



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Geçirimli Asfalt Karışımlarında Ferrokrom Cürufunun Agregata Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Sedat TOPALOĞLU*, Altan ÇETİN

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

Geliş Tarihi: 27.11.2018 Düzeltme Tarihi: 24.12.2018 Kabul Tarihi: 30.12.2018

Özet

Son zamanlarda doğal kaynakların korunması ve çevresel kaygılar sebebiyle endüstriyel atıkların geri kazanılması üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır. İnşaat sektörü ve özellikle yol yapıları yüksek miktarlarda atık malzemelerin geri kazanımına imkân tanımaktadır. Geçirimli asfalt kaplamalar yağış oranı fazla olan bölgelerde yol kaplamasının işlevsel performansını ve sürüş güvenliğini arttırmak için uygulanmaktadır. Yüksek boşluk oranına sahip olan karışımlarda kullanılan kaba agregata miktarı oldukça fazladır. Kaba agregatlar arasındaki temas sebebiyle bu karışımlarda kullanılan agreganın dayanımının ve bitümlü bağlayıcı ile aderansının iyi düzeyde olması gerekmektedir.

Bu çalışmada, ferrokrom cüruf agregasının geçirimli asfalt karışımların tasarım kriterleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışım tasarımlarında, Karayolları Teknik Şartnamesinde geçirimli asfalt için belirtilen Tip-3 gradasyonu ve polimer bitümlü bağlayıcı (PMB 76-16) kullanılmıştır. Farklı bitüm yüzdelinde hazırlanan numuneler üzerinde hacim analizi, permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarına karşı dayanım gibi tasarım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından karışımların tasarım kriterlerini sağladığı ve ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt kaplamalarda agregata olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geçirimli asfalt, Endüstriyel atıklar, Ferrokrom cürufu, permeabilite, Cantabro aşınma kaybı

Investigation of the Usability of Ferrochrome Slag as Aggregate in Porous Asphalt Mixtures

Abstract

In this study, the effects of the ferrochrome slag aggregate on the design criteria of porous asphalt mixtures were investigated. Type-3 gradation specified in the Technical Specifications of the Highways and polymer bituminous binder (PMB 76-16) were used in the mixture design. The design tests such as bulk analysis, permeability, Cantabro loss, indirect tensile strength and moisture damage were performed on specimens prepared in different bitumen percentages. It was determined from the test results that the mixtures meet the design criteria and ferrochrome slag can be used as aggregate in porous asphalt mixtures.

Keywords: Porous asphalt, Industrial wastes, Ferrochrome slag, Permeability, Cantabro loss

1. Giriş

Gün geçtikçe giderek azalan hammadde ve doğal kaynakların tükenmesi, atık malzemelerin depolanması, depolanma alanlarının giderek azalması, depolanan alanlarda su, hava ve toprak kirliliğinin giderek artması sebebiyle atıkların geri kazanılması önem kazanmaktadır. Endüstriyel atıkların büyük miktarlarda değerlendirilebildiği alanların başında inşaat sektörü ve özellikle yol inşaatları gelmektedir. Belirtilen alanlar çoğu zaman fiziksel veya kimyasal işlemlere gerek duyulmadan atık malzemelerin daha ekonomik olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Termik santral atıkları ve yüksek fırın cürufuları inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan endüstriyel atıklar arasında yer almaktadır. Doğada soğumuş yüksek fırın cürufularının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğal agregayla benzer oldukları ve yol inşaatında farklı tabakalarda kullanılabilirliği belirtilmektedir [1,2]. Ferrokrom cürufuları, ferrokrom üretimi gerçekleştiren tesislerin elektrik ark fırınlarında işlenmesi sonucu açığa çıkan atık malzemelerdir. Bu cürufular açık alanlarda depolanmakta ve çevresel önemli zararlar vermektedir [3]. Ülkemizde “Antalya Ferrokrom İşletmesi” ve “Elazığ ETİ Ferrokrom İşletmesi” tarafından ferrokrom cevherinin işlenmesi esnasında her 3 kg ferrokrom başına 1 kg cüruf atığı çıkmaktadır. Elazığ ETİ Ferrokrom Tesisi’nde yılda yaklaşık 225.000 ton, Antalya’daki işletmede ise yılda 35.000 ton Ferrokrom (FeCr) cüruf atığı ortaya çıkmaktadır. Ferrokrom cürufuları stok alanlarında depolanmakta olup bu cürufuların ciddi anlamda bir değerlendirilme alanı bulunamamıştır. Biriken bu

miktar göz önüne alındığında farklı kullanım alanlarının araştırılmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

Ulaşım hizmetlerinin hızlı, güvenli ve konforlu olarak sağlanabilmesi, yol yapım metodlarında yeni yöntemlerin ve uygulama alanlarının araştırılmasını gerektirmektedir. Geleneksel kaplama tipleri yıllık yağış miktarı fazla olan bölgelerde yol yüzeyinden suyun drene edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Sürüş güvenliği ve konforunda azalmaya, su sıçratmaya ve görüş mesafesinde olumsuzluklara ve kazalara sebep olmaktadır. Geçirimli yol üstyapısı, yağmur suyu ve eriyen karların hızlı bir şekilde süzülmesini ve yer altı suyunun yol üst yapısına zarar vermeden tekrar zemin içerisine drenajına imkân sağlamaktadır [4]. Asfalt, beton veya kilitli beton parke sistemlerden oluşan geçirimli yol üstyapı tabakaları çok daha az ince malzeme içerdiğinden sahip olduğu yüksek boşluk yüzdesi ile suyun hızlı bir şekilde drenajına olanak sağlamaktadır.

Geçirimli asfalt kaplamada yüksek miktarlarda kaba agregata kullanılması ile kaplamada %20 oranında boşluk sağlanmaktadır. Dolayısıyla, boşluklu yapısı sayesinde yağmur sularının karayolu yüzeyinden uzaklaştırılması ile araç tekerlekleri ile kaplama yüzeyi arasındaki kayma direncini iyileştirerek fren mesafesinde azalma sağlamaktadır [5]. Kaplama yüzeyinde oluşan su birikintisinden dolayı gece sürüşlerinde meydana gelebilecek ışık parlamalarını azaltarak, taşıt geçişleri sırasında su birikintilerinden sıçrayan suyun çevreyi kirlilemesini ve diğer taşıtların görüşünün kısıtlanmasını büyük oranda engellemektedir. Geçirimli asfalt kaplamalar, belirtildiği üzere yol yüzeyinden uzaklaştırılmayan suyun

oluşturacağı kaza riskinin azalmasını sağlamaktadır. Yol yüzey pürüzlülüğünün artması her ne kadar yakıt tüketiminin artacağını düşündürse de yağışlı havalarda trafik hızı ve akımında sağlanacak süreklilik yakıt tüketimini olumlu etkileyecektir [6]. Aynı zamanda periyodik bakım gerektiren geçirimli kaplamalarda, yuvarlanma gücünün absorbe edilerek taşıt içindeki konforun arttığı ve çevresel gürültü kirliliğinin azaldığı gözlemlenmiştir [7].

1950'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanmaya başlayan geçirimli kaplama tipi, 1970'li yıllara doğru 30'a yakın eyalette uygulanmaya başlanmıştır. Kaba agrega yüzdesinin yüksek olması ve bitümlü bağlayıcının yetersiz kalması 1980'li yıllarda geçirimli asfalta olan talebi azaltmış olsa da, modifiye bitümlü bağlayıcılarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte geçirimli asfalt kaplama kullanımı yaygınlaşmıştır [8]. Avrupa'da aynı yıllarda geçirimli asfalt kaplama çalışmalarına başlanarak boşluk oranı daha yüksek olan "Avrupa Poroz Karışımı"(Porous European Mix-PEM)'ni geliştirmiştir [9]. Ülkemizde de geçirimli asfalt kaplamalara ait karışım ve yapım koşulları Karayolu Teknik Şartnamesi 417. Kısım'da yer almaktadır [10]. Akdeniz ve Karadeniz bölgesi kıyıları gibi yoğun yağış alan yerlerde geçirimli asfalt kaplama uygulanabilirliği ve yüksek mevsimsel sıcaklıkların yaşandığı bölgelerde modifiye bağlayıcı kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır [11].

Elazığ ferrokrom işletmesi cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendikten sonra yapılan performans deneyleri neticesinde Elazığ ferrokrom cürufunun agrega olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir [12]. Antalya ferrokrom işletmesinden temin edilen ferrokrom cürufunun filler malzemesi olarak kullanımının geleneksel asfalt kaplama karışımları üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, karışım numunelerinin stabilize ve akma değerlerini iyileştirdiği belirlenmiştir [13].

Yılmaz A. ve Sütas İ. tarafından ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve ferrokrom cürufunun fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından yol üst yapısının granüler tabakalarında doğal agregaya alternatif olarak kullanılabilmesi, çimento gibi bir bağlayıcı ile stabilize edilen cüruf karışımlarının yüksek trafik hacmine sahip karayolları için iyi bir stabilizasyon temel alternatifini oluşturabileceği belirtilmiştir [14]. Yılmaz A. ve Kardeş M., ferrokromun agrega olarak esnek asfalt kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda ferrokromun asfalt alt yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi kararına ulaşmışlardır [15]. Çimento inceliğinde öğütülen ferrokrom cürufunun çimento bağlayıcı ile yer değiştirildiği (ağırlıkça) çalışmada, cüruf katkısı %3 olan betonların mukavemetinin kontrol betonundan yüksek olduğu ve %5 katkılı betonlarda ise kontrol betonu ile aynı değerlerin elde edildiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, maliyeti azaltmak açısından cüruf katkısının %5'e kadar çimento katkı malzemesi olarak betonda kullanılabilmesini göstermiştir [16]. Gençel O. vd., atık ferrokrom cürufunun değişik oranlarda iri agrega olarak uçucu kül ile beraber beton içerisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ferrokromun ve uçucu külün beton içerisinde ortak kullanılmasının betonun hem mekanik hem de donma çözülme dayanımı gibi durabilite özelliklerini artırdığı gözlemlenmiştir [17].

Ferrokrom metalinin üretim sürecinde atık olarak ortaya çıkan yüksek karbonlu ferrokrom (FeCr) cürufunun, inşaat sektöründe öğütülerek çimento klinkerine ilave edilmesi, yol alt temel malzemesi ve bitümlü sıcak karışım agregası olarak kullanılması gibi çeşitli alanlarda değerlendirilmesi yönünde araştırmalara rastlanmakla beraber geçirimli asfalt kaplama karışımlarında kullanımını içeren çalışmalar sınırlıdır. Kullanım alanlarının yaygınlaştırılması ile beraber bu malzemelerin özelliklerine uygun alanlarda kullanılması ekonomik açıdan daha büyük faydalar

sağlayacaktır. Özellikle çevresel koşullar ve trafiğin aşındırma etkisine maruz kalan geçirimli asfalt kaplamaların üretiminde dayanımı yüksek kaliteli agrega kullanımı gerekliliği önem kazanmaktadır. %3-5 oranında Cr₂O₃ içeren metalürjik cürufun sınıfında yer alan ferrokrom cürufunun fiziksel özellikleri bu gereksinimi karşılayacak niteliktedir.

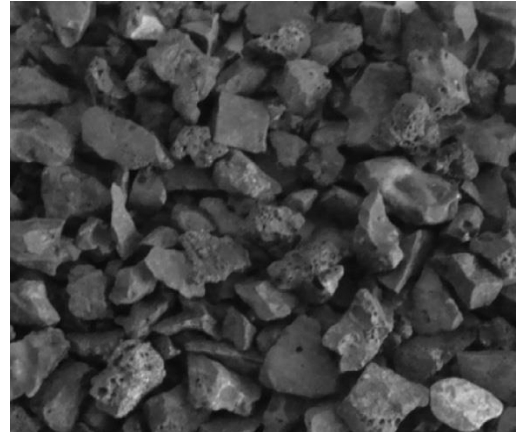
Bu bağlamda çalışmada, önemli bir atık potansiyeline sahip olan ferrokrom cürufunun özelliklerine uygun bir alan olabileceği düşünülerek geçirimli asfalt üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, Karayolları Teknik Şartnamesi'nin (KTŞ) geçirimli asfalt ile ilgili bölümü (417. Kısım) göz önünde tutularak, ferrokrom cürufunun agrega olarak kullanıldığı geçirimli asfalt karışım tasarımı için bir laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, tek tip agrega gradasyonu (KTŞ-Tip3 gradasyonu) ve polimer bitümlü bağlayıcı (PMB 76-16) kullanılmıştır. Seçilen agrega gradasyonu için farklı bitüm yüzdelere numuneler hazırlanıp boşluk analizleri yapılarak, kaplama tasarımı için permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme mukavemeti ve nem hasarı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilerek geçirimli asfalt karışımına ait tasarım değerleri ve ferrokrom cürufunun karışım performansına etkileri belirlenmiştir.

2. Kullanılan Malzemeler

Tek tip ferrokrom cürufu agrega ve polimer bitümlü bağlayıcı için yapılan karışım tasarımında, ilave filler malzemesi olarak F tipi uçucu kül ve bitüm süzülmesinin engellenmesi için selülozik fiber kullanılmıştır.

2.1. Agregası

Bu çalışmada, kaba agrega, ince agrega ve filler olarak Elazığ Ferrokrom Tesisinden temin edilen Şekil 1'de görülen cüruf malzemesi kullanılmıştır. Ferrokrom cürufuna ait olan bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Yüksek miktarlarda MgO, SiO₂, Al₂O₃ ve Cr₂O₃'den oluşan ferrokrom cüruf agregasının aşınma ve yassılık değerleri, geçirimli asfalt kaplamalarda kullanılan agrega kriterlerine uygundur. Geçirimli asfalt kaplama karışım tasarımı için Şekil 2'de verilen KTŞ'nin 417. kısmında yer alan TİP-3 gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda ilave filler takviyesi olarak Çatalağzı Termik Santralinden temin edilen %4,45 oranında F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Karışım tasarımı ve boşluk analizleri için TS EN 1097-6'ya göre gerçekleştirilen deneyler ile belirlenen cürufa ait özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 2'de verilmiştir.



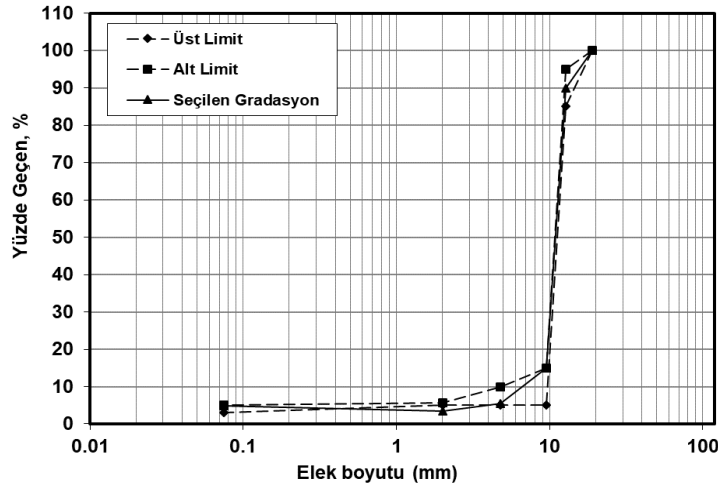
Şekil 1. Ferrokrom cürufu kaba agrega

Tablo 1. Ferrokrom cürufuna ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler

| Özellikler | Fiziksel Özellikler | | | | | | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|------|
| | Deney Standardı | | | Değerler | | | |
| Los Angeles Aşınma Kaybı, (%) | TS EN 1097-1 | | | 18 | | | |
| Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (%) | TS EN 1367-1 | | | 0,85 | | | |
| Kırılmışlık Oranı, (%) | ASTM D 5821 | | | 100 | | | |
| Yassılık İndeksi, (%) | TS 9582 EN 933-3 | | | 7,8 | | | |
| Kimyasal Kompozisyonu | | | | | | | |
| Bileşim | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | MgO |
| Ağırlıkça Yüzde, % | 5,17 | 1,55 | 29,38 | 23,47 | 0,15 | 0,06 | 38,5 |

Tablo 2. Agregra özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri

| Özellikler | Kaba Agregra | İnce Agregra | Mineral Filler |
|----------------------|--------------|--------------|----------------|
| Zahiri Özgül Ağırlık | 2.996 | 2.781 | 3.209 |
| Hacim Özgül Ağırlık | 2.966 | 2.616 | - |
| Su emme yüzdesi, % | 0.33 | 2.27 | - |

**Şekil 2.** Karışım tasarımında kullanılan agregra gradasyonu (KTŞ, Tip-3)

2.2. Bitümlü Bağlayıcı

Bu çalışmada, İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen PMB 76-22 polimer bitümlü bağlayıcı

kullanılmıştır. Polimer bitümlü bağlayıcıya ait bazı fiziksel özellikler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Kullanılan bitümlü bağlayıcıya ait fiziksel özellikler

| Özellikler | Standartlar | Sonuçlar |
|---|-------------|----------|
| Penetrasyon, 25°C, 100 g, 5 s (0.1 mm) | TS EN 1426 | 44 |
| Yumuşama noktası (°C) | TS EN 1427 | 62.4 |
| Brookfield viskozite 135°C, 20rpm | ASTM D 4402 | 1500 cP |
| BBR kiriş eğme reometresi, S≤300MPa, m≥0,300) | TS EN 14771 | -6°C |
| DSR dinamik kesme reometresi, (G*/sinδ>1kPa) | TS EN 14770 | 76°C |
| Özgül ağırlık | TS 1087 | 1.026 |

2.3. Selülozik Fiber

Bu çalışmada, karışımlardan bitümün süzülmesini engellemek için Şekil 3'de görülen selülozik fiber kullanılmıştır. "İstanbul Teknik" firmasından temin edilen selülozik fibere (HiperCell®) ait

bazı özellikler Tablo 4'de verilmiştir. Selülozik fiber, üretici firma tarafından önerilen %0.03 (karışım ağırlığının) oranında karışımlara ilave edilmiştir.

Tablo 4. Selülozik fibere ait fiziksel özellikler [18]

| Bileşimi | Granül Olarak Sıkıştırılmış Selülozik Fiber |
|-----------------------|---|
| Görünümü | Granül elyaf |
| Renk | Gri |
| Pelet Çapı | 7 mm |
| Yoğunluk | 450 g/l |
| Ortalama lif uzunluğu | 2 mm |
| Isıl dayanımı | > 250 °C |

**Şekil 3.** Selülozik fiber (HiperCell®)

3. DeneY Yöntemleri ve Sonuçları

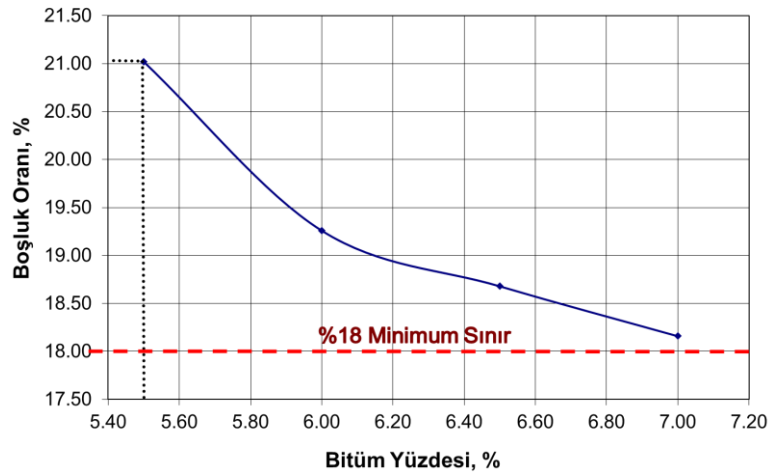
Bu bölümde karışım numunelerinin hazırlanması ve tasarım değerlerinin belirlenmesi için numunelere uygulanan boşluk analizi, permeabilite, Cantabro aşınma, dolaylı çekme mukavemeti, nem hasarına karşı direnç deneylerinin metodları ve deney sonuçları yer almaktadır.

3.1. Karışımın Numunelerinin Hazırlanması

Seçilen agrega gradasyonu (KTŞ Tip-3) için tasarım aşamasında 4 farklı bitüm oranında (%5.5, %6.0, %6.5 ve %7.0) karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında öncelikle selülozik fiber, karışım içerisinde homojen olarak dağılabilmesi için agrega ile kuru olarak 2 dak. karıştırılmıştır. Sonrasında belirtilen yüzdelerde bitümlü bağlayıcı 175 °C'de mikser yardımıyla karıştırılarak, 130-140 °C sıcaklıkta Marshall kompaktörü ile her iki yüzüne 50 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numunelerin kalıptan çıkarılması için oda sıcaklığına kadar soğuması beklenilmiştir.

3.2. Sıkıştırılmış Karışım Numunelerinin Boşluk Analizi

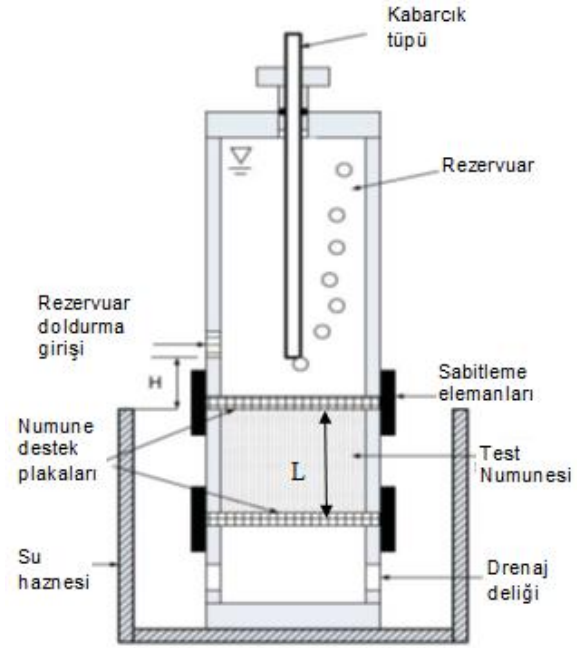
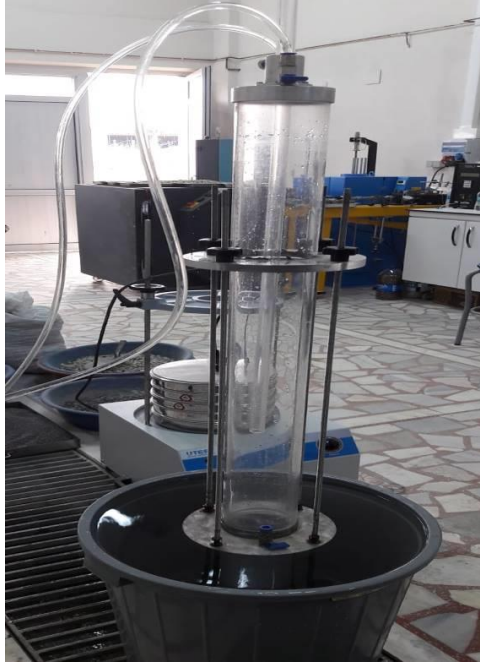
Geçirimli asfalt karışımların boşluk oranının yüksek ve yüzeyinin pürüzlü olmasından dolayı sıkıştırılmış numunelerin özgül ağırlık ve boşluk oranları Şekil 4'de görüldüğü gibi parafilm kaplama metodu kullanılarak belirlenmiştir [19]. Tip 3 geçirimli asfalt karışım gradasyonu için farklı bitümlü bağlayıcı yüzdelerinde hazırlanan numunelerin hava boşluğu değerlerinin bağlayıcı bitüm ile değişimi Şekil 5'deki grafikte verilmiştir. Grafik incelendiğinde, bitüm yüzdesi artışıyla karışımın boşluk oranı azalmaktadır. Doğal olarak artan bitüm miktarı, karışım içindeki hava boşluğunu doldurmaktadır. Geçirimli asfalt karışımların boşluk oranının %18'den daha büyük olması gerekmektedir [20, 21]. En yüksek boşluk yüzdesi %21.02 değeri ile %5.5 bitüm içeriğinde elde edilirken bitüm içeriğinin tüm yüzdelerinde boşluk yüzdesinin %18'in üzerinde olduğu belirlenmiştir.

**Şekil 4.** Boşluk analizleri için parafilm ilke kaplanmış numune**Şekil 5.** Boşluk yüzdesinin bitüm oranı ile değişim grafiği

3.3. Sabit Seviyeli Permeabilite Deneyi

Bu sistem, 100 mm çaplı silindirik numunelerin permeabilite katsayılarını ölçmek için özel olarak geliştirilmiş bir "rijit duvar permeametri" kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 6'da görülen sistem, "kabarcık tüplü sabit seviyeli permeametre" olarak adlandırılmaktadır. Yan duvar sızıntısını önemli ölçüde azaltan bu sistem, çok düşük hidrolik gradyanların uygulanmasına izin vermekle birlikte yüksek akış oranlarına sahip olan malzemelerin test edilmesine olanak tanımaktadır. Numunenin kalıptan çıkarılmadan yerleştirildiği permeametre, sabit su seviyesini korumak için su ile dolu bir hazne içerisine yerleştirilmektedir (Şekil 6). Test başlamadan önce kabarcık tüpünün ucu kapatılarak, sistemin rezervuarı belirli bir seviyeye kadar vakum pompası

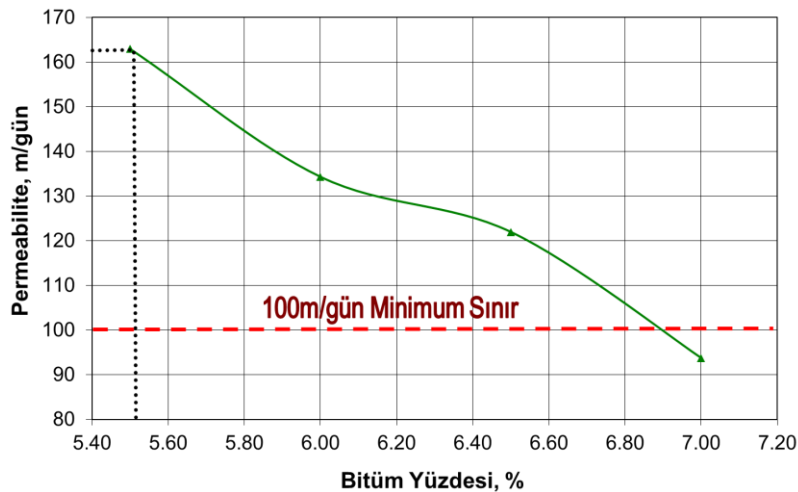
yardımla su ile doldurulur. Bu seviye stabil duruma geldiğinde seviye kaydedilir, kabarcık tüpünün ucu açılarak deney başlatılır. Su, permeametrinin silindirik haznesinden numune boyunca aktığından, kabarcık tüpünün tabanından hava kabarcıkları ortaya çıkmaktadır. Deney sonunda rezervuardaki su seviyesi ve akış süresi kaydedilir. Numune yüksekliği (L) ve toplam seviye kaybını veren kabarcık tüpünün tabanı ile sistemin içine yerleştirildiği su haznesinin üst kısmı arasındaki yükseklik farkı (H) belirlenir. Numuneden geçen toplam su debisi (Q), rezervuar tüpünün iç alanı ile deneyin başlangıç ve bitişi arasındaki seviye farkı çarpılarak belirlenir. Permeabilite katsayısı, Darcy yasası kullanılarak hesaplanır [22].



Şekil 6. Laboratuvarında kullanılan permeabilite deney düzeneği

Geçirimli kaplama yapılarında minimum permeabilite katsayısı değerinin yaygın olarak 102 cm/s (≈ 100 m/gün) olması önerilmektedir [23, 24]. Şekil 7'deki permeabilite katsayısının bitüm yüzdesi ile değişim grafiğinde, boşluk yüzdelere paralel olarak bitüm oranı arttıkça permeabilite katsayısı değerleri azalmaktadır. Bununla beraber, bitüm yüzdelerinin %7.0 bitüm

oranı ile hazırlanan numunelerin permeabilite katsayısı değeri hariç diğer permeabilite katsayısı değerleri tavsiye edilen sınır değer olan 100 m/gün değerinin üzerindedir. Maksimum permeabilite katsayısı (162.9 m/gün) %5.5 bitüm muhtevasında elde edilmiştir.



Şekil 7. Permeabilite katsayısının bitüm oranı ile değişim grafiği

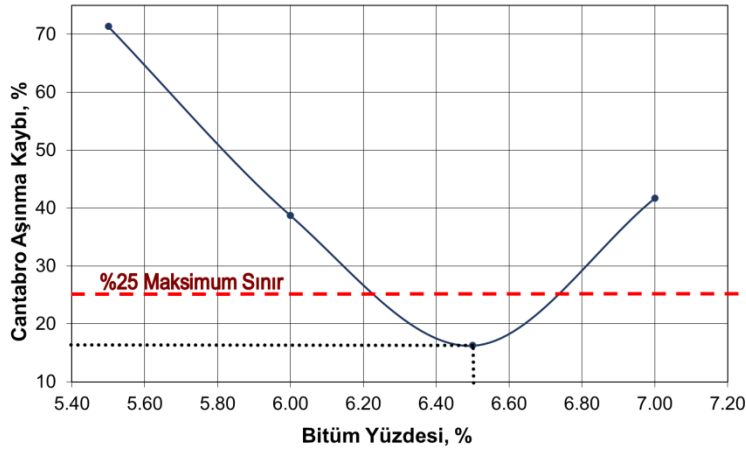
3.4. Cantabro Aşınma Deneyi

Geçirimli asfalt kaplama boşluk oranının fazla olması sebebiyle kaplama yüzeyinden koparak parça kaybetme olayı (sökülme) daha fazla görülmektedir. Geçirimli asfalt kaplamalarda sökülme direncinin belirlenmesinde Cantabro aşınma deneyi uygulanmaktadır. TS EN 12697-17 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyde, dakika da 30-33 tur hızda dönen Los Angeles aşındırma aletine her seferinde tek konulan sıkıştırılmış numunenin 300 tur sonundaki aşınma kaybı belirlenmektedir. Şekil 8'de gerçekleştirilen bir test için deney öncesi ve sonrasında test

numunelerinin fotoğrafları görülmektedir. Aşınma kaybı, deney sonrası ve öncesinde belirlenen numune ağırlıkları oranlanarak yüzde olarak hesaplanır. Belirtilen şartnamede Cantabro aşınma kaybının %25'den fazla olması istenmemektedir [25]. Bitüm oranları ile aşınma kaybının değişiminin verildiği Şekil 9'da bitüm oranı artışıyla aşınma değerinin azaldığı, %6.5 değerinde minimum aşınma kaybının (%16.26) elde edildiği görülmektedir. Optimum film kalınlığının elde edildiği bu değerden sonra aşınma miktarının arttığı belirlenmiştir. Diğer bitüm yüzdelerinde şartnamede istenilen minimum sınır değer sağlanamamıştır.



Şekil 8. Cantabro aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında numuneler

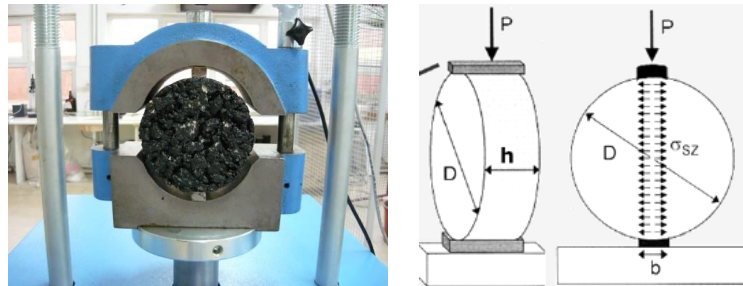


Şekil 9. Cantabro aşınma kaybı yüzdesinin bitüm oranı ile değişim grafiği

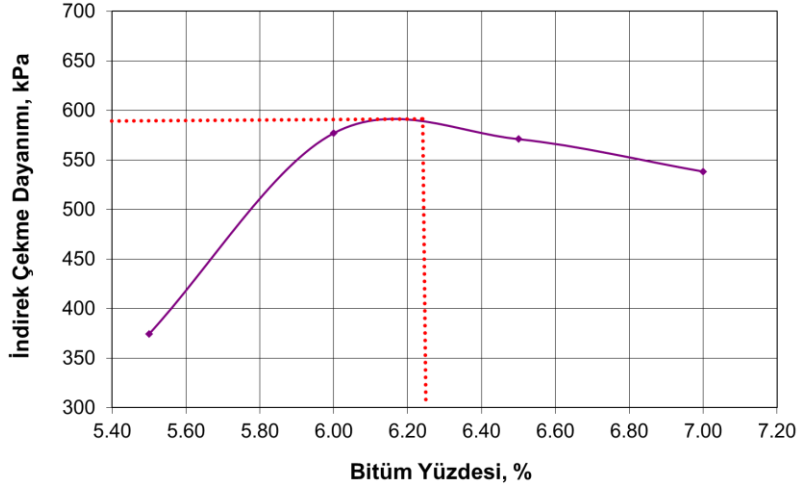
3.5. Dolaylı Çekme Mukavemeti

Asfalt kaplamaların maruz kaldığı gerilme durumunu kısmen yansıtan bu deney, asfalt karışımların dayanımının karakterizasyonunda yaygın bir şekilde kullanılan temel deneylerden biridir. Deney sonuçları asfalt karışımların yaklaşık mukavemeti ve kaplama bozulma potansiyeli hakkında bilgi vermektedir. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, özellikle performansı bitüm filminin çekme dayanımına bağlı olan geçirimli asfalt kaplama karışımların tasarımında, bitümün bağlayıcılığının ve yüke maruz kalması durumunda asfalt matriksinin sergileyeceği davranışın belirlenmesinde önemli bir deneydir. Bu test, 50 mm/dakika deformasyon hızı ve 25 °C sıcaklıkta Marshall stabilite test cihazı kullanılarak ASTM D6931 prosedürüne uygun olarak

gerçekleştirilmiştir [26]. Şekil 10'da görüldüğü gibi deneyde, eğrisel yüklemeye şartları arasında yerleştirilen silindirik numune, düşey çap düzlemine paralel olarak uygulanan basınç yüküne maruz bırakılmaktadır. Uygulanan yükün yönüne dik olarak oluşan çekme gerilmesi, numunenin kırılmasına sebep olan nihai yük ve yüke maruz kalan numune alanı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Şekil 11'de verilen grafik incelendiğinde %6.0 ve %6.5 bitüm yüzdelerinde elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Maksimum dolaylı çekme dayanımının elde edildiği bitüm yüzdesi %6.25 olarak belirlenmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti ve Cantabro deneylerinde belirlenen optimum bitüm değerleri birbirlerini desteklemektedir.



Şekil 10. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi

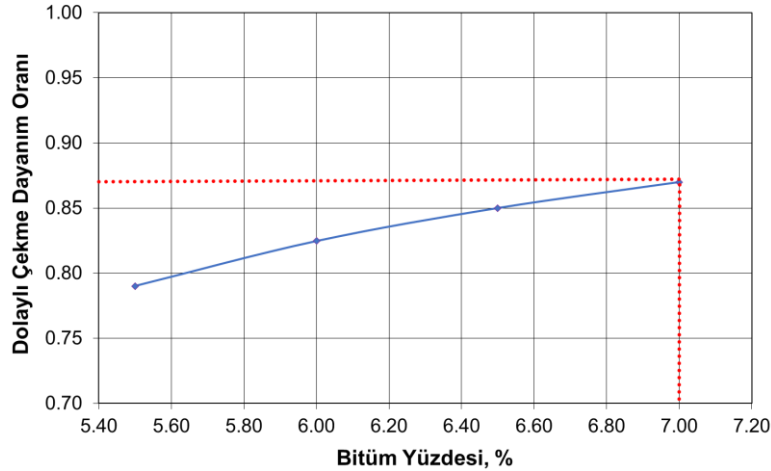


Şekil 11. Dolaylı çekme mukavemetinin bitüm oranı ile değişim grafiği

3.6. Su Hasarı Deneyi

Asfalt karışımı içerisinde nüfuz eden su, bitümlü bağlayıcı ve agrega arasındaki bağlara zarar vererek kaplamada oluşan bozulmaları hızlandırmaktadır [27]. Geçirimli asfalt kaplamalar yapısı gereği suya ve sudan kaynaklanacak hasarlara maruz kalmaktadır. Bu deney, AASHTO T-283 standardında belirtilen prosedüre göre uygulanmıştır. Bu metotta, özgül ağırlıkları birbirine yakın en az 3 adet numune üzerine koşullandırılmış ve koşullandırılmamış olarak 2 grup olarak yapılmıştır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış gruplardaki sıkıştırılmış numunelerin dolaylı çekme dayanımları belirlenmiştir. Koşullandırma işleminde, numuneler vakum tatbik edilemediği için iletılarak plastik bir film tabakası ile iyice sarılmış ve her biri

içerisinde 10 ml su bulunduran plastik torbalara konulmuştur. Sonrasında, numuneler 16 saat -18 °C'de derin dondurucuda ve 24 saat 60 °C'deki su banyosunda bekletilmiştir. Son olarak, 2 saat 25°C'deki su banyosunda bekletilen numuneler dolaylı çekme deneyine tabi tutulmuştur. Asfalt karışımların suyun etkisine karşı direncinin sayısal indeksi, donma/çözülme koşullandırmasından sonraki dayanımının orijinal dayanıma oranı olarak ifade edilmektedir. Şekil 12'de bitüm içeriği arttıkça dolaylı çekme dayanım oranının iyileştiği belirlenmiştir. Bitüm film kalınlığı arttıkça çevresel koşullar altındaki durabilitesi iyileşmektedir. %5.5 bitüm yüzdesi dışındaki tüm yüzdelerde dolaylı çekme dayanım oranları standartta belirtilen %80 değerinin üzerinde elde edilmiştir.



Şekil 12. Dolaylı çekme dayanım oranı bitüm oranı ile değişim grafiği

3.7. Karışım Tasarım Sonuçları

Performans deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde, permeabilite ve boşluk oranı için doğal olarak en düşük bitüm yüzdesi olan %5.5'de en yüksek boşluk ve permeabilite katsayısı değerleri elde edilirken %7.0 haricindeki bitüm yüzdelere 100 m/gün sınır değerini sağladığı belirlenmiştir. Cantabro aşınma kaybı deneyinde ise %25 sınır değeri sadece %6.5 bitümde sağlanmaktadır. Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları için %6.0 ve %6.5 bitüm yüzdelere sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiş ve çizilen grafikte maksimum değer %6.25 olarak belirlenmiştir. Su hasarı deneyinde bitüm yüzdesi ve dolayısıyla bitüm film kalınlığındaki artışla dolaylı çekme dayanım oranlarının arttığı belirlenmiş, %5.5 bitüm oranı haricinde tüm oranlarda sonuçların arzu edilen minimum değer olan %80'den büyük olduğu görülmüştür. Bütün sonuçlar dikkate alındığında, maksimum Cantabro aşınma değerini sağlayan tek bitüm yüzdesinin %6.5 olduğundan ve bu değerinde boşluk, permeabilite, dolaylı

çekme ve su hasarı deneyleri için istenilen limit değerleri sağladığından geçirimli asfalt karışımı için optimum bitüm yüzdesi değerinin %6.5 seçilmesi uygun olacaktır. Yapılan karışım tasarımının tasarım değerleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Geçirimli asfalt karışımı tasarım değerleri

| Tasarım Karakteristikleri | Sonuçlar | Limit Değerler |
|-------------------------------|----------|----------------|
| Optimum bitüm, % | 6.5 | - |
| Boşluk oranı, % | 18.68 | Min. 18 |
| Cantabro aşınma kaybı, % | 16.26 | Maks. 25 |
| Permeabilite katsayısı, m/gün | 121.95 | Min. 100 m/gün |
| Dolaylı çekme mukavemeti, kPa | 590 | - |
| Su hasarı oranı, % | 85 | Min. 80 |

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt kaplamada kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla boşluk oranı, permeabilite, Cantabro aşınma kaybı, dolaylı çekme dayanımı ve su hasarına karşı direnç gibi tasarım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Karışımlardaki bitüm oranının artması ile hava boşluğu yüzdeleri ve permeabilite katsayıları azalmakta ve %7.0 bitüm oranındaki permeabilite değeri dışındaki tüm sonuçlar istenilen limit değerleri sağlamaktadır.

- Cantabro aşınma deneyinde %25 aşınma kaybının altında kalan tek değer %6.5 bitüm oranında sağlanmıştır. Sıkıştırılmış karışımlarda agrega kopma direncinin bitüm oranı değişim davranışı bitüm film kalınlığının önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca ferrokrom cürufunun yüzey özellikleri ve yapısı bitümlü bağlayıcı ile arasındaki adezyonun iyi olduğunu göstermektedir.

- Karışımlardaki adezyon ve film kalınlığının etkisinin belirlenmesinde kullanılan dolaylı çekme mukavemeti deneyi değerlerindeki değişim eğilimi ve en iyi dayanımın elde edildiği bitüm yüzdesi Cantabro aşınma deneyi sonuçlarını destekler niteliktedir.

- Geçirimli asfalt karışımlardaki nem hasarının etkisi için belirlenen dolaylı çekme dayanım oranlarının genel itibarıyla %80'in üzerinde olması, polimer bitümün olumlu etkisinin yanında ferrokrom cürufu agregasının soyulma direncinin iyi olduğunun bir göstergesidir.

- Tasarım deneylerinin sonuçları değerlendirilerek, Cantabro aşınma için sınır değerin sağlandığı tek bitüm oranı olan %6.5 değeri diğer tasarım kriterlerini de karşıladığından geçirimli asfalt karışımı için optimum bitüm yüzdesi değeri %6.5 olarak belirlenmiştir.

- Yapılan çalışma neticesinde, ferrokrom cürufunun geçirimli asfalt agregası olarak kullanılmasının uygun olduğu belirtilebilir.

- İleriye yönelik çalışmalarda ferrokrom agreganın geçirimli asfalt karışımlarda optimum permeabilite ve dayanım performansının belirlenmesi için farklı gradasyonların geliştirilmesine yönelik araştırmalar gerçekleştirilebilir.

- Geçirimli asfalt karışımlarda kullanılan ferrokrom cürufu agreganın farklı bitüm tipleri ve film kalınlıklarındaki performans özellikleri araştırılabilir.

- Ferrokrom cürufu gibi farklı sanayi atıklarının uygun alanlarda kullanımının araştırılması, çevresel kirliliğin önlenmesi, doğal kaynakların korunması ve sağlanacak ekonomik fayda açısından önemlidir.

Kaynaklar

1. Yılmaz A., Yol Üstyapısında Kullanılan Cürufu Atıklarının Çevresel Etkilerinin İncelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(2): 123-134, 2017.
2. Yılmaz M., Kök B. V., Ferrokrom Cürufu Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12-3, 186-194, 2008.
3. Yılmaz A., Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cürufularının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2002.
4. Claytor R., "New Developments in Street Sweeper Technology." Center For Watershed Protection, Ellicott City, MD. Watershed Protection Techniques, 3(1).
5. John Emery VP, Trowltd.ConsultingEngineers. Steel SlagUtilization in AsphaltMixes, MF 186-1.

6. Lees G., Skid Resistance of Bituminous and Concrete Surfacing. Developments in Highway Pavement Engineering-1, Applied Science Publishers, London, pp 272-273, 1978.

7. Raaberg J., Schmidt B., Bendtsen H., Technical Performance and Long-Term Noise Reduction of Porous Asphalt Pavements VI, Report 112., 2001.

8. Kandhal P. S., Mallick R. B., Open-Graded Asphalt Friction Course: State of The Practice, Transportation Research Circular E-C005, Transportation Research Board. Washington, D.C., 1998.

9. European Asphalt Pavement Association, Asphalt in Figures, Brussels, Belgium, 2007.

10. Karayolları Teknik Şartnamesi, Yol Üstyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, Kısım 417 PorozAsfalt(PA), 1-6/417, 2013.

11. Öztürk D., Türkiye'de Poroz Asfaltın Uygulanabilirliği, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 2008.

12. Vapur H., Top S., Teymen A., Türkmenoğlu M., Elazığ Ferrokrom Tesisi Cürufularının Agregası Özelliklerinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(1), 77-88, Haziran 2013.

13. Yılmaz A., Süttaş İ., Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Beton Numunelerinin Mühendislik Özellikleri, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya.

14. Yılmaz A., Süttaş İ., Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, İMO Teknik Dergi, 294, 4455-4470, 2008.

15. Yılmaz A., Kardeş M., Mechanical Properties of FerrochromiumSlag in Granular Layers of Flexible Pavements, Materials and Structures, 43, 309-317, 2010.

16. Yazıcıoğlu S., Gönen T., Çobanoğlu Ö. C., Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi Fırat Üniversitesi, Fen ve Müh. Bil. Der. Science and Eng. J. of Fırat Üniversitesi, 17 (4), 681-685, 2005.

17. Gencil O., Koksal F., Özel C., Brostow W., Combined Effect of Fly Ash and Waste Ferrochromium on Properties of Concrete. Construction and Building Materials, 29, 633-640, 2012.

18. İstanbul Teknik, Hipercell selülozik elyaf, <https://www.istanbulteknik.com/asfalt-urunleri/hipercell-selulozik-elyaf>, (Erişim tarihi: 23.04.2018).

19. AASHTO T275-91, "Standard Method of Test For Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Paraffin-Coated Specimens", American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, D.C., 1991.

20. ASTM D7064-08, "Standard Practicefor Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design", Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials, vol. 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

21. ASTM D6931-07, "Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures, Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials, Vol. 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

22. Cetin A., Kaya Z., Cetin B., Aydılek A., "Influence of laboratory compaction method on mechanical and hydraulic characteristics of unbound granular base materials", Road Materials and Pavement Design, 15(1), 220-235, 2014.

23. Mallick R.B., Kandhal P. S., Cooley L. A., Watson D. E., Design Construction and Performance of New Generation Open-Graded Friction Courses, NCAT Report No. 2000-01, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2000.

24. Florida Departmentof Transportation Standard Specifications, Florida Method of Test to Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures, Designation FM 5-565, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, 2012.

25. TS EN 12697-17, "Gözenekli Asfalt Numunelerde Tanecik Kaybı", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2017.

26. ASTM D6931-07, "Standard Test Method For Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures, Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials, Vol. 04.03., ASTM International, West Conshohocken, PA., 2007.

27. Shen DH, Wu CM, Du JC. Performance Evaluation of Porous Asphalt With Granulated Synthetic Lightweight Aggregate. Constr. Build. Mater. 22:902-10, 2008.



Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi



Eğik Eğilme ve Eksenel Yüke Maruz Prizmatik Kirişlerin Optimum Kesit Boyutlarının Belirlenmesi

Mirali NURALIYEV

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

Geliş Tarihi: 24.09.2018 Düzeltme Tarihi: 24.12.2018 Kabul Tarihi: 30.12.2018

Özet

Bu çalışmada, farklı yükleme sonucu yalnızca eğik eğilmeye ve çekme (veya basma) ile birlikte eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli prizmatik kirişlerin optimum kesit boyutlarının belirlenmesi üzerine analitik incelemeler yapılmıştır. Kiriş kütlelerinin azalmasını sağlayan minimum kesit alanı, optimizasyon kriteri olarak kabul edilmiştir. Eğik eğilmede mukavemet koşulları esas alınarak Lagrange Belirsiz Çarpanlar yöntemiyle optimum kesit boyutlarının ve minimum kesit alanının belirlenmesi için analitik formüller elde edilmiştir. Yalnızca eğik eğilmeye zorlanan kirişlerde kesit genişliğinin yükseklğine optimum oranının (b/h) , P kuvvetinin veya M kuvvet çiftinin bulunduğu düzlemin düşeyle yaptığı açının tanjantına eşit olduğu görülmüştür. Çekme (veya basma) ile birlikte eğik eğilmeye zorlanan kirişlerde ise optimum (b/h) oranının eksenel P kuvvetinin uygulandığı noktanın koordinatlarının oranına (y/x) eşit olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda minimum kesit alanının, eksenel P kuvvetinin yalnız kesit köşegeni üzerindeki noktalarda uygulandığı takdirde elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, Dikdörtgen Kesitli Kiriş, Eğik Eğilme, Minimum Kesit Alanı, Optimum Kesit Boyutları, Çekme (veya basma)

Determining the Optimum Cross Sections of Prismatic Beam Subjected to Oblique Bending and Axial Load

Abstract

In this study, analytical investigations were carried out on the determination of the optimum cross-sectional dimensions of the rectangular prismatic beams which were forced to bend with an oblique bending and tension (or compression) under different loads. The minimum cross-sectional area, which allows the reduction of the beam, is accepted as the optimization criterion. Based on the strength conditions at the oblique bending, in order to determine the optimum cross-sectional dimensions and the minimum cross-sectional area analytical formulas were obtained by using the Lagrange Uncertain Multipliers method. For beams which are only forced to oblique bending, it has been determined that the tangent of the angle that the M -force pair or P -force makes with the vertical plane is equal to the optimum ratio of the (b/h) . It was determined that the optimum (b/h) ratio of the beams which were forced to oblique bending subjected to tensile or compression, is equal to the ratio of the coordinates (y/x) of the point where the axial P force is applied. At the same time, it was concluded that the minimum cross-sectional area can be obtained if the axial P force is applied only at the points on the cross-sectional diagonal.

Keywords: Optimization, Rectangular Cross-Section, Oblique Bending, Minimum Cross-Sectional Area, Optimum Cross-Sectional Dimensions, Tensile (or compression)

1. Giriş

Çoğu mühendislik uygulamalarında, içi dolu dikdörtgen kesitli elamanlar (çubuk, kiriş vs.) kullanılmaktadır. Söz konusu elamanlardan imal edilen konstrüksiyonların ağırlığı; I , U , Z ve kutu kesit profillerine göre daha yüksek çıkmaktadır. Dolayısıyla dolu dikdörtgen kesitli kirişlerin ağırlıklarının veya üretim maliyetinin en aza indirilmesi, diğer kesit profillerine göre daha güncel problemlerinden sayılabilir. Yapılan araştırmalara bakıldığında, bahsedilen problem üzerine bir çok optimizasyon çalışmaları sunulmuştur.

Kirişlerin optimum boyutlandırılması ile ilgili ilk çalışma 1713'te ünlü Fransız matematikçi ve mühendis Antoine Parent tarafından yapılmıştır. Yapmış olduğu çalışmada, silindirik ahşap kütükten maksimum eğilme dayanımına sahip $b \times h$ boyutlarında dikdörtgen kesitli prizmatik kirişin nasıl elde edilebileceğini araştırmıştır. Araştırma sonunda, $b \times h^2$ çarpımının dolayısıyla kesitin mukavemet direncinin en büyük değere sahip olması gerektiğini ifade etmiştir. Aynı zamanda hem grafiksel hem de analitik olarak kesit boyutlarını veren çözümler bulmuştur [1-3]. Toktosunov ve Liakhovich'in yaptıkları çalışmada, basma ve eğilmeye zorlanan dikdörtgen kütüğün en kesit boyutlarının optimum değerleri araştırılmıştır. Minimum normal gerilme, optimizasyon kriteri olarak kabul edilmiştir. Buna dayanarak

kütüğün en kesit boyut formülleri belirlenmiştir [3]. Shein çalışmasında, iki düzlemde eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli kütükleri ele almıştır. Bunun üzerine kesit alanını en aza indirecek şekilde optimizasyon yapmıştır. Mukavemet koşulunu esas alarak Lagrange Çarpanlar Metodu (LÇM) yardımıyla optimum kesit boyut formülleri elde etmiştir [4]. Fraiman, eğik eğilmeye zorlanan ince cidarlı kutu kirişlerin optimum tasarımını araştırmıştır. Bu amaçla mukavemet koşullarını esas alarak kiriş kesitinin optimum boyutlarını belirlemiştir [5, 6]. Moiseev ve diğerleri, iş şekillere ek yaparak bindirmeli ve diyaframlı kesitleri de incelemiştir. Bileşik zorlamalara maruz bu kesitlerin, ağırlığını en aza indirmek suretiyle optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Optimum kesit boyutları için mukavemet koşullarını esas alarak LÇM yardımıyla analitik formüller bulmuşlardır [7-11]. Andjelic ve diğerleri, eğilme ve burulma yüklemeleri altındaki I , Z , ve U profilli kirişlerin optimum en kesitlerini belirlemek için LÇM'den yararlanmışlardır ve minimum kesit alanını karşılayan en kesit ölçülerini elde etmişlerdir [12-17]. Al-Mosawi ve Saka çalışmalarında, genel yüklemelere zorlanan ince cidarlı profillerin tasarımı için bir algoritma sunmuşlardır. Optimum çözümün belirlenmesinde, LÇM'den faydalanmışlardır [18]. Gasic ve diğerleri, kamyon vinç bomlarında kullanılan eğilme ve eksenel yüklemelere zorlanan ince cidarlı trapez kesitleri araştırmışlardır. Optimum kesit boyutlarının belirlenmesinde, mukavemet koşulları

esas alınmıştır. Optimizasyon sürecinde, LÇM'yi kullanarak geometrik parametreler arasındaki ilişkileri belirlemişlerdir [19]. Gohberg'in editörlüğü ile yapılmış "Krenler" adlı kitapta, I ve kutu profilli kren kirişlerinin optimizasyonu ile ilgili birçok çalışmaların sonuçları verilmiştir. Sunulan çalışmalarda, yöntem olarak LÇM ve kriter olarak da minimum kesit alanı seçilmiştir. Eksenel ve eğilme zorlamalarında, mukavemet koşulları esas alınarak optimum kesit boyutları bulunmuştur [20, 21]. Bu kapsamda gerçekleştirilen literatür incelenmesi sonucunda, yalnızca eğik eğilmeye ve çekme (veya basma) ile birlikte eğik eğilmeye zorlanan içi dolu dikdörtgen kesitli kirişlerin optimum boyutlandırılması ile ilgili kapsamlı bir araştırma yapılmadığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı söz konusu yüklemelerde ve elemanlarda, minimum ağırlık veya kesit alanını karşılayan optimum en kesit boyutlarının belirlenmesi üzerine incelemeler yapılmıştır. Sistemlerinden, geleneksel ürünlere oranla daha iyi sonuçlar alınmıştır.

2. Lagrangenin Belirsiz Çarpanlar Yöntemi

$z = f(x, y)$ amaç fonksiyonunun ekstremum değerinin belirlenmesi problemi, x ve y değişken parametreleri arasında $\varphi(x, y) = 0$ şeklinde bağıntı varsa, Lagrange Belirsiz Çarpanlar yöntemi ile çözülebilir [22]. Lagrange fonksiyonu $L = f(x, y) + \lambda \varphi(x, y)$ şeklinde yazılır. Burada λ sabiti Lagrange belirsiz çarpanı olarak adlandırılır. x , y ve λ bilinmeyenleri ise;

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} [f(x, y) + \lambda \varphi(x, y)] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} [f(x, y) + \lambda \varphi(x, y)] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \lambda} [f(x, y) + \lambda \varphi(x, y)] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

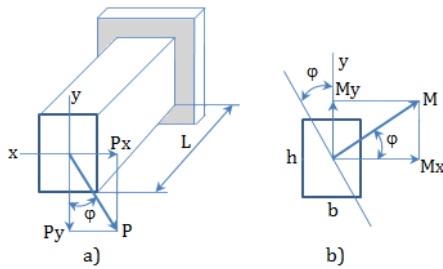
denklemlerinden veya

$$\frac{\partial z}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2)$$

eşitliği yardımıyla bulunabilir.

3. Eğik Eğilmeye Zorlanan Prizmatik Kirişlerin Optimum Kesit Boyutlarının Belirlenmesi

Düseye φ açısı yapan düzlem üzerinde bulunan M kuvvet çifti veya P kuvveti etkisi altında eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli prizmatik bir kirişi ele alalım (Şekil 1 a, b). Bakılan problemde eğik eğilme sonucu kirişin en kesitinde ortaya çıkan maksimum normal gerilmenin sınır değerini aşmaması şartıyla kiriş kesit boyutlarının optimum değerlerinin bulunması istenmektedir.



Şekil 1. Eğik eğilmeye maruz dikdörtgen kesitli prizmatik kirişlerde farklı yüklenme durumları

Optimizasyon kriteri olarak kiriş kütlesi ile malzeme ve üretim maliyetinin azaltılmasını sağlayan minimum kesit alanı kabul edilmiştir.

$$A = \sqrt[3]{36 W_x W_y} \rightarrow \min, \quad (3)$$

Burada W_x, W_y, x ve y eksenlerine göre kesit mukavemet momentleridir. Kesit boyutlarının değişken parametreleri üzerine tanımlanan kısıtlamalar, eğik eğilmeye maruz kalan prizmatik kirişin dayanımını ifade eden mukavemet koşullarına göre belirlenir. Bu koşul sınır fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varphi(\sigma_1, \sigma_2) = M_x/W_x + M_y/W_y - \sigma_{em} \leq 0 \quad (4)$$

Burada $M_x = P \cos \varphi \cdot L = M \cos \varphi$ olup, P kuvvetinin oluşturduğu maksimum momentin veya M kuvvet çifti vektörünün x eksenindeki bileşenidir. $M_y = P \sin \varphi \cdot L = M \sin \varphi$ olup, P kuvvetinin oluşturduğu maksimum momentin veya M kuvvet çifti vektörünün y eksenindeki bileşenidir. Eğer, eşitlik (4)'de verilen mukavemet momentlerinin yerine değişken parametreler arasındaki bağıntı denklemleri aşağıdaki şekilde yazılması durumunda;

$$W_x = \frac{Ah}{6} \text{ ve } W_y = \frac{Ab}{6} \quad (5)$$

sınır koşulu (eşitlik 4):

$$\varphi(b, h) = \frac{6M_x}{h} + \frac{6M_y}{b} - \sigma_{em} A \leq 0 \quad (6)$$

kısıtlama fonksiyonu şeklinde bulunur. Eşitlik (3)'teki amaç fonksiyonunu ve eşitlik (4)'deki sınır koşulunu sağlayan kesit boyutlarının belirlenmesi için düzenlenen Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$L = \sqrt[3]{36 W_x W_y} + \lambda \left(\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} - \sigma_{em} \right) \rightarrow \min \quad (7)$$

Kesit boyutlarının optimum değerleri ise aşağıdaki denklemler çözülerek bulunur.

$$\begin{cases} h + \lambda \left(-\frac{6M_y}{b^2} \right) = 0, & (a) \\ b + \lambda \left(-\frac{6M_x}{h^2} \right) = 0, & (b) \\ \frac{6M_x}{h} + \frac{6M_y}{b} - \sigma_{em} A = 0. & (c) \end{cases} \quad (8)$$

Eşitlik (8)'de (a) ve (b) denklemlerinin λ içeren terimleri eşitliğin sağ tarafına geçirilip, taraf tarafa bölünürse, kiriş kesit genişliğinin yüksekliğine göre optimum oranı:

$$(b/h)^{opt} = \frac{M_y}{M_x} = \frac{M \sin \varphi}{M \cos \varphi} = \tan \varphi \quad (9)$$

şeklinde bulunur. Eşitlik (9) ile eşitlik (8c) birlikte çözülerek kesit boyutlarının optimum değerlerini belirlemek için aşağıdaki analitik formüller elde edilmiştir,

$$h^{opt} = \sqrt[3]{\frac{12M_x}{\sigma_{em} \tan \varphi}}, \quad (10)$$

$$b^{opt} = \sqrt[3]{\frac{12M_y}{\sigma_{em} \cot \varphi}}, \quad (11)$$

Optimum kesit boyutları ile eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli prizmatik kirişin en ekonomik kesit alanı A_{min} ,

$$A_{min} = \sqrt[3]{\frac{72M^2 \sin 2\varphi}{\sigma_{em}^2}}, \quad (12)$$

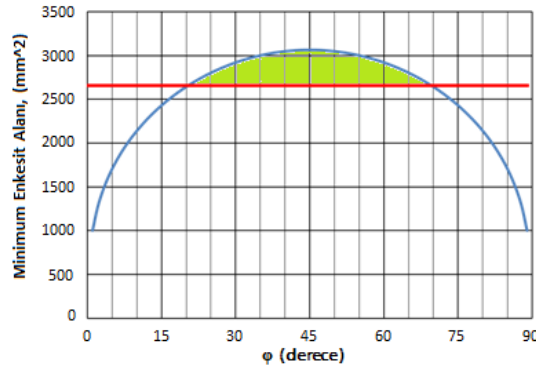
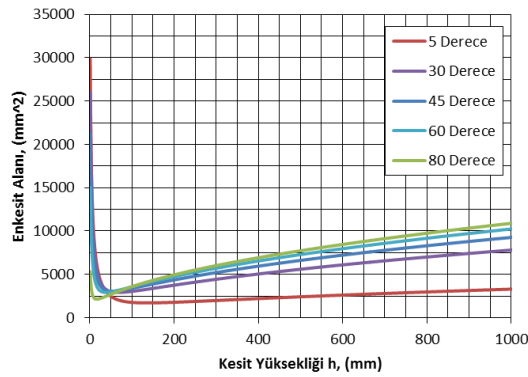
şeklinde bulunur.

Kiriş optimum kesit boyutlarının ve minimum kesit alanının belirlenmesi için elde edilen eşitlik (10,11,12) analitik formülleri ve amaç fonksiyonu kullanılarak, $M = 3$ kNm ve $\sigma_{em} = 150$ MPa alınarak $h^{opt} = f(\varphi)$, $b^{opt} = f(\varphi)$, $A_{min} = f(\varphi)$ ve $A = f(h)$ bağıntılarının incelenmesi üzerine yapılan örnek hesaplamaların sonuçları Tablo 1' de ve grafiksel olarak Şekil 2 ve 3' de gösterilmiştir.

Bilindiği gibi P kuvvetinin veya M kuvvet çiftinin bulunduğu düzlemin düşeyle yaptığı φ açısı 0° veya 90° olursa, kiriş yatay veya dikey düzlemde düz eğilmeye maruz kalır. Bu zorlanmalarda ise minimum kesit alanının kriter olması suretiyle optimum noktanın belirlenmesi söz konusu olamaz ve kesit boyutları mevcut mukavemet hesabı ile belirlenir. Tablo 1 ve Şekil 2'deki diyagramdan görüldüğü üzere φ açısı 45° olursa kirişin optimum en kesiti kare şeklindedir ve alanı, minimum en kesit alanlarının en büyüğü olur. φ açısı 0° ile 45° arasında değişirse kirişin optimum kesiti $h/b > 1$ şeklinde olmakta ve minimum kesit alanı 0 mm^2 ile

Tablo 1.Optimum kiriş en kesit boyutlarının φ' ye bağlı olarak değişimi

| φ^0 | 0^0 | 10^0 | 20^0 | 30^0 | 40^0 | 45^0 | 50^0 | 60^0 | 70^0 | 80^0 | 90^0 |
|-----------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| h^{opt} , mm | $\rightarrow \infty$ | 110 | 85 | 71 | 60 | 55 | 50 | 41 | 31 | 19 | $\rightarrow 0$ |
| b^{opt} , mm | $\rightarrow 0$ | 19 | 31 | 41 | 50 | 55 | 60 | 71 | 85 | 110 | $\rightarrow \infty$ |
| A_{min} , mm ² | $\rightarrow 0$ | 2090 | 2635 | 2911 | 3000 | 3025 | 3000 | 2911 | 2635 | 2090 | $\rightarrow 0$ |

**Şekil 2.** Minimum en kesit alanının φ' ye bağlı olarak değişimi**Şekil 3.** Kiriş enkesit alanının kesit yüksekliğine bağlı olarak değişimi

3025 mm² arasında değişmektedir. φ açısı 45^0 ile 90^0 arasında değişirse kirişin optimum kesiti $h/b < 1$ şeklinde olmakta ve minimum kesit alanı 3025 mm² ile 0 mm² arasında değişmektedir. Başka bir ifadeyle her 1^0 ye karşılık minimum kesit alanı ortalama $\Delta A = 3025/45 = 67$ mm² değişim göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre eğik eğilmeye zorlanan kirişlerde kuvvet veya kuvvet çiftinin kiriş kesitine uygulandığı açının ekonomik açıdan çok önemli olduğu görülmektedir. Söz konusu açının ($0^0 - 20^0$) ve ($70^0 - 90^0$) aralarında olmasının minimum kesit alanı üzerindeki etkisi, açının ($20^0 - 70^0$) arasında olmasının minimum kesit alanı üzerindeki etkisinden çok daha fazladır. Bu nedenle uygulanan kuvvetin veya kuvvet çiftinin bulunduğu düzlemin düşeyle yapmış olduğu açının ($0^0 - 20^0$) veya ($70^0 - 90^0$) arasında olması tavsiye edilir. Örneğin $\varphi \leq 20^0$ veya $\varphi \geq 70^0$ olması durumu için, kiriş kesit alanından en az $\Delta A = (3025 - 2635)/3025 \cdot 100 = \%13$ tasarruf elde edilebilir.

4. Çekme (veya Basma) ile Birlikte Eğik Eğilmeye Zorlanan Prizmatik Kirişlerin Optimum Kesit Boyutlarının Belirlenmesi

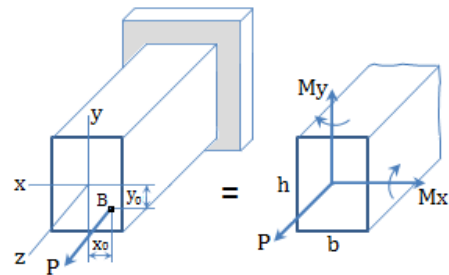
Eksenel yükleme sonucu çekme (veya basma) ile birlikte eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli prizmatik bir kirişi ele alalım (Şekil 4).

Şekil 4'te verilen yükleme durumu için izin verilen gerilmeye karşılık, kiriş en kesitinde ortaya çıkan maksimum normal gerilme kısıtlama fonksiyonu olarak;

$$\varphi(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \frac{P}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} - \sigma_{em} \leq 0, \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $M_x = P y_0$ ve $M_y = P x_0$ olup, kesitin $B(x_0, y_0)$ noktasında uygulanan P kuvvetinin x ve y eksenlerine göre oluşturduğu momentlerdir.

Kiriş kesit alanının minimize edilmesi için eşitlik (13)'de verilen kısıtlama fonksiyonu kullanılarak Lagrange amaç fonksiyonu, optimizasyonun giriş denklemi eşitlik (14)'deki gibi yazılır.

**Şekil 4.** Çekme (veya basma) ile birlikte eğik eğilmeye neden olan dış merkezli yükleme durumu

$$L = A + \lambda \cdot \varphi \rightarrow \min, \quad (14)$$

Analitik yoldan yapılan optimizasyon işlemlerinin zorluk derecesini azaltmak ve matematiksel ifadeleri kolaylaştırmak için, mukavemet momentleri, kesit alanı cinsinden yazılarak eşitlik (13) yeniden düzenlenirse, kısıtlama fonksiyonu;

$$\varphi(b, h) = P + \frac{6M_x}{h} + \frac{6M_y}{b} - \sigma_{em}A \leq 0, \quad (15)$$

haline gelir. Eşitlik (15) 'de b ve h değişken parametrelerine göre alınan diferansiyelleri

$$\frac{\partial \varphi}{\partial b} = -\frac{6M_y}{b^2}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial h} = -\frac{6M_x}{h^2} \quad (16)$$

Lagrange fonksiyonunun ekstremum değeri için

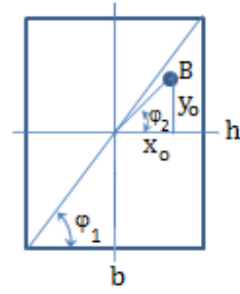
$$\frac{\partial A}{\partial b} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial h} = \frac{\partial A}{\partial h} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial b} \quad (17)$$

koşulunda yerine yazıldıktan sonra elde edilen denklem çözülerek kiriş yüksekliğinin genişliğine optimum oranı aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$(h/b)^{opt.} = \frac{M_x}{M_y} = \frac{P y_0}{P x_0} = \frac{y_0}{x_0}, \quad (18)$$

Burada, x_0 ve y_0 P kuvvetinin kiriş kesitine uygulandığı B noktasının koordinatlarıdır. Eşitlik (18)'in geometrik anlamı $\tan \varphi_1 = \tan \varphi_2$ 'dir (Şekil 5). Bu eşitliğin sağlanması ise, B noktasının yalnız köşegen üzerinde olması halinde mümkündür. Başka bir ifadeyle optimum boyutlara veya minimum kesit alanına sahip dikdörtgen kesitli bir kiriş elde etmek için P kuvveti her zaman kesit köşegeni üzerindeki noktalardan birine uygulanmalıdır.

Eşitlik (15) ve eşitlik (18) birlikte çözülerek dış merkezli çekme veya basma ile birlikte eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli prizmatik kirişin optimum kesit yüksekliğini belirlemek için ;



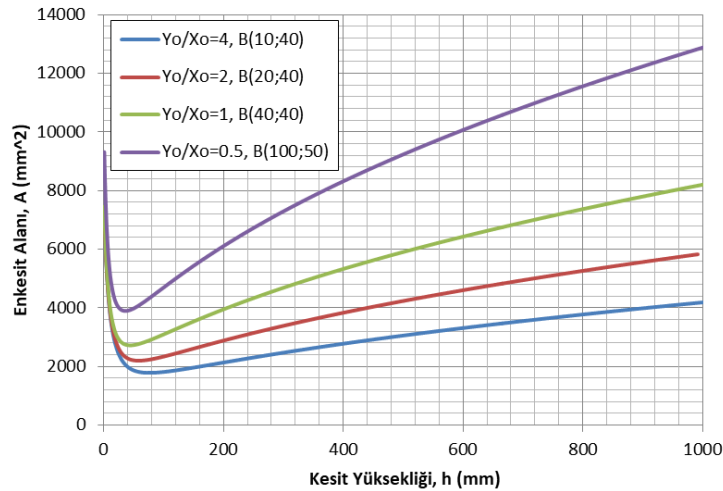
Şekil 5. Eşitlik (18)'in izahı

$$h^{opt.} = \sqrt[3]{6ky_0 + \sqrt{(6ky_0)^2 - (k/3)^3}} + \sqrt[3]{6ky_0 - \sqrt{(6ky_0)^2 - (k/3)^3}}, \quad (19)$$

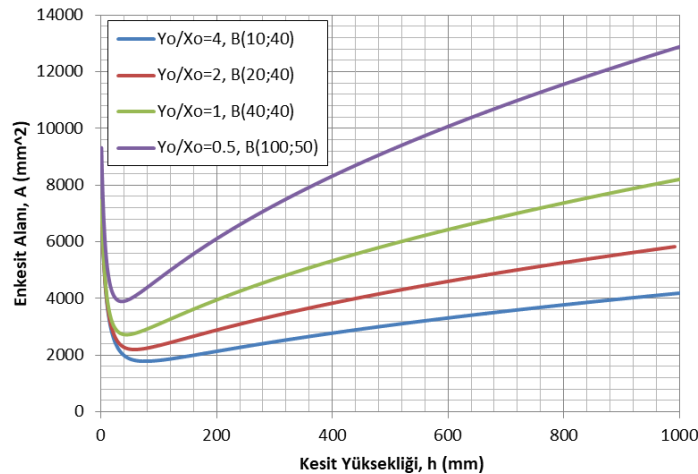
analitik formülü elde edilmiştir. Burada $k = P y_0 / (\sigma_{em} x_0)$ dir.

Sayısal örnek olarak $P = 40$ kN, $\sigma_{em} = 150$ MPa alınarak $B(x_0, y_0)$ noktasının farklı yerleşimleri için eşitlik (19)'a göre yapılan örnek hesaplamaların sonuçları grafiksel olarak şekil 6' da verilmiştir.

Amaç fonksiyonunun sayısal incelenmesi sonucu kiriş kesit alanı ile kesit yüksekliği arasındaki bağıntılar belirlenmiş ve diyagram olarak Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Optimum Kesit Yüksekliğinin B Noktasının Koordinatına Göre Değişimi



Şekil 7. Kiriş Enkesit Alanının Kesit Yüksekliğine Bağlı Değişimi

Bu diyagramlardan, kesit alanının minimum değerlerine karşılık gelen kesit yüksekliklerinin, eşitlik (19) yardımıyla bulunan kesit yükseklikleri ile (Şekil 6) aynı olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

1. Yalnızca eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli kirişlerde;

- Optimum kesit boyutları ve minimum kesit alanı eşitlik (10), eşitlik (11) ve eşitlik (12) analitik bağıntıları ile tayin edilebilir;
- Optimum kesit genişliğinin yüksekliğine oranı, P kuvvetinin veya M kuvvet çiftinin bulunduğu düzlemin düşeyle yaptığı φ açısının tanjantına eşittir;
- Önerilen φ açısı değerleri 0^0-20^0 ve 70^0-90^0 aralığındadır. Bu aralık değerlerinde kesit alanında elde edilen tasarruf minimum %13 olarak belirlenmiştir.

2. Çekme (veya Basma) ile birlikte eğik eğilmeye zorlanan dikdörtgen kesitli kirişlerde;

- Optimum kesit boyutları eşitlik (18) ve eşitlik (19) analitik bağıntıları ile tayin edilebilir;
- Optimum kesit yüksekliğinin genişliğine oranı P eksenel kuvvetinin uygulandığı $B(x_0, y_0)$ noktasının koordinatlarının oranına (y_0/x_0) eşittir;
- Minimum kesit alanı, eksenel P kuvveti yalnızca kesit köşegeni üzerindeki noktalardan birine uygulandığı takdirde elde edilebilir.

Kaynaklar

1. Timoshenko, S. P., History of Strength of Materials, McGraw-Hill, New York, 1953.
2. Tardini, C., Toward Structural Mechanics Through Wooden Bridges in France (1716-1841), Springer, Cham, 2014.
3. Toktosunov, E. A. Ve Liakhovich, L. S., "Silindirik Ahşap Kütükten Üretilen ve Basma-Eğilmeye Zorlanan Kirişin Dikdörtgen En Kesitinin Optimizasyonu", Genç Alimlerin ve Öğrencilerin 59. Bilim-Teknik Konferans Materyalleri, TSUAB, Tomsk, 216-221, 2013, (Rusça).
4. Shein A.I. "Closed Solution of The Problem of Finding The Optimal Size of a Rectangular Section Beams in Tension-Compression Bending in Two Planes", Modern Scientific Researches and Innovations, No 11, 2014, (Rusça).
5. Fraiman, F. I., "Optimum Design of A Thin-Webbed Channel Beam under Pure Oblique Bending", Sov. Appl. Mech., Cilt 7, No 11, 1256-1262, 1971.
6. Fraiman, F. I., "Particular Case of Optimal Design of Thin-Walled Shell Beam with Unisymmetrical Bending", Sov. Appl. Mech., Cilt 8, No 2, 224-227, 1972.
7. Moiseev G. D. ve Savelyev, A. G., "Yol İnşaat Makinalarının Çubuk Sistemlerinin Kalite Analizi", Kalite Yönetim Metodları, No 11, 40-42, 2002, (Rusça).
8. Moiseev, G. D. ve Savelyev, A. G., "Kutu Kesitli Çubukların Ağırlıklarının Minimize Edilmesi" New Materials and Technologies in The Construction and Road Complex, International Scientific and Technical Conference, BGITA, Bryansk, 2008, (Rusça).
9. Moiseev, G. D., "Bindirmeli Kutu Şekilli Çubukların Ağırlığının Minimize Edilmesi", New Materials and Technologies in Machine Building, 10th International Scientific and Technical Conference, Bryansk, 175-179, 2009, (Rusça).
10. Moiseev, G. D. ve Rudnicki. V. N., "Dikey Diyaframlı Kutu Şekilli Çubukların Ağırlığının Minimize Edilmesi", New Materials and Technologies in Machine Building, 17th International Scientific and Technical Conference, , Bryansk, 2013, (Rusça).
11. Moiseev, G. D., Prus, B. N. ve Kolesnikov P. G., "İki Dikey Diyaframlı Kutu Şekilli Çubukların Ağırlığının Minimize Edilmesi", New Materials and Technologies in Machine Building, 18th International Scientific and Technical Conference, Bryansk, 2013, (Rusça).
12. Andjelic, N., "Thin Walled I-Beam under Complex Loads - Optimization according to Stress Constraint", FME Transactions, Cilt 31, No 2, 55-60, 2003.
13. Andjelic, N., "One View to The Optimization of Thin Walled Open Sections Subjected to Constrained Torsion", FME Transactions, Cilt 35, No 1, 23-28, 2007.
14. Andjelic, N. ve Milosevic-Mitic, V., "An Approach to the Optimization of Thin-Walled Cantilever Open Section Bbeams", Theoret. Appl. Mech., Cilt 34, No 4, 323-340, 2007.
15. Andjelic, N., Milosevic-Mitic, V. ve Maneski, T., "An Approach to The Optimization of a Thin-Walled Z-Beam", Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Cilt 55, No 12, 742-748, 2009.
16. Andjelic, N. ve Milosevic-Mitic, V., "Optimum Design of Thin-Walled I Beam Subjected to Stress Constraint", J. Theor. Appl. Mech., Cilt 50, No 4, 987-999, 2012.
17. Andjelic, N., Milosevic-Mitic, V. O. ve Petrovic, A. S., "Stress Constraints Applied to the Optimization of a Thin-Walled Z-Beam", FME Transactions, Cilt 42, No 3, 237-242, 2014.
18. Al-Mosawi, S. ve Saka, M.P., "Optimum Shape Design of Cold-Formed Thin-Walled Steel Sections", Advances in Engineering Software, Cilt 31, 851-862, 2000.
19. Gasic, M. M., Savkovic, M. M. ve Bulatovic, R. R., "Optimization of Trapezoidal Cross Section of the Truck Crane Boom by Lagrange's Multipliers and by Differential Evolution Algorithm (DE)", Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Cilt 57, No 4, 304-312, 2011.
20. Gohberg, M. M., Krenler, Makine Yapım Yayınevi, Cilt 1, 339-341, Moskova 1988, (Rusça).
21. Gohberg, M. M., Kaldırma ve İletme Makinalarının Metal Konstrüksiyonları, Makine Yapım Yayınevi, 2. Baskı, Leningrad, 1976, (Rusça).
22. Rao, S. S., Engineering Optimization Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2009.
23. Savković, M.M., Gasic, M.M., Catic, D.M., Nikolić, R.R., . Pavlović, G.V., "Optimization of the box section of the main girder of the bridge crane with the rail placed above the web plate", Structural and Multidisciplinary Optimization, 47(2), 273-288, 2013.