



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Örselenmiş ve Örselenmemiş Killi Zeminlerin Drenajsız Kayma Mukavemeti, Bartın Üniversitesi Kutlubey Yazıcılar Kampüsü

Serdar ALLI*, Ermedin TOTİÇ

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

Geliş Tarihi: 12.07.2015 Düzeltme Tarihi: 28.07.2015 Kabul Tarihi: 17.08.2015

Özet

Bu çalışmada örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri ile alınan killi zemin numuneleri üzerine laboratuvar da konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç (UU) deneyleri yapılmış, drenajsız kayma mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Bartın Üniversitesi Kutlubey Yazıcılar Kampüsü yerleşkesinden alınan zemin numuneleri üzerine elek, hidrometre, kıvam limiti deneyleri yapılarak zemin sınıflandırılmış, zeminin endeks özellikleri belirlenmiştir. Kilin hassasiyeti, literatürde yer alan sınıflandırmalar kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan örselenmemiş kilin drenajsız kayma mukavemetinin, laboratuvar da aynı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan yoğrulmuş (remolded) kile göre daha büyük olduğu görülmüştür. Aradaki farkın fazla büyük olmaması kilin hassasiyetinin düşük olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Drenajsız Kayma Mukavemeti, Örselenmiş Kil, Örselenmemiş Kil, Hassasiyet

Undrained Shear Strength of Undisturbed and Disturbed Clayey Soils, Kutlubey Yazıcılar Campus Of Bartın University

Abstract

In this study, with the methods of disturbed and undisturbed sampling, unconsolidated undrained (UU) triaxial compression tests were performed on the clayey soils. The undrained shear strengths were compared. Soil that was taken from Kutlubey Yazıcılar Campus of Bartın University was classified by performed sieve and hydrometer analysis, atterbergs limits. Soil indeks properties were calculated. Sensitivity of the clay was evaluated by using the classification ranges in the literature. From the experimental results, it is seen that undrained shear strength of undisturbed clay is bigger than that of remolded clay prepared in the same water content and dry unit weight with the undisturbed clay. That the difference is small shows the sensitivity of the clay can be considered as low.

Keywords: Undrained Shear Strength, Disturbed Clay, Undisturbed Clay, Sensitivity

1. Giriş

Zemin numuneleri araziden örselenmiş ve örselenmemiş örnekler olmak üzere iki şekilde alınabilmektedir. Dokusu, yapısı, boşluk oranı, su muhtevası ve arazideki gerilme koşulları değiştirilmeden alınmış örneklere örselenmemiş örnekler, bu özellikleri korunarak alınamamış örneklere ise örselenmiş örnekler denilmektedir [1]. Laboratuvar dayanım ve deformasyon deneylerinin arazideki durumunu en iyi temsil eden numuneler üzerine yapılması gerektiğinden pek çok laboratuvar deneyleri örselenmemiş zemin numuneleri üzerine yapılmaktadır. Örselenmiş zemin numuneleriyle ise sınıflandırma ve kompaksiyon deneyleri yapılabilmektedir. [2,3,4].

Killi zeminlerden örselenmemiş örnek alınmasının mümkün olmadığı ya da laboratuvar deneyleri için örselenmemiş numune sayısının yetersiz olduğu durumlarda, örselenmiş olarak araziden alınan zeminlerin, örselenmemiş örnekle aynı su muhtevası ve sıklığında dolayısıyla arazideki doğal zeminle aynı su muhtevası ve sıklığında olacak şekilde tekrardan yoğrulup sıkıştırılmasıyla hazırlanan numuneler kullanılmaktadır. Böylece laboratuvar da arazideki özelliğini en iyi temsil eden zemin örnekleri elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu şekilde hazırlanmış killi zeminlere, yoğrularak (remolded) hazırlanmış killi zeminler denilmektedir.

Killerin sabit su muhtevasında yoğrulma ve işlenme sürecinin onu tıpkı diğer kolloid malzemelerde olduğu gibi daha yumuşak hale getireceği Terzaghi vd [5] tarafından ifade edilmiştir. Yazarlar bu yumuşamanın nedenini üç farklı sebeple açıklamışlardır: absorbe kil tabakalarındaki su molekülleri ve iyonların muntazam yöneliminin bozulması, kil tabakalarının kenar yüzey yöneliminden ağırlıklı olarak yüz yüze etkileşime geçmesi, kilin sedimentasyon ve

konsolidasyon süresince kazandığı yapının bozulması. Bu örselenmenin ve yumuşamanın etkisiyle dayanımda azalmanın meydana geleceği ve aradaki farkın farklı killer için farklı değerler alabileceği yine yazarlarca belirtilmiştir. Zemin mekaniğinde bu davranış şekli hassasiyet kavramıyla ifade edilmektedir [5,6,7].

Hassasiyet bir kilin kıvamı üzerine yoğrulmanın etkisini ifade eden bir kavram olup, kilin örselenmemiş veya doğal dayanımının aynı su muhtevasındaki yoğrulmuş dayanımına oranı olarak tanımlanmaktadır [5]. Dayanım serbest basınç dayanımı oranları ya da kesme dayanımı oranları olarak göz önüne alınabilmektedir [6]. Literatürde killerin hassasiyetini değerlendirmede değişik hassasiyet değer aralıkları mevcut olup, Skempton ve Northey [7] Bjerrum [8] tarafından yapılan çalışmalar bunlara örnek olarak verilebilir.

Killi zeminlerin örselenmemiş ve yoğrulmuş kayma mukavemetlerinin belirlenmesi onların mühendislik davranışlarının yorumlanmasında oldukça önem taşımaktadır. Örselenmemiş ve yoğrulmuş dayanım arasındaki fark çok büyük olduğunda bu zeminler göçme karşısında son derece hassas olabilmektedirler. Örselenmedikleri sürece oldukça mukavim olmalarına karşın bir sebepten dolayı kesmeye maruz kalmaları halinde her sıvı gibi akabilmektedirler [6]. Nitekim doğu Kanada ve İskandinavya'da bu şekilde aşırı hassas killerin varlığı ifade edilmiştir [6,7,8]. Örselenmemiş ve yoğrulmuş dayanımlarının belirlenmesinin bir faydası ise özellikle örselenmemiş numune alınımının mümkün olmadığı ya da sayılarının yetersiz olduğu durumda yoğrulmuş numune dayanımından arazi dayanımının bu noktada belirlenmesine yardımcı olabilesidir.

Bu çalışmada örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri gözetilerek Bartın Üniversitesi Kutlubey Yazıcılar

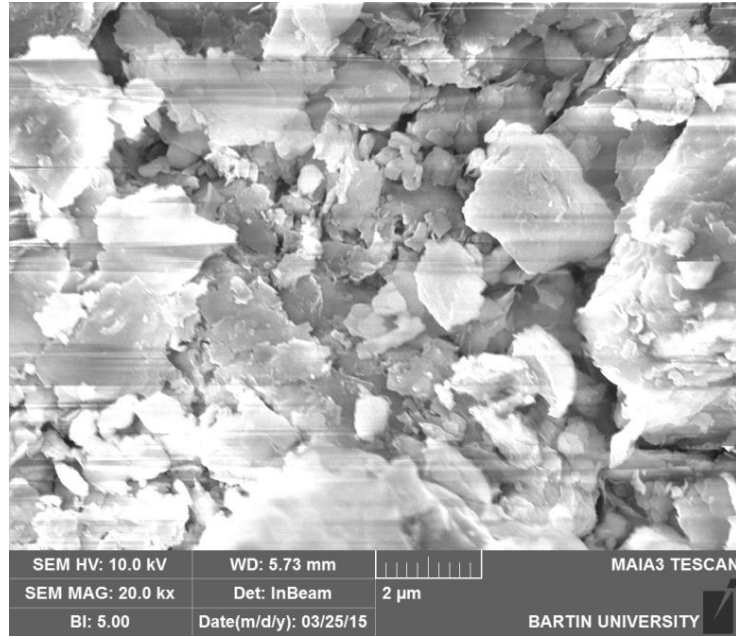
Kampüsü yerleşkesinden alınan killi zemin numuneleri üzerine laboratuvarında konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmış, örselenmemiş ve yoğrulmuş zeminlerin drenajsız kayma mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Killi zemin, elek analizi hidrometre ve kıvam limiti deneyleri yapılarak sınıflandırılmış, zeminin endeks özellikleri belirlenmiştir. Literatürde farklı ülkelerin killerin hassasiyetini değerlendirmek üzere kullandığı hassasiyet aralığından kilin hassasiyeti değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

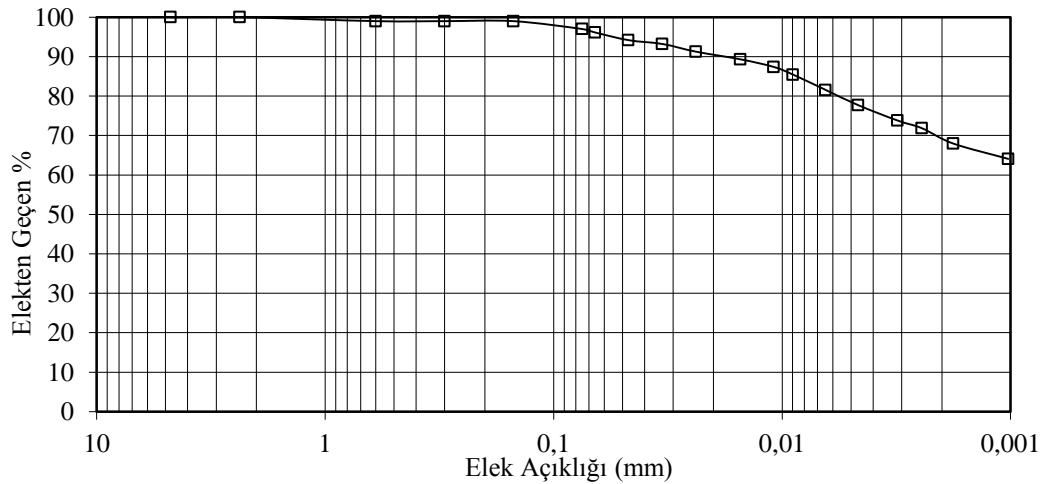
DeneySEL çalışmalarda kullanılan kil Bartın Üniversitesi Kutlubey Yazıcılar Kampüsü yerleşkesinden alınmıştır. Killi zeminden örselenmemiş örnekler 38 mm çapında 76 mm yüksekliğinde ince cidarlı çelik numune alıcılar kullanılarak alınmıştır. Killi zeminden örselenmiş zemin numuneleri de alınarak örselenmemiş örneklerle aynı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında olacak şekilde konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyler için yoğrulmuş deney numuneleri hazırlanmıştır.

Yoğrulmuş deney numuneleri zeminin özelliklerini daha iyi temsil edebilmek için örselenmemiş zemin numunelerinden daha fazla sayıda hazırlanmıştır. Toplamda üç örselenmemiş zemin numunesi 50, 100, 200 kPa çevre basınçlarında, altı yoğrulmuş hazırlanmış zemin numunesi 50, 100, 200, 300, 400, 500 kPa çevre basınçlarında konsolidasyonsuz drenajsız olarak ASTM D 2850-03a [9]'e göre üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır ve drenajsız kayma mukavemetleri hesaplanmıştır.

Alınan zemin numunelerine elek analizi hidrometre kıvam limiti deneyleri yapılarak zemin sınıflandırılmıştır. Kilin endeks özellikleri belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılan kilin likit limit değeri (LL) 90, plastik limit değeri (PL) 39 olarak belirlenmiştir. Tablo 1 'de deneySEL çalışmalarda kullanılan kilin bazı endeks özellikleri verilmiştir. Mühendislik davranışının daha iyi anlaşılabilmesine olanak sağlaması açısından Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüsü ve dane boyu dağılım eğrisi Şekil 1 ve Şekil 2 'de sunulmuştur.



Şekil 1. Kullanılan kile ait SEM görüntüsü



Şekil 2. Killi zemine ait dane boyu dağılım eğrisi

Tablo 1. Kilin Endeks Özellikleri

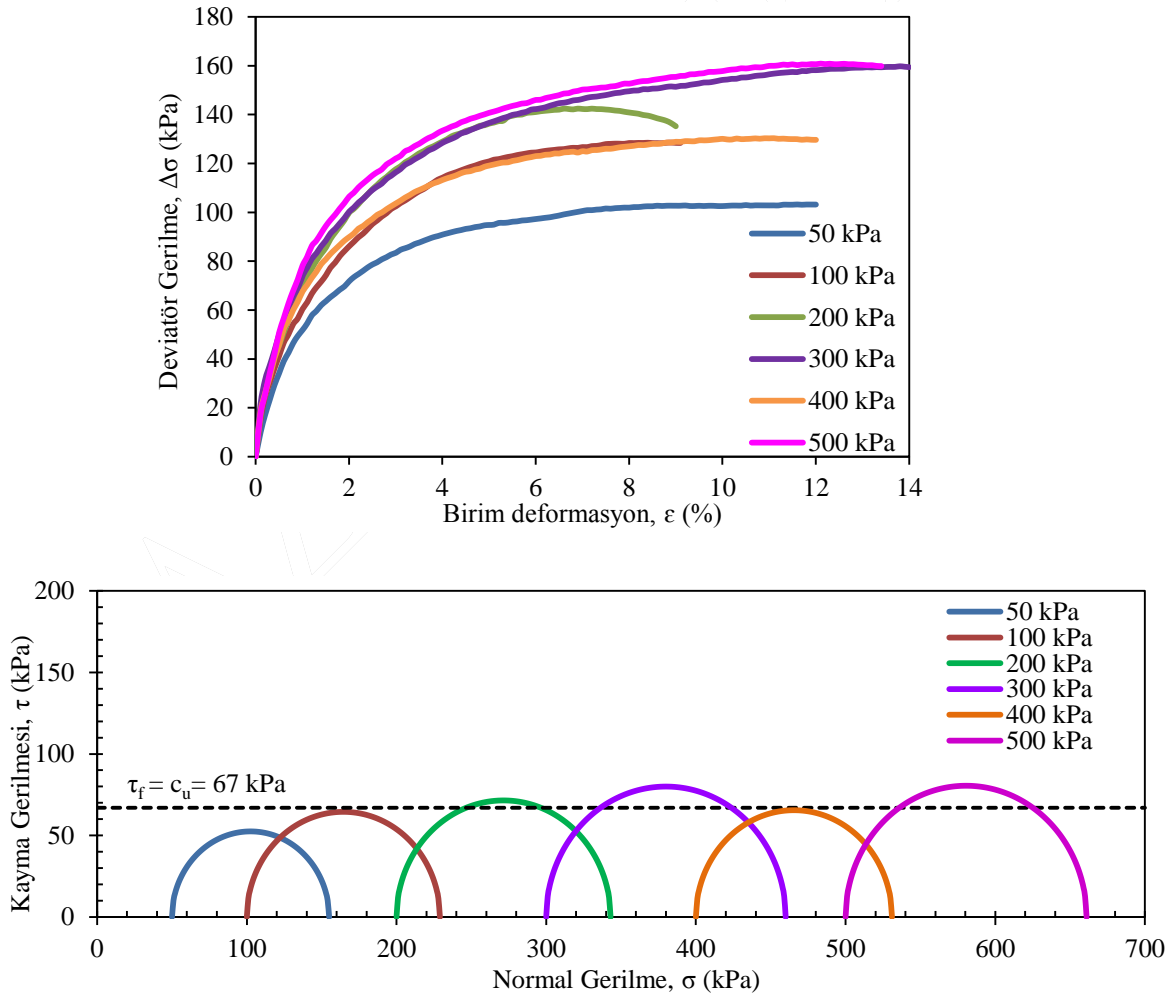
Zemin Sınıfı (USCS)	CH
Likit Limiti	90
Plastik Limiti	39
Plastisite İndisi	51
Özgül Ağırlık, (Gs)	2,725
Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ_n , kN/m ³)	18,6
Doğal Su Muhtevası (%)	37
Zeminin Doğunluk Derecesi, Sr, (%)	100
Çakıl (%)	-
Kum (%)	3
Silt (%)	28
Kil (%)	69

3. Bulgular ve Tartışma

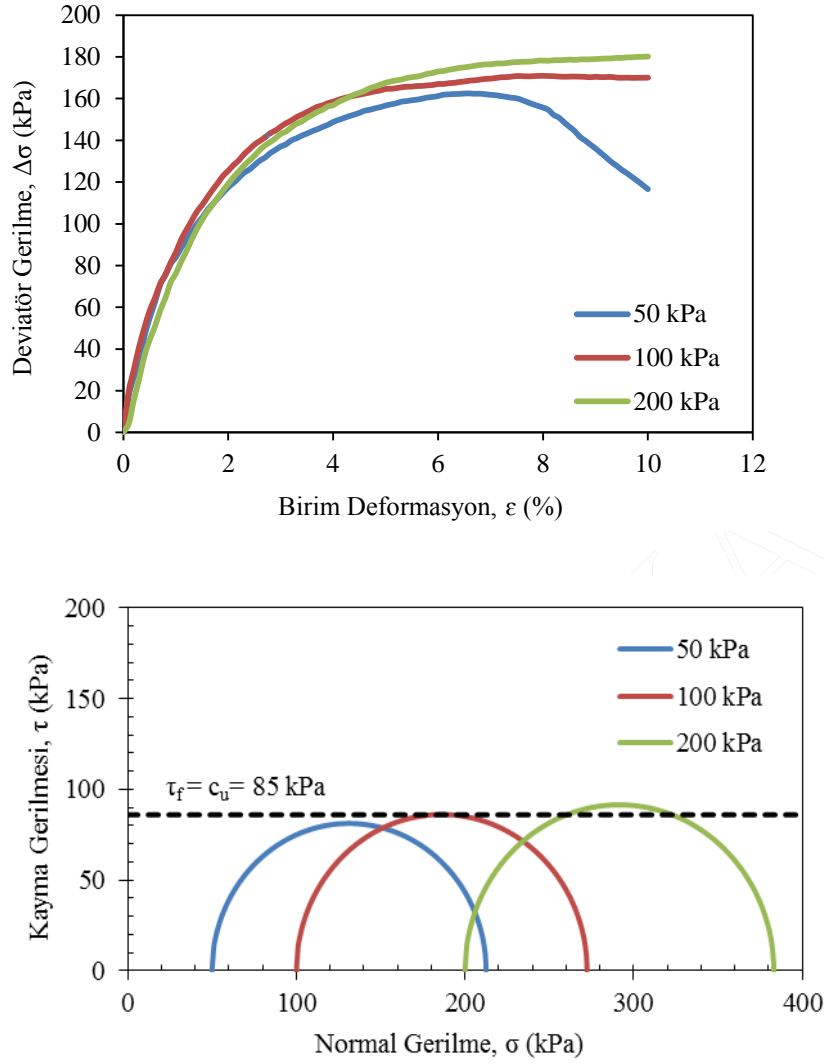
Bartın Üniversitesi Kutlubey Yazıcılar Kampüsünden alınan örselenmemiş ve örselenmiş zeminin drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesi için konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmış sonuçları tartışılmıştır.

Konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri doğun kohezyonlu zeminlerde hücre basıncının sabit tutularak, zeminin su muhtevası ve boşluk oranında değişime izin verilmeden zeminin kayma direncinin ölçüldüğü bir deney olarak açıklanmaktadır [9]. Zemin suya doğun olduğundan ve deneyde drenaja müsaade edilmediğinden hücre basıncının artırılarak numunenin kesilmesiyle zeminin kayma dayanımı

değişmemektedir. Çünkü deney süresince su muhtevası ve boşluk oranı hep sabit kalmaktadır. Artan hücre basıncı ve devitör gerilme boşluk suyu basıncı tarafından karşılanmakta ve yenilmede toplam gerilmelerden bağımsız sadece bir adet efektif gerilme tanımlanmaktadır [10]. Dolayısıyla yenilmede bütün Mohr daireleri aynı çapta olmaktadır [9,10]. Numunelerin homojen olmaması veya deneyde numune hazırlanmasında su muhtevasında meydana gelebilecek küçük değişimler nedeniyle kayma dirençlerinde küçük farklılıklar ortaya çıkabilirse de Skempton [11], deney sonucu olarak doğun kohezyonlu zeminlerin kırılma zarfının yatay olarak çizilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu durumda yenilme zarfı, mohr dairelerine en iyi uyan yatay doğru olarak göz önüne alınabilmektedir [11,12].



Şekil 3. Yoğrulmuş numunelere ait konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyi sonuçları



Şekil 4. Örselenmemiş numunelere ait konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyi sonuçları

Şekil 3 ve Şekil 4'te yoğunlaştırılmış ve örselenmemiş numunelerin UU üç eksenli basınç deney sonuçları sunulmuştur. Şekil 3 ve Şekil 4'teki grafiklerden artan hücre basıncıyla zeminlerin dayanımının az da olsa, yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı bir miktar değiştiği görülmektedir. Bundan dolayı zeminlerin drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesi için mohr dairelerine en iyi uyum yatay doğru yenilme zarfı olarak burada göz önüne alınmıştır.

UU deney sonuçlarından örselenmemiş zemin için drenajsız kayma mukavemeti 85 kPa, örselenmemiş numunelerle aynı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında olacak şekilde yoğunlaştırılmış zeminin drenajsız kayma mukavemeti 67

kPa olarak hesaplanmıştır. Bu durum, Terzaghi vd [5] tarafından ifade edilen dayanım farklılığını doğrulamakla beraber aradaki farkın bilinmesi geoteknik mühendisliğinde önem arz etmektedir.

Kilin hassasiyeti daha önceden örselenmemiş dayanımın yoğunlaştırılmış dayanıma oranı olarak ifade edilmişti ve mühendislik davranışındaki önemi vurgulanmıştı. Örneğimizdeki kilin hassasiyet değeri örselenmemiş drenajsız kayma mukavemetinin yoğunlaştırılmış drenajsız kayma mukavemetine oranından 1,3 olarak hesaplanmaktadır. Tablo 2'de ABD, Kanada ve İsveç gibi ülkelerin killerin hassasiyetini değerlendirmek üzere kullandığı değerler verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde kilin hassasiyetinin düşük olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.

Tablo 2. Hassasiyet için tipik değerler

Durum	Hassasiyet (S_f) Aralığı		
	ABD	Kanada	İsveç
Düşük hassasiyet	2-4	<2	<10
Orta hassasiyet	4-8	2-4	10-30
İleri derece hassasiyet	8-16	4-8	>30
Çabuk	16	8-16	>50
Çok çabuk	-	>16	>100

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmalarda örselenmemiş ve örselenmiş numune alma yöntemleri gözetilerek Bartın Üniversitesi Kutlubey Yazıcılar kampüsü yerleşkesinden killi zemin numuneleri alınmış örselenmemiş ve yoğrulmuş drenajsız kayma mukavemetleri hesaplanmıştır.

Konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli deney sonucunda örselenmemiş killi zeminin drenajsız kayma mukavemeti 85 kPa, örselenmemiş örneklerle aynı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığındaki yoğrulmuş deney numunelerinin drenajsız kayma mukavemeti ise 67 kPa olarak hesaplanmıştır. Yoğrulmuş numunelerin dayanımındaki azalmanın Terzaghi vd [5] tarafından ifade edilen aşağıdaki nedenlerden kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir.

- Kil tabakalarındaki su molekülleri ve iyonların muntazam yöneliminin bozulması,
- Kil tabaklarının kenar yüzey yöneliminden ağırlıklı olarak yüz yüze etkileşime geçmesi,
- Kilin sedimantasyon ve konsolidasyon süresince kazandığı yapının bozulması.

Aradaki dayanım farkının büyük olmaması kilin hassasiyetinin düşük olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Kaynaklar

1. Ünsal, N., İnşaat Mühendisleri için Jeoloji, Alp Yayınevi, 2006, 376 s.

2. Hvorslev, M. J., "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes" U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1949.
3. Rowe, P.W., "The Relevance of Soil Fabric to Site Investigation Practice, Geotechnique, 22, 193-300, 1972.
4. BS5930, Code of Practice for Site Investigations, BSI, London, U.K, 1981.
5. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G., Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1996, 549 s.
6. Holtz, R.D., and Kovacs, W..D., An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd Edition, 2010, 864 s.
7. Skempton, A.W., and Northey, R.D., "The Sensitivity of Clays, Geotechnique, Vol.III, No. 1, 30-53, 1952.
8. Bjerrum, L., "Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays, Geotechnique, Vol. IV, No. 2 49-69, 1954.
9. ASTM D 2850-03a, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained, 2010.
10. Bishop, A.W., and Henkel, D.J., "The Measurement of Soil Properties in Triaxial Test, Edward Arnold Ltd., London, 2nd Ed., 1962, 228 s.
11. Skempton, A.W., "The $\phi_u=0$ Analysis for Stability and Its Theoretical Basis, Second Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Engrg, Vol. 1, 72-77, 1948.
12. Sert S., Bol E., Özocak A., Kohezyonlu Zeminde Doygunluk Derecesinin Değişiminin Drenajsız Kayma Direncine Etkisi, 5. Geoteknik Sempozyumu, 5-7 Aralık 2013, Adana.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Hafif Agregalı Polimer Betonların Özellikleri

Osman GENÇEL^{1*}, Tayfun UYGUNOĞLU², Fuat KÖKSAL³, Muhammed Yasin DURGUN¹

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

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Afyon / TÜRKİYE

³Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yozgat / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 08.10.2015 Düzeltme Tarihi: 28.10.2015 Kabul Tarihi: 03.11.2015

Özet

İnşaat sektöründe polimer beton uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Polimer betonlar çimento tabanlı betonlara göre bazı özellikleri daha üstündür. Bunların başında yüksek dayanım, korozyondan etkilenmeme, kimyasal etkilere karşı yüksek direnç, düşük su emme oranı ve düşük ağırlığa sahip olmaları gelmektedir. Bu çalışmada, hafif polimer betonların fiziksel mekanik ve termal özellikleri araştırılmıştır. Hafif polimer betonların üretiminde pomza agregası kullanılmıştır. Karşılaştırma amacıyla kırmataş agregalı polimer betonlarda üretilmiştir. Ayrıca polimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine çelik lif ilavesinin etkisi de araştırılmıştır. Kullanılan çelik liflerin çapı ve boyu sırasıyla 0.16 mm ve 5 mm'dir. Polimer betonların içerisine %, %0.5 ve %1 oranında ilave edilmiştir. Elde edilen hafif ve lif katkılı polimer betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, ağırlıkça su emme, görünen porozite ve birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre pomza katkılı hafif polimer betonların çimento esaslı hafif betonlara göre daha yüksek dayanıma ve daha düşük birim ağırlığa sahip olduğu görülmüştür. Betonarme uygulamalarında istenen 20 MPa değerinden daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Ayrıca hafif polimer betonlar çimento tabanlı betonlara göre daha yüksek ısı performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer Beton, Hafif Beton, Fiziksel Özellikler, Mekanik Özellikler

Properties of Polymer Concretes Incorporating Lightweight Aggregates

Abstract

In construction sector, applications of polymer concrete have been increased day by day. Some properties of polymer concretes are superior than those of cement based concrete. High compressive strength, resistance to corrosion and chemical effects, low water absorption and weight are among these. In this study, physical, mechanical and thermal properties of lightweight polymer concrete were investigated. Pumice was used as aggregate to produce lightweight concrete. Polymer concretes with crushed stone was produce for comparison. Also influence of steel fiber content on physical and mechanical properties was investigated. The diameter and length of the steel fiber is 0.16 mm and 5 mm, respectively. The steel fibers were added to polymer concretes in ratio of 0%, 0.5% and 1%. On the lightweight polymer concrete, compressive and flexural strength, ultrasonic pulse velocity, water absorption by weight, specific porosity, dry unit weight and thermal conductivity experiments was carried out. According to the obtained results, it was found that the pumice lightweight polymer concretes have higher strength and lower unit weight than cement-based lightweight concrete. Value over 20 MPa which is required for reinforced concrete applications was obtained. Also lightweight polymer concrete presents a higher thermal performance than that of cement based concrete.

Keywords: Polymer Concrete, Lightweight Aggregates, Physical Properties, Mechanical Properties

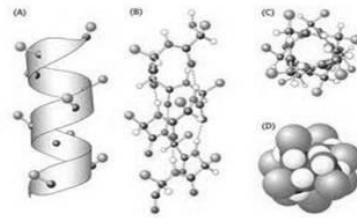
1. Giriş

İnşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzeme normal Portland çimentosudur. Tüketimdeki bu yüksek oran enerji, ekonomik ve çevresel problemleri de ortaya çıkarmıştır [1]. Dünyada toplam CO₂ yayılımının %7'si çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir [2,3]. Bu yüzden Portland çimentosuna alternatif çimentolar üretmek güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Ayrıca çimento, yüksek sıcaklıkta (1400-1500°C) üretildiği için önemli ölçüde enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek maliyetlerle elde edilmektedir [2].

Birçok çalışmada; çimento yerine kullanılacak polimer gibi yeni bağlayıcı malzemelerin üretilmesi ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar da bu bağlayıcıların inşaat sektöründe kullanılarak çimentosuz harç ve beton üretiminin gerçekleştirilmesi üzerine olmaktadır. Bunların başında polimer betonlar gelmektedir [4]. Polimer betonlarda agregaları birleştirme işlemini gören bağlayıcı malzeme polysterden elde edilen polimerdir. Polimer betonların özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmış olup, genellikle normal agregalarla üretilen agregaların kullanımı araştırılmıştır.

Yapı sektörü üretiminde kullanılan (taşıyıcı, kaplama, yalıtım, dekoratif vb. amaçlı) malzeme çeşitliliğinin en yüksek olduğu sektörlerden biridir. Gelişen hızlı kentleşme ve sanayileşmede açığa

çıkan bu malzemelerin yapı sektöründe değerlendirilip geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen yeni malzemenin ham maddeden üstün ve farklı özellikler göstermesi amaçlanır. Bu sayede hem ekolojik denge sağlanmakta hem de işlevselliği farklı yeni malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemelerin başında polimerik malzemeler gelmektedir. Polimer, monomer denilen ufak moleküllerin birbirine kovalent bağ ile bağlanarak oluşturdukları büyük bir moleküldür (Şekil 1). İnsanların el ele tutuşmasıyla oluşan zincire benzetilebilirler [5]. Canlıların yaşam sürecinde önemli rol oynayan pek çok organik polimer olduğu gibi, doğada da pek çok inorganik polimer bulunur. Ayrıca laboratuarlarda çeşitli yöntemler kullanılarak çok sayıda yapay polimer üretilmiştir.



Şekil 1. Polimerlerin genel görünümü

Betonarme yapılarda betonun zati yükünün azaltılması için hafif agregalı beton kullanılması üzerine uzun yıllardır çalışmalar devam etmektedir [6]. Hafif betonların yapılarda kullanılmasıyla yapıların tüm ağırlığında önemli bir azalma sağlanır. Bunun olumlu etkilerini 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 [7-8]. TS EN 206-1 [7]'de hafif beton, etüv kurusu 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.

Hafif agregalı polimer betonlar üzerine de çalışmalar yapılmışsa da oldukça kısıtlı kalmıştır. Ülkemizde çok miktarda bulunan pomzalı polimer betonda kullanılarak polimer betonun birim ağırlığının azaltılmasıyla hem ülkemizde mevcut bulunan pomzanın farklı kullanım alanlarının kazandırılması hem de polimer beton teknolojisine farklı üretim teknikleri kazandırılacaktır. Çimento yerine polimer malzemelerin kullanılmasıyla Portland çimentosunun üretiminden dolayı meydana gelen CO₂ emisyonu azalarak çevre kirliliği önemli derecede azaltılmasına katkı sağlanacaktır. Çimento üretimi esnasında harcanan enerji kaybının azaltılması amaçlanmaktadır. Normal portland çimentosuna alternatif olarak üretilecek polimer çimento ile betonun priz alma süresi kısaltılacak ve bundan dolayı betonun kalıp alma süresi ve bakım maliyetinin azalacağı beklenmektedir.

Günümüzdeki araştırmalarda enerji, çevre ve ekonomik problemlerin çözümü doğrultusunda çalışmalara ağırlık verilmektedir. Bu çalışmalarda; ülke ekonomisine, çevreye katkıda bulunmak için, atıklardan ülkelerdeki doğal kaynaklara kadar mevcut, alternatif olarak kullanılabilir, yararlı olabilecek ya da zararlı önenecek her konuda çalışmaya ağırlık verilmektedir. Bunlardan inşaat sektörüne düşen kısmı ise en yoğun kullanılan malzeme olarak çimento üzerindeki problemlerin azaltılması ve doğal, ucuz malzemelerden kullanılması konusunda araştırmalar sürmektedir.

Türkiye 2009 yılında Avrupa'nın en büyük, Dünya'nın ise 5. en büyük çimento üreten ülkesi oldu. 2011 yılında ise dünyanın en çok çimento üreten 6. ülkesiyiz. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından verilen istatistikî bilgilere göre ülkemizde 2011 yılının ilk 3 ayında çimento üretiminde %2'lik büyüme sağlamıştır [1]. Bu gelişmeler olumlu gibi görünse de aslında sera gazlarından CO ve CO₂ gazlarının salınımları, üretim prosesinde atıkların ülkemizde kalması bakımından oldukça düşündürücüdür. Çimento üretiminde, pişirme sırasında, kimyasal reaksiyonlar sonucunda doğaya bırakılan atıkların başında CO ve CO₂ gelmektedir. Bu nedenle, özellikle bazı Avrupa ülkeleri çimentonun üretimini en zahmetli kısmı olan pişirme aşamasını kaldırmışlardır. Bunun yerine Türkiye gibi çimento üretiminde öncü olan ülkelerden klinkeri (pişirme işlemi sonrasında elde edilen ürün) ithal ederek öğütüp paketlemekte ve kendi piyasasına sunmaktadırlar. Diğer yandan dünya ülkeleri çimentosuz beton üretimi üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmaların başında polimer teknolojisi gelmektedir.

Bu çalışmada beton teknolojisinde kullanımı araştırılan polimer reçinesi çimento yerine bağlayıcı olarak kullanılması ile üretilen pomza agregalı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Genelde normal agregaların kullanılmasıyla üretilen polimer betonun teknolojisine hafif polimer betonların özellikleri de ortaya konarak literatürdeki boşluk doldurulacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Agregalar

Hafif ve yarı hafif polimer betonların üretiminde hafif agregalar olarak pomza agregası kullanılmıştır. Pomza agregası, Bartın'da bulunan Yazlar A.Ş.'den temin edilmiştir. Kullanılan pomza Kayseri yöresine aittir. Pomzanın kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Normal agregalar olarak kireç tabanlı kırmataş agregası kullanılmıştır. Kırmataş agregası Bartın'da bulunan Pelenkoğlu hazır beton tesisinden temin edilmiştir.

Tablo 1. Pomzanın kimyasal bileşenleri

Bileşen	%
SiO ₂	56.85
Al ₂ O ₃	16.72
Fe ₂ O ₃	4.66
MgO	1.84
CaO	5.39
Na ₂ O	4.61
K ₂ O	5.19
SO ₃	-
K.K.	2.8

2.2. Bağlayıcı

Bağlayıcı olarak polyester reçine kullanıldı. Polyester reçine, izofalik asit/ NPG esası, akrilik modifiye UV dayanımlı doymamış poliester reçinedir. Polyester tek başına bağlayıcı özellik gösterememektedir. Bu nedenle methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) ve kobalt ile beraber kullanılmıştır. Kullanılan polyester reçinenin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Reçinenin kullanım oranı 1 kg polyester reçine + 15 g MEKP + 2 g kobalt şeklindedir.

Tablo 2. Polyester reçinesi teknik özellikleri

Renk	Saydam
Yoğunluk	1.076 g/cm ³
Jel süresi	33 dk.
Monomer oranı	%40
Tam mukavemet	7 gün
Raf ömrü	Açılmamış orijinal ambalajında 12 ay

2.3. Çelik Lif

Hafif agregalı polimer betonların üretimlerinde ayrıca farklı oranlarda çelik lifler kullanılmıştır. Çelik liflerin boyu 12 mm ve çapı 0.6 mm olup buna bağlı olarak da narinlik oranı 20'dir. Özgül ağırlığı 7.8 olan çelik lifler polimer beton karışımı sırasında karışıma dağıtılarak ilave edilmiştir (Şekil 2).



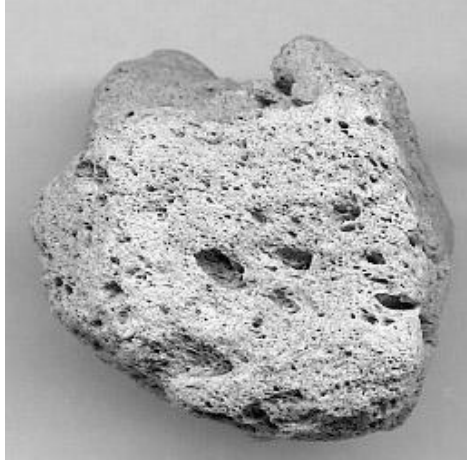
Şekil 2. Çelik liflerin görünümü.

2.4. Pomza

Pomza, birbirine bağlantısız boşluklu, süngerimsi, silikat esaslı, volkanik olaylar sonucunda oluşmuş, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, birim hacim ağırlığı 1 g/cm³'ten küçük, gözenekli camsı bir kayadır [9]. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanım türü en geniş olan asidik pomza, beyaz ve kirli renkte olmaktadır. Bazik pomza ise siyahımsı renkteki pomza türüdür. Asidik karakterli pomzalarda silis oranı daha yüksek olup, inşaat

sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Diğer taraftan bazık karakterli pomzalar da alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranda bulunması nedeniyle diğer endüstriyel alanlarda kullanım alanı bulabilmektedir. Her iki

pomza türü de oluşum sırasında ani soğuma ve gazların bünyeyi ani olarak terk etmesi sonucu oldukça gözenekli bir yapı kazanmışlardır (Şekil 3) [10].



Şekil 3. Pomzanın genel görünümü

Tablo 3. Pomzanın karakteristik özellikleri

Deney adı	Pomza	Kırmataş agregası	Standart
Yüzey kuru suya doygun hacim özgül ağırlığı (g/cm ³)	1.65	-	TS EN 1097-6 [11]
Görünen özgül ağırlık (g/cm ³)	2.2	2.67	TS EN 1097-6 [11]
Su emme (%)	37.2	3.14	TS EN 1097-6 [11]
Gevşek birim hacim ağırlık (kg/m ³)	729	1534	TS EN 1097-3 [12]
Organik madde	-	Açık sarı	TS EN 1744-1 [13]

2.5. Numunelerin Üretimi

Pomza agregalı polimer betonların üretimlerinde ön denemelerde elde edilen karışım oranları kullanılmıştır. Polimer beton üretiminde reçine oranı %10-%40 oranında değişim göstermektedir. Bu değişim, kullanılan agreganın türü ve gradasyonuna bağlıdır. Tane boyutu küçüldükçe agregaların yüzey alanı arttıkça ihtiyaç duyulan bağlayıcı miktarı artmaktadır. Eğer agregası gözenekli bir yapıya sahip ise karışımın reçine ihtiyacı artmaktadır. Üretimde kullanılan karışım oranları aşağıda Tablo 4'de verilmiştir. Burada NPB, "normal polimer beton", YHPB, "yarı hafif polimer beton" ve HPB, "hafif polimer beton" numunelerini ifade etmektedir.

Tablo 4. Karışım oranları

Beton türü	Reçine oranı (MEKP ve kobalt dahil)	Kırmataş	Pomza
NPB	%20	%80	-
YHPB	%25	%37.5	%37.5
HPB	%30	-	%70

Polimer beton üretimine geçmeden önce agregalar 105±5°C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar kurutuldu. Polimer beton üretim kalıplara yerleştirilmeden önce kalıp ayırıcı ile kaplanmıştır. Üretilen numuneler 10×10×50 cm ebatlı prizmalara eğilme dayanımını tayin etmek için üretilmiştir (Şekil 4). Φ15×30 cm ebatlı numuneler basınç dayanımını ölçmek için üretilmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Polimer betonların dökümü



Şekil 5. Üretilen polimer betonlar

2.6. Uygulanan Deneyler

Kür işlemi uygulanarak sertleşen numuneler üzerinde basınç dayanımı, ağırlıkça su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik, dinamik elastisite modülü ve ultrases geçiş hızı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Basınç dayanımı

Basınç dayanımının belirlenmesinde TS EN 12390-3 [14]'a göre Şekil 10'de verilen tam otomatik basınç presi kullanıldı. Basınç presinin kapasitesi 300 ton'dur. Tüm serilerden basınç dayanımı için 3'er adet silindirik numune kullanılmış olup, deney

sonucu olarak bu üç numunenin basınç dayanımı deney sonucunun aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımının belirlenmesinde TS EN 12390-5 [15]'a göre Şekil 7'de verilen tam otomatik pres kullanıldı. Eğilme presinin kapasitesi 20 ton'dur. Tüm serilerden eğilme dayanımı için 3'er adet 10×10×50 cm ebatlı prizma numune kullanılmış olup, deney sonucu olarak bu üç numunenin eğilme dayanımı deney sonucunun aritmetik ortalaması kullanılmıştır.



Şekil 6. Basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan pres



Şekil 7. Numunelerde eğilme dayanımının ölçülmesi

Birim ağırlık, görünen porozite, su emme

Üretilen numunelerin 7 gün sonraki birim hacim ağırlık, görünen porozite, su emme ve ultrases hızı geçişi özelliklerini kapsayan fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu deneylerden ultrases hızı geçişi haricindeki özelliklerin belirlenmesinde Arşimet prensibi kullanılarak, numunelerin 24 saat suya doygun ağırlıkları, su içerisinde asılı ağırlıkları ve etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonraki ağırlıkları kullanılarak belirlenmiştir.

Numunelerde Arşimet prensibine göre numunelerin etüv kurusu halindeki (W_o) suya doygun havada (W_1) ve su içerisinde (W_2) ağırlıkları alındıktan sonra Denklem (1), (2) ve (3) kullanılarak sırasıyla yoğunluk (BHA), ağırlıkça su emme (W_w) ve görünen porozite (GP) değerleri belirlenmiştir.

$$BHA = \frac{W_o}{(W_1 - W_2)} \quad (1)$$

$$W_w = \frac{W_o}{(W_1 - W_o)} \times 100 \quad (2)$$

$$GP = \frac{(W_1 - W_o)}{(W_1 - W_2)} \times 100 \quad (3)$$

Ultrases geçiş hızı

Hafif agregalı polimer betonların yoğunluklarıyla ilişkili olarak $10 \times 10 \times 50$ cm ebatlarındaki prizma numunelerde ultrases geçiş hızı süreleri ölçülmüştür (Şekil 8). Literatürden de bilindiği gibi yoğunluğu fazla olan betonların dayanımları da yüksek olmaktadır. Dolayısıyla ultrases dalgaları daha yoğun beton içerisinde daha hızlı geçmektedir.



Şekil 8. Numunelerde ultrases geçiş süresinin ölçülmesi.

Polimer betonların basınç dayanımlarının tahribatsız olarak tahmin edilebilmesi için bir kenarı 100 mm olan küp numunelerde ultrases geçiş süreleri ultrasonik test cihazıyla ölçülmüştür. Ultrases geçiş süreleri ölçüldükten sonra verilen Denklem (4) yardımıyla polimer betonların ultrases geçiş hızları belirlenmiştir.

$$U = \frac{L}{t} \quad (4)$$

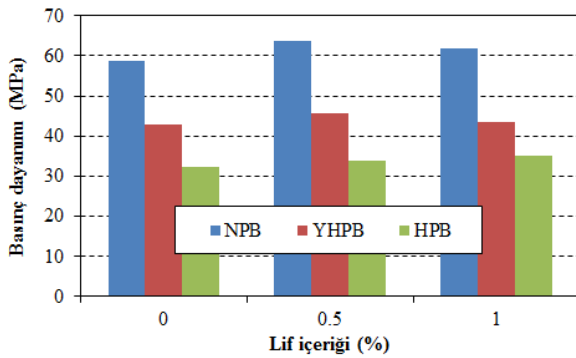
Eşitlikte, U, ultrases geçiş hızını (km/sn); L, numunedeki proplar arası mesafeyi (mm); t, numunedeki ultrases geçiş süresini (µs) göstermektedir [16].

3. Bulgular ve Tartışma

DeneySEL çalışmalar sonucunda elde edilen veriler mekanik özellikler ve fiziksel özellikler alt başlıkları altında detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Mekanik özellikler kapsamında, hafif ve normal ağırlıklı polimer betonların basınç dayanımları, aderans dayanımları, dinamik elastisite modülleri incelenirken, fiziksel özellikler alt başlığında da su emme, birim hacim ağırlık, görünen porozite, ultrases geçiş hızı ve korozyon test sonuçları değerlendirilmiştir.

3.1. Mekanik Özellikler

Basınç dayanımı



Şekil 2. Polimer betonların basınç dayanımları

Hafif polimer betonların (HPB), yarı hafif polimer betonların (YHPB) ve normal polimer betonların (NPB) çelik lif ve pomza içeriğine bağlı olarak basınç dayanımlarındaki değişim Şekil 13'de görülmektedir. Çelik lifin etkisine bakıldığında, lif içermeyen HPB, YHPB ve NPB'lerin basınç dayanımları sırasıyla 32.2 MPa, 42.9 MPa ve 58.6 MPa değerindedir. Çelik lif ilave edilmesiyle HPB ve YHPB'nun basınç dayanımı değerleri %0.5 içeriği için sırasıyla 33.8 ve 45.7 MPa değerlerini alarak şahit seriye (lifsiz) göre %4.6 ve %6.5 oranlarında artmıştır. Çelik lif ilave edilmesiyle HPB ve YHPB'nun basınç dayanımı değerleri %1 içeriği için sırasıyla 35.2 ve 43.4 MPa değerlerini alarak şahit seriye (lifsiz) göre %9 ve %1.2 oranlarında artmıştır. NPB serilerinde ise, şahit serinin basınç dayanımı 58.6 MPa iken, %0.5 ve %1 lif içeriklerindeki NPB'lerin dayanımları sırasıyla 63.6 MPa ve 61.8 MPa değerlerini almıştır. NPB'lerde %0.5 lif içeriğinde basınç dayanımı %8.5 oranında artarken, %1 lif içeriğinde şahit seriye göre %5.5 oranında artmıştır. Her iki beton tipinde de lif ilavesi sonucunda dayanımlarda artma görülmüştür. Genel olarak lif ilavesi betonların basınç dayanımını \pm %25 mertebesinde etkilemektedir [17,18].

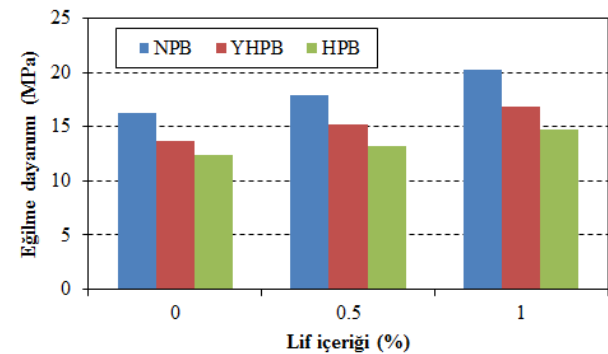
Polimer betonların basınç dayanımlarına pomzanın etkisine bakıldığında, çelik lif içermeyen HPB ve YHPB'nun basınç dayanımları çelik lif içermeyen NPB'nun basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %44.9 ve %26.8 oranında azalmıştır. %0.5 oranında çelik lif içeren HPB ve YHPB'nun basınç dayanımları %0.5 oranında çelik lif içeren NPB'nun basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %46.9 ve %28.1 oranında azalmıştır. %1 oranında çelik lif içeren HPB ve YHPB'nun basınç dayanımları %1 oranında çelik lif içeren NPB'nun basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %43 ve %29.8 oranında azalmıştır. HPB ve YHPB'ların basınç yükü etkisi altındaki davranışına bakıldığında pomza agregalarının kırılma yapılarından dolayı yük

altında ilk çatlaklar ve kırılmalar pomza agregalarda olmuş ve bu NPB'lere göre daha düşük dayanım değerlerine sahip olmuşlardır. NPB'lerde ise basınç yükü altında ilk kırılma veya çatlaklar en zayıf bölge olan agrega-reçine ara yüzeyinde başlamıştır. Çünkü normal agregaların basınç dayanımları reçinenin basınç dayanımından daha yüksek olmakla birlikte normal agregaların yüzeyi pomza kadar gözenekli olmayıp, en zayıf bölge ara yüzeydir [19]. HPB ve YHPB serileri basınç dayanımları açısından dikkate alındığında, taşıyıcı hafif beton sınıfında yer almaktadırlar.

Eğilme dayanımı

Hafif polimer betonların (HPB), yarı hafif polimer betonların (YHPB) ve normal polimer betonların (NPB) çelik lif ve pomza içeriğine bağlı olarak eğilme dayanımlarındaki değişim Şekil 14'de görülmektedir. Çelik lifin etkisine bakıldığında, lif içermeyen HPB, YHPB ve NPB'ların eğilme dayanımları sırasıyla 12.4 MPa, 13.7 MPa ve 16.2 MPa değerindedir. Çelik lif ilave edilmesiyle HPB ve YHPB'nun eğilme dayanımı değerleri %0.5 içeriği için sırasıyla 13.2 ve 15.2 MPa değerlerini alarak şahit seriye (lifsiz) göre %6.5 ve %10.9 oranlarında artmıştır. Çelik lif ilave edilmesiyle HPB ve YHPB'nun eğilme dayanımı değerleri %1 içeriği için sırasıyla 14.7 ve 16.9 MPa değerlerini alarak şahit seriye (lifsiz) göre %18.5 ve %23.4 oranlarında artmıştır. NPB serilerinde ise, şahit serinin eğilme dayanımı 16.2 MPa iken, %0.5 ve %1 lif içeriklerindeki NPB'lerin dayanımları sırasıyla 17.9 MPa ve 20.3 MPa değerlerini almıştır. NPB'lerde %0.5 lif içeriğinde eğilme dayanımı %10.5 oranında artarken, %1 lif içeriğinde şahit seriye göre %25.3 oranında artmıştır. Her iki beton tipinde de lif ilavesi sonucunda dayanımlarda artma görülmüştür. Genel olarak lif ilavesi betonların eğilme dayanımında %25 mertebesinde artış şeklinde etkilemektedir.

Polimer betonların eğilme dayanımlarına pomzanın etkisine bakıldığında, çelik lif içermeyen HPB ve YHPB'nun eğilme dayanımları çelik lif içermeyen NPB'nun eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %23.5 ve %15.4 oranında azalmıştır. %0.5 oranında çelik lif içeren HPB ve YHPB'nun eğilme dayanımları %0.5 oranında çelik lif içeren NPB'nun eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %26.3 ve %15.1 oranında azalmıştır. %1 oranında çelik lif içeren HPB ve YHPB'nun eğilme dayanımları %1 oranında çelik lif içeren NPB'nun eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %27.6 ve %16.7 oranında azalmıştır. HPB ve YHPB'ların eğilme yükü etkisi altındaki davranışına bakıldığında pomza agregalarının kırılma yapılarından dolayı yük altında ilk çatlaklar ve kırılmalar pomza agregalarda olmuş ve bu NPB'lere göre daha düşük dayanım değerlerine sahip olmuşlardır. Buna rağmen çimento tabanlı betonların eğilme dayanımlarına kıyasla daha yüksek bir dayanım görülmektedir.

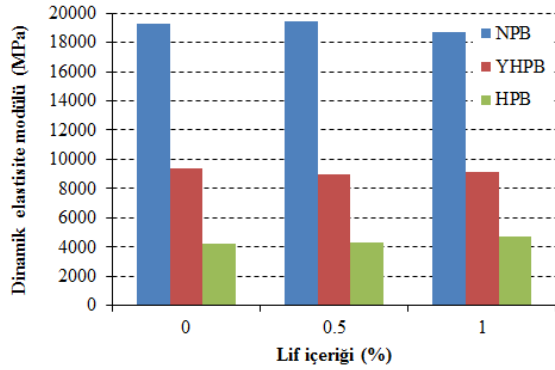


Şekil 3. Polimer betonların eğilme dayanımları

Dinamik elastisite modülü

Betonun dış yükler altındaki şekil değiştirme yeteneğinin bir göstergesi olan elastisite modülü NPB için lif içeriğine bağlı olarak 18678 ile 19312 MPa arasında değerler almış olup, YHPB için 8954 ile 9381 MPa arasında ve HPB için de 4206 ile 4754 MPa arasında değişmiştir (Şekil 11). Dinamik elastisite modülünün yüksek değer alması, polimer betonun şekil değiştirme yeteneğinin azaldığını, daha rijit hale geldiğini göstermektedir [20,21]. Dolayısıyla YHPB ve HPB serilerinin NPB serilerine göre daha fazla şekil

değiştirebilme yeteneğine sahip oldukları sonucuna ulaşılır ki bunun nedeni de pomza agregalarının kırmataş agregalarına göre daha kırılğan yapıya sahip olmalarındandır.



Şekil 41. Polimer betonların dinamik elastisite modülü

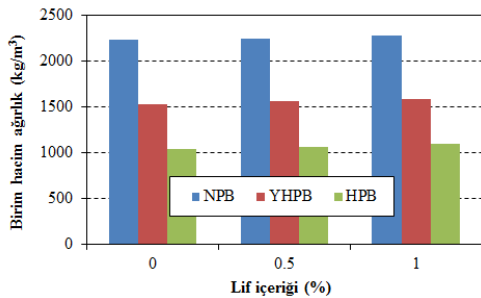
Yük altında kolayca kırılan agregalar betonun daha kolay şekil değiştirebilme yeteneğine sahip olmasına neden olmaktadır. NPB'lerde ise, agregaların yüksek dayanımları sayesinde kullanıldıkları betonu da rijit hale getirmekte ve dinamik elastisite modülünün daha yüksek değerler almasını sağlamaktadırlar. Çelik liflerin beton içerisinde dağılımları bazen homojen olmayabilmektedir. Bu durumda basınç dayanımlarının ve elastisite modüllerinin azalmasına neden olmaktadır.

3.2. Fiziksel Özellikler

Birim hacim ağırlık

Hafif polimer betonların (HPB), yarı hafif polimer betonların (YHPB) ve normal polimer betonların (NPB) çelik lif ve pomza içeriğine bağlı olarak birim hacim ağırlıklarındaki (BHA) değişim Şekil 16'da görülmektedir. Lif içermeyen HPB, YHPB ve NPB'ların birim hacim ağırlıkları sırasıyla 1037 kg/m³, 1527 kg/m³ ve 2229 kg/m³ değerindedir. Çelik lif ilave edilmesiyle HPB ve YHPB'nun BHA değerleri %0.5 içeriği için sırasıyla 1059 ve 1553 kg/m³ değerlerini alarak şahit seriyeye (lifsiz) göre %2.1 ve %1.7 oranlarında azalmıştır. Çelik lif ilave edilmesiyle HPB ve YHPB'nun BHA değerleri %1 içeriği için sırasıyla 1087 ve 1586 kg/m³ değerlerini alarak şahit seriyeye (lifsiz) göre %4.8 ve %3.9 oranlarında azalmıştır. NPB serilerinde ise, şahit serinin BHA değeri 2229 kg/m³ iken, %0.5 ve %1 lif içeriklerindeki NPB'lerin BHA değerleri sırasıyla 2243 kg/m³ ve 2274 kg/m³ değerlerini almıştır. NPB'lerde %0.5 lif içeriğinde BHA %0.6 oranında, %1 lif içeriğinde şahit seriyeye göre %2 oranında artmıştır. Her iki beton tipinde de lif ilavesi sonucunda BHA'da artma görülmüştür.

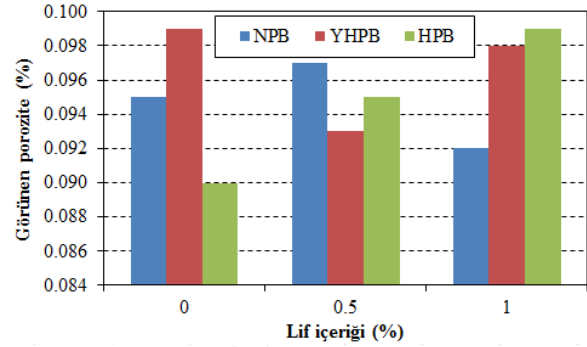
Polimer betonların BHA'larına pomzanın etkisine bakıldığında, çelik lif içermeyen HPB ve YHPB'nun BHA'ları çelik lif içermeyen NPB'nun BHA ile karşılaştırıldığında sırasıyla %53.5 ve %31.5 oranında azalmıştır. %0.5 oranında çelik lif içeren HPB ve YHPB'nun BHA'ları %0.5 oranında çelik lif içeren NPB'nun BHA ile karşılaştırıldığında sırasıyla %52.8 ve %30.8 oranında azalmıştır. %1 oranında çelik lif içeren HPB ve YHPB'nun BHA %1 oranında çelik lif içeren NPB'nun BHA ile karşılaştırıldığında sırasıyla %52.2 ve %30.3 oranında azalmıştır. HPB ve YHPB'ların BHA'larındaki azalma kullanılan pomza agregasının özgül ağırlığının normal agregadan daha az olmasından dolayıdır.



Şekil 5. Polimer betonların birim hacim ağırlıkları.

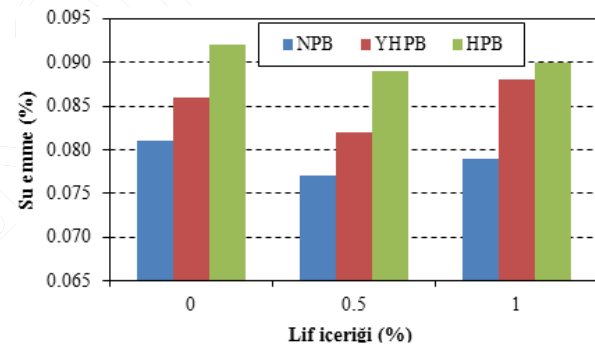
Görünen porozite

Görünen porozite değerleri HPB, YHPB ve NPB'ler için betona ilave edilen lif içeriğine göre Şekil 13'de görülmektedir. Burada literatürdeki bilgilere göre zıt bir durum gözlenmektedir. Diğer bir ifadeyle, polimer betonların porozite değerleri çok düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, polimer beton üretiminde kullanılan reçine dolayısıyla agrega yerleşme ve dağılım sırasında agregalar arasında fazla boşluk kalmamış olmasıdır. Bir diğer nedeni ise, agregaların dış yüzeyi polimer reçinesi ile tamamen kaplanarak dış ortama karşı tamamen izole edilmiş olmasıdır. Görünen porozite değerleri incelendiğinde tüm polimer betonlar için oldukça düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu değerler ihmal edilebilecek düzeydedir.



Şekil 6. Polimer betonların görünür poroziteleri.

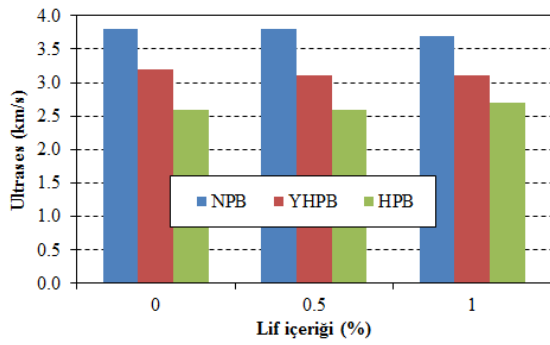
Su emme



Şekil 7. Polimer betonların su emme oranları.

Üretilen polimer betonların su emme oranları Şekil 14'de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere polimer betonların su emme oranları oldukça düşüktür. Bu çalışmanın en ilginç sonuçlarından birisi polimer betonların çimento tabanlı betonlara göre daha az su emme oranına sahip olmalarıdır. Literatürden de bilindiği gibi çimento bağlayıcılı betonlarda bu durum hafif agregaların normal agregalara göre gözenekli olmalarından dolayı yüksek su emme oranına sahip olmalarıdır. Çünkü pomzanın girişli-çıkıntılı yüzey yapısı sayesinde polimer reçineleri bu yüzeyle tam olarak temas sağlamıştır. Polimer reçineleri kendi başlarına suyu geçirmeyen malzemeler olup, pomzanın gözeneklerini de dışarıya kapatarak su emmelerini önlemiştir. NPB'lerde ise, normal agreganın yüzey yapısı pomzanın kadar pürüzlü olmadığından agrega-polimer reçinesi arayüzeyi pomzada olduğu kadar tam kenetlenme gerçekleşmemiş olabilir. Buna rağmen her iki polimer beton tipinde önemsenmeyecek derecede su emme oranı görülmektedir. Üretilen polimer betonlar için su emme oranı onbinde 8 civarındadır. Bu nedenle su emmeyen malzemeler olarak nitelendirilebilir.

Ultras ses geçiş hızı

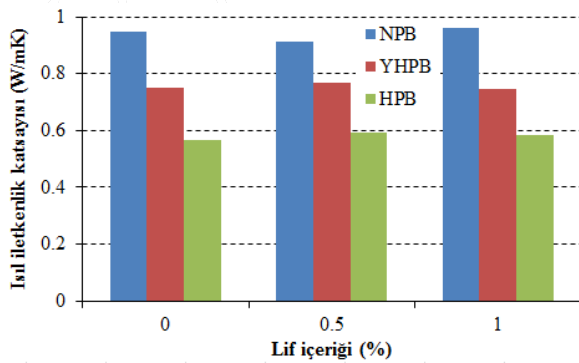


Şekil 8. Polimer betonların ultras ses geçiş süreleri.

Bir malzeme üzerinde ultras ses geçiş hızının yüksek değeri, malzemelerin daha dolu, kompakt bir yapıya sahip olduklarının göstergesidir [16]. Şekil 15 incelendiğinde, HPB ve YHPB'lerin daha boşluklu bir malzeme oldukları açıkça görülebilir. HPB ve YHPB'lerin reçine oranının fazla olması da bu betonlardan ses geçişine düşük oranda izin vermiştir. Pomzanın da gözenekli yapısı sayesinde HPB ve YHPB'lerin ultras ses geçiş hızı değerleri lif içeriğine bağlı olarak 3.2 ile 2.6 km/s arasında değişmiştir. HPB ve YHPB'lara göre çok daha az reçine içeren NPB'lerin ultras ses geçiş hızları ise 3.7 ile 3.8 km/s civarındadır. Reçine oranının azalması agreganın artmasıyla sesin iletimi kolaylaşarak NPB'ler daha yüksek ultras ses geçiş hızı değerlerine sahip olmuşlardır. Lifin ultras ses geçiş sürelerine önemli bir etkisi olmamıştır.

Termal iletkenlik

Üretilen polimer betonların ısı iletkenlik katsayıları Şekil 16'de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere NPB'lerin ısı iletkenlik katsayıları 0.9 W/mK civarındadır. Bu değeri yüksek bir değerdir. ısı iletkenlik malzemedeki boşluk oranı ile ilgilidir. Boşluk oranı arttıkça ısı performansı artar. Boşluk oranını arttırmak için iki yöntem uygulanabilir. Bunlardan birincisi üretimi gerçekleştirilen kompozitin gözenekli bir yapı oluşturmasını sağlamaktır. Bu yöntemin polimer beton üretiminde uygulanması zordur. İkincisi ise polimer beton üretiminde gözenekli yapıya sahip agregaların kullanımınıdır. NPB üretiminde kireç tabanlı normal agreganın kullanıldığından dolayı daha az boşluk oranına sahip bir kompozit elde edilmiştir. Bu ise daha yüksek bir ısı iletkenlik katsayısını elde edilmesine neden olmuştur. YHPB'lerin ısı iletkenlik katsayısı 0.7 W/mK civarındadır. Bu ısı performansı yaklaşık %21 oranında artış olmuştur. Bunun nedeni bünyedeki pomza hafif agregasının bulunması nedeni ile daha gözenekli bir yapı elde edilmesidir. HPB ısı iletkenlik değeri 0.5 W/mK civarındadır. NPB ile kıyaslandığında ısı performansı yaklaşık olarak %40 artış demektir. Bu artışın nedeni bünyede daha fazla pomza agregasının yer alması ile daha gözenekli bir yapı elde edilmesidir. Çelik lifin ısı iletkenlik değerine önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 16. Polimer betonların ısı iletkenlik katsayıları

4. Sonuçlar

Polyester reçine ile üretilen hafif agregalı ve çelik lif takviyeli polimer betonların fiziksel, mekanik ve ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Pomza agregaları ile üretilen HPB ve YHPB serileri üretimleri sırasında pomzanın gözenekli yüzey yapısı nedeniyle daha fazla bağlayıcı reçine kullanılmasına neden olmuştur.
- HPB ve YHPB'lerin basınç dayanımı NPB basınç dayanımına göre %44.9 ve %26.8 oranında azalmıştır. Bu azalmaya rağmen her iki hafif polimer beton serileri basınç dayanımları açısından dikkate alındığında, taşıyıcı hafif beton sınıfında yer almaktadır. Çelik lifler bütün polimer beton serilerinde %9 mertebesinde artış sağlamıştır.
- NPB serileri, HPB ve YHPB serilerine göre %26.3 ve %15.4 oranında daha yüksektir. Bütün polimer beton serilerinde çelik lif katkısı ile eğilme dayanımı artmıştır. Lif içeriğinin artması ile eğilme dayanımı artış göstermiştir.
- Dinamik elastisite modülü sonuçlarına göre HPB serileri NPB serilerine göre daha fazla şekil değiştirebilme yeteneğine sahip oldukları sonucuna ulaşılmıştır ki bunun nedeni de pomza agregalarının kırılma agregalarına göre daha kırılma yapıya sahip olmalarındadır. pomza agregalarının dayanımları bağlayıcı reçineye göre daha düşük olup, yük altında tüm agregaların kırıldığı gözlemlenmiştir.
- HPB, YHPB ve NPB'lerin birim hacim ağırlıkları sırasıyla 1037 kg/m³, 1527 kg/m³ ve 2229 kg/m³ değerindedir. Polimer beton bünyesindeki hafif agreganın miktarı arttıkça BHA azalmıştır. Basınç dayanımları açısından taşıyıcı hafif beton sınıfında olan HPB ve YHPB serileri oldukça düşük birim ağırlığa sahiptirler. Çimento esaslı pomza ile üretilmiş hafif betonlara göre daha hafif üretilebilirlerdir. Dolayısıyla yapıya getirecekleri yük miktarı da aynı oranda daha az olacaktır.
- Pomzanın girintili-çukurlu yüzey yapısı sayesinde polimer reçineleri bu yüzeyle tam olarak temas sağlamıştır. Tüm gözeneklerin kapanmasını sağlayarak görünen porozite değerinin çok düşük olmasını sağlamıştır. Ayrıca polimer reçineleri kendi başlarına suyu geçirmeyen malzemeler olup, pomzanın gözeneklerini de dışarıya kapatarak su emmelerini önlemiştir. Benzer durum normal agregalı polimer betonlarda da gözlemlenmiştir. Su emme değerleri açısından diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında her iki beton tipi de su emmeyen malzeme sınıfındadırlar.
- Polimer beton içerisindeki hafif agreganın oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı değeri düşmektedir. Bu ısı performansının artması demektir. Üretilen hafif polimer beton hem taşıyıcı sınıfta hem de ısı yalıtım özelliği sunmaktadır. Çimento tabanlı pek çok taşıyıcı sınıfta olan beton ısı yalıtım özelliği gösterememektedir.

Tüm deney sonuçları göz önüne alındığında, polimer beton içerisinde hafif agreganın kullanılmasıyla, çimento esaslı hafif betonlara göre daha hafif, fakat daha yüksek dayanıma sahip betonlar üretilmiştir. Aynı zamanda ısı yalıtım özelliği de sunmaktadır. Polimer betonların yaygın olarak kullanılabilirliklerinin önündeki tek engel yüksek maliyetli olmalarıdır. Bu nedenle özel uygulamalar için kullanımı önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP-2011-2-33 no'lu proje ile desteklenmiştir. Proje birimine katkıları dolayısıyla teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Sanayi Genel Müdürlüğü, Çimento sektörü raporu (2013/1), TC Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sektörel raporlar ve analizler Serisi, 2013.

2. Uygunoğlu, T., Topçu, İB, Çimento Hamurunun Priz Süresi ve Genleşmesine Mineral Ve Kimyasal Katkıların Etkisi, Beton 2011 Hazır Beton Kongresi, 20-22 Ekim 2011, İstanbul, 521-531.
3. ÇED Rehberi, Çimento fabrikaları, TC Çevre ve Orman Bakanlığı, Haziran 2009. Fowler D.W., Polymers in concrete: a vision for the 21st century. Cement Concrete Composites; 1999, 21:449-52.
4. Brostow, W., *Mechanical properties*, Ch. 24 in Physical Properties of Polymers Handbook, ed. J. E. Mark, 2nd edition, Springer, New York, 2007.
5. 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, 2001, 31, 1627-1632.
6. TS EN 206-1, "Beton- Bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002, 68 sayfa.
7. TS 2511, "Taşıyıcı hafif beton karışım hesap esasları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1977, 13 sayfa.
8. Kuşçu, M., "Endüstriyel kayaçlar ve mineraller", Süleyman Demirel Üniversitesi, 2001, Yayın No: 10, ss. 37.
9. Gündüz L. (Ed.), "Pomza teknolojisi, pomza karakterizasyonu", Cilt I, Isparta, 1998, 218 sayfa.
10. TS EN 1097-6/A1, "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007, 3 sayfa.
11. TS EN 1097-3, "Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999, 20 sayfa.
12. TS EN 1744-1, "Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Kimyasal Analiz", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000, 15 sayfa.
13. TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
14. TS EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
15. Erdoğan T.Y., Beton, METU Press, Ankara, 2007
16. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, İTÜ Dergisi, Cilt:1, Sayı:2, Aralık 2002, 125-144.
17. Ünal O., Uygunoğlu, T., Gençel O., Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 23-30, 2007.
18. Chandra, S., Berntsson, L., "Lightweight aggregate concrete: Science, technology and applications", William Andrew Publishing, Norwich, New York, 2002, USA, ISBN: 0-8155-1486-7, pp.136-138.
19. Kurugöl S, Tanaçan L, Ersoy HY, Young's modulus of fiber-reinforced and polymer-modified lightweight concrete composites, Construction and Building Materials, 22, 6, 2008, 1019-1028
20. Gorninski J.P., Molin D.C.D, Kazmierczak C.S., Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004) 2091-2095.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Farklı Mimari Durumların Enerji Tüketimi ve Çevresel Etkileri Üzerine Bir Araştırma

Ahmet ERDOĞAN*, Suat CANBAZOĞLU

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 11.10.2015 Düzeltme Tarihi: 28.10.2015 Kabul Tarihi: 02.11.2015

Özet

Bu çalışmada, Malatya ilinde bulunan, hem eğitim hem de ofis amaçlı kullanılan örnek bir bina seçilmiştir. Farklı mimari durumlara göre yıllık enerji tüketimi, yıllık enerji maliyeti ve sebep olduğu CO₂ salınımı incelenmiştir. Farklı mimari durumlar olarak; tek camlı pencere-yalıtımlı duvar, çift camlı pencere-yalıtımsız duvar ve çift camlı pencere-yalıtımlı duvar gibi durumlar belirlenmiştir. Saatlik Analiz Programı (HAP 4.50) kullanılarak binanın yıllık enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar; üç farklı iklimlendirme sistemi (Fan-Coil (FCU), Değişken Hava Debili (VAV) ve Sabit Hava Debili (CAV)) için uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Tüketimi, Enerji Simülasyonu, CO₂ Salınımı, İklimlendirme Sistemi, Analiz Programı (HAP)

An Investigation on Energy Consumption and Environmental Effects of Different Architectural Cases

Abstract

In this study; a sample building located in Malatya, which is used for both educational and office purposes, is selected. Consumption and the cost of annual energy and CO₂ emission caused by the building were investigated according to different architectural alternatives. As different architectural alternatives; different cases such as single glazing windows-thermal insulated wall, double glazing window-uninsulated wall, double glazing window-thermal insulated wall were determined. Using Hourly Analyses Program (HAP), energy simulations annually were performed. The simulations data was carried out for three different HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) systems (Fan-Coil Unit (FCU), Variable Air Volume (VAV) and Constant Air Volume (CAV)).

Keywords: Energy Consumption, Energy Simulation, CO₂ Emission, HVAC System, Hourly Analysis Program (HAP)

1. Giriş

Enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmakta ve fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. Fosil yakıtların hızla tükenmesi, temiz bir çevrenin ve doğal kaynakların gelecek kuşaklara aktarılmasını, yani sürdürülebilirliği zorlaştırmaktadır. Son yıllarda fosil kaynaklı yakıt tüketimindeki artış, atmosfere salınan sera gazı miktarının artmasına ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır [1]. Enerji tüketimini ve sera gazlarının atmosfere salınımını azaltmaya yönelik çalışmalarda binalar önemli yer tutmaktadır. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) ülkeleri arasında yapılan bir çalışmaya göre binalar en önemli enerji tüketen kaynaklardan biri olarak toplamda kullanılan elektriğin yarısını, doğalgazın ise üçte birini tüketmektedirler ve oluşan sera gazlarının üçte birinden sorumludurlar [2]. Ünlü [3], Ankara ili için örnek bir ofis binasında HAP programını kullanarak farklı HVAC sistemlerinin yıllık enerji tüketim simülasyonlarını ve bu sistemlerin maliyet analizlerini yapmıştır. Coşkun vd. [4], bir yerleşke dâhilindeki eğitim binasının enerji taramasını yapmışlardır. Öncelikle binanın mevcut durumu incelenmiş ve bu inceleme sonucunda alınabilecek önlemler vasıtası ile üç ana başlıkta iyileştirme yapılabileceği tespit edilmiştir. Bunlar; bina dış kabuğuna yalıtım yapılması, ısıtma gereksinimi için daha verimli (yoğuşmalı) bir kazan kullanılması, binanın doğal aydınlatma olanakları, elektrik ve su tüketimindeki tasarruf şeklindedir. Yılmaz [5], İstanbul ili için örnek bir ofis binasında HAP programını kullanarak farklı HVAC sistemleri, farklı mimari alternatifler, fotovoltaik sistem ve paket kojenerasyon ünitesi, bina oryantasyonunun değiştirilmesi gibi farklı unsurları kullanarak on bir ayrı alternatif durum oluşturmuştur. Her bir durum için enerji simülasyonu, maliyet analizi ve karbondioksit salınım miktarları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Milbrandt [6], Iowa Üniversitesi'nde bulunan bir laboratuvar binasının TRACE paket programını kullanarak beş farklı durum için yıllık enerji tüketiminin simülasyonunu yapmıştır. Pan vd. [7], bir ofis binasında üç farklı model için EnergyPlus paket programını kullanarak enerji simülasyonu yapmışlardır ve bunu uygulayarak enerji verimliliğinin

arttırılması için devletler tarafından çıkarılan bina enerji etiketleme sistemlerini analiz etmişlerdir. Eskin ve Türkmen [8], bir ofis binasında EnergyPlus paket programı yardımıyla, binalardaki iklim koşullarının, yalıtım ve ısı kütle, binanın konumlanışı, dış yüzey renkleri, dış gölgeleme, çeşitli cam-pencere sistemleri ile havalandırma debileri ve farklı dış hava kontrol stratejileri gibi parametrelerin yıllık ısıtma ve soğutma ihtiyacı üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. İnanıcı vd. [9], çalışmalarında Türkiye'nin farklı iklim bölgelerindeki beş şehirde (Erzurum, Ankara, Diyarbakır, İzmir, Antalya), binalar için, en-boy oranının ve güney cephesindeki pencere büyüklüğünün, ısı performans açısından uygun değerini bulmak için çalışma yapmışlardır.

Bu çalışmada; Malatya İnönü Üniversitesi yerleşkesinde bulunan Hukuk Fakültesi binası için Saatlik Analiz Programı (HAP) kullanılarak enerji simülasyonu yapılmıştır. Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar, çift camlı pencere-yalıtımsız duvar ve çift camlı pencere-yalıtımlı duvar gibi mimari durumlar için binanın yıllık enerji tüketimi, yıllık enerji maliyeti ve atmosfere saldığı CO₂ miktarı karşılaştırılmıştır. Her bir mimari alternatif durum için; Fan-Coil (FCU), Değişken Hava Debili (VAV) ve Sabit Hava Debili (CAV) olmak üzere üç farklı HVAC sistemi seçilerek enerji simülasyonu yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malatya için İklim Verileri

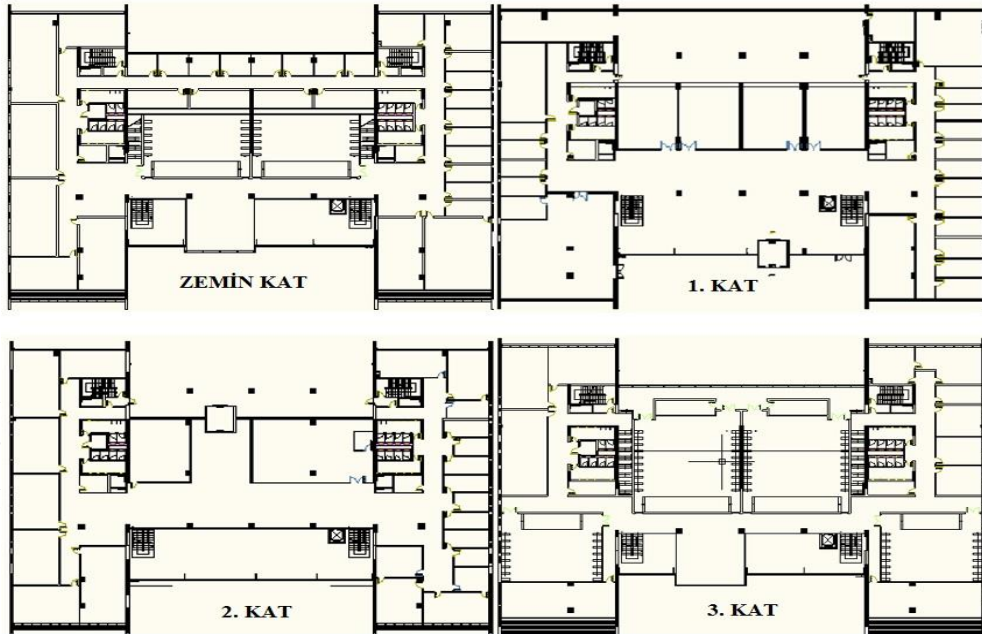
İklim verileri HVAC sistemlerinin yük hesaplamasında en önemli unsurlardan bir tanesidir. HAP programının veri tabanında Türkiye'den üç şehir (İstanbul, Ankara ve İzmir) için iklim verileri mevcuttur. Bu üç şehrin dışındaki şehirler için bir hesaplama yapılacağı zaman iklim verilerini kendimiz tanımlamamız gerekmektedir. Malatya ili için programda tanımlanan iklim verileri Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malatya ili için iklim verileri [10]

Kış: Kuru Termometre Sıcaklığı	-8.4 °C
Yaz: Kuru Termometre Sıcaklığı	36 °C
Yaz: Yaş Termometre Sıcaklığı	20.7 °C
Enlem	37.2°
Boylam	-39.2°
Rakım	998 m

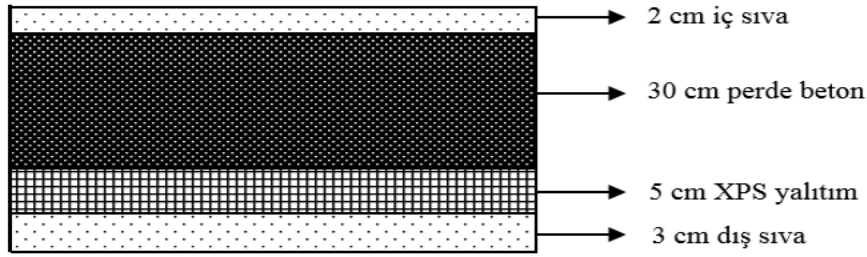
2.2. Örnek Bina: İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Binası

Bu çalışmada enerji simülasyonu yapılan bina; İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi binasıdır. Şekil-1'de örnek binanın genel görünüşü verilmiştir. Bina 4 katlı olup, 7695 m² kullanım alanına sahiptir. Yapı her katta farklı ve oldukça karmaşık bir mimariye sahip olup, katların kesiti Şekil-2'de verilmiştir. Kat yüksekliği 4 m.'dir. Binada; çalışma ofisleri, derslikler, toplantı salonları, kantin ve koridor gibi ortak kullanım alanları mevcuttur. Binada iklimlendirilen toplam 110 adet mahal programda girdi olarak tanımlanmıştır.

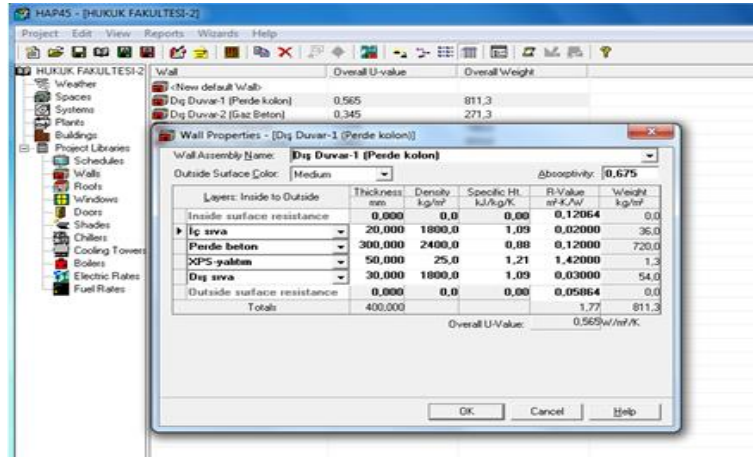
**Şekil 1.** İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Binası'nın genel görünüşü**Şekil 2.** İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Binası'nın mimari görünüşü**2.2.1. Binanın Isı Geçiş Yüzeyleri****Dış Duvarlar**

Simülasyonu yapılan binada iki ayrı dış duvar tipi mevcuttur. Yalıtımlı duvarlardan birinci dış duvar tipi olarak; perde kolonların olduğu kısımlarda 2 cm iç sıva, 30 cm perde beton, 5 cm XPS yalıtım ve 3 cm dış sıva mevcuttur (Şekil-3). İkinci dış duvar tipi

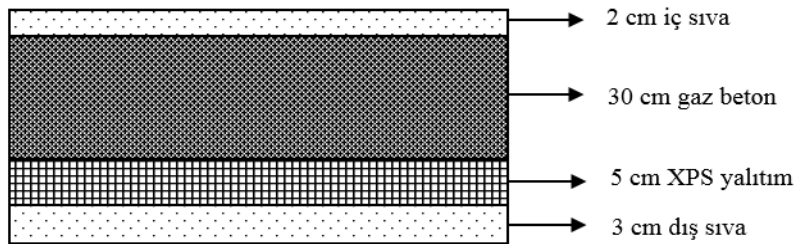
olarak; gaz beton bulunan kısımlar; 2 cm iç sıva, 30 cm gaz beton, 5 cm XPS yalıtım ve 3 cm dış sıva ihtiva etmektedirler (Şekil-5). Şekil-3, Şekil-4, Şekil-5 ve Şekil-6'da her iki duvar tipinin yalıtımlı olma durumlarındaki duvar katmanları ve program girdileri resmedilmiştir.



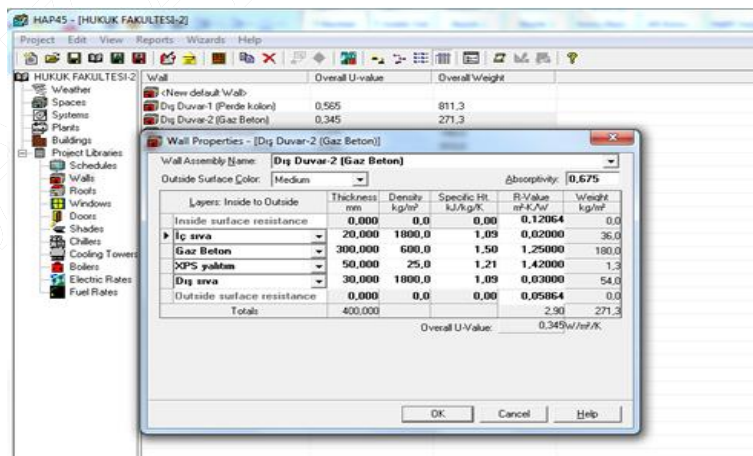
Şekil 3. Dış duvar-I, perde beton bulunan kısımların yalıtımlı hal duvar katmanları



Şekil 4. Dış Duvar-I için program girdisi



Şekil 5. Dış duvar-II, gaz beton bulunan kısımların yalıtımlı hal duvar katmanları



Şekil 6. Dış Duvar-II için program girdisi

Tablo 2. Dış duvarların ısı geçirenlik katsayıları

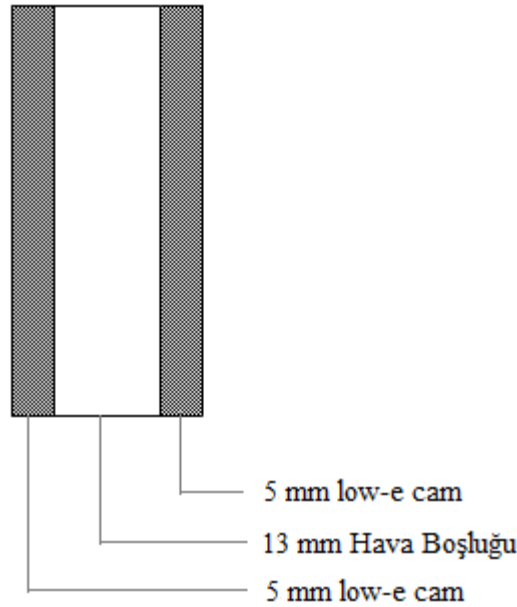
	U-Isıl geçirgenlik katsayısı (W/m ² .K)	
	Dış Duvar-I (Perde Kolon)	Dış Duvar-II (Gaz Beton)
Yalıtımlı Duvar	0.565	0.345
Yalıtımsız Duvar	2.863	0.676

Tablo-2’de her iki duvar tipinin yalıtımlı ve yalıtımsız olma durumlarındaki toplam ısıl geçirgenlik katsayıları verilmiştir.

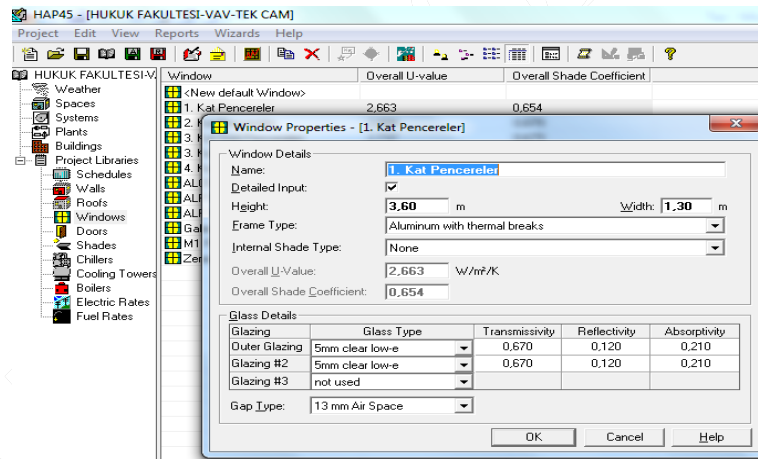
Pencereler

Enerji simülasyonu yapılan binada pencere olarak tek cama ve çift cama sahip olma durumlarına göre iki ayrı pencere tipi

tariflenmiştir. Kullanılan pencerelerde low-e adıyla anılan düşük yayımlı ısı kontrollü yalıtım camları kullanılmıştır. Çift camlı pencerenin katmanları Şekil-7’de, program girdileri Şekil-8’de verilmiştir.



Şekil 7. Çift camlı pencerenin katmanları



Şekil 8. Çift camlı pencere için program girdisi

Tablo-3’te tek camlı ve çift camlı olma durumlarına göre pencerelerin toplam ısıl geçirgenlik katsayıları verilmiştir.

Tablo 3. Pencerelerin ısıl geçirgenlik değerleri

Pencere Tipi	U (W/m ² .K)
Tek Camlı Pencere	4.623
Çift Camlı Pencere	2.663

2.3 Saatlik Analiz Programı (HAP)

Saatlik Analiz Programı (HAP), Carrier’ın HVAC tasarım programı olan E20-II ailesinin bir parçasıdır. HAP ticari binalarda HVAC sistemlerinin tasarımı için çok yönlü özellikler sağlamaktadır. HVAC sistemlerinin tasarım ve analizleri çok rahatça yapılabilmektedir. HAP binanın ısı transferi yüklerini, hava sisteminin ve cihazların çalışmasını hesaplamak için yılın 8760 saatlik hava verilerini kullanarak gerçek bir saatlik enerji analizini gerçekleştirir. Bina ısı akışını hesaplamak için ASHRAE Transfer Fonksiyon Yöntemi kullanılır [11]. Bileşen yüklerini, saatlik yük

profillerini, detaylı saatlik performans verilerini ve Psikometrik diyagramları sağlayan ilave raporlar da sağlanabilir. Ayrıca tasarım alternatifleri içerisinde enerji tüketimi ve çalışma maliyetlerini karşılaştırma olanağı sağlayan güçlü enerji olanakları sunmaktadır.

HAP altı adet hesaplama motoru kullanmaktadır. Yük hesaplama motoru, ASHRAE Transfer Fonksiyonu Yöntemi’ne göre bina içerisindeki dinamik ısı transferini analiz etmekte ve mahaller için ısıtma ve soğutma yüklerini hesap etmektedir. Sistem motoru, sistemlerin hava tarafındaki termomekanik işletimi simüle etmektedir. Boyutlandırma motoru bina içerisinde kullanılan difüzörler, hava terminaleri, fanlar, serpantinler ve nemlendiricileri boyutlandırmada kullanılır. Ekipman motoru su soğutma grupları ile sıcak su kazanlarını simüle etmektedir. Bina simülasyon motoru ise enerji ve yakıt tüketimini diğer motorlarla birlikte çalışarak hesap edip bina için yıllık bazda enerji tüketimini simüle etmektedir. Son olarak ise ömür bazlı bir simülasyon motoru ile toplam ömür boyunca yatırım, işletme ve bakım maliyetleri simüle edilebilmektedir [12].

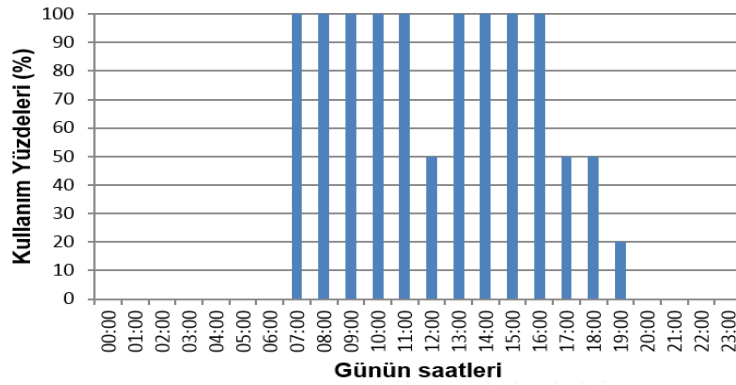
2.4 Bina Tasarım Parametreleri

Simülasyonu yapılacak binanın tasarım parametreleri Tablo-4'te verilmiştir. HAP programı mahaller için gerekli taze hava ihtiyacını ASHRAE 62.1-2004 standardından almaktadır.

Yıllık enerji simülasyonu yapılacak binanın yılın hangi günlerinde ve günün hangi saatlerinde kullanılacağına dair bir tasarım takvimi belirlenmiştir. Şekil 9'da binanın günün hangi saatlerinde insanlar tarafından ne kadar kullanılacağına dair bir tasarım sunulmuştur. Resmi tatillerde kullanım oranı % 0 alınmış ve iklimlendirme yapılmadığı kabul edilmiştir.

Tablo 4. Mahal tasarım parametreleri

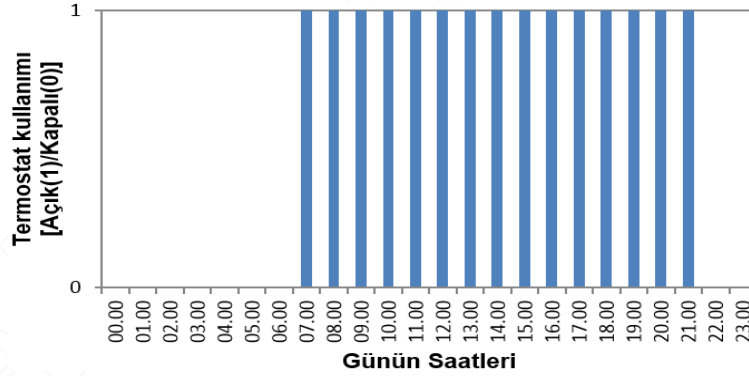
Mahal Tipi	Taze Hava İhtiyacı	Sıcaklık Set Değerleri		İç Kazançlar	
		Isıtma Sezonu (°C)	Soğutma Sezonu (°C)	İnsanlar	Aydınlatma
Ofisler	2.5 L/s-kişi	20	26	130 W/kişi	10 W/m ²
Derslikler	5 L/s-kişi	20	26	130 W/kişi	10 W/m ²
Koridorlar	0.3 L/s-m ²	20	26	220 W/kişi	10 W/m ²
Kantin	0.9 L/s-m ²	20	26	130 W/kişi	10 W/m ²



Şekil 9. Mahallerin saatlere göre kullanım yüzdeleri

Değişken Hava Debili Sistemler ve Fan-Coil Sistemleri için mahaller iklimlendirilirken, termostatla mahallerdeki sıcaklıklar belli aralıklarda tutulmaya çalışılır. İklimlendirme için termostat

kullanımı günün belli saatlerinde yapılmaktadır. Şekil-10'da hangi saatlerde mahallerde termostat kontrolü yapıldığı belirtilmiştir.



Şekil 10. Mahallerde termostat kullanım saatleri

2.5. Binada Simülasyonu Yapılacak HVAC Sistemleri

HVAC sistemleri, taze hava, ısıtma, soğutma ihtiyacı ve nem kontrolünün hepsini veya birini sağlamak için yapılarda kullanılan ekipmanları, dağıtım ağlarını ve terminalleri ifade etmektedir. HVAC sistemlerinin en temel amacı istenilen iç hava koşullarını korumak ve sağlamaktır. HVAC sistemleri enerji tüketimi bakımından oldukça önemlidir ve bu yüzden önemli enerji tasarruf imkanlarına sahiptir. Yapılan çalışmada enerji simülasyonu için üç çeşit HVAC sistemi seçilmiştir. Bunlar sırasıyla; Sabit Hava Debili (CAV) Sistemler, Değişken Hava Debili (VAV) ve Fan-Coil (FCU) sistemleridir.

2.5.1. Sabit Hava Debili Sistemler (CAV)

Sabit Hava Debili sistemlerde fanlar mahallere sabit debide hava göndermektedirler. İç ortam sıcaklığı her ne olursa olsun, klima santralinde hava belirli bir sıcaklığa getirilir ve mahalle üflenir. Mahalle gönderilen hava % 100 dış hava (taze hava)

olabileceği gibi egzoz gazını belirli bir oranda, taze hava ile karıştırarak elde edilecek karışım havası da olabilir. Bu tür sistemler aynı yapıda farklı zonların farklı ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaktadırlar. Sabit hava debili (CAV) bir sistemin şematik gösterimi Şekil-11'de verilmiştir.

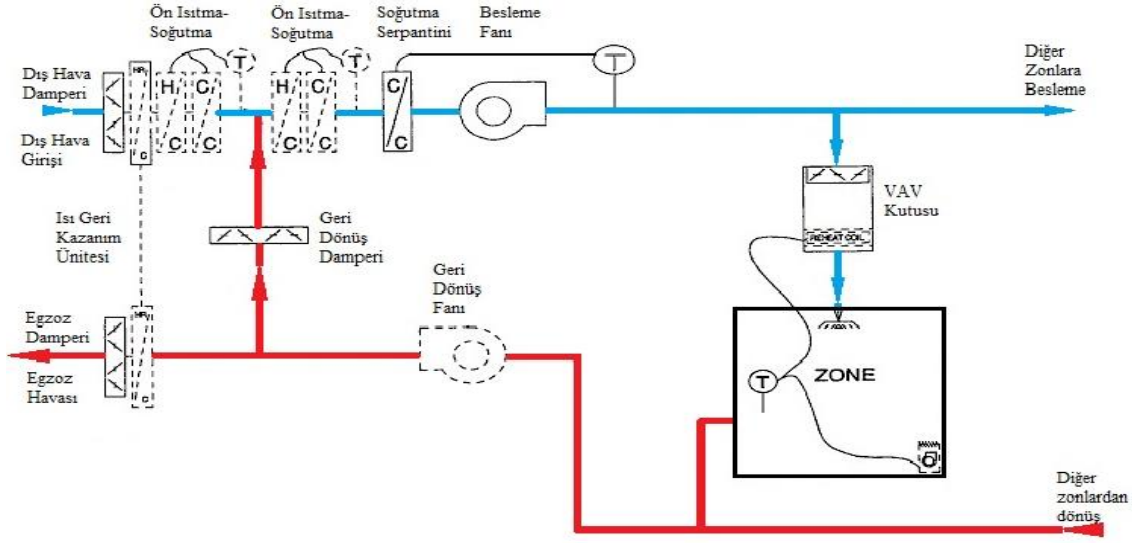
Sabit Hava Debili (CAV) sistem için belirlenen sistem karakteristikleri Tablo-5'te verilmiştir.

Tablo 5. CAV Sistem karakteristikleri

Besleme Hava Sıcaklığı	Yaz	13 °C
	Kış	35 °C
Isıtma Kaynağı	Sıcak Su Kazanı 80-60 °C	
Soğutma Kaynağı	Hava soğutmalı su soğutma grubu 7-12 °C	

2.5.2. Değişken Hava Debili Sistemler (VAV)

Birden fazla zonun farklı ihtiyaçlarını karşılayabilmek için değişken devir (frekans invertörü) teknolojisi geliştirilmiştir. VAV sistemlerinde hava klima santrallerinde belirli bir sıcaklığa getirilir ve her mahallin ihtiyacına göre farklı debilerde üflenir.



Şekil 12. Değişken Hava Debili (VAV) Sistemin şematik gösterimi [13]

Değişken Hava Debili (VAV) sistemin çalışma karakteristikleri Tablo-6'da verilmiştir.

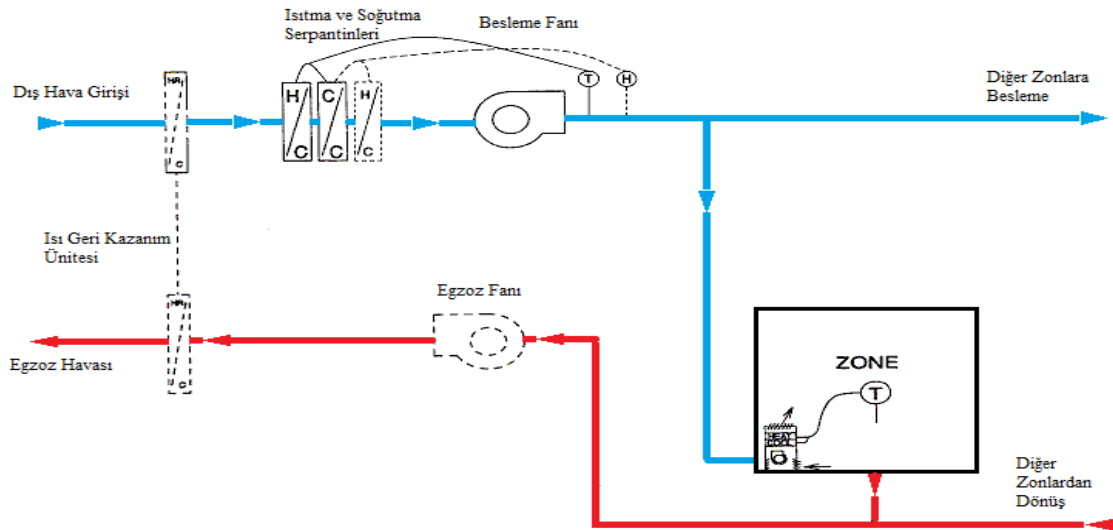
Tablo 6. VAV sistem karakteristikleri

Klima Santrali Üfleme Sıcaklığı	Yaz	13 °C
	Kış	35 °C
Isıtma Kaynağı	Sıcak Su Kazanı (80-60 °C)	
Tekrar ısıtma	Sıcak Su Kazanı	
Soğutma Kaynağı	Hava soğutmalı su soğutma grubu (7-12 °C)	

2.5.3. Fan-Coil + Taze Hava Sistemleri (FCU)

FCU sistemleri bir fan, ısıtma ve soğutma serpantinlerinden oluşmaktadır. Taze hava; merkezi klima santralinde belirli bir sıcaklığa getirilir ve mahallere gönderilir. Mahallerde bulunan FCU sistemleri havayı istenilen sıcaklığa getirir. FCU sistemleri her mahal için birbirlerinden bağımsız termostat kontrolü yapabilme yeteneğine sahiptir. Merkezi klima santralinden gelen hava, Fan-Coil cihazında fan tarafından üflenir ve serpantin üzerinden geçirilir. Isıtma sezonu için, merkezi klima santralinde kazandıran sıcak su, soğutma sezonu için ise su soğutma grubundan (Chiller) gelen soğuk su serpantinden geçerek havayı şartlandırır.

FCU sistemleri basit yerel kontrol sağlamakta ve ilk yatırım maliyetinin düşük olması sebebiyle tercih edilmektedir. Örnek bir FCU sisteminin şematik gösterimi Şekil-13'te verilmiştir.



Şekil 13. Fan-Coil (FCU) Sistemin şematik gösterimi [13]

Fan-coil (FCU) Sistemleri için belirlenen sistem karakteristikleri Tablo-7'de verilmiştir.

Tablo 7. FCU sistem karakteristikleri

Klima Santrali Üfleme Sıcaklığı	Yaz	19 °C
	Kış	23 °C
Fan-coil Cihaz Çıkış Sıcaklığı	Yaz	13 °C
	Kış	35 °C
Isıtma Kaynağı	Sıcak Su Kazanı 80-60 °C	
Soğutma Kaynağı	Hava soğutmalı su soğutma grubu 7-12 °C	

2.6. Enerji Birim Fiyatı ve Karbondioksit Salınım Miktarları

Enerji maliyeti hesapları yapılırken doğalgaz enerjisi ve elektrik enerjisi için bir birim fiyat tayin edilmiştir. Tablo-8'de doğalgaz ve elektrik enerjileri için birim fiyat verilmiştir.

Tablo 8. Doğalgaz ve elektrik enerjilerinin birim fiyatları [14,15]

	Birim Fiyat
Doğalgaz	0.995122 TL/ m ³
Elektrik	0.153 TL/kWh

Binalarda tüketilen fosil kaynaklı yakıtlar ve üretimi sırasında atmosfere sera gazı salınan elektrik enerjisi karbondioksit salınımının sebebidir. Isıtma sezonunda, sıcak su üretimi için doğalgaz tüketilirken; soğutma sezonunda ise, çillerde soğuk su

üretimi, fanların sağladığı havalandırma, pompalama, aydınlatma ve elektrikli ekipmanların çalışması için elektrik enerjisi tüketilir. Bazı enerji kaynakları ve sera gazı salınım faktörleri Tablo-9'da verilmiştir.

Tablo 9. Birincil Enerji Kaynaklarının CO₂ Dönüşüm Katsayıları [5]

Enerji Çeşidi	CO ₂ Dönüşüm Katsayısı (kg CO ₂ /kWh)
Elektrik	0.354
Doğalgaz	0.202
Sıvı Yakıtlar	0.286
Hidrojen	0

3. Simülasyon Bulguları

Üç farklı mimari alternatif için Saatlik Analiz Programı (HAP) ile gerçekleştirilen enerji simülasyonu sonuçları aşağıda verilmiştir.

3.1. Tek Camlı Pencere-Yalıtımlı Duvar Durum için Simülasyon Sonuçları

Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar durumunda üç farklı HVAC sistemi için aylık ve yıllık, elektrik ve doğalgaz tüketimi Tablo-10'da verilmiştir.

Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için aylık bazda ve yıllık toplam enerji maliyeti üç farklı HVAC sistemi için Tablo-11'de verilmiştir.

Tablo 10. Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için enerji tüketim miktarı

Ay	CAV		VAV		FCU	
	HVAC Kaynaklı Enerji Tüketimi		HVAC Kaynaklı Enerji Tüketimi		HVAC Kaynaklı Enerji Tüketimi	
	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)
Ocak	26980	175736	17953	198618	8511	213377
Şubat	16809	104195	15262	125830	7619	135851
Mart	12392	75700	15231	96935	7797	103763
Nisan	954	0	8268	0	8028	0
Mayıs	15413	0	16971	0	17642	0
Haziran	32632	0	30532	0	29015	0
Temmuz	60723	0	57368	0	47354	0
Ağustos	48601	0	47725	0	39597	0
Eylül	30120	0	28189	0	27803	0
Ekim	2629	13732	11753	27273	7737	29067
Kasım	13226	78417	14557	103792	7461	106103
Aralık	22911	145077	16565	166578	8727	181068
Toplam (kWh/yıl)	283390	592857	280374	719026	217291	769229

Tablo 11. Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için enerji maliyeti

Ay	CAV	VAV	FCU
	Enerji Maliyeti (TL)	Enerji Maliyeti (TL)	Enerji Maliyeti (TL)
Ocak	19346.67	19947.12	19780.63
Şubat	11595.06	13231.96	12930.4
Mart	8451.59	10724.91	10178.81
Nisan	145.96	1265	1228.28
Mayıs	2358.18	2596.56	2699.22
Haziran	4992.69	4671.39	4439.29
Temmuz	9290.61	8777.3	7245.16
Ağustos	7435.95	7301.92	6058.34
Eylül	4608.36	4312.91	4253.85
Ekim	1591.42	4160.05	3700.96
Kasım	8814.49	11215.6	10330.05
Aralık	16069.05	16960.09	17015.71
Toplam (TL/yıl)	94700.08	105164.9	99860.75

Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için üç farklı HVAC sistemi kullanıldığında atmosfere salınan CO₂ miktarı Tablo-12'de verilmiştir.

Tablo 12. Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için CO₂ salınım miktarı

Sistem	CO ₂ Salınım Miktarı (ton/yıl)
CAV	219.5
VAV	240.4
FCU	215.9

3.2. Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar Durum için Simülasyon Sonuçları

Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar durumunda üç farklı HVAC sistemi için aylık ve yıllık, elektrik ve doğalgaz tüketimi Tablo-13'te verilmiştir.

Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar durum için aylık bazda ve yıllık toplam enerji maliyeti üç farklı HVAC sistemi için Tablo-14'te verilmiştir.

Tablo 13. Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar durum için enerji tüketim miktarı

Ay	CAV		VAV		FCU	
	HVAC Kaynaklı Enerji Tüketimi		HVAC Kaynaklı Enerji Tüketimi		HVAC Kaynaklı Enerji Tüketimi	
	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)
Ocak	15090	92955	18004	114332	8371	128707
Şubat	8246	46578	14917	65307	7445	75592
Mart	4978	25423	14666	43778	7639	51862
Nisan	8333	0	10156	0	12707	0
Mayıs	25527	0	22865	0	23820	0
Haziran	41127	0	39056	0	35096	0
Temmuz	65990	0	67247	0	51048	0
Ağustos	53985	0	55969	0	43150	0
Eylül	38300	0	33983	0	31953	0
Ekim	724	3193	11246	9791	7697	14950
Kasım	6034	31436	14667	52697	7339	56463
Aralık	12983	77918	17069	96379	8587	111829
Toplam (kWh/yıl)	281317	277503	319845	382284	244852	439403

Tablo 14. Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar durum için enerji maliyeti

Ay	CAV	VAV	FCU
	Enerji Maliyeti (TL)	Enerji Maliyeti (TL)	Enerji Maliyeti (TL)
Ocak	10358.67	12655.76	12426.78
Şubat	5295.29	7937.88	7685.35
Mart	2963.26	6035.07	5660.01
Nisan	1274.94	1553.86	1944.17
Mayıs	3905.63	3498.34	3644.46
Haziran	6292.43	5975.56	5369.68
Temmuz	10096.47	10288.79	7810.34
Ağustos	8259.7	8563.25	6601.95
Eylül	5859.9	5199.39	4888.8
Ekim	387.28	2568.53	2472.31
Kasım	3645.55	6807.61	6012.56
Aralık	8734.09	10957.97	10998.2
Toplam (TL/yıl)	67073.26	82042.07	75514.65

Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar durum için üç farklı HVAC sistemi kullanıldığında atmosfere salınan CO₂ miktarı Tablo-15'te verilmiştir.

Tablo 15. Çift camlı pencere-yalıtımsız duvar durum için CO₂ salınım miktarı

Sistem	CO ₂ Salınım Miktarı (ton/yıl)
CAV	215.2
VAV	232.8
FCU	216.4

3.3 Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar Durum için Simülasyon Sonuçları

Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar durumunda üç farklı HVAC sistemi için aylık ve yıllık, elektrik ve doğalgaz tüketimi Tablo-16'da verilmiştir.

Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için aylık bazda ve yıllık toplam enerji maliyeti üç farklı HVAC sistemi için Tablo-17'de verilmiştir.

Tablo 16. Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için enerji tüketim miktarı

Ay	CAV		VAV		FCU	
	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (kWh)
Ocak	11168	43903	16852	70083	11322	79702
Şubat	5647	17827	13780	35751	9884	44823
Mart	2552	5600	13242	20340	10055	29565
Nisan	13136	0	10807	0	18482	0
Mayıs	30342	0	24717	0	29140	0
Haziran	44204	0	41361	0	39753	0
Temmuz	66429	0	68872	0	53822	0
Ağustos	54860	0	57778	0	46126	0
Eylül	41562	0	36332	0	36257	0
Ekim	14637	374	10768	4200	10261	10328
Kasım	3910	10261	13188	28290	9772	29172
Aralık	9710	36499	16032	59160	11643	69632
Toplam (kWh/yıl)	298157	114464	323729	217824	286517	263222

Tablo 17. Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için enerji maliyeti

Ay	CAV	VAV	FCU
	Enerji Maliyeti (TL)	Enerji Maliyeti (TL)	Enerji Maliyeti (TL)
Ocak	5510.7	8647.54	8634.45
Şubat	2407.8	5204.37	5393.92
Mart	875.41	3787.47	4098.74
Nisan	2009.8	1653.47	2827.74
Mayıs	4642.32	3781.7	4458.42
Haziran	6763.21	6328.23	6082.2
Temmuz	10163.63	10537.41	8234.76
Ağustos	8393.58	8840.03	7057.27
Eylül	6358.98	5558.79	5547.32
Ekim	2271.84	2011.22	2464.33
Kasım	1486.83	4467.67	4021.41
Aralık	4646.44	7576.15	7811.51
Toplam (TL/yıl)	55530.6	68394.09	66632.12

Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için üç farklı HVAC sistemi kullanıldığında atmosfere salınan CO₂ miktarı Tablo-18'de verilmiştir.

Tablo 18. Çift camlı pencere-yalıtımlı duvar durum için CO₂ salınım miktarı

Sistem	CO ₂ Salınım Miktarı (ton/yıl)
CAV	214.7
VAV	225.7
FCU	213.7

4. Sonuç ve Öneriler

Enerji simülasyonu bulgularında verilen çift camlı pencere-yalıtımlı duvar ve çift camlı pencere-yalıtımsız duvar mimari durumları dikkate alındığında dış duvarda kullanılan 5 cm'lik bir yalıtımın bina enerji maliyetinde CAV sistemi için % 17.2, VAV sistemi için % 16.6, FCU sistemi için % 11.7 oranında tasarruf sağladığı görülmektedir.

Tek camlı pencere-yalıtımlı duvar ve çift camlı pencere-yalıtımlı duvar mimari durumları için verilen enerji simülasyonu bulguları incelendiğinde binanın dış cephesinde yer alan pencerelerde düşük yayımlı çift camlı pencere kullanılması durumunda yıllık enerji maliyetinde CAV sistemi için % 41, VAV sistemi için % 35, FCU sistemi için % 33.2 oranında tasarruf sağladığı görülmektedir. Çift cam kullanımı durumunda sağlanan tasarruf miktarının dış duvarın yalıtımlı olması halinde sağlanan tasarrufa göre yüksek olmasının sebebi binanın dış cephesinin büyük ölçüde cam giydirmesi olmasından kaynaklanmaktadır.

Farklı mimari durumlar çevresel etki açısından değerlendirildiğinde; dış duvarda kullanılan 5 cm'lik bir yalıtımın,

binanın CO₂ salınımını CAV sistemi için 0.5 ton/yıl, VAV sistemi için 7.1 ton/yıl, FCU sistemi için 2.7 ton/yıl azalttığı görülmektedir. Pencerelerin tek camlı olma durumu yerine çift camlı olma durumunda ise binanın CO₂ salınımı CAV sisteminde 4.2 ton/yıl, VAV sisteminde 14.7 ton/yıl, FCU sisteminde ise 2.2 ton/yıl azalmaktadır.

Örnek binada daha etkin bir enerji verimliliği sağlamak için uygun mimari durumu ve uygun HVAC iklimlendirme sistemi seçilmesine ilave olarak; önem sırasıyla egzoz havası ile taze hava arasında duyulur ve gizli ısı transferini sağlayabilen etkinlik katsayısı yüksek ısı tekeri tipinde bir döner ısı geri kazanım ünitesinin kullanılması, uygun mahal içi kuru termometre sıcaklığı ve bağıl neminin referans alınması, soğutucu eşanjör için uygun by-pass faktörünün (bu çalışmada 0.10 alınmıştır) seçilmesi, pompalama elemanlarının (fanlar, pompalar ve kompresörler) frekans invertörleriyle tahrik edilmesi, klima santrallerinde geçiş mevsimlerinde serbest soğutma uygulamasının yapılması, oransal brülörlü-baca gazı analiziyle yanma verimliliği kontrol altında tutulan yoğunlaşma kazanlarının kullanılması yanında tüm mekanik tesisatta ısı yalıtımı uygulamalarının optimum bir biçimde yapılması gereklidir.

Yapılacak olan fizibilite çalışmasından elde edilecek sonuçlara göre, çevreci ve enerji verimliliği yüksek bir sistem olduğu bilinen yatay borulmalı toprak kaynaklı bir ısı pompasının örnek binada ısıtma ve soğutma maksatlı kullanılması yanında, kısa sürelerde kendilerini amorti ettikleri bilinen bir mini veya küçük ölçekli kojenerasyon (veya trijenerasyon) sisteminin kullanılması uygun olabilecektir [16].

Örnek binanın ısı kazanç ve kayıplarını minimize etmek için fotoselli kayar kapılarda hava perdeli sistemlerin kullanılması, binanın kuzey yönüne iğne yapraklı ağaçların dikilmesi (kışın

yapıyı soğuk kış rüzgârlarına karşı kısmen korur) ve yaprağını döken ağaçların ise binanın güney yönüne dikilmesi (yazın güneş etkilerini azaltırken, kışın da güneş ışınları engellenmemiş olur) gibi uygulamaların enerji verimliliği bakımından önemli ölçüde yararı olacağı söylenebilir.

Malatya gibi gündüz yüksek ve gece ise düşük sıcaklıklarla karşılaşılacak iklimlerde parafin mumu vb. faz değiştiren uygun maddelerde gizli ısı depolaması yoluyla soğutma ve ısıtma yapılması [17] yanında, gelecekte maliyet azalması sonucunda PV (güneş pilleri) ve yakıt pilleri kullanılarak örnek binanın elektrik ve hatta ısıtma ihtiyacının bir kısmının karşılanması [18] vb. yenilikçi uygulamalar alternatif çözümler olarak düşünülebilir.

Kaynaklar

1. Erdoğan A., Malatya'da Örnek Bir Binada Enerji Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
2. Key World energy statistics, *International Energy Agency*, <http://www.iea.org> (Erişim Tarihi: 15.06.2012)
3. Ünlü G., Sürdürülebilir Binalar İçin HVAC Sistemleri Seçimi, Tasarımı ve Enerji Verimliliği Analizi, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
4. Coşkun C., Oktay Z., Enerji Tasarrufu Perspektifinde Bir Kampüs Binasının Enerji Taraması Çalışması, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 115 (6), 49-55, 2010.
5. B. Yılmaz, Binalarda Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
6. R. M. Milbrandt, *Simulating Energy Efficiency In Laboratory Buildings*, Master of Science, 2008.
7. Pan, Y., Yin, R. and Huang, Z., Energy modeling of two Office buildings with data center for greenbuilding design, *Energy and Buildings*, 40 (7), 1145-1152, 2008.
8. Eskin, N. and Türkmen, H., Analysis of annual heating and cooling energy requirements for Office buildings in different climates in Turkey, *Energy and Buildings*, 40 (5), 763-773, 2008.
9. İnanıcı, M. N. and Demirbilek, F. N., Thermal performance optimization of building aspect ratio and South window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey, *Building and Environment*, 35(1), 41-52, 2000.
10. Yılmaz T., Bulut H., Türkiye İçin Yeni Dış Ortam Sıcaklık Tasarım Değerleri, *V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 293-311, İzmir, 2001.
11. "8760 saatlik bina enerji analizi", *Alarko Carrier Teknik Bülten*, Mayıs 2007, Sayı 21.
12. Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., Griffith, B., Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment*, 43 (4), 661-673, 2008.
13. Carrier, Hourly Analysis Program 4.50, Carrier, 2008, USA.
14. Doğalgaz Birim Fiyatı <http://www.malatyagazdagitim.com/Turkish/FiyatTarifesi.aspx>, Erişim Tarihi (13.06.2015).
15. Elektrik Birim Fiyatı <http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasasi/tarifeler?id=95>, Erişim Tarihi (13.06.2015).
16. Pennycook, K., *The Illustrated Guide to Renewable Technologies*, BSRIA Guide, London, 2008.
17. Günerhan, H., Faz Değişim Malzemeli Bir Soğutucunun Isıl Tasarımı, Binalarda Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik, IX Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu, İstanbul, s. 201-208, 2010.
18. Ural, Z., Gençoğlu, M.T., Konutsal Uygulama İçin Bir Yakıt Pili Sisteminin Tasarımı, *Kaynak Elektrik*, 246 (1), s. 98-103, 2009.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Effect of Temperature and Boric Acid on the Photoluminescence Properties of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ Material

İlhan PEKGÖZLÜ^{1*}, Soner ÇAKAR²

¹Bartın University, Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, Bartın / TURKEY

²Bülent Ecevit University, Application and Research Center for Science and Technology, Zonguldak / TURKEY

Received: 28.10.2015 Revised: 10.11.2015 Accepted: 23.11.2015

Abstract

Dy^{3+} doped SrIn_2O_4 materials were prepared by a conventional solid state reaction. The synthesized materials were characterized using powder XRD and SEM. The synthesized materials were investigated using spectrofluorometer at room temperature. It observed that two main bands peaking at (480-494) nm, 582 nm and of a weaker feature at (672-683) nm under 294 nm excitation. The effect of the sintered temperature and boric acid on the photoluminescence properties of the synthesized materials was studied in detail. The optimum sintered temperature and boric acid concentration was observed at 950°C and 0.02 mol, respectively. Finally, the photoluminescence spectra of the synthesized material SrIn_2O_4 with different Dy^{3+} doping concentrations were analyzed at room temperature.

Keywords: Boric Acid, Luminescence, XRD, SEM, SrIn_2O_4

$\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ Malzemesinin Fotoluminesans Özelliğine Borik Asit ve Sıcaklık Etkisi

Özet

Dy^{3+} katkılı SrIn_2O_4 malzemeleri klasik katı hal reaksiyonu ile hazırlanmıştır. Sentezlenen malzemeler toz XRD ve SEM kullanılarak karakterize edilmiştir. Sentezlenen malzemeler oda sıcaklığında bir spektrofotometre kullanılarak araştırılmıştır. 294 nm uyarı ışığı altında (480-494) nm, 582 nm’lerde iki ana pik ve (672-683) nm’de zayıf bir pik gözlemlenmiştir. Sentezlenen malzemelerin fotoluminesans özelliğine sinterleme sıcaklığı ve borik asit etkisi detaylı olarak çalışılmıştır. Optimum sinterleme sıcaklığı ve borik asit konsantrasyonu sırasıyla 950°C ve 0.02 mol olarak gözlemlendi. Son olarak da farklı konsantrasyonlar da Dy^{3+} katkılı SrIn_2O_4 malzemesinin fotoluminesans özelliği oda sıcaklığında analiz edildi.

Anahtar Kelimeler: Borik Asit, Luminesans, XRD, SEM, SrIn_2O_4

1. Introduction

Among trivalent rare-earth elements, the Dysprosium ions have been incorporated into glasses and crystal lattices in order to obtain two primary color yellow/blue luminescent materials. Dy^{3+} -doped solid-state systems can be quite easily excited by the commercial UV or blue LEDs, because their excitation spectra exhibit several 4f-4f electronic bands located in the 340-480 nm spectral range [1]. Indium belongs to the same IIIA group of periodic table of elements with boron, aluminum and gallium and exhibits similar chemical properties. SrIn_2O_4 is an indium compound, is characterized by having an association SrO_8 polyhedra and InO_6 octahedra. It has excellent host lattice for efficient luminescence due to stable physical and chemical properties [2,3]. Up to now, many papers related with rare earth ions doped SrIn_2O_4 have been reported by different research groups [2-7]. To assist the sintering reaction, addition of boric acid as a flux is a popular method to accelerate the sintering reaction. So, boric acid are widely used as the flux for the conventional solid-state reaction because of its low melting point [8]. So, in this study, $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ phosphors with different mol ratios of B^{3+} were prepared by a conventional solid state reaction. The synthesized materials were characterized by using the powder X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). After synthesis and characterization of all synthesized SrIn_2O_4 materials, the photoluminescence properties of these phosphors were studied in detail using a spectrofluorometer.

2. Experimental

$\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$, B^{3+} phosphors were prepared by a conventional solid state reaction. SrCO_3 , In_2O_3 , H_3BO_3 and Dy_2O_3 were used as starting materials. The raw materials were weighed according to the stoichiometric proportions. The starting materials were thoroughly

mixed in ethanol and ground in an agate mortar at room temperature. The solution was completely evaporated to dryness, and then the mixtures were placed in alumina crucibles. First, the mixtures were pre-sintered in a muffle furnace at about 450 °C for 1 h in air. The obtained powders were thoroughly mixed and then heated up to 650 °C for 1 h in air. After milling, the powders were slowly heated up at final temperature (900-1200°C). After cooling to room temperature, yellow powders were obtained. The XRD structural analysis of B^{3+} and Dy^{3+} doped SrIn_2O_4 materials were performed on an X-ray Phillips X’Pert Pro equipped with $\text{Cu K}\alpha$ (30 kV, 15 mA, $\lambda = 1.54051 \text{ \AA}$) radiation at room temperature. Scanning was generally performed between 10° and 90° 2θ. Measurement was made with 0,0330° step size at 25°C temperature. Observation of particle morphology was investigated by scanning electron microscope (Phillips XL-30S FEG). The photoluminescence spectra were measured at room temperature with a Thermo Scientific Lumina fluorescence spectrometer equipped with a 150 W Xenon lamp.

3. Results and Discussion

3.1. XRD and SEM Analysis

Fig. 1 shows the XRD pattern of the synthesized phosphors prepared by a solid state reaction without boric acid at different sintered temperatures (900-1200°C). The crystal structure of SrIn_2O_4 was appeared at 900, 950, 1000, 1100 and 1200°C, which are in agreement with the JCPDS (17-0643). Fig. 2 shows the morphology of SrIn_2O_4 prepared by a solid state reaction without boric acid at 900, 950 and 1000°C. The SEM photographs of the synthesized SrIn_2O_4 exhibit particles of irregular lumps to nearly spherical geometry with rounded corners and smooth grain interfaces. The grain size distribution is narrow, ranging from 1 to 5 micrometer.

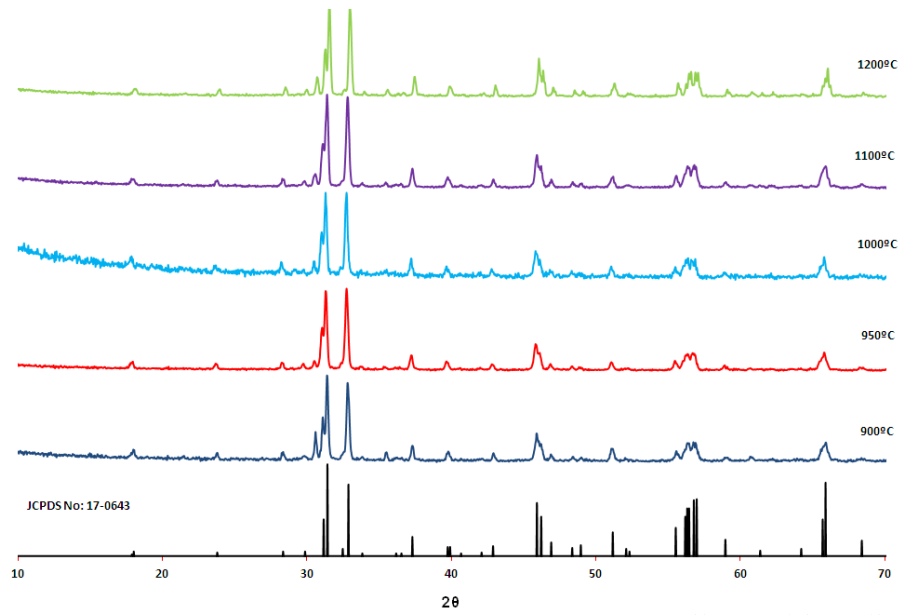
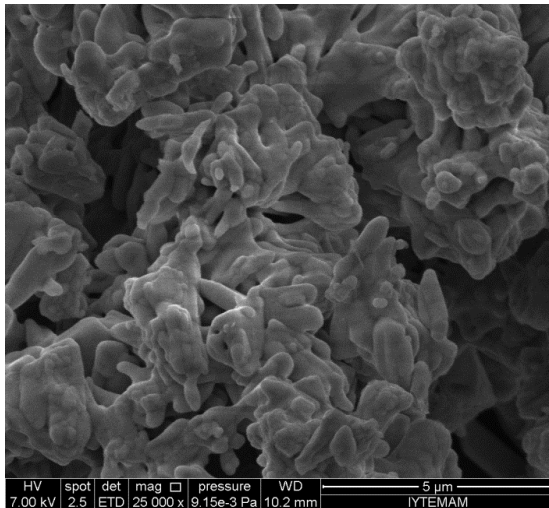
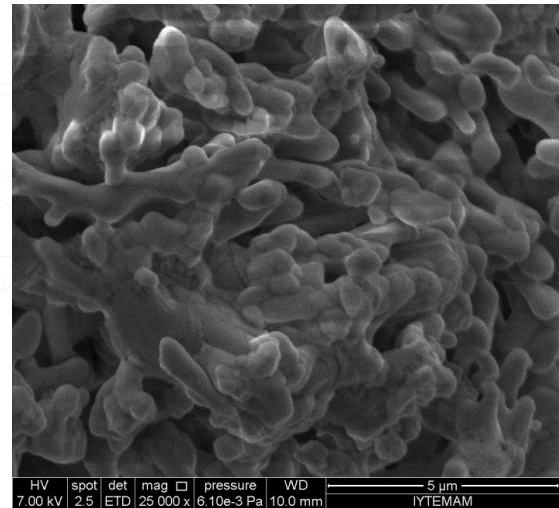


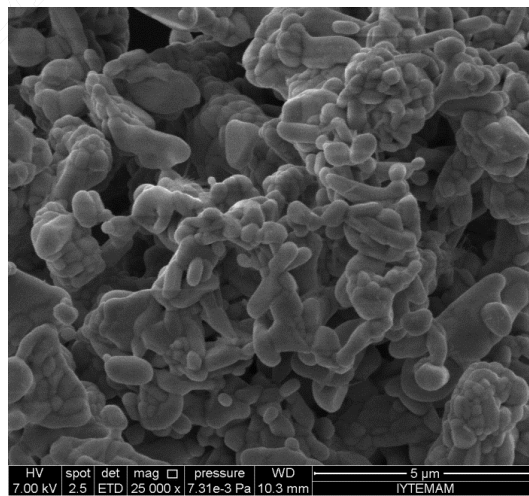
Fig. 1. XRD pattern of the synthesized phosphors prepared by a solid state reaction with different sintered temperatures.



a) 900°C



b) 950°C



c) 1000°C

Fig. 2. SEM photographs of SrIn_2O_4 particles prepared by a solid state reaction

3.2. Photoluminescence Properties of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$

The excitation and emission spectra of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ are demonstrated in Fig. 3a and 3b. The excitation spectrum of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ (Fig. 3a) monitored with 582 nm emissions of Dy^{3+} (${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$). Dy^{3+} with $4f^9$ configuration has complicated f-block energy levels, therefore various possible transitions between these levels are highly selective, and show sharp line spectra [9, 11, 12]. The weak bands in the range of 350–475 nm is $4f-4f$ transitions of Dy^{3+} , while a strong band about 294 nm can be attributed to a charge transfer band (CTB) of $\text{Dy}^{3+} - \text{O}^{2-}$ [9, 13-15]. The emission spectrum of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ (Fig. 3b) has been measured upon 294 nm excitation. It consists of two main bands peaking at (480-494) and 582 nm and of a weaker feature at (672-683) nm. These are assigned to the transitions from the ${}^4\text{F}_{9/2}$ to the ${}^6\text{H}_{15/2}$, ${}^6\text{H}_{13/2}$ and ${}^6\text{H}_{11/2}$ states, respectively [7, 9, 10, 16- 20]. And the intensity of yellow (${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$) emission is much stronger than that of blue (${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$) emission [9, 16- 19].

In addition, the emission and excitation spectra of the synthesized material SrIn_2O_4 with different Dy^{3+} doping concentrations were analyzed at room temperature. The dependence of the emission intensity on the Dy^{3+} concentration for the $\text{Sr}_{1-x}\text{Dy}_x\text{In}_2\text{O}_4$ ($0.0025 \leq x \leq 0.05$) is shown in Fig. 4. The shapes and positions of the emission peaks have exhibited no obvious changes. With increasing Dy^{3+} concentration in SrIn_2O_4 , the emission intensity of the synthesized phosphors increases and reaches a maximum at 0.005 mol. And then, when the mole concentration of Dy^{3+} ion exceeds this concentration level, the emission intensity decreases, due to concentration quenching. The concentration quenching of Dy^{3+} in phosphors is mainly caused by cross-relaxation, i.e. energy transfers from one Dy^{3+} to another neighbor Dy^{3+} by transition that match in energy [13, 21, 22]. Therefore, it can be seen that the optimum concentration of Dy^{3+} in SrIn_2O_4 is 0.005 mol.

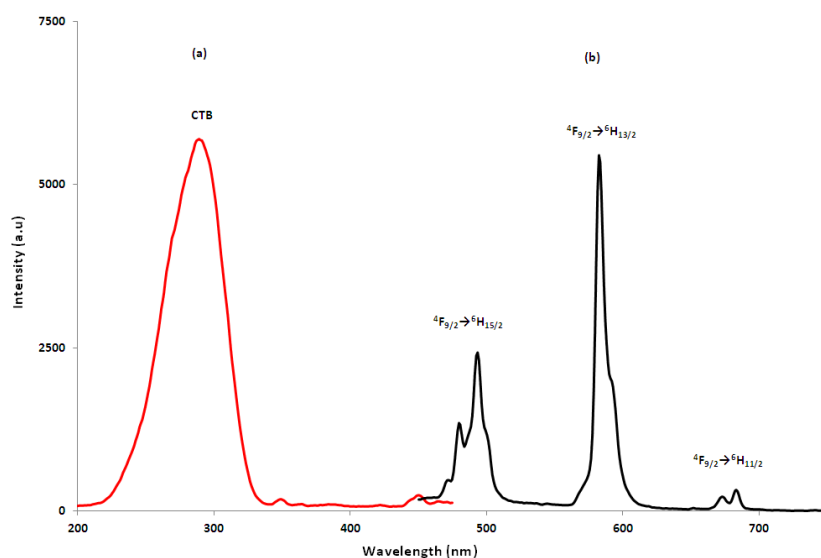


Fig. 3. The excitation (a) and emission (b) spectra of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ (%1) phosphor prepared by a solid state reaction at 950°C ($\lambda_{\text{exc}}=294\text{nm}$, $\lambda_{\text{em}}=582\text{nm}$).

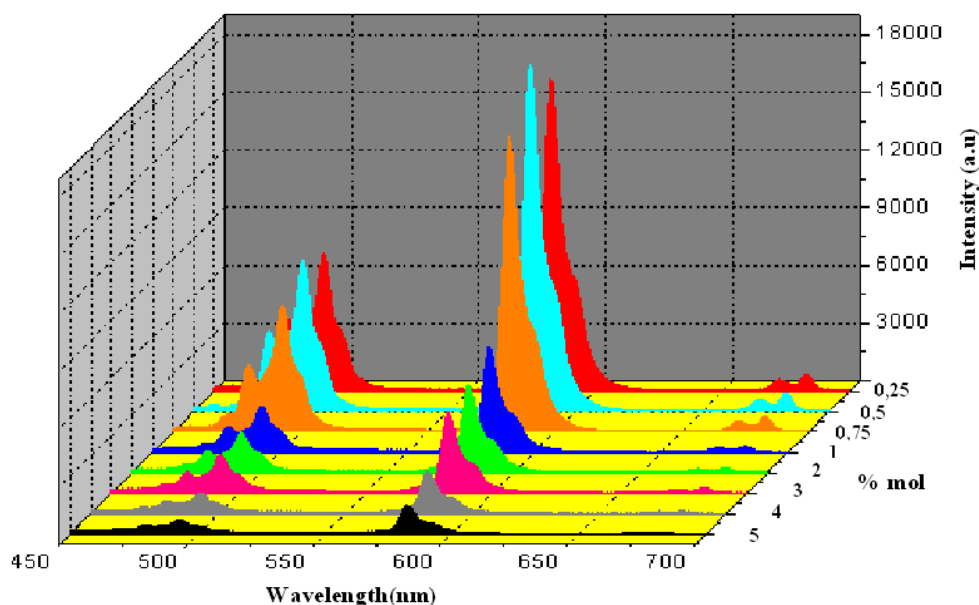


Fig. 4. Emission spectra of Dy^{3+} (0.25, 0.50, 0.75, 1, 2, 3, 4, and 5 mol%): SrIn_2O_4 phosphors ($\lambda_{\text{exc}}=294\text{nm}$) prepared by a solid state reaction at 950°C .

3.3. Influence of Boric Acid

Recently, the effect of boric acid on the luminescence properties has been extensively investigated by the scientists. They were observed that the emission intensity of various phosphors was significantly increased when the minor amount of boric acid was added to the hosts [23-31]. So, the emission spectra of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ with different B^{3+} doping concentrations were analyzed at room temperature. The molar ratio of H_3BO_3 to SrCO_3 was varied from 0 to 0,05. The effect of boric acid on the crystal structure of phosphors prepared by solid state reaction is shown Fig. 5. It is evident that phosphors showed that all the peaks were due to SrIn_2O_4 phase and no other crystalline phase could be detected with the increasing of the amount of boric acid.

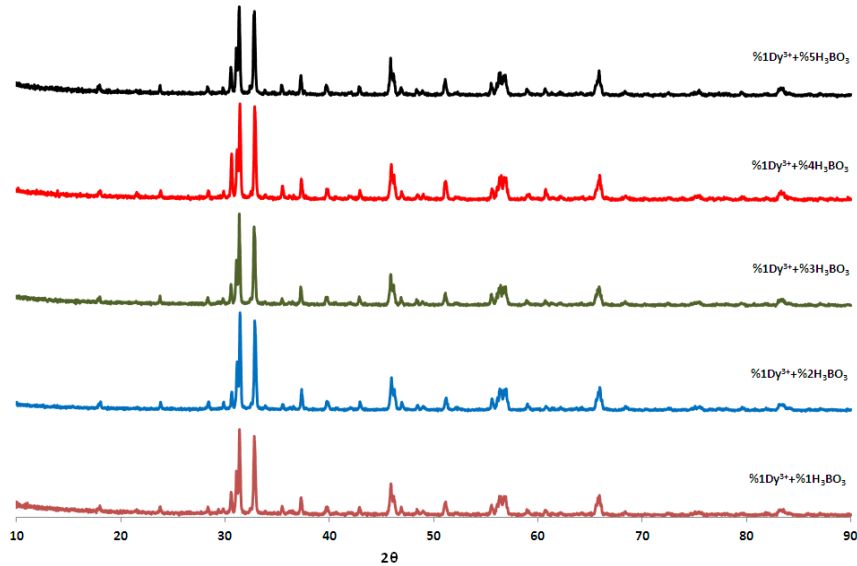


Fig. 5. XRD patterns of the synthesized $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ (%1) phosphors with different amount of boric acid

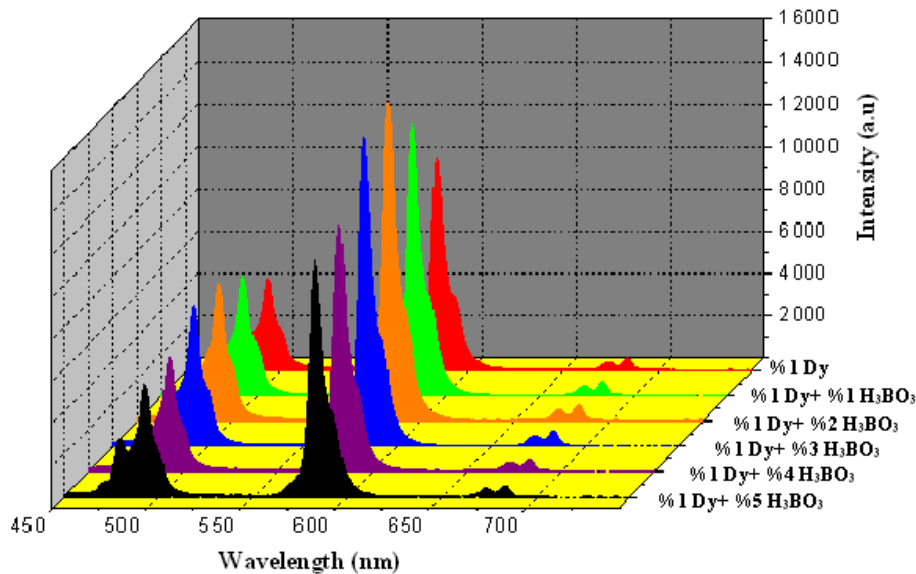


Fig. 6. The emission spectra of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ (%1) with different amount of boric acid ($\lambda_{\text{exc}}=294$ nm, 950°C)

Fig. 6 further shows the emission intensity as a function of the B^{3+} . The emission intensity increases with the H_3BO_3 content, reaching a maximum at H_3BO_3 content of $x=0.02$, and then decreases at higher H_3BO_3 content. The introduction of a small amount of H_3BO_3 to enter the lattice sites, meaning that more Dy^{3+} helps more Dy^{3+} can emit light. Moreover, it increases the radiative transition probability. Therefore, the emission is finally intensified with the introduction of a small amount of H_3BO_3 , although the non-radiative transition probability increases. However, when H_3BO_3 content exceeds 0,02 mol, non-radiative energy transfers will result in the luminescence quenching [24]. It can be expressed that the optimum molar ratio of boric acid to strontium carbonate is about 0.02

3.4. Influence of Sintered Temperature

Until recently, the effect of sintered temperature on the photoluminescence properties has been extensively investigated by the scientists. They were observed that the emission intensity changes significantly with the increase in temperature [28-31]. So, the emission properties of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ phosphor prepared at different sintered temperatures were analyzed. Fig. 7. shows the emission spectra of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}(\%2)$ phosphor with different sintered temperatures in the range 900-1200°C under the excitation of 294 nm. With increasing the sintered temperature, the emission intensity of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ increased up and reached a maximum at

950°C. When the sintered temperature exceeded 950°C, the emission intensity of the synthesized phosphor decreased. The phosphors prepared at 950°C have high photoluminescence intensity because of fine crystallinity that can be seen in Fig. 1. It is obvious that the emission intensity increased with the decrease of the sintered temperature, due to the improvement of crystallinity which is well in agreement with Fig. 1. However, the emission intensity changes significantly with the increase in temperature until 1200°C at which the emission intensity gets very low, it may be due to excessive sintering and aggregation of particles.

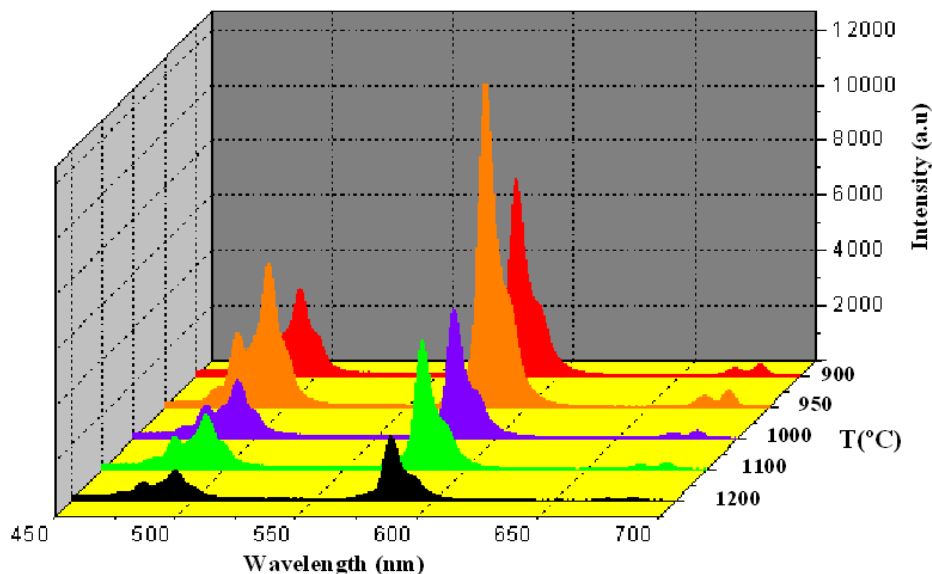


Fig. 7. The emission spectra of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}(\%2)$ phosphor prepared by a solid state reaction without boric acid at different sintered temperatures (900-1200°C).

4. Conclusions

Dy^{3+} doped SrIn_2O_4 materials were prepared by a conventional solid state reaction. The synthesized materials were characterized using powder XRD and SEM. The XRD pattern of all synthesized phosphor is in agreement with the JCPDS (17-0643). The synthesized materials were investigated using spectrofluorometer at room temperature. It observed that two main bands peaking at (480-494) nm, 582 nm and of a weaker feature at (672-683) nm under 294 nm excitation. The effect of the sintered temperature and boric acid on the photoluminescence properties of phosphors was studied in detail. With introduction of boric acid (0.02 mol), the emission intensity can be enhanced by 1.5 times under 294 nm excitation. And, optimal photoluminescent properties was observed at the sintering temperature of 950°C due to fine crystallinity. Also, the dependence of the emission intensity on the Dy^{3+} concentration for the SrIn_2O_4 were studied in detail. It was observed that the concentration quenching of Dy^{3+} in SrIn_2O_4 is 0.005 mol.

Acknowledgement

This project was financially supported by the foundation of Scientific Research Projects of Bartın University (BAP-2012-2-61).

References

- Pisarska J., Lisiecki R., Ryba-Romanowski W., Goryczkad T., Pisarska W.A., Unusual luminescence behavior of Dy^{3+} -doped lead borate glass after heat treatment, *Chemical Physics Letters*, (489), 198-201, 2011.
- Baszczuk A., Jasiorski M., Nyk M., Hanuza J., Maczka M., Luminescence properties of europium activated SrIn_2O_4 , *Journal of Alloys and Compounds*, (394), 88-92, 2005.
- Li P., et al., $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$: A Red Emitting Phosphor with a Broadened Near-Ultraviolet Absorption Band for Solid-State Lighting Semiconductor Devices, *Materials, and Processing, Journal of Electrochemical Society*, (158), H1201-H1205, 2011.
- Kao F. S., A study on the luminescent properties of new green-emitting $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Tb}$ phosphor, *Materials Chemistry and Physics*, (76), 295-298, 2002.
- Yamamoto H., et al., Luminescence Efficiency Enhancement by Impurity Doping in $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Pr}^{3+}$, *Journal of Electrochemical Society*, (154), J15-J20, 2007.
- Yang Z., Tian J., Wang S., Yang G., Liu X., Combustion synthesis of $\text{SrIn}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$ red emitting phosphor for white light-emitting diodes, *Materials Letters*, (62), 1369-1371, 2008.
- Liu X., et al., Host-Sensitized Luminescence of $\text{Dy}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ in Polycrystalline SrIn_2O_4 for Field Emission Displays, *Journal of Electrochemical Society*, (154), J21-J27, 2007.
- Nakamura A., Nambu N., Saitoh H., Effect of boron concentration in $\text{Y}_2\text{O}_3:(\text{Eu},\text{B})$ phosphor on luminescence property, *Science and Technology of Advanced Materials*, (6), 210-214, 2005.
- Pekgözlü İ., Çakar S., Photoluminescence properties of $\text{Li}_4\text{CaB}_3\text{O}_{10}:\text{M}^{3+}$ (M^{3+} : Dy and Sm), *Journal of Luminescence*, (132), 2312-2317, 2012.
- Erdoğan E., Pekgözlü İ., Photoluminescence Properties of $\text{CaAlBO}_4:\text{M}$ (M : $\text{Pb}^{2+}, \text{Dy}^{3+}, \text{and Sm}^{3+}$), *Journal of Applied Spectroscopy*, (81), 394-398, 2014.
- Nagpure I. M., Shinde K. N., Dhoble S. J., Kumar A., Photoluminescence characterization of Dy^{3+} and Eu^{2+} ion in $\text{M}_2(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (M = Ba, Sr, Ca) phosphors, *Journal of Alloys and Compounds*, (481), 632-638, 2009.
- Choi H., Kim Ch. H., Pyun Ch. H., Kim S.J., Luminescence of $(\text{Ca}, \text{La})\text{S}:\text{Dy}$, *Journal of Luminescence*, (82), 25-32, 1999.
- Omkaram I., Buddhudu S., Photoluminescence properties of $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$ powder phosphor, *Optical Material*, (32), 8-11, 2009.
- Sommerdijk J. L., Brill A., Hoex-strik F. M. J. H., Philips Research Report, (32), 149-159, 1977.

15. Krupa J. C., Gerard I., Martin P., Vacuum UV excitation of luminescent materials by synchrotron radiation—electronic structure, *Journal of Alloys and Compounds*, (188), 77-81, 1992.
16. Zhang J., Wang Y., Wen Y., Zhang F., Liu B., Luminescence properties of $\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{PO}_4)_7:\text{RE}^{3+}$ (RE = Ce, Tb, Dy, Tm and Sm) under vacuum ultraviolet excitation, *Journal of Alloys and Compounds*, (509), 4649-4652, 2011.
17. Raju G. S. R., Park J. Y., Jung H. C., Moon B. K., Jeong J. H., Kim J. H., Luminescence properties of $\text{Dy}^{3+}:\text{GdAlO}_3$ nanopowder phosphors, *Current Applied Physics*, (9), e92-e95, 2009.
18. Xin M. J., Tao Y. C., Qing C. Q., Photoluminescence characterization of Ce^{3+} and Dy^{3+} doped $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$ phosphors, *Journal of Luminescence*, (130), 1320-1323, 2010.
19. Yu M., et al., Fabrication, patterning, and optical properties of nanocrystalline $\text{YVO}_4:A$ ($A = \text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Er}^{3+}$) phosphor films via sol-gel soft lithography, *Chemistry of Material*, (14), 2224-2231, 2002.
20. Blasse G., Grabmaier B.C., *Luminescence Materials*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994, 44-45pp.
21. Zhang A., et al., Combustion synthesis and photoluminescence of $\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ -doped $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ nanocrystals, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, (67), 2430-2434, 2006.
22. Liu X., et al., Host-sensitized luminescence of $\text{Dy}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$ in polycrystalline CaIn_2O_4 for field emission displays, *Journal of Solid State Chemistry*, (180), 1421-1430, 2007.
23. Haranath D., et al., Role of boric acid in synthesis and tailoring the properties of calcium aluminate phosphor, *Materials Chemistry and Physics*, (101), 163-169, 2007.
24. Shu W., et al., Enhanced red emission in $\text{LiAl}_5\text{O}_8:\text{Fe}^{3+}$ phosphor by B^{3+} doping, *Journal of Alloys and Compounds*, (509), 3886-3888, 2011.
25. Wanjun T. and Donghua C., Photoluminescence properties Pr^{3+} and Bi^{3+} -codoped CaTiO_3 phosphor prepared by a peroxide-based route, *Materials Research Bulletin*, (44), 836-839, 2009.
26. Chen R., Song F., Chen D., Peng Y., Improvement of the luminescence properties of $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}$ obtained by modified solid-state reaction, *Powder Technology*, (194), 252-255, 2009.
27. Yin S., et al., Combustion synthesis and luminescent properties of $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}, \text{Al}$ persistent phosphors, *Journal of Alloys and Compounds*, (441), 327-331, 2007.
28. Ren F., Chen D., A promising red-emitting phosphor for white-light-emitting diodes prepared by a modified solid-state reaction, *Optics & Laser Technology*, (42), 110-114 2010.
29. Jung D. S., Hong S. K., Lee H. J., Kang Y. C., $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ phosphor particles prepared from spray solution containing boric acid flux and polymeric precursor by spray pyrolysis, *Optical Materials*, (28), 530-535, 2006.
30. Yao S. and Chen D., Combustion synthesis and luminescent properties of a new material $\text{Li}_2(\text{Ba}_{0.99}, \text{Eu}_{0.01})\text{SiO}_4:\text{B}^{3+}$ for ultraviolet light emitting, *Optics & Laser Technology*, (40), 466-471, 2008.
31. Jung D. S., et al., Effect of boric acid flux on the characteristics of $(\text{CeTb})\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$ phosphor particles prepared by spray pyrolysis, *Journal of Alloys and Compounds*, (398), 309-314, 2005



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Katmanlı Kalıp Teknolojisi ile Parça Üretimi

İsmail DURGUN, Emre DORUK*

TOFAŞ, Türk Otomobil Fabrikası A. Ş., Bursa / TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 29.09.2015 Düzeltme Tarihi: 07.11.2015 Kabul Tarihi: 30.11.2015

Özet

Sanayi devriminden günümüze dünya çok hızlı bir şekilde değişim göstermiştir. Ticari sınırların kalkması üretilen bir malın dünyanın her tarafına satılabilir olması rekabeti arttırmıştır. Bu durum günümüz üretim dünyasında kalite, zaman ve maliyet terimlerinin çok önem kazanmasını sağlamıştır. Bu doğrultuda gerek akademisyenler gerek mühendisler üretim tekniklerini geliştirmek için yeni yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yeni yöntemlerden birisi de Katmanlı Kalıp (Laminated Tooling)'tır. Katmanlı kalıp kısaca tabakalardan kalıp oluşturulup, döküm ya da plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak parça üretmektir. Bu makalede katmanlı kalıp üretim yöntemi incelenmiş ve sac parça şekillendirilmesi için uygunluğu analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı Kalıp Teknolojisi, Prototip Kalıp

Sheet Metal Part Production Using Laminated Tooling Technology

Abstract

The world has changed very quickly since the industrial revolution. The removal of trade barriers produced a commodity to be sold to all over the world and then this situation has increased the competition. Quality, time and cost term in today's production world has gained a lot of importance because of this competition. In this context, engineers and academicians have developed new methods to improve production techniques. One of these new methods is Laminated Tooling. In short, the mold is created using layers and produce parts using casting or plastic deformation methods. In this article, laminated tooling method is examined and analyzed the suitability for sheet metal forming.

Keywords: Laminated Tooling, Prototype Tooling

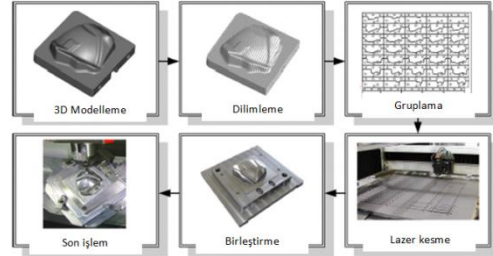
1. Giriş

Katmanlı kalıp yönteminin geleneksel yöntemler karşısında gözlemlenebilir avantajları olmasına rağmen günümüze kadar sac yapımında etkin bir şekilde kullanılamaması dikkat çekicidir. Bu konuda ilk çalışmalar Hart tarafından 1942'de gerçekleştirilmiştir. Hart katmanlı kalıp yöntemi ile kalıp oluşturup bunu ayakbağı üretiminde kullanmıştır. 1954 yılında Clevenger laminasyon kalıp konseptini hidroformingte kullanmıştır. Yine bu alanda ilk patent 1954 yılında Clevenger'a aittir. Katmanlı kalıp yöntemi ile kalıp oluşturup bu yöntemin seri üretimde kullanılabileceği görüşünü ileri sürmüş, çalışmalarıyla bunu göstermiştir. Katmanlı kalıp yöntemini sac yapımına adapte etme konusunda öncü sayılabilecek Nakagawa ve Kunieda [13-16] 3-D programlar ve CNC yardımı ile başarılı bir şekilde sac metal kalıbı oluşturmuşlardır. Günümüze kadar devam eden çalışmalar bizlere bu konuda detaylı bir veri sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, düşük hacimli prototip kalıp ve parça imalatında esnek bir yöntem olan katmanlı kalıp teknolojisini tanıtmak, avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymak ve uygulanabilirliğini analiz etmektir [1].

2. Katmanlı Kalıp

Katmanlı kalıp, tabakalar haline getirilmiş parçaların birleştirilmesi ile oluşturulur. Bu yöntem genelde aşağıdaki işlem adımları esas alınarak gerçekleştirilir [3];

- Tabakalar belirlenir.
- Tabaka alanları belirlendikten sonra, çeşitli kesme yöntemlerinden en uygunu kullanılarak kesme işlemi gerçekleştirilir.
- Tabakalar haline getirilmiş parçalar çeşitli bağ yöntemleri ile birleştirilir.
- Parçalar birleştirildikten sonra gerekli yüzey işlemleri uygulanır.



Şekil 1. Katmanlı kalıp işlem aşamaları [4]

Katmanlı kalıp uygulamasının çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Avantajları:

- Katmanlı kalıp kullanılması enjeksiyon kalıbı oluşturulurken konformatif soğutma kanallarının oluşumuna izin vermektedir. Şeklin sahip olduğu boşluğa göre soğutma kanallarına şekil verilebilmekte ve parça üzerinde tasarımcılara daha çok kontrol şansı vermektedir [6, 7, 10].
- Zarar görmüş ya da yıpranmış tabakaların tek tek değiştirilebilmesi
- Parça için kritik olmayan kısımlarda daha ucuz materyal kullanılarak tabaka oluşturulabilmesi.
- Düşük maliyet ve hızlı üretim

Dezavantajları:

- Kalıp çeşitli dilimlere bölündüğü için her zaman üretilen kalıp ile istenilen kalıp arasında tutarsızlıklar meydana gelmektedir. Bu nedenle kalıp üretimi sonrasında bir tamamlama işlemine ihtiyaç duyulur. Genelde freze yardımı ile gerçekleştirilen bu işlem istenilen tolerans değerlerine ulaşılması için zorunluluk haline gelmektedir. Bu da ayrı bir zaman ve maliyet oluşturmaktadır.

Çeşitli avantajları ve dezavantajları olan katmanlı kalıp yönteminin uygulanabildiği başlıca alanlar:

- Sac şekillendirme
- Thermoforming
- Kompozit kalıpları
- Metal ekstüzyon

- Enjeksiyon kalıpları
- RTM-Resin transfer kalıpları
- Basınçlı kalıplar

Bu üretim proseslerinin, optimum sıcaklık ve basınç altında hangi materyallerle kullanılabileceği Tablo 1’de görülmektedir.

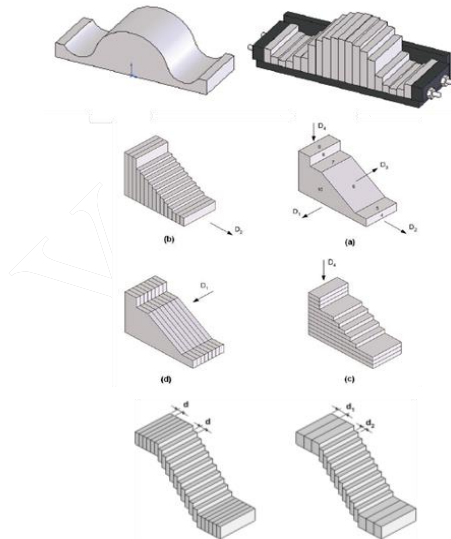
Tablo 1. Katmanlı kalıp kullanım alanları [8]

Üretim Prosesi	Maksimum İşlem Sıcaklığı (°C)	Kalıp veya Döküm Malzemesi	Maksimum İşlem Basıncı (MPa)	Kalıp için Isıl Yalıtım Gereksinimleri	Geçirgenlik Gereksinimleri	Uygulanabilir Bağ Metotları	Çalışılan Malzeme
Çelik Sac Şekillendirme	25	Alum, Çelik, Epoksi	7.0	düşük	gereksiz	difüzyon, kaplama veya yapıştırma	çelik veya alüminyum sac
Termoforming	55-90	Alum Çelik, Ağaç	0.8	düşük	vakumlama, konformal soğutma	difüzyon, kaplama veya yapıştırma	plastikler
Metal Ekstüzyon	500	Çelik kalıp	60	yüksek	soğutma	difüzyon, kaplama	alüminyum
Enjeksiyon Kalıbı	100-150	Çelik, Alum	14-170	yüksek	belirli ısıtma ve soğutma	difüzyon, kaplama veya yapıştırma	plastikler
Resin Transfer kalıplama	200	Çelik, Alum	0.3	yüksek	vakumlama, ısıtma	difüzyon, kaplama veya yapıştırma	plastikler
Kompres Kalıplama	200	Çelik, Alum	14-170	yüksek	soğutma	difüzyon, kaplama veya yapıştırma	plastikler
Kompozit Kalıplama	150	Çelik, Alum	1.4	Orta / yüksek	vakumlama, ısıtma	difüzyon, kaplama veya yapıştırma	kompozitler

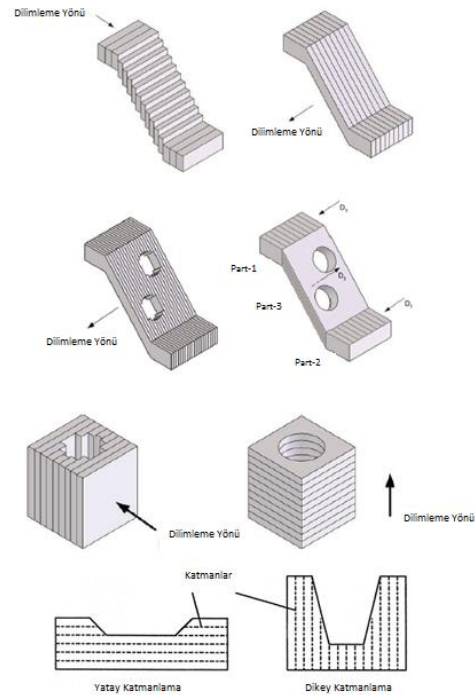
3. Katmanlı Kalıp İşlem Adımları

3.1. Modelleme

Üretilmesi istenilen parçanın CAD modeli kullanılarak kalıp tasarımı gerçekleştirilir. Tasarımı tamamlanan kalıp tabakalara ayrılarak her bir tabakanın modeli elde edilir (Şekil 2). Buradaki en önemli nokta tabaka kalınlıklarının yönlerinin (Şekil 3) belirlenmesidir. Sabit kalınlıklarda veya kullanıcı tarafından parça geometrisine göre belirlenecek kalınlıklarda tabakalar oluşturulabilir. Bunun yanında tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde optimizasyon metodu olarak genetik algoritmalar kullanılabilir [5, 9]. Tabakaların oluşturulması sırasında el ile çalışma gerçekleştirilmesi durumunda kalıp oluşturma süreci önemli bir zaman almaktadır. Bu nedenle dilimleme çalışması için otomatik çalışan bir program kullanılması gereklidir.

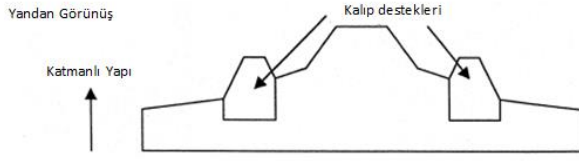


Şekil 2. Parçanın CAD Programında Kesim Yerlerinin Belirlenmesi [10]



Şekil 3. Dilimler yerleştirilirken, tabaka kalınlıklarının yönlerinin belirlenmesi [5]

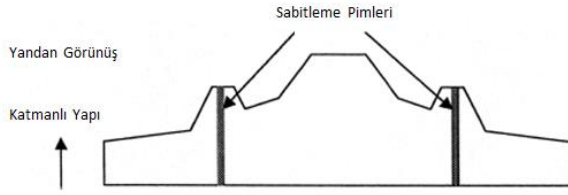
Tabakalar kesildikten sonraki süreç tabakaların yerleştirilmesidir. Kullanılan parçanın türüne ve boyutuna göre yerleştirme şekli sayesinde boyutsal toleranslar sağlanabilmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar, doğru oryantasyonun yüzey kalitesine direkt etki ettiğini göstermektedir. Uygulamada yatay ve dikey yerleştirme olmak üzere başlıca iki farklı yerleştirme mevcuttur.



Şekil 4. Yatay Yerleştirmede Desteklerin Konması [18]

Yatay yerleştirmede tabakalar üst üste istiflenerek kalıp oluşturulur. Yatay yerleştirmelerde ortaya çıkabilecek statik problemleri gidermek için şu işlemler yapılabilir:

- Tabakalara çeşitli destekler koymak (Şekil 4)
- Tabakalara dikey yönde çiviler veya vidalar monte etmek (Şekil 5)



Şekil 5. Yatay Yerleştirmede Çivilerin Monte Edilmesi [18]

Dikey yerleştirmede ise tabakalar dik olarak yan yana dizilir, istiflenmez. Bu yöntem ile iniş çıkışlar ya da olası pürüzler kendi içinde statik dengeye kavuşur.

Her iki yönteme baktığımızda dikey yerleştirmenin daha kullanışlı olduğu belirlenmiştir. Karşılaşılabilecek olası hatalar direkt eleminde edilmektedir. Yatay yerleştirmenin en önemli avantajı ise dilim sayısının dikey yerleştirmeye göre az olmasıdır. Uygulamada küçük ve basit geometriye sahip parçalar için yatay yerleştirme kullanılması gerekirken, büyük ve karmaşık parçalar için dikey yerleştirme yapmak daha uygundur. Çünkü; parça büyüdükçe diğer statik problemler açığa çıkmakta ve bu sorun yatay yerleştirme ile aşılanmaktadır [14, 15].

Kesme sonucu elde edilmiş tabakaları birleştirmeden önce kontrol edilmesi gereken önemli nokta "hacimsel sapma"dır. Herbir tabaka yanlarında veya üst ve altında konumlanan iki tabaka arasında bulunmaktadır. Dolayısıyla kompleks tabakalarda tabakalar arasında çeşitli uzunluk kalınlık farklılıkları oluşmaktadır. Buna hacimsel sapma denmektedir. Hacimsel sapmanın en önemli sebebi CAD yazılım programının kullanılmasıdır. Program daha öncede belirtildiği gibi çeşitli yaklaşımlar ve kabuller yapmaktadır. Bunun sonucunda bilgisayardaki model ve gerçek model arasında sapmalar meydana gelmektedir. Ancak belirlenen dilim sayısı ve dilim kalınlığına göre hacimsel sapma optimize edilebilmektedir. Hacimsel sapma çok kritik ve önemlidir. Eğer sapma minimuma indirilmezse üretim sonrası işleme gerek duyulmaktadır. Bu durumda maliyeti ve üretim süresini artırmaktadır. Eğer hacimsel sapmayı tamamen ortadan kaldırmak için çok ince dilimler kullanılırsa bu sefer üretim sonucu oluşacak kalıbın sertliği ve dayanıklılığı ile ilgili problem açığa çıkacaktır.

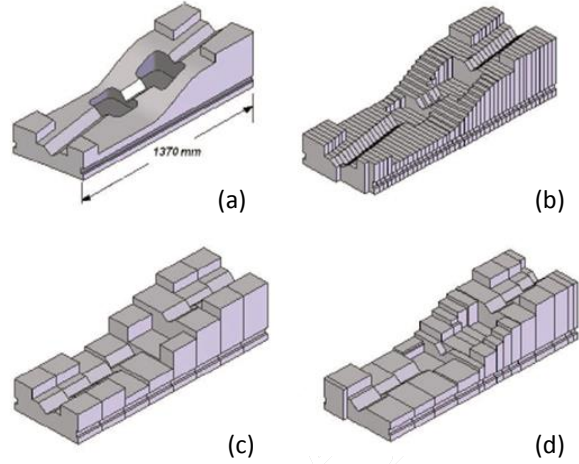
Hacimsel sapmayı azaltmanın birinci yolu optimum dilim sayısını belirlemektir (dolayısıyla ile optimum kalınlıkta belirlenmiş olur) (Şekil 6). Bu doğrultuda daha öncede belirtildiği gibi genetik bir algoritma kullanılmaktadır [5].

3.2. Kesme

"Line-of-sight" kesme işlemi 3 farklı yolla gerçekleştirilebilmektedir [2, 3, 8]:

Aşındırıcı Su Jeti ile Kesme (AWJ): Tabakalar üzerinde temassız konik kesim sağlayan bu yöntem çok kullanışlıdır. Bu metod endüstride 1982 yılından beri kullanılmaktadır. Direkt temasın sağlanmadığı ve yüzeye düşük kuvvetler etki ettiği için tabakalarda

defleksiyon ihmal edilebilecek kadar küçüktür. AWJ kesme makineleri 0.10 ve 0.26 m/dk hız aralığında, 210-280 MPa basınç aralığında çalışabilirler. Tikhomirov [13]'a göre AWJ kesme prosesinde ulaşılabilecek maksimum hız materyalin akma mukavemetine (yield strength) bağlıdır.



Şekil 6. Hacimsel Sapma Optimizasyonu (a) Örnek Model (b) Uniform Minimum Kalınlık Kullanılarak Hazırlanan Kalıp (c) Uniform Maksimum Kalınlık Kullanılarak Hazırlanan Kalıp (d) Optimum Kalınlık Değerleri ile Hazırlanan Kalıp [5].

AWJ yöntemi ile yapılan kesme işleminde drag line, kerf'in taper açısı ve kerf genişliğinden dolayı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ancak Matsui [17] bu sorunlara karşı çözümler üretmiştir:

- Kerf'in orta çizgisini genişliğinin yarısı kadar kaydırmak.
- Kesme açısını y-ekseni etrafında taper açısının yarısı kadar döndürmek.
- Aralık mesafesini minimize etmek için kesme ucunu x-ekseni etrafında eğmek.

Plazma Arkı ile kesme: AWJ gibi temassız bir kesme yöntemidir. Bu kesme yönteminin en cazip özelliği diğer kesme yöntemlerine göre 5 kat daha hızlı olmasıdır. Ancak kerf'in taper açısı çok fazladır ve kesme başına yakın olan kerf kenarı alev alabilmektedir. Dolayısıyla ile tabaka kesme işleminde bu metodu kullanmak verimli değildir.

Lazer ile kesme: Diğer iki metod gibi lazer kesme işlemi de temassız ve hızlı olarak gerçekleşen bir işlemdir. Lazer kesme işlemine başlamadan önce uygulanacağı yüzeye göre çeşitli özellikleri belirlenmelidir:

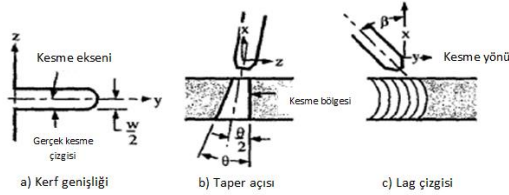
- Lazer Tipi (CO_2 , Nd-YAG)
- Işın zaman modu (darbeli)
- Işın Dağıtım Sistemi (hard-optik veya fiber-optik)
- Kesme işleminde kullanılacak gaz (N_2 füzyon kesme işlemi için, O_2 reaktif kesme işlemi için)

Uygulamada yukarıda belirtilen türlerin arasından optimum olanını seçmek için yapılmış olan deneyler sonucu, çelik sac için lazer tipi Nd-YAG, ışın zaman modu seçimi için darbeli, ışın dağıtım sistemi olarak hard-optik ve kesme işleminde kullanılacak gaz O_2 olarak belirlenmiştir.

Kesme Metodlarının Karşılaştırılması: 3 önemli kesme yöntemi yukarıda belirtilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir [2, 3, 8]:

- Oluklu kenar freze makinasının parçanın istenmeyen kısımlarını atmada uygulanabilmesi için malzemeye yüksek kesme kuvveti gerekmektedir. Ancak uygulanan bu yüksek kuvvet malzeme üzerinde önemli defleksiyonlara sebebiyet vermektedir. AWJ ve lazer kesme gibi temasın olmadığı kesme işlemleri neredeyse ihmal edilebilir defleksiyonlara yol açmaktadır.

- Her üç kesme yöntemi de yüksek hızlarda kesme işlemi yapabilmektedir. Ancak maksimum hız, AWJ ve freze kesme işlemlerinde kullanılan materyalin kompozisyonuna ve sertliğine bağlıdır. Lazer kesme işleminde ise maksimum hız sadece lazerin gücüne bağlıdır.
- Her üç kesme işleminde de maksimum bevel açısı 80 derecedir.
- Oluklu kenar freze makinesi bütün yöntemler arasında en pürüzsüz yüzey kalitesi sunmakta ancak bevel açısı arttıkça bu durum git gide kötüleşmektedir. Lazer kesme işleminde de benzer özellikler gözlemlenmiştir. AWJ kesme işlemi ise en hassas yüzey kalitesi sunmaktadır.



Şekil 7. (a) kerf genişliği (b) taper açısı ve (c) lag çizgisinin gösterimi [2, 3, 8]

Uygulamada kesme yöntemleri arasında tercih yapmak gerekirse, sırasıyla en uygun yöntemler:

- Nd-YAG lazer kesme işlemi ilk tercih edilebilecek yöntemdir. Çünkü maksimum lazer kesme hızı sadece lazerin kuvvetine bağlıdır, parça aşınması gözlemlenmez, kesme kuvveti ihmal edilebilir ve kerf diğer yöntemle arasında en küçük olandır.
- Aşındırıcı Su Jeti ile Kesme ikinci en kullanışlı yöntemdir. Maksimum kesme hızı kesilen materyalin kompozisyonuna ve sertliğine bağlıdır.
- Oluklu kenar freze; kesme kuvveti, kerf genişliği ve maksimum hızın materyale en çok bağlı olduğu kesme işlemidir.

3.3. Bağ Yöntemleri

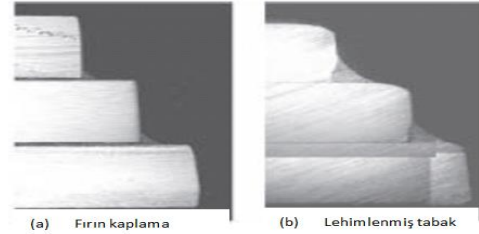
Bugüne kadar tabakaları bir arada tutacak çok sayıda bağ yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan denenmiş ve uygun görülmüş bağ yöntemleri difzyon bağı, kaplama, yapıştırıcı ile yapıştırma, soğuk lehimleme, kaynak ve mekaniktir [8, 12].

Kaplama, sıvılaştırılmış metalin (nikel, bakır, gümüş) ısıtılmış iki tabak arasında salınması ile oluşturulan metalürjik bağıdır. Bu bağ çeşidinde tabakalar arasındaki birleşme, kullanılan "astar" materyalin tabakaların yüzeyine difzyon ile yayılıp bu bölgelerde yeniden kristelleşip yapışkan bir etki oluşturması ile sağlanmaktadır. Eğer karşılıklı iki çelik levha kullanılırsa yüzeydeki oksitleri temizlemek için metalik olmayan kimyasal bir birleşim kullanılır. Kaplama işlemi 450°C ve üstündeki sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Bu yüzden erime noktası düşük olan alüminyum gibi metaller için tavsiye edilen bir bağ yöntemi değildir.

Kaplama bağ metodunun diğer bağ yöntemlerine göre en önemli avantajı uygulandığı metal üzerinde minimum seviyede etki yapmasıdır. Tüm plaka yüzeyine yayılan kaplamada kullanılan metal gerilmeyi de tüm yüzeye dağıtmaktadır. Ayrıca hacimsel sebeplerden eşleşmeyen iki tabaka arasındaki toleransı diğer bağ yöntemlerine göre çok daha fazladır. Bunun sebebi astar metal tüm yüzeye yayılır ve aradaki boşluklar doldurulur. En önemli dezavantajı da boşlukları ve akıntıyı kontrol etmek için çeşitli mekanik bağlantılara ihtiyaç duymasındır.

Difzyon bağı, ara yüzünde moleküllerin boşlukları doldurmak için hareket etmesi ile oluşur. Özellikle difzyon kinetiği belli bir süre doğru yere uygulanacak olan basınç ve sıcaklık ile ivme kazanacaktır. Örneğin Nakagawa [13-16] difzyon yolu ile birbirlerine bağlanmış 55 tane sac levhayı bir vakumun içinde 1100°C'de 5.9 MPa basınç altında bir saat süre ile bekletmiştir. Bu

bağ yönteminin en önemli avantajları; belirgin bir bağ çizgisi oluşturulmaması, bağ kuvvetinin uygulandığı materyalin sertliği ile %100'e yakın benzerlik göstermesi ve termal yüzey direnci oluşturulmamasıdır. Başlıca dezavantajları ise; uygulama alanının çok kısıtlı olması (alüminyum-alüminyum iki levha arasında uygulanamaz), sıcak pres gerektirmesi, karşılıklı tabakalar arasındaki bağı zayıf olması durumunda toleransın düşmesidir. Bütün parametreler alt alta konulup bakıldığında difzyon bağ yönteminin çelik ve titanyum levhalarda uygulanması daha uygun görülmüştür.



Şekil 8. (a) Fırında kaplama ile (b) lehimlenmiş tabakaların kıyaslanması [16, 17]

Yapıştırıcı ile bağ, yapışkan materyal bloklar arasında salınır ve kuruması beklenir. Soğuk lehimleme, kaplama yöntemine çok benzer bir metottur. Ancak kullanılan astar materyal 450°C'in altında erir (kalay, kurşun ve bunların karışımları). Bağ kuvveti açısından yapıştırıcı ile bağ yöntemine benzerlik göstermektedir ancak soğuk lehimleme yönteminin prosesi çok daha karmaşıktır, çünkü bu metodu uygulamak için tabakalar arasında boşluğa ihtiyaç vardır. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar göstermiştir ki, tabakalar arasında minimum boşluk bulunan iki alüminyum levha arasındaki bağ oldukça zayıftır. Bütün parametreler göz önüne alındığında soğuk lehimleme yöntemi yerine yapıştırıcı ile bağ yönteminin kullanılması daha uygun görülmektedir [19].

Kaynak, tabakaları birleştirmek için kullanılabilen diğer düşünülün bir başka bağ yöntemidir. Ancak tabakalar halindeki bir yapıya kaynak yapmak çok zordur ve yapılmış olsa bile üretim sonrası sürece önemli görevler düşmektedir. Bu da fazladan maliyet ve zaman kaybı anlamına gelmektedir. Dolayısı ile bu yöntem kullanıma uygun değildir.

Profile Edge Lamination (PEL): Bu kaplama yöntemi sızdırma gibi problemlere sebep olmaktadır. Ancak bu istenilen bir durum değildir. Bu sebeple bu konuda çalışan mühendisler ve akademisyenler "profile edge lamination" adı altında yeni bir sistem geliştirmişlerdir [2, 3, 8, 12]. PEL yönteminin klasik katmanlı kalıp prosesinden ufak farklılıkları vardır. Tabakalar halindeki parçalar mekanik yollarla birleştirilir. Bunun için "line-of-sight" adı verilen kesme işlemi uygulanır ve doğrusal bir şekilde bütün tabakalar bağlantı yapılarak sorun olmayacak şekilde kesilir [2, 8, 11, 12]. PEL yönteminin katmanlı kalıp metodundan farkı aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Tablo 2. PEL'in istiflenmiş tabakalar ile kıyaslanması

İstiflenmiş tabakalar	Profile edge lamination dizisi
Kesme işlemi sırasında otomasyon uygulamak zordur.	Sadece en üst kenarın kesilmesi yeterlidir.
Kalıp montajı sırasında tabakaların kaydı zordur.	Tabakalar kenar ve baz plaka yardımı ile kolayca kaydedilebilmektedir.
Tabakaları güvenli bir şekilde istiflemek güçtür	Tabakaların sadece yanlardan bağlanması yeterlidir.
Tabakalar oluşturulduktan sonra sabit kalmak durumundadır. Yeniden şekillendirmek için CNC işlemine ihtiyaç vardır.	Yanlardan tutturulmuş olan tabakaların her biri yeni kalıp için farklı farklı kesilebilirler.

3.4. Üretim Sonrası Süreç

Tabakalar birleştirildikten sonra en son yapılması gereken işlem yüzey kalitesinin artırılmasıdır. Bunun sebebi tabakalardan dolayı oluşan pürüzlü yapıdır. Yüzey kalitesini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan yöntemlerden başlıcaları; açılı kesim, lazer kaynak, lazer kenar kaynağıdır [4]. Ancak bu yöntemlerden en basiti ve pratiği CNC yardımı ile açılı kesme işleminin kullanılmasıdır. Burada önemli bir nokta unutulmamalıdır. Eğer bu aşamaya kadar katmanlı kalıp işlem prosesleri düzgün bir şekilde gerçekleştirilmezse üretim sonrası süreçte harcanacak vakit ve maliyet artacaktır.

4. Tartışma ve Sonuç

Rekabetin her geçen yıl daha da arttığı üretim sektöründe daha hızlı, daha ucuz ve daha verimli olan üretim tekniklerine ve araçlarına olan ihtiyaç artmaktadır. Bu çalışma boyunca hızlı üretim tekniklerinden biri olan katmanlı kalıp tekniği tanıtılmıştır. Katmanlı kalıp yönteminin sac üretiminde(sheet metal forming) kullanılabilirliği araştırılmış ve bu konuda yapılan araştırmalara geniş yer verilmiştir. Örneklerde de görüldüğü gibi katmanlı kalıp metodu birçok avantajı beraberinde getiren, zaman tasarrufu sağlayan ve üretim maliyetlerini uzun vade de düşüren bir yöntemdir. Var olan teknoloji ile katmanlı kalıp yönteminin her parçanın üretiminde kullanılamayacağı açıktır. Ancak diğer üretim sistemleri gibi parça üretimi sırasında çeşitli kısıtlamalar getirmemesi, bu yöntemin büyük hacimli parçaların üretimi için verimli olduğunu ortaya koymuştur.

Kaynaklar

1. Walczyk, D.F., Hardt, D.E., 1996. Recent Developments in Profiled-Edge Lamination Dies for Sheet Metal Forming. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium.
2. Walczyk, D.F., Hardt, D.E., 1998. Rapid Tooling for Sheet Metal Forming Using Profile Edge Laminations-Design Principles and Demonstrations, Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer Polytechnic Institute Troy.
3. Walczyk, D.F., Hardt, D.E., 1999. A Comparison of Rapid Fabrication Methods for Sheet Metal Forming Dies. Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer Polytechnic Institute Troy.
4. Himmer, T., Anja, T., Steffen, N., Eckhard, B., 2004. Metal Laminated Tooling- A Quick And Flexible Tooling Concept. University of Technology at Dresden.
5. Ahari, E., 2011. Optimization of Laminated Dies Manufacturing. Doktora Tezi, Waterloo University, 135.
6. Wimpenny, D.I., Bryden, B., Pashby, I.R., 2003. Rapid Laminated Tooling. Journal of Materials Processing Technology, 138, 214–218.
7. Bryden, B.G., Pashby, I.R., 2001. Hot Platen Brazing To Produce Laminated Steel Tooling. Journal of Materials Processing Technology, 110, 206-210.
8. Walczyk, D.F., Nathanael, Y. D., 1997. Bonding Methods for Laminated Tooling. Aeronautical Engineering and Mechanics Rensselaer Polytechnic Institute Troy.
9. W.S. Clevenger, Laminated Die Form and Producing The Same. US Patent Office Patent Number: 2679172,1954
10. Ahari, H., Khajepour, A., Bedi, S., 2013. Laminated Injection Mould with Conformal Cooling Channels: Optimization, Fabrication and Testing. Journal of Machinery Manufacturing and Automation, 2, 16–24.
11. Walczyk, D.F., Yong-Tai, I., 2005. Structural Modelling of Profiled Edge Laminae (PEL) Tools. ASMA, 127, 2.
12. Walczyk, D.F., Hardt, D.E., 1994. A New Rapid Tooling Method for Sheet Metal Forming Dies. Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping.
13. Nakagawa, T., Kunieda, M., Liu, S. D., 1985. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding. Proceedings of the 25th International Machine Tool Design and Research Conference.
14. Walczyk, D.F., Seungryeol Y., 2005. Advanced Design and Development of Profile Edge Laminae Tools. Journal of Manufacturing Process, 7, 2.
15. Kunieda, M., Nakagawa, T., 1984. Manufacturing of Laminated Deep Drawing Dies by Laser Beam Cutting. Proceedings of the 1st International Conference on Technology of Plasticity.
16. Nakagawa, M., Suzuki, K., 1980. A low cost blanking tool with bainite steel sheet laminated. Proceeding of 21th International MTDR Conference.
17. Matsui, S., Matsumuro, H., Ikemoto, Y., Shimzu, H., 1991. High Precision Cutting Method for Metallic Materials by Abrasive Waterjet. Proceedings of the 6th American Water Jet Conference, paper 10.
18. Bryden, B.G., Pashby, I.R., Wimpenny, D.I., Adams, C., 2000. Laminated Steel Tooling In The Aerospace Industry. Materials and Design, 21, 403–408.
19. Yoon, S.H., Na, S.J., 2003. Rapid Laminated Tooling by a Brazing and Soldering Process. Journal of Manufacturing Processes, 5, 2