



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Bir Konfeksiyon İşletmesinde “U” Tipi Üretim İçin Montaj Hat Dengeleme Çalışması ve Bir Örnek Uygulama

Yunus BOZBAHÇE*, Mahire CİHANGİROVA

Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 03.05.2017 Düzeltme Tarihi: 05.07.2017 Kabul Tarihi: 10.07.2017

Özet

Çağdaş üretim sistemlerinin temel felsefesini oluşturan yalın üretim anlayışı günümüz işletmelerin küresel rekabette geri kalmamaları için benimsemeleri gereken bir anlayış olarak karşımıza çıkmaktadır. Yalın üretim anlayışı olan “U” tipi hat dizilimi işletmelerin maliyetleri düşürebilmeleri, üretim hızlarını artırabilmeleri, daha kaliteli ve özellikle esnek bir üretim anlayışı yakalayabilmeleri için gerekli bir üretim sistemidir.

Bu çalışma kapsamında bir konfeksiyon işletmesinde kurulacak olan “U” tipi montaj hattının pozisyon ağırlık metoduyla hat dengeleme çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar mevcut üretim hattı olan “I” tipi ile kıyaslanmıştır. Dengeleme çalışmaları sonucunda hattın etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Modüler üretim, “U” tipi hat, Pozisyon ağırlığı, Hat dengeleme

Assembly Line Balancing Works for “U” Type Production Line in a Clothing Manufacturer and a Sample Application

Abstract

Lean production, which forms the fundemetal philosophy of up-to-date production systems, is seen as an understanding to be adopted so as not to fall behind today’s firms at global rivalry. The “U” shaped flow, a lean production understanding, is a necessary producing system to reduce the cost of firm, to accelarate the production, to reach high quality and especially flexible production level.

In the scope of this work, in a garment manufacturer, in which a “U” shaped flow is set, line balancing works are done by the Ranked Positional Weight Method (RPWM). As a result of balancing works, it is observed that the activity of line increased.

Keywords: Modüler production, “U” type line, Ranked positional weight method, Line balancing

1. Giriş

Sınırların zamanla yok olmaya başladığı, rekabetin ön planda olduğu global dünyada üretimde verimlilik ve süreklilik işletmeler için olmazsa olmaz bir hal almıştır. Gün geçtikçe değişen ve sürekli olarak artan tüketici talepleri üreticilerin farklı tasarımlar yaratma zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bu taleplerin karşılanma sürecinde üretimdeki tüm süreçlerin birbirleriyle uyumlu halde bir bütün olarak çalışmasını gerektirmektedir.

Geleneksel sistemlerle üretim yapan işletmelerin müşteri taleplerini beklenen seviyede karşılayamadığı oldukça net görülmektedir. İhtiyaçtan fazla işçi çalıştırılması, çalışanların yeterli verimlilikte çalışmaması ve uygun pozisyonlarda yer almıyor olması, üretim yapılan alanın verimsiz ve düzensiz kullanılması, teknolojinin ve bilimin getirdiği yeniliklerin yeterince takip edilmiyor olması; bunlarla birlikte kurumsal bir kimliğe henüz adım atılmamış olması birçok işletmenin rekabet edilebilirlik yeteneklerini zamanla yok etmektedir. Bu gibi etkenlerin sonucunda ise yükselen maliyetler, düşük kalitede üretim, yükselen stoklar, müşteri kayıpları gibi birçok olumsuz sonuç doğurmaktadır.

Çağdaş anlayışla üretim yapan işletmeler kazandıkları kurumsal kimlikle, benimsedikleri çağdaş üretim anlayışlarıyla, önem verilen teknolojik gelişmelerle; düşük maliyet, zamanında üretim, stoksuз üretim, yükselen kalite, yüksek müşteri memnuniyeti gibi pozitif değerler sayesinde geleceğe daha umutla bakabilmektedir.

Tekstil ve hazır giyim sektörünün emek yoğun bir sektör olmaları, ülke istihdamlarına büyük bir katkıda bulunabilmeleri açısından değerlendirildiğinde gelişmekte olan ve nüfus sayısı oldukça yüksek olan ülkeler için olmazsa olmaz bir sektör

konumuna gelmektedir. Ülkemizin de maliyet açısından özellikle Asya ülkeleriyle rekabet etmesi gün geçtikçe zor bir hal almaktadır. Müşterilerin ülkemize olan taleplerini artırabilmek, onların devamlılığını sağlayarak memnuniyeti üst seviyede tutabilmek için birim zamandan alınan verim yükseltilmeli, katma değeri yüksek olan ürünler üretmeli, maliyetler aşağı çekilmelidir. Bunları gerçekleştirebilmek için ise firmalar çağdaş üretim anlayışlarını benimseyerek sistemlerinin içerisine adapte etmeli ve devamlı gelişmeyi desteklemelilerdir.

Tüketicilerin yıl içerisinde beğenilerinin ve taleplerinin çok hızlı bir şekilde değişmesi firmaların bu talebe cevap verebilmek için oldukça esnek olabilmelerini gerektirmektedir. Geleneksel üretim anlayışları yüksek adetli üretim sistemlerine uygun iken çağdaş üretim sistemleri ürün çeşitliliği yüksek adetleri az olan sistemlere uygun olarak geliştirilmiştir. Bu makalede çağdaş bir üretim anlayışı olan modüler üretim kapsamında bir hazır giyim işletmesinde “U” tipi hatların dengeleme çalışması sonrasında etkinliği hakkında uygulama çalışması yapılmıştır.

1.1. Modüler Üretim Sistemi

Küresel pazarda artan rekabet işletmelerin daha kısa sürede daha kaliteli ürünler üretmesini, aynı zamanda hızla değişen tüketici taleplerine ve piyasa değişikliklerine olabildiğince çabuk cevap verebilmesini gerektirmektedir. Çağdaş üretim sistemlerinin benimsenmesini, geleneksel üretim sistemlerinin hızlı bir şekilde terkedilmesini ön gören bu yeni rekabetçi yapı işletmelerin bu sürece ayak uydurabilmeleri, karlılıkları ve pazar paylarını arttırabilmeleri için bu sistemleri işletmelerine entegre etmelerini zorunlu kılmaktadır.

Modüler kavramı bir ürünü oluşturan parçaların birbirinden bağımsız birimlerde üretilerek birleştirilmesi anlatan bir yapıdır. Modüler sistem sadece bir fabrikanın mamul üretimini anlatan bir sistem değildir. Modüler sistem mesleki eğitimde ya da bir yönetim şekli olarak benimsenebilecek önemli bir anlayış biçimi de olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir metafor olarak değerlendirildiğinde ahtapotun kollarını andıran bu sistem her birimin diğerinden bağımsız olarak çalışarak ortak bir amaç için hareket edebilmesini sağlamaktadır.

Modüler üretim sistemi Alman otomotiv üreticileri tarafından 1996-1997 yıllarında ortaya çıkarılan yeni bir üretim anlayışıdır. Modüler üretim sistemi, bir süreci bir araya getiren iş süreçlerini en küçük birimlere bölmek yerine bir grup oluşturarak onu meydana getirecek bir modülü görevlendirmek suretiyle üretim sürecini en aza indirgemeyi hedefleyen çağdaş bir üretim sistemidir. Genelde “U” hat şeklini benimseyen bu sistem demet halinde akış yerine tek parça akış sistemini benimsemiştir. Hazır giyim sanayinde bir makine bir insan prensibine karşı çıkarak makine sayısının insan sayısından fazla olduğu bir üretim şeklidir [1]. Geleneksel üretim anlayışında bir banda bulunan çalışan sayısı 70-80 civarı olabiliyorken “U” tipi hat dizaynı ile 3-5 kişi gibi daha küçük guruplarla üretim yapabilmeye olanak sağlamaktadır. Çalışanların deneyim ve yapılan iş hakkındaki bilgileri geleneksel sisteme göre, çok daha donanımlı çalışanların oluşturduğu guruplar üretimi gerçekleştirmektedir. Bu tür kalifiye elemanların yetiştirilmesi ve bir modüle monte edilmesi 6 ay gibi bir süre alabilmektedir. Önceden bir veya iki iş sürecinden sorumlu olan çalışan bu yeni sistemle artık ürünün üretimi için gerekli olan tüm iş süreçleri hakkında bilgi sahibi olmasını gerektirmektedir.

Modüler üretim sistemi, işletmelerin üretim hızını artırmak, üretim ve üretkenlik kalitesini yükseltmek, işletme maliyetlerini olabildiğince azaltmak, model çeşitliliğin yüksek olması sebebiyle esnek bir yapıya sahip olması bireye göre üretim anlayışına uygun üretim yapabilmeye olanak sağlamak gibi önemli özelliklere sahip bir üretim anlayışıdır. Ürünlerin üretiminde birbirinden bağımsız modüller sayesinde çeşitliliğin yükseltilmesine olanak sağlamakta, üretime hazırlık yani set-up sürelerini kısaltmakta, üretim maliyetleri ve süreleri daha tahmin edilebilir bir duruma gelmektedir. Bu sistemde üretimi yapılacak ürünün ister tüm süreçleri bir modülde, istenirse de doğru planlama yapılarak birleştirme işlemiyle iş süreçleri modüller arasında paylaşılarak üretim gerçekleştirilebilmektedir. En çağdaş üretim sistemi olan esnek üretim sistemlerinin temelini oluşturan modüler sistem işletmeler tarafından farkındalığı gittikçe artan, uygulanması zaman alan bir iş sürecidir [2].

1.2. “U” Tipi Üretim

Üretim sektörlerinin karmaşık birçok sorunlarından en önemlilerinden birisi hat dengeleme sorunudur. Özellikle hazır giyim sektöründe her makinenin ayrı çalışmasının olması, ürünün dikim işleminin birçok iş sürecinden oluşması, her sürecin çok kısa bir zaman alması, model çeşitliliğin çok fazla olması, modellerin moda akımlarına uyarak çok hızlı değişmesi, modellere göre iş akışlarının önemli ölçüde farklılık göstermesi hat dengeleme işlemini hayati bir öneme sahip olduğunu göstermektedir [3]. “U” tipi üretim, ürünlerin üretim süreçlerinde sahip oldukları süreler, bu iş süreçleri arasındaki öncelik sırasının ürünün en kısa sürede üretilmesini sağlamak için montaj hattı dengeleme sorunu olarak açıklanabilmektedir. Geleneksel üretim modelinde üretim hatları düz bir şekilde kurulurken Tam Zamanlı Üretim (JIT) veya Yalın Üretim Anlayışı gibi sistemleri çağdaş üretim anlayışlarını Toyota ve bazı Alman otomotiv firmalarının verimliliklerini artırmak için “U” tipi hat düzenini kurmasıyla yeni bir üretim tasarımı oluşmuştur. Çok fonksiyonlu çalışanların olması gerektiği bu sistemde modül içerisindeki tüm istasyonlardaki iş süreçleri hakkında bilgiye ve yeteneğe sahip olmalıdır [4].

“U” tipi hat yapısıyla çalışanlar arasındaki iletişim en üst seviyeye ulaşabilmektedir. Birbirleriyle etkili iletişim kuran çalışanların takım çalışmasına olan yatkınlığı artmakta ve böylece hedeflenen değerlere ulaşmada etkili olmaktadır. Uzunlamasına kurulan hatlarda hem alan kayıpları artmakta hem de operatörler arasındaki iletişim kısıtlı olmaktadır. “U” tipi üretimde yardımcı

malzemeler çalışanın kol mesafesinde olmalıdır ve değer üretmeyen çalışan hareketlerinin en aza indirilmesi için iyice analiz edilmelidir. Üretim sırasında ürünler için gerekli olan malzemelerin kutularından çıkarılmış olması gerekmektedir. Üretim hattını sekteye uğratabilecek bir formda olmamalarına dikkat edilmelidir. “U” tipi üretimde çalışanlar geleneksel tarzda üretimden farklı olarak ayakta çalışırlar. Çalışanlar için bu dönüşüm sancılı olmakla birlikte etkili bir iletişim ve kayıpların en aza indirildiği bir üretim için ayakta çalışmak gereklilik olmaktadır [5]. Bu tür hücrelerde çalışanların süreç için değer yaratmayan iş süreçlerini üretmelerini engellemek için her çalışan için standart iş kartları oluşturulmalıdır. Hangi iş sürecinin hangi çalışan tarafından yapıldığının bilinmesi kalite hatalarının kaynağının tespit edilmesinde ve sürecin analizinin yapılmasında kolaylık sağlamaktadır [1].

Makineleri birbirine yaklaştırmak, iş süreçleri arasında tek parça akışı sayesinde stoksuz üretimi sağlamak “U” tipi üretimin amaçlarındandır. Operatörler arasında ürün akışında bekleme olmadan iş süreçlerinin gerçekleşmesi Japonya’da “Tavşan Kovalama” kavramı olarak tabir edilmektedir [6]. Tavşan kovalama tekniğinin en büyük dezavantajı hat dengelemede yaşanan problemlerdir. Çalışan sayısının az olması, kalifiye eleman bulmada ve yetiştirmedeki sorunlar, ergonomik faktörler, planlamadaki zorluklar tekniğin mükemmelle ulaşmasındaki engeller olarak görülmektedir.

“U” tipi hat yapısının getirdiği ayakta çalışma, fiziksel ve zihinsel iş yükü nedeniyle çalışanın performansı etkilenmektedir. Hedefleri tutturmak için durmaksızın hareket etmek yorgunluk ve stresi beraberinde getireceği için üretimde aksaklıklara, çalışanda ise bazı ergonomik rahatsızlıklara neden olabilmektedir. Ağır iş yükü güçsüzlük ve yetersizlik oluştururken hafif iş yükü dikkat eksikliği veya bıkmaya durumlarını ortaya çıkaracağından dengeli bir iş yükü çalışanlara atanmalıdır. Çalışanlara görevleri dışında iş yüklememek, eş zamanlı hareket gerektiren iş süreçlerini gruplandırmak, işlerin getirdiği riskleri göz önüne almak, daha dikkatli olunması gereken işlere kalifiye eleman atamak gibi bu faktörler ergonomik riskleri azaltmakta önemli bir etken olmaktadır [7].

2. Uygulama

2.1. Pozisyon Ağırlık Metodu (Ranked Positional Weight Method – RPWM)

Sezgisel metotlardan birisi olan Pozisyon Ağırlık Metodu (RPW), U hüre tipi gibi montaj hattı dengeleme sorunlarında kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu metoda göre her iş sürecinin sahip olduğu pozisyon ağırlığı olmaktadır ve her iş sürecinin pozisyon ağırlığı, kendinden sonraki tüm iş süreçlerinin sürelerinin art arda toplanmasıyla bulunur [9]. Pozisyon ağırlığı metodunun adımları şu şekildedir: [8]

- Öncelik diyagramı oluşturulur.
- Her bir iş süreci için pozisyon ağırlığı değeri hesaplanır.
- İş süreçleri pozisyon ağırlıklarına göre büyükten küçüğe doğru sıraya dizilir.
- Görevler en yüksek pozisyon ağırlığına sahip değer öncelikli olmak üzere istasyonlara atanır.
- Sonraki iş süreci atandığında istasyon zamanı çevirim zamanını aşılırsa, öncelik ilişkilerini ihlal etmediği sürece bir sonraki görev atanmaya çalışılır. Atanabilecek bir görev yoksa yeni bir istasyon açılır.
- Tüm iş süreçleri istasyonlara atanıncaya kadar 4. ve 5. adımlar tekrarlanmaya devam edilir.

2.2. Uygulamanın Yapıldığı İşletmenin Tanıtılması

Yalın üretim uygulamasının yapılacağı firma Bartın organize sanayi bölgesinde bulunan fason üretim yapan bir hazır giyim üreticisidir. 30 çalışanla 1997’de üretime başlayan bu firma 210 çalışanı ile 2400 metrekare kapalı alanda üretimini gerçekleştirmektedir. Ağırlıklı olarak Avrupa pazarına ihraç ürünler üreten firma penye türü ürünler üzerine üretimini gerçekleştirmektedir. Üretilen modelin iş süreçlerine göre ortalama günde 7000 ile 10000 civarı ürün üretilmektedir. Gelecek müşteri arayan değil müşterilerin onu aradığı bir firma olmak için yola çıkan

tedarikçi; kaliteli, hızlı ve esneklik özelliklerini kazanmak için bir danışmanlık şirketinden hizmet almaktadır. Yalın üretim sistemini işletmesine entegre ederek güvenilir, saygın, şeffaf, çalışan memnuniyeti, temiz işletme, yenilikçi gibi bu değerleri işletmesine kazandırmaya devam etmektedir.

İşletmede mevcut üretim sitemi “ I ” şeklinde hat dizilimi ile yapılmaktadır. 4 adet üretim hattı bulunmaktadır ve her hatta 30-32 arasında çalışan yer almaktadır. Yalın üretim çalışmaları işletmede

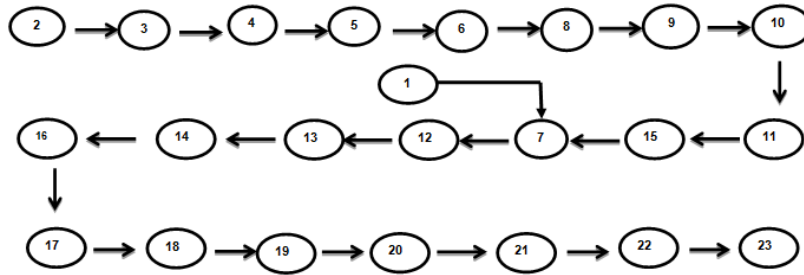
aktif bir şekilde devam etmektedir. Hatların ve çalışanların verimliliğini daha da artırmak isteyen firmada örnek bir “U” tipi hat tasarlanacaktır. Bu doğrultuda daha önce üretimi yapılmış bir ürünün üretimini tekrar gerçekleştirmek üzere hat dengeleme çalışmaları yapılacaktır. Tasarlanacak olan “U” tipi hatta 6 çalışan görevlendirilecektir. Pozisyon ağırlığı metoduna göre dengeleme hesapları yapılacaktır. Tablo 1 “I” tipi hat ve “U” tipi hat için üretim değerleri gösterilmektedir.

Tablo 1: Mevcut “ I ” tipi ve tasarlanan “U” tipi hat değerleri

İş Süreçleri	Mevcut “ I ” tipi hat verileri	“U” tipi hat değerleri “U” tipi hat verileri
Gerçekleşen Üretim	1735 adet/gün	381 adet/gün
Mevcut Durum İçin Çevirim Zamanı	477 sn	477 sn
Hat Etkinliği	%85	% 93,5
Ana İstasyon Sayısı	28	23
Hatta Çalışan Kişi Sayısı	30	6
Net Çalışma Süresi	540 dk (Günlük)	540 dk (Günlük)
Mevcut Hat İçin Beklenen Üretim	2042 adet/gün	407 adet/gün (%100 etkinlik için)

Tablo 2 : Görev tanımları ve öncelikli görevler

Görev No	Görev Süresi (Sn)	Komşu Öncül Görevler	Görev Tanımı
1	17	-	Kol ucu biye
2	17	-	Omuz
3	15	2	Tela dökme
4	20	3	Omuz reçme
5	17	4	Tutturma
6	17	5	Yaka hazırlık
7	33	6	Kol takma
8	33	5	Yaka takma
9	17	8	Ense biye
10	13	9	Ense gaze
11	14	10	Ense etiketi
12	33	7	Yan kapama
13	10	12	Yıkama talimatı
14	13	13	Etek reçme
15	18	11	Yaka çırma + çevirme
16	13	1,12	Kol reçme
17	33	16	Kalite kontrol
18	33	17	Ütü + işaret atma
19	47	18	Rivet çakma
20	17	19	Optik gözlem
21	17	20	Alarm kart
22	17	21	Katlama + pelur
23	13	22	Paketleme + sticker



Şekil 1: Öncelik diyagramı

Tablo 2’de her iş süreci için tespit edilen süreleri, görev numaraları, hangi iş sürecinin diğerinden daha önce yapılması gerektiğini belirten görevler ve bu görevlerin tanımları belirtilmiştir.

Şekil 1’ de pozisyon ağırlığı metodunun öncelikli iş süreçlerine göre işlem basamakları verilmektedir. Konfeksiyon sanayinde üretilen birçok ürünün üretim aşamalarına bakıldığında bir önceki aşamanın sonrakinin önceliği olduğu görülecektir. Sapmalar bir iş sürecinde önceden olması gereken bir parçanın o iş sürecine monte edilmesi gerektiği durumlarda oluşmaktadır. Yukarıdaki öncelik diyagramına göz atıldığında 1 nolu iş sürecinin yani kol ucu biye

parçasının önceden hazırlanması gerektiği için 7 numaralı iş sürecinin önceliği durumuna gelmektedir. Aynı durum 6 numaralı yaka hazırlık parçası için de geçerli olmakla birlikte bu parça ve 8 numaralı iş süreci aynı makinede işlem göreceği için öncelikli bir durum olması verimlilik için gereksiz bir hamle olarak görülmüştür.

Tablo 3’de iş süreçlerinin pozisyon ağırlıkları şekil 1’deki diyagrama göre hesaplanmıştır. Görev numarası 2 olan iş sürecinin en yüksek pozisyon ağırlığı değerine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 4’de ise pozisyon ağırlıkları hesaplanan görevlerin büyükten küçüğe doğru sıralama işlemi yapılmıştır.

Tablo 3. Pozisyon ağırlıklarının öncelik esasına göre hesaplanması **Tablo 4.** Pozisyon ağırlıklarının büyükten küçüğe sıralanması

Görev No	Görev Süresi (sn)	Pozisyon Ağırlığı Değeri
1	17	296
2	17	460
3	15	443
4	20	428
5	17	408
6	17	391
7	33	279
8	33	341
9	17	308
10	13	291
11	14	278
12	33	246
13	10	213
14	13	203
15	18	297
16	13	190
17	33	177
18	33	144
19	47	111
20	17	64
21	17	47
22	17	30
23	13	13

Sıra	Görev No	Görev Süresi (sn)	Pozisyon Ağırlığı
1	2	17	460
2	3	15	443
3	4	20	428
4	5	17	408
5	6	17	391
6	8	33	341
7	9	17	308
8	15	18	297
9	1	17	296
10	10	13	291
11	7	33	279
12	11	14	278
13	12	33	246
14	13	10	213
15	14	13	203
16	16	13	190
17	17	33	177
18	18	33	144
19	19	47	111
20	20	17	64
21	21	17	47
22	22	17	30
23	23	13	13

Tablo 5. İstasyonlara görevlerin atanması ve çevirim zamanları

1 nolu İstasyon	2 nolu İstasyon	3 nolu İstasyon	4 nolu İstasyon	5 nolu İstasyon	6 nolu İstasyon
1,3,4,9,16	5,10,11,13,15	7,8,14	2,16,12,23	17,18,20	19,21,22
Toplam	Toplam	Toplam	Toplam	Toplam	Toplam
Zaman:	Zaman:	Zaman:	Zaman:	Zaman:	Zaman:
82 sn	72 sn	79 sn	80 sn	83 sn	81 sn

Ürünlerin üretimi için toplam birim zaman değeri 477 saniyedir. 6 çalışan için gerekli hesaplamalar yapıldığında çalışan başı 79,5 saniye olarak hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda istasyonlara görev atamaları yapılmıştır.

Etkinlik Oranı aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$[\sum_{i=1}^N ti / (n * C)] * 100 \quad (1)$$

Önerilen yeni "U" tipi üretim hattı ile çalışma durumunda Etkinlik Oranı şöyledir:

$$[\sum_{i=1}^N ti / (n * C)] * 100 = [460 / (6 * 82)] * 100 = \%93,5 \quad (2)$$

"I" tipi üretimle günlük gerçekleşen miktar 30 çalışanla 1735 adet olarak tespit edilmiştir. Etkinlik oranı ise %85 olarak ölçülmüştür. Ürünler "U" tipi hücre üretim sistemiyle hat dengeleme çalışmaları sonucunda 6 çalışanla %93,5 etkinlik oranı ile günlük 381 adet üretilebileceği hesaplanmıştır.

3. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada daha önce bir tişört modeli üretimi sırasında "I" ve "U" tipi üretim hatları için etkinlik verileri kıyaslanmıştır. "U" tipi üretimin daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. "U" tipi üretim hat dengeleme çalışması yapılırken Helgeson Birnie tarafından geliştirilen pozisyon ağırlığı metodu kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda 30 çalışanla kurulacak 5 adet "U" tipi hat ile hattın günlük üretim adedinin 170 e kadar artırılacağı gözlemlenmiştir.

"U" tipi hattın etkinliği "Tavşan Kovalamaca" tekniğinin planlanarak etkin bir şekilde uygulanmasıyla verimliliğin artacağı gözlenecektir. "U" tipi üretim sistemi üretim sürelerinin kısaltması, maliyetlerin düşürülmesi, set-up sürelerinin kısaltması ve özellikle

üretimde esnekliği büyük oranda artırmaktadır. Çalışanların ayakta çalışmalarını sürekli eğitim olarak çok fonksiyonlu olmalarını gerektirmesi nedeniyle uygulamada zorluklar oluşturabilmektedir.

Daha önce yapılan "U" tipi hat çalışmalarına bakıldığında;

- Güner B. ve Hasgül S. 'nin "Sürdürülebilir Denge İçin Ergonomik Faktörleri İçeren U-Tipi Montaj Hattı Dengelemesi" isimli çalışmasına göre, hat dengelemede oluşan problemlerin çözümünde çalışanda oluşabilecek ergonomik problemlere göz önüne alınarak tam sayılı programlama modeli olan Urban'ın modeli kullanılmıştır. Sürdürülebilir denge için istasyon sayılarının artabileceğini önermektedir.

- Ağpak K., Gökçen H., Saray N. ve Özel S.'nin "Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel" adlı çalışmasına göre, montaj hattı dengeleme problemi için sezgisel bir metod olan COMSOAL sezgisel yöntemi ile istasyon sayısını en aza indirmeyi amaçlamıştır. Bu yöntemle iş gücü maliyetlerinde iyileştirme gözlenirken görevlerin tamamlanmasına ilişkin maliyetin sabit kaldığı tespit edilmiştir.

- Aksoy S., Yıldız M. ve Altınova S.'nin "Pozisyon Ağırlık Metodu İle Tek Model U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme" adlı çalışmasına göre, güvenlik ve emniyet ekipmanları üreten bir firmada hat dengeleme problemleri için pozisyon ağırlık metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda hattın istasyon sayısı aynı kalırken, çevirim sürelerinde iyileşme ve hat etkinliğinde artış gözlemlenmiştir.

Bu üretim anlayışı bir süreç işi olup yöneticilerin ve çalışanların sürekli eğitilmesiyle bu tür üretim anlayışına geçilmesi gerçekleştirilebilir.

Kaynaklar

1. Sarıcam .C, Konfeksiyonda Modüler Üretim Sisteminin Kurulması ve Analizi Üzerine Bir Uygulama – İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2005
2. Çoruh E., Hazır Giyim Endüstrisi İçin Üretim Sistem Yaklaşımları, Tekstil Mühendisleri Odası, Tekstil ve Mühendis Dergisi, Yıl17 Sayı:80, 2017.
3. Güngör M., Ağaç S., Resource-Constrained Mixed Model Assembly Line Balancing In An Apparel Company, Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, 24(4), 2014.
4. Ağpak K., Gökçen H., Saray N., Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel – Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 17, No 4, 115-24, 2002
5. Apilioğulları L., Yalın Dönüşüm Verimliliğinin Şifresi, Sistem Yayıncılık, 1. Baskı, İstanbul, 2010.
6. Suzaki K., The New Manufacturing Challenge (İmalatta Mükemmellik Yolu), Optimist Yayıncılık, 1. Baskı, İstanbul, 2015.
7. Güner B., Hasgül S., Sürdürülebilir Denge İçin Ergonomik Faktörleri İçeren U-Tipi Montaj Hattı Dengelemesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 27, No 2, 407-415, 2012
8. Küçükkoç İ., Montaj Hattı Tasarımı ve Analizi-6 – Balıkesir Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 2016.
9. Aksoy S., Yıldız M. S., Altınova S., Pozisyon Ağırlığı Metodu İle Tek Model U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme – AKÜ İİBF Dergisi, Cilt 16, Sayı 2, 2014.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Eğik Eğilme ile Birlikte Burulmaya Zorlanan Dikdörtgen Kesitlerin Optimum Boyutlandırılması

Mirali NURALİYEV*, Oğur İYNEN

Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 08.06.2017 Düzeltme Tarihi: 26.09.2017 Kabul Tarihi: 10.10.2017

Özet

Bu çalışmada, eğik eğilme ile birlikte burulmaya zorlanan $h/b \geq 1$ şeklindeki içi dolu dikdörtgen kesitlerin optimum boyutlarının belirlenmesi üzerine analitik incelemeler yapılmıştır. Optimizasyon kriteri olarak, minimum kesit alanı ve sınır fonksiyonları olarak da mukavemet koşulları esas alınmıştır. Mb burulma momentinin x ekseninde; y ve z eksenlerinde ise My, Mz eğilme momentlerinin etki gösterdiği kabul edilmiştir. Optimizasyon işlemleri, kesitin kritik noktaları olarak bilinen köşe noktasına (A), kısa kenarın orta noktasına (E) ve uzun kenarın orta noktasına (K) göre Euler-Lagrange Optimizasyon Metodu yardımıyla yapılmıştır. K noktasındaki gerilme durumuna göre optimum çözümün (hopt, bopt) mevcut olmadığı tespit edilirken, E noktasına göre bulunan çözümün ise kesitin diğer noktalarında mukavemet koşullarını sağlamadığı saptanmıştır. A noktasındaki gerilme durumuna göre de kesit alanını minimum yapan optimum çözümün olduğu belirlenmiş ve bu çözümün, $Mb \leq My \leq Mz$ aralığında kesitin tamamı için geçerli olduğu tespit edilmiştir. Kesit boyutlarını veren çözüm, analitik formüller şeklinde bulunmuştur. Optimizasyon yolu ile en kesit alanından elde edilen tasarrufun Mb, My ve Mz değerlerine bağlı olarak % 1.34 ile % 11 aralığında değiştiği ve en büyük tasarrufun her üç kesit tesirinin eşit olduğu durumda ortaya çıktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Optimum boyutlandırma, Dikdörtgen kesit, Eğik eğilme, Burulma, Minimum alan

Optimum Sizing of Rectangular Sections Subjected to Bending Together with Torsion

Abstract

In this study, analytical analysis was conducted to determine optimum sizes of solid rectangular section subjected to bending together with torsion. Optimization criteria was selected minimum section area and strength conditions were applied as boundary functions. Torsion moment Mb, bending moments My and Mz was subjected about x, y and z axes, respectively. Optimization processes were performed using Euler-Lagrange Optimization Method according to corner point (A), midpoint of short edge (E) and midpoint of long edge (K) known as critical points for rectangular section is $h/b \geq 1$. Optimum solution (hopt, bopt) was detected to be absent according to stress state at K. It was found that this solution did not satisfy the strength conditions according to stress state at E at other points. It was found that there is an optimal solution at A point. Also it is valid for entire of section. Analytic formulas belonging to section sizes were obtained for $Mb \leq My \leq Mz$ valid range. Savings obtained from cross-sectional area by optimization were revealed that they vary in the range of 1.34 - 11% depending Mb, My and Mz values. The biggest savings were obtained in case of $Mb = My = Mz$.

Keywords: Optimum sizing, Rectangular section, Oblique bending, Torsion, Minimum area

1. Giriş

Çoğu mühendislik uygulamalarında, içi dolu dikdörtgen kesitli çubuklar kullanılmaktadır. Söz konusu çubuklardan imal edilen konstrüksiyonların ağırlığı; I, U, Z ve kutu kesit profillerine göre daha yüksek çıkmaktadır. Dolayısıyla dolu dikdörtgen kesitli çubukların ağırlıklarının veya üretim maliyetinin en aza indirilmesi, diğer kesit profillerine göre daha güncel problemlerden sayılabilir. Yapılan araştırmalara bakıldığında, bahsedilen problem üzerine bir çok optimizasyon çalışmaları sunulmuştur. Şöyle ki bu alanda ilk çalışma 1713'te ünlü Fransız matematikçi ve mühendis Antoine Parent tarafından yapılmıştır. Yapmış olduğu çalışmada, silindirik ahşap kütükten maksimum eğilme dayanımına sahip $b \times h$ boyutlarında dikdörtgen kesitli prizmatik kirişin nasıl elde edilebileceğini araştırmıştır. Araştırma sonunda, $b \times h^2$ çarpımının dolayısıyla kesitin mukavemet direncinin en büyük değere sahip olması gerektiğini ifade etmiştir. Aynı zamanda hem grafiksel hem de analitik olarak kesit boyutlarını veren çözümler bulmuştur [1-3]. Toktosunov ve Liakhovich'in yaptıkları çalışmada, basma ve eğilmeye zorlanan dikdörtgen kütüğün en kesit boyutlarının optimum değerleri araştırılmıştır. Minimum normal gerilme, optimizasyon kriteri olarak kabul edilmiştir. Buna dayanarak kütüğün en kesit boyut formülleri belirlenmiştir [3]. Shein çalışmasında, eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli kütükleri ele almıştır. Bunun üzerine kesit alanını en aza indirecek şekilde optimizasyon incelemesi yapmıştır. Mukavemet koşulunu esas alarak Lagrange Çarpınlar Metodu (LÇM) yardımıyla optimum

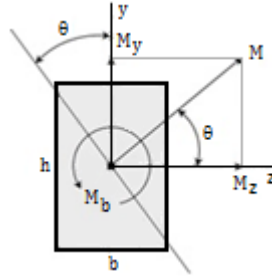
kesit boyut formülleri elde etmiştir [4]. Fraiman, eğik eğilmeye zorlanan ince cidarlı kutu kirişlerin optimum tasarımını araştırmıştır. Bu amaçla mukavemet koşullarını esas alarak kiriş kesitinin optimum boyutlarını belirlemiştir [5,6]. Moiseev ve diğerleri, iş makinelerinde kullanılan dikdörtgen kutu şekillerin yanı sıra bu şekillere ek yaparak bindirmeli ve diyaframlı kesitleri de incelemiştir. Bileşik zorlamalara maruz bu kesitlerin, ağırlığını en aza indirmek suretiyle optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Optimum kesit boyutları için mukavemet koşullarını esas alarak LÇM yardımıyla analitik formüller bulmuşlardır [7-11]. Andjelic ve diğerleri, eğilme ve burulma yüklemeleri altındaki I, Z, ve U profilli kirişlerin optimum en kesitlerini belirlemek için LÇM'den yararlanmışlardır. Minimum kesit alanını karşılayan en kesit ölçülerini elde etmişlerdir [12-17]. Al-Mosawi ve Saka çalışmalarında, genel yüklemelere zorlanan ince cidarlı profillerin tasarımı için bir algoritma sunmuşlardır. Optimum çözümün belirlenmesinde, LÇM'den faydalanmışlardır [18]. Gasic ve diğerleri, kamyon vinç boylarında kullanılan eğilme ve eksenel yüklemelere zorlanan ince cidarlı trapez kesitleri araştırmışlardır. Optimum kesit boyutlarının belirlenmesinde, mukavemet koşulları esas alınmıştır. Optimizasyon sürecinde, LÇM'yi kullanarak geometrik parametreler arasındaki ilişkileri belirlemişlerdir [19]. Gohberg'in editörlüğü ile yapılmış "Krenler" adlı kitapta, I ve kutu profil kren kirişlerinin optimizasyonu ile ilgili birçok çalışmaların sonuçları verilmiştir. Sunulan çalışmalarda, yöntem olarak LÇM ve kriter olarak da minimum kesit alanı seçilmiştir. Eksenel ve eğilme

zorlamalarında, mukavemet koşulları esas alınarak optimum kesit boyutları bulunmuştur [20,21].

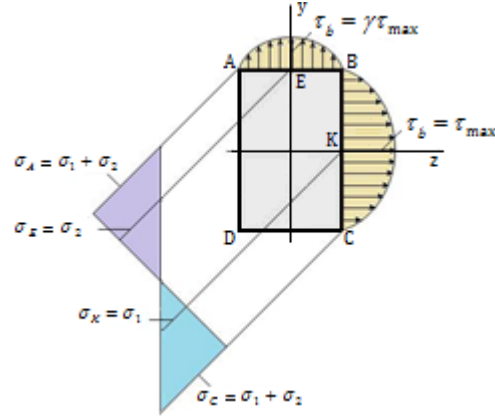
Bu kapsamda gerçekleştirilen literatür incelenmesi sonucunda, eğik eğilme ile birlikte burulmaya zorlanan içi dolu dikdörtgen kesitli çubukların optimum boyutlandırılması ile ilgili araştırma yapılmadığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı söz konusu yüklemelerde ve elemanlarda, minimum ağırlık veya kesit alanını karşılayan optimum en kesit boyutlarının belirlenmesi üzerine incelemeler yapılmıştır.

2. Optimizasyon Probleminin Matematiksel Formülasyonu

Eğik eğilme ile birlikte burulmaya zorlanan prizmatik çubuğun, $h/b \geq 1$ şeklindeki en kesiti Şekil 1a' da gösterildiği gibi ele alınmıştır. Burulma momenti (M_b) x ekseninde; y ve z eksenlerinde ise M_y , M_z eğilme momentlerinin etki ettiği kabul edilmiştir. Bileşik zorlanma sonucu ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilmenin, emniyet gerilme sınırını aşmamak şartıyla optimum kesit boyutlarının bulunması istenmektedir. Çubuk kütlelerini ve dolayısıyla üretim maliyetini en aza düşürecek minimum çubuk hacmi veya minimum çubuk en kesit alanı "Optimizasyon Kriteri" (1) kabul edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1. Bileşik zorlanmalar altındaki çubuğun kesiti; a. yüklenme hali, b. gerilme hali

Tablo 1. α ve γ nümerik katsayılarının h/b oranına bağlı değerleri

h/b	1.00	1.25	1.40	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	6.00	8.00	10.00	>10
α	0.208	0.221	0.228	0.231	0.246	0.258	0.267	0.282	0.299	0.307	0.313	0.333
γ	1.000	0.910	0.865	0.859	0.795	0.766	0.753	0.745	0.743	0.742	0.742	0.742
γ/α	4.808	4.118	3.794	3.719	3.232	2.969	2.820	2.642	2.485	2.417	2.371	2.228

Şekil 1b'den görüldüğü gibi normal ve kayma gerilmelerinin maksimum değerleri, kesitin farklı noktalarında ortaya çıkmaktadır. O halde kesit üzerinde hangi noktanın daha fazla zorlandığı ve hangi noktaya göre mukavemet hesabının yapılacağını, önceden söylemek mümkün değildir. Buna göre incelenen kesitin optimum boyutları bu kesitin en tehlikeli noktası olabilecek köşe noktasında (A veya C), kısa kenarın orta noktasında (E) ve uzun kenarın orta noktasında (K) oluşan eşdeğer gerilmeler için $\sigma_{eş} \leq \sigma_{em}$ emniyet koşulu kontrol edilmekle belirlenmelidir. A noktası için gerilme bileşenleri $\sigma_1 = M_y/W_y$, $\sigma_2 = M_z/W_z$ ve $\tau_b = 0$ ile (2) genel mukavemet koşulu, aşağıdaki şekli alır.

$$\varphi(\sigma_1, \sigma_2) = M_y/W_y + M_z/W_z - \sigma_{em} \leq 0 \quad (3)$$

E noktası için gerilme bileşenleri $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = M_z/W_z$ ve $\tau_b = \gamma\tau_{max}$ ile (2) genel mukavemet koşulu, aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\varphi(\sigma_2, \tau_b) = (M_z/W_z)^2 + 4(\gamma M_b/W_b)^2 - \sigma_{em}^2 \leq 0 \quad (4)$$

K noktası için gerilme bileşenleri $\sigma_1 = M_y/W_y$, $\sigma_2 = 0$ ve $\tau_b = \tau_{max}$ ile (2) genel mukavemet koşulu, aşağıdaki şekli alır.

$$V = V_{min} \text{ veya } A = A_{min} \quad (1)$$

Genel olarak boyutlandırma ile ilgili optimizasyon çalışmalarında, bağıntı denklemlerini ve kısıtlama fonksiyonlarını oluşturmak için mukavemet koşullarından faydalanılmaktadır [3-21]. Bundan dolayı bu çalışmada söz konusu kesitin, optimum boyutlandırılması için maksimum kayma gerilmesi hipotezine göre mukavemet koşulu, sınır fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$\varphi(\sigma, \tau) = \sigma_e^2 + 4\tau_b^2 - \sigma_{em}^2 \leq 0 \quad (2)$$

Burada $\sigma_e = \sigma_1 + \sigma_2$, toplam maksimum eğilme gerilmesidir. σ_1 , M_y 'den doğan; σ_2 , M_z 'den doğan maksimum normal gerilmelerdir. τ_b , M_b burulma momentinden doğan kayma gerilmesidir. Kesitin uzun kenarının ortasında $\tau_b = \tau_{max} = M_b/W_b$ ve kesitin kısa kenarının ortasında ise $\tau_b = \gamma\tau_{max}$ şeklinde belirlenmektedir [21-34]. Burulma mukavemet momenti $W_b = \alpha hb^2$ formülü ile hesaplanmaktadır. α ve γ , h/b oranına bağlı nümerik katsayılarıdır. Bu katsayıların değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

$$\varphi(\sigma_1, \tau_b) = (M_y/W_y)^2 + 4(M_b/W_b)^2 - \sigma_{em}^2 \leq 0 \quad (5)$$

Yukarıdaki bilgiler dikkate alınarak optimizasyon işlemleri; (1) amaç fonksiyonu ile birlikte A'da (3), E'de (4) ve K'da (5) mukavemet koşullarının sağlanmasıyla yapılmalıdır.

3. Euler-Lagrange Optimizasyon Metodunun Uygulanması

Dikdörtgen kesitli prizmatik bir çubuk parçasının hacmini ifade eden aşağıdaki

$$V = \int_{x_1}^{x_2} A(x, y_i(x), \dot{y}_i(x)) dx \quad (6)$$

fonksiyonelinin ekstremum değerlerini sağlayan $y_i(x)$ fonksiyonu, değişkenler arasında

$$\varphi_k(x, y_i(x), \dot{y}_i(x)) = 0 \quad (7)$$

şeklinde bağıntı varsa Lagrange belirsiz çarpanları kullanılarak belirlenebilir. $A(x, y_i, \dot{y}_i)$ ve $\varphi_k(x, y_i, \dot{y}_i)$ bağıntıları yardımıyla $F = A + \sum_{k=1}^m (\lambda_k \varphi_k)$ Lagrange fonksiyonu kurulur. Burada x_1 ve x_2 çubuk eksenli boyunca x koordinatında integral sınırlarıdır. A çubuk kesit alanıdır. $y_i(x)$ çubuk kesitinin i boyutunun x

koordinatına bağlı verilen bir fonksiyondur. $i = 1, 2, 3 \dots n$; n çubuk en kesit boyut sayısıdır. $k = 1, 2, 3 \dots m$; m bağıntı denklem (ek şart) sayısıdır. λ_k sabiti, Lagrange belirsiz çarpanıdır. Lagrange belirsiz çarpanları λ_k ve y_i değişkenleri, aşağıda verilen (8) Euler denklemleri çözülerek bulunabilir [35-42].

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y_i'} \right) - \frac{\partial F}{\partial y_i} = 0 \quad (8)$$

Euler denklemi (8)'de F Lagrange fonksiyonu yerine yazılıp, y_i değişkenlerine göre diferansiyellendikten sonra, $m = 1$ ve $n = 2$ için

$$\frac{\partial \varphi_1 / \partial y_1}{\partial A / \partial y_1} = \frac{\partial \varphi_1 / \partial y_2}{\partial A / \partial y_2} = \frac{1}{\lambda_1} \quad (9)$$

eşitliği elde edilir. y_1 ve y_2 kesit boyutlarının optimum değerleri (7) ve (9) denklemlerinin birlikte çözülmesi ile bulunur.

4. Optimizasyon İşlemleri

4.1. Kesitin Köşe Noktalarındaki Gerilme Durumuna Göre

Kesitin A (veya C) köşe noktasında oluşan gerilme durumuna göre, φ kısıtlama fonksiyonu için yazılan (3) ifadesini (9) eşitliğinde yerine yazıp, gereken matematiksel işlemler yapıldıktan sonra

$$\frac{M_y}{W_y^2} \left(\frac{\partial W_y / \partial y_1}{\partial A / \partial y_1} - \frac{\partial W_y / \partial y_2}{\partial A / \partial y_2} \right) + \frac{M_z}{W_z^2} \left(\frac{\partial W_z / \partial y_1}{\partial A / \partial y_1} - \frac{\partial W_z / \partial y_2}{\partial A / \partial y_2} \right) = 0 \quad (10)$$

denklemleri elde edilmiştir. Burada $y_1 = b_1$ ve $y_2 = h_1$ çubuk en kesit boyutlarıdır. $\partial W_y / \partial b_1 = b_1 h_1 / 3$, $\partial W_y / \partial h_1 = b_1^2 / 6$, $\partial W_z / \partial b_1 = h_1^2 / 6$, $\partial W_z / \partial h_1 = b_1 h_1 / 3$, $\partial A / \partial b_1 = h_1$ ve $\partial A / \partial h_1 = b_1$ kısmi türevleri (10) denkleminde yerine konulup çözüldükten sonra çubuk kesit yüksekliğinin genişliğine optimum oranı

$$(h/b)_{opt1} = M_z / M_y = M \cos \theta / (M \sin \theta) = 1 / \tan \theta \quad (11)$$

şeklinde bulunmuştur. (3) ve (11) denklemleri birlikte çözülerek optimum kesit boyutlarını belirlemek için aşağıdaki analitik formüller elde edilmiştir.

$$h_{opt1} = \sqrt[3]{12M_z^2 / (M_y \sigma_{em})} = \sqrt[3]{12M_z / (\sigma_{em} \tan \theta)} \quad (12a)$$

$$b_{opt1} = \sqrt[3]{12M_y^2 / (M_z \sigma_{em})} = \sqrt[3]{12M_y / (\sigma_{em} \cot \theta)} \quad (12b)$$

Burada θ , M bileşke eğilme momentinin konumunu belirleyen açıdır.

4.2. Kesitin Kısa Kenarının Ortasındaki Gerilme Durumuna Göre

Mukavemet momentleri kesit alanı cinsinden yazılarak kesitin E noktasında oluşan gerilme durumuna göre (4) mukavemet koşulu yeniden düzenlenirse;

$$\varphi(b_2, h_2) = 36M_z^2 / h_2^2 + 4(\gamma/\alpha)^2 M_b^2 / b_2^2 - A^2 \sigma_{em}^2 \leq 0 \quad (13)$$

kısıtlama fonksiyonu elde edilir. Tablo 1'de verilen değerlere göre γ/α oranı ile h/b arasında bulunan bağıntı, aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\gamma/\alpha = 2 + 2.7 / (h_2 / b_2) \quad (14)$$

Denklem (14) dikkate alınarak (13) kısıtlama fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılır.

$$\varphi(b_2, h_2) = 36M_z^2 / h_2^2 + 4M_b^2 (2 + 2.7b_2/h_2)^2 / b_2^2 - A^2 \sigma_{em}^2 \leq 0 \quad (15)$$

Son ifadenin b_2 ve h_2 değişkenlerine göre alınan aşağıdaki kısmi türevleri

$$\partial \varphi / \partial b_2 = -16(M_b^2 / b_2^2) (2/b_2 + 2.7/h_2) \quad (16)$$

$$\partial \varphi / \partial h_2 = -72M_z^2 / h_2^3 - 21.6(M_b^2 / h_2^2) (2/b_2 + 2.7/h_2) \quad (17)$$

denklem (9)'da yerine konularak gerekli matematiksel işlemler sonucu kesit yüksekliğinin genişliğine optimum oranı aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$k = (h/b)_{opt2} = \sqrt{1.82 + 2.25(M_z/M_b)^2} \quad (18)$$

(15) ile (18) bağıntıları birlikte çözülerek optimum kesit boyutları için aşağıdaki analitik formüller elde edilmiştir.

$$h_{opt2} = \sqrt[6]{4k^2 [9M_z^2 + (2k + 2.7)^2 M_b^2] / \sigma_{em}^2} \quad (19)$$

$$(b_{opt2} = \sqrt[6]{4[9M_z^2 + (2k + 2.7)^2 M_b^2] / (k^4 \sigma_{em}^2)}) \quad (20)$$

4.3. Kesitin Uzun Kenarının Ortasındaki Gerilme Durumuna Göre

K noktasındaki gerilme durumuna göre amaç fonksiyonunun ekstremum değerlerini belirlemek için gerekli koşul,

$$\frac{M_y}{W_y^3} \left(\frac{\partial W_y / \partial y_1}{\partial A / \partial y_1} - \frac{\partial W_y / \partial y_2}{\partial A / \partial y_2} \right) + 4 \frac{M_b}{W_b^3} \left(\frac{\partial W_b / \partial y_1}{\partial A / \partial y_1} - \frac{\partial W_b / \partial y_2}{\partial A / \partial y_2} \right) = 0 \quad (21)$$

şeklinde elde edilmiştir. Dikdörtgen kesitin burulmada mukavemet momenti W_b 'nin ifadesinde yer alan α katsayısı için S.Timoşenko [22] tarafından sunulan

$$\alpha = 1 / [3 + 1.8 / (h/b)] \quad (22)$$

formülü dikkate alınmakla $y_1 = b_3$ ve $y_2 = h_3$ değişkenlerine göre kısmi türevleri alınıp (21) denkleminde yerine yazıldıktan ve yapılan sadeleştirmelerden sonra,

$$9M_y^2 (h_3/b_3 + 0.9) + M_b^2 (h_3/b_3 - 0.9) = 0 \quad (23)$$

eşitliği bulunmuştur. Burada $h_3/b_3 - 0.9 > 0$ olduğu için (23) ve aynı zamanda (21) şartının sağlanmadığı ve K noktasına göre optimum çözümün olmadığı belirlenmiştir.

4.4. Son Çözümün Belirlenmesi

Optimizasyon işlemlerinin sonucunda iki ($h_{opt.}$, $b_{opt.}$) çift çözümü elde edilmiştir. Kesit alanını minimum yapan bu çözümlerden hangisinin son olarak kabul edilmesinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ($h_{opt.1}$, $b_{opt.1}$) için E ve K noktalarında, ($h_{opt.2}$, $b_{opt.2}$) için de A ve K noktalarında mukavemet kontrolleri yapılmalıdır. Sonuç olarak mukavemet koşullarını sağlayan ($h_{opt.}$, $b_{opt.}$) çifti optimum kesit boyutları olarak kabul edilmelidir.

4.4.1. ($h_{opt.1}$, $b_{opt.1}$) Çifti ile E ve K Noktalarında Mukavemet Kontrolü

a) E noktasında mukavemet kontrolü: ($h_{opt.1}$, $b_{opt.1}$) için (12a,b) ifadeleri E noktasındaki gerilme durumuna göre (4) koşulunda yerine yazılıp gereken matematiksel işlemler yapıldıktan sonra $M_b/M_y \leq 3\sqrt{3} / (\gamma/\alpha)$ bulunmuştur. γ/α oranının en büyük değeri $\gamma/\alpha = 4.808$ ile $M_b/M_y \leq 1$ olur ve bu şartlarda (4) koşulunun daima sağlandığı görülmektedir.

b) K noktasında mukavemet kontrolü: (12a,b) ifadeleri K noktasına göre (5) koşulunda yerine yazılıp gereken işlemler yapıldıktan sonra $\alpha \geq 1/(3\sqrt{3})$ veya $\alpha \geq 0.192$ bulunmuştur. α 'nın bütün değerleri bu aralığa girdiği için (5) koşulu her zaman sağlanmaktadır. Böylece ($h_{opt.1}$, $b_{opt.1}$) çözümünün kesitin tamamı için geçerli olduğu görülmektedir.

4.4.2. ($h_{opt.2}$, $b_{opt.2}$) Çifti ile A ve K Noktalarında Mukavemet Kontrolü

K noktasında mukavemet kontrolü: (19) ve (20) bağıntıları, (5) koşulunda yerine konularak yapılan sadeleşmeler sonucu aşağıdaki yeni şeklini almıştır.

$$1.82 \left[1 + \frac{1-\gamma^2}{9\alpha^2} (M_b/M_y)^2 \right] + 2.25(M_z/M_b)^2 + \left(\frac{1-\gamma^2}{4\alpha^2} - 1 \right) (M_z/M_y)^2 \leq 0 \quad (24)$$

(24) şartının sağlanması için en azından $(1 - \gamma^2)/\alpha^2 < 4$ olması gerekmektedir. Bu eşitsizlik ise $1 \leq h/b < 1.4$ aralığı için α ve γ değerlerinde doğrudur. Diğer taraftan (18)'e göre daima $(h/b)_{opt} \geq 1.35$ olmaktadır. Bu eşitsizliklerin ortak çözümü olan $1.35 \leq (h/b)_{opt} < 1.40$ aralığının sınır değerlerine göre (24) koşulu kontrol edilmiştir. $h/b = 1.4$ için α ve γ katsayılarıyla (24)'ün sağlanmadığı aşikardır. $(h/b)_{opt} = 1.35$ oranını veren $M_z = 0$ değerinde de (24)'ün doğrulanmadığı görülmektedir. O halde (24) koşulunun hiç bir şekilde sağlanmayacağı sonucuna varılmıştır.

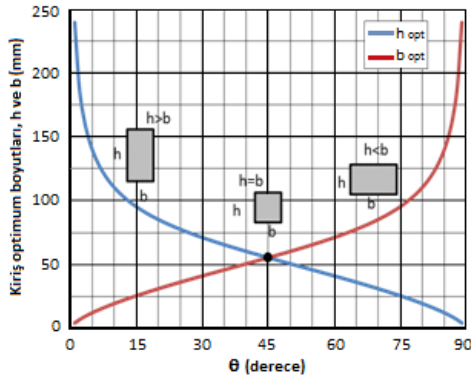
A noktasında mukavemet kontrolü: $(h_{opt,2}, b_{opt,2})$ çözümünü K noktasında (5) mukavemet koşulunu sağlamadığı için A'da mukavemet kontrolünün yapılmasına gerek kalmamaktadır. Böylece $(h_{opt,2}, b_{opt,2})$ çözümünün kesitin tamamı için geçerli olmadığı görülmektedir.

4.4.3. Farklı Yükleme Durumları ve Çözüm

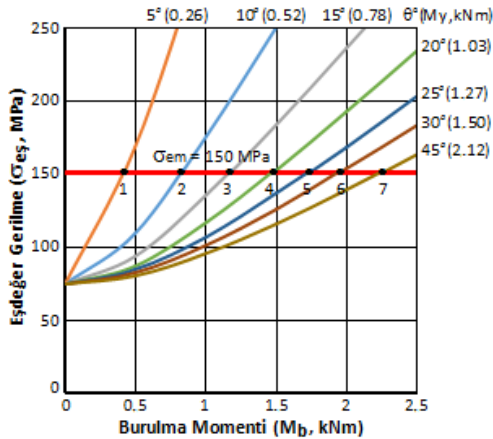
Optimum en kesit boyutlarının belirlenmesi için elde edilen (12a,b) analitik formülleri ve (5) mukavemet koşulu kullanılarak, $M = 3 \text{ kNm}$ ve $\sigma_{em} = 150 \text{ MPa}$ alınarak $h^{opt} = f(\theta)$, $b^{opt} = f(\theta)$, ve $\sigma_{es} = f(M_b)$ bağıntılarının incelenmesi üzerine yapılan hesaplamaların neticeleri Tablo 2' de ve grafiksel olarak Şekil 2 ve 3' de verilmiştir. Bilindiği gibi θ açısı 0° ($M_y = 0$) veya 90° ($M_z = 0$) olursa, kesit yatay veya dikey düzlemde düz eğilmeye maruz kalır. Bu zorlanmalarda ise minimum kesit alanının kriter olması suretiyle optimizasyon meselesi söz konusu olamaz ve kesit boyutları genel mukavemet koşulları ile belirlenir. Tablo 2' den ve

Tablo 2. Optimum en kesit boyutlarının θ açısına bağlı değerleri

θ	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
$h_{opt}, \text{ mm}$	$\rightarrow \infty$	110	85	71	60	55	50	41	31	19	$\rightarrow 0$
$b_{opt}, \text{ mm}$	$\rightarrow 0$	19	31	41	50	55	60	71	85	110	$\rightarrow \infty$
$A_{min}, \text{ mm}^2$	$\rightarrow 0$	2090	2635	2911	3000	3025	3000	2911	2635	2090	$\rightarrow 0$



Şekil 2. Optimum en kesit boyutlarının θ' ya bağlı değişimi



Şekil 3. Eşdeğer gerilmenin M_b 'ye bağlı değişimi

Şekil 2 'deki diyagramlardan görüldüğü gibi θ açısı 45° ise yani $M_y = M_z$ olursa çubuğun optimum en kesiti kare şeklinde ve alanı, minimum en kesit alanlarının en büyüğü olur. θ açısı 0° ile 45° arasında değişirse yani $M_y < M_z$ ise çubuğun optimum kesiti $(h/b)_{opt} > 1$ şeklindedir. θ açısı 45° ile 90° arasında değişirse yani $M_y > M_z$ ise optimum kesit $(h/b)_{opt} < 1$ şeklinde olmaktadır. Bu ise dikdörtgen kesitin burulmasında ele alınan $h/b \geq 1$ şartına zıt olduğu için (12a,b) formüllerinin yalnız $0^\circ-45^\circ$ ($M_y < M_z$) aralığında geçerli olduğunu gösterir. Dikdörtgen kesite uygulanabilecek burulma momentinin en büyük sınır değeri M_{bmax} , maksimum kayma gerilmesinin olduğu kesitin K noktasındaki gerilme durumuna göre $\sigma_{es} = f(M_b)$ bağıntıları incelenerek belirlenmiştir. M_{bmax} değerleri Şekil 3'te emniyet doğrusu ile eşdeğer gerilme eğrilerinin 1-7 kesişme noktaları olarak görülmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi M bileşke eğilme momentinin her bir konumundaki M_y bileşeni M_{bmax} ' tan küçüktür.

Bununla birlikte $M_b \leq M_y$ eşitliğini sağlayan her bir burulma momenti için de $\sigma_{es} < \sigma_{em}$ koşulu doğru olmaktadır. Elde edilen sonuçlar birleştirildiğinde eğik eğilme ile birlikte burulmaya zorlanan dikdörtgen kesitlerin optimum boyutlandırılması için bulunan (12a,b) analitik formüllerinin kesit tesirlerinin $M_b \leq M_y \leq M_z$ aralığında daima doğru olduğu görülmektedir. Özetlersek kesit tesirleri $M_b \leq M_y \leq M_z$ aralığında ise boyutlandırma işlemleri (12a,b) formülleri üzerinden, diğer yüklemelerde ise mevcut mukavemet hesabı ile yapılmalıdır.

5. Sayısal Örnekler

Emniyet gerilmesi $\sigma_{em} = 80 \text{ N/mm}^2$ alınarak optimizasyon yöntemi ile yapılan hesaplama sonuçları Tablo 3' de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi $M_b \leq M_y \leq M_z$ aralığındaki tüm mümkün 1-4 yükleme durumlarında A noktasına göre belirlenen (h_{opt1}, b_{opt1}) çözümleri E ve K noktalarında mukavemet koşullarını sağladığından kesitin tamamı için geçerlidir. E noktasına göre bulunan (h_{opt2}, b_{opt2}) çözümleri ise A ve K noktalarında mukavemet koşullarını sağlamamaktadır. Bununla birlikte $M_b \leq M_y \leq M_z$ ' den farklı mümkün 5-10 yükleme durumlarında da kesitin tamamı için geçerli optimum çözümün olmadığı görülmektedir.

Örneğin 2 nolu yükleme durumu ve $h/b = 2$ için kesitin boyutlandırılmasını mevcut mukavemet hesabı ile yapalım: A noktası için (3) mukavemet koşulundan

$$b = \sqrt[3]{(6M_y + 3M_z)/(2\sigma_{em})} = \sqrt[3]{(6 \cdot 2 \cdot 10^4 + 3 \cdot 8 \cdot 10^4)/(2 \cdot 80)} = 13.10 \text{ mm}$$

E noktası için (4) mukavemet koşulundan

$$b = \sqrt[6]{(9M_z^2 + 4(\gamma/\alpha)^2 M_b^2)/4\sigma_{em}^2} = \sqrt[6]{(9 \cdot 64 \cdot 10^8 + 4 \cdot 3.232^2 \cdot 4 \cdot 10^8)/(4 \cdot 6400)} = 11.94 \text{ mm}$$

ve K noktası için (5) mukavemet koşulundan

$$b = \sqrt[6]{(9\alpha^2 M_y^2 + M_b^2)/(\alpha^2 \sigma_{em}^2)} = \sqrt[6]{(9 \cdot 0.246^2 \cdot 4 \cdot 10^8 + 4 \cdot 10^8)/(0.246^2 \cdot 6400)} = 10.8 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Bulunan kesit genişliklerinden değeri en büyük olan $b=13.10 \text{ mm}$ sonuç olarak seçilir ve kesit yüksekliği $h=2 \cdot b=26.20 \text{ mm}$, kesit alanı ise $A=b \cdot h=343.22 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanır. 2 nolu

yüklem durumu için optimizasyon yöntemiyle $h_{opt.} = 36.34$ mm ve $b_{opt.} = 9.10$ mm olarak bulunmuştur. Bu değerler ile minimum kesit alanı $A_{min} = 330.69$ mm²'dir. Bulunan kesit boyutları karşılaştırıldığında çubuk kesit alanında

$$(A - A_{min})/A = (343.22 - 330.69)/343.22 = 0.0365$$

azalma olduğu görülmektedir. Dolayısıyla çubuk kütleinde %3.65 tasarrufun elde edileceği söylenebilir. Diğer yüklem durumları için benzer şekilde yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi optimizasyon sonucu kesit alanında elde edilen tasarruf, M_b , M_y ve M_z kesit tesirlerine bağlı olarak büyük bir aralıkta (%1.34 - %11) değişmektedir. En büyük tasarrufun ise her üç kesit tesirlerinin eşit olduğu durumda ortaya çıktığı görülmüştür.

Tablo 3. (12a,b), (19) ve (20) formülleri ile belirlenen optimum kesit boyutları

Yüklem Durumu	Kesit tesirleri, Nmm	Boyutlandırma, mm				Mukavemet kontrolü, MPa				
		A' ya göre		E' ye göre		A' da	E' de	K' da		
		h_{opt1}	b_{opt1}	h_{opt2}	b_{opt2}	h_{opt2}, b_{opt2} ile	h_{opt1}, b_{opt1} ile	h_{opt1}, b_{opt1} ile	h_{opt2}, b_{opt2} ile	
$M_b \leq M_y \leq M_z$ aralığına dahil tüm mümkün kombinasyonlar										
1	$M_b < M_y < M_z$	$M_z = 78.10^4$ $M_y = 26.10^4$ $M_b = 11.10^4$	70.54	23.51	-	-	-	41.93	45.24	-
2	$M_b = M_y < M_z$	$M_z = 80.10^3$ $M_y = 20.10^3$ $M_b = 20.10^3$	36.34	9.09	-	-	-	53.30	61.93	-
3	$M_b < M_y = M_z$	$M_z = 24.10^4$ $M_y = 24.10^4$ $M_b = 13.10^4$	33.02	33.02	-	-	-	44.89	52.97	-
4	$M_b = M_y = M_z$	$M_z = 16.10^4$ $M_y = 16.10^4$ $M_b = 16.10^4$	28.84	28.84	-	-	-	58.80	75.56	-
$M_b \leq M_y \leq M_z$ aralığı dışındaki tüm mümkün kombinasyonlar										
5	$M_z > M_b > M_y$	$M_z = 90.10^3$ $M_y = 30.10^3$ $M_b = 85.10^3$	34.34	11.45	-	-	-	128.48	147.04	-
6	$M_z < M_y < M_b$	$M_z = 20.10^4$ $M_y = 60.10^4$ $M_b = 75.10^4$	21.54	64.63	h/b ≥ 1 şartı sağlanmadığı için kontrol yapılamaz					
7	$M_z = M_y < M_b$	$M_z = 50.10^4$ $M_y = 50.10^4$ $M_b = 80.10^4$	31.07	31.07	-	-	-	118.52	149.67	-
8	$M_z < M_y = M_b$	$M_z = 31.10^4$ $M_y = 70.10^4$ $M_b = 70.10^4$	27.41	61.89	h/b ≥ 1 şartı sağlanmadığı için kontrol yapılamaz					
9	$M_y > M_z > M_b$	$M_z = 30.10^4$ $M_y = 47.10^4$ $M_b = 12.10^4$	30.63	47.98	h/b ≥ 1 şartı sağlanmadığı için kontrol yapılamaz					
10	$M_y < M_z < M_b$	$M_z = 50.10^4$ $M_y = 25.10^4$ $M_b = 51.10^4$	53.13	26.57	-	-	-	96.58	117.58	-

Tablo 4. Elde edilen kazanç değerleri

Yüklem Durumu	Kesit tesirleri, Nmm	Mevcut kesit boyutları			Optimum kesit boyutları			Tasarruf, % $\frac{A - A_{min}}{A}$
		h, mm	b, mm	A, mm ²	$h_{opt.}$, mm	$b_{opt.}$, mm	A_{min} , mm ²	
1	$M_z = 78.10^4$ $M_y = 26.10^4$ $M_b = 11.10^4$	57.980	28.990	1680.840	70.540	23.510	1658.400	1.340
2	$M_z = 80.10^3$ $M_y = 20.10^3$ $M_b = 20.10^3$	26.200	13.100	343.220	36.340	9.090	330.690	3.650
3	$M_z = 24.10^4$ $M_y = 24.10^4$ $M_b = 13.10^4$	47.620	23.810	1133.830	33.020	33.020	1090.320	3.840
4	$M_z = 16.10^4$ $M_y = 16.10^4$ $M_b = 16.10^4$	43.240	21.620	934.850	28.840	28.840	831.750	11.030

6. Sonuçlar

a) Eğik eğilme ile birlikte burulmaya zorlanan dolu dikdörtgen kesitin optimum boyutlandırması, minimum kesit alanına ve kesitin üç kritik noktasında (köşe, kısa kenarın ortası ve uzun kenarın ortası) oluşan gerilme durumlarına göre mukavemet koşulları esas

alınarak yapılmıştır. Yapılan optimizasyon işlemleri sonucunda kesit boyutlarını belirlemek için analitik formüller elde edilmiştir.

b) Kesitin uzun kenarının orta noktasındaki gerilme durumuna göre optimum çözümün ($h_{opt.}$, $b_{opt.}$) mevcut olmadığı görülmüştür. Kısa kenarın orta noktasındaki gerilme durumuna göre ise optimum

çözümün var olmasına rağmen bu çözümün kesitin tamamı için geçerli olmadığı belirlenmiştir.

c) İncelenen kesitin köşe noktasındaki gerilme durumuna göre optimum çözümün var olduğu ve bu çözümün kesitin diğer noktaları için de geçerli olduğu belirlenmiştir.

d) Ele alınan dikdörtgen kesitin optimum boyutları kesit tesirlerinin $M_b \leq M_y \leq M_z$ aralığındaki yüklenme durumları için denklem (12a,b) analitik formülleriyle tayin edilmiştir. $M_b \leq M_y \leq M_z$ 'den farklı yüklemelerde ise kesit boyutlandırma işlemleri mevcut mukavemet hesabı ile yapılmalıdır.

e) Yapılan optimizasyon işlemleri sonucu, M_b , M_y ve M_z kesit tesirlerine bağlı olarak kesit alanında % 1.34 ile % 11 arasında bir tasarrufun olduğu ve en büyük tasarruf ise her üç kesit tesirinin eşit olduğu durumda ortaya çıktığı görülmüştür.

Kaynaklar

1. Timoshenko, S.P., History of Strength of Materials, New York, USA, McGraw-Hill, 1953.
2. Tardini, C., Toward Structural Mechanics Through Wooden Bridges in France (1716-1841), London, UK, Springer, 2014.
3. Toktosunov, E.A., Liakhovich, L.S., Silindirik Ahşap Kütükten Üretilen ve Basma-Eğilmeye Zorlanan Kirişin Dikdörtgen En Kesitinin Optimizasyonu, Genç Akademisyenlerin ve Öğrencilerin 59. Bilim-Teknik Konferans Materyalleri, Tomsk, Rusya, 11-13 Mart 2013.
4. Shein, A.I., Closed Solution of The Problem of Finding The Optimal Size of a Rectangular Section Beams in Tension-Compression Bending in Two Planes, Scientific & Practical Journal «Modern Scientific Researches and Innovations», No 11, 2014.
5. Fraiman, F.I., Optimum Design of A Thin-Webbed Channel Beam under Pure Oblique Bending, Soviet Applied Mechanics, 7 (11), 1256-1262, 1971.
6. Fraiman, F.I., Particular Case of Optimal Design of Thin-Walled Shell Beam with Unisymmetrical Bending, Soviet Applied Mechanics, 8 (2), 224-227, 1972.
7. Moiseev, G.D., Savelyev, A.G., Yol İnşaat Makinalarının Çubuk Sistemlerinin Kalite Analizi, Kalite Yönetim Metodları, No 11, 40-42, 2002.
8. Moiseev, G.D., Savelyev A.G., Kutu Kesitli Çubukların Ağırlıklarının Minimize Edilmesi, Uluslararası İnşaat ve Yol Komplekslerinde Yeni Malzeme ve Teknolojiler Konferansı, Bryansk, Rusya, 19-21 Kasım 2008.
9. Moiseev, G.D., Bindirmeli Kutu Şekilli Çubukların Ağırlığının Minimize Edilmesi, Onuncu Uluslararası Makine Yapımında Yeni Malzeme ve Teknolojiler Konferansı, Bryansk, Rusya, 8-9 Ekim 2009.
10. Moiseev, G.D., Rudnicki, V.N., Dikey Diyaframlı Kutu Şekilli Çubukların Ağırlığının Minimize Edilmesi, On yedinci Uluslararası Makine Yapımında Yeni Malzeme ve Teknolojiler Konferansı, Bryansk, Rusya, 9-10 Nisan 2013.
11. Moiseev, G.D., Prus, B.N., Kolesnikov, P.G., İki Dikey Diyaframlı Kutu Şekilli Çubukların Ağırlığının Minimize Edilmesi, On sekizinci Uluslararası Makine Yapımında Yeni Malzeme ve Teknolojiler Konferansı, Bryansk, Rusya, 29-31 Mayıs 2014.
12. Andjelic, N., Thin Walled I-Beam under Complex Loads - Optimization according to Stress Constraint, FME Transactions, 31 (2), 55-60, 2003.
13. Andjelic, N., One View to The Optimization of ThinWalled Open Sections Subjected to Constrained Torsion, FME Transactions, 35 (1), 23-28, 2007.
14. Andjelic, N., Milosevic-Mitic, V., An Approach to the Optimization of Thin-Walled Cantilever Open Section Beams, Theoretical and Applied Mechanics, 34 (4), 323-340, 2007.
15. Andjelic, N., Milosevic-Mitic, V., Maneski, T., An Approach to The Optimization of a Thin-Walled Z-Beam, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 55 (12), 742-748, 2009.
16. Andjelic, N., Milosevic-Mitic, V., Optimum Design of Thin-Walled I Beam Subjected to Stress Constraint, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 50 (4), 987-999, 2012.
17. Andjelic, N.M., Milosevic-Mitic, V.O., Petrovic, A.S., Stress Constraints Applied to the Optimization of a Thin-Walled Z-Beam, FME Transactions, 42 (3), 237-242, 2014.
18. Al-Mosawi, S., Saka, M.P., Optimum Shape Design of Cold-Formed Thin-Walled Steel Sections, Advances in Engineering Software, 31 (11), 851-862, 2000.
19. Gasic, M.M., Savkovic, M.M., Bulatovic, R.R., Optimization of Trapezoidal Cross Section of the Truck Crane Boom by Lagrange's Multipliers and by Differential Evolution Algorithm (DE), Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 57 (4), 304-312, 2011.
20. Gohberg, M.M., Krenler, Moskova, Rusya, Makine Yapım Yayınevi, 1988.
21. Gohberg, M.M., Kaldırma ve İletme Makinalarının Metal Konstrüksiyonları, İkinci Baskı, Leningrad, Rusya, Makine Yapım Yayınevi, 1976.
22. Timoshenko, S., Strength of Materials Part I Elementary Theory of Problems, Ition-Tenth Printing, New York, USA, D. Van Nostrand Company, 1948.
23. Holzmann, G., Dreyer, H-J., Faiss, H., Technische Mechanik 3. Achte Auflage, Stuttgart, Germany, B. G. Teubner GmbH, 2002.
24. Niemann, G., Winter H, Höhn, B.R., Maschinenelemente Band 1. Vierte Auflage, Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2005.
25. Sydorhuk, V.K., Petrenko, A.K., Sammal, A.S., Kirişlerin Burulması, Novomoskovsk, Rusya, Novomoskovsk Enstitüsü Yayınevi, 2002.
26. Feodosyev, V.İ., Cisimlerin Mukavemeti, Moskova, Rusya, Moskova Devlet Teknik Üniversitesi Yayınevi, 1999.
27. Pirogov, E.N., Goltsev, V.Y., Cisimlerin Mukavemeti, Moskova, Rusya, Fizik Mühendisliği Enstitüsü Yayınevi, 2008.
28. İnan, M., Cisimlerin Mukavemeti, İstanbul, Türkiye, İTÜ Vakfı Yayınevi, 1996.
29. Pisarenko, G.S., Agarev, V.A., Kvitka, A.L., Popkov, V.G., Umansky, E.S., Cisimlerin Mukavemeti, Kiev, Ukrayna, Vishcha School Yayınevi, 1986.
30. Gafarov, R.H., Zhernakov, V.S., Cisimlerin Mukavemeti Neyi Öğretir, Moskova, Rusya, Makine Yapım Yayınevi, 2001.
31. Pavlov, P.A., Parshin, L.K., Melnikov, B.E., Sherstnev, V.A., Cisimlerin Mukavemeti, Moskova, Rusya, LAN Yayınevi, 2007.
32. Gere, J.M., Goodno, B.J., Mechanics of Materials, Eighth Edition, Stamford, USA, Cengage Learning, 2013.
33. Spotts, M.F., Design of Machine Elements, Third Edition, New Jersey, USA, Prentice-Hall, 1961.
34. Ural, A.C., Mechanical Design: An Integrated Approach, First Edition, New York, USA, Mc Graw Hill, 2004.
35. Fraser, C.G., Isoperimetric Problems in the Variational Calculus of Euler and Lagrange, Historia Mathematica, 19 (1), 4-23, 1992.
36. Gelfand, İ.M., Fomin, S.V., Varyasyon Hesabı, Moskova, Rusya, FM Yayınevi, 1961.
37. Brousse, P., Optimization in Mechanics: Problems and Method, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Science Publishers B. V., 1988.
38. Brousse, P., Structural Optimization, New York, USA, Springer-Verlag Wien GMBH, 1975.
39. Gelfand, İ.M., Fomin, S.V., Calculus of Variation, New Jersey, USA, Prentice-Hall, 1963.
40. Ramana, B.V., Higher Engineering Mathematics, Sixth Reprint, New Delhi, India, Tata McGraw-Hill, 2008.
41. Ramana, B.V., Engineering Mathematics, Second Edition, New Delhi, India, Tata McGraw-Hill, 2008.
42. Bayın, S.Ş., Fen ve Mühendislik Bilimlerinde Matematiksel Yöntemler, Birinci Baskı, Ankara, Türkiye, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınevi, 2000.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmiş Üçlü Model SiC/Al2014 Kompozitinin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine İnfiltrasyon Sıcaklığı, Basıncı ve Mg İlavesinin Etkisi

Serkan ATEŞ^{1*}, İbrahim UZUN²

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 05.09.2017 Düzeltme Tarihi: 20.11.2017 Kabul Tarihi: 29.11.2017

Özet

Bu çalışmada 105µm, 66µm ve 44µm ortalama tane boyutuna sahip SiC tozlar ağırlıkça belli oranda karıştırılarak paslanmaz çelik borular içerisine yerleştirilmiş ve gözenekli filtreler arasında sabitlenmiştir. 700°C-800°C arasındaki sıcaklıklarda, 500-900kPa arasındaki basınçlarda, %0-8 arasındaki Mg İlavesi değerlerinde %0-8 arasındaki Mg ilavesi değerlerinde ve 3 dakika içerisinde N₂ gazı atmosferinde basınçlı infiltrasyon yöntemi ile SiC tozları arasındaki boşluklara Al2014 alüminyum alaşımı emdirilerek metal matrisli kompozitler üretilmiştir. Elde edilen numunelerin görüntü analizleri Taramalı Elektron Mikroskopu(SEM) ile yapılmıştır. Yoğunlukları, poroziteleri, ısı iletkenlikleri, sertlikleri ve basma gerilmeleri ise deneysel olarak belirlenmiştir. İnfiltrasyon basıncının ve sıcaklığının artmasıyla porozite miktarının azaldığı, diğer özelliklerde ise artış meydana geldiği belirlenmiştir. Matrise Mg ilavesi miktarının artmasıyla porozite ve ısı iletkenlikte azalma görülürken, diğer özelliklerde artış tespit edilmiştir. Ayrıca üretilen tüm kompozitlerde artan sıcaklıklarda ısı iletim katsayısının düştüğü belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki mevcut bilgilerle karşılaştırılarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal matrisli kompozit, Basınçlı infiltrasyon, SiC, Al2014

Effect of Infiltration Temperature, Pressure and Mg Addition on the Mechanical Physical Characteristics of Trio Model SiC/Al2014 Composite Produced with Pressure Infiltration Method

Abstract

In this study SiC powders with 105µm, 66µm ve 44µm average particle sizes were mixed, placed within stainless steel tubes and then fixed between sintered filters. Metal matrix composites were produced through absorption of Al2014 aluminium alloy within the gaps between SiC powders with pressure infiltration method under N₂ environment at 700°C-800°C temperature range under 500-900kPa pressure range with addition of %0-8 Mg and within the time period of 3 minutes. Image analyses of obtained samples were made using Scanning Electron Microscope (SEM). Density, porosity, thermal conductivity, hardness and compressive stress values were found experimentally. The amount of porosity was found to be decreasing by increasing infiltration pressure and temperature, while other characteristics exhibited an increase under same conditions. Porosity and thermal conductivity decreased with increasing amount of Mg addition into the matrix, whereas other values increased. Also, coefficient of thermal conduction was found to be decreasing at elevated temperatures for all produced composites. Obtained results were presented comparatively with related literature information.

Keywords: Metal matrix composite, Pressure infiltration, SiC, Al2014

1. Giriş

Günümüz gelişen teknolojisi ile beraber malzemelerin de geliştiği bilinmektedir. Bir tek saf malzemenin sağlayamadığı özellikler birden fazla malzeme kullanılarak istenilen doğrultuda geliştirilebilmektedir. Hafiflik, sertlik, iletkenlik, yalıtkanlık gibi kompoziti oluşturan malzemelerin saf özellikleri yanında kompozitin üretim tekniği, infiltrasyon basıncı sıcaklığı ve diğer şartlar da önemli olmaktadır. Metal matrisli kompozitleri üretmek için döküm metotları, toz metalürjisi tekniği ve infiltrasyon metotları gibi birkaç metot vardır [1-2]. Metal matris kompozit malzemelerin infiltrasyon yöntemleri basınç altında, vakum ile ve basınçsız emdirme olarak uygulanmaktadır [3-4]. Basınçlı infiltrasyon yöntemi, takviye içeren ön şekillendirilmiş malzemeye sıvı metalin nüfuz etmesi için sıvı metale mekanik basınç yerine inert gaz basıncı uygulayan bir üretim tekniğidir [5]. Metal matrisli kompozitlerin matris malzemesi genelde alüminyum ve alüminyum alaşımlarıdır. Magnezyum, demir, titanyum ve süper alaşımlar gibi matris malzemeleri alüminyuma nazaran daha az kullanılmaktadır [6]. Malzemelerin ısı iletkenliklerini artırmak için ısı iletkenliği yüksek takviye elemanları kullanıldığı bilinmektedir. Bunun dışında takviye malzeme tane büyüklüğü ve takviye hacim oranı değiştirilerek ısı iletkenliğinin etkilendiği görülmektedir [7].

Ayrıca toz metalürjisi yöntemi(PIM) ile farklı takviye hacim oranlarında SiC/Al kompozitlerin infiltrasyonunda farklı tane boyutlarında ısı iletkenliğinin takviye hacim oranı ile doğrusal değiştiği görülmüştür[7]. Elektronikte kullanılan paketleme malzemeleri; düşük ve uygun termal genleşme katsayısına, yüksek termal iletkenliği, düşük maliyet ve düşük yoğunluğa sahip olmalıdır. Ancak geleneksel paketleme malzemeleri bütün bu özellikleri karşılamadığından seramik takviyeli metal matrisli kompozitler geliştirilmiştir[8]. Bu yüzden kompozit malzemelerin ısı iletkenliklerinin önemi son yıllarda daha fazla bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Elektronik endüstrisindeki yeni uygulamalarda; elektronik aygıtların boyutlarının küçülmesi ve güçlerinin artması neticesinde bu aygıtlarda kullanılacak olan malzemeler için ısı iletim katsayısı oldukça yüksek yaklaşık 250-300(W/mK) olan malzemelere gereksinim duyulmaktadır[9]. Kompozit üretiminde genellikle karbür, nitrid, oksit ve borür gibi refrakter bileşiklerden oluşan endüstriyel tozlar kullanılmaktadır. Daha çok tercih edilen süresiz takviye elemanları partikül ve kılcak kristal formda SiC ve Al₂O₃'dir. SiC'ün sertliği, kırılmaya karşı direnci, elastisite modülü Al₂O₃'den daha yüksek, yoğunluğu ve ısı genleşme katsayısı daha düşük olduğundan genelde SiC takviye elemanı olarak kullanılmaktadır[10]. Silisyum karbür seramikler içerisinde; yüksek aşınma direnci ve ısı şok mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı, uygun ısı iletkenlik ve genleşme katsayısı gibi üstün özellikleri

nedeniyle gaz türbinlerinde ve aşınmaya maruz otomobil parçalarında kullanımı büyük önem kazanmıştır[11]. Basınçlı infiltrasyon tekniğinde; sıvı metal sıcaklığı, takviye tane büyüklüğü, infiltrasyon süresi ve basıncı, matrise Mg ilavesi en önemli infiltrasyon parametrelerini teşkil ederler.

Kompozitlerin ısı iletkenliği ölçmek için kullanılan flash tekniği geniş bir kullanım alanına sahiptir ve farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğin ölçülmesine imkan sağlar[12]. Bu çalışmada kullanılan flash tekniğinde, cihaza yerleştirilen küçük bir numunenin ön yüzü çok kısa ve yoğun bir ısı enerjisiyle maruz bırakılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzeme

Bu çalışmada metal matrisli kompozit üretiminde takviye elemanı olarak ticari safılıkta 105µm ve 66µm ortalama tane büyüklüklerine sahip kimyasal kompozisyonu Tablo 3'de verilen SiC tozlar ve matris malzemesi olarak ise kimyasal kompozisyonu Tablo 2'de verilen Al2014 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan matris ve takviye elemanına ait fiziksel ve ısı özellikler ise Tablo 1'de verilmiştir[13].

Tablo 1. Al 2014'e ait fiziksel, mekanik ve termal özellikler

		Al 2014	SiC
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk (kg/m ³)	2800	3200
Isıl Özellikler	Isıl İletkenlik (W/mK)	193	77.5

Tablo 2. Al 2014'ün kimyasal kompozisyonu

Element	Al	Cr	Cu	Fe	Mg
(%)	90,45-93,55	0,10	3,9 – 5,0	0,70	0,20 - 0,80
Element	Mn	Si	Ti	Zn	Diğer
(%)	0,50 – 1,20	0,50 – 1,20	0,15	0,25	0,15

Tablo 3. SiC'ün kimyasal kompozisyonu

Element	SiC	Fe ₂ O ₃	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃
(%)	90,4 – 95,0	0,10	3,9 – 5,0	0,70	0,20 – 0,80

105µm ve 66µm ortalama tane büyüklüklerine sahip SiC tozlar ağırlıkça (105µm : 66µm : 44µm) (5 : 2 : 1) oranında karıştırılarak elde edilen üçlü modelin (ÜM) takviye-hacim oranı tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Tane büyüklüğüne göre T-H oranı

Takviye tane büyüklüğü (µm)	105	66	44	Üçlü Model(ÜM)
Takviye hacim oranı (%)	51,68	45,81	41,96	48,99

2.2. Kompozit Üretimi

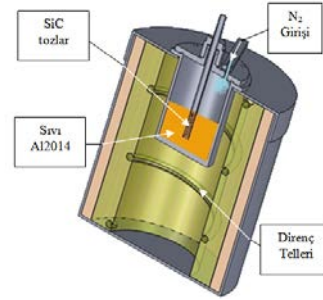
Üretilen kompozitler için infiltrasyon sıcaklığı, basıncı ve matrise Mg ilavesi olmak üzere 3 farklı üretim parametresi kullanılmıştır. Kullanılan üretim parametreleri tablo 5'de verilmiştir.

SiC tozları homojen olarak karıştırıldıktan sonra 13mm çapında, 300mm yüksekliğindeki paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş boruların içerisine doldurularak her iki tarafı filtre ve bilezik ile sabitlenmiştir. İnfiltrasyon işlemi inert gaz olarak kullanılan azot gazının (N₂) 500kPa ile 900kPa arasındaki beş farklı basınç değeri altında, 700°C ile 800°C sıcaklıkları arasında değişen 3 farklı sıcaklık değerinde, %0 ile %8 arasında değişen 3 farklı matrise Mg ilavesi değerinde ve 3 dakikada gerçekleştirilmiştir. Basınçlı infiltrasyon işlemine tabi tutulan numuneler havada soğumaya

birakıldıktan sonra yoğunluk, gözenek miktarı, ısı iletkenlik, sertlik, basma dayanımı ve taramalı elektron mikroskop ölçümleri için uygun ölçülerde kesilmiştir. Şekil 1'de basınçlı infiltrasyon işleminin gerçekleştirildiği düzeneğe gösterilmiştir.

Tablo 5. Kompozit üretim parametreleri

No	İnfiltrasyon Sıcaklığı (°C)	İnfiltrasyon Basıncı (kPa)	Matrise Mg ilavesi (%)
1		500	
2	700	600	0
3	750	700	4
4	800	800	8
5		900	



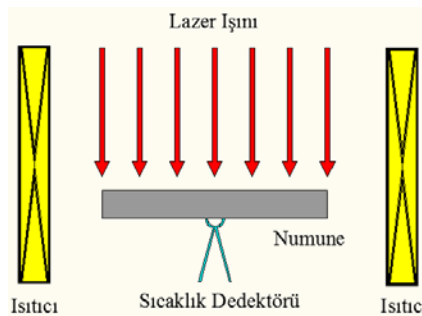
Şekil 1. Basınçlı infiltrasyon düzeneği

2.3. Deneysel Ölçümler

Numunelerin yoğunluklarının deneysel ölçümleri 0.0001g hassasiyete sahip "Sartorius YDK 01" marka hassas teraziye yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak arşimet prensibine göre yapılmıştır. Malzeme içerisindeki gözenek miktarı (ϕ) deneysel olarak elde edilen yoğunluk (ρ_d) ve takviye hacim oranı kullanılarak hesaplanan teorik yoğunluk (ρ_t) ve ölçüm yapılan sıcaklıktaki sıvın yoğunluğu (ρ_s) kullanılarak aşağıdaki eşitlik (1) ile hesaplanmıştır.

$$\phi = \frac{\rho_t}{\rho_d} \cdot \rho_s \quad (1)$$

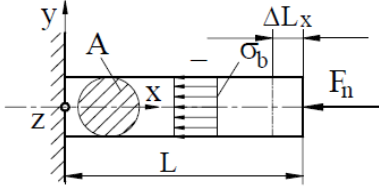
Numunelerin ısı iletkenlik değerleri "Anter Flash Line 2000" model cihaz ile Laser Flash tekniği kullanılarak ısı yayılım katsayısından eşitlik (2) ile dolaylı olarak hesaplanmıştır. Zamana bağlı ısı iletkenlik ölçüm temeline dayalı bu cihazın çalışma prensibi aşağıdaki Şekil 2'de verilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri her bir kompozit için 25°C ile 200°C arasında değişen 8 farklı sıcaklık değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu cihazdaki ölçümler yapılırken numune boyutları cihaza uyarlanmak için Cast 95 ile çapı büyütülerek ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2. Lazer flash tekniğinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi

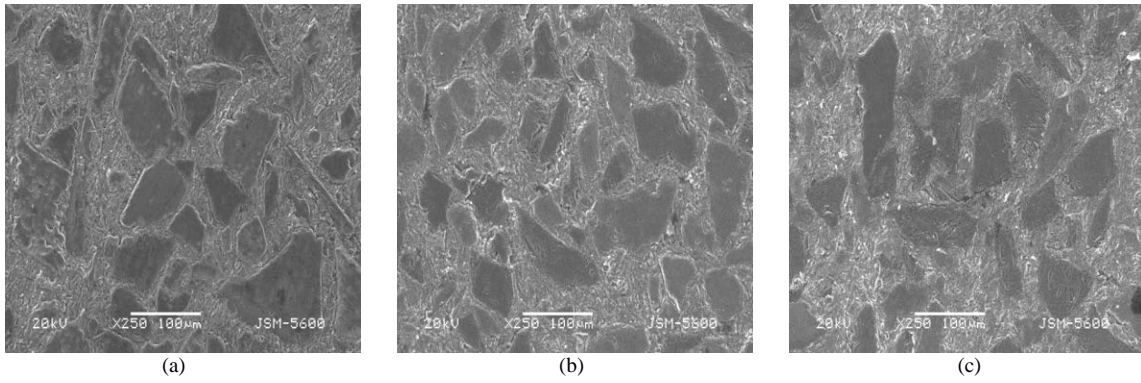
Numunelerin sertlik ölçümleri "Clark 100S" marka sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Sertlik ölçümünde Rockwell sertlik ölçüm yönteminin HR-30N skalası kullanılmıştır. Bu ölçüm yönteminde tepe açısı 120° olan elmas koni uç kullanılmıştır. Numunelere 3kg ön yük olmak üzere toplam 30 kg yük uygulanarak sertlikler ölçülmüştür.

Numunelerin basma dayanımları "Zwick Z100" marka çekme-basma dayanımı cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Basma dayanımının belirlenmesinde numunelerin boyutları çok küçük olduğu için özel bir aparat kullanılmıştır. Şekil 3'de dairesel kesitli (A) bir malzemeye etki eden basma kuvveti (F_n) ile meydana gelen basma gerilmesi (σ_b) şematik olarak gösterilmiştir. Basma gerilmesi denklem 2'de görüldüğü gibi hesaplanır.



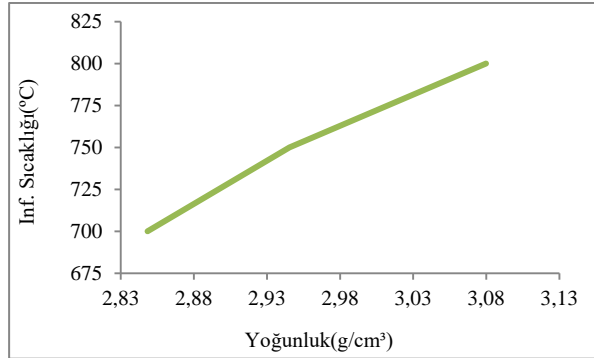
Şekil 3. Basma gerilmesinin şematik gösterimi

$$\sigma_b = \frac{F_n}{A} \quad (2)$$



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda üretilen kompozitlerin SEM resimleri
(a) 700°C, (b) 750°C, (c) 800°C

3.1.2. Yoğunluk



Şekil 5. Yoğunluğun sıcaklıkla değişimi

Şekil 5'de görüldüğü gibi infiltrasyon sıcaklığının artması ile kompozitin yoğunluk değeri artmaktadır. Bu sonuçlar peççok sisteminde olduğu gibi SiC/Al2014 sisteminde de sıcaklığın önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Sıcaklık arttıkça sıvıların viskozitesi ve yüzey gerilimi düşmektedir. Dolayısıyla akıcılık artmakta ve buda zorlanmış infiltrasyona yardımcı olmaktadır. Böylece sıvı metalin SiC tozlar içerisine daha iyi nüfus etmesi sağlanmakta ayrıca arayüzeyde daha iyi yapışma meydana gelmekte ve kompozitin yoğunluğu artmaktadır.

3.1.3. Gözenek Miktarı

Şekil 6'de görüldüğü gibi infiltrasyon sıcaklığının artması ile kompozitin gözenek miktarı azalmaktadır. İnfiltrasyon sıcaklığının artması ile sıvı matrisin akıcılığı artmakta, infiltrasyon öncesi boşlukları doldurması kolaylaşmakta böylece sıvı matrisin SiC

Hazırlanan numunelerin yüzey incelemeleri "JEOL JSM 5600" marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

3. Sonuç ve Öneriler

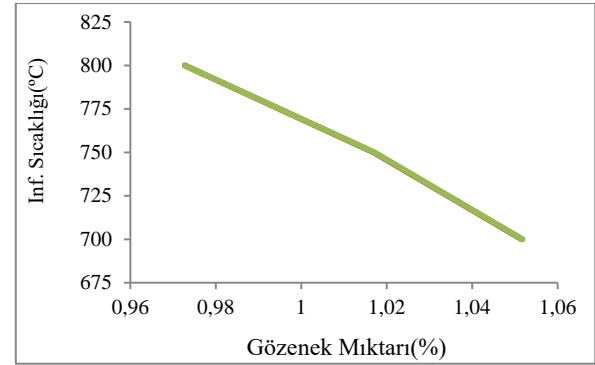
3.1. İnfiltrasyon Sıcaklığı

Kompozitler 3 farklı sıcaklık değerinde, 700kPa sabit infiltrasyon basıncında, matrise Mg ilavesi olmadan ve 3 dakikada üretilmiştir. Tüm sıcaklıklarda 70mm'lik tozun tamamı infiltre olurken aynı zamanda taşmada meydana gelmiştir.

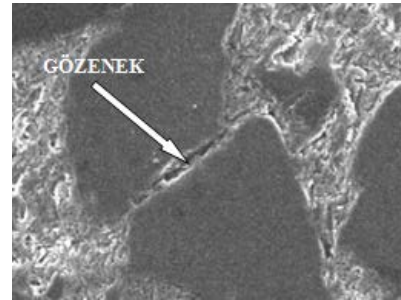
3.1.1. Mikroyapı

SiC'ün bazı bölgelerde homojen dağılmadığı ve bazı bölgelerde SiC partiküllerinin itilerek kümelendiği görülmektedir. Bunun nedeni yetersiz soğuma hızından dolayı katılaşmanın SiC partiküllerinin katılaşma sırasında hareket etmesine imkan verecek kadar yavaş bir sürede gerçekleşmesi ve Al2014 alaşımı dentritlerinin SiC partiküllerini dentritler arasında kalan bölgelere itmesi olabilir.

tozlar içerisine daha iyi nüfus etmesi sağlanmakta ayrıca daha iyi iletme meydana gelmektedir.



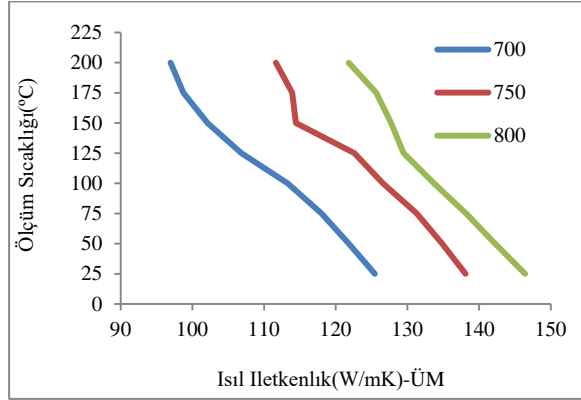
Şekil 6. Gözenek miktarının sıcaklıkla değişimi



Şekil 7. Gözenek oluşumu

Yapılan mikroyapı incelemelerinde SiC tozların arasındaki boşlukların küçük olduğu yerlerde gözenekler belirlenmiştir. Bundan, taneler arasındaki küçük boşlukların infiltrasyonu zorlaştırdığı anlaşılmaktadır.

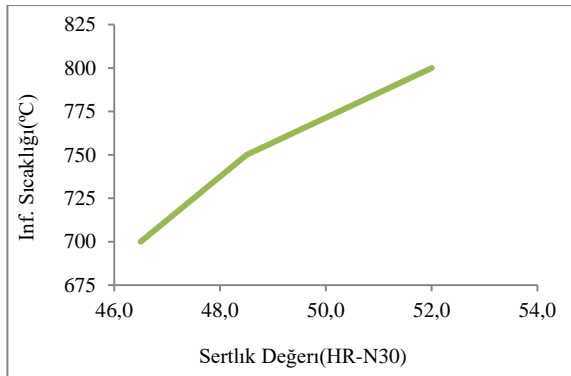
3.1.4. Isıl İletkenlik



Şekil 8. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi

Isıl iletkenliğin sıcaklık ile değişimi Şekil 8'de gösterilmiş olup ısı iletkenliğin infiltrasyon sıcaklığı ile arttığı ancak ölçüm sıcaklığıyla azaldığı görülmektedir. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla artmasının nedeni porozite ile ilgilidir. İnfiltrasyon sıcaklığının yüksek olması eriyiğin mikro düzeydeki partiküller arasında daha iyi nüfuz etmesini ve porozitenin azalmasını sağlamaktadır. Kompozit içerisindeki gözeneklere hava hapsolmuş durumdadır. Havanın ısı iletkenliği kompoziti oluşturan diğer malzemelere göre çok daha düşük olduğundan Kompozit içerisindeki gözenek miktarı ne kadar az olursa ısı iletkenlikte o kadar artar. Sıcaklıkla ısı iletkenliğin azalması ise SiC kaynaklanmaktadır. SiC'ün negatif sıcaklıklarda ısı iletkenliğinin yükseldiği oda sıcaklıklarına doğru ve daha yüksek sıcaklıklarda düştüğü bilinmektedir.

3.1.5. Sertlik

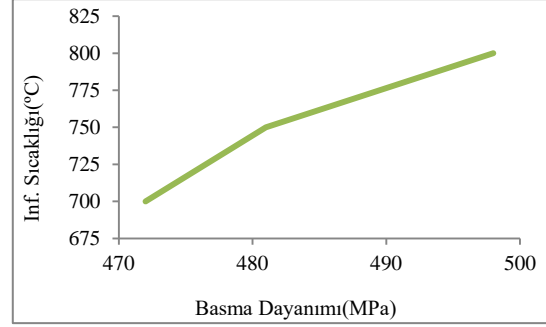


Şekil 9. Sertlik değerinin sıcaklıkla değişimi

İnfiltrasyon sıcaklığının artması ile kompozitin sertlik değeri artmıştır. Bunun nedeni artan infiltrasyon sıcaklıklarının sıvı matrisin SiC tozlar içerisinde infiltrasyonunu kolaylaştırarak daha az gözenekli kompozit oluşmasına yardımcı olması ve sertlik değerlerini arttırmasıdır.

3.1.6. Basma Dayanımı

İnfiltrasyon sıcaklığının artması ile kompozitin basma dayanımı artar. Metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri porozitedir. SiC partiküllerinin alüminyum alaşımı tarafından ıslatılabilirliğinin az olması nedeniyle matris/takviye arayüzeyinde oluşan mikro poroziteler matris/takviye fazı arayüzey mukavemetini azaltmaktadır. Ayrıca matris fazının büzülmesinden kaynaklanan porozite ise yükün uygulandığı alanı azaltarak kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir.



Şekil 10. Basma dayanımının sıcaklıkla değişimi

3.2. İnfiltrasyon Basıncı

Kompozitler 5 farklı basınç değerinde, 750°C sabit infiltrasyon sıcaklığında, matrise Mg ilavesi olmadan ve 3 dakikada üretilmiştir. Tüm basınçlarda 70mm'lik tozun tamamı infiltre olurken aynı zamanda taşmada meydana gelmiştir.

3.2.1. Mikroyapı

Deneyler sırasında Al2014 ve SiC parçacıklarının karıştırma işleminin ideal şartlarda yapılmasına rağmen 66µm ortalama tane boyutuna sahip olan SiC parçacıklarının 105µm ortalama tane boyutuna sahip olan SiC parçacıklardan daha hafif olmalarından dolayı infiltrasyon borusu içerisinde tabana doğru hareket etme eğiliminin parçacıkların tam homojen olarak karışmalarını engellediği sonucuna varılabilir. Ancak infiltrasyonun gerçekleştirildiği yüksek basınç sayesinde daha hafif olan partiküllerin infiltrasyon borusu içerisinde yukarı doğru hareket etmek isteyecekleride aşıkardır. İşte bu yüzden yerçekimi ve infiltrasyon basıncı gibi birbirine ters yönde etki eden iki kuvvetin etkisi altında yaklaşık olarak homojen bir dağılım elde edilebilmiştir

3.2.2. Yoğunluk

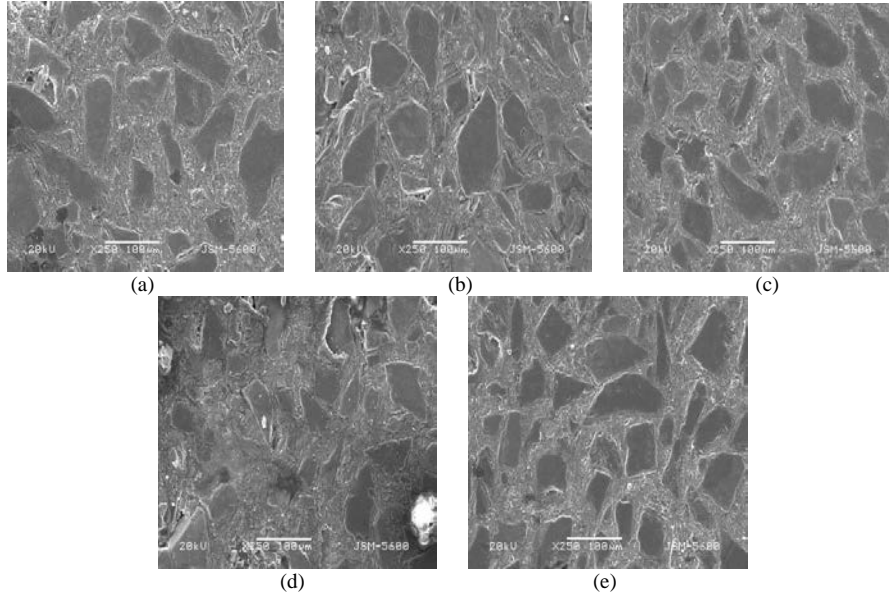
Şekil 12'de görüldüğü gibi infiltrasyon basıncının artması ile kompozitin yoğunluk değeri artmaktadır. Ayrıca bazı bölgelerde SiC partiküllerin kümelenmediği ancak sıvı Al2014 alaşımının uygulanan basınç sayesinde bu bölgeleri beslediği ve boşlukların oluşmadığı veya çok az oluştuğu görülmektedir. Kompozit içerisindeki boşlukların azalmasının da yoğunluğu arttırdığı söylenebilir.

3.2.3. Gözenek Miktarı

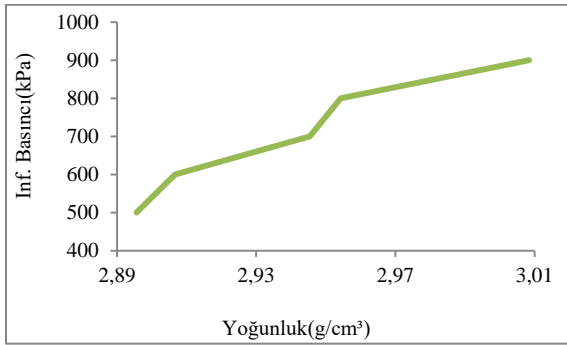
Şekil 13'de görüldüğü gibi infiltrasyon basıncının artması ile kompozitin gözenek miktarı azalmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde porozite, partikül takviyelerin matris/partikül arayüzeyinde porozitenin çekirdeklenmesi için uygun bölgeler oluşturması ve partikül kümelerinin arasında kalan bölgelerin yetersiz beslenmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak basınçlı döküm yönteminde uygulanan yüksek basınç katılaştıran metal içerisinde gaz ve büzülmeden kaynaklanan porozitenin oluşmasını engellemektedir.

3.2.4. Isıl İletkenlik

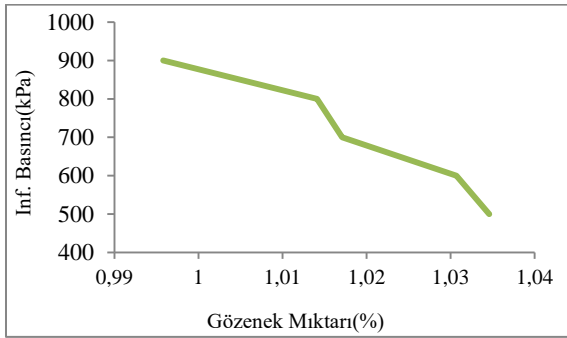
Isıl iletkenliğin basınç ile değişimi Şekil 14'de gösterilmiş olup ısı iletkenliğin infiltrasyon basıncı ile arttığı ancak ölçüm sıcaklığıyla azaldığı görülmektedir. Isıl iletkenliğin basınçla artmasının nedeni porozite ile ilgilidir. İnfiltrasyon basıncının yüksek olması eriyiğin mikro düzeydeki partiküller arasında daha iyi nüfuz etmesini ve porozitenin azalmasını sağlamaktadır. Kompozit içerisindeki gözeneklere hava hapsolmuş durumdadır. Havanın ısı iletkenliği kompoziti oluşturan diğer malzemelere göre çok daha düşük olduğundan Kompozit içerisindeki gözenek miktarı ne kadar az olursa ısı iletkenlikte o kadar artar. Sıcaklıkla ısı iletkenliğin azalması ise SiC kaynaklanmaktadır. SiC'ün negatif sıcaklıklarda ısı iletkenliğinin yükseldiği oda sıcaklıklarına doğru ve daha yüksek sıcaklıklarda düştüğü bilinmektedir.



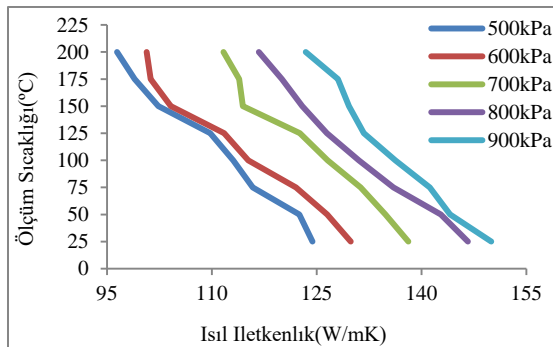
Şekil 11. Farklı basınçlarda üretilen kompozitlerin SEM resimleri
(a)500kPa, (b)600 kPa, (c)700kPa, (d)800kPa, (e)900kPa



Şekil 12. Yoğunluğun basınçla değişimi

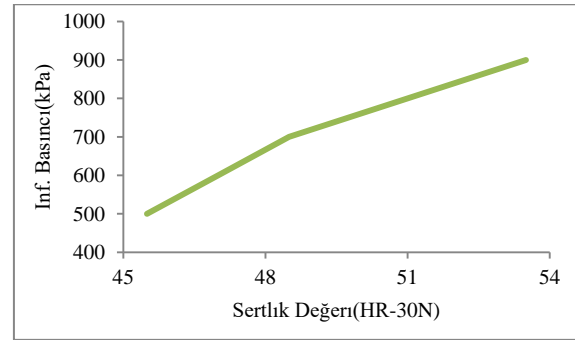


Şekil 13. Gözenek miktarının basınçla değişimi



Şekil 14. Isıl iletkenliğin basınçla değişimi

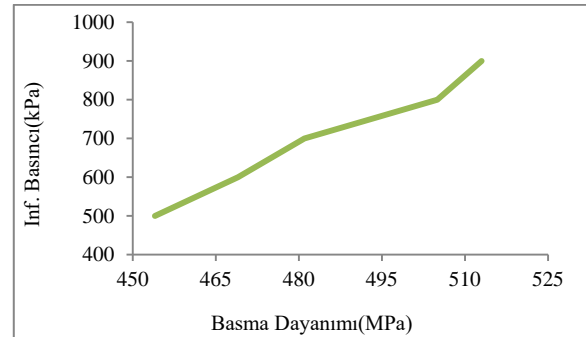
3.2.5. Sertlik



Şekil 15. Sertlik değerinin basınçla değişimi

Sertlik değerinin basınçla değişimi şekil 15'de gösterilmiş olup infiltrasyon basıncının artması ile kompozitin sertlik değeri artmıştır. Bunun nedeni artan infiltrasyon basınçlarının sıvı matrisin SiC tozlar içerisinde infiltrasyonunu kolaylaştırarak daha az gözenekli kompozit oluşmasına yardımcı olması ve sertlik değerlerini arttırmasıdır.

3.2.6. Basma Dayanımı



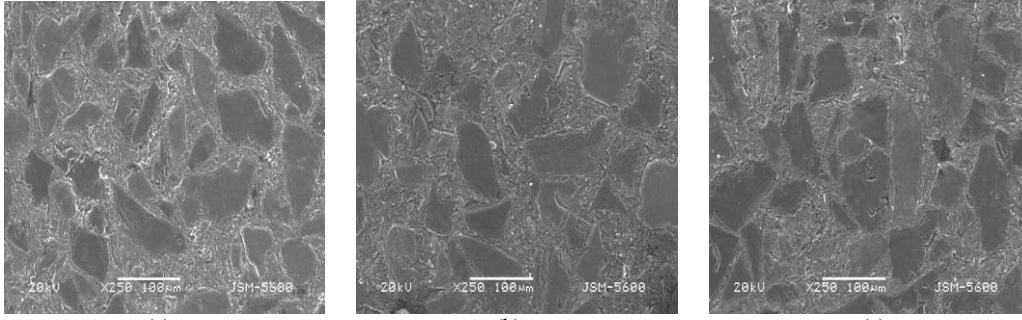
Şekil 16. Basma dayanımının basınçla değişimi

Basma dayanımının basınçla değişimi şekil 16'da gösterilmiş olup infiltrasyon basıncının artması ile kompozitin basma dayanımı artar. Metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri porozitedir. SiC partiküllerinin alüminyum alaşımı tarafından ıslatılabilirliğinin az olması nedeniyle matris/takviye arayüzeyinde oluşan mikro poroziteler matris/takviye

fazı arayüzey mukavemetini azaltmaktadır. Ayrıca matris fazının büzülmesinden kaynaklanan porozite ise yükün uygulandığı alanı azaltarak kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle artan infiltrasyon basıncı ile porozite azalmakta böylece basma dayanımı artmaktadır.

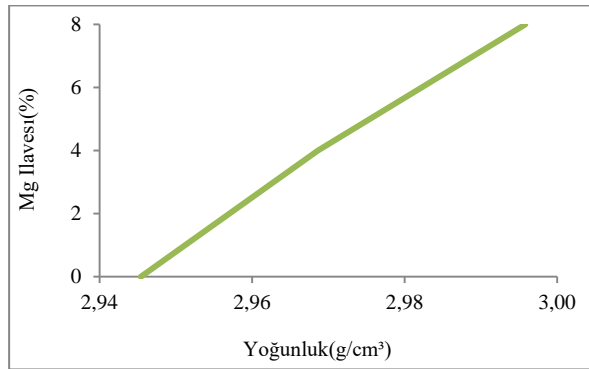
3.3. Matrise Mg İlavesi

Kompozitler matrise Mg ilavesi olmadan ve ağırlıkça %4, %8 gibi 2 farklı değerinde matrise Mg ilave edilerek, 750°C sabit infiltrasyon sıcaklığında, 700kPa sabit infiltrasyon basıncında ve 3 dakikada üretilmiştir. Tüm matrise Mg ilavesi değerlerinde 70mm'lik tozun tamamı infiltre olurken aynı zamanda taşmada meydana gelmiştir.



Şekil 17. Farklı matrise Mg ilavesi değerlerinde üretilen kompozitlerin SEM resimleri
(a) %0, (b) %4, (c) %8

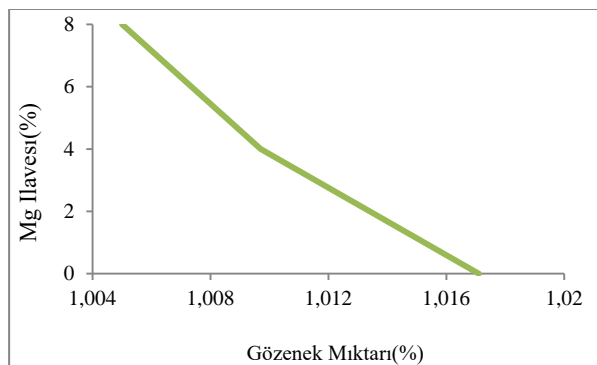
3.3.2. Yoğunluk



Şekil 18. Yoğunluğun Mg ilavesi ile değişmesi

Şekil 18'de görüldüğü gibi matrise Mg ilavesi değerinin artması ile kompozitin yoğunluk değeri artmaktadır. Aslında ilave edilen magnezyumun yoğunluğunun (1,7g/cm³), matris malzemesi Al2014'ün yoğunluğundan (2,8g/cm³) düşük olmasına rağmen infiltrasyonu kolaylaştırıcı etki yapıp kompozit içerisindeki gözenek miktarını düşürdüğünden yoğunluğu arttırdığı söylenebilir.

3.3.3. Gözenek Miktarı



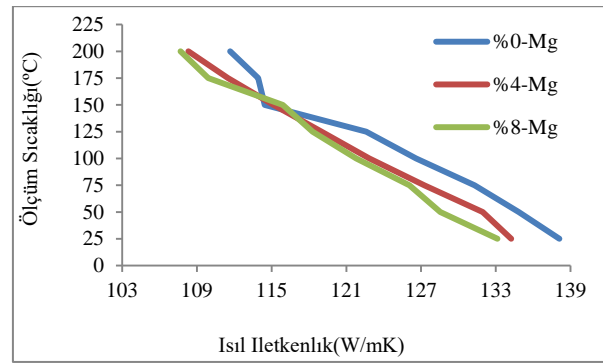
Şekil 19. Gözenek miktarının Mg ilavesi ile değişimi

3.3.1. Mikroyapı

Kompozitlerin mikro yapısı yüzey düzeltme ve parlatma işlemlerinden sonra taramalı elektron mikroskopunda 250 büyütme ile görüntülenmiş elde edilen fotoğraflar şekil 17'de verilmiştir. Resimler incelendiğinde infiltrasyonun tam olarak gerçekleştiği ve matrise ilave edilen Mg değerinin artmasıyla SiC parçacıklarının matris içerisinde homojen olarak dağıldıkları gözlenmiştir. Bunun nedeni Mg'un infiltrasyonu kolaylaştırıcı etkiye sahip olması ve iyi bir ıslatma sağlıyor olması olabilir.

Şekil 19'da görüldüğü gibi matrise Mg ilavesinin artması ile kompozitin gözenek miktarı azalmaktadır. Matrise Mg ilavesinin artması ile infiltrasyon kolaylaşmakta böylece sıvı metalin SiC tozlar içerisinde daha iyi nüfus etmesi sağlanmakta ayrıca daha iyi ıslatma meydana gelmektedir. Böylece kompozitin gözenek miktarı azalmaktadır.

3.3.4. Isıl İletkenlik

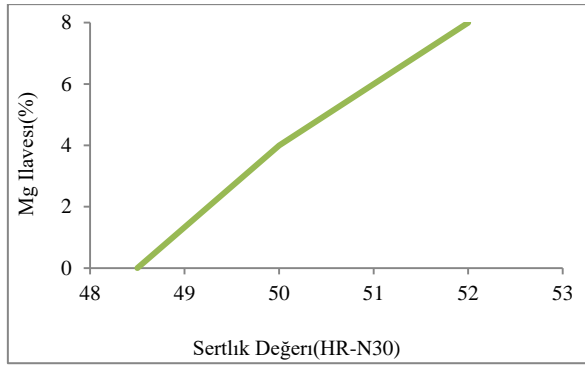


Şekil 20. Isıl iletkenliğin Mg ilavesi ile değişimi

Isıl iletkenliğin sıcaklık ile değişimi Şekil 20'de gösterilmiş olup ısıl iletkenliğin matrise Mg ilavesi ve ölçüm sıcaklığıyla azaldığı görülmektedir. Beklenildiği gibi Mg'un ısıl iletkenlik değerinin matristen daha düşük olması kompozitin ısıl iletkenlik değeri düşmüştür. Sıcaklıkla ısıl iletkenliğin azalması ise SiC kaynaklanmaktadır. SiC'ün negatif sıcaklıklarda ısıl iletkenliğinin yükseldiği oda sıcaklıklarına doğru ve daha yüksek sıcaklıklarda düştüğü bilinmektedir.

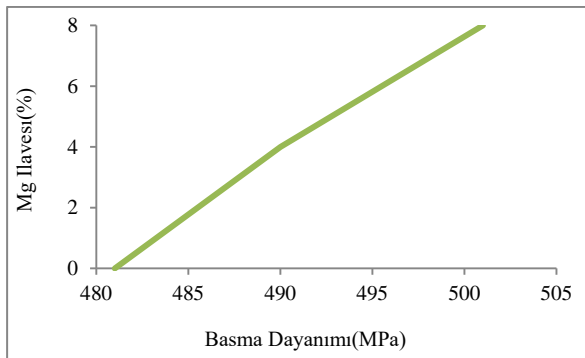
3.3.5. Sertlik

Sertlik değerinin matrise Mg ilavesi ile değişimi şekil 21'de gösterilmiş olup matrise ilave edilen Mg değerinin artması ile kompozitin sertlik değeri artmıştır. Bunun nedeni artan Mg ilavesi değerlerinin sıvı matrisin SiC tozlar içerisinde infiltrasyonunu kolaylaştırarak daha az gözenekli kompozit oluşmasına yardımcı olması ve sertlik değerlerini arttırmasıdır.



Şekil 21. Sertlik değerinin Mg ilavesi ile değişimi

3.3.6. Basma Dayanımı



Şekil 22. Basma dayanımının Mg ilavesi ile değişimi

Basma dayanımının Mg ilavesi ile değişimi şekil 22'de gösterilmiş olup Mg ilavesinin artması ile kompozitin basma dayanımı artar. Metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri porozitedir. SiC partiküllerinin alüminyum alaşımı tarafından ıslatılabilirliğinin az olması nedeniyle matris/takviye arayüzeyinde oluşan mikro poroziteler matris/takviye fazı arayüzey mukavemetini azaltmaktadır. Ayrıca matris fazının büzülmesinden kaynaklanan porozite ise yükün uygulandığı alanı azaltarak kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle artan Mg ilavesi miktarı ile porozite azalmakta böylece basma dayanımı artmaktadır.

Deneyssel olarak yapılan bu çalışmada, matris malzemesi olarak Al2014 alaşımı, takviye malzemesi olarak 105 – 66 - 44µm tane boyutuna sahip SiC tozlar kullanılmıştır. Takviye malzemesi 5 : 2 :

1 oranında kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları SEM ile belirlenmiş ve infiltrasyon sıcaklığı, infiltrasyon basıncı, matrise Mg ilavesi değişkenlerine göre; kompozitlerin yoğunlukları, gözenek miktarları, ısı iletkenlikleri, sertlikleri ve basma dayanımları deneysel olarak tespit edilmiştir. İnfiltrasyon sıcaklığı, infiltrasyon basıncı ve matrise Mg ilavesi değerlerinin artırılması ile kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma farklı matris ve takviye elemanı kullanılarak yapılacak olan diğer çalışmalar için cesaret verici olarak nitelendirilmiştir. Ayrıca ileriki çalışmalarda H. Çetin vd. (14) yaptığı çalışmada kapak malzemesi olarak kullandıkları tantalyum sahip olduğu üstün korozyon direnci nedeniyle takviye elemanı olarak kullanılabilir.

Kaynaklar

1. D. M. Stefanescu, D. K. Dhindaw and S. Ahuja, Metall. Mater. Trans. **23A**, 2328 (1992).
2. S. A. Gedeon and İ. Tangerini, Mat. Sci. Eng. A, **144**, 237 (1991)
3. C. L. Buhmaster, D. E. Clark and H. B. Smart, J. Metals, **40**, 44 (1988)
4. J. A. Aguliar-Martinez, M. İ. Pech-Canul, M. Rodríguez-Reyes and J. L. De Lapena, Mater. Lett., **57**, 4332 (2003)
5. E. M. Hamzawy., A. A. El-Kheshen, , Zawrah, M. F., "Densification and properties of glass/cordierite composites", *Ceramics International*, Elsevier., 31: 383-389 (2005)
6. Metal Matris Kompozit Malzemeler, Soy. U, Sakarya Üniversitesi Yayınları, (2009)
7. Chu, K. Jia, C. Liang, X. Chen, H. Guo, H. The thermal conductivity of pressure Infiltrated SiC_p/Al composites with various size distribution: Experimental study and modeling. *Materials and Design*, 30, 3497-3503, (2009)
8. Benal, M.M. and Shivanand, H.K., Effects of reinforcements content and ageing durations on wear characteristics of Al (6061) based hybrid composites, *Wear*, Volume 262, İssue 5-6, Pages 759-763, (2007)
9. C. Zweben., Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging, *JOM*, 50, 47-60, (1998)
10. Ahlatçı, H., Koçer, T., Candan, E. and Çimenoglu, H., 2006. Wear behaviour of Al/(Al₂O_{3p}+SiC_p) hybrid composites, *Tribology International*, 39(3), 213-220
11. Sixta M. E., Zhang X. F., Jonghe L. C. D., Flexural Creep of İn – Situ Toughened Silicon Carbide, *Journal of American Ceramic Society*, 84, 2022-2028 (2001)
12. Y. Rong, L. Jia-Jun, L. Bao-Liang, Z. Zhen-Bi and L. He-Zhuo Miao, *Wear*, 210, 39 (1997)
13. www.matweb.com
14. H. Çetin, R. G. Ross, "The Phase Diagram of Na-Zn Alloys", *Journal of Phase Equilibria*, Vol 12, No 1, (1991).



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Al6061 Matrisli Geleneksel ve Atık Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi

Onur KAMBER¹, Serkan ATEŞ^{2*}

¹Atmaca Motosan Şantiyesi, İstanbul / TÜRKİYE

²Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 05.09.2017 Düzeltme Tarihi: 07.11.2017 Kabul Tarihi: 14.11.2017

Özet

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al6061 alaşımı, geleneksel takviye elemanlarından SiC ve Al₂O₃ ve atık takviye malzemesi olarak ise kiremit üretimi yapan fabrikalardan toplanarak bilyalı değirmende öğütülüp toz haline getirilmiş kiremitler kullanılmıştır. Takviye malzemeleri kullanılarak tekli, ikili ve üçlü hibrit kompozitler üretilmiştir. Daha sonra elek analizi yapılarak çalışmada kullanacağımız 22-59µm toz boyutuna sahip olan tozlar elde edilmiştir. Ayrıca 22-59µm toz boyutuna sahip olan SiC ve Al₂O₃ seramikleri de piyasadan temin edilmiştir.

Kompozitler, sıvı hal üretim yöntemlerinden olan iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu yöntemde öncelikle Al6061 alaşımını 700°C sıcaklığına çıkartılmış daha sonra alaşımın sıcaklığı 600°C ye düşürülerek bu sıcaklıkta bulamaç halde olan alaşıma önceden 250°C ye ısıtılmış olan takviye elemanları eklenmiş ve elle karıştırılmıştır. Daha sonra alaşım süper ısıtmaya tabii tutularak alaşımın sıcaklığı 800 °C ye çıkartılmıştır. Bu sıcaklıkta 250 dev/dk. hızında alaşım mekanik olarak 10 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sırasında inert gaz olarak azot gazı kullanılmış ve bu sayede ortamdaki oksijenin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra 300mm uzunluğunda ve 30mm çapındaki metal kalıplara döküm yapılarak kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenerek incelenmiş ve EDS analizleri alınmıştır. Porozite miktarları Arşimet prensibi ile hesaplanmış, sertlikleri ise Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir.

Takviye elemanlarının kompozitin porozite miktarına etkisi değerlendirildiğinde, en yüksek porozite miktarlarına kiremit tozunda ikinci sırada Al₂O₃ en düşük değerlerde ise SiC'in olduğu gözlemlenmiştir, bu sıralamanın seçtiğimiz matris ile takviyelerinin yoğunluk farkından dolayı olduğu düşünülmektedir. Takviye malzemesi oranı artırdıkça porozite miktarında artış olduğu görülmüştür. Porozite miktarlarını azaltmak için magnezyum elementini takviye malzemeleri ile kullanarak daha iyi sonuçlar elde edilebileceği öngörülmektedir. Takviye malzemesi olan kiremit tozu, SiC ve Al₂O₃ kadar sertliği arttırmasa da matrise ilave edilen kiremit tozu kompozitin sertliğinde artışa sebep olmuştur. Kiremit tozunun ikili ve üçlü hibrit kompozitlerin sertliğini arttırmada kullanılabilecek bir takviye malzemesi olduğu öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mikro yapı, Porozite, Sertlik, Kompozit, Al6061, SiC, Al₂O₃, Kiremit tozu

Investigation of Tribological Behavior of Traditional and Waste Reinforced Al6061 Matrix Hybrid Composites

Abstract

In this study, Al6061 alloy was used as matrix material, SiC and Al₂O₃ as traditional reinforcing elements, and powder of tiles as waste reinforcement material were collected from tile mills and ground tiles were used. Single, double and triple hybrid composites were produced using reinforcing materials. We then used the sieve analysis to obtain powders with a powder size of 22-59µm. SiC and Al₂O₃ ceramics with a powder size of 22-59µm were also supplied from the market.

The composites were produced using a two-stage blended casting process, which is a liquid-phase production process. In this method, the Al6061 alloy is first heated to 700°C, then the alloy temperature is lowered to 600°C and the alloy, which is semi-solid at this temperature, is preheated to 250°C and added by hand. The alloy was then superheated and the temperature of the alloy was increased to 800 °C and at this temperature 250 rpm. The alloy was mechanically mixed for 10 minutes at speed. Nitrogen gas was used as the inert gas during the mixing process and the oxygen in the environment was removed. Composites were then produced by casting metal molds with a length of 300 mm and a diameter of 30 mm.

When the effect of the reinforcing elements on the porosity of the composite is evaluated, it is observed that the highest porosity amounts are in the second order of tile powder and the lowest value of Al₂O₃ is in the case of SiC, which is considered to be due to the density difference of the matrix and the reinforcements. As the amount of reinforcement material increased, the amount of porosity increased. It is predicted that better results can be obtained by using magnesium element with reinforcing materials to reduce porosity amounts. Powder of tile, which is a reinforcement material, increased the hardness of the composite, which was added to matrix hardness increase as SiC and Al₂O₃. It is foreseen that tile powder is a reinforcement material that can be used to increase the hardness of double and triple hybrid composites.

Keywords: Microstructure, Porosity, Hardness, Composite, Al6061, SiC, Al₂O₃, Powder of tile

1. Giriş

Yaşadığımız dünyada var olan hammadde ve enerji kaynakları sınırlı olmasına rağmen yenilenememektedir. Nüfusun artmasıyla birlikte artan enerji ihtiyacının büyük bir bölümü petrol ürünleri ve katı yakıtlardan karşılanmaya çalışılmaktadır. Yenilenebilir enerji ile ilgili çalışmalar artarak devam etmesine rağmen dünyamızın tüm

enerji ihtiyacının yalnızca küçük bir bölümü yenilenebilir enerjiden karşılanmaktadır. Enerji ihtiyacı problemi için olası çözüm yöntemlerinden birisi de atıkların yeniden değerlendirilerek kullanımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde atıkların hammadde olarak değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir.

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir [1]. Kompozit malzemeler matris ve takviye fazı olmak üzere iki fazdan meydana gelirler. Kompozit malzemeler takviyelerine göre partikül takviyeli ve fiber takviyeli olmak üzere iki şekilde ifade edilirler. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerde, matris yük taşıma özeliğine sahiptir. Takviye faz ise matrisi deformasyona uğratarak metal matrisin mukavemetini artırmaktadır [2].

SiC ve Al₂O₃, alüminyum matrisli kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak sıklıkla kullanılmakta olan seramiklerin başında yer almaktadır. Bu çalışmada geleneksel takviye malzemeleri olan SiC ve Al₂O₃'e alternatif olabilecek hiçbir ticari değeri olmayan atık kiremitler toz haline getirilerek kompozit üretiminde takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Makine elemanlarının ömürleri genellikle elemanda meydana gelen aşınma ile değerlendirilmektedir. Bir parça aşınmaya maruz kalıyorsa aşınma miktarına bağlı olarak kullanım ömrü kısalmaktadır. Bu yüzden makine elemanlarının üretildikleri malzemelerin aşınma dayanımlarının artırılması makinelerin kullanım ömürlerinin de artması anlamına gelmektedir.

Mondal, D.P., ve Das, S., 2005 yılında yaptıkları çalışmada; 25-50 ve 50-80 µm tane boyutuna sahip SiC'ü takviye malzemesi Al alaşımını ise matris malzemesi olarak kullanıp kompozitler üretmişlerdir. Yük, takviye elemanın tane boyutu ve takviye hacim oranının değişimi ile yüksek basınçtaki abrasiv aşınma miktarının değişimini incelemişlerdir. Takviye hacim oranı olarak %5-12 arasında değişen oranları kullanmışlar ve SiC'ün takviye hacim oranının artması ile abrasiv aşınma miktarının düştüğünü belirlemişlerdir. Yüke göre hem alaşımın hem de kompozitin abrasiv aşınma miktarının lineer olarak arttığını tespit etmişlerdir. Abrasiv ebadına göre ise aşınmanın sabit olduğunu ancak kritik abrasiv ebadından sonra geçiş olduğunu ve elde edilen sonuçlar ile elde edilen denklemler ve aşınma yüzeyinin incelenmesi ile benzer olduğunu belirtmişlerdir [3].

İpek, R., 2005 yılında yayınladığı çalışmasında; matris malzemesi olarak kullandığı Al1417 alaşımına, SiC ve B4C karbürlerini %10, %15 ve %20 oranlarında ilave etmiştir. Kompozitlerin üretiminde sıvı hal metal matrisli kompozit üretim yöntemlerinden birini kullanmış ve kuru sürtünmeli aşınma miktarlarını ölçmüştür. Benzer aşınma deney koşullarında Al1417

alaşımında yüksek miktarda abrasiv ve adhesiv aşınma gözlemlerken buna karşın B4C takviyeli kompozit de az miktarda adhesiv aşınma meydana geldiğini belirlemiştir. SiC takviye elemanının matris tarafından ıslatılabilirliğinin artmasının kompozitin aşınma direncini arttırdığını ve yüksek ıslatılabilirlik ile matris takviye arasında iyi bir yapışma olduğundan sürtünme esasında partiküllerin matristen kopmasının zorlaşması ile aşınma mekanizmasının da değiştiğini belirlemiştir. Benzer şartlarda üretilen %20 SiC ve %20 B4C içeren kompozitlerin aşınma miktarları karşılaştırıldığında %20 B4C içeren kompozitin, %20 SiC içeren kompozitten daha fazla aşındığını belirlemiştir [4].

Singh, M., Mondal, D. P., Modi, O. P., Jha, A. K., 2002 yılında yayınladıkları makalelerinde; Al alaşımına %10 silimanite partikülleri ağırlıkça ekleyerek döküm yöntemi ile ürettikleri kompozitlerin abrasiv aşınma miktarlarını; uygulanan yük, kayma mesafesi ve abrasiv boyutunun değişimine göre değerlendirmişlerdir. Kayma mesafesindeki artışın, kompozitin aşınma miktarını belli bir değere kadar azalttığını ve söz konusu değerden sonra kayma mesafesinin artmasının abrasiv aşınma miktarını değiştirmediğini belirlemişlerdir. Buna rağmen uygulanan yük değerindeki artış miktarının kompozitin abrasiv aşınma miktarını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Abrasiv boyutu 25µm için gerçekleştirilen abrasiv aşınma testinde üretilen tüm kompozit numuneleri için aşınma miktarı alaşımın aşınma miktarından daha az olduğunu bildirmişlerdir. Abrasiv boyutunu 200µm'ye çıkardıklarında ise abrasiv aşınma testinde kompozitlerin aşınma miktarlarının alaşımın aşınma miktarından daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Abrasiv boyutuna bağlı olarak gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda, uygulanan yük miktarının düşük ve orta derecede olduğu testlerde üretilen kompozitler yüksek oranda aşınma direnci göstermiş ancak uygulanan yük miktarının yüksek değerlerinde kompozitin aşınma miktarı kadar aşınma direnci gösteremediğini bildirmişlerdir [5].

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzeme

6061 alaşımı; 2024 veya 1100 (Saf Alüminyum) alaşımlarına göre daha sık kullanılmaktadır. 2024 alaşımı yüksek mukavemet, 1100 alaşımı üstün darbe dayanımı, 6061 ise çok iyi mukavemet ve tokluk kombinasyonu ile korozyon dayanımı sağlamaktadır [7]. Al 6061 Kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Al6061 mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Al 6061 Kimyasal bileşimi [8]

Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,5	0,6-1,0	0,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,6-1,1	0,1	0,15	Kalan

Tablo 2. Al 6061 Mekanik özellikleri [9]

Temper	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%50)	Sertlik (Brinel)
0	103-228	55-124	26	30
T4	110-140	180-230	24	65
T6	240-270	260-310	20	95

T4; Eriyik işleminden sonra oda sıcaklığında doğal yaşlandırılmış,

T6; Eriyik işlemi ve yapay yaşlandırma,

Al 6061 ısıl işlenebilir, Al-Mg-Si alaşımıdır. Yüksek dayanım/ağırlık oranı, çok iyi süneklik, mükemmel kaynak edilebilirlik, iyi korozyon direnci ve şekil değiştirme kararlılığı gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir [7].

Al ve alaşımları, kolay temin edilebilen SiC, Al₂O₃, SiO₂ ve grafit gibi takviye malzemeleriyle kimyasal ve fiziksel olarak uygunluk gösterdiklerinden dolayı matris olarak daha çok tercih edilmektedirler [10].

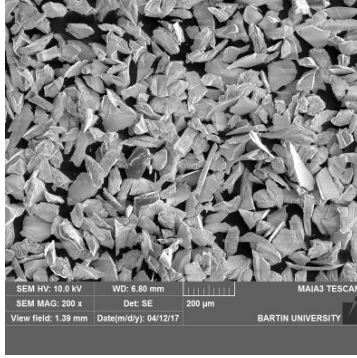
Refrakter alümina nötr veya atmosfer refrakter olarak sınıflandırılır. Alümina hem oksitleyici hem de indirgeyici atmosferlerde en kararlı oksitlerden biridir. Ucuzluğu, ergime noktası, sağlığa zarar vermesi ve uygulanabilirliği kolaylıkla refrakter safiyetinde bulunabilirliği alüminayı refrakter uygulamalarda üstün özellikte kılmaktadır. Alümina ticari

derecelerde (>1800°C) kullanılabilen saf refrakter oksitlerden birisidir. Alümina refrakterler; yüksek alaşımlı, fused döküm alümina refrakterleri, mullit refrakterleri, spinel ve alümina-kromit refrakterleri olarak sınıflandırılırlar [11]. Al₂O₃ Mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Al₂O₃'in Mekanik özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	3,8 – 3,9
Vickers sertlik (GPa)	15 – 16
Basma Mukavemeti (MPa)	2500

Numune üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan Al₂O₃'in elektron mikroskopu görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.

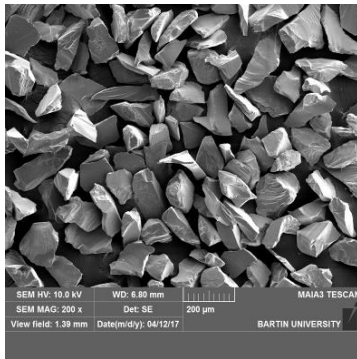
Şekil 1. Al₂O₃'ün Elektron mikroskobu görüntüsü

Silisyum Karbür (SiC), yüksek sıcaklıklarda ulaştığı, iyi mekanik özelliklerle ileri teknoloji seramiklerinin en önemlileri arasında yerini almış bir malzemedir. Aşındırıcı bir toz olarak, aşındırıcı takım malzemelerinde ve parlatma işlemlerinde kullanılmaktadır. Silisyum Karbür elmas ve bor karbürden daha düşük sertliğe sahip olmakla beraber, çok geniş bir biçimde metal dışı malzemelerin öğütülmesinde, sert malzemelerin son işleme kademelerinde ve seramik parçalarda üretim maliyetinin önemli olduğu zamanlarda dolgu olarak kullanılır [12]. Silisyum karbür'ün tipik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Silisyum karbür'ün tipik özellikleri [11]

Özellikler	Silisyum Karbür (SiC)
Yoğunluk, gr/cm ³	3.1 - 3.22
Silisyum Karbür içeriği, %	97.80
Karbon içeriği, %	0.20 - 0.80
Renk	Siyah
Eğme mukavemeti (Mpa)	400-410
Sertlik, kg/mm ² , Vickers	3100

Numune üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan SiC'ün elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. SiC'ün Elektron mikroskobu görüntüsü

Kiremit tozunun hammaddesi olan kırmızı çamurun kimyasal ve mineralojik bileşimi boksitin ayrı kompozisyonlarından ve uygulanan teknolojiye etkilenir. Boksitlerin çözünürleştirilmeleri sırasında toplam alüminanın % 76-93 kadarki alüminat çözeltisinde sıvı faza geçer. Boksitteki silis, sodyum alüminat çözeltisiyle reaksiyona girerek çeşitli kompozisyonlardaki sodyum alüminyum silikatlar halinde katı faza geçer ve boksit artığının temelini oluşturur. Boksitin diğer ana bileşenleri, örneğin demir ve titanda katı fazda kalırlar. Ayrıca galyum, vanadyum, fosfor, nikel, krom, magnezyum gibi boksitte az miktarda bulunan diğer safsızlıklarda boksit artığında bulunur [13].

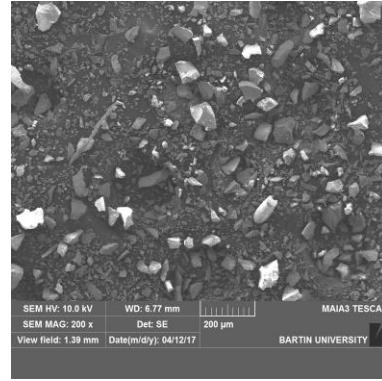
Boksit artığının iki ana bileşeni Na ve Ca genellikle boksitte bulunmayıp artığa teknolojik işlemler sonucu, kısmen desilikasyon reaksiyonuyla, kısmen çözünürleştirme katkı maddesi veya kısmen de sinterleştirilecek karışımın bileşeni olarak geçerler. Boksit artığının kimyasal bileşimi çok değişmektedir. Bayer prosesinde

oluşan kiremit tozunun hammaddesi olan kırmızı çamurların ana bileşenleri tablo da verilmiştir [14]. Kiremit tozunun kimyasal bileşimi Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kiremit tozunun kimyasal bileşimi

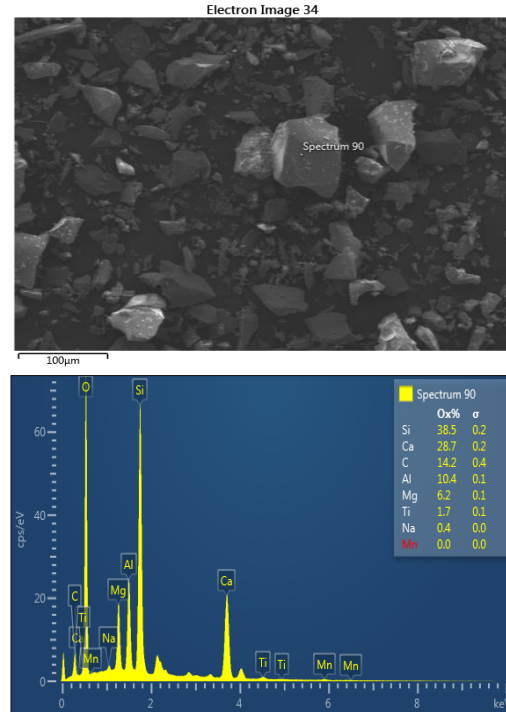
Bileşik	Miktar(%) (Kuru Bazda)
Fe ₂ O ₃	30-60
Al ₂ O ₃	5-20
SiO ₂	1-20
Na ₂ O	1-10
TiO ₂	Eser miktarda
CaO	2-8

Numune üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan kiremit tozunun elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kiremit tozunun elektron mikroskobu görüntüsü

Kiremit tozunun SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 4'te verilmiştir.



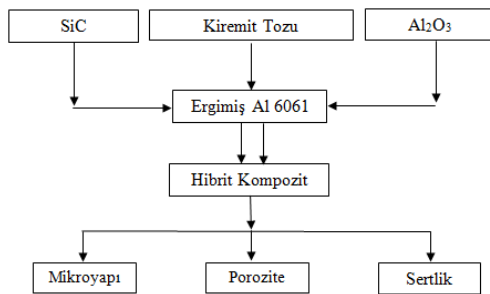
Şekil 4. Kiremit tozunun SEM görüntüsü ve EDS analiz görüntüsü

2.2. Kompozit Üretimi

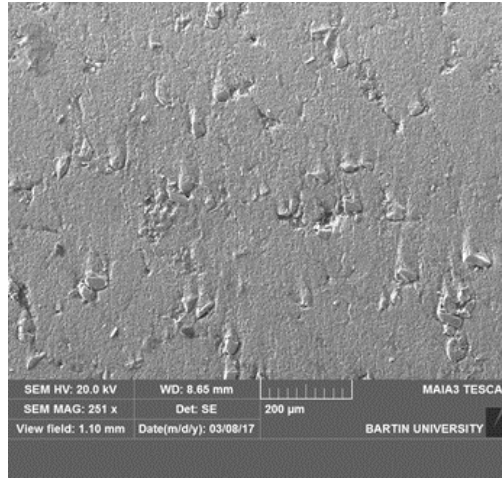
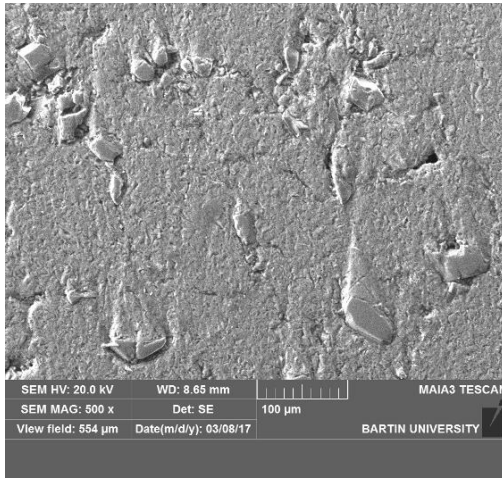
Metal matrisli kompozitlerin ticari amaçlı üretilmesini kısıtlayan faktörlerin oldukça fazla olması sebebiyle, gelişmiş mekanik

özelliklerin kaybedilmeden ekonomiklik kazandırılması amacıyla birçok üretim metodu geliştirilmekte ve MMK malzemelerin üretim maliyetlerini en aza indirmenin yolları araştırılmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmalarda öncelikli hedef matris içine yapılan takviyelerin homojen olarak dağılımlarını sağlamak olmaktadır [15].

Kompozit malzemelerin üretiminde farklı yöntemler kullanılabilir. Düşük maliyeti ve temel döküm tekniklerinin kullanımına olanak tanınması sebebiyle sıvı faz üretim yöntemleri, MMK malzemelerin üretiminde talep görmektedir. Ancak bu yöntemlerle MMK malzemelerin başarılı bir şekilde üretilmesi için öncelikle matris/takviye ara yüzeyinden kaynaklanan güçlüklerin aşılması gerekmektedir. Ara yüzey, MMK malzemelerde pek çok özelliği kontrol eden ve bu malzemelerin performansı açısından kilit önem taşıyan bölgedir. Alüminyum ve alaşımları, MMK malzemeler içinde en çok talep gören matris malzemeleridir. SiC ve Al₂O₃, alüminyum matrisli kompozitler (AMK) içinde üzerinde en çok çalışılan takviye malzemeleridir [16].



Şekil 5. Kompozit üretim yöntemi ve aşamaları



Şekil 7. Kompozitlerin elektron mikroskobu görüntüsü

Takviye elemanlarının bazı bölgelerde homojen dağılmadığı ve bazı bölgelerde itilerek kümelenmiş görülmektedir. Bunun nedeni yetersiz soğuma hızından dolayı katılaşmanın takviye elemanlarının katılaşma sırasında hareket etmesine imkan verecek kadar yavaş bir sürede gerçekleşmesi ve Al6061 alaşımı dentritlerinin takviye elemanlarını dentritler arasında kalan bölgelere itmesi olabilir.

3.2. Porozite

Al 6061'in yoğunluğu ile SiC, Al₂O₃ ve mermer tozunun yoğunlukları ile kompozit deki % oranları göz önüne alınarak kompozitlerin teorik yoğunlukları aşağıdaki formül ile hesaplandı.

$$\rho_{teorik} = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Hibrit kompozit üretimi için iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde matris olarak kullanılacak olan alüminyum alaşım (Al 6061) elektrik dirençli fırında grafit potada 700°C de ergitilmiş, daha sonra sıcaklık 600°C ye düşürülerek bu sıcaklıkta takviye elemanı olarak 22-59 µm tane büyüklüğüne sahip kiremit tozu, alüminyum oksit (Al₂O₃) ve silisyum karbür (SiC) tozlar ilave edilmiştir. Bulamaç halindeki karışım elle karıştırıldıktan sonra sıcaklığı 800°C ye çıkartılmış (süper ısıtma) ve bu sıcaklıkta 250 dev/dk hızla mekanik olarak karıştırılmıştır (Şekil 6). Karışım daha önceden 250°C sıcaklığa ısıtılmış olan metal kalıba dökülerek 300 mm uzunluğunda ve 32 mm çapında silindirik numuneler üretilmiştir. Üretilen silindirik numuneler CNC torna tezgahında 30 mm çapında aşınma numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 6. Karıştırmalı döküm ünitesi ve kalıptan çıkmış numune

3. Sonuç ve Öneriler

3.1. Mikroyapı

Kompozitlerin mikroyapılarını incelemek için FEI Quanta FEG 450 marka elektron mikroskobu kullanılmıştır. Kompozitlere ait elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir.

Kompozitlerin deneysel yoğunlukları ise 0,0001 hassasiyete sahip hassas terazi ve dijital termometre kullanılarak Arşimet prensibiyle hesaplandı. Bu metotta numunenin ağırlığı önce normal daha sonra suda tartıldı. tartıldı. Numunenin tartıldığı suyun o anki sıcaklığa karşılık gelen yoğunluğu (f) dikkate alınarak aşağıdaki formülle hesaplandı.

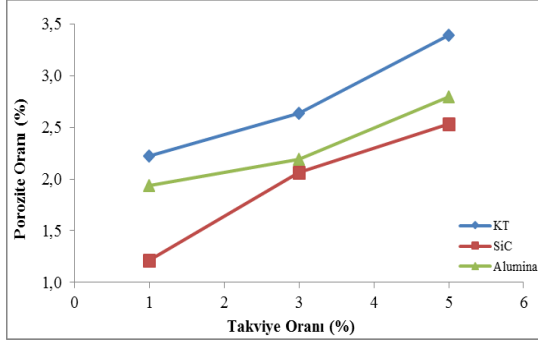
$$\rho_{deneysel} = \frac{G(\text{havada})}{G(\text{havada}) - G(\text{suda})} \times (f) \quad (2)$$

Kompozitin teorik ve gerçek yoğunlukları kullanılarak aşağıdaki formülle numunelerin porozite oranları belirlendi.

$$\%porozite = \frac{\rho_{teo.} - \rho_{den.}}{\rho_{teo.}} \times 100 \quad (3)$$

3.2.1. Takviye Elemanlarının Tekli Kompozitin Porozite Miktarına Etkisi

Kiremit tozu, alümina ve SiC takviye elemanlarının kompozitin porozitesine etkisi şekil 8'de gösterilmektedir.

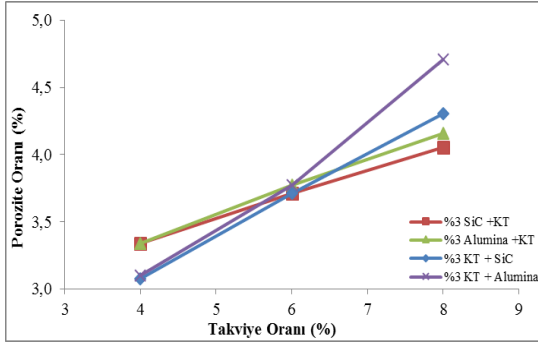


Şekil 8. Takviye elemanlarının kompozitin porozitesine etkisi

Üretilen tekli kompozitlerde; takviye malzemesi olarak kiremit tozu kullanıldığında takviye oranı %1'den %5'e değişirken; porozite oranı % 2,2201'den % 3,3928'e değerine yükselmiştir. Al₂O₃ takviyeli kompozitlerde Al₂O₃ oranı %1'den %5'e değişirken; porozite oranı % 1,9371'den % 2,7945'e yükselmiştir. Takviye malzemesi olarak SiC kullanılan kompozitler de SiC oranı %1'den %5'e değişirken; porozite oranı % 1,2112'den % 2,5329'a değerine artmıştır.

Takviye elemanlarının kompozitin porozite miktarına etkisi değerlendirildiğinde, en yüksek porozite miktarlarına kiremit tozunda ikinci sırada Al₂O₃ en düşük değerinde ise SiC'in olduğu gözlemlenmiştir, bu sıralamanın seçtiğimiz matris ile takviyelerinin yoğunluk farkından dolayı olduğu düşünülmektedir. Takviye malzemesi oranı artırıldıkça porozite miktarında artış olduğu görülmüştür. Takviye hacim oranının artması ile porozite miktarında artış olduğu benzer şekilde İ. Karademir vd. [17] tarafından da belirtilmiştir.

3.2.2. Takviye Elemanlarının İkili Kompozitin Porozite Miktarına Etkisi



Şekil 9. Takviye elemanlarının ikili hibrit kompozitin porozitesine etkisi

Takviye elemanlarının ikili hibrit kompozitin porozitesine etkisi değerlendirildiğinde, %3 kiremit tozu ve %1 SiC takviyeli numunenin porozite değeri 3,0736, %3 kiremit tozu ve %1 Al₂O₃ takviyeli numunenin porozite değeri 3,0992 olmuştur. %3 kiremit tozu takviyeli İkili hibrit kompozitte %1 Al₂O₃ takviyesi poroziteyi %1 SiC takviyesine göre daha fazla artırdığı görülmüştür.

%3 kiremit tozu ve %5 SiC takviyeli numunenin porozite değeri 4,3079, %3 kiremit tozu ve %5 Al₂O₃ takviyeli numunenin porozite değeri 4,7079 olmuştur. %3 kiremit tozu takviyeli İkili hibrit kompozitte %5 Al₂O₃ takviyesi poroziteyi %5 SiC takviyesine göre daha fazla artırdığı görülmüştür.

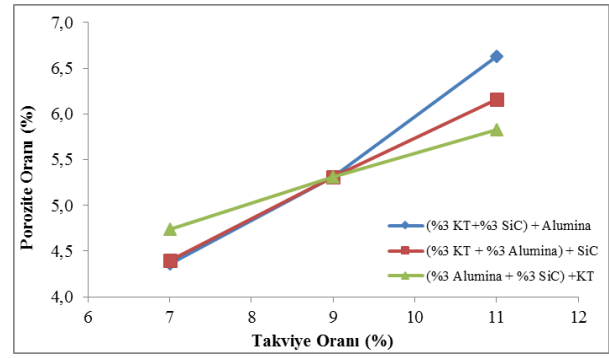
%3 SiC ve %1 kiremit tozu takviyeli numunenin porozite değeri 3,3415, %3 Al₂O₃ ve %1 kiremit tozu takviyeli numunenin

porozite değeri 3,3384 olmuştur. %3 SiC takviyeli ve %3 Al₂O₃ takviyeli hibrit kompozitlere %1 kiremit tozu takviyesi; %3 Al₂O₃'li hibrit kompozitin porozitesini, %3 SiC takviyeli hibrit kompozite göre daha fazla artırdığı görülmüştür.

%3 SiC ve %5 kiremit tozu takviyeli numunenin porozite değeri 4,0562, %3 Al₂O₃ ve %5 kiremit tozu takviyeli numunenin porozite değeri 4,1594 olmuştur. %3 SiC takviyeli ve %3 Al₂O₃ takviyeli hibrit kompozitlere %5 kiremit tozu takviyesi %3'lük Al₂O₃'li hibrit kompozitin porozitesini %3 SiC takviyeli hibrit kompozite göre daha fazla artırdığı görülmüştür. Porozite değeri yüksek olan %3 kiremit tozu ve %5 Al₂O₃ takviyeli hibrit kompozit, düşük olan ise %3 SiC ve %5 kiremit tozu takviyeli hibrit kompozit olmuştur. Bunun gerçekleşmesinin matris ile takviyelerinin yoğunluk farkından dolayı olduğu düşünülmektedir. Takviye malzemesi oranı artırıldıkça porozite miktarında artış olduğu görülmüştür.

3.2.3. Takviye Elemanlarının Üçlü Kompozitin Porozite Miktarına Etkisi

Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin porozitesine etkisi Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin porozitesine etkisi

Üretilen üçlü hibrit kompozitlerde; %3 kiremit tozu, %3 SiC ve %1 Al₂O₃ takviyeli numunenin porozite değeri 4,3622 değerine Al₂O₃ takviyesinin oranını %5'e çıkardığımızda 6,6266'ya çıkmaktadır.

%3 kiremit tozu, %3 Al₂O₃ ve %1 SiC takviyeli numunenin porozite değeri 4,3972'ye SiC takviyesinin oranını %5'e çıkardığımızda 6,1632'ye çıkmaktadır.

%3 SiC, %3 Al₂O₃ ve %1 kiremit tozu takviyeli numunenin porozite değeri 4,7394'ye kiremit tozu takviyesinin oranını %5'e çıkardığımızda 5,8288'ye çıkmaktadır.

En düşük porozite değeri %3 kiremit tozu, %3 SiC, %1 Al₂O₃ takviyeli malzemede, en yüksek porozite değeri %3 kiremit tozu, %3 SiC, %5 Al₂O₃ takviyeli malzemede görülmüştür. Bunun nedeni takviye oranlarının farklı olması ve matrisle takviye malzemelerinin yoğunluk farkının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

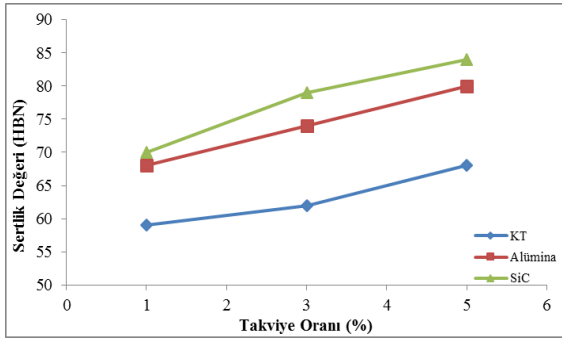
3.3. Sertlik

Sertlik izafi bir ölçü olup malzemelerin çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye karşı gösterdiği dirence denir. Laboratuvarlarda özel cihazlarla yapılan sertlik ölçmelerindeki değer, malzemenin plastik deformasyona karşı göstermiş olduğu dirençtir. Brinell sertlik deneyi malzeme yüzeyine belirli bir yükün (F') belirli bir çaptaki (D) sert malzemeden yapılmış bir bilya yardımıyla belirli bir süre uygulanması sonucu yüzeyde kalıcı bir iz (d) meydana getirme esasına dayanır. Daha sonra bu kuvvetin oluşturduğu izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri elde edilir.

$$BSD = \frac{F}{y} = \frac{2F}{\pi.D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

3.3.1. Takviye Elemanlarının Tekli Kompozitin Sertlik Değerine Etkisi

Kiremit tozu, alümina ve SiC takviye elemanlarının kompozitin sertliğine etkisi Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Takviye elemanlarının kompozitin sertliğine etkisi

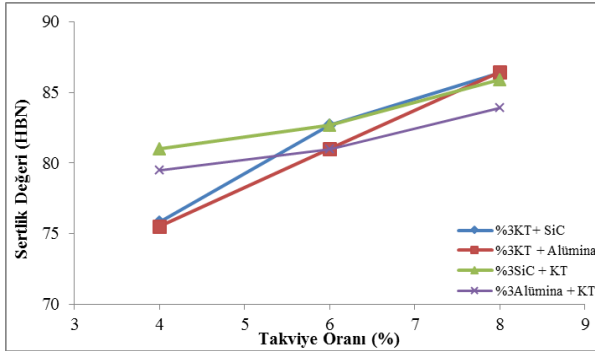
Hazırlanan Al6061 numunesinin sertlik değeri 58 HBN olarak ölçülmüştür. %1 kiremit tozu takviyeli numunede sertlik değerini 59 HBN'ye, %3 kiremit tozu takviyeli numunede sertlik değerini 62 HBN'ye, %5 kiremit tozu takviyeli numunede sertlik değerini 68 HBN'ye yükselmiştir.

%1 Al₂O₃ takviyeli numunede ise sertlik değeri 68 HBN'ye, %3 Al₂O₃ takviyesi sertlik değerini 74 HBN'ye, %5 Al₂O₃ takviyesi ise sertlik değerini 80 HBN'ye yükselttiği.

%1 SiC takviyesi sertlik değerini 70 HBN'ye, %3 SiC takviyesi sertlik değerini 79 HBN'ye, %5 SiC takviyesi sertlik değerini 84 HBN'ye yükselmiştir. Kiremit tozu, SiC ve Al₂O₃ kadar sertliği artırmasa bile matrise ilave edilen % 5'lik kiremit tozu sertliğe % 17'lik artışa sebep olmuştur.

3.3.2. Takviye Elemanlarının İkili Kompozitin Sertlik Değerine Etkisi

Takviye elemanlarının ikili hibrit kompozitin sertliğine etkisi Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Takviye elemanlarının ikili hibrit kompozitin sertliğine etkisi

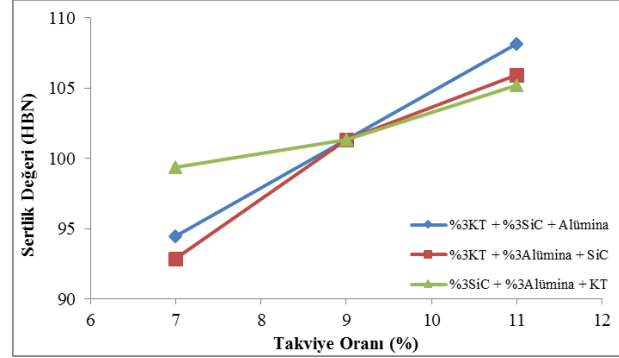
Hazırlanan numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde %3 kiremit tozu ve %1 Al₂O₃ takviyeli numunemizin sertlik değerinin 75 HBN'e, %3 kiremit tozu ve %5 Al₂O₃'lü takviyeli kompozitin sertlik değerinin 86 HBN'e deşerinde olduğu, %3 kiremit tozu ve %1 SiC'lü takviyeli kompozitin sertlik değerinin 76 HBN, %3 kiremit tozu ve %5 SiC'lü takviyeli numunenin sertlik değerinin 86 HBN olduğu belirlendi. %3 kiremit tozu ve %5 Al₂O₃ takviyeli numunemiz ile %3 kiremit tozu ve %5 SiC takviyeli numunelerin sertlik değeri aynı çıkmıştır böyle bir sonuç çıkmasının nedeninin dökümsel bir hatadan kaynaklandığı düşünölmektedir.

%3 SiC ve %1 kiremit tozu takviyeli numunemizin sertlik değerinin 81 HBN, %3 Al₂O₃ ve %1 kiremit tozu takviyeli kompozitin sertlik değerinin 79 HBN olduğu belirlendi. %3 SiC ve %5 kiremit tozu takviyeli numunemizin sertlik değerinin 86 HBN,

%3 Al₂O₃ ve %5 kiremit tozu takviyeli kompozitin sertlik değerinin 84 HBN olduğu belirlendi. Kiremit tozu ikili hibrit kompozit malzeme üretiminde Al₂O₃ ve SiC takviye malzemesi gibi sertliği artıran bir takviye malzemesi olduğu öngörülmektedir.

3.3.3. Takviye Elemanlarının Üçlü Kompozitin Sertlik Değerine Etkisi

Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin sertliğine etki değerleri Şekil 13'de gösterilmektedir.



Şekil 13. Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin sertliğine etkisi

Hazırlanan numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde %3 kiremit tozu takviyeli ve %3 SiC takviyeli malzemeye %1 Al₂O₃ takviyesi numunemizin sertlik değerinin 94 HBN'e, %5 Al₂O₃ takviyesi numunemizi sertlik değerini 108 HBN'e artırdığı göröldü.

%3 kiremit tozu takviyeli ve %3 Al₂O₃ takviyeli malzemeye %1 SiC takviyesi numunemizin sertlik değerinin 93 HBN'e, %5 SiC takviyesi numunemizi sertlik değerini 106 HBN'e artırdığı göröldü.

%3 SiC takviyeli ve %3 Al₂O₃ takviyeli malzemeye %1 kiremit tozu takviyesi numunemizin sertlik değerinin 99 HBN'e, %5 kiremit tozu takviyesi numunemizi sertlik değerini 105 HBN'e artırdığı göröldü. Kiremit tozu üçlü hibrit kompozit malzeme üretiminde Al₂O₃ ve SiC takviye malzemesi gibi sertliği artıran takviye malzemesi olduğu öngörülmektedir.

İleriki çalışmalarda H. Çetin vd. [18] yaptığı çalışmada kapak malzemesi olarak kullandıkları tantalyum sahip olduğu üstün korozyon direnci nedeniyle takviye elemanı olarak kullanılabilir.

Kaynaklar

1. Ünal, K., "Birleştirilmiş kompozit parçaların kırılma mekaniği analizi", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2012.
2. Lloyd, D., "Particle-reinforced aluminum and magnesium matrix composites", International Materials Review, 1992.
3. Mondal, D.P. and Das, S., "High stress wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect of experimental parameters, particle size and volume fraction", Tribology International, 1-9, 2005.
4. İpek, R., "Adhesive wear behaviour of B₄C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B₄C-Al/ SiC)", Materials Proc. Tech., 162-163: 71-75, 2005.
5. Singh, M., Mondal, D.P., Modi, O.P. and Jha, A.K., "Two-body abrasive wear behaviour of aluminium alloy-silimanite particle reinforced composite", Wear., 253: 357-368, 2002.
6. Schwartz, M. M., Composite Materials Volume I: Properties, Nondestructive Testing and Repair, Prentice-Hall PTR Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1997.
7. Altuner, S, Keleşođlu, E., Pruduction Of Y2O3 Coated Al₂O₃ Reinforced Aluminium Matrix Composites and the Coating of Interface Effects Over Wettability Properties. PhD Research Article, Journal of Engineering and Natural Sciences,

- Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 30, s. 252-258, 2012.
8. Seykoç Alüminyum. <http://www.seykoc.com.tr/aluminyum-aliasimlar/6061.aspx>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2017.
 9. www.aryametal.com Son Erişim Tarihi: 10.06.2017.
 10. Kök, M., Al₂O₃ Partikül Takviyeli 2024 Alüminyum Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi. Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 4, Sayı 2. s. 131-142, 2001.
 11. Hart, L. D., "Alumina Chemicals: Science and Technology Handbook", American Ceramic Society ,Ohio, 278-283, 1990.
 12. Ögünç H., "Sıcak Presleme İle Sinterlenmiş α -SiC Matrisli B₄C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2006.
 13. Akıncı, A., "Polimer Matriksli Kompozitlerde Katkı Malzemelerinin Yapı ve Özelliklere Etkisi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2004.
 14. Aksu, S., "Kırmızı Çamur Bileşenlerinin Hidroklorik Asit Çözeltilisindeki Çözünürlükleri", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2001.
 15. Akın, G., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı, İstanbul, 2006.
 16. Toptan, F., "Alüminyum Matrisli B₄C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi", Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı, İstanbul, 2011.
 17. Karademir, İ., Ateş, S., "SiO₂ Takviyeli Etial 21 Esaslı Kompozit Malzemelerin Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi", Journal of Engineering and Technological Sciences, 2014/1.
 18. Çetin, H., Ross, R. G., "The Phase Diagram of Na-Zn Alloys", Journal of Phase Equilibria, Vol 12, No 1, 1991.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Lipaz Enzimi ve Plazma Teknolojisinin FDY (Fully Drawn Yarn – Tam Çekimli İplik) Poliester İpliğın Boyanmasına Etkisi

Ramazan GÖMEÇ¹, Resul FETTAHOV², Müslüm KAPLAN^{2*}

¹Aydın Mensucat A. Ş., İstanbul / TÜRKİYE

²Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 04.10.2017 Düzeltme Tarihi: 07.11.2017 Kabul Tarihi: 14.11.2017

Özet

FDY (Fully Drawn Yarn-Tam Çekimli iplik) poliester yüksek parlaklıktaki görünümü nedeniyle tekstil endüstrisinde, özellikle de ev tekstili sektöründe oldukça fazla miktarda kullanılmaktadır. Ancak bu iplik bükümsüz haldeyken boyanamamaktadır. Bu ipliklerin boyama işleminin gerçekleştirilmesi için uygulanan büküm işlemi, ipliğın parlaklığının azalmasına, işletmelere ek maliyete ve zaman sarfiyatına neden olmaktadır. Cips olarak boyanması durumunda ise tedarikçi firmanın sunduğu renklerle sınırlı kalınmaktadır.

Bu çalışmada FDY poliester ipliğın lipaz enzimi ve plazma teknolojisi ile boyanabilirliği araştırılmıştır. Böylece ipliğe verilen büküm işlemi nedeniyle ortaya çıkan maliyet ve zaman sarfiyatının ve parlaklık azalmasının önlenmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçların spektrofotometrik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kısmen başarılı olunmuştur. Boyama sonucunda ipliklerde abrağ görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Poliester iplik üretimi, FDY poliester iplik boyama, Plazma teknolojisi, Lipaz enzimi

Effect of Lipase Enzyme and Plasma Technology on Dyeing of Polyester Fully Drawn Yarn (FDY)

Abstract

FDY (Fully Drawn Yarn) polyester is used in the textile industry, especially in the home textile sector, due to its high brightness appearance. However, this yarn cannot be painted while untwisted. The twisting process applied to realize the dyeing process leads to decrease in the brightness of the yarn, additional financial and time expenditure for the operations. In case of dyeing as chips it is limited to the colors offered by the supplier company.

In this study, the effect of Lipase enzyme and plasma technology on dyeability of FDY Polyester was investigated. Thus, it is aimed to avoid the cost and time consumption and the decrease of brightness caused by the twisting process given to the yarn. Spectrophotometric measurements of the obtained results were performed. The study has been partially successful and abrağ was observed in the yarns as a result of dyeing.

Keywords: Polyester yarn production, FDY polyester yarn dyeing, Plasma technology, Lipase enzyme

1. Giriş

Tekstil endüstrisinde FDY (Fully Drawn Yarn-Tam Çekimli İplik) Poliester filament iplikler yüksek görünümü nedeniyle özellikle ev tekstili sektöründe oldukça fazla miktarda kullanılmaktadır. Ancak bu iplik bükümsüz halde boyanamamaktadır. Boyama işlemi için yapılan büküm ipliğın parlaklığının azalmasına, işletmelere ek maliyete ve zaman sarfiyatına neden olmaktadır. Cips olarak boyama durumunda ise tedarikçi firmanın sunduğu renklerde sınırlı kalınmakla birlikte, stok maliyeti de işletmeye ek yük getirmektedir.

Tekstil endüstrisinde poliester lifleri, yüksek mukavemet, çekme dayanımı, kirlenmeye karşı dayanım, makinede yıkanabilirlik, kırışmazlık ve aşınma dayanımı gibi çok önemli avantajlara sahiptir [1]. Bu lifler çoğı düşük hidrofiliterine dayandırılan (Nem oranı: % 0.4) çeşitli dezavantajlara sahiptir. Düşük hidrofiliteri nedeniyle, PET kumaşların yüzeyi kolaylıkla ıslanmamakta ve bu da bitim işlemleri, yıkama ve boyama işlemlerinde bazı zorluklara yol açmaktadır [2]. Bu nedenle, liflerin boyanabilirliğini ve kuvvetli hidrofobik yapısıyla ilişkili diğer özelliklerini geliştirmek için poliesterin yüzey karakteristiklerini iyileştirecek yöntemler geliştirilmiştir. Lipaz enzimi ve plazma teknolojisi bu yöntemlere örnek olarak verilebilir.

Lipazlar hayvansal ve bitkisel yağların normal koşullar altında sentezi hidrolizini katalizleyen enzimlerdir. Bunun dışında esterifikasyon, transesterifikasyon gibi reaksiyonları da katalizlemektedir [3]. Düşük aktivasyon enerjileri sebebiyle lipazın

katalizlediği reaksiyonlar daha düşük sıcaklık ve nötral pH gerektirir [4]. Fakat bununla birlikte genellikle bu yöntemler, kimyasal maliyetleri, kullanılan cihazların enerji ve yatırım maliyetleri, materyalin mukavemeti ve diğer estetik özellikleri üzerindeki negatif etkileri gibi çeşitli eksiklikler içermiştir [1].

Yüzey modifikasyonu yöntemleri arasında bulunan alan plazma teknolojisi, tekstil materyallerine fonksiyonellik kazandırmak amacıyla uygulanan ve konvansiyonel yöntemlere göre su gereksiniminin olmaması, kimyasal kullanımının çok az olması, kısa işlem süresi gibi pek çok avantajı olan bir yöntemdir. Ayrıca plazma teknolojisi, toksik atığa sebep olmaması, tekstil materyalinin mekanik özelliklerine zarar vermemesi, işlemin sadece lif yüzeyinde etkili olması ve enerji tasarrufu sağlaması gibi avantajlara da sahiptir [5-10].

Bu çalışmada Bükümsüz FDY Poliester ipliğının boyanaabilirliğini araştırmak amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunun için Lipaz enzimi ve Plazma teknolojisinden yararlanılarak HT boyama yöntemine göre çeşitli boyama işlemleri yapılmıştır. Boyamalara göre elde edilen sonuçlar 160 t/m bükümlü FDY Poliester ipliklerin boyama sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Boyama işlemi için bükümsüz 96 filamentten oluşan 300 denier (300/96) tam çekimli (FDY) poliester ipliği kullanılmıştır. Bu ipliğın mukavemeti 10.31 Newton, elastikiyeti ise %25'dir.

Karşılaştırma yapılması için aynı FDY poliester ipliğin 160 tur/metre (t/m) bükümlü hali de kullanılmıştır. Bükümsüz poliester esaslı FDY ipliği, boyama işlemleri için İteks firmasından temin edilen lipaz enzimi kullanılmıştır. Boyama işlemleri Aydın Mensucat A.Ş boyahanesinde gerçekleştirilmiştir. İpliklerin spektrofotometrik ölçümleri Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.

Deneyleri gerçekleştirmek için plazma cihazı, iki farklı bobin boyama makinesi, bobin aktarma ve fiksaj makinelerinden istifade edilmiştir. Uygulamalarda kullanılan kimyasal maddeler, boyarmaddeler ve cihazlar sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 1. Uygulamalarda kullanılan kimyasallar ve boyarmaddeler

Maddenin Adı	Ticari Adı	Üretici Firma
Dispergator	Clearix PSX	Clarity
Egalizatör	Kimpol DAS 150	Kimteks
Oligomer Önleyici	Bypers GLO	-
İyon Tutucu	Kimpol CD 700	Kimteks
Asetik Asit	-	-
Lipaz Enzimi	-	-
Carrier	-	-
Boyarmadde	FRN Bril Yell Red-E	Acroma
Boyarmadde	FRN Red RD-E	Acroma
Boyarmadde	FRN Blue RD-S	Acroma

Tablo 2. Uygulamalarda kullanılan cihazlar

Kullanılan Cihaz	Üretici Firma
Plazma	Plasmatreteat
HT Boyama Makinesi	Bellini
HT Boyama Makinesi	Laip
Hassas Terazî	-
Bobin aktarma makinesi	SSM
Fiksaj Makinesi	Erturlar
Reflektans Spektrofotometresi	Datacolor (SF600+)

2.2. Metot

Bu çalışmada karşılaştırma yapılabilmesi için bükümlü, bükümsüz, lipaz enzimi ve plazma işlemi uygulanmış iplikler aynı şartlarda hazırlanmış HT boyama makinesinde ayrı ayrı boyanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için bükümlü, bükümsüz, lipaz enzimi uygulanmış, plazma işlemi uygulanmış iplikler aynı şartlarda hazırlanmış HT boyama makinesinde ayrı ayrı boyanmıştır.

Çalışmada kullanılan FDY poliester iplikler öncelikle bir fikse işleminden geçirilmiştir. Fikse şartları 125 °C'de 60 dk olarak uygulanmıştır. Fikse işleminden sonra lipaz enzimi ve plazma ile ön işlem gerçekleştirilmiştir. Ön işlemde geçirilen iplikler boyama ve redüktif yıkamadan sonra spektrofotometrede renk değerleri ölçülmüştür.

2.2.1. Lipaz Enzimi ile Ön İşlem Uygulaması

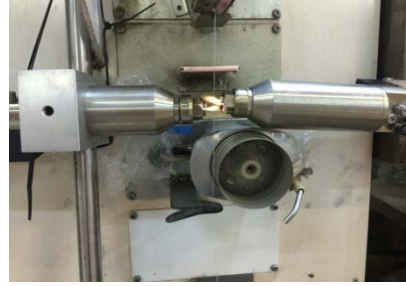
Fikselenmiş FDY poliester iplik 350 devir/dakika sarım hızı ve 10 cN bobin sarım sertliği koşulları altında SSM aktarma makinesinde delikli masuralara aktarılmıştır ve ardından enzim ile numune kazanında ön terbiye işlemi yapılmıştır. Bundan sonra enzim banyosu boşaltılarak yeni banyo ile boyamaya geçilmiştir. Numune kazanında lipaz enzimi ile yapılan ön işlem parametreleri Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Numune kazanında Lipaz enzimi ile yapılan ön işlem parametreleri

Koşullar/Kimyasal Maddeler	Konsantrasyon/Proses Koşulları
Lipaz Enzimi	%1 - %2
pH	4 - 8
Sıcaklık-Süre	40 °C-30 dk.
Banyo Oranı	1:20

2.2.2. Plazma Teknolojisi ile Ön İşlem Uygulaması

Ön işlem uygulaması olarak kullanılan bir diğer yöntem plazma uygulamasıdır. Fikselenmiş FDY poliester iplik 400 devir/dakika sarım hızı ve 15 cN bobin sarım sertliği koşulları altında SSM aktarma makinesinde delikli masuralara aktarılması sırasında plazma işlemine maruz bırakılmıştır (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. Fikselenmiş FDY poliester ipliğin plazma muamelesi

2.2.3. Boyama İşlemi

Farklı ön işlemlerden geçen FDY ipliklere HT dispers boyama uygulanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için tüm numunelere Tablo 4'te verilen kimyasal maddeler ve konsantrasyonlar uygulanmıştır. Boyama işlemine kullanılan makinenin etkisini görmek için Bellini ve Laip marka iki farklı makine kullanılmıştır.

Tablo 4. Uygulamada kullanılan cihazlar

Kimyasal Maddeler/Koşullar	Konsantrasyon/Proses Koşulları
Boyarmadde	%x (e.a.ü)
Dispergator	1,5 g/L
Egalizatör	0,3 g/L
Oligomer Önleyici	1 g/L
İyon Tutucu	1 g/L
Banyo Oranı	1:10
Sıcaklık	130 °C
Boyama Süresi	2 saat
pH	4,5-5 (Asetik asit)

Boyama işleminin ardından bağlanmayan boyarmaddelerin uzaklaştırılması için Tablo 5'de verilen şartlarda redüktif yıkama işlemi uygulanmıştır.

Tablo 5. Redüktif yıkama işlemi için gerekli koşullar ve kimyasal maddelerin konsantrasyonu

Kimyasal Maddeler/Koşullar	Konsantrasyon/Koşul
Sodyum Ditiyonit	2 g/L
Sodyum Hidroksit	2 g/L
Sıcaklık	90 °C
Banyo Oranı	1:10

2.2.4. Renk Ölçümü

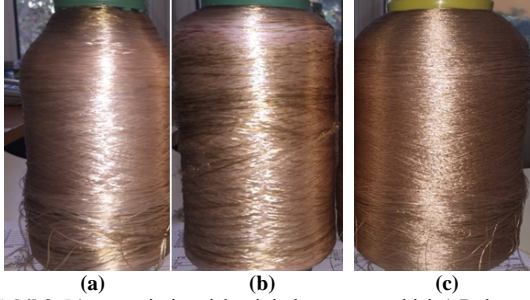
Bu çalışmada renk ölçümü için spektrofotometrik renk ölçümü tercih edilmiştir. Datacolor marka SF600X model renk ölçüm cihazında CIELab sistemine göre, D65 ışık kaynağı altında, 10° gözlem açısı ile yapılmıştır. L*, a*, b*, C*, h° ve tristimulus (X,Y,Z) değerleri kaydedilmiştir. CIELab birimleri cinsinden renk farklılıkları, aşağıdaki denklem 1'deki formül yardımıyla hesaplanmaktadır [11]:

$$\Delta E_{cmc}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h^*}{S_H}\right)^2} \quad (1)$$

S_L, S_C ve S_H, açıklık, parlaklık, koyuluk ve renk tonu için ana ağırlık faktörleridir. İki faktör l ve c sabittir ve kullanıcı tarafından tanımlanır ve ölçülen rengin tonuna göre parlaklığın ve koyuluğun önemini vurgular (Bu çalışmada CMC (2:1) kullanılmıştır).

3. Bulgular ve Tartışma

Boyama işlemi öncelikle bükümsüz ve ön işlem görmemiş poliester FDY iplik bobinlerine uygulanmıştır. Bu ipliklerin boya almadığı tespit edilmiştir. %1 lipaz enzimi ön işlemlilik bükümsüz halde boyanan iplik boyarmadde alımını ön işlem uygulanmamış bükümsüz ipliğe göre bir miktar artırdığı fakat abrajlı boyama gerçekleştiği görülmüştür. Bobinin iç kısımlarına doğru gidildikçe boyarmadde alımının azaldığı tespit edilmiştir. Lipaz enzimi %2'ye yükseltilerek yapılan çalışmada abrajın arttığı ve renk alımının iyiy gitmediği görülmüştür (Şekil 2). Tablo 6'da CIELab renk farkı değerleri verilmiştir.



Şekil 2. Lipaz enzimi ön işleminin boyamaya etkisi a) Bükümsüz ipliğe %1 enzim ile yapılan ön işlem sonrası boyama b) Bükümsüz ipliğe %2 Enzim ile yapılan ön işlem sonrası boyama

Tablo 6. Lipaz enzimi ile ön işlem yapılarak yapılan boyamalara ait renk farklılıkları

ΔE _{CMC (2:1)}		%1 Enzim ile yapılan Ön işlem sonrası Boyama	% 2 Enzim ile yapılan Ön işlem sonrası Boyama	
Referans Alınan Numune	Referans Boyama (160 tpm Bükümlü)	ΔE*	9,370	6,381
		ΔL*	8,402	6,119
		ΔC*	-4,136	-0,809
		ΔH*	-0,323	1,619

Plazma teknolojisi ile yapılan çalışmalarda; bobin sarım hızları değiştirilerek çeşitli boyamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda 400 dev/dk en uygun sarım hızı olduğu tespit edilmiştir. Daha düşük sarım hızlarında daha iyi bir boyama sonucu elde edilememiştir.

Boyama kalitesine yapılan fikse işleminin etkisinin incelenmesi için fikse işlemi uygulanmış ve uygulanmamış ipliklerle boyama işlemi gerçekleştirilmiştir. Boyama makinesinin etkisini incelemek için hem Bellini hem de Laip markalı bobin boyama makinelerinde boyama gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, makinenin ve ipliğe yapılan fikse işleminin boyamaya herhangi olumlu bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Fakat fiksesiz olan bobin, sıcaklığın etkisi ile kendisini çekerek daha da sertleşmiştir.



Şekil 3. Plazma ön işleminin boyamaya etkisi (1) Fikse+Plazma işlemi+Boyama, (2) Plazma işlemi+Boyama, (3) Fikse + Boyama (Boyama Laip boyama makinesinde gerçekleştirilmiştir)

Şekil 3'de fikse ve plazma (1) sadece plazma (2) ve sadece fikse işleminin geçtikten sonra boyama işlemine alınan bobinler verilmiştir. Tablo 7 ve Tablo 8'de sırasıyla Bellini ve Laip boyama makinelerinde gerçekleştirilen boyamalara ait CIELab renk farkı değerleri verilmiştir.

Tablo 7. Plazma ve fikse ön işlem uygulandıktan sonra yapılan boyamalara ait renk farklılıkları (Boyama Bellini boyama makinesinde gerçekleştirilmiştir).

ΔE _{CMC (2:1)}		Plazma İşlemi +Boyama	Fikse + Boyama	
Referans Alınan Numune	Fikse + Plazma İşlemi + Boyama	ΔE*	3,011	0,756
		ΔL*	-2,889	-0,738
		ΔC*	0,610	0,155
		ΔH*	0,586	0,040

Tablo 8. Plazma ve fikse ön işlem uygulandıktan sonra yapılan boyamalara ait renk farklılıkları (Boyama Laip boyama makinesinde gerçekleştirilmiştir)

ΔE _{CMC (2:1)}		Plazma İşlemi +Boyama	Fikse + Boyama	
Referans Alınan Numune	Fikse + Plazma İşlemi + Boyama	ΔE*	7,269	7,999
		ΔL*	6,959	7,810
		ΔC*	1,114	1,408
		ΔH*	-1,781	-1,008

Plazma ve fikse ön işlem çalışmalarında en iyi sonucu Fikse + Plazma + Boyama (1 nolu bobinler) işlemleri vermiştir. Fakat ipliğin iç kısımlarına doğru gidildikçe boyarmadde alımının azaldığı görülmüştür.

4. Sonuç

Enzim ile yapılan çalışmalarda; %1 enzim konsantrasyonuna sahip ön işlemlilik boyamalarda bükümsüz ipliğin en dış kesiminde boyarmadde alımının gerçekleştiği, bobinin iç kısımlarına doğru gidildikçe boyarmadde alımının azaldığı gözlenmiştir. Enzim konsantrasyonunun %2 değerinde aynı durum gözlenmiştir. Bobinin sarım sertliğinin bükümsüz FDY Poliester ipliğinin sarım işlemine etkisi de ele alınmıştır. Deney çalışmalarında bobinin sarım sertliği düşürüldüğü takdirde ipliğin bobin üzerinden aktığı, dolayısıyla homojen bir sarım işleminin gerçekleşmediği gözlenmiştir.

Plazma teknolojisi ile yapılan çalışmalarda; bobin sarım hızları değiştirilerek çeşitli boyamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda 400 dev/dk en uygun sarım hızı olduğu tespit edilmiştir. Makinenin ve ipliğe yapılan fikse işleminin boyamaya herhangi olumlu bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Fakat fiksesiz olan bobin sıcaklığın etkisi ile kendisini çekerek daha da sertleşmiştir.

Sonuç olarak abrajlı boyamanın yanı sıra spektrofotometrik ölçüm değerlendirme tablolarından da anlaşılacağı gibi referans numune ile aralarında renk farklılıkları da ortaya çıkmıştır. Bu nedenle daha sonraki çalışmalarda abraj ve renk farklılıklarının giderilmesine odaklanılması gerekmektedir. Ayrıca FDY Poliester ipliğin boyanması için farklı tekniklerin kullanımı da değerlendirilmelidir.

Kaynaklar

- Djordjevic, M. Petronijevic, Z., Cvetkovic, D., Polyester Fabric Modification by Some Lipases.Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 11/4, 183-188, 2005.
- Lee, S. and Song, W., Surface Modification of Polyester Fabrics by Enzyme Treatment, Fibers and Polymers, 11/1, 54-59, 2010.

3. Paiva, A.L., Balcao, V.M., Malcata F.X. Kinetics and mechanisms of reactions cataly-zed by immobilized lipases, *Enzyme and microbial technology*, 27, 187-204, 2000.
4. Öztürk, B., Lipaz Enzimi: Yapısal Özellikleri ve Uygulama Alanları, *Gıda Mühendisliği Dergisi*, 2002.
5. Schindler, W.D., Hauser, P. J., Flame-retardant finishes, *Chemical Finishing of Textiles*, 98-116, 2004.
6. Karmakar, S.R., *Chemical technology in the pre-treatment processes of textiles*, Westbengal, India, 1999.
7. Morent, R., Geyter, N.D., Verschuren, J., Clerck, K.D., Kiekens, P., Leys, C., Nonthermal plasma treatment of textiles, *Surface & Coatings Technology*, 202(14), 3427-3449, 2008.
8. Tsafack, M.J., Grützmacher, L.J., Towards Multifunctional Surfaces Using The Plasma- İnduced Graft-Polymerization (PIGP) Process: Flame and Waterproof Cotton Textiles, *Surface & Coatings Technology*, 201(12), 5789-5795, 2007.
9. Chaiwong, C., Tunma, S., Sangprasert, W., Nimmanpipug, P., Boonyawan, D., Graft polymerization of flame-retardant compound onto silk via plasma jet, *Surface & Coatings Technology*, 204(18-19), 2991-2995, 2010.
10. Bellini P., Bonetti F., Franzetti E. G., Rosace S. V. *Referans Books of Textile Technologies Finishing*, Milano, Italia, 2001.
11. Choudhury, A. K. R., *Principles of Colour and Appearance Measurement: Visual Measurement of Colour, Colour Comparison and Management*, Woodhead Publishing, 2014.



Bartın Üniversitesi

Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Economical Analysis of a Wind Farm Investment

Baranalp ÖZKAN, Mehmet Cabir AKKOYUNLU*

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 24.10.2017 Düzeltme Tarihi: 13.12.2017 Kabul Tarihi: 18.12.2017

Abstract

The increase of the energy demand, the decrease of fossil energy resources and, the increase of environmental problem are current challenges for Turkey. Therefore renewable energy sources like wind become more important. Using local wind data and by considering the factors that affect the total investment costs, the economic analysis of a wind farm investment which located in Çanakkale Turkey with installed power of 40 MW was conducted. Unit energy production cost was determined. Unit cost is a crucial factor for each investment; however profitability is the main goal of an investor. The effect of wind speed and current incentives regime in Turkish wind energy sector on wind turbine farm profitability was analyzed.

Keywords: Wind farm, Cost analysis, Profitability analysis, Turkey

Bir Rüzgar Çiftliği Yatırımının Ekonomik Analizi

Özet

Enerji talebinin artması, fosil enerji kaynaklarının azalması ve çevre sorununun artması Türkiye için mevcut zorluklardır. Bunları aşmakta rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları daha da önem kazanmaktadır. Yerel rüzgâr verilerini kullanarak ve toplam yatırım maliyetlerini etkileyen faktörleri göz önüne alarak, 40 MW kurulu gücü ile Çanakkale'de bulunan bir rüzgâr çiftliği yatırımının ekonomik analizi yapılmıştır. Birim enerji üretim maliyeti belirlendi. Birim maliyet her yatırım için çok önemli bir faktördür; Ancak bir yatırımcının temel amacı karlılıktır. Ülkemizdeki teşvik rejiminin ve rüzgâr hızının bir rüzgâr türbini çiftliğinin karlılığı üzerindeki etkisi analiz edildi.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar çiftliği, Maliyet analizi, Kararlılık analizi, Türkiye

1. Introduction

The "ability of a system to perform work" is a common description for energy. However, there are many other definitions of energy, depending on the context, such as thermal energy, radiant energy, electromagnetic, nuclear, etc. where definitions are derived that are the most convenient.

Energy sources are used as fuels. Fuel is burned in machinery to create motion (such as in a car) or heat (such as in a home heating system). When fuels are used for producing electricity, heat or motion causes a generator to rotate, creating electricity for everyday use in homes and businesses.

Energy sources can be classified into two types: nonrenewable and renewable. Nonrenewable sources, such as fossil fuels and nuclear material, are removed from the earth and can be depleted. These resources have been the most used type of energy in the modern era.

Renewable sources, such as wind, water, solar, and geothermal, come from sources that regenerate as fast as they are consumed and are continuously available. Some, such as biofuel produced from food crops and other plants, are replenished every growing season. In the early part of the twenty-first century, renewable sources have become more popular as nonrenewable sources have begun to be depleted.

This paper proceed as follows. We next present a brief review of the literature on economical analysis of wind energy and major energy sources. This is followed by wind power and energy status of Turkey, case study and cost analysis of an onshore wind power plant in Turkey. After that the economical calculations and profitability calculations are given and findings are reported. Finally we briefly explained in the conclusion part.

2. Major Energy Sources

Primary energy sources take many forms, including nuclear energy, fossil energy - like oil, coal and natural gas - and renewable sources like wind, solar, geothermal and hydropower. There are 10 main different sources of energy that are used in the world to generate power.

Bioenergy is derived from biomass. Biomass is organic material which is regenerated over time, such as wood, municipal waste, and alcohol fuels derived from agricultural crops. Energy is released by either direct burning or by creating a liquid-based fuel for transportation, such as ethanol and biodiesel. Uses for these fuels include generating electricity, fueling transportation needs, and heating homes.

Coal is a nonrenewable fossil fuel produced worldwide. It is formed when millions of years of pressure and heat turn the remains of prehistoric forests and swamps into coal. Coal is taken out of the earth either by deep mining (tunneling underground) or strip mining (digging out layers of earth). It exists in different grades or qualities. Coal is used predominantly to produce electricity and to provide fuel for industries that require large amounts of heat. Production of steel, cement, and paper all rely on this industry. Coal traditionally has been used for heating many homes and businesses.

Geothermal energy is derived from heat within the earth. Energy is found deep in the earth in the form of steam, naturally heated water, and rocks that touch magma deep in the earth's crust. On a small, low temperature scale, piping is run through shallow trenches in the ground and water is circulated by a pump. This process cools a building during the summer and warms it during the winter. This form of energy has no harmful emissions and is one of the most efficient systems available.

While hydrogen is the most abundant element in the universe, and the nuclear fusion of hydrogen powers the stars, on earth

virtually all of the hydrogen available is bound into water molecules or into hydrocarbons and therefore requires a substantial input of energy to free it for use as a fuel to combine with free oxygen in fuel cells. For this reason, hydrogen is today not really an energy source but rather is an energy transfer medium.

Hydropower is energy created from moving water. Dammed water passes through a turbine that rotates a generator to create electrical power. This form of energy is relatively inexpensive and has various ranges of environmental impact depending on the facility size.

Natural gas is a nonrenewable fossil fuel that is closely related to oil. It is drilled from the same wells as crude oil or it is later removed in the distilling process. Natural gas is used for heating purposes and generation of electricity.

Energy generated in a nuclear power plant is created when an atom of uranium is split and causes a chain reaction producing heat. This heat converts water to steam, which turns a turbine generating electricity. The water driving the turbine is cycled within an enclosed circuit, preventing any exhaust contaminated with radiation from escaping the system.

Crude oil is a nonrenewable fossil fuel. It is formed when heat and pressure compressed the remains of prehistoric plants, animals, and aquatic life under the bed of the sea or lakes for millions of years, thus becoming fossil fuel. Oil is drilled and pumped from giant underground pockets, or oil wells, and processed through a system called distillation. Distillation separates the by-products of crude oil. This process forms multiple fuels and other useful products, including gasoline and diesel for transportation fuel, kerosene and natural gas for heating and electrical generation, and oil for machinery lubrication.

Solar energy is a renewable resource. It is derived from the sun's rays. Solar energy is converted directly to electricity through solar photovoltaic panels. Solar rays, collected off reflective surfaces, heat an object in a process that creates solar thermal energy.

Wood is a renewable resource. It has always been a traditional source of fuel. Considered a biofuel, timber is burned directly or converted into products such as wood ethanol or wood pellets.

Wind is a renewable resource. Energy can be created from the movement of the wind. Wind is created over the earth's surface due to uneven heating patterns of the atmosphere. When the wind is caught in mill propellers, the propeller shaft is forced to rotate and turn a generator creating electricity.

3. Wind Power

Wind power has also been used for more than 1100 years to do simple tasks such as pumping water and grinding grain. This source of energy is emission free and constantly available with continuous wind flow.

Wind power is the use of air flow through wind turbines to mechanically power generators for electricity. Wind power, as an alternative to burning fossil fuels, is plentiful, renewable, widely distributed, clean, produces no greenhouse gas emissions during operation, consumes no water, and uses little land. The net effects on the environment are far less problematic than those of nonrenewable power sources.

Wind farms consist of many individual wind turbines which are connected to the electric power transmission network. Onshore wind is an inexpensive source of electricity, competitive with or in many places cheaper than coal or gas plants [1]. Offshore wind is steadier and stronger than on land, and offshore farms have less visual impact, but construction and maintenance costs are considerably higher. Small onshore wind farms can feed some energy into the grid or provide electricity to isolated off-grid locations [2].

Almost all large wind turbines have the same design; a horizontal axis wind turbine having an upwind rotor with three blades, attached to a nacelle on top of a tall tubular tower. The cost of wind energy production has fallen rapidly since the early 1980s, primarily due to technological improvements [3].

Lamy et al. present a conceptual model to estimate the economics of accessing high quality wind resources in remote areas to comply with renewable energy policy targets. Researchers assess the goal of new wind generation while minimizing costs, and include temporal aspects of wind power (variability costs and correlation to market prices) as well as total wind power produced from different farms [4]. Zhang et al. develop a Response Surface-Based Wind Farm Cost (RS-WFC) model for the engineering planning of wind farms [5]. Barros and Antunes rank the wind farms according to their technical efficiency during the period 2004–2008 and they emphasize the economic implications of it [6]. Sarucan et al. implement analytical hierarchy process method for selection of best wind turbine alternative for their case [7].

4. Energy Status of Turkey

Wind power has also been used for more than 1100 years to do simple tasks such as pumping water and grinding grain. This source of energy is emission free and constantly available with continuous wind flow.

Wind power is the use of air flow through wind turbines to mechanically power generators for electricity. Wind power, as an alternative to burning fossil fuels, is plentiful, renewable, widely distributed, clean, produces no greenhouse gas emissions during operation, consumes no water, and uses little land. The net effects on the environment are far less problematic than those of nonrenewable power sources.

Wind farms consist of many individual wind turbines which are connected to the electric power transmission network. Onshore wind is an inexpensive source of electricity, competitive with or in many places cheaper than coal or gas plants [1]. Offshore wind is steadier and stronger than on land, and offshore farms have less visual impact, but construction and maintenance costs are considerably higher. Small onshore wind farms can feed some energy into the grid or provide electricity to isolated off-grid locations [2].

Almost all large wind turbines have the same design; a horizontal axis wind turbine having an upwind rotor with three blades, attached to a nacelle on top of a tall tubular tower. The cost of wind energy production has fallen rapidly since the early 1980s, primarily due to technological improvements [3].

Lamy et al. present a conceptual model to estimate the economics of accessing high quality wind resources in remote areas to comply with renewable energy policy targets. Researchers assess the goal of new wind generation while minimizing costs, and include temporal aspects of wind power (variability costs and correlation to market prices) as well as total wind power produced from different farms [4]. Zhang et al. develop a Response Surface-Based Wind Farm Cost (RS-WFC) model for the engineering planning of wind farms [5]. Barros and Antunes rank the wind farms according to their technical efficiency during the period 2004–2008 and they emphasize the economic implications of it [6]. Sarucan et al. implement analytical hierarchy process method for selection of best wind turbine alternative for their case [7].

Oil has been one of the main energy sources in Turkey, with 28% of the country's total primary energy supply in 2011 (Figure 1). The share of natural gas in the country's TPES significantly increased from 5% in 1990 to 32% in 2011. Coal is also a large energy source in Turkey (30% in 2011). Renewable energy including hydro energy provided 10% of TPES. Turkey aims to increase the share of renewables to 30% of its electricity generation by 2023 [8].

High dependence on energy brings political and economic dependence with its back. Therefore, to generate energy with new

and renewable resources is really significant for countries like Turkey have not got natural energy sources. Turkey has significant

wind energy potential because of its geographical characteristics, such as its shoreline and mountain-valley structures [9].

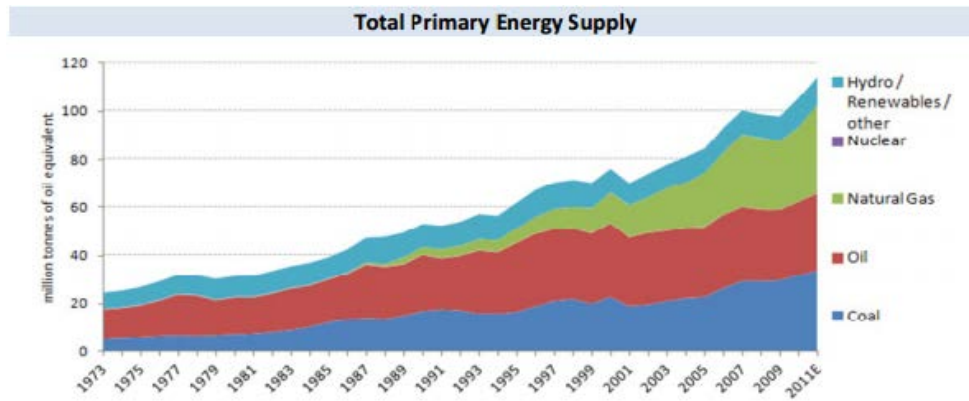


Figure 1. Total primary energy supply of Turkey [8]

5. Case Study: Economical Analysis of a Windfarm

One should consider many cost items in two main cost groups for a windfarm investment; investment costs and operation & maintenance costs [10]. Investment costs are necessary at the beginning period of the investment and paid probably only once for the plant. Investment costs include following main items:

- Investment costs
- cost of turbine
- cost of infrastructure and civil works
- cost of power electronics and electrical works
- cost of energy distribution line (grid)
- other costs (project development, license, feasibility analysis etc.)

On the other side operation and maintenance costs are necessary during the economic (useful) life of the plant and this type of cost usually expensed yearly. Operating costs include items such as plant operation and maintenance, insurance, property rental, property taxes, grid line maintenance etc.

- Operation & maintenance costs
- operation
- maintenance
- insurance
- property rental, taxes
- grid line maintenance

The interest rate *i* is necessary for economical evaluation of an investment project. For depreciation (amortization) accounting regarding this plant an amortization rate and useful life should be chosen.

5.1. Cost Analysis of an Onshore Wind Power Plant in Turkey

In this section, a real windfarm investment is examined from economic point of view. The studied wind power plant is located in Çanakkale-Turkey. Çanakkale province is one of the locations with most wind potential, and having 10% of the installed wind capacity in Turkey [11]. The onshore windfarm's installed nominal power is totally 40 MW with 50 wind turbines each 800 kW [12].

A German brand, Enercon E-48 wind turbine was selected for this power plant. It has three blades. The blades were manufactured in Turkey and transported by roadway. Turbine towers were also produced in Turkey and transported by sea to the plant location.

5.1.1. Technical Specifications of Enercon E-48 Turbine

Enercon E-48 is a horizontal-axis wind turbine. Horizontal-axis wind turbines can function in wind direction (downwind) and also opposite to wind direction (upwind). The calculated power curve of Enercon E-48 turbine is depicted in Figure 2 below. This model is appropriate for wind zone (DIB): WZ III and wind class (IEC):

IEC/EN IIA standards. Enercon E-48 turbine includes an Enercon direct-drive generator and feeds the grid using an Enercon inverter.

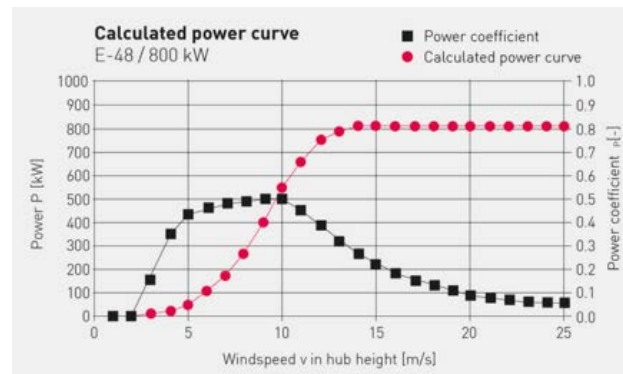


Figure 2. Enercon E-48 Power Curve [12]

Other important technical specifications of Enercon E-48 turbine: rated power for this model is 50 kW, hub height can be 50m, 60m, 65 or 76m, rotor diameter is 48m, rotor swept area is 1,810 m², no of blades is three, blade's material is epoxy resin. The rotor rotates clockwise with a rotational speed 16-34.5 rpm.

5.1.2. Cost Data of the Plant

The windfarm's installed nominal power is totally 40 MW with 50 wind turbines each 800 kW. Cost values for this plant are predicted as follows:

Table 1. Cost data of the plant

Turbine Price	675,000 USD	
C ₁	Total turbine cost	3,750,000 USD
C ₂	Infrastructure and civil works	6,600,000 USD
C ₃	Power electronics and electrical works cost	3,000,000 USD
C ₄	Energy distribution line cost	5,500,000 USD
C ₅	Other costs	6,500,000 USD

So the total investment cost CT is;

$$CT = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = 55,350,000 \text{ USD.}$$

Operating cost Cop can be estimated as 1 cent/kWh [13].

Economic (useful) life of the plant is estimated as 25 years according to IEA. [14]

The interest rate i is necessary for economical evaluation of this project. For the year 2015 the interest rate for Turkey is given as 7.5 % [15]. For depreciation (amortization) accounting regarding this plant amortization rate of 4 % is chosen. Depreciation lifetime is equal to economic lifetime, 25 years. Linear amortization method is used for depreciation accounting.

5.1.3. Wind Data of the Plant

In plant area, where 50 turbines are installed, wind characteristics are analyzed. Turbine’s hub height from ground is 60 meters. Wind speeds and blowing times are measured and the following data about blowing times for various wind speeds (Table 2) were determined during a year.

Table 2. Wind data on the location

Wind Speed v_i (m/s)	Blowing Time t_i (hours/year)	Wind Speed v_i (m/s)	Blowing Time t_i (hours/year)
0	41	13	372
1	350	14	307
2	579	15	196
3	790	16	151
4	472	17	118
5	723	18	100
6	710	19	71
7	687	20	55
8	651	21	39
9	637	22	22
10	635	23	17
11	534	24	16
12	477	25	10

The probability density function of wind speed data plotted using the WindPower Program [16] is shown in Figure 3. It is a Rayleigh distribution, in other words it is a special case of Weibull distribution with the shape factor $k=2$.

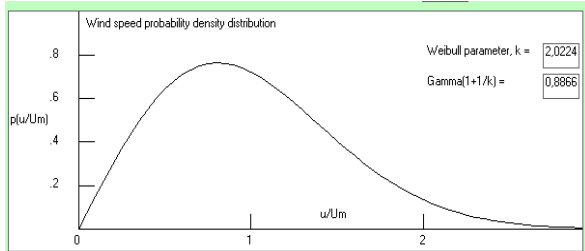


Figure 3. Wind speed probability density function

5.1.4. The Amortized Annual Cost of Wind Turbine Plant

Basically, the purpose of this economic analysis is to find unit cost of produced energy. Therefore, total investment cost should be determined firstly and then it should be annualized and compared with yearly total energy production amount.

Total cost CT is calculated above as 55,350,000 USD. To annualize this total cost using 25 years of economic life and interest rate of 7.5% one should use the Capital Recovery Factor CRF formula [17] given below.

$$A = P * [i * (1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)] \tag{1}$$

where A is capital cost per year, namely annual cost.

Instead P we use total cost CT in this formula, so the annual capital cost is

$$A = 55,350,000 * [0.075 * (1 + 0.075)^{25} / ((1 + 0.075)^{25} - 1)] = 4,965,486 \text{ USD/year}$$

Now consider the amortization (depreciation) issue. An asset loses value for reasons such as age, wear, and so on over its useful life. Even though an asset may be in excellent working condition,

the fact that it is worth less through time should be taken into account in economic evaluation studies. There are many methods for depreciation. Account the annual capital cost using linear amortization approach with an amortization rate $ia = 4\%$.

$$\text{Amortized annual cost} = A * (1 + ia) = 4,965,486 * 1.04 = 5,164,105 \text{ USD / year}$$

5.1.5. Annual Energy Production

According Kincay [18] the following formula is used to calculate the produced energy E in a year.

$$E = PR * T * CF \tag{2}$$

where PR is rated power of turbine (kW),

T is total operating time in hours per year and is $T = 24 * 365 = 8760$ hours/year

CF is capacity factor of turbine (%)

Now determine capacity factor using formula

$$CF = 0,087 * \text{vaverage} - (PR / D^2) \tag{3}$$

where $V_{average}$ is the average wind speed (m/s) and

D is the diameter of turbine rotor (m)

Average wind speed is calculated from the measured wind data using

$$\text{vaverage} = [(v_1 * t_1) + (v_2 * t_2) + \dots + (v_n * t_n)] / (t_1 + t_2 + \dots + t_n)$$

$$\text{vaverage} = [(0 * 41) + (1 * 350) + (2 * 579) \dots + (25 * 10)] / (8760) = 8.038$$

Rayleigh distribution is a special case of Weibull distribution with the shape factor $k=2$. If the wind speed is distributed according Rayleigh probability density function for average wind speeds between 4-10 m/s capacity factor of turbine can found using formula (3) as

$$CF = 0.087 * 8.038 - (800 / 48z) = 0.352$$

This formula is useful for CF between 0.2 and 0.5 values. The calculated capacity factor value of 35.2 % is convenient for efficiency (IEA 2010) 75].

Annual energy production amount is calculated via formula (2) as below:

$$E = 50 * 800 * 8760 * 0.352 = 123,367,080 \text{ kWh/year}$$

5.1.6. Unit Production Cost

We have calculated both of capital cost and produced energy amount of the wind plant based on year. Now unit capital cost can be calculated as annual capital cost divided by annual energy production;

$$\text{Unit capital cost} = A / E = 5,164,105 / 123,367,080 = 4.19 \text{ cent/kWh}$$

To find out the unit cost for produced energy in the plant we should add the operation costs to capital cost.

$$\text{Unit cost} = \text{Unit capital cost} + \text{Unit operating cost}$$

$$\text{Unit cost} = 4.19 + 1 = 5.19 \text{ cent/kWh}$$

Unit cost is found as 5.19 cent/kWh for this onshore wind plant.

5.2. Profitability Analysis

Unit cost is a crucial factor for each investment; however profitability is the main goal of an investor. The incentives regime applied in Turkey and the wind speed are two major factors which affecting the profitability of a wind turbine investment. Therefore, profitability should be analyzed under consideration of current incentives in Turkey and under wind speed variation.

5.2.1. Effect of Incentives on Profitability

Turkish energy government is applying a regime including a fixed price for electrical energy and a few additional incentives (Turkish Law No. 6094).

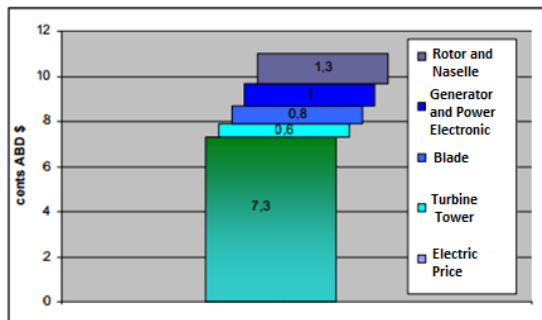


Figure 4. Incentives for wind plant investments in Turkey.

Incentives are provided to develop domestic production in this sector. These incentives are made available for plants fully installed and operating by the end of 2015. Unit price of energy produced with wind power and related incentives in Turkey are explained in the Figure 4. This depiction shows the importance of domestic manufacturing in Turkey clearly.

To determine the effect of incentives about domestic manufacturing to profitability for this wind plant investment two scenarios are analyzed:

Scenario 1. The actual investment. In this investment used blades and turbine towers are manufactured in Turkey. Therefore, the investor can benefit from the incentives for blade and turbine tower. As result, investor will sell the produced energy for first five years for

unit sell price = $7.3 + 0.8 + 0.6 = 8.7$ cent/kWh
 unit profit = $8.7 - 5.19 = 3.49$ cent/kWh
 profit per year = $123,367,080 \text{ kWh} * 3.49 \text{ cent/kwh} = 4,305,511$ USD /per year.

Scenario 2. All of the parts were manufactured in Turkey.

unit sell price = $7.3 + 0.8 + 0.6 + 1.0 + 1.3 = 11.0$ cent/kWh
 unit profit = $11.0 - 5.19 = 5.81$ cent/kwh
 profit per year = $123,367,080 \text{ kWh} * 5.81 \text{ cent/kwh} = 7,167,627$ USD /per year

The profitability after 5 years is same for both cases

unit profit = $7.3 - 5.19 = 2.11$ cent/kwh
 profit per year = $123,367,080 \text{ kWh} * 2.11 \text{ cent /kwh} = 2,603,045$ USD /per year.

We can conclude that to use 100% domestic manufactured components leads to

$5 * (7,167,627 - 4,305,511) = 14,310,580$ USD extra profit for investor.

5.2.2. Effect of Wind Speed and Capacity Factor of Profitability

To analyze the effect of wind speed and the capacity factor on the profitability we take the same values as above but wind speed. We assume the average wind speed in the plant is $V_{average} = 9$ m/s. Capacity factor is found via formula (3)

$$CF = 0,087 * 9 - (800 / 482) = 0.436$$

Capacity factor is found as 43.6% and it is satisfactory. Annual energy production is calculated via formula (2)

$$E = 50 * 800 * 8760 * 0,436 = 152,774,400 \text{ kWh / year}$$

Unit capital cost is calculated by dividing annual capital cost with annual energy production amount;

Unit capital cost = $A/E = 5,164,105 / 152,774,400 = 3.38$ cent/kWh
 Operating cost is not given in project details, but can estimated as 1 cent/kWh.

Unit cost = Unit capital cost + Unit operating cost = $3.38 + 1$ cent/kWh

The difference of profit values between two wind speeds 9 m/s and 8.075 m/s is determined as

$$5.19 - 4.38 = 0.79 \text{ cent/kWh}$$

Total yearly extra profit earned with the average wind speed increase is

$$152,774,400 * 0.79 = 1,206,918 \text{ USD/ year}$$

Resulting, increasing of wind speed improves the capacity factor and profitability of wind power plant positively. Because, wind speed have direct effect on the energy amount produced. Capacity factor can be improved also thanks to turbine technology developments.

6. Conclusion

Renewable energy has become very popular in the last decades both in the world and Turkey due to environmental concerns and due the increase of fossil fuels prices. In this study we analyzed wind potential of a farm whether these sources can be utilized economically based on the current regulated prices and the current wind turbine costs gathered from the literature. We analyzed economically a real wind power plant investment in Çanakkale, Turkey.

Briefly, two main cost components which are capital cost, operation & maintenance cost and some technical factors such as wind speed, capacity factor, and economic lifetime are explained for their effect on this wind turbine investment. To consolidate main cost components and technical factors about this wind power plant, total investment cost is determined and annualized.

We also try to give an answer to question of the profitability of this wind plant investment. The incentives regime applied in Turkey and the wind speed are two major factors which affecting the profitability of a wind turbine investment. Therefore, profitability is analyzed under consideration of current incentives in Turkey and under various wind speeds.

Turkey is one of the countries which have high wind potential. Unfortunately, at same time, Turkey's energy economy depends on imported fossil fuel. Renewable energy seems to be a good solution against fossil energy dependence. Therefore, incentives and strategies in terms of energy economy should be reorganized and investments must be taken further.

References

1. İzdeş, M. Acar, M. ve Kara, S. (1998). "Türkiye'de Elektrik Enerjisi ve Doğalgaz". Doğal Gaz Dergisi, Sayı: 54 Sayfa 136-152.
2. TPAO 2013 Yılı Ham Petrol ve Doğalgaz Raporu.
3. Kaygusuz, K. (2009). Wind Power for a Clean and Sustainable Energy Future. Energy Sources, Part B, 4:122-133
4. Julian V. Lamy, Paulina Jaramillo, Inês L. Azevedo, (2016), Ryan Wisler, Should we build wind farms close to load or invest in transmission to access better wind resources in remote areas? A case study in the MISO region, In Energy Policy, Volume 96, 2016, Pages 341-350.
5. Jie Zhang, Souma Chowdhury, Achille Messac, Luciano Castillo, (2012), A Response Surface-Based Cost Model for Wind Farm Design, In Energy Policy, Volume 42, Pages 538-550.

6. Carlos Pestana Barros, Olinda Sequeira Antunes, (2011), Performance assessment of Portuguese wind farms: Ownership and managerial efficiency, In Energy Policy, Volume 39, Issue 6, 2011, Pages 3055-3063
7. Sarucan A., Akkoyunlu M.C., Baş A., (2010), Wind Turbine Selection Using Analytic Hierarchy Process, Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology 25(1), 11-18.
8. IEA (2013) Oil&Gas Security report Turkey chapter https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2013_Turkey_Country_Chapterfinal_with_last_page.pdf
9. İkiliç, C. and Türkbay I. (2010). Determination and utilization of wind energy potential for Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2202–2207.
10. Arslan O. (2010). Technoeconomic analysis of electricity generation from wind energy in Kutahya, Turkey, Energy, 35 pp. 120–131.
11. Celik A.N. (2011). Review of Turkey's current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 15, Issue 6, August, Pages 2743–2749.
12. Enercon (2015) <http://www.enercon.de/en-en/492.htm>
13. US Department of Energy. (2012). Wind Technologies Market Report. International Energy Agency (IEA).
14. IEA (2010) Projected Costs of Generating Electricity - 2010 Edition: 43 https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/projected_costs.pdf
15. Investing.com <http://tr.investing.com/central-banks/>
16. The WindPower Program. <http://www.wind-power-program.com/>
17. Blank L. and Tarquin A. (1989). Engineering Economy 3rd Ed. McGraw Hill Singapore.
18. Kincay O. (2014). Lecture Notes Wind Energy <http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu/RuzgBol2.pdf>



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Tarihi Safranbolu Camilerinin Yapısal ve Mekânsal Özelliklerinin İncelenmesi

Şenol GÜRSOY*, Büşra CENGİZ, Ayşegül YILMAZ

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 24.10.2017 Düzeltme Tarihi: 07.11.2017 Kabul Tarihi: 10.11.2017

Özet

Bu çalışmada, Türk kentsel tarihinin en iyi korunmuş örneklerinden biri olan tarihi Safranbolu'da (Eski Çarşı'da); ahşap, taş ve/veya kerpiç gibi malzemelerle inşa edilmiş ve geleneksel kent dokusuyla bütünleşmiş camilerin yapısal ve mekânsal özellikleri incelenmiştir. Zira bu çalışmaya konu olan tarihi camilerin tasarımından inşasına kadar geçen süreçler kesin olarak bilinmemektedir. Diğer taraftan, tasarım ve inşa sürecini belirleyen etmenler pek çok araştırmacı tarafından tartışılan konulardan birisini oluşturmaktadır. Durum böyle olunca gerçekleştirilen bu çalışmanın, tarihi Safranbolu Camilerinin yapısal ve mekânsal özelliklerinin tanımlanmasına katkı sağlayacağı açıktır. Bu amaçla taşıyıcı sistem elemanlarından; sütunlar, tromplar, kemerler ve örtü elemanları gibi benzer örneklerin bulunduğu Dağdelen Cami, Eski Cami, Hamidiye Cami, Hidayetullah Cami, İzzet Mehmet Paşa Cami, Kazdağlıoğlu Cami, Köprülü Mehmet Paşa Cami, Lütüfiye Cami ve Taş Minare Cami dikkate alınmaktadır. Böylelikle sözkonusu camilere ilişkin mekânlar, taşıyıcı sistem elemanları ve örtü elemanları tanımlanmaktadır. Elde edilen bulgular karşılaştırılarak bu camilerin gelecek kuşaklara aktarılması için bazı sonuç ve öneriler getirilmektedir. Ayrıca yapılan bu çalışmanın belgeleme açısından da bir eksikliğe cevap vereceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kültürel miras, Korumacılık, Tarihi Safranbolu camileri, Safranbolu camilerinin korunması

Investigation of Structural and Spatial Characteristics of Historical Safranbolu Mosques

Abstract

Safranbolu is (in the Old Bazaar) which is one of the best-preserved examples of Turkish urban history. In this study structural and architectural features of historic mosques in this region are examined by integration of traditional urban texture that they belong and their materials such as wood, stone and /or mud brick that they have built. Because the processes from the design to the construction of the historic mosques that are the subject of this study is not known precisely. On the other hand, the factors that determine the design and construction process are the subjects discussed by many researchers. Accordingly, it is clear that this study will contribute to the identification of the structural and spatial characteristics of the historic Safranbolu mosques. With this purpose; Dağdelen Mosque, Eski Mosque, Hamidiye Mosque, Hidayetullah Mosque, İzzet Mehmet Paşa Mosque, Kazdağlıoğlu Mosque, Köprülü Mehmet Paşa Mosque, Lütüfiye Mosque and Taş Minare Mosque which have similar examples in terms of load-bearing system such as columns, squinch, arches and covering elements are taken into account. In this way, carrier (structural) system elements and covering elements related to the aforementioned mosques are defined. In comparison with the obtained findings, some results and recommendations are made for transfer of these mosques to future generations. It is also thought that this study will respond to a deficiency in terms of the documentation, too.

Keywords: Cultural heritage, Protectoinism, Historic Safranbolu mosques, Protection of Safranbolu mosques

1. Giriş

Türk kültürel mirasının önemli bir parçası olan tarihi Safranbolu, geçmişten günümüze ulaşmış ve önemli ölçüde kültürel dokusunu koruyabilmeyi başarmış bir kenttir. Safranbolu ve çevresinin Paleolitik Çağ'dan itibaren yerleşim alanı olarak kullanıldığı ifade edilmektedir [1]. Bölgede çeşitli tarihlerde sırasıyla, Hititler, Dorlar, Paphlagonlar, Kimmerler, Lidyalılar, Persler, Kappadokyalılar, Helenler, Pontlar, Galatyalılar, Bithynialılar, Roma, Bizans ve Osmanlılar hüküm sürmüşlerdir. Safranbolu farklı dönemlerde değişik isimlerle anılmıştır. Safranbolu tarih boyunca sırasıyla; "Dadybra, Zalifre, Borçlu, Burglu, Borgulu, Borlu, Taraklı Borlu, Taraklı, Zağfiran Borlu, Zağfiranbolu, Zağfiran, Benderli, Zafranbolu ve Safranbolu" gibi isimlerle anılmıştır [2]. Diğer taraftan tarihi Safranbolu çeşitli etnik, dini ve siyasi kültürlerin himayesi altına girmesine rağmen tarihi dokusunu koruyabilmiş bir kenttir.

Günümüzde tarihi Safranbolu mimarisi ve kent dokusu ile Türk kültürel mirasında önemli bir yere sahiptir. Tarihi Safranbolu'nun mahalle, cadde ve sokaklarında, özellikle Rumların el işçiliğini yansıtan çok sayıda dini ve sivil mimari örnekleri bulunmaktadır. Bu gün Safranbolu'nun modern yerleşim alanının merkezinde bulunan Kıranköy, 18-19. yüzyıllarda Rumlar tarafından yerleşim alanı olarak kullanılmış önemli bir bölgedir. Ayrıca Tarihi

Safranbolu, yeni yerleşim alanlarının gelişmesine müsait olmadığı için nüfus baskısı olmadığından kültürel miras kaynakları da zarar görmemiştir. Bu özelliklerinden dolayı UNESCO, 1994'de Tarihi Safranbolu'yu Dünya Miras listesine almıştır.

Tarihi Safranbolu'daki camilerin çoğunun Osmanlı dönemine ait olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada tarihi Safranbolu'daki camiler ve onların mimarilerinin günümüze kadar hangi aşamalardan geçerek geldiği taşıyıcı sistem özellikleri incelenerek sunulmakta ve böylece belgeleme açısından da bir eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

2. Tarihi Safranbolu Camileri

2.1. Dağdelen Cami

Giriş kapısı üzerindeki kitabeden caminin 1767 yılında Hoca Mehmet Efendi tarafından yaptırıldığı anlaşılmaktadır. Mimarı belli olmayan cami tek kubbeli, kuzeyden güneye doğru uzanan eğimli bir arazi üzerinde bulunmaktadır. Camide tromplardan sekizgen kasnağa, oradan kubbeye geçilmektedir. Caminin üstünde ise kiremit çatı bulunmaktadır. Camide beş bölümlü son cemaat yerini meydana getiren kemerler metal gergilerle birbirine bağlanmış ve örtü elemanı olarak girişte kubbe, diğer bölümlerde ise aynalı tonoz kullanılmıştır. Caminin sağında tek şerefeli minaresi bulunmaktadır. Ayrıca caminin yalın bir mihrabı, minberi bir de kadınlar mahfili

bulunmaktadır. Bunlara ilave olarak caminin batı duvarında suyu kurumuş ve kullanılmayan bir çeşme bulunmaktadır. Söz konusu Camide yapı malzemesi olarak kaba yontu taş ve tuğla kullanılmıştır.

2.1.1. Dağdelen Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Cephe

Tek kubbeli bir yapıya sahip Dağdelen Cami kuzey cephesinde beş bölümlü son cemaat yeri bulunmaktadır. Bu son cemaat yerinin

üst örtüsü ise dıştan kiremit çatılıdır ve sütunlara taşınan sivri kemerlerle dışa açılmaktadır. Caminin doğu kısmı beden duvarı (taşıyıcı duvar) ile kapatılmışken batı tarafı biri duvara oturan diğeri ise serbest sütunlara taşınan sivri kemerle açık bırakılmıştır. Diğer taraftan söz konusu caminin orta kısmında yuvarlak kemerli bir harime (ibadethane/mabet) giriş kapısı bulunmaktadır. Ayrıca caminin iki yanında dikdörtgen taş söveli sivri kemer alınlıklı (görünümlü) iki pencere bulunmaktadır.



Şekil 1. Dağdelen caminin kuzey ve batı cephelerinden görünüm

Dağdelen camisinin kuzey cephesi kirpi saçak uygulaması ile üç kısma ayrılmıştır. Bunlardan birinci sıra son cemaat yerinde, ikinci sıra beden duvarının saçak kısmında ve üçüncü sıra ise kubbenin etek kısmında bulunmaktadır. Söz konusu caminin güney cephesinde ise üç sıra pencere bulunmaktadır. Bunlardan da ilk sıra beden duvarının üst kısmının ortasında sivri kemerli bir pencere, ikinci sırada hemen bu pencerenin altında yine beş adet sivri kemerli pencere ve üçüncü sırada ise eksenin iki yanına yerleştirilmiş dört adet dikdörtgen taş söveli ve sivri kemer alınlıklı pencereler bulunmaktadır. Ancak ikinci kısımdaki pencerelerden ortada bulunan pencerenin diğerlerine göre biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan ilk sıradaki pencerelerin kemer kısımlarının tuğla ile örtüldüğü görülmüştür.

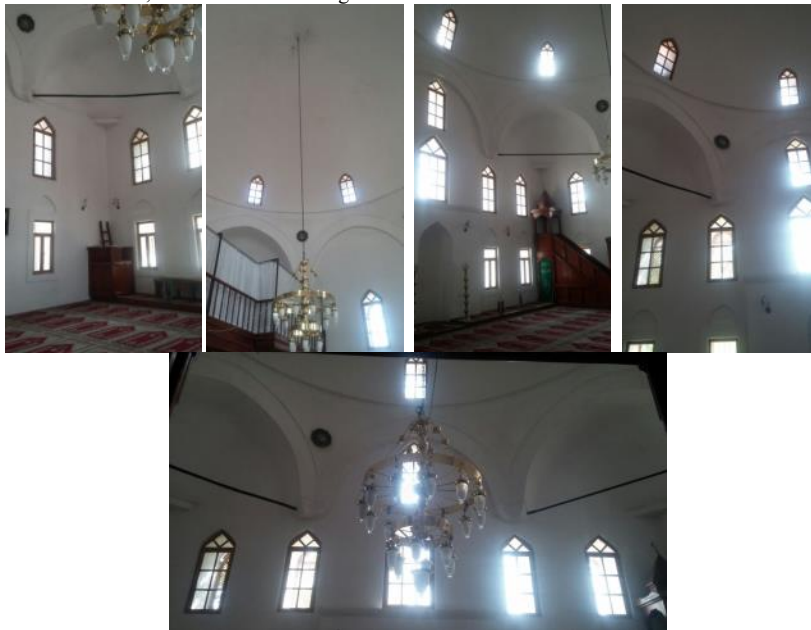
Dağdelen camisinin doğu ve batı cephelerinin benzer şekilde yapıldığı görülmektedir. Ancak söz konusu caminin batı cephesinde ilave olarak bir minaresi ve kurumuş bir çeşmesi bulunmaktadır. Dağdelen caminin her iki cephesinde de iki sıra pencere bulunduğu görülmektedir. Bunlardan üst sırada, kemer kısımları tuğla ile

örtülmüş, sivri kemerli üç adet pencere ve alt sırada ise dikdörtgen taş söveli ve sivri kemer alınlıklı üç adet pencere vardır. Ayrıca söz konusu camide sekizgen kasnak üzerinde her bir köşeye denk gelecek şekilde sivri kemer alınlıklı pencerelerin bulunduğu görülmüştür.

Caminin dış cephelerinde, kubbe eteğinin beden duvarı saçak hizasında ve son cemaat mahallinin üst kısmında üç sıra kirpi saçak bulunmaktadır. Söz konusu caminin cepheleri kubbe kasnağıyla ve kubbesi de kiremit örtülüyle son bulmaktadır.

b) İç Mekân

Caminin iç mekânı sekizgen bir kasnak üzerine oturan kubbe ile örtülmüştür. Bu yapısal elemanlara ilave olarak sekizgen kasnaktan kubbeye geçiş amacıyla sivri kemerli tromplar kullanılmıştır.



Şekil 2. Dağdelen caminin iç mekânından bir görünüm

İç mekânın güney duvarının orta kısmında dikdörtgen şeklinde bir mihrap bulunmaktadır. Bu mihrap beden duvarından (taşıyıcı duvardan) dışa çıkıntılı yapılmış ve yarım yuvarlak mihrap nişinin sivri kemerli kavсарası (kemerlerin eğrisel alt yüzeyi ya da iç büyük örtü kısmı) bulunmaktadır. Ayrıca bu mihrap beyaz renk sıvayla kapatılmış ve herhangi süslemesi yoktur. Mekanın güney batı köşede ahşap malzemenen yapılmış bir minber bulunmaktadır. Sade şekilde yapılmış olan bu minberin kare bir kapısı bulunmakta ancak aynalık, süpürgelik ve korkuluk kısımlarında herhangi süsleme bulunmamaktadır. Ayrıca bu minberin köşk kısmı konik bir külahla sonlandırılmıştır. Mekanın güney-doğu köşesinde ise duvara bitişik ve kare formunda bir vaaz kürsüsü yer almaktadır.

Dağdelen caminin kuzey cephesinin orta kısmında yuvarlak ahşap kemerli harime (ibadethane) giriş kapısı yer almaktadır. Ayrıca caminin kuzey kısmında ahşaptan yapılmış olan kadınlar mahfili (kısmı) bulunmaktadır. Mahfilin üst kısmı ahşap korkuluklarla sınırlanmış ve bu ahşap desteklerin üst kısımları da dışa doğru çıkıntılı olarak yapılmıştır. Ayrıca mahfil bölümünün altına küçük kare nişlerin açıldığı görülmüştür.

Caminin üst katına ise batı taraftan bir merdivenle çıkış sağlanmaktadır. Ayrıca minareye de üst kattan bir kapı ile giriş sağlanmaktadır. Diğer taraftan Dağdelen caminin beden duvarlarında ve kubbe kasnağında bulunan sivri kemerli pencerelerle aydınlık ve ferah bir iç mekân sağlanmıştır.

c) Minare

Caminin minaresi kuzey batı köşesinde bulunmaktadır. Bu minarenin kaide kısmı duvara gömülü ve taş malzemenen yapılmış ve bir bilezikle sınırlanmış daha sonra da silindirik gövdeye geçildiği görülmüştür. Minarenin gövdesi ise tuğla malzemenen yapılmış ancak şerefe kısmı taş malzeme kullanılarak sade bir şekilde yapılmıştır. Ayrıca minare konik bir külahla örtülmüştür.



Şekil 4. Eski caminin cephelerinden bazı görüntümler

Eski Caminin giriş kapısı kuzey cephesinde bulunmaktadır. Bununla beraber bu cephede herhangi bir pencere bulunmamaktadır. Söz konusu caminin güney cephesinde ise iki sırada dört adet pencere bulunmaktadır. Bu pencerelerden ikisinin alt sırada ve yuvarlak kemerli olduğu, üst sırada ise alt sıradaki pencerelerden daha küçük yine yuvarlak kemerli iki adet pencerenin olduğu görülmektedir.

b) İç Mekân

Eski Cami kare planlı olup, mihrabı, minberi, çatısı ve minaresi ahşaptan yapılmıştır. Ayrıca kadınlar mahfili yine ahşap direkler (sütunlar) üzerine oturtulmuştur. Caminin ibadet yapılan (namaz kılınan) bölümü 17,5 x 17,5 m ebatlarındadır.



Şekil 3. Dağdelen caminin minaresinden bazı görüntümler

2.2. Eski Cami

Eski cami Bizanslılar döneminde yapılmış ve kentin Türkler tarafından fethine kadar kilise olarak kullanılmıştır. Tarihi Safranbolu'da kilisesinden camiye çevrilen iki yapıdan birincisidir. Eski caminin kimin tarafından camiye çevrildiğine dair farklı rivayetler vardır. Kimilerine göre Candaroğlu Gazi Süleyman paşa tarafından camiye çevrildiği, kimileri göre ise Osmanoğlu Gazi Süleyman paşa tarafından çevrildiği ifade edilmektedir [3].

Moloz taştan inşa edilmiş olan Eski cami Camikebir mahallesindedir. 800 yıldan fazla Türk egemenliğinde kalan cami çeşitli tarihlerde onarımlar geçirmiştir. Caminin kitabesinden ilk onarımın 1841 yılında Sultan Abdülmecit tarafından yapıldığı anlaşılmaktadır [4]. Söz konusu caminin yakın tarihte Vakıflar Genel Müdürlüğüne kapsamlı restorasyonu yapılmıştır. Eski cami ana taşıyıcı elemanlarını beden duvarlarının oluşturduğu görülmektedir.

2.2.1. Eski Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Cephe

c) Minare

Eski Caminin minaresi kuzey-batı köşesinde çatıdan itibaren yükselmektedir. Caminin minaresi ahşap malzemeyle yapılmış olup kaidesi bulunmamaktadır. Ayrıca söz konusu minarenin şerefe ve petek kısımları birleştirilerek yekpare olarak yapılmıştır.

2.3. Hamidiye Cami

Hamidiye Camii tarihi Safranbolu'da Çeşme Mahallesi Mescit Sokakta bulunmaktadır. Hamidiye Cami kuzey doğusundaki çeşme, doğusundaki Emin Efendi Türbesi ve hazire (parmaklıklarla çevrili yer) ile bir külliye görünümündedir.



Şekil 5. Eski caminin iç kısmından bazı görünüm



Şekil 6. Eski caminin minaresinden bir görüntü

Caminin kitabesinde belirtildiği gibi cami Hamidiye ve İhsaniye adlandırılmakla beraber Mescit camii veya Zulmiye camii olarak da adlandırılmaktadır [6]. Hamidiye Caminin giriş kapısı kuzey cephede bulunmaktadır. giriş kapısı üzerinde bulunan kitabesinden H.1301/M.1884 yılında yapıldığı anlaşılmaktadır. Caminin Sultan II. Mahmut Han döneminde H.1251/M.1835 tarihinde ilk olarak mescit olarak inşa edildiği, daha sonra ise H.1301/M.1884 tarihinde onarılarak camiye dönüştürüldüğü düşünülmektedir [3].

2.3.1. Hamidiye Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Cephe

Hamidiye Cami kuzey-güney doğrultusunda 21,44 x14,30 m ebatlarında dikdörtgen planlıdır. Hamidiye Cami düz ahşap tavanlıdır. Cami tavanı orta kısımdaki yirmi dört kollu onikigen yıldız göbekten gelişen çıtalarla on iki dilime ayrılmaktadır. Caminin beden (taşıyıcı) duvarları köşelerde düzgün kesme taş ile diğer kısımları ise kaba yonu taş ile inşa edilerek hem içeriden hem de dışarıdan sıvanmıştır. Hamidiye Cami kiremit kaplı kırma çatıyla örtülüdür. Hamidiye Caminin beden duvarlarının ana taşıyıcı elemanlarını oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 7. Hamidiye caminin kuzey cephesinden bir görüntü

b) İç Mekân

Hamidiye cami kuzey-güney doğrultusunda 21,44 x 14,30 m boyutlarında olup, giriş kısmının iki yanında birer tabhane

bulunmaktadır. Tabhane, fakir ve kimsesizlerin barınmaları için kurulmuş olan hayır müesseseleridir. Bu yapılar Osmanlı İmparatorluğu döneminde misafirhane yapıları olarak da kullanılmıştır. Tabhane erken Osmanlı mimarlığında camilerle bütünlük içerisinde inşa edildiğinden Tabhaneli Camii, Zaviyeli veya ters t planlı gibi adlandırmalarla farklı bir tipoloji ortaya çıkmıştır. Caminin kuzeyinde ahşap mahfil ve iki katlı itikâf (ibadet niyetiyle inzivaya çekilme) odaları yer almaktadır. Ayrıca caminin iç kısmındaki doğu ve batı duvarlarında yazıtların bulunduğu görülmektedir.

c) Minare

Hamidiye caminin minaresi kuzeybatı köşesinde yer almaktadır. Kare şeklindeki kaide düzgün kesme taş ile bir kısmı duvara gömülü olarak yapılmıştır. Ayrıca kare şeklindeki kaide üzerinde pabuçluk kısmı bulunmaktadır. Minarenin gövdesi alttan ve üstten bilezik ile sınırlanmıştır. Üstteki bilezik kısmından sonra şerefe bölümü bulunduğu ve gövdesinin sıvalı olduğu görülmektedir. Ayrıca minarenin külah kısmının kurşunla kaplanmış olduğu ve üzerinde piriçten yapılmış bir alem bulunduğu görülmektedir.

2.4. Hidayetullah Cami

Hidayetullah Cami, Tarihi Safranbolu İzzet Mehmet Paşa Mahallesi Manifaturacılar Sokakta yer almaktadır. Caminin kitabelerine göre H.1105 / M.1693-94 yılında Hacı Hidayetullah tarafından inşa ettirildiği ve H.1290 / M. 1874 yılında Hacı Süleyman Efendi tarafından onarımının yaptırıldığı anlaşılmaktadır.

2.4.1. Hidayetullah Caminin Mekansal Özellikleri

a) Dış Cephe

Günümüzde Hidayetullah Camine giriş doğu cepheden sağlanmaktadır. Caminin kuzeyine eklenen Kuran Kursunun yapının plan dokusunu ve bu cephedeki kapısının işlevini olumsuz etkilediği görülmektedir.



Şekil 8. Hamidiye caminin iç mekanından bazı görüntümler



Şekil 9. Hamidiye caminin minaresinden bir görüntüm



Şekil 10. Hidayetullah (Dişçi) caminin dış cephelerinden bazı görüntümler

b) İç Mekân

Hidayetullah Cami kuzey-güney doğrultusunda, 11x12,50 m ölçülerinde dikdörtgen planlı ve düz ahşap tavanlıdır. Caminin güney cephesinde birinci sırada sivri kemer alınlıklı iki adet ve ikinci sırada ise yarım daire şeklinde, diğer pencerelerden yukarıda, bir adet pencere bulunmaktadır. Ayrıca caminin güney duvarının ortasında ahşap mihrap bulunmaktadır. Caminin kuzey cephesinde ise ahşap direkler üzerine oturtulmuş kadınlar mahfili

bulunmaktadır. Hidayetullah caminin doğu cephesinden bir kapı ile üst kata giriş-çıkış sağlanmaktadır.

Hidayetullah caminin ana taşıyıcı elemanlarını beden duvarları oluşturmaktadır. Diğer taraftan caminin köşelerinde pandantif benzeri geçiş öğeleri yer almaktadır.



Şekil 11. Hidayetullah (Dişçi) caminin iç mekanından bazı görüntümler

c) Minare

Hidayetullah (Dişçi) Caminin minaresi bulunmamaktadır.

2.5. İzzet Mehmet Paşa Cami

İzzet Mehmet Paşa sadrazamlığı sırasında, doğduğu Safranbolu kasabasını unutmamış, tarihi Safranbolu'ya cami, kütüphane, çeşme ve su tesisleri yaptırmıştır. Bu tesislerin idamesi (sürdürülebilmesi) için 1796 tarihinde İzzet Mehmet Paşa vakfıyesini kurmuştur.

İzzet Mehmet Paşa Camii Sadrazam İzzet Mehmet Paşa tarafından yaptırılmıştır. Cami kendi adıyla anılan mahallede ve tarihi kentin çarşısı içinde yer almaktadır. Caminin giriş kapısının üzerinde iki yazıt bulunmaktadır. Bu yazıtlardan da caminin üçüncü Selim sadrazamı İzzet Mehmet Paşa tarafından 1796 tarihinde yaptırıldığı anlaşılmaktadır.

Tarihi Safranbolu'da 18. yüzyıldan kalma en ilginç yapılardan birisi olan İzzet Mehmet Paşa Cami tamamen kesme taştan yapılmıştır. Küçük bir külliye oluşturmuş ve eğimli araziye uyumlu bir şekilde inşa edilmiş yapılardan camiye merdivenlerle ulaşılmaktadır.

İzzet Mehmet Paşa Caminin ana mekanını örten kubbeye pandantiflerle geçilmekte ve aradaki kasağa ise pencerelerin açıldığı görülmektedir. Ayrıca caminin köşelerinde ağırlık kuleleri bulunmaktadır. Diğer taraftan caminin ana mekânın kuzeyinde üç kubbeyle örtülü bir kısım bulunmaktadır. Caminin ana mekânıyla sıkı ilişkili bu kısım kadınlar mahfili olarak düşünülmüştür. Bunlara ilave olarak İzzet Mehmet Paşa Caminde ortadaki kubbeli ve yanlardakiler aynalı tonozlu olmak üzere üç bölümden oluşan son cemaat bulunmaktadır. Son cemaat yerinin sağında ise taştan malzemeden inşa edilmiş tek şerefeli bir minare yer almaktadır. Ayrıca caminin bütün örtü elemanları dıştan kurşunla kaplanmıştır.

İzzet Mehmet Paşa Cami mihrabı, minberi, pandantiflerdeki kalem işleri ve pencerelerdeki parmaklıklarına kadar bir bütünlük taşımaktadır. İzzet Mehmet Paşa Cami çeşitli zamanlarda onarım görmüştür. İlk olarak 1903 yılında esaslı bir onarım görmüş daha sonra 1980'li yıllarda Vakıflar Genel Müdürlüğüne cami yeniden onarılmış ve bezemeleri de (süslemeleri) eskisine sadık kalınarak yenilenmiştir. Bugün ise caminin tekrar restorasyonu ve onarımı devam etmektedir.

2.5.1. İzzet Mehmet Paşa Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Cephe

İzzet Mehmet Paşa Cami merkezi planlı olarak yapılmıştır. Merkezi planlı camilerde; daire, kare ya da çokgen bir orta mekânın çevresinde yapı planı gelişmektedir. Ayrıca merkezi planlı camilerin, en karakteristik öğelerinden biri olan, bir veya birden çok kubbe ile örtülü olmasıdır.



Şekil 12. İzzet Mehmet Paşa caminin kuzey (giriş) ve batı cephelerinden görüntümler

b) İç Mekân

İzzet Mehmet Paşa Caminin iç mekânı iki kısımdan oluşmakta ve içten 18,2 x 14m ebatlarındadır. Caminin asıl mekânının kare planlı olduğu ve bu kısmın ise on iki pencereyle yuvarlak kasağa oturan 12 m çapındaki pandantif geçişli bir kubbeyle örtülü olduğu görülmektedir. Caminin asıl mekânının kuzeyinde bulunan ikinci kısmın ise her biri dört sütun üzerine yerleştirilmiş üç kubbeyle örtülü olduğu ve bu kısmın mahfil olarak değerlendirildiği

İzzet Mehmet Paşa Cami kuzey-güney doğrultusunda eğimli bir arazi üzerinde tamamen düzgün kesme taş malzemeden inşa edilmiştir. Caminin doğu, batı ve güney cephelerinin genel olarak benzer şekilde yapıldığı görülmektedir. Caminin askı kemerleri arasındaki beden duvarlarına (taşıyıcı duvarlarına) pencerelerin yerleştirildiği görülmektedir. Ayrıca caminin cephelerinin yapıyı üç yönden kuşatan yatay iki sıra silme (kabartma kenar, pervaz) ile iki bölüme ayrıldığı görülmektedir. Bu silmelerden ilki beden duvarının üst kısmında bulunurken, ikincisi beden duvarının ortasında yer almaktadır. Caminin doğu ve batı cephelerinin de benzer şekilde inşa edildiği görülmektedir. Ayrıca caminin cephelerinde üç sıra pencerenin bulunduğu görülmektedir. En üst sırada kemerli (üç dilimli) üç tane pencere ve ikinci sırada ise kemerli (üç dilimli) beş tane pencere bulunmaktadır. Bu pencerelerin altında yatay silme bulunmakta ve silmenin altında ise dikkörtgen taş söveli yuvarlak kemer alınlıklı beş adet üçüncü sıra pencerelerin bulunduğu görülmektedir. Caminin doğu ve batı cephelerinde ise iki sıra pencerenin bulunduğu görülmektedir. Bu cephelerdeki pencereler, ilk sırada silimli kemerli bir adet pencere ve ikinci sırada ise yuvarlak kemer alınlıklı bir adet pencere şeklinde bulunmaktadır. Ayrıca caminin minaresi batı cephesinde bulunmaktadır.

İzzet Mehmet Paşa Caminin güney cephesi doğu ve batı cepheleriyle benzer olmakla birlikte mihrap kısmının biraz dışa taşığı görülmektedir. Ayrıca caminin güney cephesinde silmenin üzerinde kemer içinde iki sırada toplam sekiz adet kemerli (üç dilimli) pencerenin bulunduğu ve silmenin altında ise mihrap çıkıntısının iki yanında ikişerden dört adet yuvarlak kemer alınlıklı pencerenin bulunduğu görülmektedir. Caminin kuzey cephesinde ise son cemaat mahalli bulunmakta ve buraya da karşılıklı iki merdivenle çıkılmaktadır. Ayrıca bu cephede son cemaat mahallinin önünde dört adet sütun üzerine atılmış kemerler ve tonozlarla örtülü bir mekan bulunmaktadır. Son cemaat mahalli sütunlara oturan yuvarlak üç kemer ile dış kısma açılmaktadır. Bu kemerlerden ortada bulunan biraz daha küçükken, yanlarındaki sütunlar daha büyük yapılmıştır. Diğer taraftan son cemaat mahallinin batı tarafı, bir ucu sütuna diğer ucu duvara oturan yuvarlak bir kemerle açık bırakılmıştır.

İzzet Mehmet Paşa caminin doğu tarafında ise kemer içinin duvar ile kapatıldığı ve alt kısmında da iki adet kemerli (dilimli) pencere olduğu görülmektedir. Son cemaat mahallinin ortasında kenarlardan silmelerle çevrelenmiş yuvarlak kemerli bir giriş kapısı bulunmaktadır. Giriş kapısının iki yanında ise dikkörtgen, yuvarlak kemer alınlıklı ikişerden dört pencere yer almaktadır. Ayrıca bu kısmın batısında bulunan ahşap kapıdan minareye, doğusunda bulunan kapıdan ise kadınlar mahfiline geçilmektedir. Caminin cephelerinin; beden duvarı, ağırlık kuleleri, kasnak ve üzeri kurşunla kaplı kubbeyle son bulduğu görülmektedir.

görülmektedir. Caminin güney duvarın ortasında mermer bir mihrap, mihrabın batısında mermerden yapılmış bir minber ve doğusunda ise yine mermerden yapılmış bir vaaz kürsüsü bulunmaktadır. Ayrıca batı ve doğu duvarlarındaki pencerelerle aydınlık bir iç mekân oluşturulduğu görülmektedir. Caminin kuzeyde bulunan mahfilin girişi son cemaat yerinin kuzeydoğu köşesindeki kapıdan sağlanmaktadır. Diğer taraftan mahfili taşıyan dört sütunun üstte daha küçük olarak yapıldığı ve sütunlar birbirine yuvarlak kemerlerle bağlanmış olduğu görülmektedir.



Şekil 13. İzzet Mehmet Paşa caminin kadınlar mahfili ve pencere detaylarından görünüm

Osmanlı mimarisinde farklı kesitli bir elemandan diğerine geçiş yapmak için Türk üçgenleri (pandantifler) sıklıkla kullanılmaktadır. İzzet Paşa camisinde de kare planlı bir yapının üzerine kubbeyi oturtturabilmek için geçiş ögesi olarak Türk üçgenleri kullanılmıştır.

Bu geçiş öğeleri sayesinde kare planlı mekânın üstünde düzgün yuvarlak kasnak oluşturularak kubbe de bu yuvarlak kasnağa oturturulmuştur.



Şekil 14. İzzet Mehmet Paşa caminde geçiş ögesi olarak kullanılan Türk üçgeninden (pandantif) bir görünüm

c) Minare

İzzet Mehmet Paşa Caminin minaresi caminin kuzey batı köşesinde düzgün kesme taştan zarif bir şekilde tek şerefeli olarak yapılmıştır. Minarenin gövdesi kare kaide üzerinde soğan formunda düzenlenmiş kısma oturmaktadır. Ayrıca minarenin gövde kısmı üstten şerefe altında ve altta ise soğan formunun üzerinde olmak üzere birer bilezikle sınırlanmıştır. Diğer taraftan minarenin külâh kısmı kurşunla kaplanmış olduğu ve üzerinde ise pirinçten yapılmış bir alem bulunduğu görülmektedir.

2.6. Kazdağlıoğlu Cami

Kazdağlıoğlu Camii Çeşme mahallesinde ve çarşının girişinde bulunmaktadır. Caminin giriş kapısı üzerindeki kitabeden 1779 yılında yapıldığı anlaşılmaktadır. Caminin inşasının Kazdağlı olarak tanınan Mehmet Paşa tarafından yapıldığı bazı kaynaklarda belirtilmesine rağmen camiye ait kitabe böyle bir isme rastlanılmamıştır. Kazdağlıoğlu Cami 1935 tarih ve 31 sıra numarası ile Vakıflar Genel Müdürlüğü adına tapuya tescil edilmiştir.

Kazdağlıoğlu Cami taş ve tuğladan tek kubbeli olarak inşa edilmiştir. Caminin kubbesi sekizgen bir kasnak üzerine oturmuş ve tromplarla kubbeye geçiş sağlanmıştır. Caminin orta kısım kubbeyle yan kısımlar ise beşik tonozlarla örtülmüştür. Ayrıca Kazdağlıoğlu Caminde üç bölümlü son cemaat yeri ve bir kadınlar mahfili bulunmaktadır. Caminin minaresi tuğla gövdeli tek şerefeli olarak girişin sağ tarafında bulunmaktadır. Diğer taraftan eğimli bir araziye inşa edildiği için caminin kuzeyi ve güneyi kısımları farklı kotlardadır.

2.6.1. Kazdağlıoğlu Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Cephe

Kazdağlıoğlu Caminin doğu ve batı cephelerinin simetrik olduğu görülmektedir. Her iki cephede saçak seviyesinde iki sıra kirpi saçaklarla sınırlanmıştır. Ayrıca her iki cephede en üstte sivri kemerli bir pencere, bu pencerenin altında sivri kemerli üç adet pencere ve bunların altında orta kısmın iki yanına yerleştirilmiş dikdörtgen çökertme kemerli iki adet pencerenin bulunduğu görülmektedir. Caminin güney cephesinde yatay çift sıra, iki kirpi saçakla cephenin iki kısma ayrıldığı görülmektedir. Bu saçaklardan ilk sıra beden duvarının üst kısmında, ikinci sıra ise kubbe eteğinde



Şekil 15. İzzet Mehmet Paşa caminin minaresinden bazı görünüm

yer almaktadır. Ayrıca caminin güney cephesinde üç sıra pencere düzenlemesi olduğu görülmektedir. Cephede üst kısımda duvarın ortasında sivri kemerli bir adet pencere, bu pencerenin altında sivri kemerli beş adet pencere ve en altta ise duvarın orta kısmının iki yanına yerleştirilmiş ikişerden dikdörtgen-çökertme alınlıklı dört adet pencere bulunmaktadır. Görüldüğü gibi bu cephenin pencere düzenlemesi doğu ve batı cephelerinden farklılık göstermektedir. Ayrıca güney cephesinin alt kısmında sivri kemer alınlıklı, dikdörtgen şeklinde ahşap üç adet kapının bulunduğu görülmektedir. Bu kapıların caminin eğimli arazide olması nedeniyle alt kata giriş için yapılmıştır.

Kazdağlıoğlu Caminin kuzey cephesinin de iki sıra kirpi saçakla üç bölüme ayrıldığı görülmektedir. Bu saçaklardan ilk sıra saçak son cemaat yerinin üst örtüsü altında, ikinci sıra saçak beden duvarının üstünde ve üçüncü sıra saçak ise kubbe eteğinin yer almaktadır. Ayrıca bu cephede üç bölümlü son cemaat yeri bulunmaktadır. Son cemaat yerindeki yuvarlak kemerleri taşıyan sütunların üçünün serbest birinin ise duvara gömülü olduğu görülmektedir. Ayrıca son cemaat mekanının içten örtüsünün orta kısmında kubbe, yanlarda ise beşik tonoz şeklinde olduğu görülmektedir. Dıştan ise kiremit çatı ile örtülmüştür. Diğer taraftan son cemaat yerinin ortasında ise yuvarlak kemerli ve çift kanatlı ahşap bir giriş kapısı yer almaktadır. Bu girişin sağ tarafında bir

mihrabiye ve solunda ise sivri kemer alınlıklı bir pencere bulunmaktadır. Son cemaat yerinin batı tarafı beden duvarı ile kapatılmış ve burada üstte sivri kemerli bir adet pencere ve altta dikdörtgen çökertme alınlıklı bir adet pencere olmak üzere iki sıra pencere düzeni bulunmaktadır. Caminin doğu tarafının ise bir çeşme ile kapatıldığı görülmektedir. Kazdağlıoğlu Caminin cepheleri sekizgen kasnak üzerine oturan kiremit örtülü kubbeyle son bulmaktadır. Ayrıca sekizgen kasnağın her köşesinde birer adet sivri kemer pencerenin yapıldığı görülmektedir.

b) İç Mekân

Kare planlı Kazdağlıoğlu caminin iç mekanının üzeri tromplarla geçilmiş ve sekizgen kasnak üzerine oturan kubbeyle örtülmüştür. Taş malzemeyle yapılmış ve oldukça sade olan mihrap caminin güney cephesinin orta kısmında bulunmaktadır. Mihrap nişi üç yönden beden duvarlarından dışa doğru çıkıntı yapan bir bordürle çevrilmiştir. Mihrap'ın dışa doğru taşan bölümün ortasında, yarım daire mihrap nişinin üzerinde, sivri tonozlu kavsarası bulunmakta ve kavsaranın iki kenarında da rozet içinde çiçek motifinin olduğu görülmektedir. Ayrıca mihrabın sağında batı duvarına bitişik olarak ahşap bir minber ve güney doğu köşesinde ise duvara bitişik olarak ahşap bir vaaz kürsüsü bulunmaktadır.



Şekil 16. Kazdağlıoğlu caminin cephelerinden bazı görünümlemler

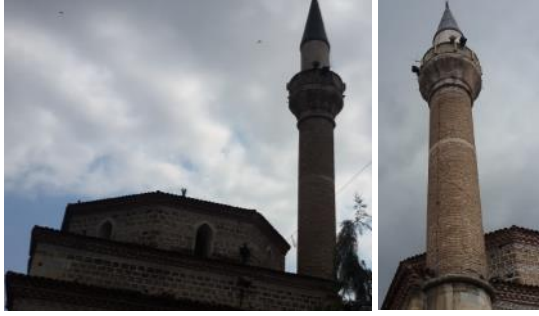


Şekil 17. Kazdağlıoğlu caminin iç mekânından bazı görünümlemler

Caminin iç kısmının kuzeyinde zeminden yükseltiyle yapılmış ahşaptan kadınlar mahfili bulunmaktadır. Bu mahfili altı tane ahşap ayak taşımaktadır. Mahfilin alt kısmına iki basamak ve üst kısma ise doğuda bulunan bir merdiven ile çıkılmaktadır. Ayrıca mahfilin üst kısmının kenarlarının kare şeklinde dışa doğru taşıdığı ve cephelerdeki pencerelerle aydınlık bir mekan elde edildiği görülmektedir.

c) Minare

Kazdağlıoğlu caminin minaresi güneybatı köşesinde yer almaktadır. Kesme taştan yapılmış minarenin çokgen bir kaidesi bulunmaktadır. Bu kaideden sonra kenarları pahlanmış pabuçluk kısmına ve sonra da gövde kısmına geçildiği görülmektedir. Caminin minaresinin gövdesi ise tuğladan yuvarlak şekilde yapılmıştır. Ayrıca minarenin sade tek şerefesinin olduğu ve konik külâhının kurşun ile kaplandığı görülmektedir.



Şekil 18. Kazdağlıoğlu caminin minaresinden bir görünüm

2.7. Köprülü Mehmet Paşa Camii

Rivayete göre caminin yapılışı ile ilgili olay şöyledir: *"Köprülü Mehmet Paşa gençliğinde sarayda hazine-i amire'de görevli iken, serkeşlik (dikbaşlılık) ve geçimsizlikle suçlanarak 1623 yılında Safranbolu'ya sürgün edilmiştir. Yanında bir de adamı birlikte şimdiki Kazdağlı Camii'nin bulunduğu yerdeki Hamide Hatun medresesinde ikamet etmekte idiler. Zamanla elde avuçta ne varsa harcadıktan sonra, eşyalarını da satarak bir müddet daha geçinmeye çalışırlar. Son olarak ellerinde sadece bir incili peşkir kalmıştır. Köprülü Paşa adamına onu da sattırarak akşam yemeği için tarhana çorbası yapmasını emreder. Ne var ki çorba tam pişmek üzereyken tencerenin üzerine bacadan bir fare düşer. İkisi de aç kalmışlardır. Köprülü Mehmet Paşa o anın sıkıntısı ile ellerini açar ve"*

"Allah'ım beni şu sıkıntıdan kurtar, bu şehre bir camii yaptırayım" der.

"Bu yakarışı daha bitir bitmez kapı çalınır. Saraydan gelen haberci paşaya affedildiğini ve saraya çağrıldığını müjdeler. Bu adağını nice yıllar sonra sadrazam olduktan sonra hatırlayan paşa, caminin yapılması için emir verir".

1658 yılında başlayan caminin inşaatı, Köprülü Mehmet Paşanın vefatından bir yıl kadar sonra 1661 yılında tamamlanarak hizmete açılmıştır [5].

Tarihi çarşı içinde, kemerli bir kapıdan avlusuna girilen Köprülü Mehmet Paşa caminin ana mekânı kare şeklindedir. Caminin üstü tromplarla geçilen bir kubbeyle örtülmektedir. Ayrıca kubbenin oturduğu sekizgen kasnak, dışarıdan payandalarla desteklenmiştir. Giriş kısmının sağ tarafında taş malzemeden yapılmış tek şerefeli bir minare yer almaktadır. Caminin avlusunda ise bir muvakkithane binası (güneşe bakarak namaz vakitlerini bildiren kişinin bulunduğu yer), bir güneş saati ve şadırvan bulunmaktadır. Ayrıca caminin avlusunun batısında kütüphane bulunmaktadır. Bu kütüphane, iki kenardan çokgen planlı iki kısımdan ve bu kısımların ortasında dikdörtgen planlı giriş kısmından oluşmaktadır. Kütüphanenin ön cephesindeki çokgen planlamanın aksine arka kısmı tamamen düz bir duvarla düzenlenmiştir. Diğer taraftan kütüphanenin çokgen planlı mekanlarında üçer adet pencere ve orta kısımdaki giriş kısmında kemerli bir kapı ve dikdörtgen şeklinde bir pencere bulunmaktadır. Ayrıca Köprülü Mehmet Paşa camii ile birlikte caminin yanına ve

Yemeniciler Arastası'nın arka kısmında (bugün boş arazi olarak bulunan yerde ahşap bir medrese yapılmıştır. Bugün söz konusu ahşap medrese yıkılmıştır.

Köprülü Mehmet Paşa caminin daha önceki yıllarda kubbesinin onarımı sırasında damında (çatısında) bulunan topraklar atılmıştır. Ancak daha sonradan bu toprakların yalıtıcı (izolasyon) madde görevini yaptığı anlaşılmış ve pişman olunmuştur. Zira bu toprak dolgu sayesinde caminin içi kış mevsiminde ılık ve yaz mevsiminde ise serin kalmaktadır. Diğer taraftan caminin kubbesi yapılırken kubbeyle yerleştirilen küplerle akustik bir özellik sağlanmıştır. Ayrıca caminin inşaatı esnasında bazı yerlerine yerleştirilen deve kuşu yumurtaları da örümceklerin yuva yapmasını önlediği ifade edilmektedir [3].

Köprülü Mehmet Paşa caminin avlusunda bulunan güneş saati ise, 1925 yılında Safranbolu'nun haritasını çizmek için gelen askeri harita mühendisleri tarafından yapılmıştır. Caminin avlusunun ortasındaki bu güneş saati kesme taştan yapılmış bir kaide üzerindeki 15x62cm ebadındaki taş levhaya işlenmiştir. Bugün bu levha 2 cm kalınlıktaki beton bir çerçeve ile sağlamlaştırılarak demir bir kafes içerisine alınmış durumdadır [7].

Köprülü Mehmet Paşa caminin avlusunda bulunan çeşmelerin üzerinde yazan kitabeden, çeşmelerin Mustafa Tevfik isimli birisi tarafından onarıldığı anlaşılmaktadır [6].

2.7.1. Köprülü Mehmet Paşa Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Cephe

Köprülü Mehmet Paşa camii tek kubbeyle sahip olup, dıştan 24,5x20 m ebatlarındadır. Doğu ve batı cephe duvarlarında üç sıra pencere düzenlemesi görülmektedir. En alt sırada dikdörtgen açıklıklı düz atkı taşlı (pencere yapımında üst kısma konan ağaç, taş veya beton destek / üst eşik) sivri kemer görünümünde dört adet pencere bulunmaktadır. Bunların üstünde aynı doğrultuda bulunan yuvarlak kemerli dört adet pencere ve en üst sırada ise yuvarlak kemerli bir adet pencere görülmektedir. Ayrıca bu pencerelerin her iki cepheye de simetrik olarak uygulandığı görülmektedir. Diğer taraftan bu cephelerde beden (taşıyıcı) duvarları iki sıralı kirpi saçakla sonlanmaktadır.

Caminin güney cephesinde mihrabın iki yanında, en alt sırada ikişerden (düz atkı taşlı) dört adet pencere, ikinci sırada alt sıradakilerle aynı hizada yuvarlak kemerli dört adet pencere, mihrabın üst kısmında yuvarlak kemerli bir adet pencere ve en üst sırada bir adet pencere olmak üzere dört sıra pencere düzenlenmesi olduğu görülmektedir. Caminin kuzey cephesinde ise beş gözlü son cemaat yeri bulunmaktadır. Bu kısmı ikisi duvarla bağlantılı ve dördü serbest altı sütun ile taşınmaktadır. Ayrıca sütunlar sivri kemerlerle birbirine bağlandığı ve üzerlerinin beşik tonozla örtüldüğü görülmektedir. Caminin giriş kapısının iki yanında dikdörtgen açıklıklı taş söveli birer adet pencere bulunmaktadır [7]. Diğer taraftan camiye kuzey cephesinde bulunan yuvarlak kemer açıklıklı çift kanatlı ahşap kapı ile girildiği görülmektedir.

b) İç Mekân

Köprülü Mehmet Paşa caminin iç mekânı yaklaşık kare plana sahip olup 17,4x17,2 m ebatlarındadır. Caminin iç mekânının sekizgen kasnağa oturan 17m çapındaki tromp geçişli bir kubbe ile örtüldüğü görülmektedir. Caminin kuzey duvarına bitişik olarak yapılmış iki katlı ahşap mahfil (camilerde müezzinlere parmaklıkla ayrılmış yüksekçe kısım) bulunmaktadır. Ayrıca caminin güney duvarında bir minber, taştan yapılmış bir vaaz kürsüsü ve duvarın ortasında bir mihrap bulunmaktadır. Diğer taraftan caminin duvarlarına açılan pencerelerle aydınlık ve ferah bir iç mekân sağlandığı görülmektedir.

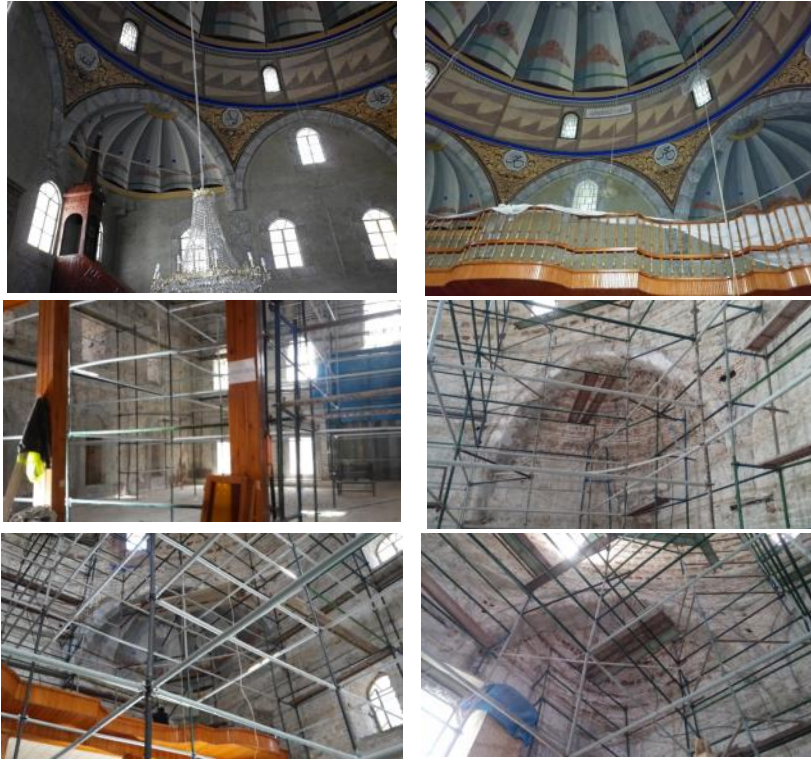
c) Minare

Köprülü Mehmet Paşa caminin kuzeybatı köşesinde düzgün kesme taş malzemeye inşa edilmiş tek şerefeli bir minare bulunmaktadır. Bu minarede kare şeklindeki kaideye oturan yuvarlak hatlı bir pabuçluk ile çokgen gövdeye geçildiği görülmektedir. Ayrıca minare gövdesi alttan ve üstten iki bilezikle sınırlanmıştır. Diğer taraftan şerefe bölümünün sade ve çokgen

planlı gövde ile uyumlu olduğu ve kurşun kaplı külah ile sonlandığı görülmektedir.



Şekil 19. Köprülü Mehmet Paşa caminin kirpi saçaklarla sonlanan cephelerinden ve çevresinden bazı görüntümler



Şekil 20. Köprülü Mehmet Paşa caminin önceki ve restorasyonu sırasındaki iç mekânından bazı görüntümler



Şekil 21. Köprülü Mehmet Paşa caminin minaresinden bir görüntüm

2.8. Lütfiye Camii

Lütfiye Camii tarihi Safranbolu'nun Akçasu mahallesinden geçen Akçasu deresi üzerine bir kemere oturtularak yapılmıştır. Caminin giriş kapısı üzerindeki kitabeye göre H.1269/M.1878-1879 yılında Müslîh Beyzade Hacı Hüseyin Hüsnü tarafından yaptırıldığı anlaşılmaktadır [6]. Akçasu deresi üzerinde kemerler üzerine oturtularak inşa edilmiş olan Lütfiye Caminin mimarı Ulu Caminin de mimarı Anton Kalfadır.

Lütfiye cami Akçasu deresinin iki yanındaki kaya üzerine yuvarlak kemerlere oturtularak inşa edilmiştir. Dikdörtgen planlı olarak moloz taşlardan inşa edilmiş olan Lütfiye caminin dış görünümü sade şekildedir. Lütfiye cami, ahşap örtüsü ve ahşap minaresi ile çevresinde bulunan diğer yapılarla bütünlük sağlamaktadır. Ayrıca Lütfiye caminin giriş kapısının üzerinde

kalker taş üzerine rika (arap harflerinin en çok kullanılan el yazısı) biçiminde yazılmış bir kitabe bulunmaktadır [3].

Lütfiye cami kuzey-güney doğrultusunda 13,70 x 7,30 m boyutlarında, düz ahşap tavanlı ve kiremit kaplı kırma çatıyla örtülmüştür. Caminin kuzey kısmında ahşap mahfil (camilerde parmaklıkla ayrılmış yüksek yer) ve tavanın ortasında ise onikigen bir göbek bulunmaktadır. Caminin beden (taşıyıcı) duvarları köşelerde düzgün kesme taş malzemeyle diğer kısımlarda ise kaba yonu taş malzemeyle inşa edilerek içeriden ve dışarıdan sıvanmıştır. Diğer taraftan caminin girişin kısmının solunda beden duvarları üzerinde ve mahfilden çıkılan çokgen gövdeli bir ahşap minare bulunmaktadır [7]. Ayrıca Lütfiye caminin şerefe bölümü gövdeden hafif çıkıntılıdır.



Şekil 22. Akçasu deresi üzerinde kemerlere oturtularak inşa edilmiş Lütfiye caminden görünüm

2.8.1. Lütfiye Caminin Mekânsal Özellikleri

a) Dış Mekan

Dıştan dışı 13,70 x 7,30 m boyutlarında olan Lütfiye caminin doğu cephesi duvarında altı üstlü düzenlenmiş ikişerden dört adet pencere bulunmaktadır. Doğu ve Batı cephelerinin pencere düzenlemeleri ve sayısı aynıdır. Ayrıca caminin doğu cephesinin kuzey kenarında mahfile girişi sağlayan ikinci giriş kapısı bulunmakta ancak bu kapının günümüzde kullanılmadığı görülmektedir [7]. Diğer taraftan caminin güney cephesinde, altta

dikdörtgen açıklıklı iki adet ve bunların üstünde üst kısmı üçgen şeklinde üç adet pencere olmak üzere, toplam beş adet pencere bulunmaktadır. Lütfiye caminin kuzey cephesinde ise giriş kısmı ile birlikte merdivenlerin başlangıç kısmının yukarısında dikdörtgen açıklıklı bir adet pencerenin bulunduğu görülmektedir. Ayrıca caminin inşa kitabesi de bu pencerenin altında yer almaktadır. Diğer taraftan kuzey cephenin batı kenarında bulunan giriş kısmı cephenin içine doğru kaydırılmış ve çift kanatlı ahşap bir kapı ile harime giriş sağlanmaktadır.



Şekil 23. Lütfiye caminin cephelerinden bazı görünüm

b) İç Mekan

Lütfiye cami, içten 13 x 5,9 m boyutlarında dikdörtgen planlı ve üstü ahşap çatılı bir camidir. Caminin kuzey kısmında iki katlı kadınlar mahfili bulunmaktadır.

c) Minare

Lütfiye caminin minaresi kuzey cephesinin batı tarafında bulunmaktadır. Caminin minaresinin tamamen ahşap malzemeyle inşa edildiği, kaidesinin olmadığı ve petek kısımlarının birleştirilerek yekpare olarak düzenlendiği görülmektedir [7]. Ayrıca bu ahşap minarenin soğan formunda bir külahla sonlandığı ve dışının tamamen sacı kaplandığı görülmektedir.



Şekil 24. Lütfiye caminin iç mekânından bazı görüntüler



Şekil 25. Lütfiye caminin minaresinden bir görüntü

2.9. Taş Minare Camii

Taş minare cami, tarihi Safranbolu'da Hüseyinçelebi Mahallesi, Taşminare Sokakta bulunmaktadır. Taş Minare caminin kuzey tarafında bulunan Taş Minare Çeşmesinin kitabesine dayanılarak, caminin Zaim Osman Ağa tarafından 1763 tarihinde yaptırıldığı kabul edilmektedir. Diğer taraftan Taş Minare caminin Candaroğulları döneminde kiliseden çevrildiği de rivayet edilmektedir.

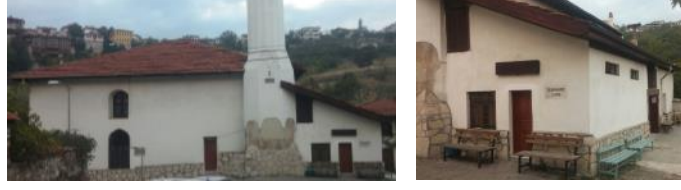
Taş Minare caminin tavanında bulunan H. 1218/ M.1803 tarihinin, onarım ve tamirini yapan ustalar tarafından yazıldığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan 1976 yılında yapılan onarım sırasında, caminin kuzeyine ortada giriş ve yanlarda iki odadan oluşan bir bölüm ilave edilmiştir.

2.9.1. Taş Minare Caminin Mekânsal Özellikleri**a) Dış Cephe**

Taş minare cami kuzey-güney doğrultusunda, 14,50 x 19,90 m boyutlarında dikdörtgen bir plana sahiptir. Caminin kuzeydoğu köşesinde; sekizgen kaideli, yivli gövdeli ve tek şerefeli taş malzemeyle inşa edilmiş bir minare bulunmaktadır.

Taş minare caminin beden (taşyıcı) duvarlarının köşelerde kesme taş, diğer kısımlarda ise kaba yonu taş malzemeyle inşa edildiği ve hem içeriden hem de dışarıdan sıvandığı görülmektedir. Ayrıca caminin kiremit kaplı kırma çatıyla örtülü olduğu görülmektedir.





Şekil 26. Taş minare caminin doğu ve kuzey cephesinden bazı görünümeler

b) İç Mekân

Taş minare cami ahşap tekne tavanlı camilerdendir. Caminin kuzeyinde ahşap mahfil yer almaktadır. Caminin tavan göbeği yirmi dört kollu dairesel yıldız motifli şeklindedir. Ayrıca tavanın tekne

bölümünün güney kenarının orta kısmında çıta ve çivilerle ev biçiminde tasvir edilmiş bir motifin bulunduğu görülmektedir. Diğer taraftan tavanın orta bölümü sahte bindirme tekniği kullanılarak çitalarla diyagonal olarak yerleştirilmiş karelerden oluşmaktadır.



Şekil 27. Taş minare caminin iç mekanından bazı görünüm

c) Minare

Taş minare caminin minaresi kuzeydoğu köşesinde yer almaktadır. Minarenin şerefe ve petek kısmı birleştirilerek yekpare olarak düzenlenmiştir. Söz konusu caminin minaresi tek şerefeli yivli yuvarlak gövdeli ve taş malzemeden inşa edilmiştir. Ayrıca minaresinin kaidesi de taştan yapılmıştır. Diğer taraftan yivli minare tezyinat (motif) açısından dikkat çekici özelliğe sahiptir. Ancak farklı zamanlardaki onarımlarla maalesef özelliğini yitirmiştir.

İzzet Mehmet Paşa Caminin beden (taşıyıcı) duvarlarında büyük kemerlerin olduğu ve beden duvarlarının üstünde kubbe kasmağının dört köşesinde ağırlık kulelerinin bulunduğu görülmektedir. Köprülü Mehmet Paşa Caminde ise kubbe kasmağı payandalarla takviye edilmiştir. Diğer taraftan Lütüfiye caminin Akçasu Deresi üstünde kemerler üzerine inşa edildiği görülmektedir.

Tarihi Safranbolu Camilerinin tümünde çoğunlukla kullanılan malzeme kesme taştır. Köprülü Mehmet Paşa caminin son cemaat yeri ve minaresi tamamen düzgün kesme taş malzeme ile inşa edilmiştir. Beden duvarlarında görülen tuğla sıralarının bir yangın sonrasında yapılan onarımdan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Dağdelen caminin beden duvarları ve minaresinin kaide ve pabuçluk kısımları da düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. İzzet Mehmet Paşa camide düzgün kesme taş malzemeyle inşa edilmiştir. Kazdağlıoğlu caminin de beden duvarları ve minaresinin kaide ve pabuçluk kısımlarının düzgün kesme taş malzemeyle inşa edildiği görülmektedir. Ancak bu camide diğerlerinden farklı olarak beden duvarlarında aralıklarla tuğla sıralarının olduğu görülmektedir. Ayrıca Kazdağlıoğlu caminin köşeleri düzgün kesme taş malzemeyle sonradan takviye edilmiştir. Diğer taraftan yukarıda bahsedilen kesme taş malzemeyle inşa edilen camilerin derzlerinin belirginleştirildiği görülmektedir. Lütüfiye cami ve Eski cami ise moloztaş malzemeyle inşa edilmiştir. Lütüfiye caminin duvarlarının dışarıdan sıvandığı ve Eski caminin belirginleştirildiği görülmektedir. Ayrıca Dağdelen ve Kazdağlıoğlu camilerinin minarelerinin gövde ve petek kısımlarının tuğla ile inşa edildiği, Lütüfiye ve Eski camilerinin minaresinin ise kaidersiz olarak ahşaptan yapıldığı görülmektedir. Tarihi Safranbolu'daki tüm camilerinin minarelerinin zamanla onarıldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 28. Taş minare caminin minaresinden bir görünüm

3. Tarihi Safranbolu Camilerinin Mekân Anlayışı ve İnşa Malzemesi Üzerine Değerlendirme

Tarihi Safranbolu camilerinin çoğunluğu tek kubbeli ve bir kaç ise ahşap çatılıdır. Tek kubbeli camilere Osmanlı mimarisinin ilk dönemlerinden itibaren Anadolu'nun çeşitli yörelerinde rastlanmaktadır. Tarihi Safranbolu'da Osmanlı Döneminde tek kubbeli olarak ilk inşa edilen Köprülü Mehmet Paşa Camisidir. Bu cami aynı zamanda tarihi Safranbolu'da Osmanlı Döneminde inşa edilen en büyük camidir. Sonraki yıllarda inşa edilen Kazdağlıoğlu ve Dağdelen Camileri Köprülü Mehmet Paşa Camisinin tekrarı niteliğindedir. Bu camilerdeki farklılık genellikle boyutlarda görülmektedir.

Tarihi Safranbolu camilerinin bazılarında taş malzeme ilave olarak tuğla malzemesinin kullanıldığı da görülmektedir. Köprülü caminin kirpi saçaklarda ve pencere alınlıklarında, Dağdelen Caminin son cemaat yeri kemerlerinde, pencere alınlıklarında, minaresinin gövdesinde ve kirpi saçaklarında ve Kazdağlıoğlu caminin ise pencere alınlıklarında, minaresinin gövde kısmında ve kirpi saçaklarında tuğla malzeme kullanılmıştır.

Osmanlı cami mimarisinde erken devirlerinden itibaren son cemaat yeri uygulaması yaygın olarak görülmektedir. İzzet Mehmet Paşa caminde diğerlerinden farklı olarak son cemaat yerinin avlu zeminine göre daha yüksek görülmektedir. Ayrıca Safranbolu tarihi camilerinde son cemaat yeri sütunları birbirine ve beden duvarlarına

kemerlerle bağlanmıştır. Ancak Lütfiye ve Eski camilerinde son cemaat yeri bulunmamaktadır.

Köprülü Mehmet Paşa caminin mihrap ve kitabesinin, İzzet Mehmet Paşa caminin kitabe, minber ve vaaz kürsüsünün mermer malzemeyle yapıldığı görülmektedir. Köprülü Mehmet Paşa caminin mahfili, minberi ve giriş kapısının, Dağdelen ve Kazdağhoğlu camilerinin mahfili, minberi, vaaz kürsüsü ve giriş kapısının ahşaptan yapıldığı görülmektedir. Ayrıca İzzet Mehmet Paşa caminin giriş kapısı çift kanatlı olarak ahşaptan yapılmıştır. Diğer taraftan Eski cami ve Lütfiye caminin mahfili, minberi, vaaz kürsüsü, giriş kapısı, tabanı ve tavanının ahşap olarak inşa edildiği görülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada tarihi Safranbolu camilerinin yapısal ve mimari özellikleri incelenmiştir. Ayrıca yapılan bu çalışmanın söz konusu camilerin mekânlarının, taşıyıcı sistem elemanlarının ve örtü elemanlarının tanımlanmasına katkı sağlayacağı ve belgeleme açısından da yararlı olacağı düşünülmektedir. Tarihi Safranbolu camilerinin geçmişle bağlantının sürdürülmesi ve var olan bu değerlerin gelecek kuşaklara aktarılabilmesi için bazı sonuç ve önerileri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

- Tarihi Safranbolu camilerinin o dönemki nüfusun ihtiyacını karşılayacak sayıda ve ölçüde yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu camilerden en büyük (iç mekânı 17,4x17,2 m) boyutlara sahip olan Köprülü Mehmet Paşa camidir.
- Tarihi Safranbolu Camilerinde beden duvarlarının kör kemerler içerisine alınmasıyla bu duvarlara etkileyen yükün azaltıldığı görülmektedir. Böylece daha çok pencere açabilme olanağının elde edildiği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan söz konusu camilerin inşasında kullanılan taş malzemenin davranışına uygun olarak kemerlerin seçildiği ve beden duvarlarıyla birlikte söz konusu camilerin taşıyıcı sistemlerini oluşturduğu görülmektedir.
- Tarihi Safranbolu Camilerinin inşasında taş malzeme kullanılması nedeniyle söz konusu camilerin basınç gerilmelerine uygun taşıyıcı sistemler (kalın beden duvarlar, kemerler, kubbeler ve tonozlar) kullanılarak inşa edildiği görülmektedir. Diğer taraftan tarihi camilerin bazılarının ahşap çatılı olduğu görülmektedir.
- İzzet Paşa Camii işçilik ve süslemeleri bakımından çalışma konusu diğer camilere göre daha öne çıkmaktadır.
- Tarihi Safranbolu camilerinin buldukları çevre ile uyum sağladığı görülmektedir.
- Günümüzde birçok turist tarafından ziyaret edilen bu camiler geçmişle günümüz arasındaki en önemli köprülerdir. Bu nedenle çevremizdeki bu tür tarihi yapıların değerlerini bilinerek onları korumamız gerekmektedir. Zira geçmişten günümüze ulaşan bu tür tarihi yapıların kültürel anlamda gelişmemize katkıda bulunacağı ve bilinmeyenlere ışık tutacağı açıktır. Diğer bir ifadeyle, tarihimize ışık tutan bu camileri yaşatmak ve korumak onlar hakkında daha çok bilgi edinmemizi sağlayacağı açıktır.
- Yazarlar, geçmişimize ışık tutan tarihi Safranbolu camilerinin gelecek kuşaklara aktarılabilmesi için restorasyonlarının bilinçli bir şekilde aslına uygun olarak yapılmasını önermektedirler.
- Yazarlar, söz konusu camilerin farklı yüklenme durumları için sayısal yöntemlerle analizlerinin yapılarak mevcut durumları ile birlikte değerlendirilmesinin oldukça yararlı olacağını düşünmektedirler.

Kaynaklar

1. Günay, R., Türk Ev Geleneği ve Safranbolu Evleri, Yem Yayınları, İstanbul 1998.
2. Yazıcıoğlu, H. ve Al, M., Safranbolu (Safranbolu, Karabük, Ulus, Eflani), Karabük, Özer Matbaası, 1982.
3. Özbek, Y., Safranbolu Camileri, 2009.
4. Kılavuz Ç., Safranbolu'da Köprülü Mehmet Paşa, Dağdelen, Kazdağhoğlu, İzzet Mehmet Paşa ve Lütfiye Camileri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Arkeoloji ve Sanat Tarihi Bölümü, Bitirme Çalışması, Van 1999.
5. Kuş, A., Türkiye'de Mimarlık Değerlerinin Korunmasında İlk Adımlar Safranbolu 1975-1980, Karabük, Safranbolu Kaymakamlığı Hizmet Birliği, 2003.
6. Karacakaya, R., Yücedağ, İ. ve Kılavuz, B. N., Safranbolu Kitabeleri, Yeni Zamanlar Sahaf, İstanbul 2013.
7. Yılmaz, A. ve Cengiz, B., Tarihi Safranbolu'daki Köprülü Mehmet Paşa ve Lütfiye Camilerinin Taşıyıcı Sistemlerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi, Karabük 2017 (Danışman: Doç. Dr. Şenol GÜRİSOY).



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Şerit Donatılı Toprakarme Duvar Sisteminin Uygulanması (Kutlubeyyazıcılar – Bartın)

Ermedin TOTİÇ*, Fahrettin YILMAZ

Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 13.11.2017 Düzeltme Tarihi: 12.12.2017 Kabul Tarihi: 18.12.2017

Özet

Toprakarme istinat duvarları, konvansiyonel dayanma yapılarına alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Toprakarme sistemin esası, sıkıştırılmış dolgu malzemesi ile donatının birlikte kullanımına dayanmaktadır. Dolgu ile özel aderanslı çelik donatının birlikte yerleştirilmesi, bu malzeme arasında temas yüzeyinde bir sürtünme yaratmaktadır. Dolgu kütlelerinin içinde oluşan gerilmeler özel galvanizli çelik şerit donatılar tarafından karşılanır. Bu gerilmeler şeritlere sürtünme vasıtasıyla transfer edilir. Böylece bu iki malzeme, tek ve kompozit bir inşaat malzemesi oluşturmaktadır.

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü girişinin Bartın-Ankara karayolu bağlantısında köprülü kavşak yapılması düşünülmektedir. Bu proje kapsamında köprü yaklaşım rampası olarak 3.7 m dolgu yüksekliğinde ve 12 m genişliğinde şerit donatılı toprakarme duvarı yapılması öngörülmektedir. Bu çalışmada, yapılması düşünülen bu yapının iCad Toprakarme yazılımıyla iç ve dış stabilite analizleri yapılarak donatı şerit boylarının ve döşeme aralıklarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca şerit donatılı toprakarme yapı sistemi, yapısal elemanları ve yapı sisteminin uygulama aşamaları genel hatlarıyla açıklanmıştır. Araştırma kapsamında şerit donatılı toprakarme duvarda kullanılacak malzemelerin şartnamelerce belirtilen kriterlere uygunluğu da yapılan deneylerle incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İstinat duvarı, Toprakarme, Şerit donatı, iCad Toprakarme

An Application of Earth Wall System Reinforced with Steel Strips (Kutlubeyyazıcılar – Bartın)

Abstract

Reinforced earth retaining walls have emerged as an alternative to conventional retaining structures. The basis of reinforced earth system is using the compacted backfill and reinforcement together. The placement of the backfill and special adherent steel reinforcements creates a friction between the backfill and contact surface. The stresses developing in the backfill mass are encountered by special galvanized steel strip reinforcements. These stresses are transferred to the strips by friction. Thus, these two materials form a single and composite construction material.

Bartın University Kutlubeyyazıcılar Campus entrance and Bartın-Ankara highway are planned to be connected with a crossroad. For this purpose, an earth wall reinforced with steel strips is planned to be constructed in a height of 3.7 m and width of 12 m. In this study, it is aimed to determine the strip lengths and intervals by analyzing internal and external stability with iCad Toprakarme software. In addition, the strip-reinforced earthed structural system, structural elements, and application steps of the structural system are roughly explained. In the study, the sufficiency of the materials to be used in the reinforced earth wall was investigated with the experiments made.

Keywords: Retaining wall, Reinforced earth, Reinforcing strip, iCad Toprakarme

1. Giriş

İstinat yapıları; geoteknik mühendisliğinin yol, yapı ve altyapı gibi farklı mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan mühendislik uygulamalarında geniş yer alan betonarme istinat yapılarının rijit özellikte olması ve temel zemininde büyük gerilmeler oluşturmamasından dolayı eğer derin temel sistemleri kullanılmazsa zemin ortamında oturma ve taşıma gücü gibi sorunlar oluşmaktadır. Bu nedenle toprakarme istinat yapıları, betonarme istinat yapılarına alternatif olarak ortaya çıkmıştır [1].

Şerit donatılı toprakarme sistemi, sıkıştırılmış geri dolgu malzemesi ile dolgu içerisine yerleştirilmiş çelik donatılar arasında meydana gelen sürtünme kuvveti sayesinde taşıyıcı özelliği olan, sağlam, kompozit bir yapı oluşturulması esasına dayanmaktadır. Toprakarme yapıların imalatlarının hızlı yapılması, deprem yükleri altında oluşabilecek büyük deplasmanları ve yükleri tolere edebilmesi ile esnek davranabilme özellikleri, estetik görünüşleri ve ekonomik oluşları sayesinde klasik betonarme istinat yapıları yerine, özellikle sismik aktivitelerin yüksek olduğu yerlerde tercih edilmektedir. Bu dayanma yapıları karayolları, demir yolları, köprüler, sanayi yapıları, su yapıları ve askeri yapılar gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Bu çalışmada, Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü Köprülü Kavşağı üzerindeki şerit donatılı toprakarme yapı sisteminin uygulanması ve yapısal elemanları genel hatlarıyla açıklanmıştır. Daha sonra iCad Toprakarme paket programı kullanılarak sistemin iç, dış ve genel stabilite analizleri yapılmış, bu stabiliteyi sağlayan çelik şeritlerin boyu ve döşeme aralıkları belirlenmiştir. Bununla birlikte toprakarme sisteminde kullanılan malzemelerin Karayolları Teknik Şartnamesi kriterlerine uygunluğu da incelenmiştir.

2. Şerit Donatılı Toprakarme Yapılar

Mühendislik açısından zeminlerin donatılar kullanılarak güçlendirilmesi yaklaşımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Fransız mimar mühendis Henry Vidal 1966 yılında çekme dayanımlı donatılarla güçlendirilmiş zeminlerin kullanımı üzerine rasyonel tasarım prosedürleri geliştirmiştir [2]. Bununla beraber toprakarme istinat duvarlarının uygulamaları tüm dünyada büyük hız kazanmış ve ilgi görmüştür. Klasik sistemlere göre imalat, performans ve ekonomi yönünden getirdiği avantaj ve yenilikler toprakarme istinat yapılarının yenilikçi bir uygulama olarak talep görmesinin önünü açmıştır. 1970 yıllarında kullanılan prekast paneller ve tırnaklı donatılar, bu yapı sisteminin gelişmesinde dönüm noktası olarak

kabul edilmektedir [3]. Bu sistem Türkiye’de ilk olarak, 1988 senesinde Adapazarı Arifiye’deki 69 Nolu otoyol üstgeçidinin çok yumuşak zeminler üstüne oturan yaklaşım dolgusunun iki yanında bulunan 12 m yüksekliğindeki duvarlar için kullanılmıştır [4].

Şerit donatılı toprakarme sistemi, duvar bloğunu oluşturan seçilmiş dolgu malzemesi ile donatı olarak kullanılan şeritlerin birlikte çalışmasına esasına dayanmaktadır. Dolgu kütlesi içinde oluşan gerilmeler sürtünme esasına göre şerit donatılar tarafından karşılanmaktadır. Böylece bu iki malzeme kompozit bir yapı olarak çalışır. Kompozit malzemenin içerisinde yer alan her donatı eş değer yatay zemin itkisi kadar yük alır. Bu sebeple düşey toprak basıncı arttıkça şerit donatılar tarafından karşılanan çekme gerilmesi de artmaktadır [5].

Donatılı toprak yapının açık sınıırını veya yüzünü oluşturmak ve dolgu malzemesinin kaybolmasını önlemek için prekast paneller kullanılır (Şekil 1). Prekast paneller donatı şeritlerine mekanik olarak tutturulmaktadır.



Şekil 1. Şerit donatılı toprakarme duvar yapımı (Kutlubeyazıcılar – Bartin)

Toprakarme sisteminin esnek yapısı, imalat sırasında veya sonrasında oluşabilecek yatay ve düşey oturmalara izin vermesi gibi özelliklerinden dolayı depreme karşı dayanıklı bir yapı oluşmasına olanak sağlar. Yapılan araştırmalarda, daha küçük ivmesel zorlanmalara göre tasarlanan bu dayanma yapılarının daha yüksek ivmesel hareketlere maruz kaldıklarında, deformasyon ve mukavemet bakımından üstün performans gösterdiği gözlemlenmiştir [6]. Bununla birlikte sürşarj yükleri arttığında dayanımı arttırabilmek için zemin içine yerleştirilecek donatı miktarlarının da arttırılması gerekmektedir [7].

Toprakarme yapıları tasarımına ilişkin bazı şartnameler, Fransa, Amerika, Almanya gibi bazı farklı ülkelerde hazırlanmıştır. Türkiye’deki karayolları uygulamalarında ise, Karayolları Teknik Şartnamesine (K.T.Ş) [8] göre imalat gerçekleştirilmektedir.

2.1. Şerit Donatılı Toprakarme Yapıların Yapısal Elemanları

Toprakarme sisteminin yapı elemanları prekast paneller, dolgu malzemesi, bağlantı elemanları ve şeritlerdir. Prekast panellerin üretimi için çelik kalıplar kullanılır. Kalıplar düz bir zemin üzerine yerleştirilerek demir teçhizatı projeye göre hazırlanarak kalıp içine yerleştirilir. Prekast paneller 7 gün süre ile kür edilir ve kalıplar, beton sertleştikten sonra panele zarar vermeyecek şekilde sökülür.

Prekast panellerin arka yüzündeki bağlantı elemanları ile duvar geri dolgusu arasında, yüksek aderanslı sıcak-daldırma galvaniz kaplamalı çelik şeritler projede gösterilen genişlik ve aralıklarla yerleştirilir. Çelik şeritlerin çekme mukavemeti minimum 510 MPa olması gerekmektedir [8].

Bağlantı elemanları; ankraj halkaları, pim, civata ve somunlar ise yüksek mukavemetli ve korozyona karşı koruyucu bir malzeme ile kaplanmış olması gerekmektedir. Panellerin yerleştirilmesi sırasında, iki panelin temasını önlenmesi amacıyla düşey derzler, polietilen köpük (Poliüretan derz contası), yatay derzler ise kauçuk Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) takozlar kullanılmalıdır.

Donatılı zemin yapılarında dolgu malzemesi olarak iyi sıkışabilen özel seçilmiş kaba daneli malzeme tercih edilmektedir.

Kaba daneli dolgu malzemesinin en önemli avantajı uygun sıkıştırma koşullarıyla yüksek mukavemetli olabilmesidir. Bu malzemelerin drenajlarının iyi olması halinde donatı şeridi ve dolgu malzemesi arasındaki etkili normal basınç yayılımı hemen gerçekleşmektedir. Dolgu malzemesinin üniformluk katsayısı $C_u > 5$, plastisite indisi $PI < 6$ ve gradasyonun da Karayolları Teknik Şartnamesi’nde önerilen değerlere (Tablo 1) uygun olması gerekmektedir [8].

Duvar yapımında; donatı elamanı olarak galvaniz kaplı çelik şerit kullanılması durumunda,

dolgu malzemesi, donatılarda korozyona sebebiyet vermemesi için bazı elektrokimyasal özelliklere sahip olması gerekmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi [8] tarafından önerilen bu değerler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Dolgu malzemesinin gradasyonu [8]

Elek Boyutu (mm)	% Geçen
125 (5’')	100
75 (3’')	85-100
12,5 (1/2’')	25-100
2 (No.10)	15-100
0,60 (No.30)	10-65
0,075 (No.200)	< 15

Tablo 2. Dolgu malzemesinin elektrokimyasal özellikleri [8]

Özellikler	Şartname Limitleri
Ph değeri	5-10
Suda çözünebilir klorür iyonu miktarı (mg/kg)	≤ 100
Toplam organik madde miktarı (%)	≤ 0,2
Suda çözünebilir sülfat iyonu miktarı (mg/kg)	≤ 200
Minimum resistivite (ohm·cm)	3000

2.2. Şerit Donatılı Toprakarme Duvar İmalat Aşamaları

Toprakarme duvar projesinde tesviye betonu 15 cm yüksekliğinde 30 cm genişliğinde dikdörtgen kesitli olarak dökülür (Şekil 2-a). İlk sıra prekast paneller hazırlanan tesviye betonunun üzerine yerleştirilir (Şekil 2-b). Panellerin yerleştirilip dolgu malzemesinin sıkıştırılması sırasında; panellere yük iletimini engellemek için geçici olarak ahşap kama veya takozlar, kalıcı olarak ise yüksek esnekliğe sahip kauçuk EPDM kullanılır. Daha üstteki panellerin yerleştirilmesinden sonra kullanılan ahşap kama veya takozlar çıkarılır. Şeritler, sıkıştırılmış geri dolgu üzerine serilerek bağlantı elemanları ile panellerin arka yüzüne bağlanır (Şekil 2-c). Montaj işlemine bir sıra panelin yerleştirilmesi, şeritlerinin serilip panellere bağlanması, şeritlerinin üst dolgusunun yapıp sıkıştırılmasından sonra ikinci sıra panellerin yerleştirilmesi şeklinde devam edilir. Bu işlem istenilen yüksekliğe ulaşıncaya kadar tekrarlanır. Dolgu malzemesi en fazla 20 cm kalınlığında katmanlar halinde serilerek sıkıştırılır (Şekil 2-d). Dolgu malzemesi, şartnameye uygun olmalı ve standart proktor deneyi ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığının minimum % 95’i olacak şekilde sıkıştırılmalıdır. Yüzey panellerinin montajının tamamlanmasından sonra harpuştta montajı yapılır (Şekil 2-e).

3. Materyal ve Metot

3.1. Şerit Donatılı Toprakarme İstinat Duvarının Projelendirilmesi

Projelendirmede ilk olarak ön tasarım yapılır. Ön tasarımda donatı kesiti ve toplam donatı sayısı hesaplandıktan sonra yapının stabilitesi incelenir. Şerit donatılı toprakarme istinat duvarının stabilitesi dış ve iç stabilize olarak iki aşamada hesaplanır.

3.1.1. Dış Stabilite

Şerit donatılı toprakarme istinat duvarının dış stabilize tahkiklerini değerlendirirken prekast panellerin ağırlığı ihmal edilerek sistemin bir ağırlık duvarı gibi çalışacağı kabul edilir. Bu kabule göre aşağıdaki tahkikler yapılır.

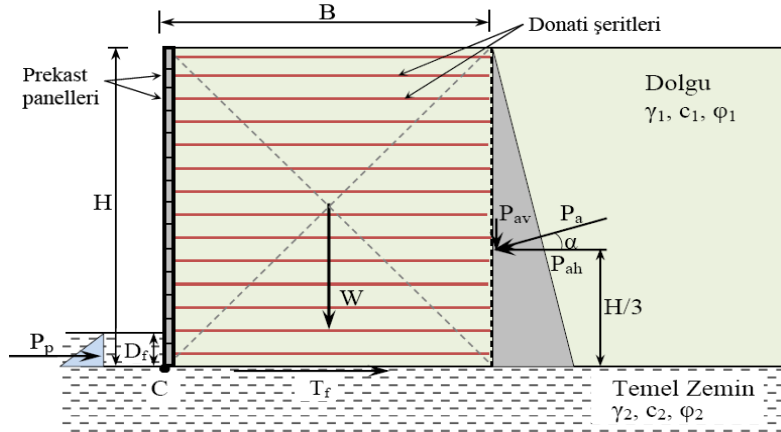


Şekil 2. Şerit donatılı toprakarme duvar imalat aşamaları; a) tesviye betonun dökülmesi b) prekast panellerin yerleştirilmesi c) çelik şeritlerinin montajı d) dolgunun sıkıştırılması e) harpuşa montajı

- a) Taban kayma tahkiki
- b) Devrilme tahkiki
- c) Taşıma gücü tahkiki
- d) Toptan göçme tahkiki

Bu tahkikler literatürde bilinen geleneksel yöntemlere göre yapıldığından bu çalışmada sadece kullanılan formüller verilmiştir.

Toprakarme yapı bir ağırlık duvarı gibi düşünülürse bu yapıya etki edecek dış kuvvetler; aktif toprak basınç (P_a), pasif toprak direnci (P_p) ve duvar ağırlığı (W) olmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Şerit donatılı duvarı üzerine etki eden dış kuvvetler

a) Taban Boyunca Kayma Tahkiki

Taban boyunca kaymaya karşı güvenlik katsayısı

$$G_{s-kayma} = \frac{\Sigma F_R}{\Sigma F_d} = \frac{T_f + P_p}{P_a \cos \alpha} = \frac{(\Sigma V) \tan \varphi_2 + Bc_2 + P_p}{P_a \cos \alpha} \quad (1)$$

denkleminde elde edilir. En düşük güvenlik sayısı 1.5 alınmalıdır [9]. Burada ΣF_R kaymayı önleyen kuvvetler toplamı, ΣF_d kaydırıcı kuvvetler toplamı, $\Sigma V = W + P_a \sin \alpha$ duvar tabanına etki eden düşey kuvvet, B donatı şerit boyu (duvar taban genişliği), c_2 ve φ_2 temel zeminin kohezyonu ve içsel sürtünme açısıdır. Yapının ekonomik ömrü içerisinde duvar önündeki zeminde kazı yapılmayacağına emin olunamıyorsa denklem (1)'deki pasif toprak direnci (P_p) ihmal edilir.

b) Devrilme Tahkiki

Devrilmeye karşı güvenlik katsayısı aşağıdaki formülden belirlenir. (1)

$$G_{s-devrilme} = \frac{\Sigma M_R}{\Sigma M_O} = \frac{W(B/2) + P_a \sin \alpha B}{P_a \sin \alpha (H/3)} \geq 1,3 \quad (2)$$

Burada ΣM_R burun noktasına (Şekil 3'teki C noktası) göre devrilmeye karşı koyan momentler toplamı, ΣM_O C noktasına göre devrilmeye çalışan momentler toplamıdır.

Yapıya etki eden kuvvetler ve eğilme momentleri tek bir normal kuvvete (N) dönüştürülürse (Şekil 4) bu kuvvet eksantriklik (e) kadar duvar ortasından uzaklaşacaktır. Eksantrikliğin $e < B/6$ 'dan küçük olması durumunda devrilme meydana gelmez ve devrilme tahkiki yapılmasına gerek yoktur. [10].

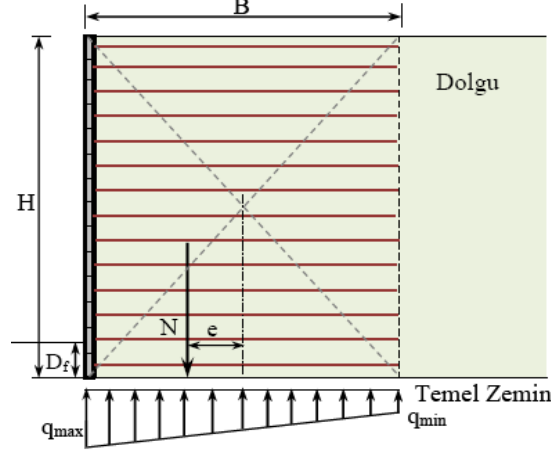
c) Taşıma Kapasitesi Tahkiki

Eksantriklik (e) artarak $B/6$ 'dan daha büyük olduğunda q_{min} negatif olur ve bu durumda tabanda çekme gerilmeleri oluşur. Zeminin çekme gerilmelerine karşı direnci çok az olduğundan bu istenmeyen bir durumdur. Bu durumda duvar genişliği yeniden belirlenerek çekme gerilmelerinin oluşmasının önüne geçilmelidir. $e \leq B/6$ (Şekil 4) durumunda taban basıncı;

$$q_{min} = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (3)$$

olmaktadır.

Taşıma gücü kontrolünde q_{max} incelemesi yapılır, maksimum taban basıncının temelin taşıma gücünü aşmaması gerekmektedir.



Şekil 4. Eksantrik yüklü şerit donatılı toprakarme istinat duvarı altında taban basıncı dağılımı [9]

Donatılı toprakarme istinat duvarı bir şerit temel olarak düşünülürse, nihai taşıma gücü Terzaghi taşıma gücü formülünden (4) belirlenebilir.

$$q_u = c_2 N_c + D_f \gamma_1 N_q + 0,5 B \gamma_2 N_\gamma \quad (4)$$

Burada c duvar altındaki zeminin kohezyon katsayısı, B duvar taban genişliği (çelik donatı boyu), D_f temel derinliği (Şekil 4), N_c , N_q ve N_γ temel zemininin içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı taşıma gücü faktörleridir.

Taşıma gücü güvenlik katsayısı [9]:

$$G_s - \text{taşıma gücü} = \frac{q_u}{q_{max}} \geq 3 \quad (5)$$

olması gerekmektedir.

d) Toptan Göçme Tahkiki

Şerit donatılı toprakarme istinat duvarı için tüm tahkikler yapıldığında, güvenlik katsayıları istenen değerlerde sağlansa da birçok durumda kazı sonucu beliren değişiklikler duvarın yapıldığı bölgede zeminin dengesini kaybederek duvarla birlikte göçmesi ihtimalini artırmaktadır. Bu nedenle toptan göçme tahkikinin yapılması gerekmektedir. Duraylılık tahkiki İsveç Dilim Yöntemi ile yapılabilir.

3.1.2. İç Stabilite

İç dengede, donatıların çekme gerilmeleri altında kopması ve yetersiz sürtünme sebebiyle dolgu zemininden sıyrılması incelenir [9]. Bu inceleme sonucunda gerekiyorsa donatıların sayısı, boyutları ve dolgu içine yerleştirme aralıkları yeniden belirlenir.

a) Donatı Kopma Tahkiki

Donatının yapıldığı malzemenin çekme dayanımı, uygun bir güvenlik sayısına bölünerek bulunur. Bir donatının taşıyabileceği maksimum çekme kuvveti T_i (Şekil 5) aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$T_i = T_{hi} + T_{qi} + T_{si} + T_{fi} + T_{mi} \quad (6)$$

Burada:

T_{hi} : Zemin yükünden oluşan çekme kuvveti

T_{qi} : Yayılı yükten oluşan çekme kuvveti

T_{si} : Düşey yükten oluşan çekme kuvveti

T_{fi} : Yatay yük

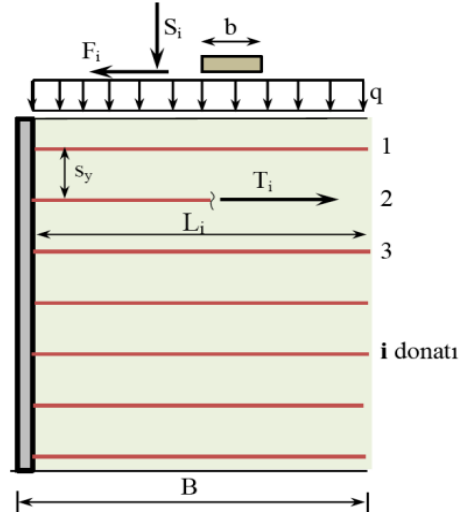
T_{mi} : Düşey yükten oluşan moment etkisidir.

Zemin yükünden oluşan çekme kuvveti T_{hi}

$$T_{hi} = (K_a \gamma h_i - 2c\sqrt{K_a}) s_y \quad (7)$$

$$T_{qi} = K_a q s_y \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır. s_y donatılar arası düşey aralık, q yayılı yük anlamına gelmektedir.



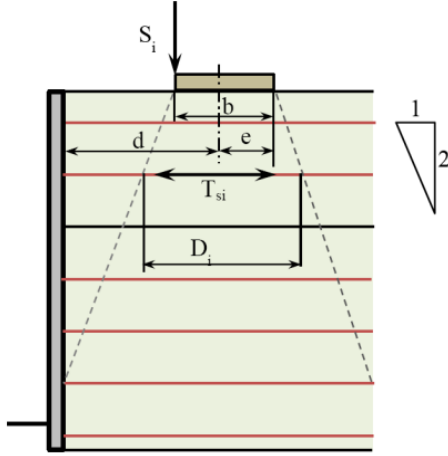
Şekil 5. Çekmeye etki eden kuvvetler [9]

Düşey yükten oluşan kuvvet T_{si} (Şekil 6);

$$T_{si} = K_a s_y \frac{S_i}{D_i} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (9)$$

$$h_i < 2d - b \text{ ise } D_i = h_i + b \quad (6) \quad (10)$$

$$h_i > 2d - b \text{ ise } D_i = d + \frac{h_i + b}{2} \quad (11)$$



Şekil 6. Dış yüklerin donatıda oluşturduğu etki [9]

Yatay yük T_{fi} ise Şekil 7'den

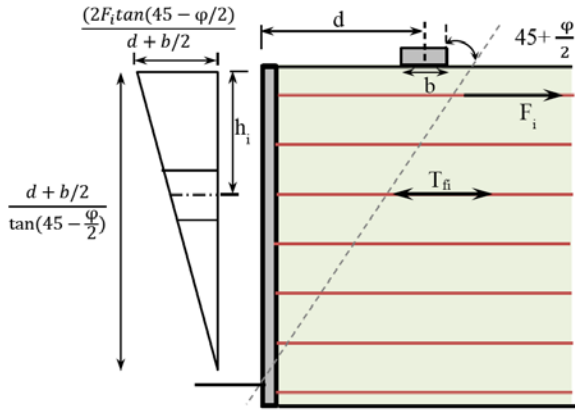
$$T_{fi} = 2S_y F_i Q (1 + h_i Q) \quad (12)$$

$$Q = \frac{\tan(45 - \frac{\varphi}{2})}{d + \frac{b}{2}} \quad (13)$$

$$T_{mi} = \frac{6K_a s_y M_i}{L_i^2} \quad (14)$$

$$M_i = F_i h_i \quad (15)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 7. Yatay yükün donatılara etkisi [9]

Burada L_i donatılan bölgenin efektif uzunluğu, S_i düşey yük F_i yatay yük, b yayılı yük genişliği, d yayılı yük ortası ile duvar yüzeyi arasındaki mesafe anlamına gelmektedir (Bakınız Şekil 5).

Maksimum çekme kuvveti hesaplandıktan sonra, şeritlerin kopma dayanımının kontrolü aşağıdaki kriterle yapılır.

$$T_{imax} < P_{at} b_s t \quad (16)$$

Burada P_{at} izin verilebilir çekme gerilmesi, b_s donatı genişliği ve t donatı kalınlığı anlamına gelmektedir.

b) Donatı Sıyırılma Tahkiki

Donatı sıyırılma incelemesinde, dolgu üst yüzeyinden h_i derinliğinde ve L_i uzunluğunda bir donatının iki yüzünde meydana gelen sürtünme kuvveti (sıyırılma direnci), donatıların kalınlığı ihmal edilebileceğinden;

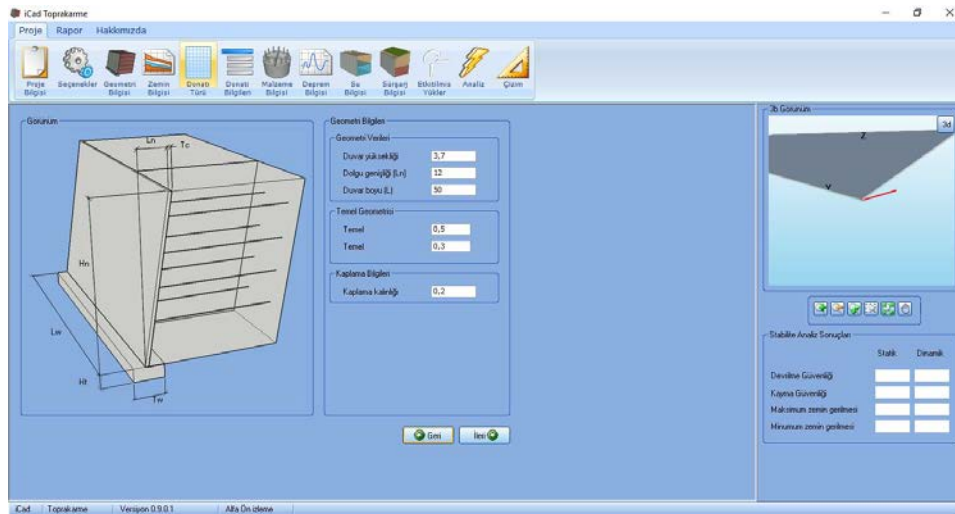
$$T_i = (P_i/2)(L_i(\gamma h_i + q) + cL_i) \quad (17)$$

ifadesi ile hesaplanır [9]. Burada P_i sürtünme katsayısı = $\tan\alpha$ ($0,5 < \alpha < 1$) anlamına gelmektedir.

3.1.3. İstinat Duvar Yazılımı (iCad Toprakarme)

Toprakarme istinat yapılarının tasarımının daha hızlı ve daha kolay yapılması amacıyla numerik analiz programları kullanılmaktadır. Kullanılan bu yazılımlarla sayesinde toprakarme sisteminin çözümlenmesinde yapılacak tahkikler doğrulanmaktadır. Toprakarme yapıların stabilite analizlerinde kullanılan numerik analiz programlarından biri de, Analiz Yapı Şirketinin geliştirmiş olduğu İCAD Toprakarme paket programıdır. Bu yazılım sayesinde; donatı türü, zemin cinsi, tabakalı zemin profili, su etkisi, şerit yük, eksantrik yük, farklı yanal toprak basınç katsayıları ve deprem etkisi gibi faktörler dikkate alınarak toprakarme yapıların iç ve dış stabilite analizleri hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Toprakarme yapıların stabilite analizlerinde etkin bir şekilde kullanılan numerik yazılıma ait program ara yüzü Şekil 8'de verilmiştir.

iCad Toprakarme programında analizi yapılacak toprakarme duvarın ilk aşamada geometrik bilgileri girilir, sonraki aşamada ise zemin bilgileri, şerit donatı bilgileri gibi diğer parametreler tanımlanır. Kullanılan yazılım ile tasarlanan toprakarme yapılar için belirlenen güvenlik katsayılarına bağlı olarak analiz gerçekleştirilir



Şekil 8. iCad Toprakarme programından ara yüzü ekran görüntüsü

3.2. Vaka Analizi

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü girişi ile Bartın-Ankara karayolu bağlantısı, köprülül kavşak ile yapılması düşünülmektedir. Hızlı, estetik ve deprem dayanımı yüksek olması sebebiyle köprünün yaklaşım rampasının şerit donatılı toprakarme istinat duvar ile yapılması öngörülmüştür. Toprakarme duvarının yüksekliği 3.7 metre dolgu genişliği 12 metredir. Köprüye 1/100 eğimle yaklaşması planlanmıştır. Projenin yapıldığı alan Bartın ili Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü mevkiinde yer almaktadır.

Toprakarme sistemin uygulanabilirliğinin araştırılması kapsamında iki adet temel sondajı yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Alınan numuneler üzerinde zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen deneyler yapılarak deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Proje güzergahı boyunca geçilen birimler Çaycuma Formasyonu açık yeşil, gri renklerde ince-orta katmanlı kumtaşı, silttaşı, kiltası ve kireçtaşının araldanmasının hakim olduğu volkanizmanın da eşlik ettiği bir birimdir. Donatılı yapı Çaycuma formasyonunun ayrışması sonucu oluşan kil üzerine oturmaktadır.

Bartın ili, Türkiye Deprem Haritasına göre 1. Derecede Deprem Bölgesi'nde bulunmaktadır. Çalışma alanı içerisinde geçen herhangi bir aktif fay bulunmamaktadır. Ancak çalışma alanının yaklaşık 100 km güneyinden Kuzey Anadolu Fay Sistemine ait Ladik-Tosya ve Gerede-Bolu fay segmentleri geçmektedir. Çalışma alanının Kuzey-Kuzey doğusunda, deniz tabanında 03.09.1968 tarihinde Ms=6.5 büyüklüğünde depreme neden olmuş bir ters fay yer almaktadır [11].

3.2.1. Beton Basınç Dayanımları

Beton taze halde iken standartlarda belirtildiği usullere göre (TS EN12350-1) küp şeklindeki kalıplara yerleştirilmekte ve bir gün sonra kalıplardan çıkarılmaktadır. Kalıplardan çıkarılan sertleşmiş beton numuneleri, deney tarihine kadar beton standartlarının belirttiği kür ortamında saklandıktan sonra, TS EN 12390-3'e [12] uygun üniform basınç yükü altında kırılmaya tabi tutulmaktadır. Beton döküm esnasında her bir yapı için 3 farklı numune alınmış ve standart basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları ise Tablo 4'te verilmiştir.

3.2.2. Çelik Şeritlerin Çekme Deneyleri

Kullanılan çelik donatı genişliği 80 mm ve kalınlığı 5 mm olan galvaniz çelik şeritlerdir. K.T.Ş.'ye uygun olup olmadığının kontrolü amacıyla ASTM E8-E8M [13] standardına göre şerit donatılar çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi ile malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışları belirlenmektedir. Deney, boyutları standartlara uygun daire veya dikdörtgen kesitli deney parçasının çekme cihazına bağlanarak artan eksenel kuvvetin uygulanması ve uygulanan kuvvete karşılık gelen uzamanın ölçülmesi, esasına dayanır. Bu çalışmada kullanılan çelik şeritlerin çekme dayanımı 588 MPa olarak bulunmuştur (Tablo 4).

3.2.3. Dolgu Malzemesi Üzerinde Yapılan Deneyler

Dolgu malzemesi Bartın Merkez Gürgenpınarı Köyü civarlarında bulunan kireçtaşı kırma taş olarak kullanılmıştır. Malzeme ocağındaki kireçtaşı bol çatlaklı olup, çatlaklar kil dolgululu ve açıklıkları yer yer 20 cm'yi geçmektedir. Malzemenin kırılması esnasında teknik şartlar nedeniyle, ince malzemeyi eleyerek uzaklaştırmak mümkün olmadığından dolgu malzemesi %8 kadar ince dane içermektedir. Dolgu malzeme üzerine elek analizi kıvam limitleri, Standart Proktor deneyi, direkt kesme deneyi ve malzemenin elektrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi deneyleri yapılmıştır. Şerit donatılı toprakarme duvar sisteminin dolgu malzemesi olarak kullanılan malzeme, K.T.Ş [8]'de belirlenen granülometrik özelliklere sahip olmalıdır (Tablo 4). Yapılan elek analizi sonucu seçilen dolgu malzemesinin dane boyu dağılımının şartnamede belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı ve dolgu malzeme olarak kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir.

Direkt kesme deneyi 4 numaralı elekten geçen ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış malzeme üzerinde

yapılmıştır. Deney sonucu içsel sürtünme açısı (ϕ) 43° olarak bulunmuştur. 4 numaralı elek üzerinde kalan malzeme katılığında bu değer daha da artacaktır. Ancak güvenli tarafta kalmak için bu çalışmada deney sonucu elde edilen değerler kullanılmıştır.

Dolgu malzemesinin elektrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Dionex Ics-1100 iyon kromatografi cihazı kullanılmıştır.

4. Bulgular

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü girişi ile Bartın-Ankara karayolu bağlantısı köprülül kavşak projesi kapsamında, geometrik koşullar ve saha araştırmaları sonuçları değerlendirilerek, imalatı planlanan toprakarme duvara ait proje verileri elde edilmiştir. Temel zemin araştırması kapsamında alınan örselenmiş-örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Toprakarme duvara ait ön tasarım çalışmaları kapsamında seçilen kesit için iç, dış stabilite analizleri ve genel stabilite analizleri yapılmıştır. Bununla beraber toprakarme geri dolgusunda kullanılacak malzemenin şartnamelerce belirlenen kriterlere uygunluğu, yapılan deneylerle incelenmiştir.

Karayolları teknik şartnamesine göre gerekli deneyler yapılarak sonuçları K.T.Ş. tarafından önerilen değerler ile karşılaştırılmış ve Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Toprakarme duvarın oturacağı temel zemin özellikleri

Zemin Özelliği	Değer
Doğal birim hacim ağırlık (γ_n) (kN/m ³)	18,14
Su muhtevası w (%)	32
Likit Limit LL	80
Plastik Limit PL	28
No 4'te kalan (%)	0
No 200'den geçen (%)	98
Zemin Sembolü	CH
İçsel sürtünme açısı ϕ (Derece)	8
Kohezyon katsayısı c (kN/m ²)	65

Toprakarme duvar projelerinde K.T.Ş.'ye göre tesviye betonunun 20 N/mm², harpuşa, harpuşa kirişi ve prekast panellerin beton basınç dayanımı minimum 30 N/mm² olmalıdır. Tesviye betonunun 40.41 N/mm², harpuşanın 46.48 N/mm², harpuşa kirişinin 44.48 N/mm² ve prekast panellerin ortalama beton basınç dayanımı 47.17 N/mm²'dir.

Şartnameye göre çelik şeridi, orta veya yüksek karbon çeliği özelliğinde ve çekme mukavemetinin minimum 510 MPa olması gerekir [8]. Bu çalışmada yapılan deney sonuçlarına göre seçilen çelik şeritlerin ortalama çekme mukavemeti 588 MPa olarak belirlenmiştir.

Toprakarme geri dolgu malzemesi üzerinde yapılan elek analizi ile kıvam limitleri deney sonuçlarına göre hem malzemenin gradasyonu hem de plastisite indisi, şartnamelerde belirtilen değerlere uygun olduğu görülmektedir.

Dolgu malzemesinin elektrokimyasal özellikleri incelendiğinde; alınan numunenin ph değeri 9.23, minimum resistivite değeri 13876.2 ohm*cm, suda çözülebilir klorür iyonu miktarı 13.98 mg/kg, suda çözülebilir sülfat iyonu miktarı 4.24 mg/kg ve toplam organik madde miktarı %0.15 olarak ölçülmüştür. Numuneler üzerinde yapılan kimyasal analizler sonucunda, toprakarme dolgu malzemesinin elektrokimyasal özelliklerinin şartnamelerde belirlenen koşulları sağladığı görülmektedir (Tablo 4).

Yapıda kullanılan çelik şerit genişliği 80 mm ve kalınlığı 5 mm'dir. Dolgu zeminin ϕ , c ve γ değerleri sırasıyla 43°, 0 kN/m² ve 21.4 kN/m³'tür. Temel zemininin ise ϕ , c ve γ değerleri sırasıyla 8°, 65 kN/m² ve 18.14 kN/m³'tür. Yol üst yapısı kalınlığının 0.2 m olması ve birim hacim ağırlığının, dolgunun birim hacim ağırlığına yakın olması sebebiyle bu çalışmada dolgu ile kaplama bir bütün olarak düşünülmüş ve ilave yayılı yük hesaba katılmamıştır.

Tablo 4. K.T.Ş. değerleri ile vaka analizi sonucunda bulunan değerlerin karşılaştırılması

TESTLER		K.T.Ş. [8]		VAKA ANALİZİ		SONUÇ
Dolgu malzemesi Testleri	Plastisite indeksi (PI)	< 6		4,1		YETERLİ
	Dane çapı dağılımı	Elek Boyutu (mm)% Geçen		Elek Boyutu (mm)% Geçen		YETERLİ
		125 (5")	100	125 (5")	100	
		75 (3")	85-100	75 (3")	100	
		12.5 (1/2")	25-100	12.5 (1/2")	79.2	
		2 (No.10)	15-100	2 (No.10)	32.8	
		0.6 (No.30)	10-65	0.6 (No.30)	21.6	
		0.075 (No.200)	< 15	0.075 (No.200)	7.9	
	Üniformluk katsayısı (C _u)	>5		58		YETERLİ
	Ph değeri	5-10		9.23		YETERLİ
	Suda çözünebilir klorür iyonu miktarı (mg/kg)	≤ 100		13.98		YETERLİ
	Toplam organik madde miktarı (%)	≤ 1		0.15		YETERLİ
	Suda çözünebilir sülfat iyonu miktarı (mg/kg)	≤ 200		4.24		YETERLİ
Minimum resistivite (ohm.cm)	>3000		13876.2		YETERLİ	
Maksimum Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m ³)			21.4		YETERLİ	
Sıkışma oranı (%)	>95		99.8		YETERLİ	
İçsel sürtünme açısı (Derece)	≥30		43		YETERLİ	
Tesviye betonunun (N/mm ²)	>20		40.41		YETERLİ	
Prekast panel betonu (N/mm ²)	>30		47.17		YETERLİ	
Harpuşta betonu (N/mm ²)	>30		46.48		YETERLİ	
Harpuşta kiriş betonu (N/mm ²)	>30		44.48		YETERLİ	
Çelik Şeritlerin Çekme Testi	Çelik Şeritlerin Çekme Mukavemeti (MPa)	>510		588		YETERLİ

Elde edilen deney sonuçları ile yapılması planlanan 3.7 m yüksekliğinde, 12 m dolgu genişliğindeki toprakarme duvarın 50 m uzunluğundaki kısmının, iCad Toprakarme yazılım programı kullanılarak statik durum ve deprem durumu için iç ve dış stabilize analizleri yapılmıştır.

Bu analizler sonucunda sistemin statik ve sismik performans açısından güvenlik katsayılarının istenen minimum değerlerin üzerine çıkması için düşey ve yatay yönde 0.5 m aralıklarda döşenmiş 4.6 m uzunluğundaki çelik şeritlerin yerleştirilmesi gerekliliği anlaşılmıştır. Yapılan iç ve dış stabilize analiz sonuçları Tablo 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Dış stabilize analizi sonuçları

Devrilme Güvenliği				
Durum	Önleyici moment	Devirmeye çalışan moment	Güvenlik Katsayısı	Sonuçlar
Statik	1283.87	493.25	2,6 > 1,5	Yeterli
Dinamik	1530.44	811.16	1,9 > 1,3	Yeterli
Kayma Güvenliği				
Durum	Kaymayı önleyen kuvvet	Kaydırıcı kuvvet	Güvenlik Katsayısı	Sonuçlar
Statik	318.69	172.94	1,8 > 1,5	Yeterli
Dinamik	349.78	252.52	1,4 > 1,0	Yeterli
Zemin Taşıma Kapasitesi Kontrolleri				
Durum	Maksimum zemin gerilmesi	Zemin emniyet gerilmesi	Sonuçlar	
Statik	194.19	200	Yeterli	
Dinamik	261.03	300	Yeterli	
Durum	Minimum zemin gerilmesi	Zemin emniyet gerilmesi	Sonuçlar	
Statik	44.7	200	Yeterli	
Dinamik	1.17	300	Yeterli	

Tablo 6. İç stabilite analizi sonuçları

Sıyırılma Güvenliği (Statik Durum)								
No	Z(i)	Ti	Ta	Sıyırılma güvenliği	Güvenlik Katsayısı	Sonuçlar		
1	0.2	0.46	204	444.72	1,5	Yeterli		
2	0.5	1.35	204	150.92	1,5	Yeterli		
3	1	1.93	204	105.66	1,5	Yeterli		
4	1.5	2.51	204	81.28	1,5	Yeterli		
5	2	3.09	204	66.04	1,5	Yeterli		
6	2.5	3.67	204	55.62	1,5	Yeterli		
7	3	4.25	204	48.03	1,5	Yeterli		
8	3.5	4.32	204	47.25	1,5	Yeterli		
Sıyırılma Güvenliği (Dinamik Durum)								
No	Z(i)	Ti	Ta	Sıyırılma güvenliği	Güvenlik Katsayısı	Sonuçlar		
1	0,2	0.98	0	207.94	1	Yeterli		
2	0.5	3	0	68.02	1	Yeterli		
3	1	4.28	0	47.62	1	Yeterli		
4	1.5	5.45	0	37.42	1	Yeterli		
5	2	6.5	0	31.37	1	Yeterli		
6	2.5	7.44	0	27.42	1	Yeterli		
7	3	8.26	0	24.7	1	Yeterli		
8	3.5	8.04	0	25.39	1	Yeterli		
Kopma Güvenliği (Statik Durum)								
No	Z(i)	Lo	Le	Tf	Ti	Kopma güvenliği	Güvenlik Katsayısı	Sonuçlar
1	0,2	4.6	2.95	1,08	0.48	2,25	1,5	Yeterli
2	0.5	4.6	3.18	3.08	1.35	2.28	1,5	Yeterli
3	1	4.6	3.4	6.59	1.93	3.41	1,5	Yeterli
4	1.5	4.6	3.62	10.54	2.51	4.2	1,5	Yeterli
5	2	4.6	3.84	14.91	3.09	4.83	1,5	Yeterli
6	2.5	4.6	4.07	19.72	3.67	5.38	1,5	Yeterli
7	3	4.6	4.29	24.96	4.25	5.88	1,5	Yeterli
8	3.5	4.6	4.51	30.63	4.32	7.09	1,5	Yeterli
Kopma Güvenliği (Dinamik Durum)								
No	Z(i)	Lo	Le	Tf	Ti	Kopma güvenliği	Güvenlik Katsayısı	Sonuçlar
1	0,2	4.6	2.95	1,08	0.98	1,10	1	Yeterli
2	0.5	4.6	3.18	3.08	3	1.03	1	Yeterli
3	1	4.6	3.4	6.59	4.28	1.54	1	Yeterli
4	1.5	4.6	3.62	10.54	5.45	1.93	1	Yeterli
5	2	4.6	3.84	14.91	6.5	2.29	1	Yeterli
6	2.5	4.6	4.07	19.72	7.44	2.65	1	Yeterli
7	3	4.6	4.29	24.96	8.26	3.02	1	Yeterli
8	3.5	4.6	4.51	30.63	8.04	3.81	1	Yeterli

5. Sonuçlar

Bu çalışmada Bartın Üniversitesi Kutlubeyazıcılar Kampüsü girişini Bartın – Ankara karayolu ile bağlantısını sağlamak için yapılması düşünülen 3.7 m yüksekliğinde ve 12 m dolgu genişliğinde şerit donatılı toprakarme duvarının yapısal elemanları, stabilite analizleri ve dayanma duvarında kullanılacak malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma kapsamında toprakarme duvara temel teşkil edecek zeminden örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınarak zemin özellikleri belirlenerek taşıma gücü açısından kontrolleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan toprakarme duvarda kullanılacak malzemelerin tümünün Karayolları Teknik Şartnamesi kriterlerine uygun olduğu görülmektedir.

Toprakarme yapıdan kaynaklanan maksimum taban basıncı, zeminin izin verilebilir taşıma gücü değerinden düşük olduğu

görülmüştür. Bununla birlikte, sismik koşullar göz önüne alındığında zemindeki maksimum gerilmenin aynı şekilde zeminin izin verilebilir taşıma gücü değerinden daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan taşıma gücü analizlerinden toprakarme duvarın emniyetli olduğu görülmüştür. Ayrıca, iCad Toprakarme yazılımıyla toprakarme duvarın 50 m uzunluğundaki kısmı için yapılan stabilite analizlerinden yapının stabilitesinin düşey ve yatay yönde 0.5 m aralıklarda döşenmiş 4.6 m uzunluğunda çelik şeritlerle sağlanabileceği görülmektedir.

Teşekkür

Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan bu çalışmada vermiş oldukları katkılarından dolayı Alagözler Şirketler Grubu çalışanlara teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Yıldız, T., Aşırı Yüklemeler Altında Toprakarme İstinat Yapılarının Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
2. Kaya T., Özbatur M., Durgunoğlu H. T., Donatılı Zemin Duvar Yapılarının Depremde Davranışı, TMMOB Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 1. Özel Konulu Sempozyum, İstanbul, 2007.
3. Elias, V., Christopher, B.R., and Berg, R.R., FHWA-NHI-00-043: Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines. Woodbury, USA, 2001.
4. Alkaya, D. ve Yeşil, B., Metal şerit ve Geosentetik Donatı Kullanılarak Oluşturulan Donatılı Zemin (Toprakarme) Yapıların Spreadsheet Kullanarak Analizi, Akademik Bilişim, Uşak Üniversitesi, 2012.
5. McKittrick, D.P., Reinforced Earth: Application of Theory and Research to Practice. Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques, Sydney, Australia, October 16, 1978.
6. Sankey J.E., and Segrestin P., Evaluation of Seismic Performance in Mechanically Stabilized Earth Structures. Landmarks in Earth Reinforcement, Volume 1. Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Kyushu, Japan, 2001.
7. Ekli O., Durgunoğlu H.T., ve Özbatur M., Donatılı Zemin Kenarlık Duvarlarının Numerik Analizi-Vaka Analizi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği XI. Ulusal Kongresi, Trabzon, 2006.
8. Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
9. TS 7994, Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1990.
10. Maksimovic, M., Mehanika tla, Cetvito izdanje. AGM Knjiga, Beograd, 2008.
11. Hendese Jeoteknik Müh. İmar İnş. San. ve Tic. Ltd.Şti. Bartın Üniversitesi Kampüs Alanı (Kutlubeyyazıcılar) İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu, Ankara, 2010.
12. TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
13. ASTM E8-E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, USA, 1999.



Tantalyumun Yüksek Sıcaklıklarda Sızdırmazlık Özelliği

Halil ÇETİN

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Burdur / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 16.11.2017 Düzeltme Tarihi: 20.12.2017 Kabul Tarihi: 20.12.2017

Özet

Ta ergime sıcaklığı 2996 0C ile yüksek sıcaklığa dayanan en iyi refraktör malzemelerinden biridir. Korozyon direnci birçok asit bileşimine karşı oldukça iyidir. Tantalyum(Ta) 'un bazı özellikleri kendine hastır ve bazı uygulamalar için gereklidir. Birçok asite ve aşındırıcıya karşı yaklaşık cam kadar iyidir. Ayrıca kolay işlenebilir olması; onu bükme, hadde ve kaynak ile kolayca şekil verilmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada Na ve Zn gazlarının deney tüpünden sızmasını önlemek için Tantalyumun kapak olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sızdırmazlık, Deney tüpü, Kapak, Karışmazlık noktası

Sealing Properties of Tantalum at High Temperatures

Abstract

Ta is perfect refractor material with melting point is 2996 0C to resist high temperature. It has a good corrosive resist against to a lot of acid formation. Ta has a special features and that is necessary for some applications. It is very good to resist a lot of acid and corrosive material approximately glass up. Also. It is possible easily forming to bend it, rolled back and to make welding. In this study, the use of tantalum lid was investigated in order to prevent leakage of buffers in Na and Zn gases experiment.

Keywords: Leaking, Tube, Cover, Immiscibility point

1. Giriş

Refraktörlerde Yüksek sıcaklık mühendisliği uygulamalarında; deney tüplerinde, valflerde, uzay ve havacılık sanayinde Tantalyum özel öneme sahiptir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı olması sebebi ile, en iyi refrakter malzemelerinden biridir. Ta ile oda sıcaklığında çok kolay çalışılabilir. Kaynak yapılmış tantalyum, şekillendirilebilir hatta çekilebilir[1]. Ta sünekliği ve yoğunluğu ile savunma sanayinde, zırhlı teçhizat için en çok tercih edilen malzemedir. Yoğunluğu ve radyoaktif kararlılığı sebebiyle radyoaktif malzemelerin saklanması için çok kullanışlı bir malzemedir. Ta tornalanabilir ve çekilebilir. Bakır gibi sertleşebilir. Ta asitlere ve sıvı metallerle karşı çok dayanımlıdır. Asitlere karşı direnci camkine eşittir. Bu özellikleri sebebiyle, Ta korrosif sıvılar için valflerin üretiminde, ısıtıcı elementlerde deney tüpleri yapımında cerrahi implantların yapımında kullanılmaktadır. Na-Zn13 faz diyagramının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen önceki tüm çalışmalarda[2-6] liküdü eğrisi belirlenmemiştir. Bunun nedeni deney tüpünden Na ve Zn buharlarının aktif özellikleri sebebiyle kaçması sonucunda doğru ölçüm yapılamamasıdır. Bu çalışmada Ta kapak kullanılarak Na ve Zn buharlarının deney tüpünden kaçması önlenmiş ve doğru ölçümlerin elde edilmesi ile Na-Zn13 faz diyagramında liküdü eğrisi belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Ta periyodik tablonun 73 numaralı elementidir. Ergime sıcaklığı 2996 0C ve yoğunluğu 16.654 g/ cm³'dir. Ta ile oda sıcaklığında çok kolay çalışılır. Saf Ta yaklaşık olarak 1204 0C de rekristalize olur.

Tantalyumun bazı özellikleri kendine özgü olduğundan, değerli ve yüksek maliyetli bir malzemedir. Tantalyumun işlenebilirliğinin kolay olması sebebiyle, istenilen şekil kolayca verilebilir. Tantalyum işlenirken çubuk şekline dönüşme eğilimindedir. Bunu önlemek için yüksek basınç altında şekillendirmelerde kalıp yağlayıcılar önerilmektedir. Birçok üretici tantalyumu geleneksel metotlarla kolayca üretebilmektedir. Aynı zamanda yoğunluğu yüksek ve sünek malzemedir. Ta şekillendirmede bakır ile aynı

uygulamalardan geçer. Tane yönünde ve aksi istikamette soğuk olarak şekillendirilebilir. Torna edilebilir ve çekilebilir, bakır gibi sertleşebilir. Tantalyum mükemmel termal iletkenliğe sahiptir. Bu özelliği ile asidik ortamda korozyona dayanım özelliği ile birlikte değerlendirilirse asit üretim cihazlarında ısı değiştirgeç malzemesi olarak kullanılması mümkündür. Ta asitlere ve sıvı metallerle karşı oldukça dayanıklıdır. Asitlere karşı direnci camkine eşittir. Sıvı metallerle karşı 899 0C ye kadar dayanıklıdır. Sadece HF asit, sülfürik asit buharı ve güçlü alkaliler tantalyumun korozyon direncini kirabilirler.

Tablo 1. Tantalyumun fiziksel özellikleri

Atomik Ağırlık	180,95
Yoğunluk	16,6 g/cm ³
Ergime Noktası	3290 K, 3017 0C ,5462 0 F
Kaynama Noktası	5731 K, 5458 0C, 9856 0F
Termal Genleşme Katsayısı(20 0C)	6,5x 10-6/ 0C
Elektriksel Direnç (20 0C)	13,5 mikroohms- cm
Spesifik Sıcaklık	0,036 kal/ g/0C
Termal İletkenlik	0,13 kal/ cm ² / cm 0C /sn

Tantalyum elektronik parçalarda, özellikle kapasitör üretiminde, kimyasal cihazlar, asit ve sıvı metaller için muhafaza kapları imalatında, sıvı metal soğutucu devrelerinde; kapılar boru ve klape imalatında, füze teknolojisi ve nükleer reaktör soğutucu devre elemanlarında kullanılmaktadır. Tantalyum roket motorlarında ısı başlığı olarak, yarı iletkenlerin üretiminde, iyon implanteri olarak, ayrıca Ta radyasyon başlığı olarak da kullanılmaktadır. Tantalyum mükemmel bir gaz gidericidir. Ayrıca ısı işlem operasyonları sırasında meydana gelen kirliliklerin giderilmesinde de kullanılmaktadır.

Tantalyum korozyona en dirençli malzemelerden biridir. Tantalyumu korozyon direnci camla karşılaştırılabilir. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklara dayanabilir olması onu çok yerde avantajlı kılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda asitlere, sıvı metal veya

metal eriyiklerine direnç göstermesi uygulama alanlarını genişletmiştir. Yaptığımız bir proje içinde, kullanılan Mo- çelik alaşımı bir tüp içerisinde Na ve Zn gazlarının dışarı sızmasını önlemek için tüp üzerine Ta kapak kullanıldı. Aşağıda verilen Tablo 2 ile muhtelif asit ve malzemelere karşı tantaliumun korozyon direnci verilmektedir.

Tablo 2. Tantaliumun korozyon direnci

Ortam	Konsantrasyon	Sıcaklık	Tantalium
Asetik Asit	50%	Kaynama	Hasar yok
Brom	Kuru	93°C	Hasar yok
Klor	Islak	93°C	Hasar yok
Kromik Asit	50%	Kaynama	Hasar yok
Hidroklorik Asit	5%	93°C	Hasar yok
	30%	93°C	Hasar yok
Nitrik Asit	30&	Kaynama	Hasar yok
Sodyum Hidroksit	65%	Oda	*
Sülfürik Asit	40%	Kaynama	Hasar yok
	98%	Kaynama	%2 Hasar

*Malzeme hidrojen atağı sırasında kırılabilir olabilir

İşlenmesi son derece kolay bir metaldir. Soğuk işlenebilir. HMK (Hacim merkezli kübik) kristal yapısından dolayı kolay dökülebilir bir metaldir. % 95 hatasızlık oranıyla soğu olarak şekillendirilebilir. Tantalium; haddelenebilir, dövülebilir ve çekilebilir. Uygun soğutucular kullanılarak yüksek hızda karbürütlü uçlarla tornalanabilir. Tantalium kaynakla, elektron ışını veya tungsten asal gaz kaynağı ile kaynaklandığında, lehimlendiğinde. Perçinlendiğinde mukavemeti artırılabilir. Tantalium işlenirken

çubuk şekline girme eğilimindedir. Bundan kaçınmak için basınç altında yağlayıcı ve kalıplar kullanılabilir.

Tantalium üretimi 3 farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir [7];

a) KCl-NaCl (%80)-TaF₆K₂ (%20) Elektrolizi ile

Serbest hava akımında ve 650- 850°C ısıda yapılır. Katot olarak kullanılan demir krosette Ta toplanır. Hidrojen altında ısıtılarak hidrür haline getirilir. Hidrür çok kırılığandır 35 mikronun altında öğütülebilir. 1100 °C nin altında hidrür hızla bozularak Ta elde edilir.

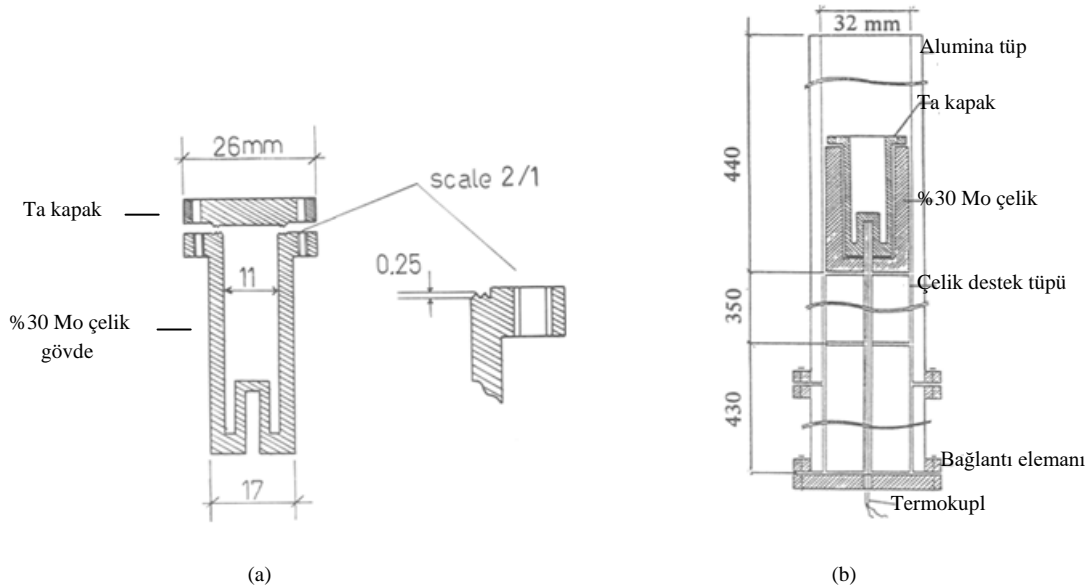
b) Karbotermi Metodu ile

Bir kuru işlem metodudur. Ta₂O₃+C karışımı bir levha hazırlanır. Bu levha 2300 °C ısıda bir fırında kavrulur. Ta₂O₃ +5C - 2Ta+ 5CO reaksiyonu sonucu Ta sünger görünüşüyle elde edilir. Bu yöntemin dezavantajı; çok yüksek sıcaklıklarda uzun süre sentezlenmesi sorunudur. Bu dezavantajların kaldırılması yönünde çalışmalar devam etmektedir.

c) Tantalium ve Potasyum Karışımı Çift Sodyum Florür Tuzunun Redüksiyonu ile

Bu karışım çelik bir kroset içerisinde 1100 °C ye kadar ısıtılır. Alkali florürler karışımı elde edilir. Daha sonra 1200 °C de gazlar uçurularak Ta elde edilir.

Tantalium kapak tasarımı şekilde gösterildiği gibi yapılarak, imal ettirilmiştir.



Şekil 1. a) Ta Kapak Tasarımı (b) Isıtıcı ve Dene Tüpü

3. Bulgular

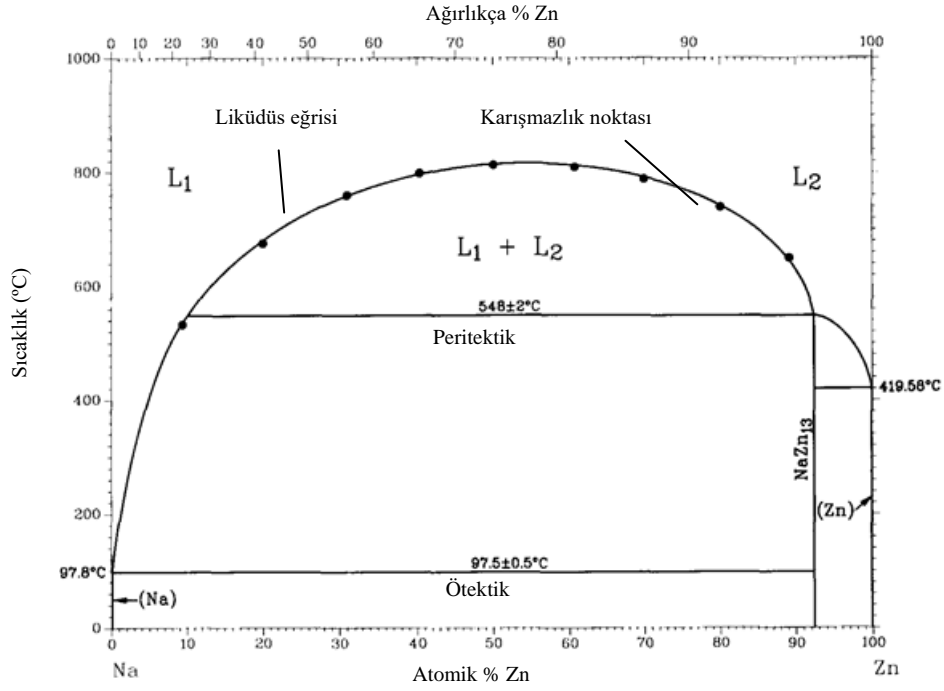
Tasarımı tarafımdan yapıp imal ettirilen Tantalium kapak kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda deney tüpünden aktif haldeki Na ve Zn13 gazlarının kaçmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda Na-Zn13 faz diyagramında daha önce belirlenememiş olan liküdüs eğrisi üzerindeki karışmazlık noktaları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda grafik halinde verilmiştir.

4. Sonuçlar

Ta ve alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda asitlere, sıvı metallere ve metal eriyiklerine karşı göstermiş olduğu korozyon direnci; bu

metale eşsiz bir avantaj sağlamıştır. Özellikle daha önce Na-Zn13 alaşımı ile yaptığımız deneysel çalışmalarda görüldü ki Na ve Zn 7000C ile 10000C aralığında %30 Molibdenli çelik alaşımından yapılmış deney tüpü içerisinde; kap çeperlerini ve aynı malzemedeki yapılmış kapağı delik deşik ederek, aktif haldeki Na ve Zn gazları deney tüpünden dışarı sızmışlardır. Daha sonra %30 Molibdenli çelikten üretilen kapak yerine Ta kapak kullanılarak, Na ve Zn buharlarının tüp dışına sızması engellenmiştir. Bu sayede Na-Zn13 alaşımına ait faz diyagramında liküdüs eğrisi belirlenmiştir.

Alkali metallerin faz diyagramlarının belirlenmesi konusunda ileriki çalışmalarda Tantalium kapak kullanılarak kesin sonuçların alınması mümkün olabilecektir.

Şekil 2. Na-Zn₁₃ Faz Diyagramı**Kaynaklar**

1. Sources and Properties of Tantalum, M.Forest Materials Worl, Vol. 10, no.pp.14-16.October 2002
2. Mathewson C.H., Z.Anorg.Allg. Chent, 48, 195-200 (1906).
3. Zintl E., Z. Elektrochem., 44,104 (1938).
4. Hansen M. and Anderko I.C., Constitution of Binary Alloys, McGrawHill, New York (1958).
5. Hausler W.,The Activity of Sodium in Molten Sodium-ZincAlloys at 600 °C," Z. Metallkd., 51, 95 (1960).
6. Lantraiov M.E, Morachevskii A.G., and Antonova M.I., Zh. Pril~ Kh/m, 36
7. Kaynak Y., Tantalum Nedir?, Madencilik Dergisi, Cilt 10, Sayı 2, 1971



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Astronot Giysilerine Uygulanan Testler Üzerine Bir Araştırma

Emrah TEMEL*, Faruk BOZDOĞAN

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 22.11.2017 Düzeltme Tarihi: 08.12.2017 Kabul Tarihi: 12.12.2017

Özet

Astronot giysileri, astronotların uzayın sert ve ölümcül koşullarında barınmalarını ve korunmalarını sağlayan hareketli bir muhafaza kabinidir. Bu elbise, astronotun soluk alıp verebilmesini sağlayan basınçlandırılmış bir iç atmosfere sahiptir. Astronot giysileri, aşırı sıcak ve aşırı soğuk ortam şartlarında yeterli termal izolasyon sağlayabilmesinin yanında, radyasyona ve mikrometeoroidler gibi hiper hızlı (~7 km/sn) parçacıklara karşı da yeterli dayanıma sahip olmak zorundadır. İnsanoğlu, astronot giysileri sayesinde bugüne kadar uzayın derin boşluğunda 4000 saatin üzerinde hayatta kalmayı başarabilmiş ve uzay istasyonu inşası da dâhil olmak üzere birçok görevi yerine getirebilmiştir. Bu noktada karşılaşılan önemli zorluklardan biri ise yeryüzünden yüz binlerce kilometre uzakta olan bir ortama uyum sağlayacak giysilerin o ortama uygunluğunun test edilmesidir. Hakkında hiçbir bilgi sahibi olunmayan, hatta bilgi sahibi olmak için gidilmeye çalışılan bir ortamın tehlikeleri ve yaşamsal koşulları hakkında yeterli bilgiye sahip olmak, insanoğlunun uzun yıllarını almış ve zaman zaman acı tecrübeler bırakmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye Uzay Ajansı'nın kurulmasına yönelik girişimlerin hızlandırıldığı bu dönemde, gelecekte üretilebilecek yerli bir astronot giysisi için ihtiyaç duyulacak yeterlilik kriterlerine ve testlerine ilişkin bilgi birikimine katkıda bulunmaktır.

Anahtar Kelimeler: Astronot giysileri, Uzay giysileri, Mekik dışı hareketlilik birimi, Mekik dışı aktivite giysileri, Astronot giysi testleri

A Study on Tests Applied to Spacesuits

Abstract

A spacesuit is a mobile storage cabin that allows astronauts to be sheltered and protected under the hard and deadly conditions of space. This suit has an internal atmosphere that allows the astronaut to breathe into its pressurizing environment. Spacesuits have to be resistant to radiation and hypervelocity (~7 km / sec) particles such as micrometeoroids, as well as being able to provide thermal insulation in extreme hot and extreme cold conditions. Mankind has been able to survive over 4000 hours in space thanks to spacesuits and has been able to fulfill many tasks including the construction of the space station. One of the major challenges faced at this point is to test the suitability of space suits into an environment that is hundreds of thousands miles away from the earth. Having enough knowledge about the dangers and vital conditions of an environment that has no knowledge about it before has taken many years of humanity and left painful experiences at times.

In consequence of the establishment of the Turkish Space Agency is recently accelerated, the aim of this study is to contribute to the knowledge of the requirements and tests for a future spacesuit that can be manufactured in Turkey.

Keywords: Spacesuits, Extravehicular mobility unit, Extravehicular activity suits, Spacesuit tests

1. Giriş

Astronot kelimesinin kökeni, Yunanca bir kelime olan astron kelimesidir. Astron Yunancada star yani yıldız anlamına gelmektedir. Astronot ise İngilizce'de "Star Sailor" anlamına gelmektedir. Türkçesi "Yıldız Gemicisidir". Astronot, kozmonot ya da uzay insanı, uzay çalışmalarına katılmak üzere eğitilen kişi olup uzaya gönderilen araçları kullanmak ve gerektiğinde uzaydaki gök cisimlerini incelemekle görevli olan kişilere verilen isimdir [1].

Astronot giysileri, astronotların uzayın sert ve ölümcül koşullarında barınmalarını ve korunmalarını sağlayan hareketli bir muhafaza kabinidir. Bu elbise, astronotun ihtiyaç duyduğu basınçlandırma ortamına ve soluk alıp verebilmesini sağlayan bir iç atmosfere sahiptir. Vücuda oksijen girişinin sağlanmasının yanında esas problem, açığa çıkarılan karbondioksit gazının astronot giysisi içerisinden uzaklaştırılmasıdır. Astronot giysileri, aşırı sıcak ve aşırı soğuk ortam şartlarında yeterli termal izolasyon sağlayabilmesinin yanında, radyasyona ve mikrometeoroidler gibi hiper hızlı (~7 km/sn) parçacıklara karşı da yeterli mekanik dayanıma sahip olmak zorundadır. Mikrometeoroidler, uzayda çok yüksek hızlarda dolaşan toz parçacıklarıdır. Mikroskobik parçacıklar olmalarına rağmen çok yüksek hızlara sahip olmaları sebebi ile yeterli mekanik dayanıma sahip olmayan bir astronot giysisinde ölümcül sonuçlar doğuracak delikler açabilmektedirler [1, 2].

Astronotların uzay aracı dışında uzayda ya da yörüngede görev yapmalarını sağlayan EMU (Extravehicular Mobility Unit) giysileri, astronotların yaşamsal tüm fonksiyonlarını mobil formda sürdürerek hayatta kalmalarını sağlayan minyatür bir uzay aracıdır [3].



Şekil 1. EMU (Extravehicular Mobility Unit – Mekik Dışı Hareketlilik Birimi) [1]

Mekik dışı aktivitelerde (EVA-Extravehicular Activity) kullanılan EMU giysileri ilk kez ABD'nin 1965 yılındaki Gemini programı ile birlikte hayata geçirilmiş olup günümüzde hala mekik dışı uzay görevlerinin yerine getirilmesinde kullanılmaktadır. Uzaya çıkma başarısı gösteren insanoğlunun uzay aracı dışında çalışma olanağına sahip olmasının ne kadar değerli olduğu birçok noktada

ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalardan birinde Skylab astronotları beklenmedik sorunları gidermek ve uzay istasyonunu terk edilmekten kurtarmak amacıyla 12 mekik dışı aktivite (EVA) gerçekleştirmiş ve başarı elde etmişlerdir [4, 5, 6].

Uzayda karmaşık işlemlerin gerçekleştirilme kabiliyeti arttıkça, mekik dışı aktivite zamanlarında da bu performanslara ulaşılması gerekmektedir. Tablo 1, 2015 yılına kadar dünya genelindeki astronotlar tarafından insanlı uzay uçuşu programları için kaydedilen mekik dışı aktivite zamanlarının toplam saatlerini göstermektedir. EMU giysileri başlangıçta sınırlı kapasiteleri ve minimum hareket kabiliyetine sahip olmaları sebebiyle operasyonel gereksinimleri tam anlamıyla yerine getirememekteydi. Günümüzde ise gelişen teknoloji ile beraber EMU giysileri uyduların onarımında, devasa uzay yapıların kurulumunda ve Uluslararası Uzay İstasyonu'nun (ISS - International Space Station) bakımlarının gerçekleştirilmesinde en etkin rolü üstlenmektedir [4].

Tablo 1. 2015 yılına kadar gerçekleştirilen toplam EVA zamanı [7]

Program ismi	Toplam EVA süresi (saat)
Apollo	175,549
Gemini	26,000
ISS	2544,000
Mir	732,876
Project 921	0,233
Salyut	107,400
Skylab	83,667
Soyuz	1,767
STS	672,906
Voskhod	0,383
TOPLAM	4344,781

EMU giysileri nefes alınabilen bir atmosfer, hareket kabiliyeti, sıcaklık kontrolü, radyasyona ve parçacık çarpmalarına karşı koruyuculuk başta olmak üzere çeşitli fonksiyonlara sahip olmak zorundadır. Bu özelliklerinin hayati önem taşıyor olması sebebi ile de EMU giysilerinin fiziksel performanslarının eksiksiz olması beklenmektedir. Bu aşamada EMU giysileri aşağıda belirtilen fiziksel testlerden geçirilmektedir.

2. Basınç Testleri

İnsan vücudu yaşamını 1 atmosfer dış basınç altında ve denge halinde sürdürmektedir. Genel katı nesnelere sahip oldukları esneklik modülleri ve rijitlikleri sayesinde buldukları ortamın basınç farklılıklarından etkilenmemektedirler. Üzerlerindeki atmosfer basıncı azaldığında ya da arttığında yapılarında herhangi bir deformasyon gerçekleşmemektedir. Fakat insan vücudu içerisinde bulunduğu basınç şartları dışında dokusal bütünlüğünü koruyamamaktadır.

Basıncı elbiseler dünya atmosferinin kenar uçlarında ve uzayın vakumsal boşluğunda astronotların hayatta kalmalarına izin vermektedir. Bu tip giysiler, astronotların basınçlandırılmış bir mekik kabininden uzaklaşarak mekik dışındaki bir görevi yerine getirmeleri gerektiği durumlarda kullanılmaktadır [8].

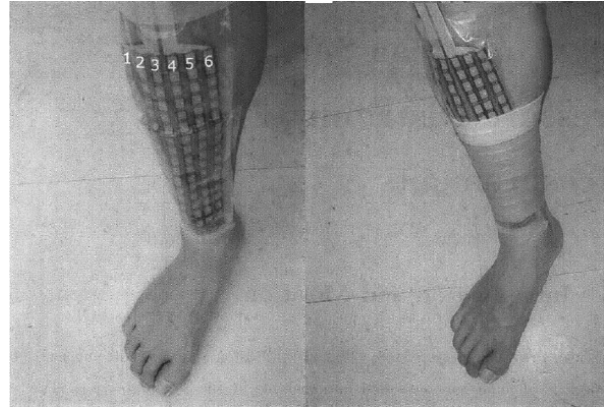
Bir EMU giysisi, vücuda astronotun soluk alıp vermesi için gerekli olan minimum gaz basıncına eşit miktarda basınç sağlamaktadır. Yani bu giysi içerisindeki saf oksijen basıncı yaklaşık olarak 30 kPa (225 mmHg, 4,4 psi) düzeyinde olmaktadır [9].

EMU giysilerinin sahip olduğu basınç miktarı, astronotların içinde bulunduğu mekiklerin ortam basıncından daha düşük seviyededir. Uzay mekiği içerisindeki ortam basıncı 101,3 kPa (760 mmHg, 14,7 psi) ile dünyadaki deniz seviyesi atmosfer basıncı ile aynı tutulurken, EMU giysileri içerisindeki ortam basıncı 30 kPa düzeyinde tutulmaktadır [9].

EMU giysileri, bir uzay aracının ortam kabin basıncından önemli ölçüde daha düşük basınca sahiptir. Bu durum, uzay yürüyüşü yapan astronotların "vurgun" olarak bilinen dekompresyon (basınç düşmesi) hastalığına maruz kalmalarına neden olmaktadır. Dekompresyon hastalığı, dokularda veya kan

akışında ortaya çıkan azot kabarcıklarının vücudun diğer bölgelerine taşınması sonucunda meydana gelmektedir. Bu sebeple, uzay yürüyüşü yapacak olan astronotların uzay yürüyüşü öncesinde vücutlarında bulunan aşırı azot miktarını gidermek için ön-solunma protokolünü (pre-breathe protocol) yerine getirmeleri gerekmektedir. Bu protokol çerçevesinde astronotlar bir takım egzersizler yardımıyla kan dolaşımını hızlandırarak vücutlarında bulunan azotun atılma hızını arttırmaktadırlar. Bu kapsamda, Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS) ön-solunma protokolü, toplamda 2 saat 20 dakika saf oksijen solunumunu ve kısa süreli, yüksek yoğunluklu egzersiz programını içermektedir [10].

EMU giysilerinin iç basınç testleri esnek baskılı devre sensörlerinin yardımı ile ölçülmektedir. Bu sensörler, kullanıcının ölçüm yapılması istenilen vücut bölgesine yerleştirildikten sonra EMU giysi parçası giydirilerek, ilgili bölgenin basınçlandırılması sağlanmaktadır. Belirli bir süre boyunca basınçlandırılan bölgenin her bir noktasındaki basınç değerleri kontrol edilerek homojen bir basınçlandırmanın sağlanıp sağlanmadığı ve vücudun basınçlandırılan bölgesinde fizyolojik rahatsızlıklar (ödem vb.) meydana gelip gelmediği kontrol edilmektedir. Bu amaçla kullanılan sistemlerden bir tanesi Tekscan I-Scan Basınç Sensör Sistemi'dir. Sistem, 16x6 dikdörtgen dizide düzenlenmiş 96 adet 12,7 mm x 12,7 mm'lik (0,5" x 0,5") sensörlerden meydana gelmektedir [9].



Şekil 2. Kalf üzerine yerleştirilmiş Tekscan I-Scan Model 9801 sensör sistemi [9]

Tekscan I-Scan sensörleri, ideal statik yüklem koşulları altında ortalama basıncı %10 hata payı ile ölçülebilmektedir. Bununla birlikte, sensörlerin ölçüm hassasiyeti bazı noktalarda zayıf kalmaktadır. Sensörlerin kayması, iletici sinyallerindeki gecikme, sıcaklık ve nem hassasiyeti gibi etkiler bu sistemin dezavantajlarını oluşturmaktadır. Bu eksikliklerine rağmen, I-Scan sistemi astronot giysileri basınç dağılımlarının ölçümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [9, 11].

Dirençli sensör dizileri ile ölçüm yapan I-Scan sistemlerinin ardından kapasitif sensör dizileri ile ölçüm yapan basınç ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Kapasitif sistemler, ürettikleri zemin kumaşının eğimli yapısı sayesinde kavisli yüzeylerle daha fazla uyum sağlamış ve I-Scan sistemlerine göre bacak üzerindeki basınç dağılımlarını daha doğru şekilde ölçümlenmiştir [12].

Belirli bir alanın basınç haritasının gerçek zamanlı olarak oluşturulmasını sağlayan tek sistem, dirençli ve kapasitif sensör dizi sistemleri olmuştur. Diğer ölçüm sistemleri sadece vücudun birkaç farklı noktasında basınç ölçümleri yapılabilmiş, verilen alan üzerindeki ortalama basıncı ölçüp, gerçek zamanlı basınç haritaları oluşturamamıştır. Bu nedenle I-Scan sensörleri sahip olduğu hata payına rağmen hala astronot giysilerinin basınç ölçümlerinde kullanılan temel sistemlerdir. Sahip olduğu hata payının en aza indirilmesi noktasında, sensörlerin uygulama noktasında mümkün olduğunca kıvrılmadan kullanılması, daha yeni sensörlerin kullanımı, eğimli yüzeyler üzerinde mümkün olduğunca fazla denge ve kalibrasyon noktası kullanımı (insan bacağına en doğru eğimle

şekillendirilmesi) ve sensör kalibrasyonlarının sıklaştırılması gibi yöntemler kullanılmaktadır [9].

Günümüzde astronot giysilerinin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer yöntem de vakum odasıdır. Astronotlar, mekik içerisinde ya da mekik dışarısında kullanacakları giysileri giydikten sonra vakum odasına alınmaktadır. Odanın içerisinde bulunan hava vakumlanarak ortam basıncı astronotun görev alacağı uzay şartlarının ya da kullanılacak uzay aracının ortam şartlarına getirilmektedir. Gerekli basınç ortamının sağlanmasının ardından astronot giysisinin bu şartlar altındaki davranışları ve performansı incelenmektedir.

Şekil 3, Houston'daki NASA Johnson Space Center'da yer alan mühendis ve teknisyenlerin Orion uzay aracı ile yolculuğa çıkacak olan astronotların kıyafetlerini test etmek amacıyla girdikleri bir vakum odasına aittir. Bu test sırasında, astronotlar yaşam destek sistemlerine bağlandıktan sonra, oda içerisindeki hava vakumlanarak Orion uzay aracı ile benzer ortam koşulları oluşturulmaktadır. Bu kıyafetler, yaşamsal destek için gerekli olan tüm fonksiyonları içerecek ve astronotların uzay yürüyüşü yapmasını ve uzay aracının basınç kaybı yaşamaması durumunda hayatta kalmalarını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır [13].



Şekil 3. NASA'da astronot giysileri basınç testlerinin gerçekleştirildiği vakum odası [13]

3. Mobilite Testleri

Astronotların karşılaştığı engellerden bir diğeri de gaz basınçlı giysilerin basınca maruz kaldıklarında sertleşmesi ve kullanıcı hareketliliğini büyük ölçüde sınırlamasıdır. Bu sebeple basınçlı giysilerin hareket kabiliyetlerinin ölçülmesi ve geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır [8].

Astronot giysilerinin bükülmeye karşı olan direnci genel olarak üç farklı etkinin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır: Yapısal faktörler, hacimsel faktörler ve basınç etkisi. Yapısal faktörler, astronot giysilerinin farklı parçalardan oluşması ve bu parçaların rijit bağ noktaları ile bir araya getirilmesi sonucu ve bir de basınçlandırmaya bağlı olarak tüm giysinin sertleşmesi ile ortaya çıkmaktadır. Apollo ay görevinde kullanılan astronot giysileri, bağlantı noktalarındaki bükülme direnci sebebiyle astronotların kalça ve diz hareketliliğini kısıtlamış, astronotların ay yürüyüşünü zıplama hareketine dönüştürmüştür. Aynı yapısal faktörler, astronotların kaya örnekleri toplama veya ay yüzeyinin yakından incelenmesi gibi basit görevleri yerine getirmek için diz çökme ve eğilme yeteneklerini de engellemiştir [14]. Hacimsel etkiler ise giysi iç basıncının vücudun her noktasında eş basınç değerlerine sahip olması gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Astronot giysi parçaları (kollar, alt gövde, üst gövde, kask) metal bilezikli bağlantı noktaları aracılığı ile üst gövdeye monte edilmektedir. Bu parçaların sahip oldukları iç hacim, astronotun hareket kabiliyetinden çok, ihtiyaç duyulan basıncın vücudun her noktasına eşit olarak dağılması göz önüne alınarak tasarlanmaktadır. Basınç etkisi ile oluşan bükülme direnci ise, astronotun hareketleri sırasında iç hacmin azaldığı noktalarda, iç basıncın harekete karşı ek direnç oluşturması ile ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar basınçsal etkiler hacimsel etkilerden kaynaklanmakta olsa da, birbirinden farklı iki etki olarak

ifade etmek gerekmektedir. Bükülme direncini oluşturan faktörler arasında en büyük paya hacimsel etkiler sahiptir ve yapısal etkiler sebebi ile oluşan bükülme direncinin de artmasına sebep olmaktadır. Basınçsal etkiler sebebi ile ortaya çıkan bükülme direnci önemsiz denilebilecek kadar azdır. Çünkü "Yaşamsal Destek Sistemleri" (LSS - Life Support System) giysi iç basıncını hassas ve kusursuz bir şekilde ayarlayabilmektedir [11].

Hareket kabiliyeti üzerine uygulanan testlerin farklı EMU giysi parçaları üzerinde gerçekleştirilmesi aşağıda anlatılmıştır.

3.1. Bükülme Direnci Testi

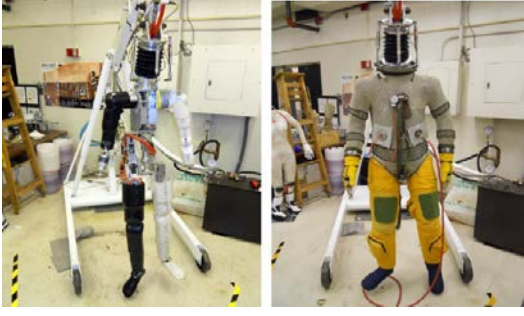
Basınç ve hacim kaynaklı toplam enerjinin minimum düzeyde tutulması için astronot giysileri bükülme sırasında eklem hacmindeki değişimi en aza indirmek üzere tasarlanmıştır [11]. Bükülme direnci, yukarıda anlatılan sebepler sonucunda astronotun eklem hareketliliğini kısıtlayan faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bükülme direnci, insanlı ve insansız astronot giysilerinde, hem pozitif (giysinin içi basınçlandırılarak) hem de negatif (giysi parçası dışarıdan vakumlandırılarak) basınçlar altında test edilmektedir (Bkz. Şekil 4). İki yöntem de belirli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. İnsansız yapılan ölçümlerde antropometrik değişkenler ve denekler arasındaki tutarsızlıklar en aza indirgenmiş olmaktadır. Bununla birlikte, bükülme direncinin en büyük bileşenini basınçlı hacim etkileri oluşturmaktadır ve insan vücudu astronot giysisi içerisindeki serbest hacmin çoğunu kaplamaktadır. Ayrıca eklem hareketleri sırasında da bölgesel hacmin azalacağını düşünersek, insansız bükülme direnci ölçümleri ile giysinin insanlı bükülme direnci hakkında öngörülebilir bulunmak çok doğru olmamaktadır. Robotların kullanıldığı ölçümlerde robotun kapladığı toplam hacim bilinmemekle beraber 1,90 m uzunluğundaki bir insana eş değer ölçüler kullanılmaktadır. İnsanlarla yapılan testlerde ise giysi içerisinde kaplanan hacimlerde büyük farklılıklar oluşmaktadır. Bu sebeple, insan hacminin istatistiksel varyasyonları göz önünde bulundurularak bu ebatlara uygun robotların kullanıldığı testler tercih edilmektedir. Buna ek olarak, insanlı testlerde, insan vücudu eklem hareketleri sırasında astronot giysisi ile temas halinde olduğu için giysi eklem noktalarının katlanma özelliklerini etkilemektedir [8, 15].

Bükülme direnci ölçümünde kullanılan bir diğer yöntem ise, dinamometre yardımıyla astronot giysisi giymiş ve giymemiş kişilerin rahat hareket sınırları içerisinde uyguladıkları dirençleri karşılaştırmaktır. Bu yöntem, astronotların karşılaştığı bükülme direnci hakkında daha net bilgiler sunabilmektedir [16].



Şekil 4. Pozitif basınç altında bükülme direnci ölçümü (solda), negatif basınç altında bükülme direnci ölçümü (sağda) [8]

Bir başka alternatif ölçüm yöntemi ise, robotik sistemler yardımıyla bükülme direnci verilerinin toplanmasıdır. Bu yöntem örneği olarak MIT (Massachusetts Institute of Technology) laboratuvarlarında bulunan Robotic Space Suit Tester (RSST) gösterilebilmektedir. RSST, NASA tarafından tasarlanan ve Sarcos Inc. tarafından geliştirilen hidrolik bir robot olup astronot giysilerinin mobilite gelişimi için bükülme direnci ölçümlerinde kullanılmaktadır. RSST'nin sağ tarafında 12 eklem noktası bulunmakta ve eklem açısının ölçümü için bir potansiyometre ve bükülme direncini ölçmek için de bir ağırlık sensörü (load cell) bulunmaktadır [8, 17].



Şekil 5. Robotic Space Suit Tester: giydirilmemiş (solda), S1034 PPA uçuş giysisi giydirilmiş (sağda) [8]

3.2. Eldiven Testleri

Eldivenli bir el, astronotun çevresiyle etkileşimde bulunmasını sağlayan temel araçlardan birisidir ve eldiven tarafından uygulanan herhangi bir kısıtlama, mekik dışı aktivite (EVA) sırasında astronotun performansını ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Mühendisler, bir EVA eldiveni oluştururken, insan elinin doğal el becerisini ve dokunsallığını olabildiğince korumak için gayret göstermektedirler [18]. Fakat bununla beraber elin uzayın zorlu şartlarından korunması da gerekmektedir. Eldivenin yarattığı en önemli zorlukların başında astronot giysisinin basınçlandırılması ile birlikte eldivenin de esnekliğini yitirmesi gelmektedir. Bununla birlikte, eldiven dış yüzeyinin çok katmanlı koruyucu bir tabakadan meydana geliyor oluşu, eldivenin hareket kabiliyetini düşüren bir diğer etken olmaktadır. Astronotların dokunma yeteneğinin olmaması ciddi bir sorun potansiyeli olarak algılanabilir. Çünkü astronotun görüş alanı EVA giysilerinde oldukça sınırlandırılmış durumdadır. Dokunsal hassasiyet ve hareket kabiliyetinin azalması mekik dışı aktivitelerde astronotun görevini yerine getirme süresinin artmasına sebep olmaktadır [19].

Astronotlar için uygulanan eldiven kullanım testleri dıştan vakumlandırılmış eldiven testleri ve içten basınçlandırılmış eldiven testleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Bir vakum kutusu içerisinde yer alan eldivenler ile gerçekleştirilen dıştan vakumlandırılmış eldiven testleri daha küçük çaplı denemelerin gerçekleştirildiği fakat maliyet açısından daha avantajlı testlerdir. Deneklerin tam bir astronot kıyafeti giyerek gerçekleştirdiği içten basınçlandırılmış eldiven testleri ise daha detaylı ve daha net sonuçlar alınabilen testlerdir. İçten basınçlandırılmış eldiven testleri beş alt başlık altında incelenmektedir [20].



Şekil 6. Dıştan vakumlanmış eldiven testleri [20]

3.2.1. Kuvvet Testi

Bu test kapsamında 3 farklı mukavemet ölçümü yapılmaktadır: Kavrama, parmak ucu sıkıştırma ve yanal sıkıştırma (aynı zamanda anahtar tutuşu olarak da adlandırılmaktadır) testleri.



Şekil 7. Kavrama (sol), yanal sıkıştırma (orta), parmak ucu sıkıştırma (sağ) [19]

Kavrama mukavemetinde, bir dinamometre kullanılarak kavrama hareketi sırasında astronotun uyguladığı kuvvet değerlendirilmektedir. Sıkıştırma testleri ise yük sensörü (load cell) kullanılarak ölçülmektedir. Her iki testte de deneklerin 3 seri halinde ölçüm cihazlarına en yüksek kuvveti uygulamaları istenmektedir. Yorgunluk etkilerini en aza indirmek için denemeler arasında 2'şer dakika ara bırakılmaktadır. Bu şekilde, deneklerin eldivensiz, basınçlandırılmış eldivenli ve basınçlandırılmamış eldivenli test sonuçları karşılaştırılmaktadır [21].

3.2.2. Parmak Mobilite Testi

Parmak hareketliliğinin nicelleştirilmesi için kullanılan bu yöntem bir süpürme hareketi olup deneklerin her bir parmağının belirlenen alanlarda gezdirilmesi istenmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, elin arka bölümüne 4 adet ve her bir parmak ucuna birer adet retroreflektif işaretçi yerleştirilerek parmak uçlarının elle görelî hareketini tanımlamak için yerel bir koordinat sistemi geliştirilmiştir. Parmakların ucundaki retroreflektif malzemelerin hareketi 100 Hz hızında çalışan 12 adet kamera ile takip edilmektedir. Her bir denekten her bir parmak için birden çok süpürme hareketi istenmekte ve o parmağın hareketliliğini tanımlamak için en büyük süpürme hareketinin alanı kullanılmaktadır. Bu şekilde, deneklerin eldivensiz, basınçlandırılmış eldivenli ve basınçlandırılmamış eldivenli test sonuçları karşılaştırılmaktadır [19].



Şekil 8. Parmak mobilite testi [19]

3.2.3. Küre Kavrama Testi

Bu test kapsamında optimal kavrama yeteneklerinin değerlendirilmesi için deneklerin 0,5 inç çapında mermer ve 1 ila 8 inç arasında değişen çaplarda strafor köpük küreler tutmaları istenmektedir. Eldiven ile küre arasındaki sürtünmenin en aza indirilmesi için küreler kumaş bantlarla kaplanmaktadır. Deneklerden her bir küreyi sırayla tutmaları ve küre üzerinde tam kontrol sahibi olduklarını göstermeleri için de masadan kaldırarak bir yay şeklinde sallamaları istenmektedir. Deney sonuçları "Başarılı", "Başarısız" ve kürelerden birinin hareket sırasında düşmesi durumunda ya da masada küreyi tutma işleminin bir mücadeleye dönüşmesi durumunda "Zayıf kavrama" olarak not edilmektedir. Deney, 8 inçlik küreye kadar bütün kürelerin başarılı şekilde kaldırılması ya da denegin kürelerden birini hiçbir şekilde kaldırmadığı noktaya kadar devam etmektedir [19].



Şekil 9. Küre kavrama testi [19]

3.2.4. Dokunsallık Testi

Dokunsallık testi, farklı yükseklik ve genişliklere sahip 30 farklı reçine bloğu ile gerçekleştirilmektedir. Bloklar bir perdenin arkasından tesadüfi bir düzende deneğin önüne getirilmektedir. Denekten görmediği bloğu teşhis edinceye kadar parmağını aşağı indirmesi istenmektedir. Denek bloğu bulunduğu ise bu bloğun bir öncesine göre daha mı uzun yoksa daha mı kısa ya da daha mı geniş yoksa daha mı dar olduğu sorulmaktadır. Şekil 10'da görüldüğü üzere deneğin blokları görmemesi için deney düzeneği bir perdenin arkasına yerleştirilmektedir. Sağ tarafta yer alan şekilde ise uygulanan yükün gerçek zamanlı olarak ölçüm bilgileri yer almaktadır. Bu test sonucunda elde edilen veriler, eldivenli bir elle algılanması gereken bir anahtar veya düğme boyutunun seçimi için uzay aracı tasarımcıları tarafından değerlendirilmektedir [19].



Şekil 10. Dokunsallık testi [19]

3.2.5. Fonksiyonel EVA (Mekik Dışı Aktivite) Araçları Testi

Bu testler kapsamında eldivenlerin işlevsel performanslarını ölçmek için bir dizi temsili EVA görevi seçilmektedir. İlgili mühendis grupları tarafından belirlenen aletler ve görevler dâhilinde denekler kendilerinden istenen görevleri yerine getirmeye çalışmaktadır. Cihazlar arasında montaj tabancası, tel kesme makinesi, tel ve özel olarak tasarlanmış bir soket anahtarı gibi görevle ilişkili ekipmanlar yer almaktadır. Bu araçların tümü, mikro yerçekimi ortamında uygun eldivenli bir mürettebat tarafından çalıştırılacak şekilde tasarlanmakta ve astronotların yörüngede kullanacağı ekipmanlarla karşılaştırılabilir benzerlikte olmaktadır. Bu testler kapsamında deneklerden gerçekleştirmesi istenilen örnek görevler şu şekildedir:

- 1) Montaj tabancası yardımıyla ince ve kalın vidaların/anahtarların montajı
- 2) Tel makaralarının tutulması ve kullanılması
- 3) Karabina ile küpeşteye ve EMU giysisi D-halkasına bağlanmak ve çözülmek
- 4) Sargı ipini küpeşteye bağlamak, mandal tertibatını monte etmek ve civatalarını sıkıştırmak

Her bir test için görevin tamamlanma zamanı kaydedilmekte ve fonksiyonel araç testinin sonunda, deneklerden görevleri tamamlama zorluğu üzerine öznel bir anket doldurmaları istenmektedir [19].

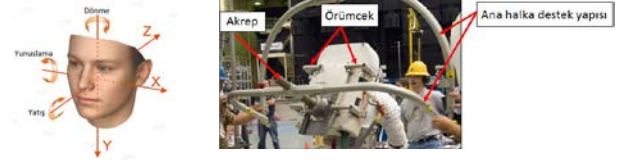


Şekil 11. EMU giysisi D-halkasına bağlanma testi [19]

3.3. Kısmi Yerçekimi Simülâtörü (POGO – Partial Gravity Simulator) Testi

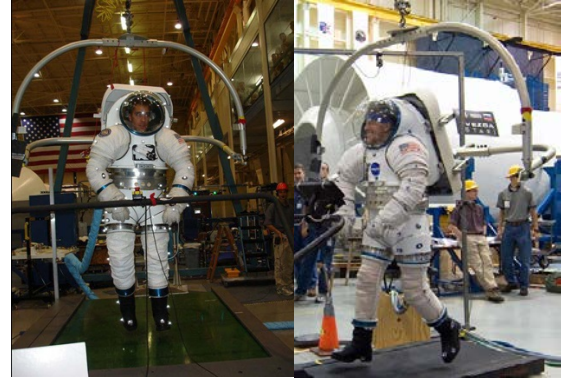
POGO yerçekimi simülâtörü, servo-kontrollü bir gerilim ölçerine bağlı pnömomatik silindirik yardımcıyla deneğin dikey eksen

hareketlerinde sabit yerçekimi kuvvetine maruz kalmasını sağlamaktadır. Sistem bir adet dikey servo düzeneği, bir gerilim ölçer, bir pnömomatik silindirik düzeneği ve bir piston çubuğundan meydana gelmektedir. POGO sistemi, doğrusal bir hava rayı üzerinde hareket ettirilerek yatay düzlemde sürekli olarak denek üzerindeki yerçekimi kuvvetinin düşürülmesine izin vermektedir. Büyük bir halka şeklinde olan destek mekanizması, kaldırma düzeneğinin ucuna bağlanarak astronot kıyafeti giymiş olan deneğin yunuslama, dönme ve yatış hareketlerini serbest bir şekilde yapmasını sağlamaktadır [22].



Şekil 12. Dönme, yunuslama ve yatış hareketleri (solda), POGO simülâtörü (sağda) [22]

Simülasyonlar, 1/6 (ay) ve 3/8 (Mars) yer çekimi oranlarında ana halka mekanizmasına bağlanmış bir astronot kıyafetine, yine ana halka üzerinde yer alan "akrep" ve "örümcek" adı verilen mekanizmalarla öne/arkaya (akrep) ve yukarı/aşağı (örümcek) hareket sağlanarak gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde astronotun ağırlık merkezi arzu edilen noktada sabit tutulmakta ve astronot, ay veya başka bir gezegenin yerçekimi ortamında dolaştırılmaktadır [22].



Şekil 13. POGO simülâtörü (solda), 10 km yürüyüş testi (sağda) [22]

3.4. 10 km Yürüyüş Testi

Test senaryosu, astronotların 4 saatlik yüzey aktivitelerinin ardından ay yüzeyinde kullanılan taşıtın bozulduğu ve astronotları yaşam alanına geri götüremediği durumlarda astronotların 10 km'lik mesafeyi yürüyerek dönmeleri üzerine kurgulanmaktadır. Test sırasında deneklerin metabolik aktiviteleri ve sağlık durumları kablosuz bir elektrokardiyogram (ECG) aracılığı ile takip edilmektedir. Ayrıca deneklerin kıyafetleri içerisinde test sırasında ihtiyaç duydukları su tüketebilecekleri düşük kapasiteli (yaklaşık 1 litre) bir içecek torbası bulunmaktadır. Bu torba, iç takımın göğüs bölgesi üzerine bir cırt bant ile tutturulmakta ve astronotun ağzının yakınına yerleştirilen bir ısırık vanası ile astronotun su içmesi sağlanmaktadır. Testin uygulanmasına yönelik şartlar ve kriterler aşağıdaki şekildedir:

- 10 km'lik kıyafetli yürüyüş deneğin arzu ettiği hızlarda gerçekleştirilmektedir. Test hızı arzu edildiği anda artırılabilir ve azaltılabilir. Denek arzu ettiği herhangi bir zamanda testi durdurabilmekte ve dinlenebilmektedir.
- Denekler her 15 dakikada bir metabolizma aktiviteleri hakkında bilgilendirilmektedir.
- Muhtemel sakatlanmalardan korunmak adına deneklerden kendilerine rahatsızlık veren hızlara çıkmamaları istenmektedir [22].

3.5. Sıfır Yerçekimi Çalışmaları

Sıfır yer çekimi çalışmalarının amacı uzay yürüyüşü yapacak olan astronotları uzay görevlerine hazırlamaktır. NASA ve diğer uzay ajansları, uçuş prosedürlerini geliştirmek, donanım uyumluluğunu kontrol etmek, astronotları mevcut görevleri konusunda eğitmek amacıyla sıfır yerçekimi çalışmalarını kullanmaktadır. Astronotların uzay yürüyüşleri sırasında üstlendikleri görevlerin sıfır yerçekimi ortamında gerçekleşmesi sebebi ile astronotların uzaya gönderilmeden sıfır yerçekimi ortamı altında görevler konusunda eğitilmesi ve başarı yeteneklerinin test edilmesi gerekmektedir. Sıfır yerçekimi altında gerçekleştirilen testler için kullanılan simülasyonlar arasında en fazla kabul göreni "Nötral yüzme" adı verilen su altı çalışmaları olmaktadır [23].

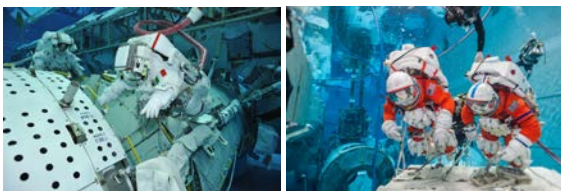
Nötral yüzme, astronotların ağırlıklar ve yüzdürme aygıtları kombinasyonları kullanılarak su altında batmadan ve su yüzüne çıkmadan kalabildikleri, sıfır yerçekimi ortamının sağlandığı bir simülasyon çalışmasıdır. Böyle bir ortamda, ağır cisimler bile sıfır yerçekimi ortamındaki gibi kontrol edilebilmektedir. Bu avantajları sebebi ile Nötral yüzme simülasyonları uzay yürüyüşü yapacak olan astronotlar için günümüzde en uygun çalışma ortamını sağlamaktadır. Bu çalışmalar sırasında astronotlar, uzayda kullanılan EMU giysilerinin suya kullanılmak üzere modifiye edilmiş versiyonlarını kullanmaktadır. Bu giysiler, modern astronot giysilerinin genel özelliklerine sahip düşük maliyetli kopyaları olarak tasarlanmakta ve üretilmektedirler. Bu simülatör giysilerin sahip olması gereken özellikler şu şekilde ifade edilebilmektedir:

- Su altı görev simülasyonlarında kullanıcıya yaşamsal ortam sağlamak.
- Mekik dışı aktivite (EVA) testlerinin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan EMU giysilerinin genel dış özelliklerine sahip olmak.
- Güncel astronot giysilerinin sahip olduğu bağlantı noktalarına, bu bağlantı noktalarının yarattığı bükülme direncine ve hareket kısıtlamalarına sahip olmak.
- Çeşitli metabolik çalışmaların ardından astronotun termal dengesini koruyabilmek.
- Çift yönlü sesli iletişim sağlayabilmek.
- Astronotların biyomedikal verilerinin uzaktan ölçümüne izin vermek [24].

Nötral yüzme çalışmaları 61,7 metre uzunluk, 31,1genişlik ve 12,2 metre derinliğe sahip, yaklaşık 12 bin ton suyla dolu bir havuz içerisinde Uluslararası Uzay İstasyonu'nun (ISS) birebir kopyasını içeren bir simülasyon ortamında gerçekleştirilmektedir. Simülasyon havuzu aynı anda 2 farklı test çalışmasına ve 5 farklı astronota çalışma imkânı sağlayabilmektedir. Çalışmalar sırasında her bir astronotlara, 2 güvenlik dalgıç, bir teknik personel dalgıç ve bir de kamera dalgıç eşlik etmektedir. Testler sırasında simülasyon programına katılan her bir astronot 6'şar saatlik 3 teknik görev dalışı gerçekleştirmektedir [25].



Şekil 14. Nötral yüzme test havuzu ve Uluslararası Uzay İstasyonu'nun (ISS) su altı kopyası (solda), Astroid üzerinden kaya örnekleri toplama çalışması (sağda) [25]

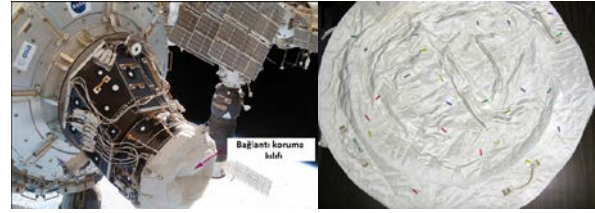


Şekil 15. Nötral yüzme görev çalışmaları [25]

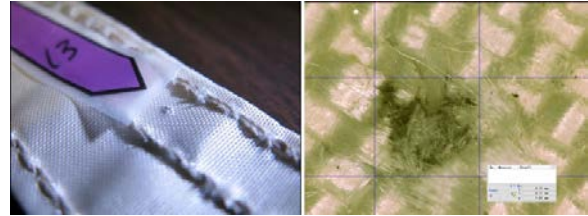
4. Mikrometeoroid Darbe Testleri

Mekik dışı aktiviteler sırasında kullanılan astronot giysilerinin basınçsal özelliklerini kaybetmemesi için mikrometeoroidlere ve yörünge artıklarına karşı yeterli delinme direncine sahip olması gerekmektedir. Mikrometeoroidler, kuyruklu yıldızlar ve asteroitlerden kaynaklanan doğal parçacıklar olup, yörünge artıkları ise büyük oranda uzay aracı ve uydu çöplerinin alüminyum bazlı bileşiklerinden oluşmaktadır. Boyutları genellikle 1 mm'nin altında olan bu parçacıklar uzayda hiper hız olarak adlandırılan çok yüksek hızlarda dolaşmaktadır. Mikrometeoroidler, güneş sisteminde 11-72 km/saniye'lik hızlarda ilerliyor olup, yörünge artıkları ise 1-15 km/saniyelik hız aralıklarında ve ortalama 9 km/saniye'lik hızlara sahiptirler. Bu sebeple, bu yüksek enerjili parçacıklar astronotların uzay yürüyüşü yaptıkları mekik dışı aktivite (EVA) giysileri için oldukça büyük tehdit oluşturmaktadır [26, 27]. Bu mikro parçacıkların astronot kıyafetlerinin dış katmanlarına nüfuz ederek oksijen kaçağına neden olması, astronot giysisinin iç basıncını kaybederek dekompresyona uğrama tehlikesini doğurmaktadır. Astronot kıyafetleri, çapı 4 mm'ye kadar olan deliklere karşı iç basıncını en az 30 dakika güvenli seviyelerde koruyabilecek niteliklerde üretilmektedir [28].

Astronot kıyafetlerinin yanı sıra uzay mekiği ve uzay istasyonlarının da bazı bölümleri kumaş yapılarından meydana gelmektedir. Şekil 16'da Uluslararası Uzay İstasyonu'nun (ISS) mekik bağlantı noktası koruma kılıfının Temmuz 2013'ten Şubat 2015'e kadar 1,63 yıllık süre zarfında karşılaştığı 26 adet mikrometeoroid ve yörünge artığı darbesi görülmektedir.



Şekil 16. ISS mekik bağlantı koruma kılıfı (solda), tespit edilen ve kumaş üzerinde işaretlenen mikrometeoroid darbeleri (sağda) [29]



Şekil 17. ISS mekik bağlantı koruma kılıfı üzerindeki mikrometeoroid darbeleri [29]

Koruma kılıfı, 2 metre çapa sahip, dış katmanı Teflon kaplamalı cam lifi kumaştan meydana gelen çok katmanlı bir kumaş yapısıdır. Houston'da bulunan Boeing firmasının Hiper hız Darbe Teknolojisi laboratuvarlarında yapılan incelemelerde koruma kılıfı üzerinde çapları en küçüğü 0,1 mm ve en büyüğü 1,2 mm olmak üzere toplam 26 adet delik tespit edilmiştir. Kumaş gramajı 4600 g/m² olan koruma kılıfı üzerindeki darbelerin hiçbir tanesi tam olarak penetrasyon gerçekleştirilmemiştir [29].

Astronot kıyafetleri mikrometeoroid ve yörünge artığı darbelerinden korunmak amacıyla çok katmanlı yapılar halinde üretilmektedirler. Güncel olarak kullanılan EVA giysileri, sırasıyla Orto kumaş, 7 katmanlı Mylar kumaş, 2 katmanlı neopren kaplamalı naylon kumaş ve üreten kaplamalı naylon kumaş olmak üzere toplam 11 katmandan oluşmakta ve 1540 g/m² kumaş gramajına sahip olmaktadır. En dış katmanda bulunan Orto kumaş, gelen hiper hızlı parçacıkların yüksek enerjilerini parçalanma, erime veya buharlaşma yoluyla absorbe eden gözden çıkarılmış bir tampon katmanı olarak işlev görmektedir. Orto kumaşın hemen arkasından alüminyum ile kaplanmış çok sayıda Mylar kumaş katmanı gelmektedir. Mylar bir radyasyon kalkanı olmasına rağmen, mikrometeoroid darbelerinin alttaki emici katmanlara ulaşmadan önce momentumunu daha geniş bir alana dağıtmak için

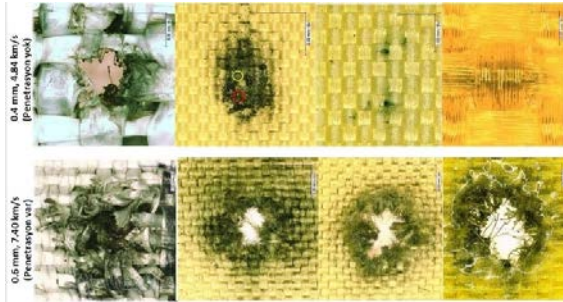
bir ara katman olarak görev yapmaktadır. Güncel EVA giysilerinde kullanılan neopren kaplı naylon tabaka ise basınçlı astronot giysisini astarlayan üreten kaplı naylon kumaşa ulaşmadan önce mikrometeoroid parçalarını emmek amacı ile kullanılmaktadır [27].

Kumaşların mikrometeoroidlere ve yörünge artıklarına karşı dayanımlarının ölçülmesinde iki aşamalı hafif gaz tabancaları (Two Stage Light Gas Gun) kullanılmaktadır. Bu silahlar, yüksek gaz basıncı (50 psi) yardımıyla çapı 1 milimetrenin altındaki parçacıkları saniyede yaklaşık 8,5 km hızlara çıkartabilen test cihazlarıdır. Testler sırasında kullanılan mermiler ise genellikle alüminyum ya da cam küreciklerden seçilmektedir. Cam kürecikler mikrometeoroidlerin, alüminyum ise yörünge artıklarının simülasyonunda öne çıkan parçacıklar olmaktadır [30].



Şekil 18. İki Aşamalı Hafif Gaz Tabancası (Two Stage Light Gas Gun) [30]

Astronot giysilerinde kullanılan katmanlı yapıların üretiminde farklı kumaşların farklı kombinasyonları kullanılabilir. Beraber, farklı çalışmalarda yeni tasarımsal denemelere rastlamak da mümkündür. Bu çalışmalardan birinde, yukarıda belirtilen güncel EVA giysilerinde kullanılan kumaşların neopren kaplamalı naylon katmanları ve Dacron kumaş katmanı çıkartılarak yerine sadece iki katman STF-ArmorTM kumaş yerleştirilmiştir. Bu şekilde iki aşamalı hafif gaz tabancası ile farklı büyüklüklerdeki ve farklı hızlardaki alüminyum mermiler kullanılarak kumaşın mikrometeoroid darbe direnci ölçümlenmiştir. 0,4 mm çaplı merminin 4,84 km/saniyelik hızında (darbe kinetik enerjisi 1,1 Joule) penetrasyon gerçekleşmediği, fakat 0,6 mm'lik merminin 7,40 km/saniyelik hızında (darbe kinetik enerjisi 8,4 Joule) penetrasyonun gerçekleştiği ifade edilmiştir [27].



Şekil 19. Farklı boyut ve hızlardaki alüminyum merminin hasar görüntüleri. Orto kumaş (en sol), 1. STF-ArmorTM katmanı (soldan ikinci), 2. STF-ArmorTM katmanı (soldan üçüncü), üreten kaplamalı naylon zemin kumaşı (en sağ) [27]

Astronot kıyafetlerinin mikrometeoroidlerin darbe direnci üzerine yapılan bir başka çalışmada, mermi hızının, mermi büyüklüğünün ve mermi giriş açısının penetrasyon sınırı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada, Orto kumaş, Mylar kumaş, Dacron kumaş ve üreten kaplamalı naylon kumaşların farklı kombinasyonları ile 7, 9 ve 17 katmandan oluşan 3 farklı kumaş yapısı oluşturulmuştur. Testler, iki aşamalı hafif gaz tabancası ile 0,39 mm'den 1,27 mm'ye kadar değişen çaplarda alüminyum mermiler kullanılarak, yaklaşık 7 km/saniyelik atış hızlarında ve 0°-60° arası farklı giriş açıları gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları doğrultusunda, ara katman olarak daha sık Dacron kumaş kullanımının 4 km/s'nin üzerindeki hızlarda balistik korumayı artırdığı ifade edilmiştir. Kevlar, Spectra gibi yüksek

dayanıma sahip kumaşların zemin kumaşına yakın kullanılmasının ise penetrasyon direncini artırdığı, bu materyallerin iç katmanlarda daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir [27].

5. Radyasyon Koruma Testleri

Dünyanın etrafını saran manyetik alan ve elektrik akımları, her ne kadar görünmez olsa da günlük yaşamımızda ölçülemez derecede büyük öneme sahiptir. Dünyanın manyetik alanı, gezegenin derinliklerinde bulunan büyük bir erimiş demir okyanusu olarak ifade edilen sıvı bir çekirdekte oluşmaktadır. Bu sıvının kendi içindeki sürekli devinimi, elektrik akımları üretmesini ve sürekliliğini koruyan bir elektromanyetik alan oluşturmasını sağlamaktadır. Manyetik alan, güneşten solar rüzgârlarla gelen yüklü parçacıklardan dünyayı koruyan bir kalkan gibi hareket etmektedir. Fakat manyetik alanın yeryüzündeki koruyuculuğu maalesef atmosferin uçlarına ve hatta uzaya çıldıkça etkisini yitirmekte ve tamamen kaybolmaktadır. [32].

Uzayda karşılaşılan temel problem parçacık radyasyonudur. Enerjik parçacıklar insan cildinin içinden geçerken, o bölgedeki hücrelere ve DNA'ya zarar verirler. Bu zararlar astronotun hayatının ilerleyen dönemleri için kanser riski oluşturmakla beraber, enerjik parçacığın dozu yeterince büyükse görev sırasında da akut radyasyon hastalığı oluşmasına neden olabilmektedir [33].

Uluslararası Uzay İstasyonu'nun (ISS) yörünge görevlerinde dünya uçuş tarihinde gerçekleştirilen çok daha üzerinde mekik dışı aktivite (EVA) gerçekleştirilmiş ve planlanana göre de çok daha fazlasına ihtiyaç duyulmaktadır. ISS'nin kurulmasının tamamlanması için 5 yıllık bir döneme yayılmış 1000 saatten fazla EVA'ya ihtiyaç duyulması beklenmektedir. Bu süre, ISS'nin kurulduğundan önce tüm astronotların ve kozmonotların gerçekleştirdiği toplam EVA süresinin yaklaşık 2,5 katı kadardır. Bu uzun zamanlı EVA ihtiyacı, astronotların ISS'nin dışında alçak yörüngede yoğun olarak radyasyona maruz kalacakları anlamına gelmektedir. ISS, dış yapısındaki kalkanlama sayesinde üzerine gelen elektron ve proton akısının tamamına yakını zayıflatmakta ve sönmölmektedir. Fakat, EVA süresince astronotlar yalnızca uzay elbiselerince sağlanan koruyucu unsurlar tarafından korunmakta, bu da, ISS'nin yapısı tarafından sağlanan koruyuculuktan çok daha düşük olmaktadır [34, 35].

Radyasyon yayılımının mevcut olduğu ortamlarda görev alan çalışanların maruz kaldığı radyoaktivite göz önüne alındığında, nükleer reaktörlerde ve parçacık hızlandırıcılarda çalışanların, hastanelerde görevli radyoloji uzmanlarının maruz kaldığı yıllık doz miktarı yasal sınır olan 25 mSv'nin çok altında olup, nadiren 1-2 mSv değerlerine yaklaşmaktadır. Buna karşılık, 6 aylık bir ISS görevinde astronotun maruz kaldığı toplam efektif doz ise yaklaşık 80 mSv'dir [36].

Alçak yörüngede ve uzayın derinliklerinde gerçekleştirilen EVA'lar sırasında düşük enerjili elektronların ve protonların nispeten yüksek akıları, sıg anatomik bölgelerde (cilt, göz merceği ve dokusal yapılar) büyük hasarlar oluşturmaktadır. Bu sebeple uzay ajansları tarafından astronotların maruz kalabileceği maksimum radyasyon limitleri belirlenmiştir [37].

Aşağıdaki tablolarda NASA (National Aeronautics and Space Administration - Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), ESA (European Space Agency - Avrupa Uzay Ajansı) ve RSA (Russian Space Agency - Rus Uzay Ajansı) için astronotların aylık ve yıllık radyasyon limitleri verilmektedir [38].

Tablo 2. Uzay ajanslarına göre astronotların maruz kalabileceği 30 günlük radyasyon limitleri [38]

Organ	NASA (mSv)	ESA (mSv)	RSA (mSv)
Göz	1000	500	500
Deri	1500	1500	1500
Kan yapıcı organlar (5 cm vücut derinliği)	250	250	250

Tablo 3. Uzay ajanslarına göre astronotların maruz kalabileceği yıllık radyasyon limitleri [38]

Organ	NASA (mSv)	ESA (mSv)	RSA (mSv)
Göz	2000	1000	1000
Deri	3000	3000	3000
Kan yapıcı organlar (5 cm vücut derinliği)	500	500	500

Astronotların kariyerleri boyunca maruz kalacakları radyasyon limiti, kanserden ölme riskinin %3'ünü aşmamak zorundadır. NASA tarafından kabul edilen bu uygulama, risk faktörleri ve ışına hesaplamaları yardımıyla gerçekleştirilen bir modellemenin, astronotların kariyerleri boyunca alacakları kümülatif efektif dozun (Sievert (Sv) cinsinden) %95 güven aralığında hesaplanmasına dayanmaktadır [39].

Efektif doz hesaplamalarında kullanılan radyasyon ışına değerleri, iki farklı yöntem ile elde edilmektedir. Radyasyon ışına testleri genellikle "bilgisayar destekli X-ışını tomografisi" cihazı (XCT – X-Ray Computed Tomography) ve bir "iyonizasyon çemberi" cihazı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. XCT cihazı EMU giysisinin bütün olarak radyasyon ışınmasına maruz bırakılmasını sağlayan bütünsel bir test yöntemidir. İyonizasyon çemberi testi ise astronot giysisinin önem taşıyan parçalarına elektron ve protonların nüfuz etmesi için gerekli olan minimum enerji düzeyinin ölçümünü sağlayan bölgesel bir yöntemdir. İki yöntemde de dışarıdan gönderilen radyoaktif enerji parçacıkların detektörler yardımı ile giysi içerisindeki miktarları tespit edilmektedir. Bunun için XCT yönteminde astronot giysisi içerisine "Phantom" adı verilen bir dozimetre (radyasyon ölçer) manken yerleştirilerek giysi tomografi cihazı içerisinde radyoaktif ışınmaya maruz bırakılmaktadır [35, 39].

Phantom (Şekil 20), ağırlıkça %9,18 hidrojen, %67,78 karbon, %2,50 azot, %20,31 oksijen ve %0,22 antimon içeren insan doku eşdeğerine sahip bir plastikten üretilmektedir. Kaplamanın altında insan iskelet yapısı barındıran manken, gerçekçi bir simülasyon için çeşitli hava boşluklarına ve akciğer simülasyonu için de yoğunluğu 0,305 g/cm³ olan düşük yoğunluklu bir köpüğe sahiptir. Phantom, baş bölgesinden diz bölgesine kadar 12 farklı büyüklükte bölgeye ayrılmakta ve üzerinde bulunan farklı bölgelerdeki ve farklı derinliklerdeki boşluklara radyoaktif enerji detektörü yerleştirilmektedir. Astronot giysisi içerisine yerleştirilen Phantom daha sonra bir tomografi (XCT) cihazına yerleştirilerek vücudun farklı bölgelerinde maruz kalınan radyasyon miktarı ölçümlenmektedir (Şekil 21) [37, 41].

**Şekil 20.** Phantom (solda), Phantom astronot giysisine yerleştirilirken (sağda) [41]**Şekil 21.** XCT cihazına yerleştirilen Phantom [41]

İyonizasyon çemberi testi ise elektron ve protonların astronot giysisi içerisine girebilmek için sahip olması gereken eşik enerji miktarını ölçümlenmektedir. Farklı giysi parçaları üzerine "doğrusal parçacık hızlandırıcı" ile ışın demeti gönderilmekte ve giysi parçası içerisindeki bir iyonizasyon çemberi yardımıyla da giysi içerisine geçen elektron ve proton eşik enerjileri ölçümlenmektedir [41].

**Şekil 22.** İyonizasyon çemberi testi [41]

6. Elektrik Ark Testleri

2002 yılında NASA tarafından gerçekleştirilen 113/111A numaralı mekik dışı aktivite sırasında EMU giysisinin içerisinde yıpranmış bir tel bulunmuştur. Bir elektrik kaynağından çıkan ve yanıcı bir materyal boyunca ilerleyen elektrik akımı, elektrik arkına bağlı tutuşma gerçekleştirebilmektedir. Oksijen bakımından zengin ortamlarda yanıcı materyallerin tutuşma riski havadakine oranla çok daha fazladır. EMU giysilerinin de oksijen açısından zengin bir ortama sahip olması, yıpranmış bir telden kaynaklanan elektrik arkına bağlı tutuşma riskini yukarılara taşımaktadır. Malzemelerin tutuşabilme özelliklerini anlamak için 3 yeni elektrik ark testi geliştirilmiştir. Bunlar, çizilme testi, kesikli ark testi ve kırık kablo testleridir. Malzemelerin tutuşabilme özelliklerini anlamak, en kötü senaryonun simülasyonunu gerektirdiğinden, bu üç test yöntemi, hangi koşulların en düşük akımlarda ateşleme üretme olasılığının en yüksek olduğunu anlamak için geliştirilmiştir. Bütün testler, yüksek basınçlı bir test kabini içinde gerçekleştirilmektedir ve kuru gaz salımlı ortam nemi minimum düzeyde tutulmaktadır. EMU giysileri içerisindeki ortam daha nemli olmasına rağmen, bu şekilde gerçekleştirilecek olan bir ölçüm, tutuşmaya daha müsait olması sebebi ile daha faydalı olarak görülmektedir [42].

6.1. Çok Noktalı Kesikli Ark Testi (Çizilme Testi)

Bu test kapsamında, düz bir plaka şeklinde olan katot üzerinde test malzemesi yerleştirilmektedir ve test malzemesi üzerinde bulunan ince bir yarıktan iğne benzeri bir anot, katotla temas ederek çizilme hareketi gerçekleştirilmektedir. Çizilme testi, astronotlar hareket ederken EMU giysisi içinde bulunan hasar görmüş telleri simüle edebilmekte ve birden fazla yerde ark yaratabilmektedir. Her bir test 15 dakika sürmekte ve numune üzerinde meydana gelen tutuşma hareketleri subjektif olarak gözlenmektedir. Her bir materyal için 5 tekrarlı test uygulanmakta olup bu testlerden birinde tutuşma olması durumunda numune başarısız kabul edilmektedir. Testler 23,5 psia basınç altında ve %100 oksijen içeriğinde gerçekleştirilmektedir. Ark oluşturmak amacıyla anot ve katot arasında 22,5 volt gerilim uygulanmaktadır. Yapılan çeşitli testler doğrultusunda materyallerin tutuşmaları için gerekli olan akımın 0,8A ile 1,4A arasında değiştiği ifade edilmiştir [42].

Numuneyi hangi arkın tutuşturduğunu belirlemenin mümkün olmaması, ark enerjilerinin testten teste ve arkın ark değişkenlik göstermesi, test numunesinin ark olayı ile tam temas halinde olup olmadığının bilinmemesi ve ark iğnesinin çok kalın olması sebebi ile EMU giysisi için gerçekçi bir test ortamı sağlamıyor oluşu testin problemleri arasında yer almaktadır [42].

6.2. Tek Noktalı Kesikli Ark Testi

Kesikli ark testi, iki farklı test değişkeninin etkisini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. EMU içerisindeki elektrik iletkenleri, çizilme testinde kullanılan iğneli elektrotlardan çok daha küçük olmaktadır. Bu sebeple kesikli ark testi, EMU içerisinde bulunan tel yapıları ile gerçekleştirilen ark testlerinin, iğneli elektrotlarla gerçekleştirilen testlere oranla daha şiddetli olup olmadığının incelenmesini amaçlamaktadır. Kesikli ark testi ayrıca, çizilme testinde olduğu üzere çok noktadan gerçekleştirilen bir ark testi ile

tek noktadan gerçekleştirilen bir ark testi arasında fark olup olmadığını incelemektedir. Test, numune materyali üzerindeki ince bir yarıktan anot elektrotu ile katot elektrotunun temas ettirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Anot elektrotu, katot üzerinde bulunan bir noktaya arka arkaya temas ederek, aynı nokta üzerinde tekrarlı ark meydana getirmektedir. Bu test yöntemi, EMU içerisindeki hasar görmüş kabloların, malzemenin tek bir noktasına tekrar tekrar temas etmesini ve o bölgede ark oluşturmamasını simüle etmektedir. Yapılan testlerde, tek ya da çok noktadan ark uygulanmasının tespit edilebilir bir fark yaratmadığı, fakat iğne uçlu katot yerine ince tel ile oluşturulan arkın daha güçlü meydana geldiği ifade edilmiştir. Hangi arkın numuneyi tutuşturduğunun bilinmemesi, ark enerjilerinin testten teste ve arkta arka değişkenlik gösteriyor olması ve test numunesinin ark olayı ile tam temas halinde olup olmadığını bilinmemesi tek noktalı kesikli ark testinin dezavantajları arasındadır [42].

6.3. Kırık Kablo Testi

Kırık kablo testi, tek noktalı ve çok noktalı kesikli ark testlerinde yaşanan ark enerjilerinin testten teste ve arkta arka farklılık göstermesi ve her iki testte de ark olayının materyalle birebir temas halinde olup olmadığını bilinmemesi gibi problemler üzerine alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Ark noktası olarak, tek noktalı kesikli ark testinde elde edilen olumlu sonuçlar doğrultusunda ince tel kullanımı tercih edilmiştir. Testler sırasında, 23,5 psia basınç altında %100 oksijen içerikli ve 50 psia basınç altında %50 oksijen, %50 azot içerikli test ortamı kullanılmıştır. Ark oluşturmak amacıyla anot ve katot arasına 15 volt gerilim uygulanmıştır [42].

Bu test kapsamında, tek bir ince tel "U" şeklinde kıvrılarak, kıvrılan uçlar ark çenelerine tutturulmakta ve "U"nun hemen altına test materyali temas halinde yerleştirilmektedir. Tele akım ve voltaj uygulandığında tel önce ısınmakta sonrasında ise kopmaktadır. Telin ısınmasıyla beraber test materyali de ısındığından, telin kopma anında ark meydana gelmektedir. Bu test simülasyonu, EMU giysileri içerisinde bir kablo demetinin hasar görmesi ve tüm gücü tek bir telin taşıdığı durumlarda ortaya çıkabilecek gerçekçi bir senaryodur [42].

Yapılan çalışmalar doğrultusunda, bu yöntemin tek ve çok noktalı kesikli ark testlerine oranla daha şiddetli ark meydana getirdiği ifade edilmiştir. Birçok numunenin 0,3A olan teknik olarak inilebilen en düşük akım şiddetinde testten kaldığı ve çoğu materyalin tutuşma için 0,3A ile 0,97A arasında akım şiddetine ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir [42].



Şekil 23. Elektrik ark testi düzeneği [42]

7. Sonuç

Uzay, bilinmezliklerle dolu, insanoğlunun cevabını en çok merak ettiği ve bunun için yoğun çaba sarf ettiği sorulardan birisidir. Gerçekte uzaya gitmek ve oradan sağ dönmek için bir roketten çok daha fazlasını üretebilmek gerekmektedir. Astronotları uzayda sağ tutabilmek için gereken en önemli donanımlardan biri de uzay elbiseleridir. Bulduğumuz gezegen yüzeyinde yaşam şartlarımızın kısıtlandığını uzaya çıkmadan anlamamız oldukça zordur. Bizler yaşamlarımızı maalesef sadece belirli ve kısıtlanmış

şartlar altında sürdürebilme yeteneğine sahip canlılarız. İçinde bulunduğumuz atmosferin yarattığı koşullara uyum sağlamış olmamız sebebiyle bu atmosfer dışına çıktığımızda bize bu şartları sağlayacak özel giysiler olmadan hayatta kalma şansımız bulunmamaktadır [1]. Bu kapsamda, astronot kıyafetlerinden beklenen iki farklı yetkinlik vardır: Birincisi hayatta tutma, ikincisi ise istenilen görevin yerine getirilmesini sağlayacak işlevselliğe sahip olmadır.

İnsanoğlu çok fonksiyonlu koruyucu bir kıyafet sayesinde bugüne kadar uzayın derin boşluğunda 4000 saatin üzerinde hayatta kalmayı başarmış ve bu süre zarfında uzay istasyonu inşası da dâhil olmak üzere birçok işlevsel görevi yerine getirebilmiştir. İnsanoğlunun uzaydaki becerileri arttıkça, astronot giysilerine karşı işlevsel beklentiler de artmış, buna bağlı olarak yeni tasarımlar ve fonksiyonların geliştirilmesi gerekmiştir. Astronot giysilerine uygulanan testler, yaşamsal testler ve işlevsel testler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Astronotun uzayın zorlu koşullarında hayatta kalması kadar kendisine verilen görevi yerine getirmesi de bir o kadar önem taşımaktadır. Bu noktada karşılaşılan önemli zorluklardan biri ise yeryüzünden yüz binlerce kilometre uzakta olan bir ortama uyum sağlayacak giysilerin, üretimden sonra o ortama uygunluğunun sınanması noktasında yaşanmaktadır. Hakkında hiçbir bilgi sahibi olunmayan, hatta bilgi sahibi olmak için gidilmeye çalışılan bir ortamın tehlikeleri ve yaşamsal koşulları hakkında yeterli bilgiye sahip olmak, insanoğlunun uzun yıllarını almış ve zaman zaman acı tecrübeler bırakmıştır. Günümüzde astronot giysileri için gerçekleştirilen her bir test, uzun yılların birikimlerini ve tecrübelerini barındırması sebebi ile büyük değer taşımaktadır.

Kaynaklar

1. Temel, E., Astronot Giysileri, 16. Uluslararası Tekstil Teknolojisi ve Kimyasındaki Son Gelişmeler Sempozyumu, Bursa, 04-06 Mayıs, 2017.
2. Bolonkin, A., In outer space without a space suit?, City University of New York - Brooklyn College, 9 pages, 2008.
3. Christoffersen, R., Lindsay J. F., Noble, S. K., Meador, M. A., Kosmo, J. J., Lawrence, J. A., Brostoff, L., Young, A. and McCue, T., Lunar Dust Effects on Spacesuit Systems, NASA Center for AeroSpace Information, 40 pages, 2008.
4. Jordan, N. C., Saleh, J. H. and Newman, D. J., The extravehicular mobility unit: A review of environment, requirements, and design changes in the US spacesuit, Acta Astronautica, 59, p.p. 1135-1145, 2006.
5. Prouty, B.R., Wilde, R.C., Gan, M., Evolution of the extravehicular mobility unit for future missions, 21st International Conference on Environmental Systems, SAE SP-872, pp. 49-60, 1991.
6. Goodman, G., Information requirements for space station freedom EVA, 21st International Conference on Environmental Systems, SAE SP-872, pp. 153-157, 1991.
7. https://www.worldspaceflight.com/bios/eva/eva_stats.php (Atf tarihi: 09 Aralık 2017)
8. Meyen, F. E., Holschuh, B., Kobrick, R. L., Jacobs, S. E. and Newman, D. J., Robotic Joint Torque Testing: A Critical Tool in the Development of Pressure Suit Mobility Elements, 41st International Conference on Environmental Systems, Portland, Oregon, 17-21 July 2011
9. Sim, Z. L., Development of a Mechanical Counter Pressure Bio-Suit System for Planetary Exploration, Master of Science in Aeronautics and Astronautics Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
10. <https://spaceflight.nasa.gov/station/eva/outside.html> (Atf tarihi: 09 Aralık 2017)
11. Harris, M. L., Morberg, P., Bruce, W. J. and Walsh, W. R., An improved method for measuring tibiofemoral contact areas in total knee arthroplasty: a comparison of K-scan sensor and Fuji film, Journal of Biomechanics, 32:951-958, 1999.
12. Ashruf, C. M. A., Thin Flexible Pressure Sensors, Sensor Review, 22(4):322-327, 1999.
13. <https://www.nasa.gov/content/astronaut-spacesuit-testing-for-orion-spacecraft> (Atf tarihi: 09 Aralık 2017)

14. Carr, C. E., The Bioenergetics of Walking and Running in Space Suits, Doctorate of Science in Medical Physics Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
15. Harris, G. L., The Origins and Technology of the Advanced Extravehicular Space Suit, Volume 24 of AAS History Series, American Astronautical Society, San Diego, California, 2001.
16. Morgan, D. A., Wilmington, R. P., Pandya, A. K., Maida, J. C. and Demel, K. J., Comparison of Extravehicular Mobility Unit (EMU) Suited and Unsuited Isolated Joint Strength Measurements, (NASA TP-3613). Technical report, National Aeronautics and Space Administration, 1996.
17. Schmidt, P., An Investigation of Space Suit Mobility with Applications to EVA Operations, Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
18. Tanaka, K., Danaher, P., Webb, P. and Hargens, A. R., Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol. 80, No. 10, pp 890-893, 2009.
19. Benson, E. A., England, S. A., Mesloh, M., Thompson, S. and Rajulu, S., Use of Traditional and Novel Methods to Evaluate the Influence of an EVA Glove on Hand Performance, 40th International Conference on Environmental Systems, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.
20. https://www.nasa.gov/topics/technology/features/glove_2009.html (Atif tarihi: 09 Aralık 2017)
21. Kuo, L. C., Chiu, H. Y., Chang, C. W., Hsu, H. Y. and Sun, Y. N., Functional Workspace for Precision Manipulation between Thumb and Fingers in Normal Hands, Journal of Electromyography and Kinesiology, 19(5):829-39, 2009.
22. Norcross, J. R., Lee, L. R., Clowers, K. G., Morency, R. M., Desantis, L., Witt, J. K. D., Jones, J. A., Vos, J. R., Gernhardt, M. L., Feasibility of Performing a Suited 10-km Ambulation of the Moon, Final Report of the EVA Walkback Test (EWT), NASA/TP-2009-214796, NASA Center for AeroSpace Information, Hanover, 2009.
23. https://www.nasa.gov/centers/ohnson/pdf/167748main_FS_NBL508c.pdf (Atif tarihi: 09 Aralık 2017)
24. Braden, J. and Akin, D., Development and Testing of a Space Suit Analogue for Neutral Buoyancy EVA Research, SAE Technical Paper 2002-01-2364, 2002.
25. Jairala, J., Durkin, R., Marak, R., Prince, A., Sipila, S., Ney, Z., Parazynski, S. and Thomason A., EVA Development and Verification Testing at NASA's Neutral Buoyancy Laboratory, JSC/EC5 U.S. Spacesuit Knowledge Capture (KC) Series Synopsis, 2012.
26. Kruse, G. R., Mendes, W. R., Sommers, W. J., Weed, R. A., Nash, K. D. and Mayo, D. V., Testing And Simulation of Microdebris From Impacts With Complex Targets, International Journal of Impact Engineering, vol. 23, pp. 489-500, 1999.
27. Cwalina, C. D., Dombrowski, R. D., McCutcheon, C. J., Christiansen, E. L. and Wagner, N. J., MMOD Puncture Resistance of EVA Suits with Shear Thickening Fluid (STF) – Armortm Absorber Layers, Procedia Engineering, vol. 103, pp. 97 – 104, 2015.
28. Christiansen, E. L., Kerr, J. H., De La Fuente, H. M. and Schneider, W. C., Flexible and Deployable Meteoroid/Debris Shielding For Spacecraft, International Journal of Impact Engineering, vol. 23, pp. 125-136, 1999.
29. Hyde, J., Read, J., Lear, D. and Christiansen, E., MMOD Impacts Found on a Returned ISS Cover, Orbital Debris Quarterly News, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Vol. 20, Issue 3, pp. 4-6, 2016.
30. McAllum, W. E., Development of Meteoroid Protection for Extravehicular-Activity Space Suits, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 6, No 11, pp. 1225-1228, 1969.
31. Christiansen, E. L., Cour-Palais, B. G. and Friesen, L. J., Extravehicular Activity Suit Penetration Resistance, International Journal of Impact Engineering, Vol. 23, pp. 114-123, 1999.
32. Floberghagen, R. and Pineiro, J., A Journey to Earth's Core Swarm: ESA's Magnetic Field Mission, European Space Agency, Bulletin 151, 2012.
33. Zeitlin, C., Guetersloh, S. B., Heilbronn, L. H., Miller, J. and Shavers, M., Radiation Tests of the Extravehicular Mobility Unit Space Suit for the International Space Station Using Energetic Protons, Radiation Measurements, Vol. 41, pp. 158 – 1172, 2006.
34. Wilson, J., Anderson, B., Cucinotta, F., Ware, J. and Zeitlin, C. J., Spacesuit Radiation Shield Design Methods, SAE Technical Paper, 2006-01-2110, 2006.
35. Benton, E. R., Benton, E. V., Frank, A. L. and Moyers, M. F., Characterization of the Radiation Shielding Properties of US and Russian EVA, Radiation Measurements, vol. 41, pp. 1191 – 1201, 2006.
36. Cucinotta, F. A., Kim, M. Y., Willingham, V. and George, K. A., Physical and Biological Dosimetry Analysis From International Space Station Astronauts, Radiation Research, 170:127-138, 2008.
37. Cucinotta, F. A., Shavers, M., Saganti, P. B. and Miller, J., Radiation Protection Studies of International Space Station Extravehicular Activity Space Suits, Technical Report, NASA Center for AeroSpace Information (NASA), NASA/TP-2003-212051, 2004.
38. Cucinotta, F. A., Space Radiation Risks for Astronauts on Multiple International Space Station Missions, Plos One, 9(4): e96099, 2014.
39. Cucinotta, F. A. and Durante, M., Risk of Radiation Carcinogenesis, Space Radiation, Chapter 4, pp. 119-170, 2009.
40. Durante, M. and Cucinotta, F. A., Physical Basis of Radiation Protection in Space Travel, Reviews of Modern Physics, 83(4), pp. 1245-1281, 2011.
41. Moyers, M. F., Saganti, P. B. and Nelson, G. A., EVA Space Suit Proton and Electron Threshold Energy Measurements by XCT, Radiation Measurements, Vol. 41, pp. 1216 – 1226, 2006.
42. Smith, S., Gallus, T., Tapia, S., Ball, E. and Beeson H., Electrical Arc Ignition Testing of Spacesuit Materials, Journal of ASTM International, Vol. 3, No. 8, Paper ID JA113563, 2006.



Bartın Üniversitesi

Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



AISI O2 Çeliğinin Frezelenmesinde Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Sisteminin Kesme Performansına Etkisi

Bilal KURŞUNCU^{1*}, Ali YARAŞ²

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

²Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 29.11.2017 Düzeltme Tarihi: 13.12.2017 Kabul Tarihi: 13.12.2017

Özet

Günümüzde kesme performansının iyileştirilmesinin yanı sıra, düşük maliyet, insan sağlığına zararlı olmayan ve çevre dostu imalat proseslerinin geliştirilmesi sürdürülebilir imalat yöntemleri açısından önem arz etmektedir. Minimum miktarda yağlama (MQL) yöntemi, sürdürülebilir imalatı sağlamak amacıyla işlenebilirliği zor olan sert ve dayanımı yüksek malzemelerin kesme performansını arttırmak için gerçekleştirilen ve geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla daha az miktarda kesme sıvısının kullanıldığı talaşlı imalat yöntemlerinden birisidir. Bu nedenle bu çalışmada, AISI O2 soğuk iş takımı çeliğinin TiAlN kaplamalı kesici takım ile MQL yöntemi kullanılarak işlenmesinde ticari kesme sıvısı kullanılmıştır. Kesme performansı üzerine MQL yönteminin etkisini incelemek amacıyla elde edilen deneysel sonuçlar kuru şartlarda yapılan frezeleme işlemine ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarına göre; en yüksek takım ömrüne (2.55 m) MQL yöntemiyle gerçekleştirilen frezeleme işleminde ulaşılmıştır. Bununla birlikte yüzey pürüzlülük ve kesme kuvvetleri değerlerinin kuru frezeleme işlemine nazaran önemli oranda iyileştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI O2 çeliği, Minimum miktarda yağlama, Yüzey pürüzlülüğü, Kesme kuvvetleri, Takım ömrü

Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) System on Cutting Performance of Milling AISI O₂ Tool Steel

Abstract

Nowadays, in addition to improving cutting performance, the development of low cost, non-harmful and environmentally friendly manufacturing processes is important in terms of sustainable manufacturing methods. Minimum Lubrication (MQL) is one of the machining methods used to improve the cutting performance of hard and high strength materials that are difficult to process and less cutting fluid is used compared to conventional processing methods in order to ensure the sustainable manufacturing methods. For this reason, commercial cutting fluid was used to machine AISI O2 cold work tool steel using TiAlN coated cutting tool by MQL method in this study. The experimental results obtained in order to investigate the effect of the MQL method on the cutting performance are compared with the results of the milling performed under dry conditions. According to the results of the experiment; the highest tool life (2.55 m) has been achieved by milling with MQL method. In addition, the values of surface roughness and cutting forces have been determined to improve significantly in comparison to dry milling.

Keywords: AISI O2 steel, Minimum quantity lubrication, Surface roughness, Cutting forces, Tool life

1. Giriş

Çevresel faktörlerden dolayı çeşitli imalat proseslerinde kullanılan kesme/yağlama sıvılarının neden olduğu kirliliğin azaltılmasına yönelik temiz üretim yöntemlerinin geliştirilmesi günümüzde son derece önem arz etmektedir [1]. Geleneksel metal işleme sistemlerinde kullanılan kesme sıvıları, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı işlem sırasında yüksek sıcaklığın neden olduğu termal hasarların yanı sıra kesme kuvvetlerini de azaltmaktadır [2]. Kesme sıvısı kullanımı aynı zamanda iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünmeyi en aza indirerek hem işlenmiş yüzeyin yüzey kalitesini hem de kesici takım ömrünü olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, özellikle mineral esaslı kesme sıvılarının çevre ve insan sağlığı ile proses maliyetleri açısından bazı zararlı etkileri olduğu unutulmamalıdır [3 – 7]. Bu nedenle son yıllarda araştırmacılar, daha az zararlı, biyolojik olarak bozunabilir, non-toksik, metal işleme performansı yüksek çevre dostu kesme sıvılarının kesme proseslerinde kullanımına yönelik çalışmalara yoğunlaşmış durumdadırlar [8, 9].

Sert freze işlemi, sertlik değeri yüksek (> 45 HRC) [16] ve dayanımlı malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir [10, 11]. Bu yöntemin en önemli dezavantajlarından biri, kesici takım ve iş parçası ara yüzeyinde sürtünme sonucunda oluşan yüksek ısıya bağlı olarak kesici takımlarda aşınmanın meydana gelmesidir. Kesme işlemi sırasında oluşan yüksek ısı,

kesme bölgesinde sıcaklık artışına neden olduğundan difüzyon ve oksitlenme aşınma mekanizmalarına bağlı olarak kesici takımın hızlı bir şekilde aşınmasına neden olur. Sonuç olarak meydana gelen aşınmadan dolayı kesici takım ömrü azalır ve işlenmiş yüzeye ait yüzey pürüzlülük değeri de artar. Bu nedenle, daha az yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek aşınma direnci elde etmek için kesici takım aşınmasının kontrol altına alınması oldukça önemlidir [12]. Sonuç olarak, talaşlı işleme proseslerinde sert ve dayanıklı malzemelerin takım ömrü ve aşınması, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler sert frezeleme yöntemi kullanılarak çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir [10, 13, 14].

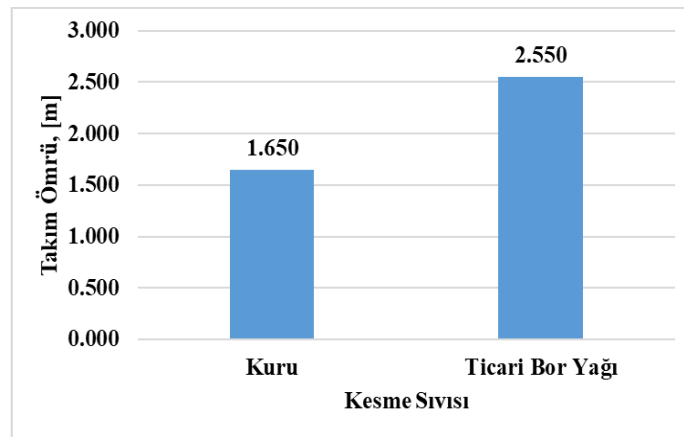
Günümüzde sert frezeleme prosesleri kuru, klasik ve kriyojenik soğutma teknikleri gibi geleneksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilirken özellikle sürdürülebilir talaşlı imalat açısından minimum miktarda yağlama (MQL) yönteminin uygulanmasında artış görülmektedir [15 – 17]. Kuru işleme tekniği çevre dostu ve son derece düşük maliyetli olmasına rağmen klasik kesici aletler ile yüksek mukavemet ve sertlikteki malzemelerin işlenmesi esnasında kesme parametreleri üzerinde olumsuz etkileri çok daha fazladır [18, 19]. Bu tip problemlerin üstesinden gelebilmek için literatürde kuru işleme yöntemiyle sert ince kaplamalı kesici aletler kullanılarak yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur [20, 21]. Yukarıda ifade edilen teknolojik, çevresel ve ekonomik avantajlarından dolayı metal ve kompozit malzemelerin sert frezeleme proseslerinde MQL yöntemi tercih edilmektedir [10, 11,

22, 23]. MQL yöntemi ile AISI 4340 çeliğinin işlenebilirliğinin geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığı bir çalışmada düşük enerji tüketimi ve işleme zamanının kısa olması nedeniyle proses maliyetinde bir azalmanın meydana geldiği belirlendi [41]. MQL tekniğinde, kesme sıvısına ait püskürtülen damlalar kesme bölgesiyle doğrudan temas eder ve kesici takım yüzeyinde ince bir tribofilim tabakası meydana gelir. Bu tabaka kesme bölgesinde sürtünmeyi ve oluşan ısıyı azaltmaya yardımcı olur [3, 17]. Bu bağlamda, Sohrabpoor ve arkadaşları tarafından AISI 4340 paslanmaz çeliği kullanılarak geleneksel, kuru, hava soğutmalı ve MQL sistemlerinin kesme performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği tormalama işleminde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından en etkili yöntemin MQL olduğunu tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, kaplanmamış karbür kesici takım ile AISI 1040 çeliğinin kesme performansı üzerine MQL yönteminin etkisinin araştırıldığı başka bir çalışmada, kesme bölgesindeki sıcaklık düşüşüne bağlı olarak kesme performansında bir artışın olduğu ifade edilmiştir. MQL yönteminin bir başka önemli özelliği de geleneksel yöntemlere kıyasla kullanılan kesme sıvı miktarının oldukça düşük olmasıdır. Literatürde geleneksel yöntemlerde kullanılan kesme sıvısı 1200 litre/saat [8] iken, MQL sisteminde 50 mililitre/saat [9] e düşürüldüğü belirtilmektedir. Benzer şekilde, M. Rahman ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada kesme performansında meydana gelen iyileşmenin yanı sıra, MQL yöntemiyle gerçekleştirilen uç frezeleme işleminde kesme sıvısı tüketiminin (8.5 mililitre/saat), geleneksel soğutma yöntemine kıyasla çok daha düşük (25260 ml/saat), olduğu tespit edilmiştir [10].

Bu çalışmada, AISI O2 soğuk iş takım çelik malzemesi, ticari kesme sıvısı kullanılarak MQL yöntemi ile TiAlN kaplamalı kesici takım frezelenerek yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme kuvvetleri gibi kesme performansı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Deneyler karşılaştırma yapabilmek amacıyla hem kuru hem de ticari kesme sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Kesme işlemlerinde kullanılan (R390-11 T3 08M-KM H13A) sinterlenmiş karbür kesici takımlar ve takım tutucu Sandvick firmasından temin edilmiştir. Kaplamasız olarak temin edilen bu kesici takımların aşınma dayanımının artırılması amacı ile TiAlN ince sert film kaplama uygulanmıştır. Takım tutucunun iki adet kesici takım bağlanacak ucu olmasına rağmen testlerde sadece bir kesici takım ile işlemler gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi kesme işlemi sırasında tek bir kesici takımda meydana gelebilecek etkilerin belirlenmesidir.



Şekil 1. Farklı kesme sıvıları kullanılarak elde edilen takım ömürleri

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Ticari bor yağı kullanılarak ve kuru şartlarda uygulanan frezeleme işlemi sonrasında iş parçası yüzeyinden elde edilen pürüzlülük değerleri Şekil 2'de görülmektedir. Pürüzlülük değerleri her paso sonrasında iş parçası üzerinden pürüzlülük cihazı ile yedi farklı değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerlere göre, ticari bor yağının MQL sisteminde kullanılması

Kesici takımın takım ömrünün belirlenmesi amacı ile optik mikroskop kullanılmıştır. Her kesme işleminden (paso) sonra kesici takım tezgah üzerine alınmış ve bilgisayar programı destekli bir optik mikroskop kullanılarak kesici takımda meydana gelen aşınma miktarı ölçülmüştür. Kesici takımın ömrünü, standartlara [24] göre aşınma miktarı 0,25 mm'e geldiğinde tamamladığı kabul edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde Mitutoyo SurfTest SJ-310 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Her kesme işlemi sonrasında kesme yüzeyinin yedi farklı yerinden alınan değerlerin ortalaması hesaplamalarda kullanılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde 10 kN'a kadar ölçüm yapan Kistler 9257B Multi-Component Dinamometre kullanılmıştır.

MQL sistemi olarak 0,0021 ml-0,028 ml yağlama aralığına sahip 4-6 bar basınçta çalışan Werte Mikro STN 25 kullanılmıştır. Hazırlanan kesme sıvısı sistem üzerinde bulunan bir nozul ile kesme ortamına püskürtülmüştür.

AISI O2 soğuk iş takım çeliğinin MQL şartlarında ticari bor yağı kullanılarak frezelenmesinde kullanılan kesme parametreleri Tablo 1'de görülmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Takım Ömrü

Şekil 1'de iki farklı kesme ortamında uygulanan AISI O2 çeliğinin sert frezelenmesi işlemi sonrasında elde edilen takım ömürleri görülmektedir. Takım ömrü, kesici takım serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarının bilgisayar yazılımına sahip bir optik mikroskoptaki görüntüsünden ölçülmesi ile belirlenmiştir. Ticari bor yağının, MQL sisteminde kullanılması ile sinterlenmiş karbür kesici takımların takım ömründe artış görülmüştür. Bu artış, kuru şartlarda yapılan frezeleme işlemi ile karşılaştırıldığında, yaklaşık olarak %55 oranında gerçekleşmiştir.

Tablo 1. Kesme parametreleri

Kesme Hızı, V_c	100 m/dk
İlerleme oranı, f_z	0,05 mm/diş
Eksenel kesme derinliği, a_p	0,5 mm
Radyal kesme derinliği, a_e	15 mm
MQL Sistemi Basıncı	5 bar
MQL Sistemi Sıvı Debisi	50 ml/s

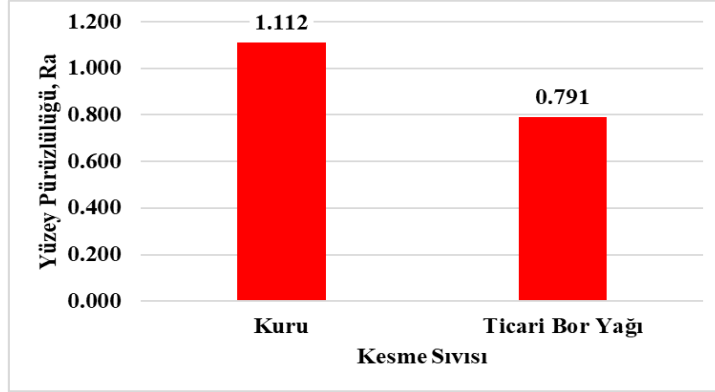
sonucu iş parçasının yüzey kalitesinin kuru şartlara göre iyileştiği ve bu duruma kesme sıvısının yağlayıcı etkisinin neden olduğu söylenebilir.

3.3. Kesme Kuvvetleri

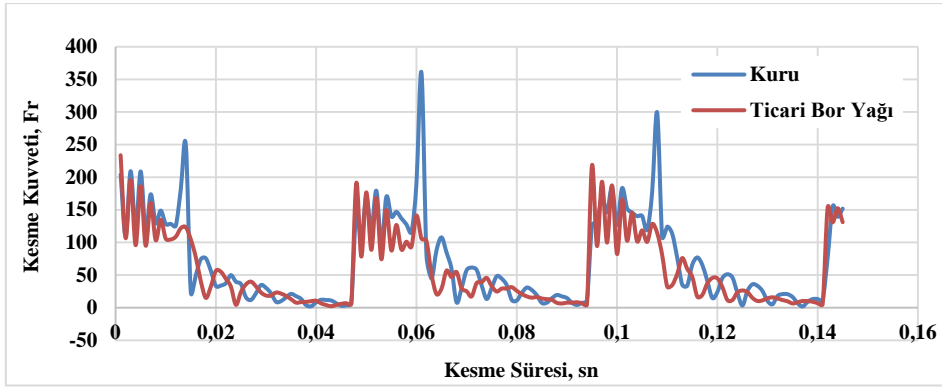
Frezeleme işlemi sırasında iki farklı şartta elde edilen bileşke kesme kuvvetlerinin kuvvet dalgalanmaları Şekil 3'te

görülmektedir. Frezeleme işleminin kesikli bir proses olmasından dolayı kesme kuvvet değerlerine ait grafikler dalgalı bir şekilde elde edilmiştir. Şekil 3'teki sonuçlar incelendiğinde ticari bor yağı varlığında kesme kuvvetlerinde azalmanın meydana geldiği

görülmektedir. Bununla birlikte kesme sıvısı kullanımı ile frezeleme işlemi sırasında meydana gelen titreşim miktarında da bir azalmanın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Frezeleme işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri



Şekil 3. Frezeleme işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, endüstride farklı malzemelerin imalatında sıklıkla kullanılan ve işlenmesi zor bir malzeme olan AISI O2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde, sürekli akış şartlarında kullanılan ticari bor yağının MQL sisteminde kesme performansına olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Sürekli akış şartlarında kullanılan ticari bor yağının MQL sisteminde kullanılması sonucu kesici takımın ömründe yaklaşık olarak %5 oranında bir artış meydana gelmiştir.
- Elde edilen pürüzlülük değerlerine göre frezeleme işlemi sonrasında AISI O2 soğuk iş takım çeliğinin yüzey kalitesinde artış görülmüştür.
- Kesme kuvvetleri açısından değerlendirildiğinde MQL sisteminin uygulanması ile kesme işlemi sırasında meydana gelen titreşimler azalmıştır. Ayrıca minimum miktarda bor yağının kesme bölgesine püskürtülmesi ile kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda MQL sisteminde farklı debilerde çeşitli akışkan tiplerinin kesme performansına etkilerinin incelenmesinin yanı sıra, farklı kesici takım ve iş parçalarının işlenebilirliği üzerine etkileri de incelenebilir.

Kaynaklar

1. Krolczyk, G.M., Nieslony, P., Maruda, R.W., Wojciechowski, S. Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production. *Journal of Cleaner Production*. 142, 3343–3354 2017.
2. Boswell, B., Islam, M.N., Davies, I.J., Ginting, Y.R., Ong, A.K. A review identifying the effectiveness of minimum quantity

lubrication (MQL) during conventional machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1–20 2017.

3. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 127, 1–18 2016.
4. Guo, S., Li, C., Zhang, Y., Wang, Y., Li, B., Yang, M., Zhang, X., Liu, G. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. *Journal of Cleaner Production*. 140, 1060–1076 2017.
5. Caliiskan, H., Kurbanolu, C., Panjan, P., cekada, M., Kramar, D. Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling. *Tribology International*. 62, 215–222 2013.
6. Zhang, S., Li, J.F., Wang, Y.W. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*. 32, 81–87 2012.
7. Sreejith, P., Ngoi, B.K.. Dry machining: Machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*. 101, 287–291 2000.
8. Lawal, S.A., Choudhury, I.A., Nukman, Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*. 41, 210–221 2013.
9. Tamada, I.S., Montagnoli, R.N., Lopes, P.R.M., Bidoia, E.D. Toxicological evaluation of vegetable oils and biodiesel in soil during the biodegradation process. *Brazilian Journal of Microbiology*. 43, 1576–1581 2012.
10. Minh, D.T., The, L.T., Bao, N.T. Performance of Al₂O₃ nanofluids in minimum quantity lubrication in hard milling of

- 60Si2Mn steel using cemented carbide tools. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814017710618>. 2017.
11. An, Q., Wang, C., Xu, J., Liu, P., Chen, M. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 43, 94–101 2014.
 12. Maruda, R.W., Krolczyk, G.M., Feldshtein, E., Nieslony, P., Tyliczszak, B., Pusavec, F. Tool wear characterizations in finish turning of AISI 1045 carbon steel for MQCL conditions. *Wear*. 372, 54–67 2017.
 13. Wojciechowski, S., Maruda, R.W., Nieslony, P., Krolczyk, G.M. Investigation on the edge forces in ball end milling of inclined surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*. 119, 360–369 2016.
 14. Wojciechowski, S., Twardowski, P., Pelic, M. Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces. In: *Procedia CIRP*. pp. 113–118 2014.
 15. Çaydaş, U., Kuncan, O., Çelik, M. AISI 52100 rulman çeliğinin işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve sıcaklık kriterlerine göre araştırılması. 2017.
 16. Kissler, H. KSS-bedingte Kosten in dersenpenden Metallbearbeitung als Anreiz für die Trockenbearbeitung. In: *12 th International Colloquium Tribology*. pp. 901–913 2000.
 17. Kaynak, Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 72, 919–933 2014.
 18. Qian, L., Hossan, M.R. Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. *Journal of Materials Processing Technology*. 191, 274–278 2007.
 19. Wakabayashi, T., Sato, H., Inasaki, I. Turning Using Extremely Small Amounts of Cutting Fluids. *JSME International Journal Series C*. 41, 143–148 1998.
 20. Quiza, R., Figueira, L., Davim, J.P. Comparing statistical models and artificial neural networks on predicting the tool wear in hard machining D2 AISI steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 37, 641–648 2008.
 21. Chinchankar, S., Choudhury, S.K. Hard turning using HiPIMS-coated carbide tools: Wear behavior under dry and minimum quantity lubrication (MQL). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 55, 536–548 2014.
 22. Le, T.S., Tran, M.D., Nguyen, D.B., Nguyen, V.C. An investigation on effect of characteristics of the peanut oil MQL on tool life in hard turning 9CrSi steel. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 13, 428 2013.
 23. Liao, Y.S., Lin, H.M., Chen, Y.C. Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47, 1667–1676 2007.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Köpük Beton

Osman Hulusi ÖREN, Osman GENÇEL*

Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 08.06.2017 Düzeltme Tarihi: 19.06.2017 Kabul Tarihi: 20.06.2017

Özet

Günümüzde normal betonlara göre sağladığı avantajlardan dolayı hafif betonların kullanımı yaygınlaşmıştır. Hafif beton teknolojisinin ürünlerinden biri olan köpük beton ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Köpük beton düşük ağırlığına rağmen yüksek mukavemete sahip olabilen ve düşük yoğunluğa sahip bir üründür. Köpük betonun kullanılması yapının ve temel üzerindeki ölü yükleri azaltır ve yapının işçilik maliyetinin düşürülmesinde etkilidir. Normal betona göre daha kolay ve ucuz üretilebilir. Düşük yoğunluğu, yüksek porozitesi, ısı iletkenliği ve yangın direncinin iyi olması köpük betonu birçok alanda kullanılabilir hale getirmiştir. Bu çalışmada köpük betonun bileşenleri, üretim yöntemleri ve köpük betonun özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca inşaat sektöründe köpük betonun yeni uygulamalarına bakış açıları sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Köpük beton, Köpük beton özellikleri, Uygulamalar

Foam Concrete

Abstract

The usage of lightweight concrete, today, has increases due to its superior advantages when compared to the conventional concrete. One of the product of lightweight concrete technology is foam concrete on which there has been many studies. Foam concrete is a product which has a low weight and density, but high strength. The Usage of foam concrete reduces the dead load of the structure and also has an effect on decreasing labor cost. According to the conventional concrete, its production is easy and less cost. Foam concrete has low density and thermal conductivity coefficient, high porosity and fire resistance that makes it applicable in many areas. In this work, information about foam concrete ingredients, its production and properties is presented. Also this work presents new perspective to the new applications of foam concrete.

Keywords: Foam concrete, Foam concrete properties, Foam concrete applications

1. Giriş

Modern dünyada beton en fazla kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Bu nedenle beton teknolojisi sürekli gelişim göstermekte ve bu sayede tüm yıl boyunca en olumsuz iklim koşullarında bile neredeyse beton imalatı ve dökümü gerçekleştirilmektedir. En genel anlamda su, çimento ve agrega karışımından oluşan geleneksel beton zamanla ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmiştir. Bu da amaca yönelik beton kavramını ortaya çıkarmıştır. Yaşam standartlarının artması ve enerjiye olan ihtiyacın artması insanlığı nükleer enerjiye yönlendirmiştir. Tüm dünyada nükleer santrallerin kurulumu artmış ve günümüzde de hala artmaya devam etmektedir. Nükleer santrallerin inşasında geleneksel beton ihtiyaçları karşılayamadığından dolayı özel bir beton olan ağır betonlara gereksinim duyulmuştur. Yine değişen yaşam koşulları ve tarzları ile geleneksel konutlaşma yerlerini son zamanlarda yüksek katlı yapılara bırakmıştır. Ayrıca deprem gerçeği de göz önüne alındığında yüksek dayanımlı betonlara ihtiyaç doğmuştur. Ayrıca depreme dayanıklılığı sağlamak için donatı yoğunluğunun artması beton teknolojisinde sorun olarak ortaya çıkmış ve bu sorunun çözümü olarak da kendiliğinden yerleşen beton ortaya çıkmıştır. Yapıların onarım ve güçlendirme işlerinde, endüstriyel zemin kaplamalarında yine özel bir beton türü olan polimer betonlar sıklıkla kullanılmaktadır. Betonun çok düşük olan çekme dayanımını arttırmak için beton içerisinde çeşitli lifler katılarak lifli betonlar üretilmiş ve bu liflerin beton içerisinde sürekli dağılı halde olması ile betonun çekme dayanımını arttırılmıştır. Bu örneklerden anlaşılacağı üzere mükemmel bir betonun olmadığı uygulanacak alana göre amacına yönelik beton kavramı ortaya çıkmaktadır. Bunlara özel betonlarda denilebilmektedir. Bu beton türlerinden bir tanesi de hafif betonlardır.

Betonarme yapılarda betonun zati yükünün azaltılması için hafif agregalı beton kullanılması üzerine uzun yıllardır çalışmalar devam etmektedir [1]. Hafif betonların yapılarda kullanılmasıyla yapıların tüm ağırlığında önemli bir azalma sağlanır. Bunun olumlu etkileri şu şekilde sıralanabilir: Yükün azalmasıyla taşıyıcı elemanların kesit boyutları küçülür. Ayrıca temel ile ilgili problemler çok daha kolay çözümlenir bir hal alır. Bütün bunların sonucunda da yapının maliyet bedeli azalmış olur. Fakat hafif betonlar asıl betonarme yapıların depreme dayanıklılığı arttırması bakımından yararlı işlev görmektedir. Hafif betonların kullanılması durumunda yapının tüm ağırlığının azalmasından dolayı deprem olayı sırasında daha küçük dinamik kuvvetler oluşacaktır. Böylece yapıdaki dinamik etkilerin azalmasıyla ve bu dinamik etkilerin oluşturacağı gerilmelerin küçülmesiyle yapıların depreme dayanıklılığı artmış olacaktır [2,3]. TS EN 206-1'de [3] hafif beton, etiv kuru durumdaki birim hacim ağırlığı (yoğunluğu), 800 kg/m³'ten büyük, 2000 kg/m³'ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif beton, yapımında kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregaların kullanılmasıyla da üretilebilir.

TS 2511'e [2] göre de, karakteristik basınç dayanımı 17 MPa'dan daha büyük olan ve birim hacim ağırlığı da en fazla 1900 kg/m³ olan hafif agregalı betonlar, taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır. Hafif betonların özellikleri, hafif beton üretiminde kullanılan agregaların karakteristik özellikleriyle doğrudan ilgilidir. TS 1114 EN 13055-1'e [4] göre hafif agrega, su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton üretiminde kullanılan, gevşek birim ağırlığının en büyük değeri 1200 kg/m³'ü veya tane yoğunluğu 2000 kg/m³'ü aşmayan, kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregalardır. Yine aynı standartta hafif agregalar tabii ve suni olarak iki sınıfa ayrılmış ve tanımları şu şekilde yapılmıştır:

Doğal agregalar, mekanik işlem dışında herhangi bir işlemle geçirilmemiş olan ve mineral kaynaklardan elde edilen agregadır. Oluşumları sırasında gözenekli bir yapı kazanmış bulunan, volkanik tüf, pomza (bims), sünger taşı, lav cürufu, diyatomit vb. kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Doğal hafif agregalar volkanik kökenli veya volkanik kökenli olmayan hafif agregalar olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Yapay agregalar, ısıtılmış veya diğer değişik endüstriyel işlemler sonucunda elde edilen mineral kökenli agregadır. Yapay agregalar, genleşme özelliği olan malzemelerin ısıtılmış işlemle geçirilmesi sonucu üretilen agregalardır. Vermikülit, perlit, arduvaz, şeyl, kil gibi agregalar yapay agregalara örnek olarak verilebilir.

2. Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların çok sayıda türleri bulunduğundan, değişik sınıflamaları yapılabilir. Üretim yöntemlerine ve kullanım alanlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmışlardır:

Tablo 1. Basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik dayanımı	
	Silindir, MPa	Küp, MPa
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.3. Ağırlıklarına Göre

TS EN 206-1'de [3] hafif betonlar birim hacim ağırlığına göre Tablo 2'de verildiği gibi D 1.0 ile D 2.0 arasında sınıflandırılmışlardır. Buna göre bir betonun birim hacim ağırlığı açısından hafif beton sınıfında olabilmesi için birim hacim ağırlık değerinin 800 kg/m³'ten az ve 2000 kg/m³'ten fazla olmaması gerekmektedir.

2.1. Üretim Şekillerine Göre

Hafif betonlar üretim yöntemine göre hafif agregalar ile üretilen hafif betonlar, ince malzemesi olmayan betonlar, kimyasal katkı kullanımıyla üretilen hafif betonlar, köpük beton ve gaz beton olarak sınıflandırılmaktadır [5].

2.2. Dayanımlarına Göre

Hafif betonların basınç dayanımları açısından birçok sınıflandırılma yapılmıştır. Bunun nedeni de, hafif agregalı beton üretiminde dayanımları birbirinden farklı olan hafif agregaların kullanılmasıdır. Rilem [6] hafif betonları ağırlıkları ve dayanımlarına göre yapısal, yapısal-yalıtım ve yalıtım betonu olarak sınıflandırmıştır. TS EN 206-1'de [3] de hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Tablo 1'de görüldüğü gibi 8 MPa'dan 80 MPa'a kadar sınıflandırılmışlardır.

Diğer yandan, birim hacim ağırlığı 800 ile 1400 kg/m³ arasında olan ve basınç dayanımları 10 MPa'dan düşük olan hafif betonlar, yalıtım betonu; birim hacim ağırlığı 1400 ile 1600 kg/m³ arasında olan ve basınç dayanımları da 16 MPa'a kadar olan betonlar yarı taşıyıcı hafif beton; birim hacim ağırlığı 1600 ile 1900 kg/m³ arasında olan ve basınç dayanımları da 17 MPa'dan daha fazla olan hafif betonlar taşıyıcı veya yapısal hafif beton olarak da sınıflandırılmaktadır [7].

Tablo 2. Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması

Yoğunluk sınıfı	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Birim hacim	≥800	>1000	>1200	>1400	>1600	>1800
Ağırlığı (kg/m ³)	≤1000	≤1200	≤1400	≤1600	≤1800	≤2000

3. Köpük Beton

Yaklaşık iki bin yıl önce Romalılar, sıcak kireç ve su ile karıştırılmış küçük çakıl ve kaba kumdan oluşan bir beton karışımı üretiyorlardı. Karışıma hayvan kanı ilave ederek karışımın daha uygulanabilir ve dayanıklı olmasını sağlayan küçük hava kabarcıkları meydana geldiğini fark ettiler [8]. İsveç ve Danimarka'da 1900'lü yılların başlarında, hava ile karışan çimento esaslı malzemelerin imalatı, ticari olarak başlamıştır. 1923 yılına kadar Axel Eriksson tarafından patentli hale getirilen ilk Portland çimento bazlı köpük betona kadar bu alanda ve bu tarzdaki malzemelerle ilgili önemli bir gelişme olmamış ve ilerleme sağlanmamıştır [9,10].

Çimento esaslı hücreli bileşikler artık malzemenin içinde havanın üç farklı şekilde oluşturulmasıyla üretiliyor. Bunlar: büyük miktarlarda hava tutan güçlü maddelerin eklenmesiyle, karıştırma işlemi esnasında gaz kabarcıklarını açığa çıkartan kimyasal katkı maddeleri vasıtasıyla veya köpük ajanlarının eklenmesiyle sağlanıyor [9,11]. Şekil 1'de sertleşmiş köpük beton gösterilmektedir.



Şekil 1. Köpük Beton

3.1. Tanımlama ve Sınıflandırma

ACI 523.2R-96'ye [12] göre, yaygın olarak hücreli veya gaz beton olarak adlandırılan malzeme :

“Portland çimentosunun kumlu cüruf veya uçucu kül gibi silisli ince malzemelerle kirecin, homojen bir boşluk ve hücreli yapıya sahip bir beton oluşturmak için suyla karıştırılmasıyla elde edilen hafif bir üründür. Hücreli yapı esas olarak bir gaz salınan kimyasal tepkime ya da mekanik diğer gazların bir araya getirilmesinden kaynaklanan makroskopik boşlukların dâhil edilmesiyle sağlanır.”

İngiliz Çimento Birliği, köpük beton "standart veya tescilli bir karıştırma tesisi kullanılarak çimento macunu veya harç bazlı karışım içerisine önceden oluşturulmuş bir köpük katarak üretilen hafif bir malzeme" olarak tanımlamıştır [13].

Genel olarak, köpük betonun karışım bileşimi, çimento esaslı malzemelerden, kum, su ve içinde hapsolan havadan oluşur. Bu nedenle kaba agrega içermez. Cox, [14,15] ürünün köpüren sıradan beton olmadığını belirtmiştir. Gözenekler suyla seyreltilmiş bir köpük ajanı ile karıştırılmasıyla elde edilir ve böylece bir köpük oluşturulur. Bu köpük daha sonra çimento esaslı harç ile dikkatlice karıştırılır [15]. Kearsley hacmin en az %20'sinin plastik harca giren köpükten oluştuğunu belirtmiştir [16,17].

3.2. Köpük Betonun Bileşenleri

Daha önce belirtildiği gibi köpük beton, Portland çimentosu, su, köpürtme ajanı ve diğer ince malzemelerden oluşmaktadır. Ayrıca, çimento yerine geçen malzemeler, mineral ve kimyasal katkı maddeleri köpük betonda başarıyla kullanılmıştır.

3.2.1. Çimento

Portland çimentosu, köpük betonun ana unsurudur. Çimento dozajı 1400 kg/m³ gibi yüksek bir seviyeden 75 kg/m³'e kadar düşük dozlarda uygulanabilir ancak uygulamada amaca göre genellikle 300 ile 500 kg/m³ arasında kullanılmaktadır [13,10,18,19].

3.2.2. Mineral Katkılar

Uygulamaya bağlı olarak, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, katı atıklar ve silis dumanı gibi çimento yerine kullanılan malzemeler köpüklü betonlara eklenmiştir [8,10,18,20,21]. Buna ek olarak, Proshin vd. [22] ince öğütülmüş karbonat veya kuvarz kumları şeklinde mineral katkılar kullanmıştır. Benzer şekilde Lee ve Hung [21], köpüklü betonda pirinç kabuğu külü (puzolanik katkı olarak), geliştirilmiş polistiren (hafif agrega olarak) ve kâğıt çamuru (takviye olarak görev yapan kâğıt elyaf parçalarını içeren) gibi katı atıkların kullanımını araştırmıştır.

Çimento uçucu kül ile yer değiştirilerek (% 80'e kadar) köpük betonun özellikleri üzerine etkisini incelemiştir [18,20,23]. Ayrıca Kearsley ve Wainwright [23], sınıflandırılmamış kül olarak adlandırılan külü köpük beton üretiminde kullanmıştır. Bu külün yaklaşık % 40'ı 45 µm üstüdür. Araştırmaları, köpük betonda büyük miktarda bu külün kullanılabilceğini göstermektedir. Yüksek kül içeriği erken dayanımda bir azalma ile sonuçlansa da, % 75'e kadar çimento uçucu kül ile değiştirilerek uzun vadedeki dayanım arttırdığı gözlemlenmiştir.

Portland çimentosuna, çimento kütlesi ile % 30 ile % 50 arasındaki seviyelerde, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu da eklenmiştir. Silis dumanı köpük betona % 10'a kadar çimento kütlesi ile dahil edilmiştir ve hava boşluk sisteminin kararlılığını etkilemeksizin düşük bir köpük yüzdesiyle (%30'a kadar) karışımların basınç dayanımının geliştirilmesinde etkili olduğu bulunmuştur. Ancak yüksek hacimdeki köpük (> %30) içeren bu karışımlarda silis dumanı etkisi belirgin değildir [10,24].

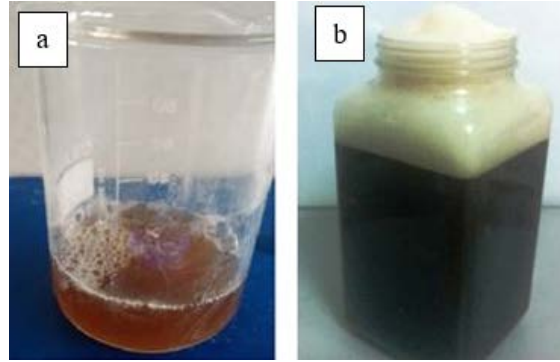
3.2.3. Agregalar

Genel olarak iri agrega köpük beton üretiminde kullanılmaz. Maksimum tane boyutu 5 mm'ye kadar olan ince agregaların kullanılması önerilir. İnce agrega uçucu kül, kireç, tebeşir, öğütülmüş beton, granit tozu, geri dönüştürülmüş cam, genleşmiş ve polyster granülleri içeren kısmen veya tamamen geri dönüştürülmüş veya ikincil malzemelerle yer değiştirilebilir

[10,21,24,25]. Tabii ki agrega fazı daha fazla hava kabarcığı ile değiştirilebilir. İnce agreganın tamamen köpük betondan çıkartılması pek yaygın bir yöntem değildir.

3.2.4. Köpük Ajanları

Köpük beton üretiminin iki ana yöntemi vardır. Birincisi önceden hazırlanmış köpük hazırlanan harçla karıştırılır. İkinci yöntemde ise karışım beton karışımı esnasında köpük oluşturma yöntemidir [8,26]. Kullanılan köpükler ya sentetik ya da protein esaslı olabilir. Protein bazlı köpüklerin (Şekil 2) temelinde rafine edilmiş hayvansal ürünler vardır. Sentetik köpükler (Şekil 2) ise amin ve amin oksitlerden, naftalin sülfonat formaldehit vb. oluşur. Bu ürünlerin bazıları çevre için tehlikeli olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla madde içerebilir. Bu nedenle bu ürünlerin kullanımında özellikle de formaldehit kondensatlarına dayanan ürünler kullanıldığında dikkatli olunmalıdır [27]. Protein esaslı köpük ajanları daha güçlü, dayanımlı ve daha kapalı hücreli bir kabarcık yapısına neden olurken sentetik olanları daha fazla genişleme ve dolayısıyla daha düşük yoğunluk üretmeye sebep olur [12,28]. Köpük beton üretmek için temel malzemelerle harmanlanmış olan önceden şekillendirilmiş köpük, ıslak köpük ve kuru köpük olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir.



Şekil 2. Köpük ajanları, (a) protein bazlı köpük ajanı, (b) sentetik köpük ajanı

Islak köpük, 2-5 mm arasında çapa sahip bir kabarcık ağıyla sonuçlanan, ince hasır üzerine köpük ajanının (genellikle sentetik) su ile püskürtülmesiyle üretilir. Islak köpük geniş bir kabarcık yapıya sahiptir ve nispeten kararlı olmasına rağmen düşük yoğunluklu (1100 kg/m³'ün altında) köpük beton üretimi için tavsiye edilmez.

Kuru köpük, tıraş köpüğüyle görünüş açısından benzerdir ve ıslak köpükten (1 mm'den daha küçük) daha küçük bir kabarcık boyutu dağılımına sahiptir ve son derece kararlıdır. Sentetik köpüklerin kullanımı daha kolaydır ve daha uzun süre depolanabilirler, fakat aşırı sıcaklıklara daha az duyarlıdır. Buna ek olarak daha ucuzdur ve üretmek için daha az enerjiye ihtiyaç duyulur. Hayvansal protein kullanılan köpük ajanlar suyu içine alıp protein yapısında tutabilme kabiliyetine sahip olmasından dolayı hayvan proteinlerine dayanan köpüklerle daha güçlü betonlar üretebilirler. Hidratasyon işlemi sırasında bu su köpükten ayrılır ve çimento partikülleri tarafından kolaylıkla kullanılır. Bu durum hava kabarcığı etrafında hidratasyon ürünleri ağı oluşturarak güçlü bir mikroyapı oluşmasını sağlar.

3.2.5. Karışım Tasarımı

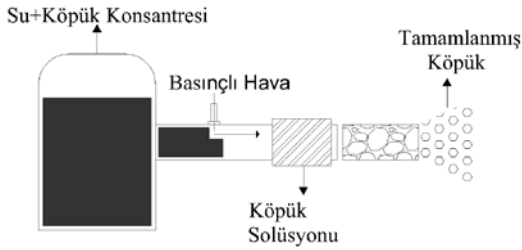
Köpük beton tasarımı için standart bir yöntem bulunmamaktadır. Tasarım felsefesi, normal betona göre köpük beton teknolojisinde karıştırma oranları sadece belirtilen basınç dayanımı için değil belirli bir yoğunluk için de seçildiğinden farklıdır. Normal betonda olduğu gibi hava içeriği ne kadar yüksek olursa mukavemet o kadar düşük olur. Yine normal betonda olduğu gibi köpük betonunda mukavemeti çimento ve su karışımına bağlıdır. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı maddelerinin kullanılması hem taze hem de sertleştirilmiş beton özelliklerinde belirgin bir değişikliğe neden olacaktır [8,10,18,21,29,30]. Normal betonda su-çimento en önemli karışım parametrelerinden biri iken köpük beton teknolojisinde su/çimento

oranına ek olarak agrega/çimento oranı, kum/çimento oranı da tasarım kriterleri olarak kullanılabilirlerdir.

3.2.6. Köpük Betonun Üretimi

Günümüzde köpüklü beton, köpük ajanlarının beton karışımına eklenmesiyle üretilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, köpük ajanları kullanarak köpüklü beton üretiminin iki temel yöntemi, önceden oluşturulmuş köpük ve karıştırma köpüğü yöntemleridir.

Önceden oluşturulmuş köpük yönteminde köpük ajanı bir köpük jeneratöründeki karışım suyunun bir kısmı ile karıştırılır ve köpüğü oluşturmak üzere havalandırılır ve daha sonra karışıma ilave edilmeden önce köpürme püskürtücüsü vasıtasıyla yüksek bir basınca maruz bırakılır (Şekil 3). Önceden oluşturulmuş köpük yöntemi sulu bir yüzey etkinleştirici ve sıkışmış havadan meydana gelir [10]. Karşım köpüğü yönteminde ise köpük ajanı çimento, su ve ince agrega ile birlikte ana malzemeye eklenen bir malzemedir.



Şekil 3. Önceden oluşturulmuş köpük beton yönteminde köpük üretimi [31]

Köpük üretilirken çok büyük kabarcıkların oluşması istenilen bir durum değildir. Çünkü büyük kabarcıklar daha az kararlıdır ve bu nedenle beton karıştırılırken, taşınırken, yerleştirilirken ve gerekirse vibrasyon tapıldığında çökme olasılığı artar. Bu işlemler sırasında çok fazla hava kaybedilirse kalan hava boşlukları, oluşan köpüklü betonun beklenenden daha düşük bir performans göstermesine neden olabilir [27].

3.3. Köpük Betonun Özellikleri

Herhangi bir çimento esaslı ürün gibi, köpük betonun karakteristiği, karışım bileşimine kesinlikle bağlıdır. Bazı genel özellikler şunlardır: yüksek dayanım/ağırlık oranı, düşük ısıl geçirgenlik katsayısı, düşük geçirimsizlik katsayısı, düşük su emme, yüksek donma çözünme direnci, rijit ve iyi bağlanmış mikroyapı, düşük rötre, ısı yalıtımı ve darbe emme kapasitesi. Normal beton davranışları köpük betonunkinden oldukça farklıdır. Bu nedenle amaca göre üretilen köpük betonların özellik ve davranışları iyi gözlemlenmelidir.

3.3.1. Taze Köpük Betonun Özellikleri

3.3.1.1. İşlenebilirlik ve Su İhtiyacı

Taze köpük beton serbestçe akan, kendiliğinden yerleşen ve kendiliğinden yayılan bir beton olduğu için çökme değeri yoktur. Ancak bir tiksotropik davranış sergilediği bilinmektedir [13]. Pompalanması kolaydır ve en sınırlı ve düzensiz boşluklara akar [10,13].

Karıştırma süresinin etkisi çok önemlidir. Genellikle karıştırma süresi ne kadar yüksek olursa, hava akışı da o kadar fazla olur. Bununla birlikte, maksimum hava içeriğine (kritik sınır) ulaşıldığında, daha fazla karıştırma yapılması, tutulan havanın kaybedilmesine neden olabilir. Bu davranış, köpüğün veya havayı tutan maddenin miktarına, türüne ve verimine bağlıdır [9].

Karışım içeriğine, kıvam gereksinimlerine, kimyasal katkıların kullanımına ve köpük kararlılığına bağlı olarak su/çimento oranı (w/c) tipik olarak 0.4 ila 0.8 arasındadır [10,32]. Su-çimento oranı, köpüğün verilmesinden önce 0.35'in altında olmalıdır. Karışımında çok az su kullanılması çimentonun su ihtiyacını köpükten karşılayıp köpüğün kısmen veya tamamen çökmesine neden olabilir [33].

Kearsley ve Mostert [30], uçucu küle az miktarda kum (% 25'den az) eklendiğinde, su içeriğini ayarlamak için ek bir suya ihtiyaç duyulmadığını ve köpük betonda kullanıma uygun olduğunu gözlemledi. Öte yandan, % 25'i (hacimce) aşan kum içeren karışımlarda su ihtiyacının önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

Kumun uçucu kül ile değiştirilmesinin kayma akımının verim değerlerini önemli ölçüde azalttığı ve plastik yoğunluktaki herhangi bir artışın, plastik viskozitenin düşmesine neden olduğu görülmektedir [10]. Köpük betonun akış davranışı temel olarak köpük hacmine bağlıdır ve köpük hacminin artmasının akışta düşüşe neden olduğu bildirilmektedir [25,34].

3.3.1.2. Yoğunluk

Köpük betonun birçok özelliği ve uygulamaları yoğunluğuna bağlıdır. Köpük betonun kuru yoğunluğu 48 kg/m³ kadar düşük ve 1800 kg/m³ kadar yüksek olabilir [10,23,27]. Kearsley ve Mostert [30], taze yoğunluk ve köpüklü betonun kuru yoğunluğu arasında farklı kül içeriği de dâhil olmak üzere farklı karışım tasarımları için doğrusal bir ilişki bulmuştur.

3.3.1.3. Hidratasyon Isısı

Hücrel mikroyapıya sahip çoğu katı madde gibi köpük betonu da çok iyi bir termal yalıtıktır. Jones ve McCarthy [10] yoğunluğu 1400 kg/m³'den 1000 kg/m³'e değiştirerek çukurlarda çekirdek yüzey sıcaklığının 10 °C'den 20 °C'ye yükseldiğini gözlemlemişler ve çukurların tabanında ise 1400 kg/m³'de en yüksek sıcaklığın 45 °C, 1000 kg/m³'te en yüksek sıcaklığın 50 °C olduğunu ifade etmişlerdir. Uçucu külün kullanımı, köpüklü betonda sıcaklığı ve sıcaklık artış oranını azaltmada çok etkilidir.

3.3.1.4. Kür

Beton sertleştiğinde içindeki kabarcıklar şekil değiştirir veya parçalanır ve bu gerçekleşirken suyu serbest bırakarak çimentonun bu suyu emmesine sebep olur. Bu sadece hidratasyon işlemine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda önceden su ile doldurulmuş gözenek ağında hava boşlukları oluşturur. Bu nedenle, suyla kürlenmiş numunelerin kıyaslanmasında kürlenme esnasında beton nemini korumaya daha az ihtiyaç vardır. Kuru kürlenme ile karşılaştırıldığında su ile kürlenmiş numunelerde daha yüksek mukavemet elde edilmiştir [10]. Ayrıca uçucu kül içeren karışımlarda iyi kürlenmiş numunelerde uzun vadeli mukavemet kazanımı daha yüksek olarak gözlemlenmiştir [23].

3.3.2. Sertleşmiş Köpük Beton ve Durabilite Özellikleri

3.3.2.1. Basınç Dayanımı

Köpük betonun basınç dayanımı ağırlıklı olarak yoğunluğundan etkilenir ve köpük betonun yoğunluğunda meydana gelen azalma ile katlanarak azalır. Basınç mukavemeti 0.34 MPa kadar düşük veya 20 MPa kadar yüksek olabilir. Uçucu külün yüksek yoğunluklu köpük betonda (1500 kg/m³) uygulanmasıyla 50 MPa'dan fazla nihai mukavemetler elde edilmiştir [23].

Kearsley ve Wainwright [29] normal betonda olduğu gibi, köpük betonun porozite ve basınç dayanımı arasında bir korelasyon olduğu ve beton porozitesinde bir azalmanın mukavemetinde bir artışa neden olduğu sonucuna varmıştır. Belli bir köpük beton yoğunluğunu elde etmek için gereken boşlukların hacmini azaltarak daha yüksek basınç dayanımı elde edilebilir.

Köpük betonun basınç dayanımı aslında yoğunluğunun bir fonksiyonudur, dolgu, uçucu kül ve çimento içeriğinin basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi yoktur gibi görünmektedir [23,30]. Ancak Papayianni ve Milud [18] yüksek kalsiyumlu uçucu külün köpüklü betonun basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Çimento %70'e varan oranlarda yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile değiştirilerek basınç dayanımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlar, uçucu kül içeriğindeki bir artış ile uçucu kül içermeyen referans köpük betona kıyasla basınç dayanımının arttığını göstermektedir. Bu artış 90 günlük olgunluğa kadar devam etmiştir. Kireç ve geri dönüştürülmüş cam gibi diğer bazı ince agregaların kullanılması basınç dayanımı üzerinde çok az veya hiç etkisinin olmadığı görülmektedir [10]. Normal betonda dayanımı arttırmak

için su azaltıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Ancak köpük betonda su azaltıcı kimyasal katkı maddeleri köpüğün stabilitesini yani kararlılığını bozduğu için genellikle kullanılmamaktadır. Köpük betonda su/çimento oranındaki küçük değişiklikler basınç dayanımını normal betonda olduğu gibi ciddi şekilde etkilemez.

Köpük beton, plastik yoğunluğu ile karakterizedir [25]. Başka bir deyişle, boşlukların hacmi, su/çimento oranının yanı sıra mukavemetin önemli bir belirleyici parametredir. Su/çimento oranına ters orantılı olan basınç dayanımı köpük betonda bir miktar farklılık gösterir. Köpük betonun basınç dayanımı su/çimento oranına bağlıdır. Daha çok köpük içeriğine bağlıdır.

Düşük yoğunluklu köpüklü betonun basınç dayanımı, çimento içeriğini artırarak yüksek yoğunluklu köpük betonunkine eşit seviyeye çıkarılabilir [35]. Öte yandan daha yüksek kum-çimento oranı, daha düşük bir basınç mukavemetine neden olur [33,35].

Daha önce belirtildiği gibi, köpük betonun basınç dayanımı, kullanılan köpük ajanlarının türüne bağlıdır ve protein bazlı köpük ajanını sentetik bazlı köpük ajanına göre basınç mukavemetini daha fazla artırmıştır [10].

3.3.2.2. Elastisite Modülü

İri agrega içermeyen bir sistem için beklendiği gibi, köpük betonun statik elastisite modülü normal betonunkinden daha düşüktür. 500 kg/m³'ten 1500 kg/m³'e kadar olan kuru yoğunluklarda köpük betonun elastisite modülü 1000 MPa ile 8000 MPa arasındadır. Jones ve McCarthy [36] çeşitli ince agregalara sahip köpük betonun elastisite modülünü belirlemek için aşağıdaki gibi denklemleri kullandılar:

$$\text{Kum agregalar için: } E = 0.42 f_{c1.18} \quad (1)$$

$$\text{Uçucu kül agregaları için: } E = 0.99 f_{c0.67} \quad (2)$$

E: Statik Elastisite Modülü (kN/mm²)

f_c: 100 mm Küp numunenin mukavemeti

Hava kabarcıklarının köpük betona ilavesi basınç mukavemeti üzerinde elastisite modülüne olduğundan daha yüksek bir etkiye sahiptir.

3.3.2.3. Termal Özellikler

Köpük beton düşük ısı iletkenliğine sahiptir ve bu özelliği köpük betonu iyi bir yalıtım malzemesi yapar. Bunun temel sebebi hücre boşluklu yapıya sahip olmasıdır. Isı direnci (yalıtkanlık ölçüsü olarak) R = 2 ile R = 4 arasındadır. Normal betonlar ise R = 1'den daha düşük değerlerde ısı direncine sahiptir. Köpüklü betonun ısı iletkenliği değerleri, normal beton için ölçülenlerin %5 ila %30'u arasındadır.

Kuru yoğunluğu 600 kg/m³ ile 1600 kg/m³ arasında olan köpük betonlarda ısı iletkenlik değeri 0.1 W/mK ile 0.7 W/mK arasındadır. 1000 kg/m³ ile 1200 kg/m³ kuru yoğunluğa sahip köpük betonlarda yoğunluğun azalmasıyla ısı iletkenlik değeri 0.42 W/mK ile 0.23 W/mK aralığına kadar azalır [10,37].

Yüksek hacim / yüzey oranı olan elemanlarda köpüklü beton kullanılırsa, bu malzemenin düşük termal iletkenliği hidrasyon ısısına bağlı olarak çekirdek sıcaklığında bir artışa neden olabilir ve çatlamaya neden olabilir.

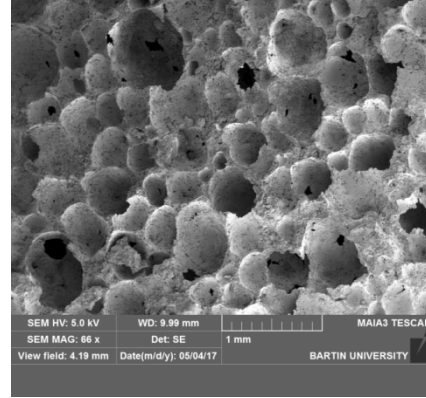
3.3.2.4. Porozite

Köpük betonun gözenek yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir. Jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve hapsedilmiş hava boşluklarından oluşur. Hoff [38], Kearsley ve Wainwright [39] ve Wee vd. [33] köpük beton için porozitenin basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösteren dayanım-porozite ilişkileri geliştirdi. Geliştirdikleri model, beton porozitesinde bir azalmanın, mukavemette bir artışa neden olduğunu göstermektedir.

Nambiar ve Ramamurthy [26], köpük betonun hava boşluğu ağını ölçmüş ve boşlukların hacmi, boyutu ve aralığının çimento esaslı köpük betonun yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini

etkilediğini belirtmişlerdir. Fakat hava boşluklarının şeklinin mukavemet üzerinde bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir [26,33].

Kearsley ve Wainwright [39] porozite ile dayanım arasındaki ilişkiyi veren denklemi aşağıdaki gibi belirtmişlerdir. Denklemde f_c basınç dayanımını ve p poroziteyi simgelemektedir.



Şekil 5. Köpük betonun gözenek yapısı ve gözeneklerin dağılımı

$$f_c = 981e^{-7.43p} \quad (3)$$

Benzer bir denklemi Wee vd. [33] önermiştir. Önerdikleri denklem aşağıda belirtilmiştir.

$$\sigma = 1.262 \sigma_p(1-A)^{2.962} \quad (4)$$

Burada σ köpük betonun basınç dayanımını, σ_p köpük beton üretiminde kullanılan harçın basınç dayanımını, A ise hava içeriğini temsil etmektedir.

3.3.2.5. Yangın Direnci

Betonda yüksek sıcaklık nedeniyle mukavemet kaybı öncelikle çimento tipinden ve agrega türünden etkilenir. Köpük betonun yangına dayanıklılığı çok iyidir ve düşük sıcaklıklarda normal ağırlıklı betonun yangın direncinden daha iyi performans gösterir.

Kearsley ve Mostert [17] yüksek alüminyum oksitli çimento ve kaba taneli uçucu kül kullanılan köpük betonun yangın direncini araştırdılar. Uçucu kül, agrega, çimento tipinin yangın direncini etkileyebileceğini gözlemlədiler. Hidrolik çimento içeren köpük beton 800 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Al₂O₃/CaO oranı 2'den yüksek olan çimento ve andaluzit agregalarını içeren karışımlar herhangi bir hasar belirtisi göstermeksizin 1450 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Ayrıca 500 kg/m³ yoğunluğa sahip alkalin Portland çimentosu kullanılan köpük betonların ateşten önceki basınç mukavemeti 5 kat daha fazla olabilmektedir [40]. Ancak daha yüksek sıcaklıklarda çimento esaslı köpükler aşırı büzülmeye uğrar ve araştırmalar bu alanda devam etmektedir [10].

3.3.2.6. Rötre

Köpük beton genel olarak fazla çimento pastasına sahip olduğu için ve iri agrega içermediğinden rötresi normal betona göre daha yüksektir. Araştırmalarda köpük betonda plastik rötre rapor edilmemiştir, fakat çimento tabanlı köpük betonların kuruma rötresi %0.1 ile %0.35 arasında olabilmektedir [10,13]. Daha düşük birim hacim ağırlıklı köpük betonların büzülme oranı daha fazla olabilmektedir.

Papayianni ve Milud [18] çimentonun %70 oranında yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile değiştirilmiş köpük betonun kuruma rötresini incelemişlerdir. Bu tip uçucu külün %60 oranında çimento ile değiştirilmesiyle elde edilen köpük betonun kuruma rötresi 1800 µm'den 1200 µm'e düşmüştür. Ayrıca mukavemetin artmasıyla rötrein azaldığını tespit etmişlerdir.

ACI 523.2R-96 [12] köpük betonların ortalama kuruma rötrelerini %0.2 olarak sınırlandırmaktadır. Kum/çimento oranı 2, su/bağlayıcı oranı 0.65 – 0.70 aralığında ve kuru birim hacim ağırlığı 1500-1600 kg/m³ olan köpük betonun kuruma büzülmesi %0.09'dan daha az olduğu rapor edilmiştir [21].

3.3.2.7. Su Emme

Köpük betonun su emme kapasitesi birim hacim ağırlığına bağlıdır. Kütleli olarak belirtildiğinde birim hacim ağırlığın azalmasıyla su emme kapasitesi artar. 1800 kg/m³ birim hacim ağırlıkta % 15'e kadar düşük ve 700 kg/m³ yoğunlukta % 35 gibi yüksek bir değer olabilir. Kum yerine uçucu kül içeren köpük betonların su emme kapasiteleri daha yüksek değerler almaktadır [33,34]. Su emme esasen çimento hamuru tarafından etkilendiğinden dolayı kısmen daha düşük çimento hamuru hacmi içeren karışımlar daha küçük kılcal boşluk hacmine sahip olmaktadır. Köpük beton üzerinde yapılan su emme testlerinde uçucu kül içeren karışımlar ince kum içerenlere göre daha yüksek değerler vermiştir [10,36].

3.3.2.8. Geçirgenlik

Köpük betonun su emme kapasitesi birim hacim ağırlığına bağlıdır. Kütleli olarak belirtildiğinde birim hacim ağırlığın azalmasıyla su emme kapasitesi artar. 1800 kg/m³ birim hacim ağırlıkta % 15'e kadar düşük ve 700 kg/m³ yoğunlukta % 35 gibi yüksek bir değer olabilir. Kum yerine uçucu kül içeren köpük betonların su emme kapasiteleri daha yüksek değerler almaktadır [33,34]. Su emme esasen çimento hamuru tarafından etkilendiğinden dolayı kısmen daha düşük çimento hamuru hacmi içeren karışımlar daha küçük kılcal boşluk hacmine sahip olmaktadır. Köpük beton üzerinde yapılan su emme testlerinde uçucu kül içeren karışımlar ince kum içerenlere göre daha yüksek değerler vermiştir [10,36].

3.3.2.9. Donma-Çözümne Dayanımı

Köpük betondaki hava boşluğu ağı donma esasında hidrolik ve ozmotik basınç için ek alan oluşturduğundan çok iyi bir donma-çözümne direncine sahiptir [10]. Jones ve Giannakou [42], farklı köpük beton karışımlarının kum veya kaba uçucu kül ile ince agrega olarak ve ayrıca çimentonun bir kısmını ince uçucu kül ile değiştirdikten sonra donma-çözümne direncini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda çimentoya ilave olarak ince uçucu külün kullanımının donma-çözümne direnci üzerinde bir etkisi olmadığını ifade etmişlerdir. 1000 kg/m³ kuru birim hacim ağırlığına sahip köpük betonun 1400 kg/m³'e göre test esnasında daha fazla hacim genişlemesi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca test sonunda daha fazla basınç dayanımına sahip olduğunu da gözlemlemişlerdir. Bunun sebebinin daha fazla gözenek hacmine sahip olmasıdır. Köpük betonun donma çözümne direncinin değerlendirilmesi için bir yöntem, Tikalsky tarafından ASTM C666 test yöntemine dayanarak tanımlanmıştır [28]. Çalışmalarının sonuçları, soğurma derinliğinin, donma-çözümne dirençli köpük beton geliştirmek için anahtar olduğunu göstermektedir. Basınç mukavemeti, başlangıç penetrasyon derinliği, absorpsiyon ve absorpsiyon hızının, tekrarlanan donma ve çözümne döngülerine dirençli olan köpük beton üretiminde önemli değişkenler olduğunu da gözlemlemişlerdir. Öte yandan, donma-çözümne direncinin belirlenmesinde yoğunluk ve geçirgenliğin belirgin parametreler olmadığı görülmektedir.

4. Köpük Beton Üzerine Yapılan Bazı Çalışmalar

Zhihua vd. [43] akışkanlaştırıcı katkı ve ultra ince yüksek fırın çürüfu kullanılarak köpük betonların dayanımlarının iyileştirilebileceğini ve çatlak kontrolünün ise polipropilen lifler kullanılarak yapılabileceğini belirtmişlerdir. Kozłowski vd. [44] köpük betonların kırılma enerjileri ve eğilmede çekme dayanımlarının araştırılması amacıyla çentikli ve çentiksiz kırıntı numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Araştırma sonucuna bağlı olarak köpük betonların kırılma enerjileri ile eğilmede çekme dayanımlarının birim ağırlığın artması ile arttığını ifade etmişlerdir. Sayadi vd. [45] yaptıkları çalışmada köpük hacmi ve çimento miktarının köpük betonların mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir. Amran vd. [46] kararlı bir

köpük beton üretiminin köpük ajanının cinsine, üniform hava boşluğu oluşturmak için hazırlanacak olan köpük solüsyonu yöntemine, karışım oranlarının doğru tasarımına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Niu vd. [47] portland çimento tabanlı köpük betonun hava boşluğu yapısı, sertleşme özellikleri ve taze köpük betonun stabilitesini incelemiş ve sonuçta gözenekleri %88.5-%95.4, basınç dayanımı 0.12 MPa-0.75 MPa olan ve ısı iletkenliği 0.036 W/mK'den 0.063 W/mK 'e kadar olan betonların önceden oluşturulmuş köpük ilavesiyle elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Chen ve Ma [48] magnezyum fosfat çimento bazlı ve köpük ajanı olarak sodyum bikarbonat kullanılarak hazırlanan köpük erken dayanım özellikli köpük beton üretmişlerdir. Alengaram vd.[49] petrol palmiyesi küllü köpüklü jeopolimer betonunun morfolojisi, kür süresince daha yoğun ve homojen bir jeopolimer ana yapısının olduğunu doğrulamış ve bunun da daha yüksek basınç direnci meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Vesova [50] düşük modüllü sentetik elyaf takviyeli köpük beton üretmenin, dağıntı donatının teknolojik rolü göz önüne alındığında mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Panesar [51] köpük betonun mekanik özellikleri, betonun iletim özelliklerini ve ısı direncini geliştirdiğinden dolayı hafif yapısal uygulamalarda kullanılmak için iyi bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur, ancak bunun kullanılan köpükleştirici maddenin türüne çok hassas bir şekilde bağlı olduğunu ifade etmiştir

5. Köpük Beton Uygulamaları

Köpük beton çok düşük yoğunluğu, düşük termal iletkenliği, üstün akışkanlık, kendi kendine yerleşme, normal betona nispeten kolay ve ucuz üretim gibi özelliklerinden dolayı kendine birçok uygulama alanı bulmuştur. Köpük beton uygulamaları bir yandan izolasyon ve boşlukları doldurmak için (küçük yoğunluklu köpük betonlarla) bir yandan da yapısal alanlarda (yüksek yoğunluklu köpük betonlarla) kullanılabilir [31]. Kendiliğinden akabildiği için, boşluklar için ideal bir materyaldir (şiddetli yağmura bağlı yollar altında oluşan boşluklarda, eski kanalizasyonlar, bodrumlar, kanallar, depolama tankları vb.). Köpük betonun diğer uygulamaları arasında hendek ve yol alt tabanı yenileme, termal yalıtım, ses yalıtımı, hafif ağırlıklı blok üretimi ve ön dökümlü panel üretimi, yangın izolasyonu, zemin stabilizasyonu, hava alanları ve düzenli trafikte kullanılmak için üretilen şok emici bariyerler yer almaktadır.

Köpük betonun kullanımı Kuzey Amerika, Kanada ve Meksika'da yaygınlaşmıştır. Bu beton türü dünyanın diğer bölgelerinde de ve özellikle kötü hava koşullarına sahip, kasırgaların ve depremlerin çok olduğu bölgelerde popülerleşmektedir. Son 5 yılda köpük betonun kullanımında inanılmaz ölçüde bir ilgi ve gelişme kaydedilmiştir. Artan bir ilginin nedeni diğer hafif yapı malzemelerinin ve özellikle ahşabın maliyetinin önemli ölçüde artmış olması ve ormancılık ve alçı ürünlerine bağlı çevresel sorunlardır. Ayrıca köpük beton üretiminin lehine olan bir durumda çimento üretiminin kolaylığı ve çevresel avantajlarıdır. Çimento bazlı köpük betonda çok geniş ölçekte mineral katkı maddelerinin kullanılabilmesi bu avantajın temel sebebidir [31].

Köpük beton, yolda donmanın neden olduğu hacim genişlemesini önlemek için kullanılır. Sığ kazıkların donmasını önlemek, sıg temelde donmaya karşı, kazık başlıklar altındaki donmayı önlemek için de kullanılır. Dolgu olarak, döküme altında döküme boşluklarını doldurmada kullanılır. İngiltere'de köpük betonun yıllık pazar büyüklüğünün 250000-300000 m³ civarında olduğu tahmin edilmektedir [9,10]. Kanada'da ise bu ürünün pazarı her geçen yıl artmaktadır ve yaklaşık olarak 50000 m³ dür.

6. Sonuç

Köpük beton daha pek çok alanda ve üründe kullanılabilirliği yönünde büyük bir potansiyele sahiptir ve bu potansiyeli birçok alanda yapılacak araştırmalar sonucu açığa çıkabilir. Köpük kararlılığını etkilemeyen veya karışımda segregasyona neden olmayan kimyasal katkılar geliştirmeye sürekli ihtiyaç vardır. Örneğin; süper akışkanlaştırıcılar hava boşluk yapısının korunmasına yardımcı olduğundan köpük betonun yoğunluğunu yükseltmeden hem mukavemetin hem de kırılma değerlerinin daha

iyi hale getirilmesi için liflerin ve hafif dolgu maddelerinin ilave edilmesini kolaylaştırıcaktır. Ayrıca hızlandırıcılar ve geciktiriciler gibi kimyasal katkı maddeleri, daha düşük bir hidrasyon ısı ile daha büyük hacimde dökümlere izin vermek için köpük ajanları ile uyumlu hale getirilmelidir

Köpük betonun mühendislik özelliklerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine ihtiyaç vardır. Özellikle elastisite modülü, poisson oranı ve sünme, yapısal tasarıma yardımcı olmak için karakterize edilmelidir.

Köpük betonun farklı yoğunluklar için termal genişleme katsayısı ve özgül ısı belirlenmelidir. Köpük betonun yangın direnci yüksek bir malzeme olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda aşırı rötre yapar ve bunun nedeni henüz bilinmemektedir. Bu davranışın altında yatan sebeplerin ve mekanizmanın anlaşılması için çeşitli araştırmalar yapılmalıdır

Günümüzde fiber takviyeli köpük betonun özellikleri hakkında hala çok az bilgiye bulunmaktadır. Düşük yoğunluklu çimento esaslı sistemlerin gerinim duyarlılığı hakkında çok az şey bilinmektedir. Statik ve dinamik yükleme ve çeşitli çevresel koşullar altında çimento esaslı köpük betonların yapısal tepkisini tanımlamak için açıkça daha fazla araştırma gerekmektedir. Yüksek kullanım alanı ve birçok avantajlı yönlerinden dolayı köpük betonla ilgili daha fazla çalışma yapılmalı ve bilinmeyen yönleri açığa çıkarılmalıdır.

Kaynaklar

1. Demirboğa, R., Örüng, İ., Gül, R., Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes, *Cement and Concrete Research*, 31: 1627-1632, 2001.
2. TS 2511, Taşıyıcı hafif beton karışım hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, , 13 s., 1977.
3. TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002, 68 s., 2002.
4. TS 1114 EN 13055-1, Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbet kullanım için, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2004, 39 s., 2004.
5. Chandra, S., Bernstsson, L., Lightweight aggregate concrete: Science, technology, and applications, William Andrew Publishing, Norwich, New York, , USA, ISBN: 0-8155-1486-7, pp.136-138, 2002.
6. Rilem, "Functional Classification of Lightweight Concretes", Recommendation LC 1, Second Ed., 40-65, 1978.
7. Şimşek, O., Beton ve beton teknolojisi, Seçkin Yayınevi, Ankara, , s. 27-30, 1978
8. Aldrige, D., Introduction to foamed concrete: What, Why, How? Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 1-14, 2005.
9. Beningfield, N., Gaimster, R., Griffin, P., Investigation into the air void characteristics of foamed concrete, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 51-60, 2005.
10. Jones, M.R. and McCarthy A., Behavior and assessment of foamed concrete for construction application, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 61-88, 2005.
11. Goual, M.S., Bali, A., de Barquin, F., Dheilly R.M., and Quéneudec, M., Isothermal moisture properties of clayey cellular concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder, *Cement and Concrete research* Vol. 36, pp. 1768-1776, 2006.
12. ACI 523.2R-96, Guide for precast cellular concrete floor, roof, and wall units, ACI Committee 523, 1996.
13. British Cement Association, Foamed concrete: Compositions and Properties. Cambery, UK, 1994.
14. Cox, L.S. and van Dijk, S., Foam concrete: A different kind of mix. *Concrete (UK)*, Vol. 36, no. 2, February, pp. 54-55, 2002.
15. Cox, L.S., Major road and bridge projects with foam concrete, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 105-112, 2005.
16. Kearsley, E.P. and Mostert, H.F. Opportunities for expanding the use of foamed concrete in the construction industry, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 143-154, 2005.
17. Kearsley, E.P. and Mostert, H.F. The Use of foamed concrete in refractories, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 89-96, 2005.
18. Papayianni, I. and Milud, I.A. Production of foamed concrete with high calcium fly ash, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 23-28, 2005.
19. ACI 523.1R-06, Guide for cast-in place low density cellular concrete, ACI Committee 523, 2006.
20. Kearsley, E.P., Just foamed concrete: An overview, Proceedings: International Conference on Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction, (Eds. RK Dhir & NA Henderson) University of Dundee, Scotland, September 8-10, pp. 227-237, 1999.
21. Lee, Y.L. ve Hung, Y.T., Exploitation of solid wastes in foamed concrete: Challenges ahead, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 15-22, 2005.
22. Proshin, A.P., Beregovoi, V.A., Beregovoi, A.M., and Eremkin, A.I., Unautoclaved foam concrete and its construction adapted to regional conditions, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 113-120, 2005.
23. Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J., The Effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 105-112, 2001.
24. Kearsley, E.P., The use of foamcrete for affordable development in third world countries: Appropriate concrete technology, Proceedings International Conference on Concrete in the Service of Mankind, (Eds. RK Dhir & MJ McCarthy), London (UK), pp. 233-243, 1996
25. Jones, M.R. and McCarthy, A. Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1032-1041.
26. Nambiar, E. ve Ramamurthy, K., Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(2):221-30, 2007.
27. Timbrell, J., Private Communication, Light Concrete LLC, 2007.
28. Tikalsky, P.J., Pospisil, J., MacDonald, W., A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research*, 34: 889-893, 2004.
29. Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J., Ash content for optimum strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 241-246, 2002.
30. Kearsley, E.P. and Mostert, H.F., Designing mix composition of foamed concrete with fly ash contents, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 29-36, 2005.
31. Bindiganavile, V. and Hoseini, M. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, *Foamed Concrete*, University of Alberta, Canada, pp. 223-251, 2008.
32. Kearsley, E.P. and Booyens, P.J., Reinforced foamed concrete: Can it be durable?" *Concrete*, no. 91, November, pp. 5-9, 1998.
33. Wee, T-H, Babu, D.S., Tamilselvan, T., Lim, H-S, Air-Void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties, *ACI Material Journal*, Vol. 103, no. 1, pp. 45-52, 2006.
34. Nambiar, E.K.K. ve Ramamurthy, K., Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 475-480, 2006.
35. Hamidah, M.S., Azmi, I., Ruslan, M.R.A., Kartini, K., and Fadhill, N.M., "Optimization of Foamed Concrete Mix of Different Sand-Cement Ratio and Curing Conditions",

- Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 37–44, 2005.
36. Jones, M.R. and McCarthy, A., Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, *Magazine of Concrete Research* Vol. 57, no. 1, pp 21–31, 2005.
 37. ASTM C618–05, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, ASTM International, 2005.
 38. Hoff, G.C., Porosity-Strength considerations for cellular concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, pp. 91–100, 1972.
 39. Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J., The Effect of porosity on the strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 233–239, 2002.
 40. Krivenko, P.V., Kovalchuk, G.Y., and Kovalchuk, O.Y., “Heat Resistant Cellular Concrete Based on Alkaline Cements”, Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 97–104, 2005.
 41. Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J., Porosity and permeability of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 805–812, 2001.
 42. Jones, M.R. and Giannakou, A., Thermally insulating foundations and ground slabs using highly-foamed concrete, *Journal of ASTM International* Vol. 1, no. 6, pp. 100–112, 2004.
 43. Zhihua, P., Hengzhi L., Weiqing, L., Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixture, *Construction and Building Materials*, 72: 256–26, 2014.
 44. Kozłowski, M., Kadela, M., Kukielka, A., Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams, *Procedia Engineering*, 108: 349-354, 2015
 45. Sayadi, A.A., Vilches, T.J., Neitzert, T.R., Clifton, G.C., Strength of bearing area and locking area of galvanized strips in foamed concrete, *Construction and Building Materials*, 114: 56-65, 2016
 46. Amran, Y.H., Nima Farzadnia, A.A., Abang, A., Properties and applications of foamed concrete; a review, *Construction and Building Materials* 101, 990–1000, 2015.
 47. Niu Y., Lu Z., Jiang, J., Li, J., Zhang, Y., Study on the preparation and properties of high porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement, *Materials and Design*, 92: 949-959, 2016.
 48. Chen, B. ve Ma, C., Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement, *Construction and Building Materials*, 137: 160-168, 2017.
 49. Alengaram, U.J., Liu M.Y.J., Santhanam, M., Jumaat, M.Z., Mo, K.H., Microstructural investigations of palm oil fuel ash and fly ash based binders in lightweight aggregate foamed geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 120: 112-122, 2016.
 50. Vesova, L.M., Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete, *Procedia Engineering*, 150: 1587-1590, 2016.
 51. Panesar, D.K., Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, *Construction and Building Materials*, 44: 575-584, 2013.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Nano Katkıların Polimerlerin Ergime (T_M) ve Camısı Geçiş (T_g) Sıcaklıklarına Etkisi

Alim KAŞTAN^{1*}, Şükrü TALAS²

¹Organize Sanayi Bölgesi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Antalya / TÜRKİYE

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 05.09.2017 Düzeltme Tarihi: 27.10.2017 Kabul Tarihi: 04.11.2017

Özet

Polimer kompozitler hafif olmaları, korozyon dirençlerinin yüksek olması ve üretim kolaylıkları gibi üstün özelliklerinden dolayı elektrik, elektronik, makine imalatı ve birçok endüstriyel alanda metalik malzemelerin yerini almaya başlamıştır. Ancak polimer malzemelerin en zayıf özelliklerinden biri ise metalik malzemelere göre daha düşük sıcaklıklarda kullanılabilmesidir. Bu sınırlayıcı durumun ortadan kaldırılması için polimer malzemelere birçok katkı maddesi eklenerek, özellikleri geliştirilmektedir. Nano boyutlu malzemeler, geleneksel makro boyutlu malzemelere göre daha düşük oranlarda bile çok daha etkin olabilmektedir. Bundan dolayı son yıllarda polimer nanokompozitlerle yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu derleme çalışmada daha önce yapılan bazı yayınlar taranarak nano katkıların polimerlerin camısı geçiş (T_g) ve erime (T_m) sıcaklıklarına olan etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Polimer kompozit, Nanokatkılar, Camısı geçiş sıcaklığı, Erime sıcaklığı

Effect of Nanoparticle Polymers on Melting (T_M) and Glass Transition (T_g) Temperatures

Abstract

Polymer composites have begun to take the place of metallic materials in electrical, electronic, machine manufacturing and many industrial fields due to their superior properties such as their light weight, high corrosion resistance and ease of production. However, one of the weakest features of polymer materials is that they can be used at lower temperatures than metallic materials. In order to overcome this limitation, many additives are added to the polymer materials to improve their properties. Nano-sized materials can be much more effective at lower rates than traditional macro-dimensional materials. As a result, work on polymer nanocomposites continues to increase in recent years. In this review study, the effects of the nanoparticles on the glass transition (T_g) and melting (T_m) temperatures of the polymers were investigated.

Keywords: Polymer composite, Nanoparticle, Glass transition temperature, Melting temperatures

1. Giriş

Polimer kompozitler, elektronik, nakliye, inşaat ve tüketici ürünleri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda nano katkıları polimerik malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nano katkıları boyutlarından en az bir tanesi 102 nanometreden küçük olan parçacıklar olarak tanımlanmaktadır [1]. Polimerik nano kompozitler (PNC) genelde %1-3 oranında nanopartikül içeren, tek bileşen ve tek faz gibi davranan materyallerdir. PNC'ler saydamlık, düşük yoğunluk, yarıcılığın azaltma, düşük geçirgenlik, mekanik özelliklerinin gelişimi gibi özellikler içerir [2]. Matris içerisine katılan nanopartiküllerin şekli, boyutları ve oranı üretilen kompozitin özelliklerini etkiler [3]. Nano katkı malzemeleri olarak genellikle karbon (örneğin fulleren ve türevleri) [4-8], katmanlı kil mineralleri [9], nano boyutlu metaller ile organik ve inorganik mineraller kullanılır [10]. Polimer karışımlarında ve kompozitlerde yüksek performans, polimer matrisle uyumlu bir dolgu bileşen ilave edilerek elde edilebilir. Bu bağlamda nano katkıları geleneksel katkılara göre umut verici bir alternatif olarak görülmektedir. Son zamanlarda nano parçacıklar içeren karışmayan polimer kompozitler üzerine yapılan çalışmalar birçok bilim insanı tarafından çalışılmıştır [11-16]. Amorf yapıdaki polimeri oluşturan zincirler sürekli olarak geliştiği güzel dönme ve bükülme hareketleri yaparlar. Sıcaklık artışı hareketliliği artırır. Zincir hareketleri T_g altında düşük enerjiye sahiptir. Bu sebeple yapı cam gibi kırılmalıdır. T_g sıcaklığının üzerinde ise hareketlilik artmış yapı kauçuğumsu bir hal almıştır. Yarı-kristal polimerlerde amorf ve kristal bölgeler birlikte bulunduklarından dolayı camısı geçiş sıcaklıkları altında amorf polimerler gibi kırılırlar. Kırılma özelliğini camısı geçiş sıcaklığına kadar korurlar. T_g geçildiğinde belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte kristal

yapılarından dolayı esnek termoplastik davranışa geçerler. T_g 'ye kadar termoplastikler özelliklerini değiştirmezler ve erime sıcaklığında kristal yapıları bozularak viskoz bir sıvı verecek şekilde erirler. Tam kristal polimerler serttirler, camısı geçiş göstermezler. Belli bir erime sıcaklığında erirler [17-18]. Polimerlerden yapılan malzemeler sertliklerini ve şekillerini camısı geçiş sıcaklığı civarına kadar koruyabilirler. Camısı geçiş sıcaklığı üzerinde, polimer zincirleri eğilip-bükülme hareketleri yapabildiğinden dolayı polimerik ürünün geometrisi değişir. Tam amorf polimerlerin camısı geçiş sıcaklığı üzerinde ısıtılmaları sürdürülürse, polimer zincirlerinin enerjisi dolayısıyla hareketliliği dereceli olarak artar ve polimer kauçuğumsu, zamkısı davranışlar göstererek sıvılaşır. Camısı geçiş sıcaklığı üzerindeki yarı-kristal yapı polimerlerin zincirleri, kristal bölgelerin etkisinden dolayı dışarıdan kesme, koparma gibi bir etki yapılmadıkça erime noktasına kadar birbirinden ayrılmazlar. Erime noktası üzerinde ise zincirler bağımsız hareket edebilir [19]. Malzemelerin servis sırasında erime ve camısı geçiş sıcaklık aralığının mümkün olduğunca geniş olması avantaj sağlayacaktır. Bu derleme çalışmasında nano katkıların, polimerlerin camısı geçiş sıcaklıklarına ve erime sıcaklıklarına olan etkisi daha önce yapılan çalışmalar doğrultusunda incelenmiştir.

2. Polimer Matrisli Malzemelerin T_g ve T_m Sıcaklıklarına Nano Katkıların Etkisi

Paszkievicz v.d yapmış oldukları çalışmada poly ethylene terephthalate (PET) içerisine değişik oranlarda nano boyutlu (%0,025, %0,05, %0,1, %0,2 ve %0,4) modifiye edilmiş (EG) ilave ederek kompozit hazırlamışlardır. Matris içerisindeki nano EG oranına bağlı olarak kompozitlerin erime sıcaklığı (T_m) ve camısı

geçiş sıcaklıklarında (T_g) meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Tablo 1'de PET/EG kompozitlerin (T_m) ve (T_g) sıcaklıklarında meydana gelen değişim görülmektedir.

Tablo 1. PET/EG kompozitlerin (T_m) ve (T_g) sıcaklıkları [20]

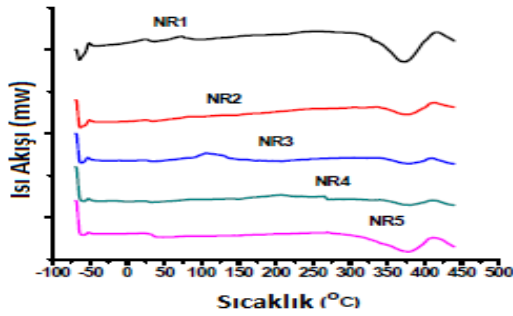
Numuneler	T_g (°C)	T_m (°C)
PET	85	257
PET/EG-%0,025	83	251
PET/EG-%0,05	83	253
PET/EG %0,1	83	252
PET/EG %0,2	83	252
PET/EG %0,4	83	253

Tablo 1'de görüldüğü gibi katkısız PET' in T_g sıcaklığı 85 °C'dir. Matris içerisine ilave edilen nano EG ile T_g sıcaklığında 2 °C'lik düşüş gözlemlenmiştir. Matris içerisindeki nano EG oranının değişmesi ile T_g sıcaklığında değişim gözlemlenmemiştir. Nano EG'nin yapı içerisindeki oranının değişmesi ile T_m sıcaklıklarında değişim gözlemlenmiştir. PET içerisine %0,025 ilave edilen EG'nin T_m sıcaklığını 6 °C düşürdüğü görülmüştür. En düşük T_m sıcaklığı 252°C ile %0,1 ve %0,2 nano EG katkılı kompozitlerde görülmüştür. Araştırmacılar matris içerisine ilave edilen nano EG'nin T_g ve T_m sıcaklıklarında büyük oranlarda değişim meydana getirmediğini belirtmişlerdir [20]. Sagar v.d matris malzemesi olarak doğal kauçuk (NR) ve katkı malzemesi olarak ise çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNTS) seçerek NR/ MWCNTS nanokompozit oluşturmuşlardır. Deneyler için beş farklı kompozisyonda numune hazırlanmıştır. Tablo 2'de NR/MWCNTS nanokompozitlerin karışım oranları görülmektedir.

Tablo 2. Test numunelerindeki MWCNTs oranları [21]

Numune	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5
% MWCNT _s	0	0,1	0,3	0,5	1,0

Oluşturulan kompozitlerin ilave edilen nano MWCNTS oranına göre T_g ve T_m sıcaklıklarında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) deneylerini yapmışlardır. DSC deneylerinden elde edilen veriler Şekil 1 ve Tablo 3'te görülmektedir.



Şekil 1. -74 to 450°C sıcaklık aralığındaki polimer esası nanokompozitlerin DSC eğrileri [21]

Tablo 3. Üretilen bütün nanokompozitlerin cam geçiş, ilk ve ikinci erime dönüşüm sıcaklıkları [21]

Numune Adı	Cam Geçiş Sıcaklığı T_g (°C)	Erime Başlama Sıcaklığı T_{m1} (°C)	En Üst Erime Sıcaklığı T_{m2} (°C)
NR1	-68.48	216.95	373.83
NR2	-69.83	275.99	375.15
NR3	-70.12	286.62	376.38
NR4	-71.18	289.32	379.08
NR5	-72.12	293.37	381.38

Şekil 1 ve Tablo 3'te görüldüğü gibi NR matris içerisindeki nano MWCNT_s oranının artması ile kompozitin T_g sıcaklığının düştüğü tespit edilmiştir. NR/MWCNT_s kompozitlerin başlangıç erime sıcaklığı (T_{m1}) ve en yüksek erime sıcaklığı (T_{m2}) değerlerinin artan nano MWCNT_s oranını ile arttığı görülmektedir.

En büyük değişim T_{m1} değerinde görülmüştür. Katkısız NR'nin T_{m1} değeri 216,95 °C iken matrise ilave edilen %1 MWCNT_s ile bu değer 293,37 °C'ye yükselmiştir. Benzer şekilde en yüksek T_{m2} değerine %1 MWCNT_s ilaveli NR5 kompozitinde ulaşılmıştır. Buradan hareketle NR5 kompozitin diğer kompozitlere göre daha geniş sıcaklık aralığında kullanılabilmesi söylenebilir. Bu duruma kauçuk matrisdeki CNT bağlarının, polimer zincir ile nano ölçekte etkileşim faz değişikliklerine karşı direnerek polimer nanokompozitlerin faz geçiş aralığını genişletmesinin sebep olduğu sanılmaktadır [21]. Bir başka çalışmada Lizundia vd. poly (L-laktit) (PLLA)/çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) kompozitlerin termal özelliklerini incelemişlerdir. PLLA içerisine uzunluğu 0,1-10µm ve çapı 10-15 nm boyutlarında ve %0,75, %1,25, %2,5, %4 ve %5 MWCNT oranlarında MWCNT ilave etmişlerdir. Nano MWCNT oranına göre, üretilen kompozitlerin DSC deneylerinden elde edilen T_m ve T_g değerlerindeki değişim Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4. DSC ile belirlenen PLLA/MWCNT kompozitlerin T_m ve T_g özelliklerinin standard sapma ve ortalama değerleri [22]

% CNT	T_g (°C)	T_m (°C)
0	56.6	169.3±0.3
0.75	61.9	169.4±0.2
1.25	61.6	169.5±0.1
2.5	62.1	169.5±1.7
4	61.4	169.2±1.2
5	61.7	169.3±0.3

Tablo 4'te görüldüğü gibi katkısız PLLA ile karşılaştırıldığında, matrise ilave edilen MWCNT'nin T_g sıcaklığını yükselttiği görülmektedir. Matris içerisine %0,75 ilave edilen MWCNT T_g sıcaklığını 5,3 °C arttırmıştır. Bu artışın PLLA zincirleri ile MWCNT arasında oluşan ara yüzeylerden kaynaklandığı düşünülmektedir. MWCNT oranının artırılması ile T_g değerinde artış gözlemlenmemiştir. Bu durum polimer zincirleri ile MWCNT'nin yüzey alanının daha fazla artmaması, artan karbon nanotüplerin daha büyük aglomerasyona sebep olmasından kaynaklanmış olabilir. Ancak T_m değerleri incelendiğinde PLLA matrise ilave edilen MWCNT'nin etkili olmadığı söylenebilir [22]. Lai vd. matris olarak seçtikleri Poli eter eter keton (PEEK) içerisine 30nm boyutunda, modifiyeli ve modifiye edilmemiş değişik oranlarda (%2,5,%5, %7,5 ve %10) nano silika (SiO₂) ilave ederek polimer nanokompozit hazırlanmıştır. Oluşturulan nanokompozitlerin termal özelliklerini incelemişlerdir. DSC ve TGA deneyleri sonucunda PEEK/ SiO₂ nanokompozitlerin termal verileri elde edilmiştir. T_m ve T_g sıcaklıklarının ilave edilen nano silika ile değişimi Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. PEEK/SiO₂ nanokompozitlerin T_m ve T_g değerleri [23]

Numuneler (Ağırlık %)	T_m , (°C) U/M	T_g , (°C) U/M
Saf PEEK	-	132
SiO ₂ %2,5	343/ 343	132/133
SiO ₂ % 5	343/345	132/133
SiO ₂ % 7,5	345/345	133/132
SiO ₂ %10	344/345	134/133

T_m : T_m değeri, 30 nm modifiye edilmiş Silika (U) ve modifiye edilmiş (M) katkılı PEEK kompozitlerinden elde edilen DSC; T_m değeri, TMA dan elde edilen modifiye edilmemiş (U) and modifiye edilmiş (M) silika katkılı PEEK kompozitleri

Tablo 5'te görüldüğü gibi matrise PEEK'na ilave edilen nano SiO₂'nin kompozitin T_m ve T_g sıcaklık değerlerine etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir. Ancak soğuma sırasında PEEK moleküllerinin hareketliliğini azaltarak kristalleşme süresini uzattığı belirtilmiştir. Ayrıca modifiye edilmiş SiO₂'nin T_m sıcaklığı çok azda olsa arttırmasının stearik asit modifikasyonunun nano-silika parçacıklarının etkisini ortaya çıkarmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [23]. Khoo vd. çözelti döküm tekniği (solution casting technique) kullanarak polilaktik asit) (PLA)/CNC nanokompozit hazırlanmıştır. Hazırladıkları PLA/CNC nanokompozitin termal özelliklerini DSC ve TGA metotlarını kullanarak incelemişlerdir.

Üretilen kompozitlerin karışım oranları tablo 6'da, erime ve camsı geçiş sıcaklıkları tablo 7'de görülmektedir.

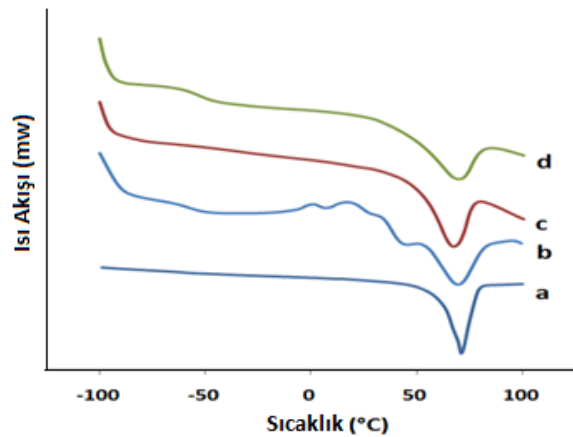
Tablo 6. PLA/CNC kompozitlerinin adlandırılması ve bileşimi [25]

Malzeme	PLA (wt%)	CNC (wt%)
PLA	100	-
PLA/CNC-1	99	1
PLA/CNC-2	98	2
PLA/CNC-3	95	5

Tablo 7. PLA/CNC nanokompozitlerinin ısı karakteristikleri [25]

Malzeme	T _g , (°C)	T _m , (°C)
PLA	58.5	149.9
PLA/CNC-1	59.1	151.8
PLA/CNC-2	59.4	149.7
PLA/CNC-3	58.1	144.4

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g), molekül içi etkileşim, zincir esnekliği ve malzemenin kendisinin moleküler ağırlığı gibi çeşitli faktörlere dayanan karmaşık bir olay olarak tanımlanır [24]. Tablo 6'da görüldüğü gibi katkısız PLA ve kompozitlerinin T_g ve T_m sıcaklıkları birbirine çok yakın olarak ölçülmüştür. Yani CNT'nin T_g ve T_m sıcaklıklarını kısmen etkilediği, önemli bir etkisinin olmadığı söylenebilir [25]. İbrahim ve Johan çözelti yaparak döküm tekniği kullanarak poly(ethylene oxide) (PEO) içerisine matris içerisine değişik oranlarda Lityum hekza floro fosfat (LiPF₆), etilen karbonat (EC) ve amorf karbon nanotüp (CNT) ilave ederek hazırladıkları kompozitin termal özelliklerini incelemişlerdir. Numuneler DSC deneylerine tabi tutularak termal veriler elde edilmiştir. Şekil 2 de PEO ve kompozitlerinin DSC verileri görülmektedir. Tablo 8'de ise üretilen kompozitlerin T_g ve T_m sıcaklıkları görülmektedir.



Şekil 2. (a) PEO (b) PEO-20 ag% LiPF₆ (c) PEO-20 ag% LiPF₆-15 ag% EC (d) PEO-20 ag% LiPF₆-15 ag% EC-5 ag% CNT içeren kompozitlerin DSC eğrileri [26]

Tablo 8. Nanokompozit polimer elektrotların ısı karakteristikleri [26]

Numuneler (% Ağırlık oranları)	T _g , (°C)	T _m , (°C)
Saf PEO	-66	68.8
PEO-%20 LiPF ₆	-72	63.5
PEO-%20 LiPF ₆ -%15 EC	-76	62.9
PEO-%20 LiPF ₆ -%15 EC-%5 CNT	-80	61.0

Şekil 2'de görüldüğü gibi katkısız PEO 65°C'de keskin pik elde edilmiştir. Ancak malzeme içerisine ilave edilen katkılar ile bu pikin daha geniş hale geldiği görülmektedir. Tablo 8'de ki veriler incelendiğinde üretilen kompozitlerin içerisine ilave edilen katkı maddeleri ile T_g ve T_m derecelerinin değiştiği görülmektedir. Kompozit içerisine ilave edilen %5 nano CNT T_g değerini -

76°C'den -80°C'ye, T_m derecesini de 62,9°C'den 61°C'ye değiştirmiştir. Araştırmacılar bu değişimleri nano CNT ile matris arasında ısı iletiminin artmasından ve kristalin oranının azalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [26]. Abdulkhani vd. Polylaktik Asit (PLA) içerisine selüloz nanofiber (CNF-Ac) ve mikrokristalin selüloz (MCC) ilave ederek oluşturdukları kompozitin termal, morfolojik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. PLA matris içerisine CNF-Ac ve MCC %1, %3 ve %5 ilave edilerek üç farklı nanokompozit hazırlamışlardır. Üretilen kompozitlerin termal özelliklerini belirlemek için DSC deneyleri uygulanmıştır. Tablo 9'da DSC deneylerinden elde edilen T_g ve T_m değerleri görülmektedir.

Tablo 9. Isıl karakteristikleri DSC ile belirlenen PLA/CNF numuneler [27].

Malzemeler	T _g , (°C)	T _m , (°C)
PLA	57.47	156.28
PLA/CNF-Ac-1	58.26	150.57
PLA/CNF-Ac-3	58.48	154.21
PLA/CNF-Ac-5	58.94	154.08

Tablo 9'da görüldüğü gibi PLA ve PLA/CNF kompozitlerin T_g değerleri 57°C ile 59°C arasında değişmektedir. PLA içerisine içerisine ilave edilen CNF ile T_g değerinde küçük bir yükseliş gözlenmiştir. En yüksek T_g değerine PLA/CNF-Ac-5 kompozitinde ulaşılmıştır. Malzemelerin T_m değerleri PLA içerisine ilave edilen CNF ile düşüş göstermiştir. Matrise içerisindeki CNF oranının artması ile T_m değerinin de arttığı tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda T_g değerindeki kısmi artışın yapıya ilave edilen CNF ile moleküler hareketlilikteki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. T_m değerindeki azalmanın ise yapıdaki amorf fazın artmasından kaynaklandığı sanılmaktadır [27]. Lee ve Chang, Poly(e-kaprolakton) matris(PLC) içerisine değişik oranlarda (%3-10) Halloysite nanotüpler (HNTs) ilave ederek beş farklı kompozisyonda ürettikleri kompozitin termal özelliklerini DSC deneyleri verileri doğrultusunda incelemişlerdir. Ergiyik karıştırma (melt mixing) tekniği kullanılarak üretilen kompozitlerin içerisindeki HNTs oranına bağlı olarak T_g ve T_m sıcaklıklarındaki değişim incelenmiştir. Tablo 10'da üretilen kompozitlerin T_g ve T_m değerleri görülmektedir.

Tablo 10. PLC/HNT nanokompozitlerin ısı karakteristikleri [28]

% Bileşim oranları	T _g , E ⁿ En üst değer, (°C)	T _m , (°C)
Katkısız PCL	-54.15±0.1	55.3±0.02
97/3	-50.57±0.1	54.8±0.02
95/5	-49.21±0.1	54.2±0.02
93/7	-48.71±0.1	53.7±0.02
90/10	-48.30±0.1	53.1±0.02

Tablo 10'da görüldüğü gibi katkısız PLC'nin T_g sıcaklığı -54°C olarak ölçülmüştür. PLC içerisindeki HNTs miktarının artması ile T_g sıcaklığının yükseldiği tespit edilmiştir. En yüksek T_g sıcaklığı %10 HNTs içeren kompozitte görülmüştür. PLC/ HNTs kompozitlerin T_m değerlerinin artan HNTs ile birlikte düştüğü görülmektedir. Ancak, bu düşüş değeri kısmi olup 2°C ile sınırlı kalmıştır. Bu duruma, PLC kristal boyutunda küçülme ve ilave edilen nanokompozitlerin kristallerin kusurlarına neden olması sonucunda PLC zincirlerinin moleküler hareketliliğinde azalmasından kaynaklandığı sanılmaktadır [28]. Ambuken vd. matris malzemesi olarak seçtikleri termoplastik poliüretan (TPU) içerisine farklı oranlarda poliamid 11, Cloisite 30B (CI) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWNT) ilave ederek kompozit hazırlamışlardır. Bu kompozitlerin termal özelliklerini belirlemek için dinamik mekanik ve termogravimetrik analiz yapmışlardır. Tablo 11'de üretilen kompozitlerin karışım oranları, tablo 12'de ise T_g ve T_m değerleri görülmektedir.

Araştırmacılar [29], TPU içerisine ilave edilen katkı maddelerinin T_g sıcaklığını neredeyse hiç değiştirmedini tespit etmişlerdir (Tablo 12). Ancak, TPU/PA kompozitlerin erime sıcaklığı ilave edilen CI ve MWNT ile 5°C'ye kadar yükselmiştir. CI ve MWNT'nin ısı geçişi sırasında bariyer özelliği göstererek T_m sıcaklığını arttırdığı sanılmaktadır [29]. Naguib vd. poly(3-

hidroksibütirat) (PHB) içerisine Organik olarak modifiye edilmiş katmanlı silikatlar, cloisite 30B (C30B) ve montmorillonit aşılansız-poli (e-kaprolakton) (MPCL) %5 ve %10 oranlarında ilave ederek nanokompozit hazırlamışlardır. PHB içerisine ilave edilen C30B ve MPCL'nin oluşturulan kompozitin termal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tablo 13'te PHB ve kompozitlerinin T_g ve T_m sıcaklıkları görülmektedir.

Tablo 11. Kullanılan malzemelerin adlandırılması [29]

Polimer	Nanopartikül	Nanopartikül oranı (%ağırlık)	Kompozitler
TPU/PA (90/10)	MWNT	7.5	TPU/PA/MWNT
TPU/PA (90/10)	Cloisite 30B	7.5	TPU/PA/CI
TPU/PA (90/10)	MWNT ve Cloisite 30B	3.5 and 3.5	TPU/PA/MWNT/CI
TPU	MWNT	7.5	TPU/MWNT
TPU	Cloisite 30B	7.5	TPU/CI

Tablo 12. DSC den elde edilen ısı özellikler [29]

Polimer	T _g , (°C)	T _m , (°C)
TPU	-40	-
TPU/PA	-42	185
TPU/CI	-38	-
TPU/PA/CI	-39	187
TPU/MWNT	-40	-
TPU/PA/MWNT	-40	189
TPU/PA/MWNT/CI	-40	190

Tablo 13. PHB ve nanokompozitlerinin ısı özellikleri [30]

Numuneler	T _g , (°C)	T _m , (°C)
PHB	8.9	180.3
PHB/5C30B	8.7	177.3
PHB/10 C30B	8.3	178.2
PHB/5 C30B	6.6	177.0
PHB/10 MPCL	5.6	176.2

Tablo 13'te görüldüğü gibi PHB içerisine ilave edilen C30B ve MPCL'nin T_g sıcaklığını düşürdüğü görülmüştür. Bu durum PHB'ye ilave edilen C30B ve MPCL'nin kristalleşmeyi geciktirmesinden kaynaklanmıştır. Oluşturulan kompozitlerin

katkısız PHB'ye göre daha düşük sıcaklıklarda bozunduğu tespit edilmiştir. Matrise ilave edilen katkı maddelerinin polimer zincirlerinin hareketlerini kısıtlaması, kristal oranının değişmesi ve lameller arası mesafenin küçülmesi (lower lameller thickness) T_m sıcaklığının düşmesine sebep olduğu sanılmaktadır [30]. Prashantha vd. poliamid-11 (PA-11) matris içerisine %2,4 ne %6 oranlarında Halloysite nanotüpler (HNTs) ilave ederek oluşturdukları polimer nanokompozitlerin termal özelliklerini TGA ve DSC deneyleri vasıtasıyla incelemişlerdir. Tablo 14'te PA-11 ve kompozitlerinin T_g ve T_m sıcaklıkları görülmektedir.

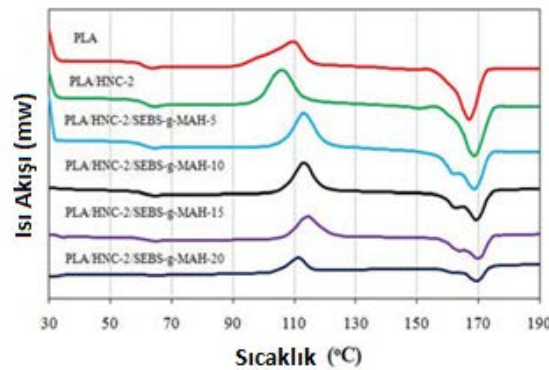
Tablo 14. Değişen oranlarda HNT içeren nanokompozitlerin ısı özellikleri [31]

Numuneler	T _g (°C)	T _m (°C)
Katkısız PA-11	52	189
PA-11 + %2 HNT	56	188
PA-11 + %4 HNT	69	189
PA-11 + %6 HNT	73	190

Yapılan deneyler sonucunda katkısız PA-11 ile PA-11/HNT kompozitlerin T_g sıcaklıkları arasında önemli farklar olduğu görülmüştür. Matrise ilave edilen HNT miktarının artması ile T_g sıcaklığı yükselmiştir. Katkısız PA-11'in T_g değeri 52°C iken, içerisine %6 HNT ilave edilen PA-11/HNT kompozitin T_g değeri 73°C ile en yüksek değere ulaşmıştır. Nanokompozitlerin T_g değerindeki böyle bir artışın, nanotüplerin yüzeyindeki hidroksil grupların ve PA-11 zincirlerindeki amin gruplarının arasındaki hidrojen bağ etkileşimine bağlı olarak nanotüplerin yüzeylerine yakın olan segmente olmuş PA zincirlerinin hareketlerinin kısıtlanmasında dolayı olduğu düşünülmektedir. Katkısız PA-11 ve kompozitlerinin T_m değerlerinde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. DSC diyagramındaki ön/omuz tepe pik'in görülmesi tercihen yönelmiş PA-11 makromoleküllerinin erimesine bağlanmıştır; böyle bir yönelmenin rijit nanodolgu maddelerinin varlığı ile açıklanmaktadır [31]. Tham vd. erime karıştırma (melt compounding) yöntemi kullanarak poli laktik asit (PLA) matris içerisine Halloysite nanokil (HNC) ve uyumlaştırıcı olarak maleik andihrit aşılansız stiren-etilen/ bütülen-stiren kopolimer (SEBS-g-MAH) ilave ederek ürettiği kompozitlerin özelliklerini araştırmışlardır. Termal özelliklerin belirlenmesi için numuneler DSC deneylerine tabi tutulmuştur. Tablo 15'te PLA kompozitlerin karışım oranları ve DSC deneylerinden elde edilen T_m ve T_g değerleri verilmiştir. Şekil 3'te PLA/ HNC/ SEBS-g-MAH kompozitlerin DSC grafikleri görülmektedir.

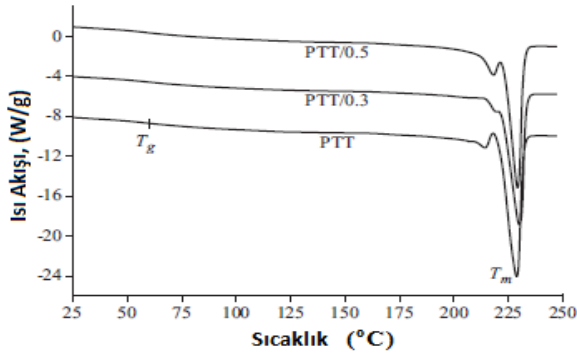
Tablo 15. PLA/HNC kompozitlerinin ısı karakteristikleri ve katkı oranları [32]

Malzemeler	PLA (% Ağırlık)	HNC (% Ağırlık)	SEBS-g-MAH (% Ağırlık)	T _g (°C)	T _m (°C)
PLA	100	-	-	58.6	168.7
PLA/HNC-2	98	2	-	59.5	168.5
PLA/HNC-2/SEBS-g-MAH-5	93	2	5	60.5	168.4
PLA/HNC-2/SEBS-g-MAH-10	88	2	10	60.4	168.3
PLA/HNC-2/SEBS-g-MAH-15	83	2	15	59.9	168.4
PLA/HNC-2/SEBS-g-MAH-20	78	2	20	60.5	168.4



Şekil 3. PLA ve kompozitlerinin kaydedilen DSC grafikleri [32]

Tablo 15'te görüldüğü gibi PLA/HNC/SEBS-g-MAH kompozitlerin camı geçiş sıcaklıkları ($T_g=60^\circ\text{C}$) birbirine çok yakındır. PLA matris içerisine ilave edilen HNC ve SEBS-g-MAH T_g değeri üzerinde etkili olamamıştır. PLA/HNC kompozitlerin tek erime derecesinin olduğu ($T_m=168^\circ\text{C}$) görülmektedir. Ancak şekil 3'te görüldüğü gibi SEBS-g-MAH'nın ilavesi ile kompozitler iki erime derecesine T_m (168°C) ve T_m' (161°C) sahip olmuştur. Araştırmacılar bu durumu PLA kompozitlere SEBS-g-MAH'nın ilavesi ile kristalizasyon prosesinin yavaşlaması ve kristal yapı düzeninin bozulmasından kaynaklandığını belirtmiştir. SEBS-g-MAH'nın ilavesi birim hücre içindeki PLA'nın moleküler istiflenmesindeki yeniden düzenlenmeyi tetikleyebilir. [32]. Szymczyk ve Roslanec yapmış oldukları çalışmada in situ polimerizasyon metodu ile poli trimetilen tereftalat (PTT) matris içerisine ortalama çapı 1.4 nm olan %0.3 ve %0.5 oranlarında tek katmanlı karbon nanotüp (SWCNTs) ilave ederek ürettikleri kompozitlerin termal özelliklerini DSC deneyleri ile incelemişlerdir. Şekil 4'te DSC deneylerinde elde edilmiş PTT ve PTT/SWCNTs kompozitlerin ısıtma termogramları görülmektedir. Tablo 16'da PTT ve PTT/SWCNTs kompozitlerin T_m ve T_g değerleri görülmektedir.



Şekil 4. PTT ve PTT/SWCNT'lerin ısıtılması sırasında elde edilen DSC diyagramları [33]

Tablo 16. Saf PTT ve PTT/SWCNT'lerin DSC ile belirlenen ısı özellikleri [33]

Numune isimleri	T_g , ($^\circ\text{C}$)	T_m , ($^\circ\text{C}$)
PTT	51	229
PTT/0.3 SWCNTs	52	230
PTT/0.5 SWCNTs	52	229

Şekil 4 ve tablo 16 incelendiğinde PTT içerisine ilave edilen SWCNTs ile üretilen kompozitlerin T_g ve T_m sıcaklıklarının neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. Araştırmacılar T_g ve T_m sıcaklıklarında değişim olmaması ile ilgili herhangi bir açıklama yapmamışlardır. Ancak T_g ve T_m sıcaklıklarında değişim görülmemesinin nedeninin matris içerisine ilave edilen SWCNTs oranının düşük olmasından ve yeterince polimer zincirleri üzerinde etkili olamamasından kaynaklanmış olabileceği sanılmaktadır [33]. Başka bir çalışmada Prashantha vd. matris olarak seçtikleri polipropilen (PP) içerisine değişik oranlarda (%2-8) modifiye edilmemiş hallositler (HNT'ler) ve kuaterner amonyum tuzu ile muamele edilmiş (QM-HNT) halloysite nanotüpler ilave ederek hazırladıkları polimer/nanokompozitin termal özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Üretilen kompozitlerin DMA deneyleri sonucunda elde edilen T_g ve T_m değerleri tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17 incelendiğinde PP/HNT ve PP/QM-HNT kompozitlerin T_m sıcaklıklarının PP + %6 QM-HNT hariç katkısız PP'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bu artış çok sınırlı olmuştur. Ayrıca PP matris içerisine ilave edilen farklı oranlardaki HNT ve QM-HNT de T_m sıcaklıklarında önemli bir değişime neden olmamıştır. Üretilen kompozitlerin T_g sıcaklıkları katkısız PP'ye göre (PP + %6 HNT hariç) yükselmiştir. En yüksek T_g değerine $15,7^\circ\text{C}$ ile PP + %4 QM-HNT kompozitinde ulaşılmıştır. Genel olarak HNT'ye göre QM-HNT'nin T_g değeri üzerinde daha fazla etkili olduğu söylenebilir. Bilindiği gibi polimerlerin T_g sıcaklıkları, polimer zincirlerinin hareketliliğine bağlıdır. Eğer moleküler bağları sınırlarsa, zincir segmentlerinin

hareketi veya gevşemesi orjinal cam geçiş sıcaklığında zor ancak yüksek sıcaklıkta kolay olmaktadır [34]. Buradan hareketle T_g değerinin artmasının nano parçacıkların matris içerisindeki dağılımından ve polimer ile katkı maddesi arasındaki etkileşimden kaynaklandığı düşünülmektedir [35]. Ahmet vd. solvent casting metodu ile polilaktid (PLA) matris içerisine farklı oranlarda montmorillonite kil ilave ederek polimer film üretmişlerdir. PLA içerisindeki montmorillonite kil oranına bağlı olarak T_m ve T_g sıcaklıklarındaki değişimi DSC analizleri yardımı ile incelemişlerdir. Tablo 18'de PLA/kil kompozitlerin T_m ve T_g sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 17. PP/HNT ve PP/QM-HNT nanokompozitlerin T_g ve T_m sıcaklıkları [35]

Kompozitler	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)
PP	12,5	163,2
PP + %2 HNT	13,9	163,5
PP + %4 HNT	13,8	163,4
PP + %6 HNT	12,5	163,3
PP + %8 HNT	13,8	163,4
PP + %2 QM-HNT	15,6	163,3
PP + %4 QM-HNT	15,7	163,7
PP + %6 QM-HNT	13,8	163,2
PP + %8 QM-HNT	13,9	163,3

Tablo 18. PLA/Kil karışımının ısı özelliklerine kil miktarının etkisi [36]

Malzemeler	T_g , ($^\circ\text{C}$)	T_m , ($^\circ\text{C}$)
PLA	$61,4 \pm 0,20$	$179,9 \pm 1,10$
PLA/kil (97/3)	$61,7 \pm 0,07$	$180,4 \pm 1,04$
PLA/kil (94/6)	$60,1 \pm 0,11$	$179,2 \pm 1,20$
PLA/kil (91/9)	$60,6 \pm 0,12$	$180,0 \pm 1,06$

Tablo 18'de görüldüğü gibi PLA içerisine ilave edilen kil ile T_g sıcaklığında PLA/kil (97/3) kompozit hariç kısmi bir azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca kil oranının artması ile T_g sıcaklığında azalma gözlemlenmiştir. PLA içerisindeki kil oranının değişmesi ile T_m sıcaklığında da değişim gözlemlenmiştir. Ancak T_g sıcaklığında olduğu gibi bu değişim de sınırlı olmuştur. En yüksek T_m sıcaklık değerine PLA/kil (97/3) kompozitinde ulaşılmıştır. Genel olarak bakıldığında PLA içerisine ilave edilen montmorillonitin T_g ve T_m sıcaklıkları üzerinde çok etkili olmadığı görülmüştür [36].

3. Sonuçlar

Bu çalışmada nano katkıların polimer matrisli malzemelerin T_g ve T_m sıcaklıklarına olan etkisi daha önce yapılan çalışmalar doğrultusunda araştırılmıştır. Genel olarak nano katkıların cinsine, miktarına, şekline, boyutuna ve üretim yöntemlerine göre polimerik malzemelerin T_g ve T_m sıcaklıkları üzerindeki etkisinin değiştiği gözlemlenmiştir. Nano katkıların matris ile oluşturdukları ara yüzeyler, polimer zincirlerinin tabakalar arasına girmesi, matris malzeme ile aralarında yeni bağlar oluşturması ve yüzey alanlarının geleneksel makro boyuttaki katkı maddelerine göre büyük olması malzeme özelliklerini yakından etkilemektedir. Nano katkıların, polimerik nano kompozitlerin T_g sıcaklığı üzerindeki etkisinin T_m sıcaklığına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun nano katkıların polimer zincirlerinin hareketlerini kısıtlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Matris içerisindeki artan nano katkı miktarı ile polimer nano kompozitlerin T_g sıcaklıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda polimer matrise ilave edilen nano katkıların T_m sıcaklığını etkilediği görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda polimer matris içerisine optimum oranda ilave edilen nano katkıların malzemelerin T_g ve T_m sıcaklık değerlerini etkilediği ancak bu etkinin sınırlı olduğu söylenebilir.

Kaynaklar

- Lorenzo, M. L. D., Errico, M. E., Avella, M., Thermal and morphological characterization of poly (ethylene terephthalate)/calcium carbonate nanocomposites Journal of Materials Science, 37, 2351– 2358, 2002.

2. Saçaklı, Y., Değişik Partikül Boyutlarındaki Mg(OH)₂ Katkılı Polipropilen (Pp) Nanokompozitinin Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2011.
3. Sheng, N., Boyce, M. C., Parks, D. M., Rutledge, G. C., Abes, J. I., Cohen, R.E., Multiscale micromechanical modeling of polymer / clay nanocomposites and the effective clay particle. *Polymer*, Vol. 45, 487-506, 2004.
4. Olad, A., Nanotechnology and Nanomaterials| Advances in Direrse industrial Applications of Nanocomposites, ISBN 976953-307-202-9, 2011.
5. Sokolov, V. I., Stankevich, I. V., The fullerenes-New allotropic forms of carbon: Molecular and electronic structure, and chemical properties, *Russ. Chem. Rev.*, 62(5) 419-435, 1993.
6. Nie, B., Rotello, V., Attachment of fullerenes to materials: The importance of backbone-fullerene interactions. *J. Phys. Chem. Solids*, 58 (11) 1897-1899, 1997.
7. Ginzburg, B. M., Shibaev, L. A., Kireenko, O. F., Shepelevskii, A. A., Melenevskaya, E. Y., Ugolkov, V. L., Thermal degradation of fullerene containing polymer systems and formation of tribo polymer films, *Polym. Sci. A47(2)* 160- 174, 2005.
8. Pesetskii, S. S., Zhdanok, S. A., Buyakov, I. F., Bogdanovich, S. P., Solntsev, A. P., Krauklis, A.V., Structure and properties of polyamide 6 modified in melt with carbon nanomaterials. *DokladyNatsionalnoi Academi, Nauk Belarusi (Reports of National Academy of Science of Belarus)*, 48(6) 102-107, 2004.
9. Ke, Y. C., Stroeve, P., Polymer-Layered Silicate and Silica Nanocomposites, Elsevier, 3989780080457581, Amsterdam, 2005.
10. Pomogailo, A.D., Rozenberg, A. S., Ufliand, I. E., Metal nanoparticles, in *Polymers, Khimia, Moscow*, (Russian translation), 2000.
11. Ginzburg, V. V., Qiu, F., Paniconi, M., Peng, G., Jasnow, D., Balazs, A. C., "Simulation of Hard Particles in a Phase-Separating Binary Mixture," *Physical Review Letters*, Vol. 82, No. 20, pp. 4026-4029, 1999.
12. Tang, Y., Ma, T. J., "Controlling Structural Organization of Binary Phase-Separating Fluids through Mobile Particles," *Chemical Physics*, Vol. 116, No. 17, pp.7719-7723, 2002.
13. Laradj, M., MacNevin, G. J., "Phase Separation Dynamics in Binary Fluids Containing Quenched or Mobile Filler Particles," *Chemical Physics*, Vol. 119, No. 4, pp. 2275-2283, 2003.
14. Tanaka, H., Lovinger, A. J., Davis, D. D., "Pattern Evolution Caused by Dynamic Coupling between Wetting and Phase Separation in Binary Liquid Mixture Containing Glass Particles," *Physical Review Letters*, Vol. 72, No. 16, pp. 2581-2584, 1994.
15. Minelli, C., Geissbuehler, I., Eckert, R., Vogel, H., Heinzlmann, H., Liley, M., "Organization of Nanoscale Objects via Polymer Dimixing," *Colloid and Polymer Science*, Vol. 282, No. 11, pp. 1274-1278. 2004.
16. Mathur, V., Sharma, K., Evaluation of Morphological Effect on Thermal and Mechanical Performance of PS/PMMA/CdS Nanocomposite Systems *Advances in Nanoparticles*, 2, 205-216, 2013.
17. Agrawal, S.K., Sanabria-Delong, N., Coburn, J.M., Tew, G.N., Bhatia, S.R., Novel drug release profiles from micellar solutions of PLA-PEO-PLA triblock copolymers, *Journal of Controlled Release*, 112, 64-71, 2006.
18. Buzoğu, L., Blok Kopolimer Sentezi ve Biyolojik Uygulamaları, yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk üniversitesi, 2012.
19. Saçak, M., Polimer teknolojisi, Gazi Kitabevi, Ankara, 2005.
20. Paszkiewicz, S., Roslanec, Z., Szymczyk, A., Sptalsky, Z., Mosnacek, J., Morphology and Thermal Properties of Expanded Graphite (EG)/Poly (ethylene terephthalate) (PET) Nanocomposites. *CHEMIK*, 66, 1, 21-30, 2012.
21. Sagar, S., Iqbal, N., Maqsood, A., Bassyouni, M., MWCNTS Incorporated Natural Rubber Composites: Thermal Insulation, Phase Transition and Mechanical Properties. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 3, June 2014.
22. Lizundia, E., Oleaga, A., Salazar, A., Sarasua, J.R., Nano- and microstructural effects on thermal properties of poly (L-lactide) /multi-wall carbon nanotube composites, *Polymer*, 53, 2412-2421, 2012.
23. Lai, Y.H., Kuo, M.C., Huang, J.C., Chen, M., On the PEEK composites reinforced by surface-modified nano-silica, *Materials Science and Engineering A*, 458,158-169, 2007.
24. Qin, L., Qiu, J., Liu, M., Ding, S., Shao, L., Lü, S., Zhang, G., Zhao, Y., Fu, X., Mechanical and thermal properties of poly (lactic acid) composites withrice straw fiber modified by poly (butyl acrylate), *Chem Eng J*, 166: 772-778, 2011.
25. Khoo, R.Z., Ismail, H., Chow, W.S., Thermal and Morphological Properties of Poly (lactic acid) /Nanocellulose Nanocomposites, *Procedia Chemistry*, 19, 788-794, 2016.
26. Ibrahim, S., Johan, M. R., Thermolysis and Conductivity Studies of Poly (Ethylene Oxide) (PEO) Based Polymer Electrolytes Doped with Carbon Nanotube *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7, 2596 - 2615, 2012.
27. Abdulkhan, A., Hosseinzadeh, J., Dadashi, S., Mousavi, M., A Study of Morphological, Thermal, Mechanical and Barrier Properties of Pla Based Biocomposites Prepared With Micro and Nano Sized Cellulosic Fibers, *Cellulose Chem. Technol.*, 49 (7-8), 597-605 (2015).
28. Lee, K.S., Chang, Y.W., Thermal, Mechanical, and Rheological Properties of Poly(e-caprolactone) /Halloysite Nanotube Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.* Doi: 10.1002/App.38457.2013,
29. Ambuken, P. V., Stretz, H. A., Koo, J. H., Messman, J.M., Wong, De., Effect of addition of montmorillonite and carbon nanotubes on a thermoplastic polyurethane: High temperature thermomechanical properties, *Polymer Degradation and Stability* 102 160-169, 2014.
30. Naguib, H. F., Aziz, M. S. A., Saad, G. R., Effect of Organo-Modified Montmorillonite on Thermal Properties of Bacterial Poly(3-hydroxybutyrate), *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 53: 90-96, 2014.
31. Prashantha, K., Lacrampe, M.F., Highly, P. K., Dispersed Polyamide 11/Halloysite Nanocomposites: Thermal, Rheological, Optical, Dielectric, and Mechanical Properties, *J. Appl. Polym. Sci.* 130: 313-321, 2013.
32. Tham, W. L., Z. Ishak, A. M., Chow, W. S., Mechanical and Thermal Properties Enhancement of Poly (Lactic Acid) /Halloysite Nanocomposites By Maleic-Anhydride Functionalized Rubber, *Journal Of Macromolecular Science R, Part B: Physics*, 53:371-382, 2014.
33. Szymczyk, A., Roslanec, Z., Non-isothermal crystallization of poly(trimethylene terephthalate)/ single-walled carbon nanotubes nanocomposites, *Polimery*, 57, nr3, 2012.
34. Prashantha, K., Lacrampe, M. F., Krawczak, P., Processing and characterization of halloysite nanotubes filled polypropylene nanocomposites based on a masterbatch route: effect of halloysites treatment on structural and mechanical properties, *Express Polymer Letters* Vol.5, No.4, 295-307, 2011.
35. Zhang Y-Q., Lee J-H., Rhee J. M., Rhee K. Y., Polypropylene-clay nanocomposites prepared by in situ grafting-intercalating in melt, *Composites Science and Technology*, 64, 1383-1389, 2004.
36. Ahmed, J., Varshney, S. K., Auras, R., Hwang, S.W., Thermal and Rheological Properties of L-Polylactide/Polyethylene Glycol/Silicate Nanocomposites Films, *Journal of Food Science*, Vol. 75, Nr. 8, 2010.