



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

Cilt 29 Sayı 3 Mayıs 2018

## Teknik Dergi

- Science Citation Index Expanded
- Scopus
- Journal Citation Reports / Science Edition
- Engineering Index
- Concrete Abstracts (American Concrete Institute)
- National Technical Information Service (US NTIS)
- CITIS
- Ulrich's International Periodical's Directory
- TÜBİTAK / ULAKBİM

tarafından taranmaktadır.

### TEKNİK DERGİ YAYIN İLKELERİ

Teknik Dergi, inşaat mühendisliğinin bütün alanlarını içeren, Science Citation Index Expanded (Genişletilmiş Bilimsel Atıf Endeksi) kapsamında bilimsel ve teknik bir dergidir. Ocak, Mayıs ve Eylül aylarında Türkçe, Mart, Temmuz ve Kasım aylarında İngilizce olmak üzere yılda altı sayı olarak yayımlanır. Derginin yayım ilkelerinden başlıcaları aşağıda özetlenmektedir:

1. Yalnızca özgün bilimsel araştırma çalışmalarını ve ilginç mühendislik uygulamaları yansıtan yazılara yer verilir. "Özgünlük" kapsamı içinde, çalışmanın ya yeni bilgi üretmiş olması veya varolan bilgiye yeni bir boyut kazandırmış olması, ya da yeni bir yöntem geliştirmiş veya bilinen bir yöntemi elle tutulur bir ölçüde ilerletmiş olması koşulu aranır.
2. Bilimsel çalışmaların öndeğerlendirme sonuçlarını aktaran yazılar ile bilimsel içeriği makale için yeterli görülmeyen, ancak okuyucuya yararlı bilgi aktarabileceği düşünülen yazılar, "teknik not" olarak yayımlanabilir.
3. Yayım tarihinden başlayarak üç ay içinde, okurlardan alınan tartışma yazıları, Yayın Kurulu'nca değerlendirildikten sonra, yazarın yanıtı ile birlikte yayımlanır.
4. Yayımlanmak üzere gönderilen yazılar iki veya üç danışman tarafından değerlendirilir; kabul-red kararı Yayın Kurulu tarafından verilir. Yazıları değerlendiren danışman adları yazarlara bildirilmez. Yeterli görülmeyen yazıların danışman önerileri doğrultusunda geliştirilmesi genel yaklaşımdır. Amaçlanan düzeye erişilemeyen yazılar reddedilir.
5. Yazardan, yazının daha önce "dergi makalesi veya kitap bölümü olarak yayımlanmamış" olduğunu belirten imzalı bir bildirim alınır. Yayın Kurulu, yazının ufak tefek değişikliklerle başka bir dergide/kitapta yayımlanmış olduğu ya da intihal vb bir başka etik ihlali bulunduğu kanısına ulaşırsa, yalnızca o yazı değil, o yazarın hiçbir yazısı yayımlanmaz.
6. Daha önce bir konferansa bildiri olarak sunulmuş olan bir çalışmayı geliştirerek aktaran yazılar yayımlanabilir. Bu durumda, daha önce sunulduğu konferans, birinci sayfada dip not olarak belirtilir.
7. Ayrıca, yazar(lar) tarafından imzalanmış, yazının telif hakkının TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası'na devredildiğini bildiren bir belgenin yazı ile birlikte gönderilmesi istenir.

Baskı: Yorum Basın Yayın Sanayi Ltd. Şti.

Başkent Organize Sanayi Bölgesi No: 12 Malıköy - Sincan / Ankara - Tel: 0.312.395 21 12

Baskı tarihi: 1 Mayıs 2018 / 2.000 adet basılmıştır. Üyelerine parasız dağıtılır.

Yerel süreli yayın.

Yayın Kurulu'nun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

*Technical Journal  
of  
Turkish Chamber of Civil Engineers  
Volume 29 Number 3 May 2018*

Cilt 29 Sayı 3 Mayıs 2018

# Teknik Dergi

**Sahibi:**

TMMOB İnşaat Mühendisleri  
Odası adına  
Cemal GÖKÇE

**Yazı İşleri Müdürü:**

Bahaettin SARI

**Yazışma Adresi:**

Teknik Dergi  
İnşaat Mühendisleri Odası  
Necatibey Cad. No:57  
Kızılay 06440 Ankara  
Tel : 0 (312) 294 30 00  
Faks: 0 (312) 294 30 88  
Web: www.imo.org.tr  
E-posta:teknikdergi@imo.org.tr

**Yayın Kurulu:**

Süheyl AKMAN  
Ender ARKUN  
İsmail AYDIN  
Özer ÇİNİCİOĞLU  
Metin GER  
Gürkan Emre GÜRCANLI  
Alper İLKİ  
Cem OĞUZ  
Kutay ORAKÇAL  
Günay ÖZMEN  
Baki ÖZTÜRK  
İsmail ŞAHİN  
Tuğrul TANKUT

**Yayın Sıklığı:**

İki ayda bir yayımlanır

**Editör:**

Tuğrul TANKUT

**Yardımcı Editörler:**

Ender ARKUN  
İsmail AYDIN  
Özer ÇİNİCİOĞLU  
Metin GER  
Gürkan Emre GÜRCANLI  
Alper İLKİ  
Kutay ORAKÇAL  
İsmail ŞAHİN

**Yayın Sekreteri:**

Cemal ÇİMEN

ISSN : 1300-3453

**Danışmanlar:**

Bu liste, son iki yayın yılında danışmanlık yapmış olan kişileri içerir ve her Ocak sayısında yenilenir.

Emine AĞAR  
Sami Oğuzhan AKBAŞ  
Özge AKBOĞA KALE  
M. Vefa AKPINAR  
Zuhal AKYÜREK  
Hilmi Doğan ALTINBİLEK  
Davut ARDITI  
Deniz ARTAN İLTER  
Cem AYDEMİR  
Yusuf AYYAZ  
Selim BARADAN  
Bekir Oğuz BARTIN  
Bilge BAŞ  
Zerrin BAYRAKDAR  
İdris BEDİRHANOĞLU  
Serkan BEKİROĞLU  
Niyazi Özgür BEZGİN  
İlknur BOZBEY  
Zafer BOZKUŞ  
Zekai CELEP  
Halim CEYLAN  
Barlas Özden ÇAĞLAYAN  
Özgür ÇAKIR  
Necati ÇATBAŞ  
Erkan ÇELEBİ  
Kutay ÇELEBİOĞLU  
Oğuz Cem ÇELİK  
Hilmi Berk ÇELİKOĞLU  
Ender DEMİREL  
Fatih DİKBAŞ  
Seyyit Ümit DİKMEN  
Ahmet Anıl DINDAR  
Emrah DOĞAN  
Nilay ELGİNÖZ KANAT  
Murat Altuğ ERBERİK  
E. Mete ERDEMGİL  
Ercan ERDİŞ

Esin ERGEN PEHLEVAN  
Ayşen ERGİN  
Gökmen ERGÜN  
Güngör EVREN  
Ergun GEDİZLİOĞLU  
Haluk GERÇEK  
Mustafa GÖĞÜŞ  
İlgin GÖKAŞAR  
M. Halis GÜNEL  
Mehmet Şükrü GÜNEY  
Aslı Pelin GÜRGÜN  
Soner HALDENBİLEN  
Zeki HASGÜR  
Zeynep İŞİK  
Recep İYİSAN  
Murat KARACASU  
Engin KARAESMEN  
Erhan KARAESMEN  
Halil KARAHAN  
Mustafa KARAŞAHİN  
C. Melek KAZEZYILMAZ ALHAN  
Engin KEYDER  
Veysel Şadan Özgür KIRCA  
Niyazi Uğur KOÇKAL  
Özgür KURÇ  
Hilmi LUŞ  
Yetiş Şazi MURAT  
Sepanta NAIMI  
Dilek OKUYUCU  
Mehmet Hakkı OMURTAG  
Engin ORAKDÖĞEN  
Akin ÖNALP  
Aybike ÖNGEL  
Bihret ÖNÖZ  
Halit ÖZEN  
Hakkı Oral ÖZHAN  
Hulusi ÖZKUL

Beliz ÖZORHON ORAKÇAL  
Turan ÖZTURAN  
Gül POLAT TATAR  
Altuğ SAYGILI  
Hasan SAYGIN  
Serdar SELAMET  
Osman SİVRİKAYA  
Serdar SOYÖZ  
İbrahim SÖNMEZ  
Ayşe Filiz SUNAR  
Özkan ŞENGÜL  
Aykut ŞENOL  
Ali Ünal ŞORMAN  
Ergin TARI  
Erhan TEKİN  
H. Onur TEZCAN  
Onur Behzat TOKDEMİR  
Nabi Kartal TOKER  
Mustafa TOKYAY  
Tamer TOPAL  
Cem TOPKAYA  
Ahmet TORTUM  
Ahmet TÜRER  
Handan TÜRKÖĞLU  
Mehmet UTKU  
Alper ÜNLÜ  
Tanvir WASTI  
Mert Yücel YARDIMCI  
Ufuk YAZGAN  
Emine Beyhan YEĞEN  
Osman YILDIZ  
Koray Kamil YILMAZ  
M. Tuğrul YILMAZ  
M. Semih YÜCEMEN  
Yeliz YÜKSELEN AKSOY  
Nabi YÜZER

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

Cilt: 29 Sayı: 3 Mayıs 2018

## İÇİNDEKİLER

|   |      |
|---|------|
| Aykırı Değerlerin Tespiti ve Taşkın Debilerinin Hesabı için Bir Yöntem Geliştirilmesi .....             | 8339 |
| <b>Mahsum AYDIN, Ahmet TUNA</b>   |      |
| Harç Tipi Kaplamaların Yüzey Özelliklerinin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalar ile Karşılaştırılması ..... | 8365 |
| <b>Ali TOPAL, Mehmet GÜNEŞ, Derya KAYA, Burak ŞENGÖZ</b>  |      |
| Geosentetik Kil Örtü Hidrasyon Yönteminin Alt Zemin Koşullarına Bağlı Olarak Değerlendirilmesi.....     | 8385 |
| <b>Tuğçe ÖZDAMAR KUL, Ali Hakan ÖREN</b>  |      |
| Açık Deniz Yapıları Kova Temel Sistemi Davranışı Üzerinde Tekrarlı Yük Frekansının Etkisi .....         | 8411 |
| <b>H. Ercan TAŞAN, C. Taylan AKDAĞ</b>  |      |
| Beton Gürültü Bariyeri İçin Perlit Kaplama ve Maliyeti .....  | 8433 |
| <b>Metehan ÇALIŞ, Zübeyde ÖZTÜRK</b>  |      |
| <b>TEKNİK NOT</b>   |      |
| Şehiriçi Yollarda Üstyapıların Mevcut Performansını Belirlemek İçin Bir Yöntem .....                    | 8459 |
| <b>Ufuk KIRBAŞ, Mustafa KARAŞAHİN</b>   |      |



# Aykırı Değerlerin Tespiti ve Taşkın Debilerinin Hesabı için Bir Yöntem Geliştirilmesi

Mahsum AYDIN<sup>1</sup>

Ahmet TUNA<sup>2</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada aykırı değerlerin belirlenmesi ve taşkın debilerinin hesabı için geliştirilen yeni bir metod önerilmektedir. Çalışmada Fırat havzası üzerinde bulunan 6 adet gözlem istasyonuna ait veriler kullanılmıştır. Bu gözlem istasyonlarına ait veriler analiz edilmiş ve aykırı değerler Rosner testi, Dixon Thompson testi ve önerilen yöntem ile tespit edilmiştir. Belirli tekerrür aralığında meydana gelebilecek olan taşkın debileri önerilen yöntem kullanılarak hesap edilmiştir. Aykırı değerler veri setlerinden çıkarılarak uyumun iyiliği testleri sonucu belirlenen olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) kullanılarak taşkın debileri hesap edilmiştir. Ayrıca L momentler yöntemi ile parametreleri belirlenen en uygun OYF yardımıyla taşkın debileri bölgesel olarak hesap edilmiştir. Önerilen yöntem, taşkın frekans analizi ve L momentler yöntemi ile hesaplanan taşkın debisi değerleri karşılaştırıldığında önerilen yöntem ve noktasal taşkın frekans analizi ile belirlenen değerlerin L momentler yöntemi ile belirlenen değerlerden daha uygun ve kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aykırı değer, taşkın frekans analizi, olasılık yoğunluk fonksiyonu, uyumun iyiliği testi, L momentler yöntemi, Fırat Havzası.

## ABSTRACT

### Development of a New Method for Detecting Outliers and Calculating Flood Discharge

In this study a new method has been proposed which was developed for detecting outliers and calculating flood discharge. In the study the data of six gauging stations on Euphrates basin have been used. The data of these stations were analyzed and the outliers were detected by using Rosner test, Dixon Thompson test and the proposed method. The flood discharge which can occur in a certain recurrence interval has been calculated by using the proposed method. After the outliers were removed from the datasets, the flood discharges were calculated by using probability density functions (PDF) which were determined by using goodness of fit tests. In addition, flood discharges are calculated regionally by using PDF

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 10.02.2016 günü ulaşmıştır. 25.07.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.373781

1 Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van - maydin@yyu.edu.tr

2 Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ - atuna@firat.edu.tr

whose parameters were determined by the L moments method. When the flood discharge values were calculated by using the proposed method, and when the flood frequency analysis and L moments methods were compared, it has been concluded that the values determined by the proposed method and flood frequency analysis are more suitable and usable than the values determined by the L moments method.

**Keywords:** Outliers, flood frequency analysis, probability density function, goodness of fit test, L moments method, Euphrates Basin.

## 1. GİRİŞ

Su yapılarının hesap ve tasarımı yapılırken gelebilecek en büyük taşkın debisi göz önüne alınarak hesap ve tasarımlar yapılmak suretiyle güvenli bir tasarım sağlanması amaçlanmaktadır. Ancak bu taşkın debileri hesaplanırken kullanılan veriler içerisinde aykırı değerlerin varlığı hesaplamaların yanlış yapılmasına ve su yapılarının boyutlandırılmasında büyük ebatlarda boyutlandırılmasına yol açarak yüksek maliyetlere neden olmasının yanı sıra daha küçük ebatlarda boyutlandırılmasına neden olup büyük felaketlere yol açabilir. Bu nedenle taşkın debilerinin hesabında kullanılan veriler içerisindeki bu aykırı gözlem değerlerinin tespit edilmesi ve bu gözlemlerin veri seti üzerindeki etkisinin azaltılması hesap sonuçlarımızın daha doğru ve anlamlı olmasını sağlayacaktır. Aykırı değerlerin tespiti için birçok yöntem geliştirilmiştir, bu yöntemlerin birçoğu aykırı değerleri hesaplarken standart sapma, çarpıklık katsayısı, ortalama değer gibi veri setlerine bağlı istatistikî değerler kullanılmaktadır. Ancak veri seti içerisinde mevcut olan aykırı değerleri tespit ederken bu veri setlerine ait istatistikî değerlerin kullanılması aykırı değerlerin teşhisinde hata yapılmasına ve veri seti içerisindeki aykırı değerlerin yeterli doğrulukta tespit edilememesine neden olacaktır. Bu çalışmada önerilen yeni yöntem sayesinde veri setleri içerisindeki aykırı değerleri tespit ederken standart sapma, çarpıklık katsayısı, ortalama gibi istatistikî değerler kullanılmamaktadır. Dolayısıyla hesaplamalar sonucu aykırı değerler daha doğru bir şekilde tespit edilebilmektedir.

## 2. AYKIRI DEĞER

Aykırı değerler, verinin geriye kalan kısmıyla tutarsız olan gözlemler şeklinde tanımlanabilir. Bir aykırı değer, verinin kalanından belirgin bir şekilde uzak ya da farklı olan ya da verilerin çoğunluğu ile oldukça tutarsız olan bir gözlemdir. Eğer istatistikî bir modelin gerçek veri üreten mekanizmaya yakın olduğunu varsayarsak, aykırı değerleri gerçek modelden sapan değerler olarak ele alabiliriz. Böylece birçok durumda aykırı değerler, kendi gerçek değerlerinden sapan gözlemler olarak yorumlanabilir ya da eksik gözlenen değerler veya yanlış ölçülen değerler olarak da yorumlanabilirler [1].

Aykırı gözlemler, verinin çoğunluğundan belirgin bir şekilde sapan değerlerdir. Verinin çoğunluğunun uyduğu mekanizmadan farklı bir şekilde oluşmuş olabilirler veya kayıt hatası, üretim aşamasında bir bozukluk veya insanlarla ilişkili sebeplerden meydana gelebilirler. Aykırı gözlemler model kurma hatasına, yanlış parametre tahminlerine veya yanlış analiz sonuçlarına sebep olabilirler [2]. Bu nedenle aykırı değerlerin veri içerisinde tespit edilmesi ve etkilerinin giderilmesi doğru hesap yapma ve model kurma açısından oldukça önemlidir.



Hidrolojik verilerde aykırı değerlerin tespit edilebilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir bu yöntemlerden bazıları; Chauvent, Dixon Thompson, Rosner metotlarıdır.

## 2.1. Chauvenet Yöntemi

Chauvenet yöntemi, örnekteki tek bir değer için geriye kalan noktalarından farklı bir popülasyondan gelip gelmediğini belirlemek için kullanılır. Kritik değerler normal dağılım varsayımına dayanır. Test edilecek veri noktası, ortalamadan en çok sapan örnek değeridir ( $X_0$ ). Nokta, ortalamanın altında ya da üstünde yer alabilir. Bu testin hipotezi şu şekildedir:

$H_0$ : Örnekteki tüm noktalar aynı normal popülasyondan gelmektedir.

$H_1$ : Örnekteki en uç örnek noktasının, kalan örnek noktaları çizildiğindeki normal popülasyondan gelmesi mümkün değildir.

Sıfır hipotezinin reddedilmesi, test edilen en uç örnek değerinin bir aykırı değer olduğunu gösterir. Değerin bir aykırı değer olarak belirlenmesinin nedeni aynı zamanda, veri son derece çarpık bir dağılımdan geldiğinde, testin normallik varsayması olabilir.

Chauvenet metodunda test istatistiğinin hesaplanabilmesi için, ilgili popülasyon parametreleri  $\mu$  'nun tahmini  $\bar{X}$  (örnek ortalaması) ve  $\sigma$  'nın tahmini S (standart sapma) değerlerine ihtiyaç vardır. Böylece örnekteki en uç değer,  $X_0$ , belirlenir ve standart normal sapma uç değer Z'nin hesaplanmasında kullanılabilir:

$$Z = \frac{X_0 - \bar{X}}{S} \quad (1)$$

Eğer yukarıdaki denkleme göre hesaplanan Z değeri  $Z_{p/2}$  değerini aşıyorsa sıfır hipotezi reddedilir.  $Z_{p/2}$  değerleri p/2 olasılığı girilerek standart normal tablodan doğrudan doğruya görülebilir.  $p = 1/(2n)$  şeklindeki Chauvenet kriteri uygulandığında bu iki kuyruklu bir testtir ve tek kuyruklu bir test olarak uygulanamaz. Bu, yalnızca tek bir aykırı değer testinde kullanılabilir ve eğer en uç değer bir aykırı değer olarak kabul edildiyse ikinci bir gözleme uygulanamaz [3].

## 2.2. Dixon-Thompson Testi

Aykırı değerler için Dixon-Thompson (1953) testi de, belirli bir noktanın, veri setinin kalanıyla aynı popülasyondan gelip gelmediğinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu özel test, küçük örnek boyutlarına sahip (en fazla 25 gözlem içeren) veri setlerinde kullanılabilir. Bu testin varsayımları:

1. Veri, normal bir dağılımdan bağımsız ölçümler içerir.
2. Aykırı değer olarak tespit edilen aşırı uç olaylar, ya kayan bir ortalaması olan ya da aynı ortalaması olan fakat daha büyük bir varyansa sahip bir popülasyondan gelebilirler.

Dixon-Thompson testi, yalnızca tek bir aykırı değer tespiti için geçerlidir. Bu testin kullanılabilmesi için, veri seti en büyükten en küçüğe doğru sıralanır ve en uç değer aykırı değer olarak test edilir. Bu nokta, örnek büyüklüğüne bağlı test istatistiklerinden biri kullanılarak test edilir. En uç değer  $X_n$  olarak ifade edilirse Dixon Thompson test istatistiği aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$R = \frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_3} \quad (2)$$

Elde edilen R test istatistiği, %5 anlamlılık düzeyi için hesaplanan kritik değerle karşılaştırılır. Eğer R değeri bu kritik değerden büyükse, bu nokta, aykırı değer olarak kabul edilecek bir aday olarak kabul edilir. Eğer nokta, bir aykırı değer olarak kabul edilirse, veri setinden ve diğer tüm alt hesaplamalardan çıkartılır [4].

### 2.3. Rosner Testi

Rosner (1983) testi tek bir aykırı değer testi için öncelikle Grubbs (1969) tarafından önerilen ve daha sonra Grubbs ve Beck (1972) tarafından tablolaştırılan aşırı studentlaştırılmış sapmanın (ESD) bir genellemesidir. Rosner'in genellemesi birden fazla aykırı değer içindir. Rosner testinin kullanılması için, mevcut potansiyel aykırı değerlerin sayısı üzerine bir üst limit (m) belirtilmelidir. Test, 25 ya da daha fazla sayıda gözlem içeren örnekler için geçerlidir.

m adet en uç gözlem çıkarıldıktan sonra kalan ölçümlerin ( $n - m$ ) ortalaması  $\bar{x}_m$  ve standart sapması  $s_m$  iken;

$$\bar{x}_m = \frac{1}{n - m} \sum_{j=1}^{n-m} x_j \quad (3)$$

$$s_m = \left[ \frac{1}{n - m} \sum_{j=1}^{n-m} (x_j - \bar{x}_m)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

m adet daha uç değer (büyük ya da küçük) tespit edildikten sonra ortalamadan ( $\bar{x}_m$ ) en uzak kalan gözlem  $x_m$  olsun. Bu durumda:

$$R_m = \frac{|x_m - \bar{x}_m|}{s_m} \quad (5)$$

veri setinin tamamındaki m adet en uç gözlem değerinin normal bir dağılımdan gelen aykırı değerler olup olmadıklarına karar vermek için kullanılan bir test istatistiğidir [5].

## 2.4. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı ortalama, standart sapma, çarpıklık vb. gibi istatistikî değerlerin kullanılmadan aykırı değerlerin tespit edilebilmesidir. Bunun en önemli nedeni ise bu istatistikî değerleri aykırı değerleri içinde barındıran veri setlerinden elde etmek zorunda oluşumuz ve aykırı değerlerin bu değerlerin çok yüksek ya da düşük çıkmasına sebebiyet vermesinden dolayı düzgün bir şekilde teşhis edilememesi sonucunu doğurmaktadır. Önerilen yöntemde ise bu istatistikî değerleri kullanmak zorunda kalmadan daha doğru bir şekilde aykırı değerlerin teşhis edilebilmesi mümkün olmaktadır. Önerilen metotta kullanılan istasyona ait m adet veri olduğunu varsayalım. Bu veriler ( $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ ) olacak şekilde küçükten büyüğe doğru sıralanır. En küçük veriye  $T = 1$ , en büyük veriye  $T = n$  olacak şekilde birer artan değerler verilir. En küçük veriden en büyük veriye kadar sırasıyla çalışmada geliştirilen (6) numaralı eşitlik yardımı ile  $\alpha$  değerleri hesaplanır.

$$\alpha = \frac{Q_m}{T_m \cdot \ln T_m} \quad (6)$$

Bulunan bu değerler yardımıyla  $\alpha$ -T grafikleri çizilir. Grafik üzerinden  $\alpha$  değerlerinin içinde  $\alpha_{\min}$  değerinin olduğu nokta bulunur ve bu noktadan sonra  $\alpha$  değerlerinin artış gösterdiği bir nokta mevcut ise  $\alpha_{\min}$  değerinin olduğu noktadan sonraki değerlerin aykırı değer oldukları kabul edilir. Bu noktadan sonra aykırı değer olarak kabul edilen noktalar için yeni  $\alpha$  değerleri (7) nolu eşitlik yardımı ile yeniden hesaplanarak grafiğin doğal eğimine uygun şekilde getirilir.

$$\alpha_{T_m} = \frac{\alpha_{\min} \cdot T_{\min}}{T_m} \quad (7)$$

Aykırı değer olarak kabul edilen bu noktaların düzeltilmiş değerleri çalışmada geliştirilen (8) numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanır ve grafiğin doğal eğimine uyacak şekilde yeniden hesaplanırlar. Yine aynı şekilde kullanılmış olan bu formül yardımıyla 50, 100, 1000 ve 10000 yıllık taşkınlar grafiğin doğal eğimine uyacak şekilde hesaplanabilmektedir.

$$Q_m = \alpha_{\min} \cdot T_m \cdot \ln T_m \quad (8)$$

Bu yöntem sayesinde veri içerisindeki aykırı değerler elimine edildiğinden taşkın frekans analiz sonuçlarındaki aykırı değerlerin etkilerinden doğan hatalar giderilmiş ve daha doğru sonuçlar elde edilmiş olur.

## 3. TAŞKIN FREKANS ANALİZİ

Taşkın frekans analizi, belirli bir periyotta, belirlenen bir debinin üzerindeki bir taşkın debisinin gelme olasılığının analizidir.

Taşkın frekans analizinde ele alınacak veriler homojen ve bağımsız olmalıdır. Homojenlik özelliği, bir serideki tüm gözlem değerlerinin aynı topluma ait olduğunu gösterir. Gelecekte

meydana gelecek hidrolojik olayların frekansının tahmininde homojenlik şartı, eldeki verilerin gelecekteki akımları temsil etmesini şart koşar. Bağımsızlık özelliği ise, bir hidrolojik olayda, örneğin bir tekil büyük fırtına sisteminin meydana getirdiği iki veya daha fazla taşkın piklerinden sadece bir tanesinin veri grubuna girmesidir [6].

Taşkın frekans analizi prosedürü, bölgedeki taşkın popülasyonunun uygun istatistikî dağılımının ve uygun parametre tahmin metodunun belirlenmesi ile ilgilidir. Taşkın frekans analiz yöntemleri üzerine yapılan son araştırmaların çoğu bir D/E yöntem terminolojisi içinde dağılım (D) ve tahmin (E) yöntemlerinin doğru seçimi üzerine yoğunlaşmıştır. Özel bir D/E yöntemi uygulanırken iki bileşen hesaba katılmalıdır: tanımlanabilirlik ve tahmin edilebilirlik [7]. Tanımlanabilirlik, seçilen istatistiksel veri karakteristiklerinin yeniden üretilmesi için bir dağılımın bulunması ile ilgilidir. Özellikle eğrilik ve kurtosis ölçümleri ile açıklanan yoğunluk şeklinin tanımlanması ile ilgilidir. Tahmin edilebilirlik ise, taşkın hesabındaki hatayı hesaplamak için kullanılan taraflılık ve ortalama korelasyon katsayısı hatasıyla ölçülebilecek doğrulukla ilgilidir [8].

Hem üst dağılımın dikkate alınması fikri hem de parametre tahmini prosedürü (D/E), yıllık maksimum taşkınlar için bir üst dağılımın belirlenmesinin mümkün olmadığı argümanına dayanır [9].

### **3.1. Noktasal Taşkın Frekans Analizi**

Belirli tekerrür aralığında meydana gelebilecek olan taşkın debisinin hesaplanması için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu O.Y.F. belirlenirken Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling ve Ki Kare gibi uyumun iyiliği testleri kullanılarak seçilen veri setine ait en uygun O.Y.F. belirlenir. Belirlenen en uygun O.Y.F. kullanılarak taşkın debileri hesaplanır.

### **3.2. L Momentlere Dayalı Taşkın Frekans Analizi**

Hosking tarafından 1990 yılında öne sürülen L momentler yöntemi parametre tahmini, bölgeselleştirme ve dağılım tanımlama ile ilgili çeşitli problemleri çözmeye yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. L momentler yöntemi olasılık ağırlıklı momentlerin doğrusal bileşimidir. Bu nedenle L momentler yöntemi ile hesaplamalar yapılırken kullanılan verilerin karesi ve küpü alınmamaktadır. Bu sayede elde edilen çarpıklık ve varyans katsayıları daha tarafsız bir şekilde hesaplanmaktadır ve hemen hemen normal dağılıma sahip olmaktadır [11]. L moment oranları, çarpıklık ve basıklık gibi parametrelerin hesabı aşağıdaki gibidir;

$$\text{Ortalama} = L_1$$

$$L\text{-Cv (Varyasyon Katsayısı)} (t_2):$$

$$t_2 = L_2 / L_1 \quad (9)$$

$$L\text{-Çarpıklık} (t_3):$$

$$t_3 = L_3 / L_2 \quad (10)$$

L-Basıklık ( $t_4$ ):

$$t_4=L_4/L_2 \quad (11)$$

Burada:

$$L_1=\beta_0 \quad (12)$$

$$L_2=2\beta_1-\beta_0 \quad (13)$$

$$L_3=6\beta_2-6\beta_1+\beta_0 \quad (14)$$

$$L_4=20\beta_3-30\beta_2+12\beta_1-\beta_0 \quad (15)$$

Burada veri ( $x_{1:n}$ ) 1 den  $n$ 'e kadar artan sıralı olacak şekilde sıralandığında:

$$\beta_0=n^{-1} \sum_{j=1}^n x_j \quad (16)$$

$$\beta_1=n^{-1} \sum_{j=2}^n x_j [(j-1)/(j-2)] \quad (17)$$

$$\beta_2=n^{-1} \sum_{j=3}^n x_j [(j-1)(j-2)/[(n-1)(n-2)]] \quad (18)$$

$$\beta_3=n^{-1} \sum_{j=4}^n x_j [(j-1)(j-2)(j-3)/[(n-1)(n-2)(n-3)]] \quad (19)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [12].

Yukarıda belirtilen eşitlikler yardımı ile hesaplanan L moment oranları kullanılarak x test programı kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar sırasıyla yapılmaktadır.

Seçilen her bir istasyon için uyumsuzluk ölçüsü  $D_i$  hesaplanmaktadır. Hesaplanan değerler seçilen istasyon sayısına bağlı olarak belirlenen kritik değerden büyük ise seçilen istasyonun uyumsuz olduğu belirlenir.

Frekans analizinde kullanılacak O.Y.F. ait parametreler bölgesel olarak hesaplanmaktadır.

Seçilen bölge için heterojenlik ölçüsü (H) hesaplanmaktadır. Hesaplanan  $H < 1$  ise kabul edilebilir düzeyde homojendir, eğer  $1 \leq H < 2$  ise muhtemelen heterojendir ve  $H > 2$  ise bölge kesinlikle heterojendir.

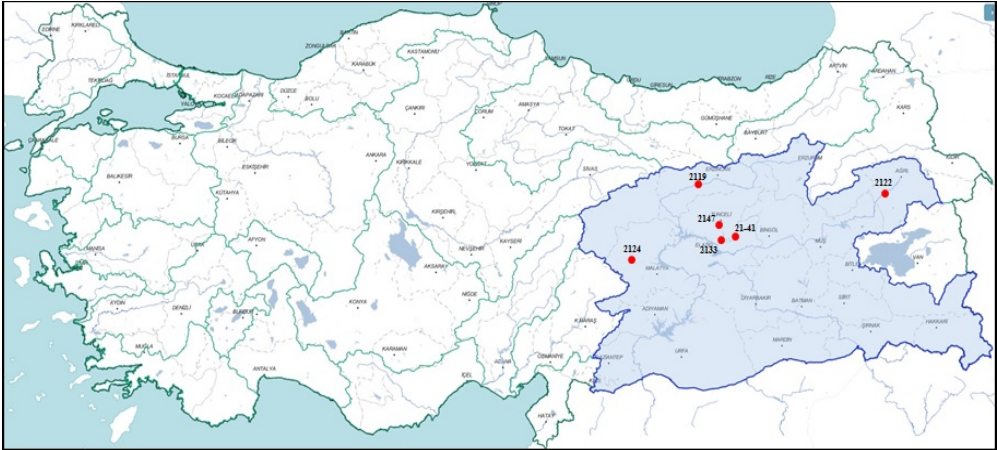
Belirlenen dağılımlar içinde en uygun dağılımın bulunabilmesi için dağılım uygunluk ölçüsü (Z) hesaplanmaktadır. Hesaplanan Z değerlerine bakılarak 1.68 değerine eşit veya küçük hesaplanan olasılık dağılım fonksiyonları en uygun dağılım olarak belirlenir[10-13].

#### 4. MATERYAL

Bu çalışmada materyal olarak Elektrik İşleri Etüd İdaresi'nin (EİEİ) ve Devlet Su İşleri'nin (DSİ) yıllara göre çıkarmış olduğu akım rasat yıllıklarındaki su yılı maksimum akım değerleri kullanılmıştır. Fırat havzasındaki 6 adet gözlem istasyonuna ait yıllık maksimum akış verilerinden faydalanılmıştır. Fırat havzasındaki istasyonlara ait bazı bilgiler tablo 1'de verilmiştir. Gözlem istasyonlarının coğrafi konumu şekil 1'de gösterilmektedir.

*Tablo 1. Fırat Havzasında Bulunan Gözlem İstasyonlarına Ait Bilgiler*

| İstasyon Adı   | No     | Suyun Adı   | Gözlem Süresi (yıl) | Yağış Alanı (km <sup>2</sup> ) | Kot (m) |
|----------------|--------|-------------|---------------------|--------------------------------|---------|
| Selenk Köprüsü | 21-041 | Perisuyu    | 22                  | 2062                           | 1154    |
| Kemah Boğazı   | 2119   | Fırat Nehri | 27                  | 10356                          | 1123    |
| Tutak          | 2122   | Murat Nehri | 31                  | 5882.4                         | 1552    |
| Yazıköy        | 2124   | Tohma Suyu  | 37                  | 1256.1                         | 1193    |
| Melekbahçe     | 2133   | Munzur Suyu | 31                  | 3284.8                         | 875     |
| Dedikuşağı     | 2147   | Munzur Suyu | 34                  | 875                            | 1195    |



*Şekil 1. Akım gözlem istasyonlarının coğrafi konumları*

## 5. UYGULAMA

Çalışmada kullanılan Fırat Havzasında bulunan gözlem istasyonlarına ait ortalama, standart sapma ve çarpıklık gibi istatistikî büyüklükler hem veri setleri aykırı değerlerin etkisi altında iken hem de veri setlerinde bulunan aykırı değerler önermiş olduğumuz yöntem ile grafiğin doğal eğimine uyacak şekilde belirlendikten sonra düzeltilen veri setleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Aykırı değerler veri setinde iken ve aykırı değerlerin etkisi giderildikten sonra hesaplanan istatistikî büyüklükler tablo 2'de gösterilmektedir.

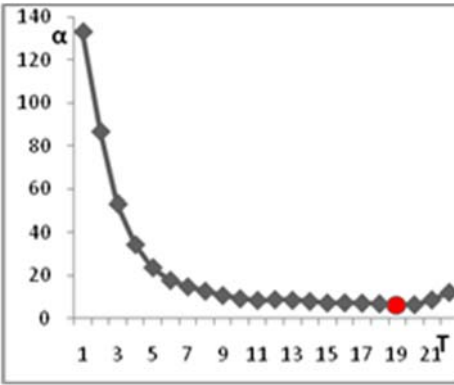
Tablo 2. Gözlem istasyonlarına ait Ortalama, Standart Sapma ve Çarpıklık Değerleri

| İstasyon Adı    | No     | Gözlem Süresi (yıl) | Ortalama | Standart Sapma | Çarpıklık |
|-----------------|--------|---------------------|----------|----------------|-----------|
| Selenk Köprüsü  | 21-041 | 22                  | 283.864  | 155.502        | 2.204     |
| Selenk Köprüsü* |        |                     | 263.084  | 100.240        | 0.768     |
| <b>Fark</b>     |        |                     | 20.780   | 55.262         | 1.436     |
| <b>Hata %</b>   |        |                     | 7.320    | 35.538         | 65.154    |
| Kemah Boğazı    | 2119   | 27                  | 485.007  | 203.459        | 1.424     |
| Kemah Boğazı*   |        |                     | 464.465  | 153.292        | 0.157     |
| <b>Fark</b>     |        |                     | 20.542   | 50.167         | 1.267     |
| <b>Hata %</b>   |        |                     | 4.235    | 24.657         | 88.975    |
| Tutak           | 2122   | 31                  | 543.516  | 210.997        | 0.303     |
| Tutak*          |        |                     | 537.411  | 202.246        | 0.230     |
| <b>Fark</b>     |        |                     | 6.105    | 8.751          | 0.073     |
| <b>Hata %</b>   |        |                     | 1.123    | 4.147          | 24.092    |
| Yazıköy         | 2124   | 37                  | 46.481   | 21.605         | 0.264     |
| Yazıköy*        |        |                     | 45.404   | 19.271         | 0.140     |
| <b>Fark</b>     |        |                     | 1.077    | 2.334          | 0.124     |
| <b>Hata %</b>   |        |                     | 2.317    | 10.803         | 46.970    |
| Melekbahçe      | 2133   | 31                  | 547.129  | 220.381        | 0.867     |
| Melekbahçe*     |        |                     | 535.376  | 190.360        | 0.057     |
| <b>Fark</b>     |        |                     | 11.753   | 30.021         | 0.81      |
| <b>Hata %</b>   |        |                     | 2.148    | 13.622         | 93.426    |
| Dedikuşağı      | 2147   | 34                  | 167.177  | 58.761         | 0.660     |
| Dedikuşağı*     |        |                     | 164.810  | 52.768         | 0.046     |
| <b>Fark</b>     |        |                     | 2.367    | 5.993          | 0.614     |
| <b>Hata %</b>   |        |                     | 1.416    | 10.199         | 93.030    |

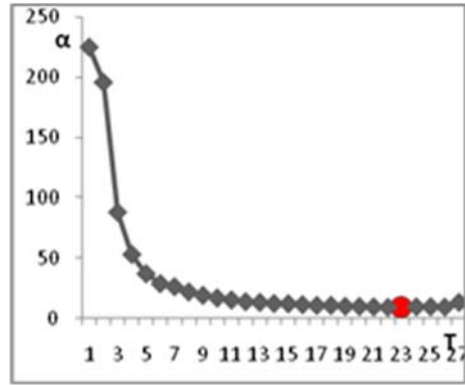
\* ile gösterilenler aykırı değerler önerilen yöntemle çıkarıldıktan sonra hesaplanan değerleri göstermektedir.

Tablo 2'den de görülebileceği gibi aykırı değerler önerilen yöntemle grafiğin doğal eğimine uyacak şekilde yeniden hesaplandığında veri setine ait istatistiki büyüklüklerde belirgin bir düşüş meydana gelmektedir. Bu nedenle yapılacak olan hesaplamalarda aykırı değerlerin etkisinin göz ardı edilmesi yanlış sonuçlara ve yorumlara neden olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla ortalama, standart sapma ve çarpıklık gibi istatistiki büyüklükler yardımı ile aykırı değerleri teşhis için kullanılan yöntemlerde sonuçların ve yorumların hatalı olmasına yol açabilirler.

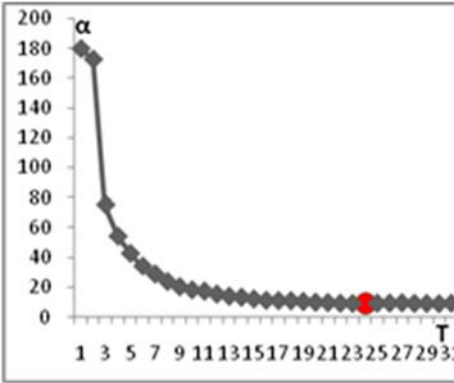
Önerilen yöntemle hesap yapılması durumunda ise çizilen  $\alpha$ -T grafiklerinde  $\alpha_{\min}$  değerinden sonraki değerlerin aykırı davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Aşağıdaki şekillerde verilerini kullanmış olan istasyonların  $\alpha$ -T grafikleri ve bu grafik üzerinde  $\alpha_{\min}$  değerleri ve aykırı değerlerin hangi veriler olduğu gösterilmiştir.



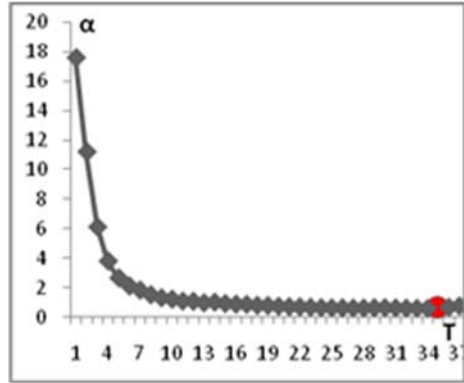
Şekil 2. Fırat 2119 nolu istasyonu önerilen yöntem için  $\alpha$ -T diyagramı



Şekil 3. Fırat 21-041 nolu istasyonu önerilen yöntem için  $\alpha$ -T diyagramı

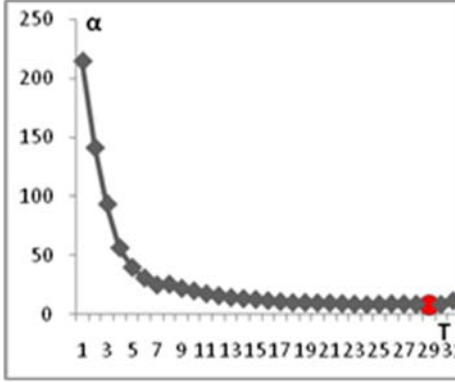


Şekil 4. Fırat 2122 nolu istasyonu önerilen yöntem için  $\alpha$ -T diyagramı

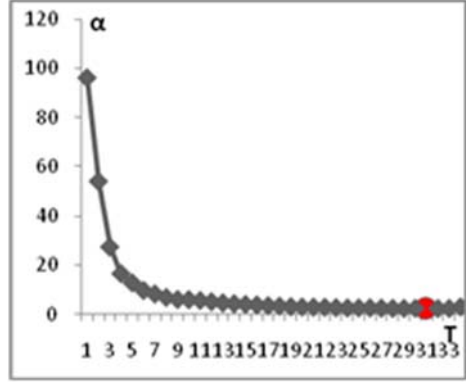


Şekil 5. Fırat 2124 nolu istasyonu önerilen yöntem için  $\alpha$ -T diyagramı





Şekil 6. Fırat 2133 nolu istasyonu önerilen yöntem için  $\alpha$ - $T$  diyagramı



Şekil 7. Fırat 2147 nolu istasyonu önerilen yöntem için  $\alpha$ - $T$  diyagramı

Yukarıda verilen  $\alpha - T$  grafikleri incelendiğinde Fırat 21-041 nolu istasyon için  $\alpha_{\min}$  19 nolu ölçümde, Fırat 2119 nolu istasyon için  $\alpha_{\min}$  23 nolu ölçümde, Fırat 2122 nolu istasyon için  $\alpha_{\min}$  24 nolu ölçümde, Fırat 2124 nolu istasyon için  $\alpha_{\min}$  35 nolu ölçümde, Fırat 2133 nolu istasyon için  $\alpha_{\min}$  29 nolu ölçümde, Fırat 2147 nolu istasyon için  $\alpha_{\min}$  31 nolu ölçümde bulunmuştur. Bu noktalardan sonraki değerlerin aykırı değer olduğu kabul edilmiştir.

Aykırı değer olarak davrandığı kabul edilen bu değerler önerilen (7) numaralı eşitlik yardımı ile düzeltilerek grafiğin doğal eğimine uygun forma getirilmektedir. Aynı şekilde grafiğin doğal eğimine uygun bir şekilde uzatılması sonucu 50, 100, 1000 ve 10000 yılda gelecek olan taşkın debileri de aykırı değerlerin etkisinden arındırılmış bir biçimde hesaplanmaktadır.

Aşağıda Fırat havzası üzerinde bulunan gözlem istasyonlarına ait veriler kullanılarak taşkın debilerinin hesabı hem önerilen yöntem ile hem de bu verilere en uygun olan olasılık dağılım fonksiyonları yardımı ile hesaplanmıştır. En uygun olasılık dağılım fonksiyonları belirlenirken Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling ve Ki Kare uyumun iyiliği testleri sonucu en uygun ilk üç olasılık dağılım fonksiyon sonuçlarına yer verilmiştir.

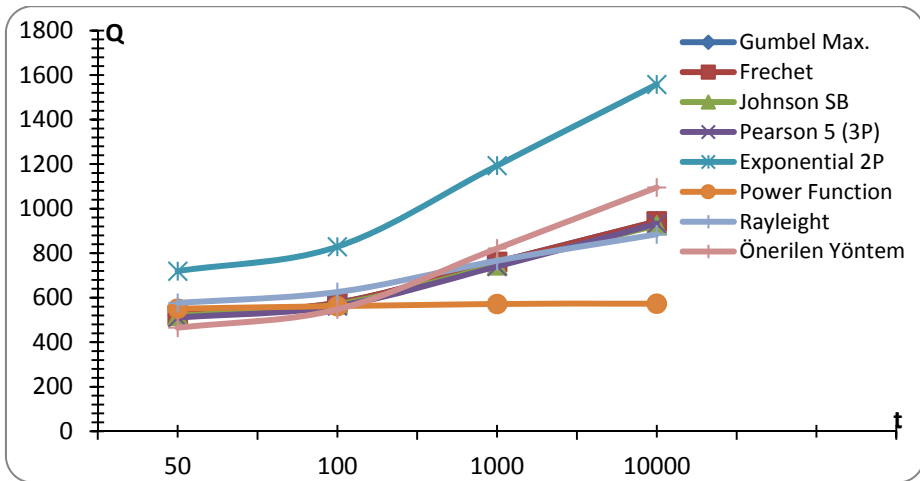
Seçilen istasyonlar için aykırı değerler veri setlerinden çıkarıldıktan sonra 61 adet olasılık yoğunluk fonksiyonu içerisinde Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling ve Ki Kare uyumun iyiliği testlerine göre en uygun dağılımlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Tablo 3. 21-041 nolu istasyon için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonları

| O.Y.F.           | Kolmogorov Smirnov | Anderson Darling | Ki-Kare |
|------------------|--------------------|------------------|---------|
| GumbelMax.       | 1                  | 3                | 36      |
| Frechet (3P)     | 2                  | 2                | 39      |
| Johnson SB       | 3                  | 5                | 35      |
| Pearson 5 (3P)   | 14                 | 1                | 38      |
| Exponential (2P) | 47                 | 44               | 1       |
| PowerFunction    | 48                 | 45               | 2       |
| Rayleigh         | 38                 | 36               | 3       |

Tablo 4. Fırat 21-041 nolu istasyon için uygunluk test sonuçlarının analiz sonuçları ve önerilen yöntem değerleri

|                  | Q <sub>50</sub> | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
|------------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| GumbelMax.       | 521.85          | 577.19           | 760.04            | 942.58              |
| Frechet (3P)     | 522.35          | 577.65           | 760.4             | 942.82              |
| Johnson SB       | 518.13          | 570.84           | 745.81            | 925.37              |
| Pearson 5 (3P)   | 510.7           | 562.83           | 740.7             | 932.58              |
| Exponential (2P) | 719.4           | 829.15           | 1193.7            | 1558.3              |
| PowerFunction    | 551.12          | 562.03           | 571.98            | 572.98              |
| Rayleigh         | 576.55          | 625.54           | 766.13            | 884.65              |
| Önerilen Yöntem  | 465.0           | 547.4            | 821.1             | 1094.8              |



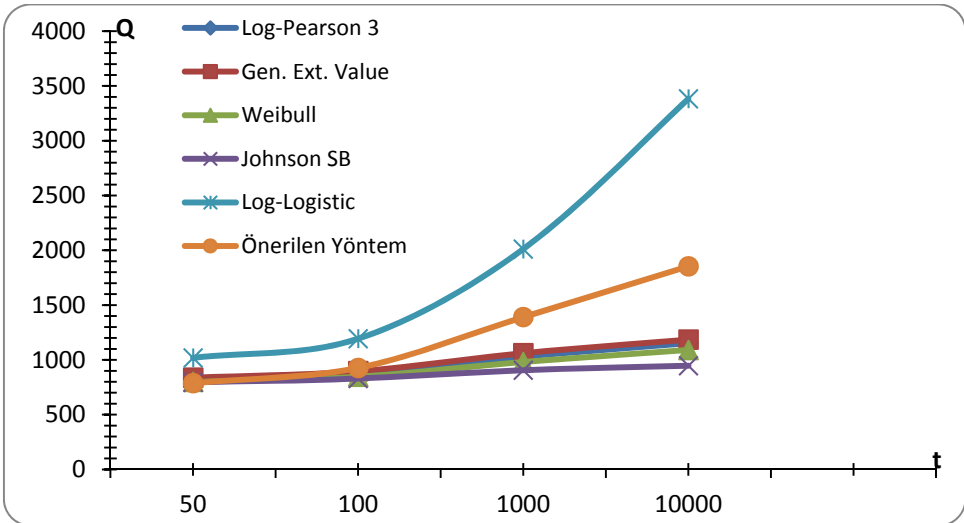
Şekil 8. Fırat 21-041 nolu istasyon için Q-T grafiği

Tablo 5. 2119 nolu istasyon için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonları

| O.Y.F.          | Kolmogorov Smirnov | Anderson Darling | Ki-Kare |
|-----------------|--------------------|------------------|---------|
| Log- Pearson 3  | 1                  | 2                | 1       |
| Gen. Ext. Value | 2                  | 1                | 10      |
| Weibull (3P)    | 3                  | 7                | 25      |
| Johnson SB      | 4                  | 3                | 2       |
| Log-Logistic    | 29                 | 31               | 3       |

Tablo 6. Fırat 2119 nolu istasyon için uygunluk test sonuçlarının analiz sonuçları ve önerilen yöntem değerleri

|                 | Q <sub>50</sub> | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Log- Pearson 3  | 821.69          | 876.25           | 1029.3            | 1151.9              |
| Gen. Ext. Value | 837.11          | 896.68           | 1061              | 1184.7              |
| Weibull (3P)    | 798.62          | 846.52           | 980.63            | 1090.5              |
| Johnson SB      | 795.45          | 830.12           | 905.52            | 946.6               |
| Log-Logistic    | 1018.3          | 1193.5           | 2011.1            | 3382.6              |
| Önerilen Yöntem | 787.3           | 926.8            | 1390.2            | 1853.5              |



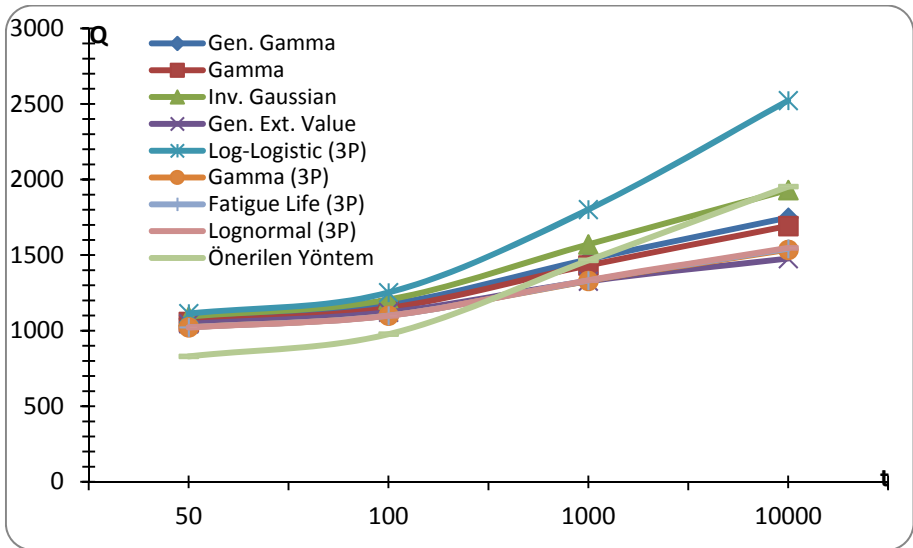
Şekil 9. Fırat 2119 nolu istasyon için Q-T grafiği

Tablo 7. 2122 nolu istasyon için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonları

| O.Y.F.            | Kolmogorov Smirnov | Anderson Darling | Ki-Kare |
|-------------------|--------------------|------------------|---------|
| Gen. Gamma        | 1                  | 9                | 7       |
| Gamma             | 2                  | 14               | 16      |
| Inv. Gaussian     | 3                  | 32               | 12      |
| Gen. Ext. Value   | 7                  | 1                | 29      |
| Log-Logistic (3P) | 9                  | 2                | 1       |
| Gamma (3P)        | 12                 | 3                | 27      |
| Fatigue Life (3P) | 13                 | 4                | 2       |
| Lognormal (3P)    | 14                 | 5                | 3       |

Tablo 8. Fırat 2122 nolu istasyon için uygunluk test sonuçlarının analiz sonuçları ve önerilen yöntem değerleri

|                   | Q <sub>50</sub> | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Gen. Gamma        | 1078.4          | 1174.4           | 1471.4            | 1747.9              |
| Gamma             | 1058.8          | 1150.2           | 1431.9            | 1692.9              |
| Inv. Gaussian     | 1093.4          | 1205.7           | 1571              | 1931.4              |
| Gen. Ext. Value   | 1045.6          | 1121.9           | 1327.6            | 1477.2              |
| Log-Logistic (3P) | 1113.3          | 1252.4           | 1801.5            | 2522.3              |
| Gamma (3P)        | 1022.8          | 1099.7           | 1329.7            | 1535.3              |
| Fatigue Life (3P) | 1022.2          | 1099.5           | 1332.1            | 1542                |
| Lognormal (3P)    | 1021.3          | 1098.8           | 1333.7            | 1548                |
| Önerilen Yöntem   | 829.7           | 976.7            | 1465              | 1953.3              |



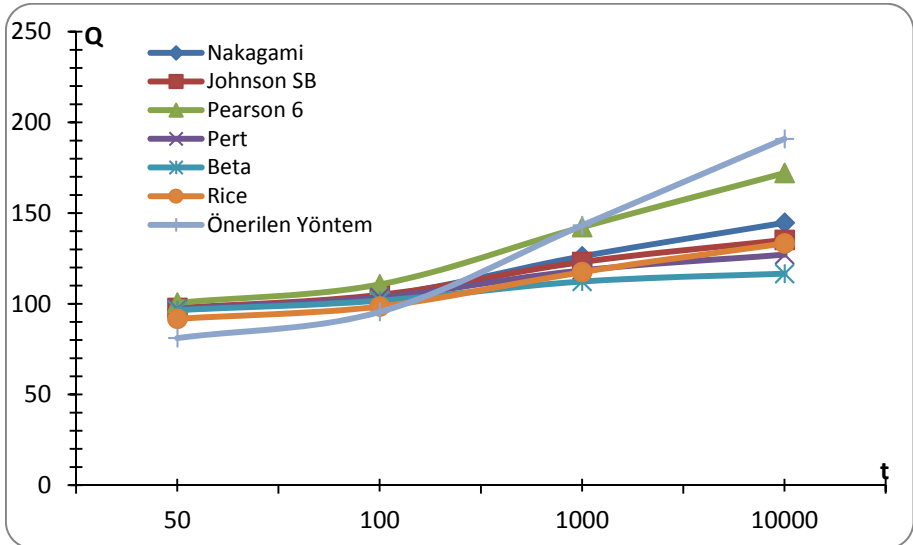
Şekil 10. Fırat 2122 nolu istasyon için Q-T grafiği

Tablo 9. 2124 nolu istasyon için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonları

| O.Y.F.     | Kolmogorov Smirnov | Anderson Darling | Ki-Kare |
|------------|--------------------|------------------|---------|
| Nakagami   | 1                  | 3                | 15      |
| Johnson SB | 2                  | 1                | 22      |
| Pearson 6  | 3                  | 12               | 32      |
| Pert       | 8                  | 2                | 1       |
| Beta       | 20                 | 4                | 2       |
| Rice       | 10                 | 24               | 3       |

Tablo 10. Fırat 2124 nolu istasyon için uygunluk test sonuçlarının analiz sonuçları ve önerilen yöntem değerleri

|                 | Q <sub>50</sub> | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Nakagami        | 96.58           | 104.23           | 126.16            | 144.66              |
| Johnson SB      | 97.69           | 104.88           | 123.05            | 135.22              |
| Pearson 6       | 100.59          | 110.69           | 142.3             | 172.06              |
| Pert            | 97.135          | 103.58           | 118.5             | 127.07              |
| Beta            | 96.563          | 101.72           | 112.03            | 116.63              |
| Rice            | 91.751          | 98.473           | 117.5             | 133.3               |
| Önerilen Yöntem | 81.1            | 95.5             | 143.2             | 190.9               |



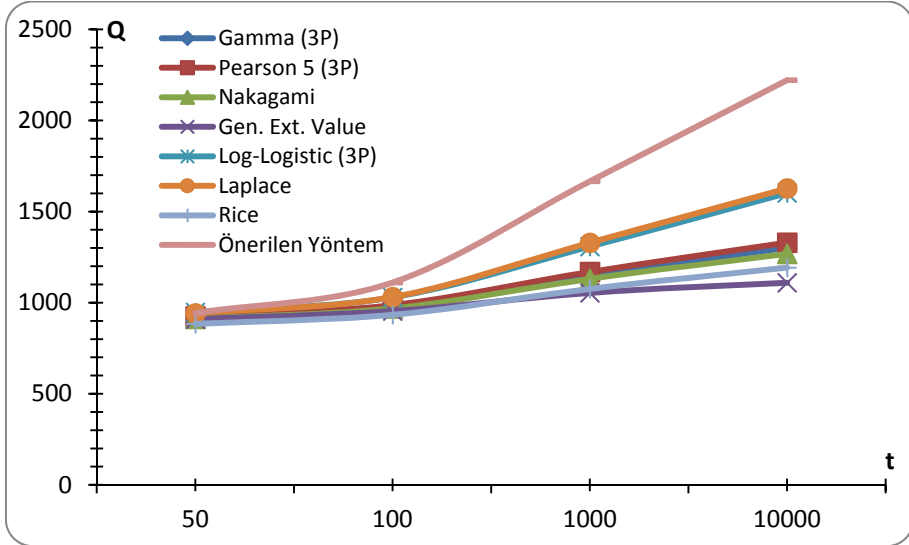
Şekil 11. Fırat 2124 nolu istasyon için Q-T grafiği

Tablo 11. 2133 nolu istasyon için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonları

| O.Y.F.            | Kolmogorov Smirnov | Anderson Darling | Ki-Kare |
|-------------------|--------------------|------------------|---------|
| Gamma (3P)        | 1                  | 2                | 11      |
| Pearson 5 (3P)    | 2                  | 14               | 10      |
| Nakagami          | 3                  | 19               | 20      |
| Gen. Ext. Value   | 7                  | 1                | 3       |
| Log-Logistic (3P) | 5                  | 3                | 17      |
| Laplace           | 24                 | 27               | 2       |
| Rice              | 29                 | 24               | 1       |

Tablo 12. Fırat 2133 nolu istasyon için uygunluk test sonuçlarının analiz sonuçları ve önerilen yöntem değerleri

|                   | Q <sub>50</sub> | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Gamma (3P)        | 922.86          | 981.67           | 1152.8            | 1300.9              |
| Pearson 5 (3P)    | 925.05          | 986.62           | 1168.6            | 1329.7              |
| Nakagami          | 911.8           | 968.46           | 1130.9            | 1268                |
| Gen. Ext. Value   | 910.13          | 953.82           | 1053.9            | 1109.6              |
| Log-Logistic (3P) | 947.46          | 1029.1           | 1307.7            | 1601.7              |
| Laplace           | 941.08          | 1030.8           | 1329              | 1627.1              |
| Rice              | 883.14          | 933.6            | 1075.5            | 1192.9              |
| Önerilen Yöntem   | 943.4           | 1110.5           | 1665.8            | 2221                |



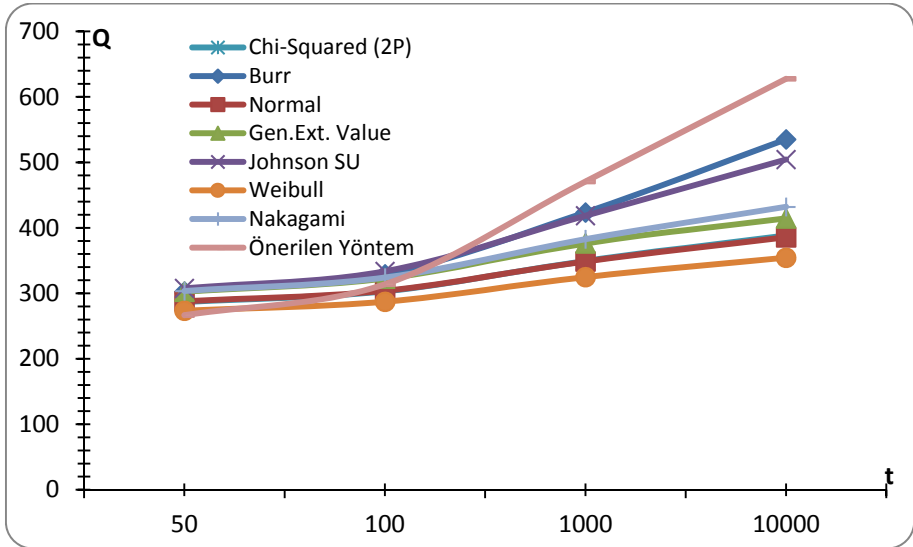
Şekil 12. Fırat 2133 nolu istasyon için Q-T grafiği

Tablo 13. 2147 nolu istasyon için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonları

| O.Y.F.         | KolmogorovSmirnov | AndersonDarling | Ki-Kare |
|----------------|-------------------|-----------------|---------|
| Ki Kare (2P)   | 1                 | 4               | 7       |
| Burr           | 2                 | 1               | 26      |
| Normal         | 3                 | 14              | 3       |
| Gen.Ext. Value | 6                 | 2               | 10      |
| Johnson SU     | 4                 | 3               | 11      |
| Weibull        | 8                 | 24              | 1       |
| Nakagami       | 19                | 10              | 2       |

Tablo 14. Fırat 2147 nolu istasyon için uygunluk test sonuçlarının analiz sonuçları ve önerilen yöntem değerleri

|                 | Q <sub>50</sub> | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Ki Kare (2P)    | 286.64          | 303.01           | 349.45            | 388.27              |
| Burr            | 302.83          | 329.28           | 423.63            | 535.09              |
| Normal          | 287.86          | 303.87           | 348.76            | 385.71              |
| Gen.Ext. Value  | 302.43          | 322.56           | 376.23            | 414.54              |
| Johnson SU      | 307.56          | 333.61           | 418.54            | 504.39              |
| Weibull         | 273.35          | 287.22           | 324.83            | 354.46              |
| Nakagami        | 303.61          | 324.05           | 382.66            | 432.13              |
| Önerilen Yöntem | 266.6           | 313.8            | 470.7             | 627.6               |



Şekil 13. Fırat 2147 nolu istasyon için Q-T grafiği

### 5.1. L Momentlere Dayalı Bölgesel Taşkın Frekans Analizi Sonuçları

Çalışmada Fırat havzası üzerinde seçilmiş olan 6 adet istasyona ait veriler kullanılarak bu istasyonlara ait ortalama debi ( $Q_{ort}$ ), L moment oranları ve uyumsuzluk ölçüsü  $D_i$  hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15. Fırat Havzasındaki istasyonlara ait L-moment oranları ve Uyumsuzluk Ölçüsü Değerleri

| İstasyon No                 | N gözlem süresi (yıl) | $Q_{ort}$ | $t_2$  | $t_3$  | $t_4$  | $D_i$ |
|-----------------------------|-----------------------|-----------|--------|--------|--------|-------|
| 2141                        | 21                    | 258.33    | 0.2157 | 0.1787 | 0.1783 | 1.43  |
| 2119                        | 26                    | 459.08    | 0.1958 | 0.0937 | 0.0844 | 1.62  |
| 2122                        | 31                    | 543.52    | 0.2233 | 0.0846 | 0.1110 | 0.07  |
| 2124                        | 37                    | 46.48     | 0.2643 | 0.1187 | 0.0874 | 1.43  |
| 2133                        | 30                    | 524.30    | 0.2010 | 0.0174 | 0.1189 | 1.07  |
| 2147                        | 34                    | 167.18    | 0.1973 | 0.0797 | 0.1457 | 0.37  |
| Ağırlıklı Bölgesel Ortalama |                       |           | 0.2182 | 0.0918 | 0.1181 |       |

Hesaplanan uyumsuzluk ölçüsü değerleri incelendiğinde kritik  $D_i$  değeri olan 1.648 değerinden küçük çıktığından dolayı seçilen tüm istasyonların birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Bölgeye ait heterojenlik ölçüsü değerleri X test programı yardımı ile hesap edilmiştir. Hesaplanan değerler tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Fırat Havzası için hesaplanan Heterojenlik Ölçüsü Değerleri

|   |        |
|---|--------|
| Gözlenen değerlerin grup L-Cv lerin standart sapması                    | 0.0255 |
| Grup L-Cvlerinin standart sapmasının simülasyon ortalamaları            | 0.0244 |
| Grup L-Cvlerinin standart sapmasının simülasyonlarının standart sapması | 0.0081 |
| Standart test değeri H(1)   | 0.14   |
| Gözlenmiş ortalamaların L-Cv/L-skew mesafesi                            | 0.0434 |
| Ortalama L-Cv/ L-skew mesafesinin simülasyon ortalaması                 | 0.0658 |
| Ortalama L-Cv/L-skew(Cs) mesafesinin simülasyon standart sapması        | 0.0185 |
| Standart test değeri H(2)   | -1.21  |
| Gözlenmiş ortalamanın L-CV/L-kurt(Ck) mesafesi                          | 0.0457 |
| Ortalama L-Cv/ L-kurt mesafesinin simülasyon ortalaması                 | 0.0821 |
| Ortalama L-Cv/L-kurt mesafesinin simülasyon standart sapması            | 0.0199 |
| Standart test değeri H(3)   | -1.83  |



Hesaplanan  $H_1$  değerleri incelendiğinde hesaplanan değerlerin 1 değerinden küçük olduğu ve bölgenin homojen olduğu söylenebilir.  $H_2$  ve  $H_3$  değerleri 2 değerinden küçük olduğundan bölge muhtemelen heterojen sonucu çıkmaktadır. Hosking ve Wallis (1993),  $H_1$ 'in homojen ve heterojen bölgelerin ayırımında daha güçlü olduğunu öne sürmüşlerdir[10].Bu nedenle bölge homojen kabul edilerek hesaplamalara devam edilmiştir. Ayrıca seçilen istasyonlar için uyumun iyiliği testi sonucu beş adet olasılık dağılım fonksiyonu için L-basıklık ve Z değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Uyumun iyiliği test sonuçları

| Olasılık Dağılım Fonksiyonu | L-Basıklık | Z değeri |
|-----------------------------|------------|----------|
| Gen. Logistic               | 0.174      | 2.30     |
| Gen. Extreme Value          | 0.124      | 0.29*    |
| Log. Normal                 | 0.129      | 0.50*    |
| PearsonType III             | 0.125      | 0.32*    |
| Gen. Pareto                 | 0.026      | -3.70    |

Hesaplanan Z değerlerine bakılarak 1.68 değerine eşit veya küçük hesaplanan olasılık dağılım fonksiyonları en uygun dağılım olarak belirlenmiştir. Hesaplanan Z değerlerine göre Gen. Extreme Value, Log. Normal ve Pearson Type III dağılımları % 90 anlamlılık seviyesinde en uygun dağılım olarak belirlenmiştir.

Belirlenen dağılımlara ait parametrelerin yanı sıra Wakeby dağılımına ait parametreler L momentler yöntemi ile belirlenmiş ve hesaplanan parametreler tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18. %90 seviyesinde kabul edilen dağılımlara ait parametrelerin tahmini

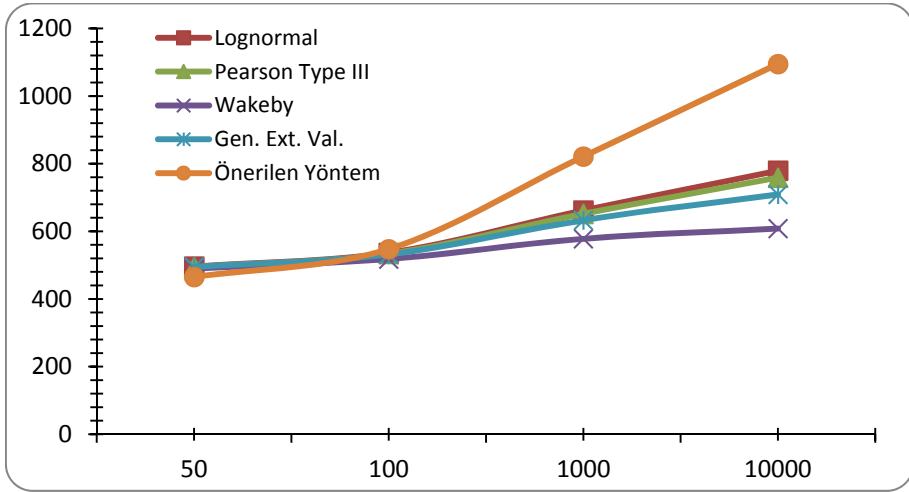
| O.Y.F.          | Parametreler |          |          |          |          |
|-----------------|--------------|----------|----------|----------|----------|
|                 | $\xi$        | $\alpha$ | $k$      |          |          |
| Gen. Ext. Val.  | 0.837        | 0.349    | 0.125    |          |          |
| Log. Normal     | 0.964        | 0.381    | -0.188   |          |          |
| Pears. Type III | $\mu$        | $\sigma$ | $\gamma$ |          |          |
|                 | 1.000        | 0.391    | 0.562    |          |          |
| Wakeby          | $\xi$        | $\alpha$ | $\beta$  | $\gamma$ | $\Delta$ |
|                 | 0.317        | 1.666    | 3.904    | 0.390    | -0.136   |

$\xi$ : konum parametresi,  $\alpha$ : ölçek parametresi,  $k$ : şekil parametresi,  $\mu$ : konum parametresi,  $\sigma$ : ölçek parametresi,  $\gamma$ : şekil parametresi

Hesaplanan parametreler yardımıyla seçilen dağılımlar kullanılarak 50, 100, 1000 ve 10000 yıl tekerrür aralıkları için taşkın debileri hesap edilmiştir. Her bir istasyon için hesaplanan değerler aşağıda verilmiştir.

Tablo 19. Fırat 21-041 nolu istasyon için hesaplanan bölgesel taşkın debileri

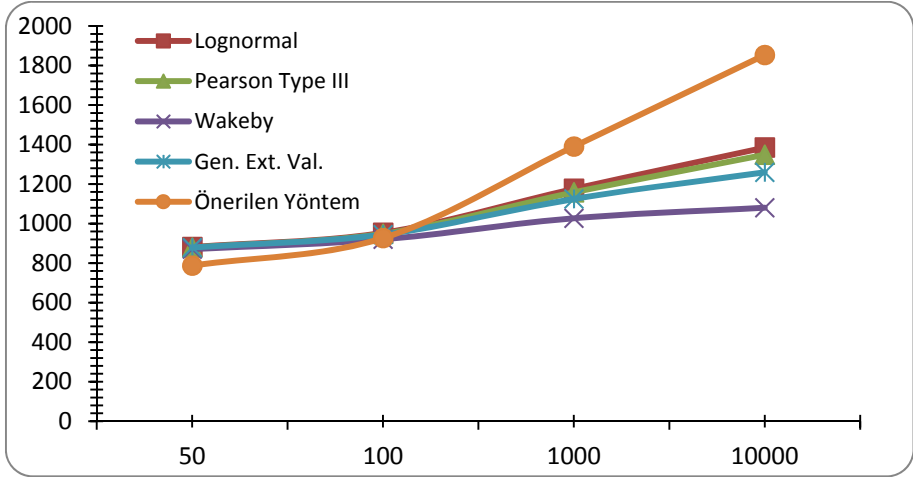
|                 | Tekerrür Aralığı (Yıl) |                  |                   |                     |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                 | Q <sub>50</sub>        | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
| Gen. Ext. Val.  | 494.60                 | 531.56           | 633.03            | 708.89              |
| Log. Normal     | 495.84                 | 536.38           | 661.72            | 779.31              |
| PearsonType III | 494.54                 | 533.66           | 651.88            | 758.86              |
| Wakeby          | 490.15                 | 518.05           | 578.08            | 608.02              |
| Önerilen Yöntem | 465                    | 547.40           | 821.1             | 1094.8              |



Şekil 14. Fırat 21-041 nolu istasyon için Q-t grafiği

Tablo 20. Fırat 2119 nolu istasyon için hesaplanan bölgesel taşkın debileri

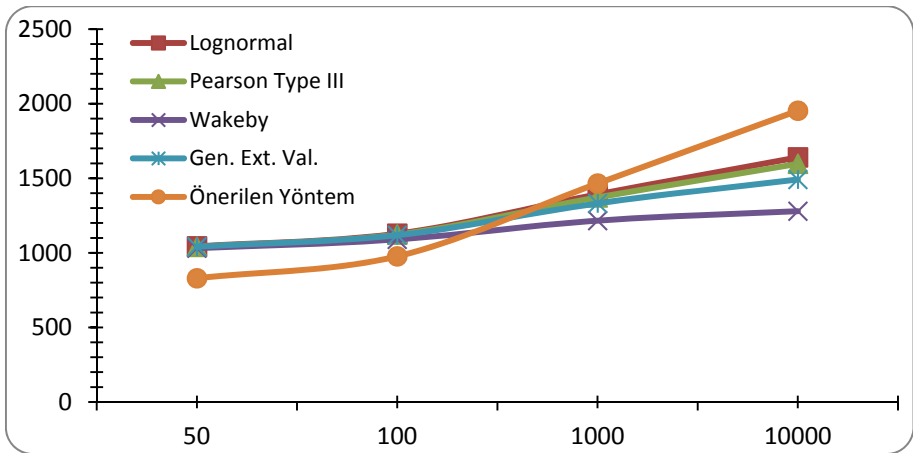
|                 | Tekerrür Aralığı (Yıl) |                  |                   |                     |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                 | Q <sub>50</sub>        | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
| Gen. Ext. Val.  | 878.95                 | 944.63           | 1124.95           | 1259.76             |
| Log. Normal     | 881.15                 | 953.20           | 1175.94           | 1384.92             |
| PearsonType III | 878.84                 | 948.38           | 1158.45           | 1348.58             |
| Wakeby          | 871.01                 | 920.62           | 1027.31           | 1080.52             |
| Önerilen Yöntem | 787.30                 | 926.80           | 1390.20           | 1853.50             |



Şekil 15. Fırat 2119 nolu istasyon için Q-t grafiği

Tablo 21. Fırat 2122 nolu istasyon için hesaplanan bölgesel taşkın debileri

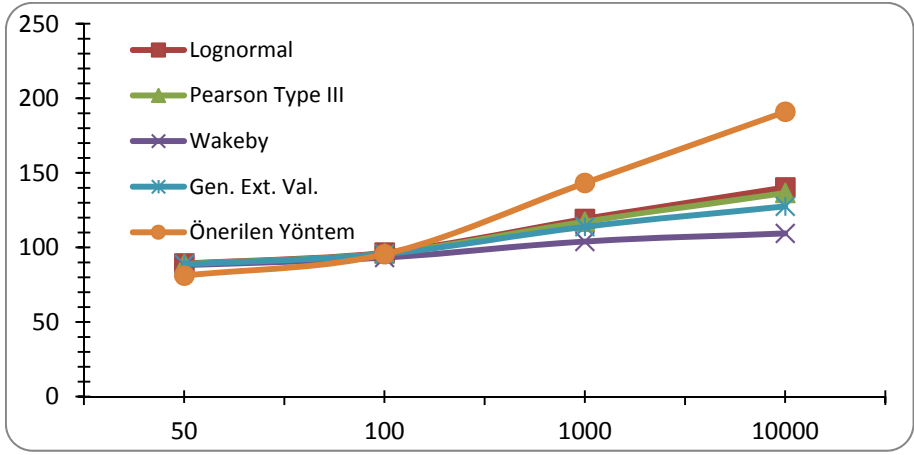
|                 | Tekerrür Aralığı (Yıl) |                  |                   |                     |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                 | Q <sub>50</sub>        | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
| Gen. Ext. Val.  | 1040.60                | 1118.36          | 1331.84           | 1491.45             |
| Log. Normal     | 1043.21                | 1128.50          | 1392.21           | 1639.62             |
| PearsonType III | 1040.47                | 1122.79          | 1371.50           | 1596.60             |
| Wakeby          | 1031.24                | 1089.94          | 1216.24           | 1279.24             |
| Önerilen Yöntem | 829.7                  | 976.7            | 1465              | 1953.3              |



Şekil 16. Fırat 2122 nolu istasyon için Q-t grafiği

Tablo 22. Fırat 2124 nolu istasyon için hesaplanan bölgesel taşkın debileri

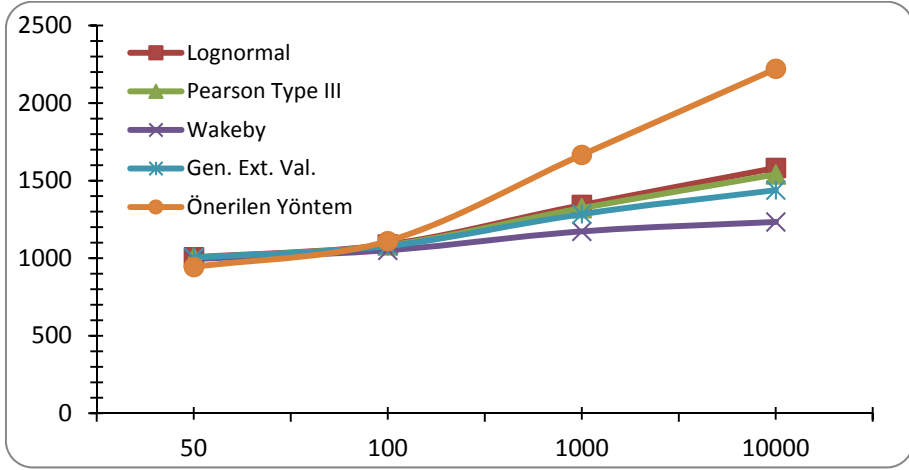
|                 | Tekerrür Aralığı (Yıl) |                  |                   |                     |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                 | Q <sub>50</sub>        | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
| Gen. Ext. Val.  | 88.69                  | 95.64            | 113.90            | 127.55              |
| Log. Normal     | 89.21                  | 96.51            | 119.06            | 140.22              |
| PearsonType III | 88.98                  | 96.02            | 117.29            | 136.54              |
| Wakeby          | 88.19                  | 93.21            | 104.01            | 109.40              |
| Önerilen Yöntem | 81.1                   | 95.5             | 143.2             | 190.9               |



Şekil 17. Fırat 2124 nolu istasyon için Q-t grafiği

Tablo 23. Fırat 2133 nolu istasyon için hesaplanan bölgesel taşkın debileri

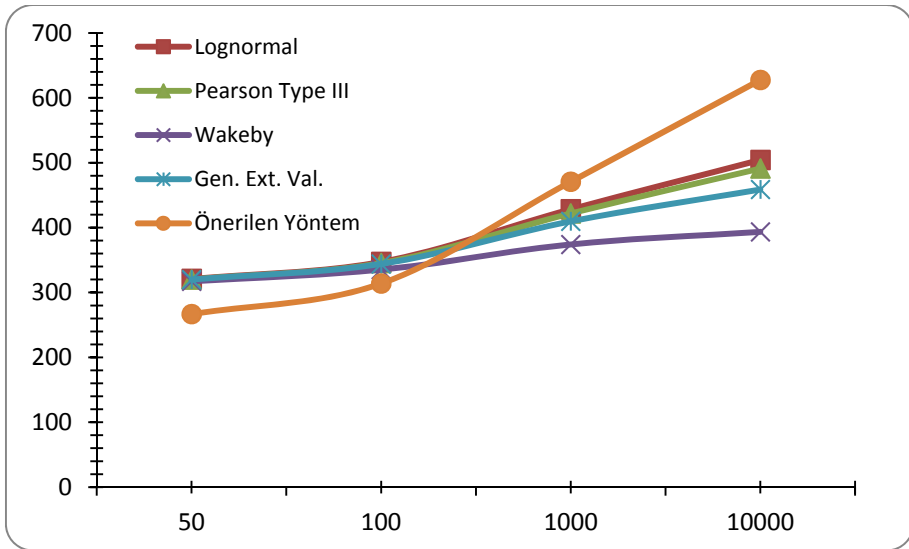
|                 | Tekerrür Aralığı (Yıl) |                  |                   |                     |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                 | Q <sub>50</sub>        | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
| Gen. Ext. Val.  | 1003.81                | 1078.82          | 1284.75           | 1438.72             |
| Log. Normal     | 1006.32                | 1088.60          | 1342.99           | 1581.65             |
| PearsonType III | 1003.68                | 1083.10          | 1323.01           | 1540.15             |
| Wakeby          | 994.78                 | 1051.40          | 1173.24           | 1234.01             |
| Önerilen Yöntem | 943.4                  | 1110.5           | 1665.8            | 2221                |



Şekil 18. Fırat 2133 nolu istasyon için Q-t grafiği

Tablo 24. Fırat 2147 nolu istasyon için hesaplanan bölgesel taşkın debileri

|                 | Tekerrür Aralığı (Yıl) |                  |                   |                     |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|
|                 | Q <sub>50</sub>        | Q <sub>100</sub> | Q <sub>1000</sub> | Q <sub>10.000</sub> |
| Gen. Ext. Val.  | 320.07                 | 343.99           | 409.65            | 458.74              |
| Log. Normal     | 320.87                 | 347.11           | 428.22            | 504.32              |
| PearsonType III | 320.03                 | 345.35           | 421.85            | 491.09              |
| Wakeby          | 317.19                 | 335.25           | 374.10            | 393.47              |
| Önerilen Yöntem | 266.7                  | 313.8            | 470.7             | 627.6               |



Şekil 19. Fırat 2147 nolu istasyon için Q-t grafiği

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Fırat havzası üzerinde bulunan 6 adet gözlem istasyonuna ait veriler kullanılmıştır. Bu veriler içerisindeki aykırı değerler hem Dixon Thompson hem de çalışmada önerilen yöntem kullanılarak tespit edilmiştir. Aykırı değerlerin etkisi olmaksızın 50, 100, 1000 ve 10000 yılda gelecek maksimum taşkın Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling ve Ki Kare uyumun iyiliği testleri sayesinde kullanmış olduğumuz veri setlerine en uygun olan olasılık dağılım fonksiyonları belirlenmiş ve taşkın debileri bu olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak, L momentlere dayalı bölgesel olarak belirlenen OYF parametreleri kullanılarakve önerilen yöntemle çizilen  $\alpha$ -T diyagramlarının doğal eğimine uyacak şekilde ayrı ayrı hesap edilmiştir.. Hesap edilen değerler incelendiğinde özellikle aykırı değerler belirlenip veri setlerinde çıkarıldıktan sonra hesap edilen taşkın debileri L momentler yönteminde oldukça düşük hesap edilmiştir. L momentler yöntemi ile hesap edilen 50 yıl ve 10000 yılda bir gelebilecek olan taşkın debileri arasındaki farkın çok az olduğu ve bu hesaplanan sonuçların su yapılarının tasarım debisi olarak kullanılmasının sakıncalı olabileceği düşünülmektedir. Noktasal olarak belirlenen taşkın debileri incelendiğinde ise 50 ve 100 yıl gibi kısa dönemlerde gelebilecek debilerin önermiş olduğumuz yöntemle kıyasla daha yüksek hesaplandığı, buna karşın daha uzun dönemler 1000 ve 10000 yıl göz önüne alındığında hesaplanan taşkın debilerinin önermiş olduğumuz yöntemle göre bazı istasyonlarda daha küçük hesaplanırken bazı istasyonlarda ise yakın sonuçlarda hesaplandığı görülmüştür.

Bütün bu sonuçlar incelendiğinde L momentler yöntemi ile yapılan hesaplamalarda aykırı değerlerin veri seti içerisinde çıkarılması debi tekrür eğrisinin yatıklaşmasına ve sonuçların oldukça düşük çıkmasına neden olduğu bu nedenle L momentler yönteminin sağlıklı sonuçlar vermediği düşünülmektedir. Noktasal olarak belirlenen OYF kullanılarak yapılan hesaplamalarda ise kısa tekrür aralığında gelebilecek olan taşkın debilerinin nispeten daha yüksek hesaplandığı, bunun yanında daha uzun tekrür süreleri için hesaplanan taşkın debi değerlerinin L momentler yöntemi ile hesaplanan değerlerle kıyaslandığında daha makul değerlerde hesaplandığı düşünülmüştür ve hesaplanan bu debi değerleri önerilmiş olan yöntemle kıyaslandığında daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sonuç olarak aykırı değerlerin veri setinden çıkarılarak hesaplamaların yapılması durumunda önerilen yöntem ve noktasal taşkın frekans analizi yönteminin L momentler yöntemine göre daha iyi sonuçlar verdiği ve bu iki yöntemin kullanılmasında daha uygun olduğu düşünülmektedir.

### Semboller

- $\alpha$  : Önerilen yöntem test istatistiği değeri  
 $\mu$  : Ortalama parametresi  
 $\sigma$  : Standart sapma parametresi  
 $m$  : Üst limit  
 $n$  : Örnekteki eleman sayısı  
 $R$  : Dixon- Thompson test istatistiği değeri

|           |                             |
|-----------|-----------------------------|
| $\bar{X}$ | : Örnek ortalama değeri     |
| Z         | : Standart normal uç değeri |
| $\beta$   | : Olasılık ağırlıklı moment |
| Cv        | : Varyasyon katsayısı       |

### Kaynaklar

- [1] Wu, L., Mixed Effects Models for Complex Data, Chapman and Hall / CRC, 2009.
- [2] Liu, H., Shah, S., Jiang, W., On-line Outlier Detection and Data Cleaning, Computers & Chemical Engineering, 28, 9, 1635-1647, 2004.
- [3] Mc Cuen, R. H., Modeling Hidrologic Change: Statistical Methods, Lewis Publishers, 2003.
- [4] Stagge, J. H., Field Evaluation of Hydrologic and Water Quality Benefits of Grass Swales for Managing Highway Runoff, Master of Science, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2006.
- [5] Gibbons, R. D., Bhaumik, D., Aryal, S., Statistica I Methods for Ground water Monitoring, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., 2009.
- [7] Cunnane, C., Review of Statistical Methods for Flood Frequency Estimation, in Hydrologic Frequency Modeling, 49-95, 1987.
- [8] Seçkin, N., Ceyhan ve Seyhan Havzalarının Bölgesel Taşkın Frekans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [9] Mkhandi, S. H., Kachroo, R. K., Flood Frequency Analysis of Southern Africa: II. Identification of Regional Distributions, Hydrological Sciences, 45, 449-464, 2000.
- [10] Seçkin, N., L Momentlere Dayalı Gösterge-Sel Metodu ile Bölgesel Taşkın Frekans Analizi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [11] Şorman, A.Ü., Bölgesel Frekans Analizindeki Son Gelişmeler ve Batı Karadeniz'de Bir Uygulama, İMO Teknik Dergi, 3155-3169, 2004.
- [12] Vogel, R.M., Fennessey, N.M., L Moment Diagrams Should Replace Product Moment Diagrams, Water Resources Research, 29, 6, 1745-1752, 1993.
- [13] Hosking, J.R.M., Wallis J.R., Regional Frequency Analysis An Approach Based on L-Moments, Cambridge University Press, 1997.





# Harç Tipi Kaplamaların Yüzey Özelliklerinin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalar ile Karşılaştırılması

Ali TOPAL<sup>1</sup>  
Mehmet GÜNEŞ<sup>2</sup>  
Derya KAYA<sup>3</sup>  
Burak ŞENGÖZ<sup>4</sup>

## ÖZ

Karayolunda güvenli bir sürüşün sağlanabilmesi, yüksek kayma dirençli yüzey dokusuna sahip kaplamalar ile mümkündür. Hizmet ömrü boyunca trafiğin aşındırıcı etkileri, iklim ve çevre koşulları sebebiyle pürüzlülüğünü kaybeden kaplama yüzeylerinin iyileştirilme gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında, harç tipi kaplama ile iyileştirilmiş ve Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) kullanarak yenilenmiş yolların yüzey özellikleri, iyileştirme çalışması öncesi ve sonrasında incelenmiş ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları, yüzey iyileştirme işlemi yapılan yollarda yüzey dokusu ve buna bağlı olarak sürtünme direnci değerlerinde artış olduğunu göstermiştir. Yüzey iyileştirme uygulamalarının trafik güvenliği üzerinde etkisinin araştırılması için İzmir Trafik Denetleme Şube Müdürlüğü'nden temin edilen kaza verileri analiz edilmiştir. Kaza analiz sonuçları, iyileştirme uygulanan yollardaki kaza miktarlarında önemli oranda azalma meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte BSK kaplamalarda, harç tipi kaplama ve BSK kullanılarak yapılan yüzey iyileştirmelerinin ayrı ayrı 20 yıllık maliyet analizleri yapılmış ve harç tipi kaplama ile yüzey iyileştirmesi yapılmasının BSK'ya göre yaklaşık %40 daha ekonomik olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Asfalt kaplama, yüzey dokusu, ortalama doku derinliği, sürtünme direnci, harç tipi kaplamalar, trafik güvenliği.

## ABSTRACT

### Comparison of Slurry Seal and Hot Mixed Asphalt Surface Properties

It is possible to enjoy a safe road drive on a pavement with a high skid resistant surface texture. During the service life, textures of the pavement surface need to be improved due to

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 09.03.2016 günü ulaşmıştır. 06.06.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.374650

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ali.topal@deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - mehmetgunes3636@gmail.com

3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - d.kaya@deu.edu.tr

4 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - burak.sengoz@deu.edu.tr

the corrosive effects of the traffic, climatic conditions and environmental effects. In scope of this study, surface texture properties of different road sections have been evaluated prior to and after the surface improvement by means of a surface rehabilitation application through slurry seal and Hot Mix Asphalt (HMA). The results were then compared. The investigations proved that rehabilitation enhanced the textural properties and hence the frictional values of the surface. In order to investigate the effect of surface enhancement on traffic safety, accident data obtained from the Izmir Traffic Control Branch Directorate were evaluated. These results indicated that there is significant decrease in the number of accidents that occurred after rehabilitation applications. Finally, the cost analysis for both slurry seal and HMA applications has been performed for a period of 20 years. The cost analysis results showed that the surface rehabilitation by means of slurry seal application generally costs 40% less than the cost of a new HMA application.

**Keywords:** Asphalt pavement, surface texture, mean texture depth, skid resistance, slurry seal, traffic safety.

## 1. GİRİŞ

Modern bir karayolu, taşıtların güvenli, konforlu ve ekonomik bir şekilde seyir etmelerine olanak sağlamalıdır. Yol kaplama yüzeyi ile araç tekerleği arasındaki sürtünme direnci, sürüş emniyetini etkileyen önemli bir parametredir. Özellikle olumsuz hava koşullarında kritik öneme sahip olan fren mesafesi, yol yüzey dokusu ile doğrudan etkilenmektedir. Kaplamalar hizmete açıldıktan sonraki kullanım sürecinde trafik tesirleri, iklim koşulları, vb. sebeplerle yüzey dokusu özelliklerini zamanla kaybetmektedir. Güvenli sürüş koşullarının devamı için, kaplamanın yüzey dokusu belirli bir seviyenin altına indiğinde, tekrar başlangıç değerlerine getirebilmek için yüzey iyileştirmesi yapılması gerekmektedir.

Kaplama tabakasının çeşitli sebeplerle deforme olması ve özellikle yol yüzeylerinin cıralanması durumunda mevcut kaplamanın yeniden yapılması yerine, yüzey iyileştirme yöntemlerine başvurulması daha ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Amerika ve Avrupa'da kaplama yüzeylerinin iyileştirilmesi amacı ile çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ülkemizde ise iyileştirme yöntemlerinin kullanımı henüz çok yeni olup, genellikle kaplamanın yeniden yapımı tercih edilmektedir. Bu durum özellikle altyapısı tamamlanmamış kentlerde bakım onarım maliyetlerinin oldukça artmasına neden olmaktadır.

Taşıt kontrolü ve trafik güvenliği büyük oranda kaplama yüzey özelliklerine bağlıdır. Sürücü fren tedbirine başvurduğunda, yol yüzeyi ile tekerlek bandajları arasında hem kuru ve hem de yağışlı hava koşullarında gerekli aderans sağlanmalıdır. Taşıt tekerleği ile kaplama arasındaki yetersiz aderans patinaj, savrulma, kayma, fren mesafesinde artış gibi tehlike oluşturabilecek durumları da beraberinde getirmektedir.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Yollar Teknik Şartnamesi 2013 yılında güncellenmiş ve yeni yapılan yollarda kum yama deneyi ile yol yüzeylerinin makro dokusunun belirlenmesi şartı getirilmiştir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında, yol yüzeylerinin makrodokusunun belirlenmesinde kum yama deney yöntemi kullanılmıştır. Kaplama yüzeylerinin kayma dirençlerinin ölçülmesinde ise Yollar Teknik Şartnamesinde bir kriter bulunmamasıyla birlikte, gelişmiş ülkelerde kayma dirençlerinin ölçülmesinde SRT (Skid Resistance Test: Kayma direnci ölçer) yöntemlerinden biri olan DFT (Dynamic Friction

Tester: Dinamik sürtünme ölçer) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, DFT cihazı bu çalışma kapsamında kayma direnci ölçümünde kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında saha ölçümlerinin yapıldığı yollar, İzmir Büyükşehir Belediyesi'nce İzmir ilinde yüzey iyileştirme yöntemlerinden harç tipi kaplamanın ilk defa uygulandığı yol kesimleri olup, başlıca amaç, harç tipi kaplamalarda yüzey doku özelliklerinin zamanla nasıl değiştiğini gözlemlemek ve sıcak asfalt karışımların (BSK) yüzey özellikleri ile karşılaştırmaktır. Belirlenen istasyon noktalarının konumları, yol kaplamalarında kullanılan malzemelerin özellikleri ve trafik akım karakteristikleri tanımlanarak, arazi çalışmaları sonrasında yapılacak değerlendirmeler için mevcut durum tespiti yapılmıştır. Çalışma kapsamında, üç farklı istasyon noktasında, benzer hava koşullarında yaklaşık 3'er aylık periyotlar halinde kum yama yöntemi ile yol yüzey makrodokusu; DFT cihazı ile 20 km/saat hıza karşılık gelen değer DFT(20) olarak belirlenerek dinamik sürtünme direnci olarak kaydedilmiştir. Ortalama doku derinliği kullanılarak hesaplanan sürtünme sabiti ( $S_p$ ) ile birlikte DFT(20) değerleri kullanılarak hıza bağlı değişen Uluslararası Sürtünme İndeksi (IFI: International Friction Index) değerleri 60 km/saat için hesaplanmıştır (FR(60)).

Çalışma kapsamında ayrıca, yüzey dokusu ve kayma direnci özelliklerinin trafik güvenliğine etkisinin incelenebilmesi için İzmir Trafik Denetleme Şube Müdürlüğü'nden, seçilen istasyon noktalarında yaşanan kaza istatistikleri temin edilerek ayrı ayrı ölçüm dönemleri bazında değerlendirilmiştir. Son olarak harç tipi kaplama ve BSK için hizmet ömrünü esas alan 20 yıllık maliyet analizi yapılarak, harç tipi kaplamalarla daha ekonomik ve güvenli iyileştirme yapılıp yapılamayacağına İzmir ilinde seçilen istasyon noktaları özelinde belirlenmesi amaçlanmıştır.

## **2. LİTERATÜR ÖZETİ**

Kayma direnci, araç lastikleri ve yol kaplama yüzeyleri arasında oluşan sürtünmeye bağlı yol güvenliğine katkıda bulunan en önemli faktörlerden biridir [1, 2]. Sürücülerin araç kullanım özelliklerini ve duruş mesafesini etkileyen bu faktör, zaman içerisinde kaplama yüzeyindeki agregaların aşınmasından dolayı azaldığı için kaplamaların yenilenmesi ya da iyileştirilmesi gerekir. Kaplamaların sıcak asfalt karışımları ile bakım onarımlarının yapılması yüksek maliyetlere neden olmakta ve üretim hataları ile kot farklılıkları hem onarım yapılmış kaplamanın beklenenden daha çabuk bozularak yapılan harcamaların heba olmasına neden olmakta, hem de konforu bozmaktadır. Literatürde, kaplama iyileştirme yöntemlerinin etkinlikleri ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur [3,4]. Bu iyileştirme yöntemleri arasında harç tipi kaplamalar avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Ancak harç tipi kaplamaların yüzey özellikleri ile ilgili literatürde bir araştırmaya rastlanmamıştır. Harç tipi kaplama, asfalt emülsiyonunun sürekli gradasyonlu ince agrega, filler ve su ile homojen karıştırılmasıyla elde edilen ve kaplama yüzeylerinin koruyucu ve düzeltici bakımında kullanılan ince bir yüzey örtü tabakasıdır.

Kaplama yüzeyindeki kayma direnci genellikle karışımda kullanılan agreganın minerolojik kompozisyonuna, morfolojisine ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Kaplama yüzeyinin yeterli ve uzun süreli kayma direncine sahip olması için yol yüzey tabakasının agrega bileşenlerini optimize etmek gerekmektedir. Kaplama yüzey dokuları şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Mikrodoku, karışımdaki agrega yüzeyindeki pürüzlülüğe bağlıdır (Dalga boyu 0,5mm'den genişliği 0,2 mm'den düşük girinti ve çıkıntılar).
- Makrodoku, agreganın dane boyutuna ve şekline bağlı bir parametredir (Dalga boyu 0,5–50 mm, genişliği 0,2–10 mm arasında değişen girinti ve çıkıntılar). Makrodoku özellikle kaplamanın sürtünme direnci üzerinde etkilidir.
- Megadoku, yol yapım aşamasında finişerin vibrasyonu sonucunda veya yol yüzeyinin zamanla bozulması sonucu oluşan çatlaklar, tekerlek izleri gibi kalıcı deformasyonlar vb. nedenlerle ortaya çıkar (Dalga boyları 50–500 mm, Genlikleri 10–50 mm arasında değişen girinti ve çıkıntılar). Megadoku, sürüş konforunu bozan bir özellik olup, mikrodoku ve makrodokudan farklı olarak kaplamalarda istenilen bir yüzey özelliği değildir.

Islak yol yüzeyleri üzerinde birikmiş suyun yol yüzeyinden ayrılması için doku derinliğinin belirli değerlerde olması gerekmektedir [5]. Doku derinliği bir yüzey alanı için lastik/yol yüzey ara fazının üç boyutlu hali veya bir mesafe için lastik/yol yüzey arafazının iki boyutlu hali olarak aşağıdaki şekillerde tanımlanmaktadır [6].

- Doku Derinliği (Texture Depth), TD; Yüzey ile yüzeyde en büyük üç pik noktasından geçen düzlem arasındaki düşey mesafe,

- Ortalama Doku Derinliği (Mean Texture Depth), MTD: Hacim esasına dayanan kum yama yöntemi kullanılarak kaplamanın ortalama makro derinliği.

Yol Kongreleri Daimi Birliği (PIARC) tarafından desteklenen ve farklı üye ülkelerdeki farklı tipteki yol yüzeylerinin, modern yol yüzey dokusu ve sürtünme direnci aletleri ile ölçümü planlanmış ve ölçümlerin sonuçları değerlendirilerek uluslararası sürtünme direnci indeksi oluşturma çalışmaları yapılmıştır. Sürtünme direncini tespit etmek amacı ile kilitlenmiş tekerlek, sabit ve değişken kayma aletleri, dinamik sürtünme ölçer test cihazı ile bazı prototip cihazlar kullanılmıştır. Yol doku derinlikleri için ise kum yama, lazer profilometresi ve bazı optik sistemler kullanılmıştır. Çalışmalar sonunda, Uluslararası Sürtünme İndeksi (IFI) kaplama yüzeylerinin sürtünme özelliklerinin sınıflandırılabilmesi için ortak bir referans ölçek olarak geliştirilmiştir. IFI, kaplama makro yapısının hız sabiti ile ilişkilendirildiği PIARC sürtünme modeli olarak tanımlanan bir istatistiksel modeldir [7].

Yüzey dokusu ve kayma direncindeki azalma, yol yüzeyinin araç lastikleri ile yaptığı aderansı azaltmaktadır. Bu durumda özellikle yağışlı havalarda fren mesafesi uzamakta ve buna bağlı olarak yol sürüş güvenliği azalmaktadır. Bu alandaki çalışmalar, sürtünme direncindeki azalmanın trafik kazalarını arttırdığını ortaya koymaktadır [8,9,10].

Kaplama yenileme yöntemlerinden olan BSK ve harç tipi kaplama üretimlerinin performans özellikleri ile birlikte yaşam ömürleri ve üretim maliyetleri de farklıdır. Bu iki kaplama yönteminin yaşam ömürleri birçok araştırmaya konu olmuştur. Trafik hacimleri, yükleme koşulları ve çevresel faktörlere de bağlı olmakla birlikte, harç tipi kaplamanın yaklaşık 3-4 yıl, BSK'nın ise 9-10 yıl hizmet ömrü olduğu öngörülmüştür [11,12].

### 3. SAHA ÇALIŞMALARI

#### 3.1. İstasyon Noktalarının Belirlenmesi

İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından 2013 yılında bazı kritik yol kesimlerinde harç tipi kaplama ile yüzey iyileştirmesi yapılmıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında harç tipi kaplamaların performansının incelenebilmesi ve önce-sonra etütlerinin yapılabilmesi için TÜBİTAK MAG 108M293 [13] projesi kapsamında daha önce incelenen istasyon noktaları arasından harç tipi kaplama yapılan istasyon noktaları deneysel çalışmalar yapmak üzere seçilmiştir. Seçilen istasyon noktalarına ek olarak, Harç Tipi Kaplamanın yüzey performans özelliklerinin karşılaştırabilmesi için BSK kullanılarak iyileştirilmiş bir istasyon noktası da seçilmiştir. BSK tasarımında, İzmir Aliğa Rafinerisi'nden temin edilen 50/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu %4,76 toplam karışım oranında kullanılmıştır. Agregası olarak Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTS) yer alan aşınma Tip-1 gradasyonuna sahip kalker kullanılmıştır.

Seçilen istasyon noktalarının trafik güvenliği açısından kavşak ve benzeri kesişim noktalarından mümkün olduğunca uzakta olmasına dikkat edilmiştir. Ölçümler, yol malzemeleri ve deney ekipmanlarında meydana gelebilecek iklimsel etkileri (lastik bapuçun sertliği, su sıcaklığı, kum küreciklerinin uçması, vb.) minimize etmek amacıyla benzer hava ve sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Ölçüm isimleri ve tarihleri

| Ölçüm İsmi | Ölçüm Tarihi |
|------------|--------------|
| 2014/1     | 06.02.2014   |
| 2014/2     | 01.04.2014   |
| 2014/3     | 01.10.2014   |
| 2014/4     | 25.12.2014   |
| 2015/1     | 29.04.2015   |

Çalışma kapsamında Yeşildere Caddesi ve Mustafa Kemal Sahil Bulvarı üzerinde 4'er adet istasyon noktası seçilmiştir.

#### 3.1.1. Yeşildere Caddesi

Yeşildere Caddesi, şehrin kuzeyinden Altinyol ve Ankara Caddesi ile gelen trafiği Mürselpaşa Caddesi ile toplayarak, Yeşillik Caddesi ile şehrin güneyine aktarılmasını sağlayan yaklaşık 4,5 km uzunluğunda ve 25 m platform genişliğinde bir yoldur. Yeşildere Caddesi'ne ait genel görünüm ve ölçüm yapılan istasyon noktaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Yeşildere Caddesi üzerindeki 1, 2 ve 3 No'lu istasyonlar harç tipi kaplama 4 No'lu istasyon ise BSK kaplamalıdır.



Şekil 1. Yeşildere genel görünüm ve ölçüm yapılan istasyon noktaları

### 3.1.2. Mustafa Kemal Sahil Bulvarı

Mustafa Kemal Sahil Bulvarı, İzmir Körfezi'nin güney sahil şeridi boyunca devam eden, 6,2 km uzunluğunda ve 27 m platform genişliğinde bir yoldur. Bu yol, Cumhuriyet Bulvarı ile Fevzipaşa Caddesi'nin kesiştiği noktadan başlayarak, İzmir-Çeşme Otoyolu'na bağlanmaktadır. Mustafa Kemal Sahil Bulvarı (Konak Altgeçidi) istasyon noktalarına ait genel görünüm ve ölçüm yapılan istasyon noktaları Şekil 2'de gösterilmiştir. Mustafa Kemal Sahil Bulvarı üzerindeki 1, 2 ve 3 No'lu istasyonlar harç tipi kaplama 4 No'lu istasyon ise BSK kaplamalıdır.



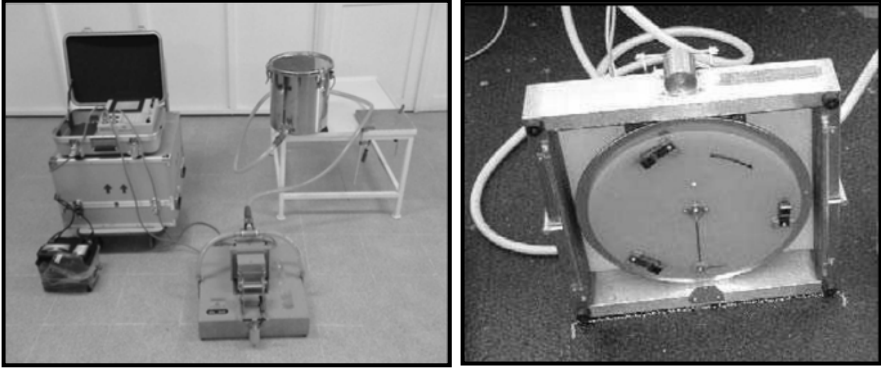
Şekil 2. Mustafa Kemal Sahil Bulvarı genel görünüm ve ölçüm yapılan istasyon noktaları

### 3.2. Dinamik Sürtünme Ölçer Testi

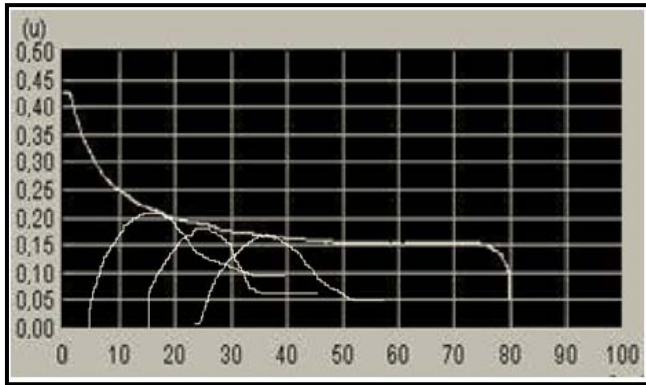
Dinamik sürtünme ölçer (DFT), saha ve laboratuvar ölçümlerinde kalite kontrol/kalite güvencesi, proje ve araştırmalarda yararlanılmak üzere sürtünme verilerinin elde edilmesi

için kullanılmaktadır. Deney yöntemi ASTM E 1911'de belirtilmiştir [14]. Şekil 3'de gösterildiği gibi 3 adet kauçuk lastik yatay dönen diskin altına sabitlenmiştir. Cihaz çalışmaya başladıktan sonra disk dönmeye başlar ve 80 km/saat hız ulaştığında otomatik olarak kaplama yüzeyine dik bir şekilde alçalarak yola temas eder. Kauçuk lastikler yol yüzeyine dik bir şekilde etkiyen W sabit yükü altında ve doğrusal bir F kuvveti ile V hızında döner. F değeri ile sabit oranda artan  $\mu$  sürtünme değeri 20, 40, 60 ve 80 km/saat hız değerlerinde hesaplanır. Bu yöntem, her aşamada tekrar edilebilme ve yeniden yapılabilme imkânı sunmakla birlikte, rüzgar, hatalı okuma gibi dış etkenlerden kesinlikle etkilenmeden uluslararası kayma direnci indeksi (IFI-ASTM E1960-07) değerine kolayca ulaşılabilmektedir [17].

Dinamik sürtünme ölçer cihazı, tüm eğrileri tek bir sürtünme eğrisi olarak değerlendirmekte ve Şekil 4'de gösterildiği gibi hızla bağlı değişimi vermektedir. Deney 0 ile 80 km/saat arasındaki hızlardan IFI değerinin elde edilmesinde kullanılan 20 km/saat hızla karşılık gelen DFT verisini esas almaktadır.



Şekil 3. Dinamik sürtünme ölçer test cihazı



Şekil 4. Hıza bağlı DFT değerinin genel değişimi

### 3.3. Kum Yama Yöntemi (ASTM E 965-96)

İngiltere’de geliştirilen bu deneyin amacı, yol yüzey doku derinliğini belirlemektir. Boyutları standartlaştırılmış ve hacmi bilinen bir miktar kum (British Standard 598’e göre 50 ml) kaplamanın girintilerini dolduracak, çıkıntılarını aşmayacak şekilde, bir kauçuk ayak yardımıyla, yüzey üzerine dairesel olarak yayılır. İşlem sonucunda kaplama yüzeyinin ortalama doku derinliği elde edilmiş olur. Kullanımı pratik olan bu yöntemin ıslak koşullar altında kullanımının zor olması, zayıf üretilebilirlik ve doku derinliği az olan yollarda doğru veri vermemesi gibi dezavantajları vardır.

### 3.4. Sürtünme İndeksi

DFT kullanarak kaplamanın sürtünme özellikleri Denklem 1’deki gibi ifade edilmektedir.

$$FR(V) = DFT_{20} \times e^{\frac{-V+20}{Sp}} \quad (1)$$

Burada;

$DFT_{20}$  = 20 km/saat hıza karşılık gelen dinamik sürtünme değeri.

V = Taşıt hızı (km/saat)

Sp = Sürtünme Sabiti (Speed constant).

IFI’yi oluşturan temel parametrelerden biri olan ve kaplama yüzeyinin cilalanma özellikleri ile ilgili bilgi veren Sp değeri, yolun ortalama profil derinliği veya ortalama doku derinliği ile ilişkilidir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$Sp = a + b \times T \quad (2)$$

Denklem 2’deki a ve b sabit katsayılar olup ASTM E 965 (Kum yama yöntemi) ile tayin edilecekse veya ASTM E 1845 ile tayin edilecekse farklı değerler almaktadırlar. Çalışma kapsamında Sp değeri MTD’nin bir fonksiyonu olarak Denklem 3’deki gibi kullanılmıştır.

$$Sp = -11,6 + 113,6 \times MTD \quad (3)$$

IFI’yi oluşturan diğer parametre ise F(60)’tır. Bu değer 60 km/saat hızdaki normalleştirilmiş sürtünme değeridir ve Denklem 4’deki gibi hesaplanır.

$$FR(60) = DFT_{20} \times e^{\frac{-60+20}{Sp}} \quad (4)$$

Burada;

FR(60) = S kayma hızında 60 km/saat hıza göre hesaplanmış düzeltilmiş sürtünme değeri,



$FR(S) = S$  kayma hızındaki sürtünme değeri (DFT ile)

$S$  = Kayma hızı, km/saat (genellikle 20 km/saat alınmaktadır)

Uluslararası sürtünme indeksi çalışmaları kapsamında ele alınan bağıntı ise aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$F(V) = A + B.FR(V) \quad (5)$$

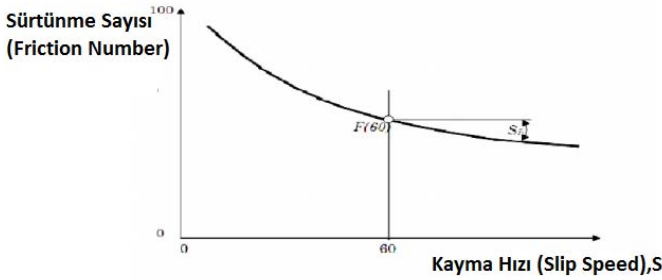
Burada;

$F(60)$  = Düzeltilmiş IFI sürtünme sayısı

$A, B$  = Sürtünme ölçüm aletine bağlı kalibrasyon sabiti (DFT cihazı için bu parametreler  $A=0,11$ ;  $B=0,66$  olarak ilgili ASTM standardından alınmıştır)

$S_p$  ve 60 km/saat hızdaki sürtünme değeri bilinen bir kaplamanın herhangi bir  $S$  kayma hızındaki sürtünme değeri tahmin edilebilir. Şekil 5'deki IFI model grafiği Denklem 6 kullanılarak elde edilmiştir ve herhangi bir  $S$  kayma hızının  $F(60)$  ve  $S_p$  değerlerinin tahmininde kullanılabilir [6, 15, 16].

$$FN(S) = FN_v \times e^{\frac{(S-V)}{S_p}} \quad (6)$$

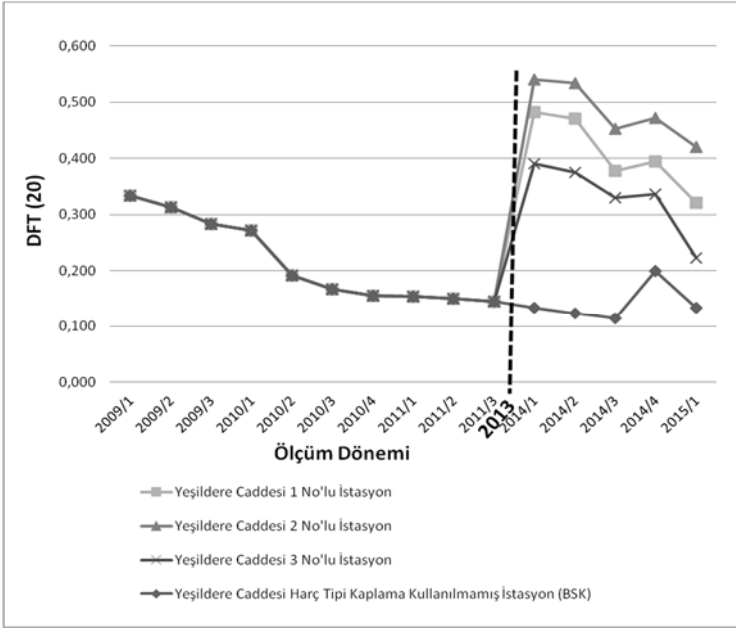


Şekil 5. Uluslararası kayma indeksi Modeli (IFI)

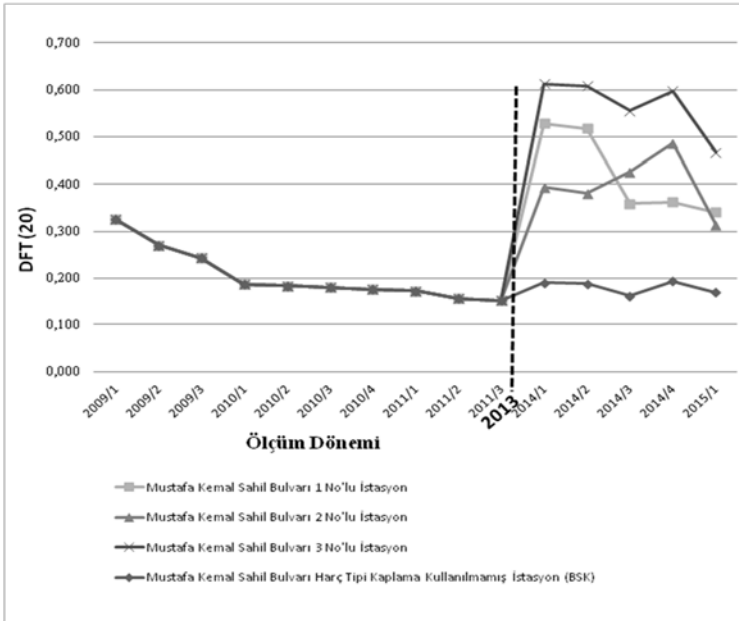
## 4. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1. Dinamik Sürtünme Ölçer Testi Sonuçları

Yeşildere Caddesi ile Mustafa Kemal Sahil Bulvarı İstasyon noktalarında (1, 2 ve 3 no'lu) Dinamik Sürtünme Ölçer Test Cihazı ile 2013 yılında yapılan kaplama iyileştirme çalışması öncesi ve sonrası ölçüm dönemlerinde kaplamaların DFT20 değerleri Şekil 6 ve 7'de sunulmuştur. Şekil 6 ve 7'de harç tipi kaplama yapıldıktan sonraki dönemlerdeki DFT 20 değerleri BSK ile kıyaslamalı olarak verilmiştir.



Şekil 6. Yeşildere Caddesi istasyonlarının ölçüm dönemlerine göre DFT20 değişimi



Şekil 7. M. Kemal Sahil Bulvarı istasyonlarının ölçüm dönemlerine göre DFT20 değişimi

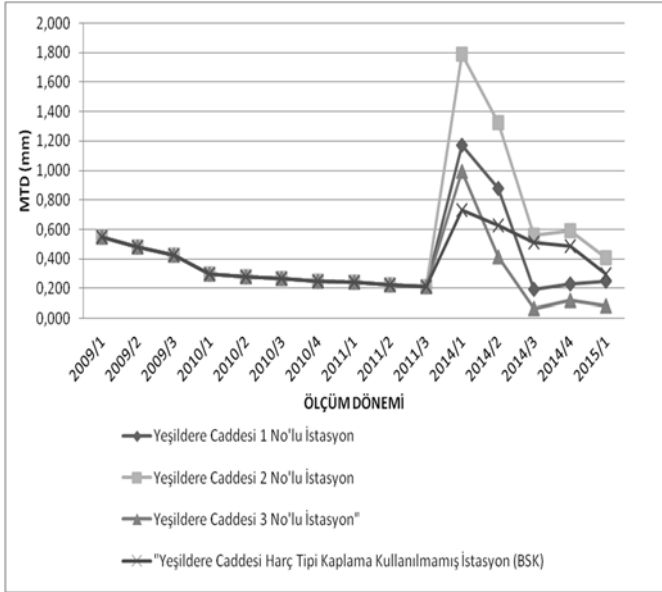
DFT, kaplamanın sürtünme direnci hakkında fikir veren dinamik sürtünme katsayısının ölçülmesini sağlamaktadır. Yukarıdaki şekillerde de açıkça görüleceği gibi 20 km/saat hıza karşılık gelen sürtünme değeri DFT20 tüm ölçüm dönemleri boyunca beklenildiği şekilde azalma eğilimindedir. Bu durum doğrudan yoğun trafik etkisi ile zaman içerisinde azalan sürtünme direnci ile açıklanabilir. 2013 yılında harç tipi kaplama kullanılarak yapılan yüzey iyileştirme işleminden sonra DFT20 değeri beklenildiği üzere artış göstermiştir.

Bununla birlikte yeni yapılan harç tipi kaplama ile BSK kaplama arasında karşılaştırma yapıldığında; 2014/1 dönemi için harç tip kaplamanın DFT20 değerinin BSK kaplamanın DFT20 değerinde göre 1,6 ile 2,8 kat daha fazla olduğu, bu oranların 2015/1 son ölçüm döneminde azaldığı görülmektedir. Bu durum kaplama yüzeylerinde yüzey dokusu azaldıkça DFT20 değerlerinin birbirlerine yaklaştığını göstermektedir.

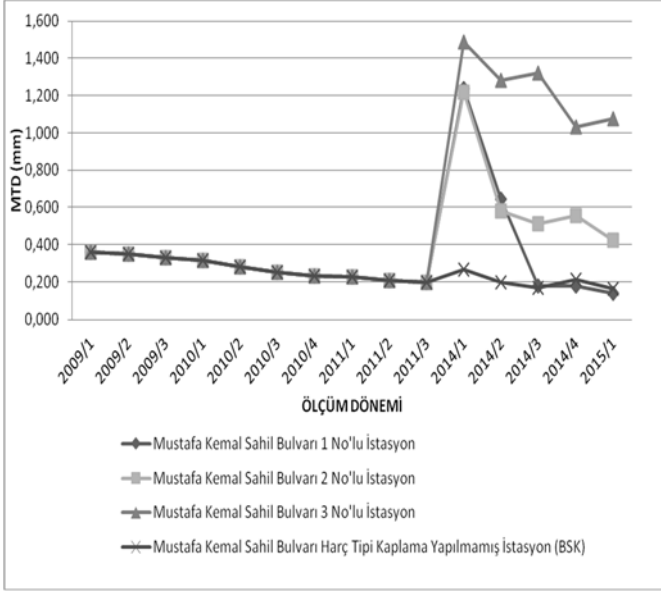
Ayrıca 2014/4 ölçüm döneminde tüm kaplama yüzeyleri için DFT20 değerlerinin bir önceki ölçüm dönemine göre bir miktar arttığı gözlenmiştir. Bu durum, özellikle yoğun yağış dönemlerinde kaplama yüzeyinin çok iyi yıkanması ve yüzey dokusunun ortaya çıkması ile açıklanabilir. Yüzeysel toz ve çamurların kaplama yüzeylerinin makro dokusunu doldurması sonucu DFT20 değerleri artış şeklinde değişim gösterebilmektedir. Bu durum, deney sonuçlarının mevsimsel farklılıklara ve özellikle yağışlara duyarlı olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

#### 4.2. Kum Yama Yöntemi (ASTM E 965-96) Sonuçları

Şekil 8 ve 9'da sırasıyla Yeşildere Caddesi'ndeki ve Mustafa Kemal Sahil Bulvarı'ndaki istasyon noktalarının 2013 yılında yapılan yenileme çalışması öncesi ve sonrası tüm ölçüm dönemlerine ait ortalama doku derinliklerindeki (MTD) değişimler verilmiştir.



Şekil 8. Yeşildere Caddesi kum yama deneyi ile ortalama doku derinlikleri (MTD)



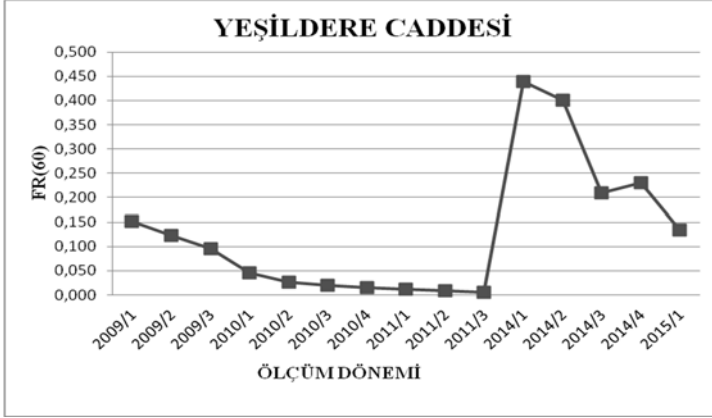
Şekil 9. M. Kemal Sahil Bulvarı kum yama deneyi ile ortalama doku derinlikleri (MTD)

Kum yama yöntemi, yüzeyin ortalama doku derinliklerini (MTD) ölçmekte kullanılan bir yöntemdir. Tüm ölçüm dönemleri göz önüne alındığında MTD değerlerinin tüm istasyon noktalarında zamanla azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu azalma, kaplama üzerinden zamana bağlı olarak eklenik araç sayısının artması ve yüzeyi aşındırmasıyla azalan doku derinliği ile açıklanabilir. 2013 yılında gerçekleştirilen yenileme işleminden sonra kaplamaların MTD değerleri önemli oranda artmıştır.

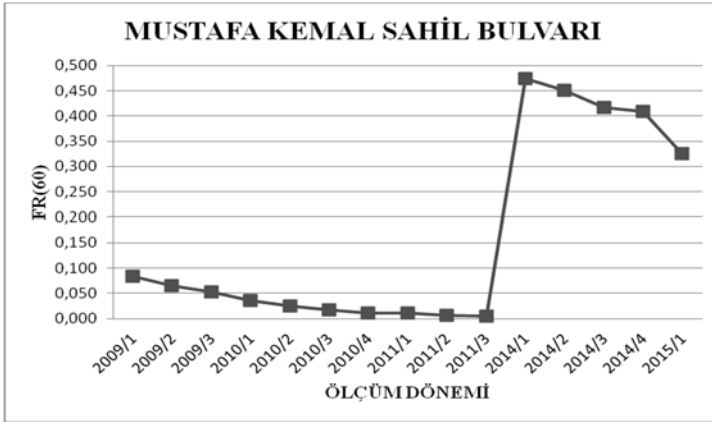
### 4.3. Sürtünme İndeksi Sonuçları

Şekil 10 ve Şekil 11'de Yeşildere Caddesi ve Mustafa Kemal Sahil Bulvarı istasyon noktalarına ait 60 km/saat hız değerine karşılık gelen IFI sürtünme eğrileri F(60) yer almaktadır.

F(60) değerleri, hem doku derinliğine hemde DFT20 değerlerine bağlı olarak hesaplandığı için şekillerde ölçüm dönemleri boyunca F(60) değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum trafik etkisi ile ölçüm dönemleri boyunca MTD'de azalma ile birlikte lastik-taşık etkileşimini ifade eden DFT20 değerlerindeki azalmaya bağlıdır. Sunulan iki şekilde de 2013 yılında istasyon noktalarında uygulanan yüzey iyileştirme yöntemlerinden olan harç tipi kaplamanın sürtünme direncini arttırdığı açıkça görülmektedir.



Şekil 10. Yeşildere Caddesi uluslararası sürtünme indeksi eğrileri (FR(60))



Şekil 11. M.Kemal Sahil Bulvarı uluslararası sürtünme indeksi eğrileri (FR(60))

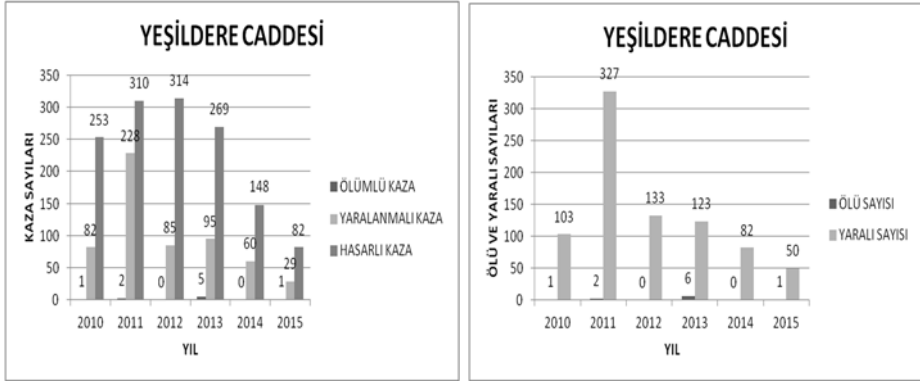
#### 4.4. Kaza Analizleri

Harç tipi kaplamaların sağladığı yüksek sürtünme direncinin trafik kazaları ve yol güvenliğine etkisini incelemek amacıyla çalışma kapsamında, İzmir Trafik Denetleme Şube Müdürlüğü'nden 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 yıllarına ait ölümlü, yaralanmalı, kamu araçlarının karıştığı kazalar ile tek araçların karıştığı kaza verileri temin edilmiştir.

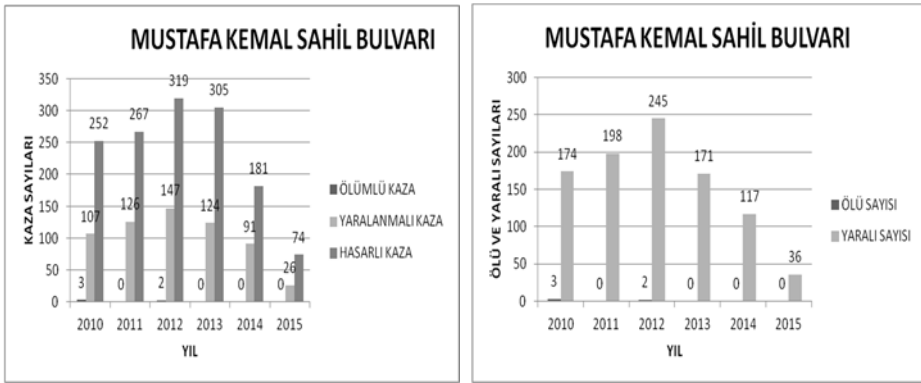
Yeşildere Caddesine ilişkin kaza verilerinin ayrıntılı analizleri sırasıyla Yeşildere Caddesi ve Mustafa Kemal Sahil Bulvarı için Şekil 12 ve 13'de verilmiştir.

İzmir Trafik Denetleme Şube Müdürlüğü'nden alınan veriler incelendiğinde 2013 yılında yapılan yenileme işleminden önce gerçekleşen kaza sayılarının zaman içerisinde arttığı görülmüştür. Kaplamanın zaman içerisinde azalan sürtünme direnci ve yüzey pürüzlülüğünün fren mesafelerini arttırması ve kaplamayı daha güvensiz hale getirmesi buna

sebepler olarak gösterilebilir. Her iki istasyon noktasında da 2013 yılından sonra yapılan yenileme işlemi ile birlikte gerçekleşen kazalar da incelendiğinde ise kaza oranlarında fark edilir bir azalma olduğu görülmüştür. Böylece, yenileme işlemi yapılan kaplamaların kaza oluşumu açısından daha güvenli olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 12. Yeşildere Caddesi'ne ait kaza verileri



Şekil 13. Mustafa Kemal Sahil Bulvarı'na ait kaza verileri

## 5. MALİYET ANALİZİ

Seçilen istasyon noktalarında iki tip kaplama türü vardır. Bir tanesi yüzey iyileştirme yöntemlerinden biri olan harç tipi kaplama, diğeri ise BSK kaplamadır. Çalışma kapsamında bu iki kaplama türünün malzemeleri, sürtünme dirençleri ve kaplamaların trafik güvenliğine etkisi incelenmiştir. Bunlara ek olarak harç tipi kaplama ve BSK'nın 20 yıllık maliyet analizi yapılmış ve birbirleri ile kıyaslanarak hangisinin daha ekonomik olduğu araştırılmıştır.

Literatür özetinde de belirtildiği gibi, harç tipi kaplamanın yenilenme süresi 4 yıl, BSK kullanılarak yapılan yolların ise 10 yıl olarak kabul edilmiştir. Harç tipi kaplamalardan farklı olarak BSK ile uygulanan yenileme işlemlerinden önce kaplamanın yüzeyinin kazınması gerekmektedir.

### 5.1. Bitümlü Sıcak Karışım Maliyeti

Asfalt karışımının ana bileşenleri esas olarak agregaya ve bitümlü bağlayıcıdır. Ülkemizdeki karayollarının büyük bölümünde agregaya olarak Yollar Teknik Şartnamesinde belirtilen bir takım standart özellikleri karşılamak koşulu ile ve genellikle birim hacim ağırlığı 2,60-2,70 ton/m<sup>3</sup> olan Kireçtaşı (Kalker-Dolomit) kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcının Birim Hacim Ağırlığı da 0,95 ve 1,05 ton/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Bu iki malzemenin belirli agregaya granülometrisi (Tip 1-2) ve oranlarında yüksek sıcaklık koşullarında asfalt plentinde karıştırılması ile elde edilen asfalt karışımının birim ağırlığı ise yaklaşık 2,44 ton/m<sup>3</sup> dür ve 1 ton asfalt ile 6 cm kalınlığında 6,83 m<sup>2</sup> asfalt kaplama yapılabilir.

6 cm kalınlığında 1m<sup>2</sup> asfalt betonu aşınma tabakası için gerekli Asfalt miktarı:

$$1,00 \text{ m}^2 \times 0,06 \text{ m} \times 2,44 \text{ ton/m}^3 = 0,1464 \text{ ton/m}^2$$

$$1 \text{ ton asfalt ile kaplanabilecek alan: } 1,00 \text{ ton} / 0,1464 \text{ ton/m}^2 = 6,83 \text{ m}^2$$

### 5.2. Harç Tipi Kaplama Maliyeti

Harç tipi kaplamaların ülkemizde yeni kullanılan yüzey iyileştirme yöntemi olması sebebiyle birim fiyatı analizi henüz bulunmamaktadır. Kıyaslama yapabilmek amacı bu iki kaplama türü için 1 m<sup>3</sup> karışım için gerekli malzemeler hesaplanmış ve bu hacim için gerekli malzemelerin maliyetleri Karayolları Genel Müdürlüğü birim fiyat analizi ve Tüpraş 2015 verileri kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 2 ve Çizelge 3) [18].

Çizelge 2. BSK'nın 1m<sup>3</sup> karışım birim fiyatı

| Poz No     | Tanımı   | Miktarı | Hacim (m <sup>3</sup> ) | 1 m <sup>3</sup> Hacim için gerekli miktar | 2015 Birim Fiyatı | Tutarı (TL) |
|------------|--|---------|-------------------------|--|-------------------|-------------|
| KGM/6400-1 | Asfalt Betonlu Aşınma Tabakası Malzemelerinin Temini (Kırılmış ve Elenmiş Ocak Taşı ile) (Tip-1) | 1       | 0,370                   | 2,7  | 17,54             | 47,36       |
| 04.610/D   | Bitümlü malzeme bedeli   | 0,058   | 0,056                   | 0,157                                      | 904,96            | 141,74      |
| TOPLAM     |  |         |                         |  |                   | 189,10      |

Çizelge 3. Harç tipi kaplama karışımı 1 m<sup>3</sup> karışım birim fiyatı

| Poz No     | Tanımı   | Miktarı | Hacim (m <sup>3</sup> ) | 1 m <sup>3</sup> Hacim için gerekli miktar | 2015 Birim Fiyatı | Tutarı (TL) |
|------------|--|---------|-------------------------|--|-------------------|-------------|
| KGM/6400-2 | Asfalt Betonlu Aşınma Tabakası Malzemelerinin Temini (Kırılmış ve Elenmiş Ocak Taşı ile) (Tip-2) | 1       | 0,370                   | 2,7  | 17,54             | 47,36       |
| 04.611/1D  | Katyonik Asfalt Emülsiyonu (CSS-1 Tipi) Emülsiyon malzeme bedeli                                 | 0,140   | 0,135                   | 0,146                                      | 1414,50           | 205,95      |
| TOPLAM     |  |         |                         |  |                   | 253,31      |

Bir metre küp malzeme ile BSK için kaplama kalınlığı 6 cm, harç tipi kaplama kalınlığı 8 mm alınarak birim m<sup>2</sup> bulunmuştur. Elde edilen 1m<sup>3</sup> maliyetler kaplama kalınlığı ile 1 m<sup>2</sup> maliyetlere çevrilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Kaplamaların birim m<sup>2</sup> fiyatları

| Kaplama Cinsi         | Tabaka Kalınlığı (cm) | 1 m <sup>3</sup> ile kaplama yapılabilecek alan (m <sup>2</sup> ) | Birim Fiyatı (TL/m <sup>3</sup> ) | 1 m <sup>2</sup> Birim Fiyatı (TL) |
|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|
| Bitümlü Sıcak Karışım | 6                     | 16,67   | 189,10                            | 11,35                              |
| Harç tipi kaplama     | 0,8                   | 125   | 253,31                            | 2,03                               |

### 5.3. Harç Tipi Kaplama ve BSK Yenileme İşlemlerinin 20 Yıllık Maliyet Analizi

Farklı tür kaplama yenileme işlemlerinin 20 yıllık maliyet analizi yapıldığında başlangıç olarak yapılan masraf tüm yenileme işlemleri için aynıdır ve BSK maliyeti kadardır. BSK'nın ortalama yenileme süresi olan 10. yılın sonunda yenileme türüne göre yapılan maliyetler değişmektedir. BSK kullanılarak yapılan yenileme işlemlerinde harç tipi kaplamadan farklı olarak kaldırım kotlarının düşmemesi ve rögar kapakların yol kotunun altında kalmaması için mevcut kaplamanın kazınması gerekmektedir. Çizelge 5'de bitümlü sıcak karışımın 1 m<sup>2</sup> için birim kazıma maliyet hesabı bulunmaktadır.

Çizelge 5. Bitümlü Sıcak Karışım 1 m<sup>2</sup> kazınma birim fiyatı

| Poz No     | Tanımı   | Hacim (m <sup>3</sup> ) | 2015 Birim Fiyatı (TL/m <sup>3</sup> ) | 1 m <sup>2</sup> Birim Fiyatı (TL) |
|------------|--|-------------------------|--|------------------------------------|
| KGM/40.130 | Asfalt kazıma makinası ile her cins bitümlü karışım kaplamaların kazılması | 1                       | 58.70                                  | 3.52                               |

Harç tipi kaplamanın yenileme süresi 4 yıl olarak alındığında geriye kalan 10 yıl içerisinde 3 kez yenilenmesi gerekmektedir. BSK için ise 10. Yılın sonunda kullanılmaz hala gelen mevcut kaplamanın kazınması işleminden sonra bir kez daha dökülmesi yeterli olacaktır. Bu durum Şekil 14'de daha net görülebilmektedir.

Bu durumda yenileme işlemi için BSK kullanılan 1 m<sup>2</sup> kaplamanın 20 yılın sonundaki toplam maliyeti:

11,35 TL (başlangıç maliyeti)

3,52 TL (kazıma masrafı)

11,35 TL (yenileme masrafı),

Toplam 26,22 TL olarak bulunur.



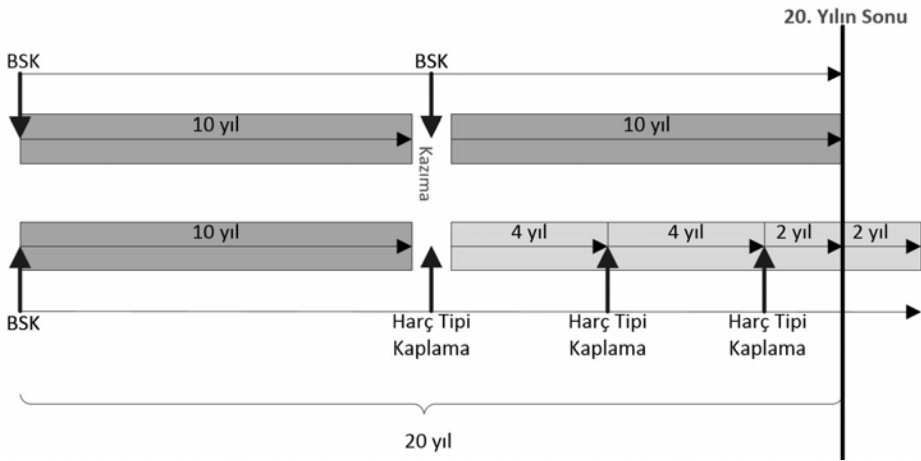
Yenileme işlemi için harç tipi kaplama kullanılan 1 m<sup>2</sup> kaplamanın 20 + 2 yıl sonundaki toplam maliyeti:

11,35 TL (başlangıç maliyeti)

2,03 x 3 kez = 6,09 TL (3 kez yapılacak harç tipi kaplama maliyeti)

Toplam 17,44 TL olarak bulunur.

Yapılan araştırmanın sonunda da görülmüştür ki 20 yıllık süre için harç tipi kaplama ile yapılan yenileme işlemleri BSK kullanımına nazaran %40 oranında daha ekonomiktir. Sadece bakım maliyeti olarak karşılaştırıldığında ise BSK'ya oranla Harç tipi kaplamalar yaklaşık 2,5 kat daha ekonomiktir.



Şekil 14. BSK ve harç tipi kaplamanın 20 yıllık maliyet analizi

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

108M293 no'lu Tübitak projesinin istasyon noktaları arasından seçilen, harç tipi kaplama yapılan istasyonlara ait kum yama deneyi ve dinamik sürtünme ölçer cihazı mevcut eski verileri güncel saha deneyleri ile karşılaştırıldığında, kaplamadaki yol yüzey dokusunun imalat yılı olan 2013 yılından itibaren çok önemli miktarda arttığı gözlemlenmektedir. Yol yüzey dokusunda meydana gelen bu artışın sürtünme direncini de arttığı görülmektedir. Yol yüzey dokusu kaplamanın sürtünme direncini etkilemektedir.

Çalışma kapsamında önce-sonra etüdü ile birlikte güncel verileri de karşılaştırmak amacıyla aynı güzergâh üzerinde harç tipi kaplama imalatı yapılmış ve yapılmamış istasyonlarda yapılan deneyler sonucunda, yol yüzey dokusunun; imalat yapılan istasyonlarda yapılmayan BSK kaplamalara göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca bu değerler ağır trafik yüküne maruz kalan bölgelerde bile imalat yapılmayan bölgelere göre 2 kat daha büyük değere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kum yama deneyi ile elde edilen ortalama doku derinliği (MTD) ile tek başına kaplamanın yüzey dokusunun güvenilirliğini belirlemek yeterli değildir. Deney sonuçları, deney yapan operatöre, havanın yağışlı ve/veya rüzgarlı olmasına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Kaplama hizmet kalitesi değerlendirilirken servis ömrü süresince F(60) değerindeki değişimin incelenmesinin daha sağlıklı olacağı düşünülmektedir.

Yüzey iyileştirme uygulamalarının trafik güvenliği üzerinde etkisinin araştırılması için İzmir Bölge Trafik Müdürlüğü'nden temin edilen kaza verileri, yüzey iyileştirilmesi yapılmadan önceki ve sonraki durum, yol yüzey dokusu ve DFT deney verileri ışığında karşılaştırıldığında; harç tipi kaplama imalatının sağladığı yüzey dokusu sayesinde yol güvenliğinin önemli miktarda arttığı görülmektedir. İstasyon noktalarında yüzey iyileştirme işlemi öncesi ve sonrasında yaşanan kazalar incelendiğinde, yenileme çalışmasından sonra pürüzlülük değerleri artan yollarda kazaların önemli oranda azaldığı görülmüştür. Ancak, trafik kaza tutanaklarında fren mesafelerinin yanında, kazanın meydana geldiği yol yüzeyinin pürüzlülüğünün de belirlenmesi ve bu amaçla hızlı ve etkin bir yöntemin kullanılması gerekliliği de ortadadır. Trafik kaza tutanaklarının, trafik kazalarının sağlıklı ve geniş çaplı araştırmalarının yapılabilmesi amacıyla oluşum nedenlerini daha sağlıklı yansıtabilecek şekilde yol yüzey durumu ile ilgili bilgileri de içerecek şekilde tutulması sağlanmalıdır.

Tasarım kriterlerini sağlayan ancak yüzey doku özellikleri kötü olan yollar, araç tekerleklerinin kaplama yüzeyi ile iyi aderans sağlanmaması nedeni ile kaza oluşumu açısından risk teşkil etmektedir. Bu sebeple yüzey doku derinlikleri ve sürtünme değerleri de tasarım kriteri olarak değerlendirilmelidir.

BSK kaplamaların 20 yıllık ömür-döngü maliyetleri incelendiğinde, bakım çalışmalarının yeni bir BSK kaplaması yerine harç tipi kaplama yapılması durumunda yaklaşık % 40 daha ekonomik olduğu hesaplanmıştır. Sadece bakım maliyeti olarak karşılaştırıldığında ise BSK'ya oranla Harç tipi kaplamalar yaklaşık 2,5 kat daha ekonomiktir. Kaza oranlarındaki azalma ve daha düşük maliyetler de göz önüne alındığında yüzey iyileştirme yöntemlerinden olan harç tipi kaplamaların bitümlü sıcak karışıma göre tercih edilebileceği görülmektedir.

Çalışma sonuçlarından da görülebileceği gibi, harç tipi kaplamalar gerek ekonomik gerek güvenlik gerekse performans açısından BSK'ya kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. İzmir ilinde yaygın olarak kullanılmayan harç tipi kaplamaların yol yüzey özelliklerini iyileştirme çalışmaları için uygulanması önerilir.

## **Teşekkür**

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teşekkür ederiz.

Bu çalışma DEÜ BAP 2015 KB FEN 029 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. DEÜ BAP Koordinatörlüğüne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Çalışma kapsamında yapılan tüm ölçüm ve gözlemler sırasında verdikleri destekler için, İzmir Emniyet Müdürlüğü, İzmir Trafik Denetleme Şube Müdürlüğü ve İzmir Büyükşehir Belediyesine teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Kane, M., & Cerezo, V. (2015). A contribution to tire/road friction modeling: From a simplified dynamic frictional contact model to a “Dynamic Friction Tester” model. *Wear*, 342, 163-171.
- [2] Praticò, F. G., Vaiana, R., & Fedele, R. (2015). A study on the dependence of PEMS acoustic properties on incidence angle. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(7), 632-645.
- [3] Dong, Q., & Huang, B. (2012). Evaluation of influence factors on crack initiation of LTPP resurfaced-asphalt pavements using parametric survival analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(2), 412-421.
- [4] Tarefder, R. A., Ahmad, M., & Hossain, M. I. (2016). Pavement maintenance procedures with and without milling materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(1), 20-29.
- [5] Rado, Z., Yager, T.J., Wambold, J.C. ve Hall, J.W., (2006). Guide for pavement friction, final report preraped for NCHRP, Project No:1-43.
- [6] International Organization for Standardization (ISO), (1997). Characterization of pavement texture by use of surface profiles, part 1: Determination of mean profile depth, ISO 13473-1.
- [7] Fuentes, L., Gunaratne, M., de León Izeppi, E., Flintsch, G., & Martinez, G. (2012). Determination of pavement macrotexture limit for use in International Friction Index model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2306), 138-143.
- [8] Buddhavarapu, P., Smit, A. F., & Prozzi, J. A. (2015). A fully Bayesian before–after analysis of permeable friction course (PFC) pavement wet weather safety. *Accident Analysis & Prevention*, 80, 89-96.
- [9] Montella, A., & Imbriani, L. L. (2015). Safety performance functions incorporating design consistency variables. *Accident Analysis & Prevention*, 74, 133-144.
- [10] Li, P., & He, J. (2016). Geometric design safety estimation based on tire–road side friction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 63, 114-125.
- [11] Wang, Y., Wang, G., & Mastin, N. (2011). Costs and Effectiveness of Flexible Pavement Treatments: Experience and Evidence. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(4), 516-525.
- [12] Hajj, E., Loria, L., Sebaaly, P., Borroel, C., & Leiva, P. (2011). Optimum time for application of slurry seal to asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2235), 66-81.
- [13] Şengöz, B., Tanyel, S., Topal A., Gümüştekin, Ş. ve Açar, E. (2012). Yol kaplama yüzeylerinin mikro-makro pürüzlülüğünün görüntü analiz yöntemleri ile belirlenmesi, sonuçların trafik güvenliği açısından değerlendirilmesi. MAG 108M293 no'lu TÜBİTAK Projesi, Ankara.

- [14] American Standard of Testing Materials. (2005). ASTM E1911–09, Standard test method for measuring paved surface frictional properties using the dynamic friction tester. ASTM International, Volume 04, West Conshohocken, PA, United States.
- [15] Rado, Z., Analysis of texture models, PTI Report No. 9510, Pennsylvania Transportation Institute, Penn State University, State College, Pennsylvania, 1994.
- [16] Hall, J.W., Smith, K.L, Glover L.T., Wambold, J.C., Yager, T.J., Rado, Z., Guide for pavement friction, NCHRP, Project No:01–43, 2009.
- [17] American Standard of Testing Materials. (2011). ASTM E 1960–07, Standard practice for calculating international friction index of a pavement surface. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [18] İzmir Büyükşehir Belediyesi, (2013). İzbeton A.Ş 60118 No’lu ihale, İzmir ili muhtelif cadde ve sokaklarda çift kat harç tipi asfalt kaplama (Slurry Seal) yapılması yapım işi teknik şartnamesi.

# Geosentetik Kil Örtü Hidrasyon Yönteminin Alt Zemin Koşullarına Bağlı Olarak Değerlendirilmesi

Tuğçe ÖZDAMAR KUL<sup>1</sup>

Ali Hakan ÖREN<sup>2</sup>

## ÖZ

Sunulan çalışma, geosentetik kil örtü (GKÖ) hidrasyonunda esnek duvarlı permametre hücrelerinin kullanıldığı iki yöntemi karşılaştırmaktadır. Çalışma kapsamında GKÖ'ler sıkıştırılmış siltli kum ve zeolit zeminler üzerine yerleştirilmiş ve zamana bağlı olarak alt zeminden su emme miktarları belirlenmiştir. Bu işlem literatürde GKÖ hidrasyonu olarak bilinmektedir. Bu çalışmada GKÖ'ler iki permametre hücresinin kullanıldığı kontrol örnekli yöntem (KÖY) ve daha büyük çaplı tek permametre hücresinin kullanıldığı tek büyük örnekli yöntem (TBÖY) ile hidrate edilmiştir. Hidrasyon süreleri sonunda her iki yöntemle hidrate edilen GKÖ'lerin içindeki bentonitlerin su içerikleri karşılaştırılmıştır. Aynı hidrasyon süreleri için her iki yöntemden elde edilen nihai bentonit su içerikleri arasındaki fark, alt zemin tabakasının siltli kum ve zeolit olmasına göre sırasıyla azami %8 ve %20 olarak belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan hidrasyon yönteminden bağımsız olarak zeolit üzerinde hidrate edilen GKÖ'nün bentonit su içeriği siltli kum üzerinde hidrate edilenden iki kat fazla bulunmuştur (~125% ve 65%). Hidrasyon sonunda alt zeminlerin su içeriği profilleri (alt zemin yüksekliği boyunca) karşılaştırıldığında siltli kum ve zeolitin benzer davranış gösterdiği görülmüştür. KÖY ve TBÖY ile hidrate edilen GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenlikleri hemen hemen aynı elde edilmiş olmasına rağmen, hidrolik davranışlar birbirinden farklıdır. Bu farklılık, GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik deneyleri sırasında bünyelerine su almayla devam etmiş olmalarından kaynaklanmıştır. Diğer yanda, KÖY ile şişmiş bentonit partiküllerinin durumu daha iyi görümlenebilmiş, fakat iki adet permametre ve sıkıştırılmış alt zemin kullanılması gerektiğinden bu yöntemin TBÖY'e kıyasla daha pahalı ve zahmetli olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Atık depolama alanı, bentonit, geosentetik kil örtü, hidrasyon, hidrolik iletkenlik, üst örtü.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 29.03.2016 günü ulaşmıştır. 18.04.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.378245

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - tugce.ozdamar@deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ali.oren@deu.edu.tr

## **ABSTRACT**

### **Evaluation of the Hydration Method of Geosynthetic Clay Liners in View of Subsoil Conditions**

Presented study compares two hydration methods for geosynthetic clay liners (GCL) which were conducted through flexible-wall permeameters. In this study, GCLs were hydrated over silty sand and zeolite subsoils. At the end of the hydration durations, bentonite water contents from the control sample method (CSM) that uses two permeameters and the single large sample method (SLSM) that uses one permeameter were compared. There are 8% and 20% differences between the final bentonite water contents obtained from two methods when silty sand and zeolite were used as subsoil, respectively. Regardless of the hydration method used, bentonite water content of GCL hydrated over zeolite was two times greater than that of GCL hydrated over silty sand (~125% and 65%). In addition, subsoil water content profiles along silty sand and zeolite were quite similar. Although the final hydraulic conductivities of the GCLs hydrated with CSM and SLSM were almost the same, the hydraulic behaviors were different. This difference was caused by the water uptake of GCLs during the hydraulic conductivity tests. In contrast, although swelling of bentonite particles can be monitored more easily in CSM, this method is more expensive and troublesome than SLSM as it requires two permeameters and compacted specimens.

**Keywords:** Waste disposal area, bentonite, geosynthetic clay liner, hydration, hydraulic conductivity, cover.

## **1. GİRİŞ**

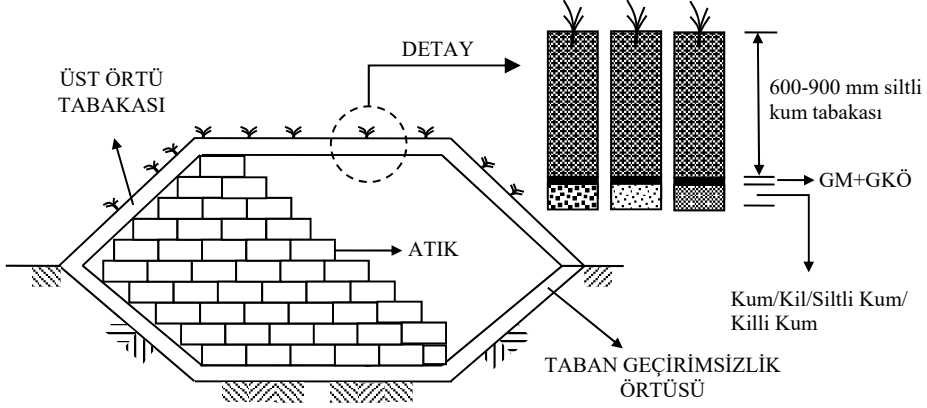
Geosentetik Kil Örtüler (GKÖ'ler) sahip oldukları düşük hidrolik iletkenlik özelliği ve arazide kolay uygulanabilirliği ile katı atık depolama alanları, gölet tabanları, kanal yatakları ve çeşitli maden işletmelerinin atık havuzları dahil pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2].

GKÖ'ler iki geotekstil arasına bentonit serilmek sureti ile imal edilen ince kompozit malzemelerdir. İçindeki bentonitin mineralojisi ile fiziksel ve kimyasal özellikleri GKÖ'lerin geçirimsizliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde, sodyumca zengin GKÖ'lerin su ile süzdürüldüğü durumdaki hidrolik iletkenliklerinin yaklaşık  $2.0 \times 10^{-9}$  cm/s olduğu rapor edilmiştir [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Bu özelliklerin yanı sıra GKÖ içindeki bentonitin sahip olduğu su içeriği değeri de geçirgenlik üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Önceki çalışmalarda GKÖ su içeriğinin artmasının hidrolik iletkenlik üzerinde azaltıcı etkisi olduğu raporlanmıştır [9, 10]. Benzer şekilde, Benson vd. [11] arazide kullanımda olan GKÖ'lerden aldıkları örnekler üzerinde yaptıkları çalışmada en düşük hidrolik iletkenlik değerinin GKÖ su içeriğinin yüksek olduğu durumda (%59 - %67) elde edildiğini raporlamışlardır.

GKÖ'lerin su içerikleri, arazide üzerine yerleştirildikleri zemin tabakalarından bünyelerine çektikleri su miktarı ile ilişkilidir. Özellikle atık depolama alanlarında üst örtü teşkili farklı tipte zemin malzemeleri ile değişik kalınlıklarda yapılabilmektedir (Şekil 1). Genel olarak bakıldığında üst örtü tabakasında GKÖ üzerine oldukça küçük efektif gerilmelerin etki ettiği görülmektedir (10~25 kPa). Düşük efektif gerilme altında geçirimsiz kabul edilen GKÖ'nün

hidrolik iletkenliği de daha yüksek olmaktadır [12, 13]. Bu nedenle GKÖ'nün alt zemin tabakasından emme yoluyla su içeriğini arttırarak şişmesi, düşük hidrolik iletkenliğin uzun süreli muhafaza edilebilmesi için oldukça önemlidir.



Şekil 1. Atık depolama alanı bileşenlerinin basit gösterimi ve üst örtü tabakası detayı.

GKÖ içindeki bentonitin alt zeminden su çekmesi genellikle “hidrasyon” olarak adlandırılmaktadır. Son dönemde GKÖ hidrasyonu ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı artmıştır. Bu konu literatürde iki şekilde ele alınarak incelenmiştir. Çalışmalardan önemli bir kısmı yalnızca GKÖ hidrasyonunu ele almış ve hidrasyonu etkileyen parametreleri incelemiştir [14-18]. Görece daha sınırlı sayıdaki çalışmalarda ise GKÖ hidrasyonu ve hidrolik iletkenlik birlikte ele alınarak araştırılmıştır [19, 20].

GKÖ hidrasyonu üzerine yapılan laboratuvar çalışmalarında arazi koşullarının daha iyi temsil edilebilmesi için GKÖ'ler sıkıştırılmış zeminler üzerinde belirli süreler boyunca hidrate edilmişlerdir. Bu çalışmalarda genellikle iki farklı deney sistemi kullanılmıştır: i) PVC (ve/veya akrilik) kalıpların kullanıldığı sistemler ve ii) esnek duvarlı permametrelerin kullanıldığı kontrol örneklili sistemler.

GKÖ hidrasyonunun PVC kalıplarda gerçekleştirildiği deneylerde istenilen boyutlarda örneklerin hazırlanması mümkün hale gelebilmektedir. Örnek boyutlarının büyütülmesiyle arazi koşulları daha iyi temsil edilebilmektedir. Bu şekilde hazırlanan numunelerin merkezinden hidrolik iletkenlik deneylerinde kullanmak üzere örnekler çıkarılabilmekte ve kalan kısımdan bentonitin hidrasyon sonundaki su içeriği ve diğer bazı fiziko-kimyasal özellikleri belirlenebilmektedir. Dolayısıyla su içeriği (veya diğer parametreler) ile hidrolik iletkenlik ilişkisi daha gerçekçi olarak karşılaştırılabilmektedir.

Literatürde farklı ebatlarda PVC kalıpların kullanıldığı çalışmalara sık rastlanmaktadır. Rayhani vd. [14] 15 cm çapında ve 50 cm yüksekliğinde; Anderson vd. [15], Sarabian ve Rayhani [16] ve Barclay ve Rayhani [17] 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde; Chevrier vd. [18] 9.5 cm çapında ve 30 cm yüksekliğindeki PVC kalıplar içerisinde hazırladıkları farklı tipteki zeminler üzerinde GKÖ'lerin sadece hidrasyon davranışını incelemişlerdir.

Bununla birlikte Katsumi vd. [19] ise 10 cm çapında 15 cm yüksekliğindeki akrilik hücre içerisinde iki farklı GKÖ hidrate etmişlerdir. Hidrasyon sonunda GKÖ'lerin ortasından hidrolik iletkenlik deneylerinde kullanmak üzere 6 cm çapında örnekler almışlardır. GKÖ hidrasyonunun PVC kalıplar içerisinde gerçekleştirildiği uygulamalardan sadece bu çalışmada GKÖ hidrasyonu ile hidrolik iletkenlik ilişkisi irdelenmiştir. Ancak PVC kalıpların kullanıldığı diğer çalışmalarda da olduğu gibi bu çalışmada da uygulanan gerilme sınırlı kalmıştır (1-2 kPa). Zira bu yöntemde nispeten yüksek gerilmelerin uygulanması oldukça zordur. Mesela, 15 cm çapa sahip bir örnek üzerine 1 kPa'lık gerilme uygulamak için 1.8 kg gerekirken, örnek çapı 60 cm'ye çıkarıldığında bu yük 28 kg'a çıkmaktadır. Diğer yanda ise arazi durumunu temsilen gerilme arttırılmak istenirse, yine yüksek miktarda yük uygulanması gerekmektedir (10 kPa gerilme için 15 cm ve 60 cm çaplı örnekler için sırasıyla 18 kg ve 280 kg yük uygulamak gerekmektedir). Bu da laboratuvar ortamında yürütülen çalışmayı zorlaştırmaktadır.

Esnek duvarlı permametrelerin kullanıldığı ikinci deney sisteminde ise deneyler kontrol örnekleri hazırlanarak yürütülmektedir. Bu amaçla iki adet aynı çapta örnek (bu genelde 10 cm olmaktadır) GKÖ rulosundan kesilerek biri hidrolik iletkenlik deneyinde, diğeri ise hidrasyon sonu GKÖ su içeriğinin belirlenmesinde kullanılmak üzere alt zemin tabakaları üzerinde aynı anda hidrate edilmektedir. Bu yöntemde sistem basınç paneline bağlandığı için hidrasyon sırasında örneklere uygulanmak istenen yükleme koşulları laboratuvar ortamında rahatlıkla temsil edilebilmektedir. Fakat bu yöntemin kullanıldığı çalışma sayısı literatürde oldukça azdır. Bradshaw vd. [20] bu yöntemle 10 kPa gerilme altında hidrate ettikleri GKÖ örneklerinin hidrolik iletkenlik davranışlarını incelemişlerdir.

Kontrol örnekli yöntem (KÖY) olarak adlandırılabilir bu sistem ile yapılan deneylerde hidrasyonda kullanılan sıkıştırılmış zemin tabakalarının hedeflenen su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinden saptığı ve/veya bu zeminler üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerin fiziksel özelliklerinin (birim alana gelen bentonit miktarlarının) farklı olduğu durumlarda su içeriği ile hidrolik iletkenlik deney sonuçlarının yorumlanması güçleşebilir. Diğer yanda ise bu sistemde aynı anda iki esnek duvarlı permametre hücresi kullanıldığından yöntem pratik olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu durum ancak Katsumi vd.'nin [19] PVC kalıbı kullanarak yaptığı GKÖ hidrasyonu uygulamasının esnek duvarlı permametre sistemine adapte edilmesi ile ortadan kaldırılabilir. Kullanılacak yeni sistem ile daha büyük çaplı (15 cm) GKÖ'ler istenen gerilmeler altında esnek duvarlı permametre hücrelerinde hidrate edilebilir ve aynı örnek içerisinde hem su içeriği için hem de hidrolik iletkenlik deneyleri için numune alınması mümkün olabilir. Böylece sonuçların yorumlanmasının daha gerçekçi olması beklenmelidir.

Literatürdeki çalışmalarda GKÖ'lerin hidrasyonuna etki eden faktörlerden bazıları (alt zemin tabakası tipi, hidrasyon süresi ve ortam sıcaklığı) araştırılmıştır. Ancak hidrasyon sırasında hangi yöntemin kullanılabilirliği konusunda bir araştırma bu zamana kadar yapılmamıştır. Burada sunulan çalışmada arazi yükleme koşullarının daha iyi yansıtılabilmesi için GKÖ hidrasyonları esnek duvarlı permametre hücreleri içerisinde iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir: i) iki permametre hücresinin kullanıldığı kontrol örnekli yöntem (KÖY) [20] ve ii) Katsumi vd.'den [19] modifiye edilen, fakat PVC kalıplar yerine permametre hücrelerinin kullanıldığı tek büyük örnekli yöntem (TBÖY). Kullanılan yöntemle ilgili olarak hidrasyon sonuçları farklı görüntü oranına sahip alt zemin tabakaları ile birlikte değerlendirilmiştir (alt zemin tabakası görüntü oranı: sıkıştırılmış örnek boyunun (L), çapa



(D) bölünmesi, L/D). Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan alt zemin tabakası tipinin (siltli kum ve zeolit) GKÖ hidrasyonuna etkisi de deney programına dahil edilmiştir. Hidrasyon sonrasında ise GKÖ'lerden bir kısmı esnek duvarlı permametrelerle hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur.

## **2. MALZEME VE YÖNTEM**

### **2.1. Malzemeler**

Sunulan çalışmada GKÖ'lerin hidrasyonu için alt zemin malzemesi olarak Aydın katı atık depolama sahası içinden alınmış doğal zemin ile Rota Madencilik A.Ş.'den temin edilen zeolit kullanılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması'na (USCS) göre doğal zemin malzemesi ve zeolit siltli kum (SM) olarak sınıflandırılmıştır. ASTM D 698-07'ye [21] göre Standart Proctor enerjisi altında siltli kumun optimum su içeriği %12, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 18.3 kN/m<sup>3</sup>; zeolit optimum su içeriği %46, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 10.5 kN/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Hidrasyon için kullanılacak GKÖ, rulo halinde yerli bir firmadan temin edilmiş olup içindeki bentonitin başlangıç su içeriği %12.6'dır. GKÖ içinden çıkarılan bentonitin likit limiti Casagrande deney aleti ile %108 olarak belirlenmiştir.

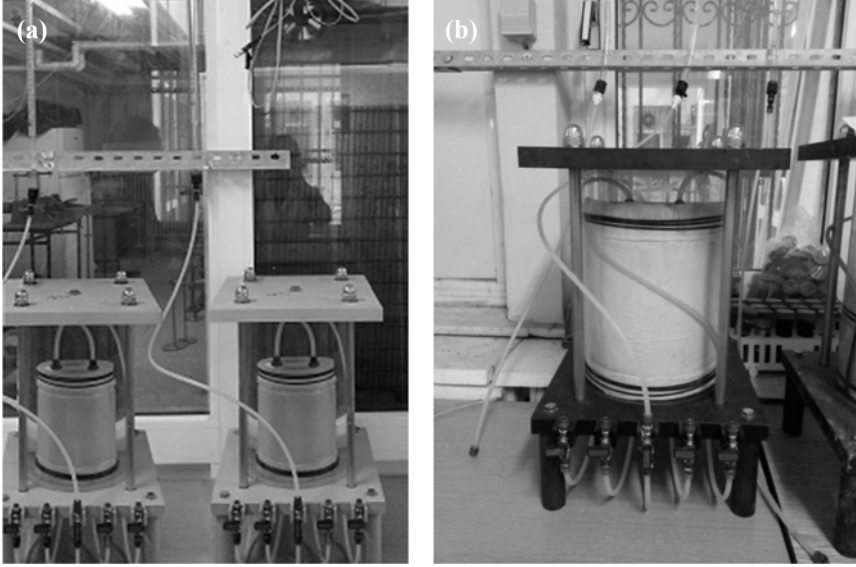
Alt zemin tabakaları paslanmaz çelikten imal edilen kalıplar içinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma deneylerinde 10.2 cm ile 15.2 cm arasında değişen çaplara ve 11.6 cm ile 17.4 cm arasında boylara sahip kalıplar kullanılmıştır.

GKÖ hidrasyonları 10 cm ve 15 cm çapındaki esnek duvarlı permametre hücreleri içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2a-b). Şekil 1'de gösterilen katı atık depolama alanı üst örtüsü üzerine gelebilecek yükü temsilen GKÖ'ler permametreler içerisinde 10 kPa'lık hücre basınçları altında hidrate edilmişlerdir. Bu gerilme laboratuvarında askıda tutulan cam bütrelere (borulara) 1 m yüksekliğinde su doldurmak sureti ile sağlanmıştır. Su yüksekliği hidrasyon süresi boyunca sürekli takip edilmiş, buharlaşma dolayısıyla cam boruda su seviyesi azaldığında eksilen kısım hemen tamamlanmıştır.

Hidrolik iletkenlik deneylerinde de aynı esnek duvarlı permametre hücreleri kullanılmıştır. Permametre sistemi ve kullanılan esnek duvarlı hücrelerle ilgili gerekli bilgi Ören ve Demirkıran'da [22] detaylı olarak verilmiştir.

GKÖ'ler rulolardan kesilirken ve hidrolik iletkenlik deneyleri safhasında süzdürme sıvısı olarak deiyonize su (damıtık su) kullanılmıştır. Deiyonize su, Sartorius Arium Comfort Kombine su saflaştırma sisteminden elde edilmiştir. Sıkıştırma öncesinde alt zeminlerin (siltli kum ve zeolit) ıslatılmasında ve permametre hücrelerine basınç sağlayan cam borularda ise İzmir şebeke suyu kullanılmıştır.

Atık depolama sahası üst örtüsünün laboratuvarında tam olarak temsil edilebilmesi için sıkıştırılmış alt zemin tabakası üzerine GKÖ yerleştirilmiştir. GKÖ'nün üzerine Drefon S-1000 tipi kalın ve örgüsüz geotekstil, onun üzerine de her iki yüzü pürüzsüz HDPE geomembran konduktan sonra hidrasyon işlemine geçilmiştir. Kullanılan bu geosentetik malzemeler, Dokuz Eylül Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan rulolardan kesilerek kullanılmıştır.



Şekil 2. Hidrasyon için kullanılan permametre sistemlerinin genel görünümü: a) 10 cm çaplı permametrelerin kullanıldığı kontrol örnekli yöntem (KÖY) ve b) 15 cm çaplı permametrelerin kullanıldığı tek büyük örnekli yöntem (TBÖY)

## 2.2. Yöntemler

### 2.2.1. Alt Zemin Tabakalarının Sıkıştırılması

Siltli kum ve zeolit, optimum su içeriğinin %2 ıslak kısmında (siltli kum için  $w=14$ ; zeolit için  $w=48$ ) hazırlanmıştır. Doğal neminde olan numunelere plastik leğenlerde püskürteç ile yavaş yavaş su ilave ederek hedeflenen bu su içeriği değerlerine ulaşılmıştır. Islatma sırasında numuneler sürekli karıştırılmış, sonrasında suyun her tarafa homojen dağılabilmesi için ıslak numuneler 24 saat süre ile plastik poşetler içerisinde bekletilmişlerdir. Bekleme süresi sonunda numuneler tekrar plastik leğenlere boşaltılarak son kez karıştırılmışlar, daha sonra da Çizelge 1’de verilen görüntü oranlarında otomatik kompaktör kullanılarak Standart Proctor enerjisi ile sıkıştırılmışlardır. Görüntü oranına bağlı olarak örneklerin Standart Proctor enerjisi altında aynı kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ( $\gamma_d \approx 18.1 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma_d \approx 10.3 \text{ kN/m}^3$ ) sıkıştırılabilmeleri için tabaka sayısı ve her tabakaya uygulanacak darbe adedi yeniden ayarlanmıştır (Çizelge 1).

Sıkıştırılan tabakalar arasında yeterli aderansın sağlanabilmesi için her tabaka üzerine ince uçlu spatula yardımıyla çizikler atılmış, daha sonra takip eden tabaka yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numune yüzeyi metal düzleştirici ile traşlandıktan sonra GKÖ’ye temas edecek en üstteki tabaka yüzeyi tekrar spatula ile çizikler atılarak pürüzlendirilmiştir. Sıkıştırılan numuneler hidrolik krikö ile metal kalıplarından dikkatli bir şekilde çıkarılarak permametre hücrelerine nakledilmiştir.

Çizelge 1. GKÖ altına yerleştirilen alt zemin tabakası boyutları, sıkıştırmada uygulanan tabaka sayısı ve her tabakaya uygulanan darbe adedi

| Örnek Hazırlama Yöntemi | Alt Zemin Görüntü Oranı<br>GO=L/D | Örnek Çapı<br>D (cm) | Örnek Boyu<br>L (cm) | Tabaka Sayısı | Darbe / Tabaka |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------|
| KÖY                     | 1.14                              | 10.2                 | 11.6                 | 3             | 25             |
| TBÖY                    | 1.14                              | 15.2                 | 17.4                 | 5             | 52             |
| TBÖY                    | 0.76                              | 15.2                 | 11.6                 | 3             | 56             |

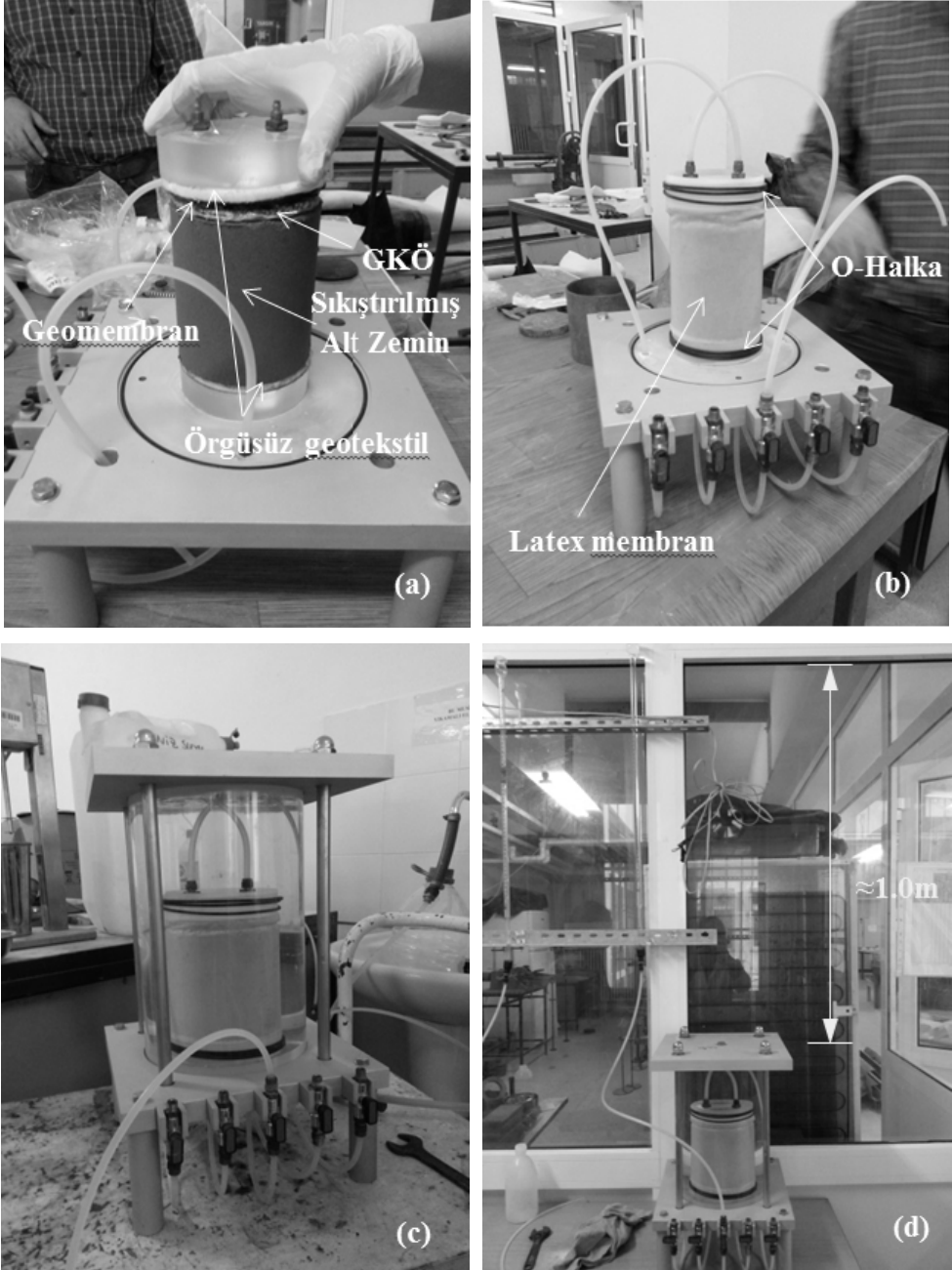
### 2.2.2. Hidrasyon için GKÖ örneklerinin hazırlanması

KÖY yönteminde birisi su içeriğinin belirlenmesinde, diğeri ise hidrolik iletkenlik deneyinde kullanılmak üzere her bir hidrasyon (kür) süresi için ikişer adet örnek hazırlanmıştır. Bunun için GKÖ rulosundan 20 cm×20 cm'lik iki adet kare numune kesilmiş ve bunların ortasına kalemle 10 cm çapında daireler çizilmiştir. Bentonit kaybının önlenmesi amacıyla kalemle işaretlenen kesilme yüzeyleri deiyonize (damıtık) su ile az miktarda ıslatılmıştır. Bir süre ıslak bentonitin şişmesi beklenmiş ve daha sonra keskin uçlu maket bıçağı yardımıyla dairesel GKÖ, karesel parçadan çıkarılmıştır.

GKÖ'ler daha sonra hidrate edilmek üzere esnek duvarlı permametre hücrelerinin içine yerleştirilmiştir. Hidrasyon işleminde katı atık depolama sahasında üst örtü teşkili resmedilmiştir. Bunun için alt başlığın üzerine sırası ile Drefon S-1000 örgüsüz geotekstil, sıkıştırılmış alt zemin (siltli kum veya zeolit), GKÖ, HDPE geomembran, Drefon S-1000 geotekstil ve üst başlık yerleştirilmiştir (Şekil 3a). Tüm bu sistemin üzerinde lateks membran geçirildikten sonra alt ve üst başlığa üçer adet O-halka takılmış ve üst başlık hortum bağlantıları yapılmıştır (Şekil 3b). Permametre hücreleri su ile doldurulmuş (Şekil 3c) ve sistem üzerine 10 kPa'lık hücre basıncı uygulanmıştır (Şekil 3d). GKÖ hidrasyonunun yalnızca alt zemin tabakasından su çekilerek (emilerek) sağlanabilmesi için permametre hücrelerinin girişi ve çıkışı vanaları hidrasyon süresi boyunca kapalı tutulmuştur.

İkinci yöntemde (TBÖY) ise GKÖ rulosundan kesilen 30 cm×30 cm'lik kare numunenin ortasından bir adet 15 cm çapında dairesel örnek kesilmiştir. Alt zemin tabakası olarak kullanılan siltli kum veya zeolit, 15 cm çapındaki kalıpta sıkıştırılmış, sıkıştırılan örnek daha büyük çaptaki alt ve üst başlıklara sahip (15 cm) esnek duvarlı permametre hücresine nakledilmiştir. GKÖ'nün sıkıştırılmış örnek üzerine yerleştirilmesi ve onun üzerine de diğeri geosentetik malzemelerin konulması sırası ile deney esnasında uygulanan diğeri aşamalar KÖY ile aynıdır.

Çalışma kapsamında GKÖ hidrasyonları için KÖY ile 10 adet, TBÖY ile 6 adet olmak üzere toplam 16 adet örnek hazırlanmıştır. Alt zemin olarak siltli kumun kullanıldığı durumda kısa ve uzun dönem hidrasyon sürelerini temsilen 7 ve 62 günlük kür süreleri tatbik edilmiştir. GKÖ'ler sıkıştırılmış zeolitler üzerine yerleştirildiğinde ise esnek duvarlı permametrelerin etkin kullanılabilmesi için yapılan program dahilinde ancak 17 ve 30 günlük hidrasyon süreleri uygulanabilmiştir.



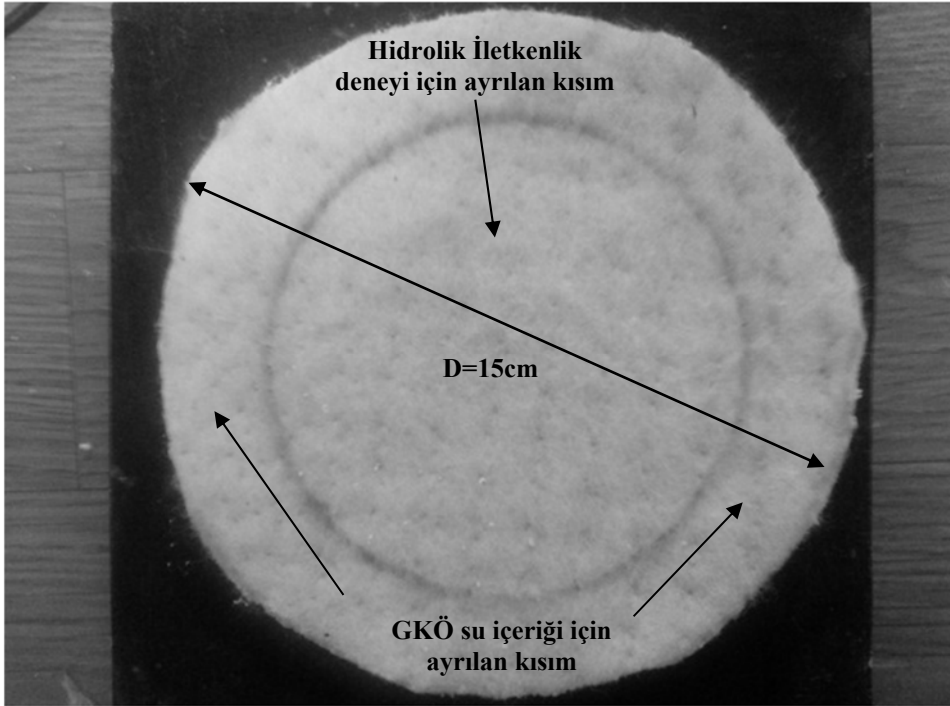
Şekil 3. Hidrasyon için GKÖ örneklerinin hazırlanması: a) GKÖ'nün alt zemin tabakası üzerine yerleştirilmesi, b) lateks membran ve O-halka geçirilmesi, c) hücreye su doldurulması, d) hücre basıncının uygulanması

### 2.2.3. Hidrasyon Sonrası GKÖ'lerin ve Alt Zemin Tabakalarının Su İçeriklerinin Belirlenmesi

Hidrasyon sonunda hücre suyu boşaltılan permametrelin ıslak kısımları (özellikle lateks membran üzeri ve üst başlık) kağıt havlu ile kurulanmış, lateks membran dışarıya doğru sıyrılarak GKÖ ve alt zemine dışarıdan su girişi engellenmiştir. Daha sonra GKÖ ve sıkıştırılmış alt zemin permametre hücresinden çıkarılmıştır.

KÖY ile hidrate edilen GKÖ'lerden biri su içeriğini belirlemek üzere açılmıştır. Bunun için iğneleme yoluyla birbirine bağlanan örgülü ve örgüsüz geotekstillere lifleri keskin uçlu maket bıçağı ile kesilmiştir. Kesim sırasında ekstra özen gösterilerek geotekstiller arasında kalan şişmiş bentonit tabakasının zarar görmesi engellenmeye çalışılmıştır. Bentonit tabakasının mevcut durumu görüntülendikten sonra tamamı su içeriğinin belirlenmesi için 105°C'deki etüvde kurutulmuştur.

TBÖY'de ise hidrate olmuş GKÖ örneklerinin ortasından hidrolik iletkenlik deneylerinde kullanılmak üzere 10 cm çapında ikincil örnekler çıkarılmıştır (Şekil 4). Hidrasyon sonu su içeriğinin belirlenebilmesi için GKÖ'nün kalan kısmındaki geotekstiller KÖY'dekine benzer şekilde ayrılarak bentonit tabakası açığa çıkarılmıştır. Bir spatula ile açığa çıkarılan bentonit sıyrılarak kaba konmuş ve 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur.



Şekil 4. Tek büyük örnekli yöntemde hidrasyon sonrası hidrolik iletkenlik deneyi ve su içeriği tayini için ayrılan kısımların GKÖ üzerinde gösterilmesi

Uygulanan kür sürelerinin sonunda alt zemin tabakalarının derinlik boyunca su içerikleri de belirlenmiştir. Bunun için sıkıştırılmış alt zeminler spatula ile 2.5 cm'lik tabakalara bölünmüştür. Her iki yöntemde de en altta kalan tabaka kalınlığı örnek boyuna bağlı olarak değişkenlik göstermiştir (son tabaka boyları 11.6 cm ve 17.4 cm yüksekliğindeki zeminler için sırasıyla 1.6 cm ve 2.4 cm olmuştur). Bölünen tabakaların su içerikleri 105 °C'deki etüvde 24 saat boyunca kurutulduktan sonra belirlenmiş ve sonuçlar tabaka ortası su içeriğini temsil edecek şekilde sunulmuştur.

#### **2.2.4. Hidrolik İletkenlik Deneyleri**

KÖY ile hidrate edilen diğer GKÖ ve TBÖY ile hidrate edildikten sonra orta kısımdan kesilerek çıkarılan GKÖ, hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışma boyunca toplam 9 adet hidrolik iletkenlik deneyi yapılmıştır. Deneylerde GKÖ'lerin alt ve üst yüzlerine homojen süzdürme sağlaması için poroz taş yerine Drefon S-1000 tipi geotekstil konmuş ve bu şekilde esnek duvarlı permametre hücresinin alt başlığı üzerine yerleştirilmiştir. Üst başlık da yerleştirildikten sonra kenardan sızmayı önlemek için alt başlık ile üst başlık arasında kalan kenar yüzey Na-bentonit ile sıvanmıştır. Lateks membran geçirilip, O-halkalarda başlıklara tutturulduktan sonra hortum bağlantıları yapılmış ve permametre hücresi kapatılarak içine su doldurulmuştur.

Hidrolik iletkenlik deneyleri ASTM D6766-12 [23] takip edilerek, fakat geri basınç uygulanmadan yapılmıştır. Bu nedenle cam boru (büret) poliüretan hortumla permametre girişine bağlanmış, GKÖ'den süzülen suyu toplamak için permametre çıkış ağzı atmosfere açık şekilde ölçekli mezür içine yerleştirilmiştir. Süzdürme yönü yukarıdan aşağı olacak şekilde permametreye su verilmiştir. Deney boyunca hücre basıncı 35 kPa'da sabit tutulmuştur. Büretteki su seviyesine bağlı olarak deneylerde uygulanan ortalama efektif gerilme 27 kPa, hidrolik eğim ise 190 hesaplanmıştır. Hidrolik iletkenlik deneyleri 3-6 ay arasında sürdürüldükten sonra tamamlanmıştır.

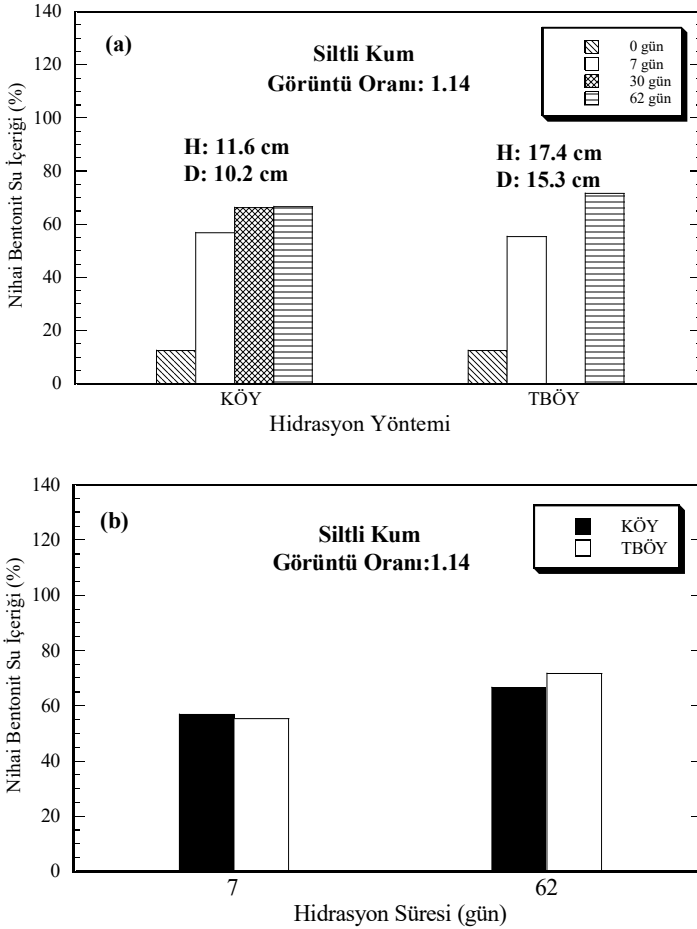
### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

#### **3.1. Hidrasyon Yöntemlerinin Alt Zemin Görüntü Oranlarına Bağlı Olarak Karşılaştırılması**

##### **3.1.1. Aynı Görüntü Oranında Sıkıştırılmış Siltli Kum Tabakaları ile GKÖ Hidrasyonu**

Hidrasyon yöntemlerinin GKÖ su içeriğine etkisi ilk olarak yüksek görüntü oranına sahip sıkıştırılmış alt zemin tabakaları üzerinde denenmiştir. GKÖ'ler, aynı görüntü oranında (GO: 1.14) fakat farklı çap ve boylarda sıkıştırılmış siltli kum tabakaları üzerinde KÖY ile 7, 30 ve 62 gün; TBÖY ile 7 ve 62 gün boyunca hidrate edilmiştir. Hidrasyona maruz bırakılan GKÖ'lerin esnek duvarlı permametre hücreleri içinde yalnızca sıkıştırılmış siltli kum zeminden su emmesi sağlanmıştır. Bu süreler sonunda bentonitlerin sahip olduğu su içerikleri Şekil 5'de hidrasyon yöntemine ve süresine bağlı olarak gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, her iki yöntemde GKÖ'lerin ilk 7 günde alt zeminden önemli miktarda su emdiği, sonraki süreçte ise bentonit su içeriğinin bir miktar daha artarak hemen hemen sabit bir değere ulaştığı görülmüştür (Şekil 5a). Diğer bir deyişle, başlangıç bentonit su içeriği %12.6 olan GKÖ'lerin 7 günlük hidrasyon süresi sonunda nihai su içerikleri KÖY'de

%56.9'a, TBÖY'de ise %55.4'e yükselmiş; hidrasyon süresi 62 güne çıkarıldığında ise nihai bentonit su içerikleri bir miktar daha artarak KÖY'de ve TBÖY'de sırası ile %66.7 ve %71.7 olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Herhangi bir hidrasyon süresi için karşılaştırma yapıldığında (Şekil 5b), 7 günlük hidrasyon sonunda her iki yöntem arasında nihai bentonit su içerikleri açısından pratikte bir fark olmadığı; 62 günlük hidrasyon sonunda ise TBÖY ile elde edilen su içeriğinin KÖY'den elde edilene kıyasla %8 daha fazla olduğu görülmüştür.



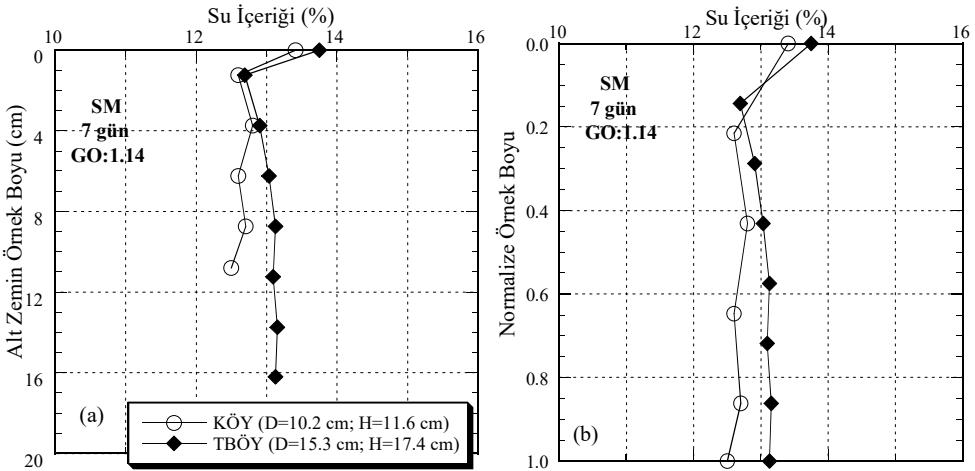
Şekil 5. Aynı görüntü oranında sıkıştırılmış siltli kum üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerin nihai bentonit su içeriklerinin: a) hidrasyon süresi ve b) yöntemine bağlı olarak karşılaştırılması

Hidrasyon sırasında emme yoluyla su içeriği artan bentonitler, alt zemin tabakalarının su içeriklerinde de değişime sebep olmuştur. Bu değişimin belirlenmesi GKÖ'lerin su emme

davranışının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Kullanılan hidrasyon yönteminin sıkıştırılmış siltli kumun su içeriği üzerindeki etkisi 7 günlük kür süresi için Şekil 6'da iki biçimde gösterilmiştir. İlk gösterimde alt zeminin 2.5 cm'lik tabakalara bölünmesi suretiyle belirlenen su içerikleri, tabaka ortaları baz alınarak toplam boy için sunulmuştur (Şekil 6a). Fakat bu gösterimde kullanılan yöntemle ilgili olarak alt zemin görüntü oranları aynı olmasına rağmen örnek boylarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir (11.6 cm ve 17.4 cm). Sonuçların bir başka şekilde de kıyaslanabilmesi için su içeriği belirlenen her tabaka yüksekliği, toplam boya bölünmek suretiyle normalize edilmiştir. Böylece Şekil 6b'de gösterilen ikinci grafik hazırlanmıştır.

Şekil 6a ve 6b'den, tabaka boyunca meydana gelen su içeriği değişim izlerinin her iki yöntemde de birbirine oldukça benzediği görülebilir. Her iki yöntemde de hidrasyon sonrasında GKÖ ile temas eden en üst alt zemin tabakalarındaki su içeriklerinin ani azaldığı ve takip eden tabakalara kıyasla daha az su içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Alt zemine göre nispeten daha kuru ve daha ince daneli bentonit partiküllerinden oluşan GKÖ (%12.6), kapiler kuvvetler etkisiyle siltli kum tabakasından daha fazla su emmiştir. Bunun neticesinde alt zeminin GKÖ ile temas eden üst tabakasından su içeriği azalırken GKÖ'de su içeriği önemli miktarda artmıştır (Şekil 6).

Diğer yanda ise tabaka boyunca TBÖY'den elde edilen su içerikleri, KÖY'den elde edilenlere kıyasla bir miktar daha yüksektir. Bu farkın, TBÖY'de hazırlanan siltli kum zeminin başlangıç su içeriğinin KÖY'de hazırlanan siltli kum zemine göre daha yüksek olması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. GKÖ hidrasyon yöntemine bağlı olarak 7 gün sonunda sıkıştırılmış siltli kumda: a) orijinal ve b) normalize edilmiş örnek boyunca meydana gelen su içeriği değişimleri

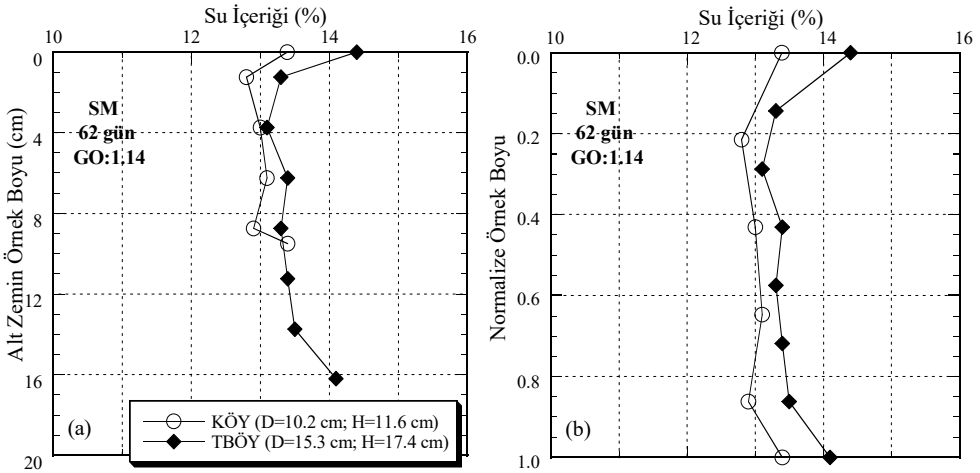
Siltli kumun 62 günlük kür süresi sonundaki su içeriği değişimi örnek boyu ve normalize edilmiş örnek boyu için Şekil 7a-b'de sunulmuştur. Genel olarak, 62 günlük hidrasyon sonunda elde edilen alt zemin su içeriği profillerinin 7 günlük hidrasyon süresi sonunda elde edilenlere



oldukça benzediği görülmektedir. Bununla birlikte, 62 gün sonunda TBÖY'den elde edilen siltli kum su içeriklerinin KÖY'e göre daha yüksek olduğu bulgulanmıştır. Bunda, siltli kum başlangıç su içeriğinin TBÖY'de daha fazla olması etkili olmuştur.

Diğer yanda 62 günlük hidrasyon süresi için tabaka bazlı inceleme yapıldığında, kullanılan yöntemle bağlı olarak alt zemin su içeriği profilleri arasında bir miktar fark olduğu görülmektedir. KÖY'de en üstteki tabakada su içeriği azaldıktan sonra takip eden tabakada su içeriği artarken, TBÖY'de ise en üstteki iki tabakada su içeriği azalmış ve daha sonra tekrar artmaya başlamıştır (Şekil 7a). Fakat Şekil 7b'de gösterilen normalize boylar dikkate alındığında, yöntemler arasında sergilenen davranışın birbirine benzer olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, alt zeminde su içeriği değişimi hemen hemen aynı normalize derinlikte değişmeye başlamıştır. Son tabakalarda ise (örnek taban kısımları) alt zemin su içeriği değerlerinin her iki yöntemde de bir miktar arttığı görülmektedir. Bu durumun yerçekimi etkisi ile belirli bir süre geçtikten sonra suyun alt tabakalara ilerlemesinden kaynaklandığı söylenmektedir [17]. Benzer davranışa, süre kısa olduğu için 7 gün hidrate edilen alt zemin tabakalarında rastlanmamıştır.

Çalışmada uygulanan hidrasyon süreleri dikkate alındığında, her iki yöntemde kullanılan alt zemin tabakası boyutları birbirinden farklı olmasına rağmen görüntü oranı aynı olduğundan tabaka boyunca meydana gelen su içeriği değişimleri de benzer elde edilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7). Aynı şekilde, GKÖ su içerikleri de birbirine oldukça yakın bulgulanmıştır (Şekil 5a-b).



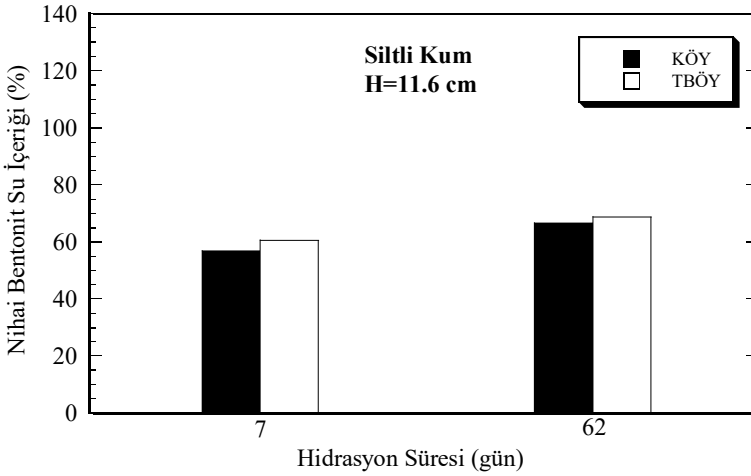
Şekil 7. GKÖ hidrasyon yöntemine bağlı olarak 62 gün sonunda sıkıştırılmış siltli kumda: a) orijinal ve b) normalize edilmiş örnek boyunca meydana gelen su içeriği değişimleri

### 3.1.2. Farklı Görüntü Oranında Sıkıştırılmış Siltli Kum Tabakaları ile GKÖ Hidrasyonu

Aynı görüntü oranına sahip siltli kumun GKÖ hidrasyonu üzerine etkisi belirlendikten sonra yöntem karşılaştırması farklı görüntü oranlarında hazırlanan sıkıştırılmış siltli kum üzerine yerleştirilen GKÖ'ler için incelenmiştir. Bu aşamada siltli kum boyu her iki yöntemde de eşit tutulmuş fakat görüntü oranları değiştirilmiştir (KÖY'de 1.14 ve TBÖY'de 0.76). Diğer bir deyişle, GKÖ'ler aynı boyda (H=11.6 cm), fakat farklı çaplarda sıkıştırılan siltli kum tabakaları üzerinde kısa ve uzun dönemi temsilen 7 ve 62 gün boyunca hidrate edilmiştir.

Yeni durumda hidrasyon yöntemlerinin GKÖ davranışına etkisi Şekil 8'de verilmiştir. TBÖY'de görüntü oranının azaltılmasıyla her iki yöntemden elde edilen nihai bentonit su içerikleri arasında kısa dönem hidrasyonda (7 gün) %7'lik bir fark bulunmuş, ancak hidrasyon süresinin 62 güne çıkarılmasıyla bentonit su içerikleri arasındaki fark %3'e düşmüştür.

Siltli kumda örnek boyunca elde edilen su içeriği değişimleri daha önce Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen davranışlara oldukça benzerlik göstermektedir. Bu nedenle örnek boyunun sabit tutulup, görüntü oranının değiştirildiği durum için alt zemin tabakası su içeriği profillerinin burada tekrar gösterilmesine gerek görülmemiştir.



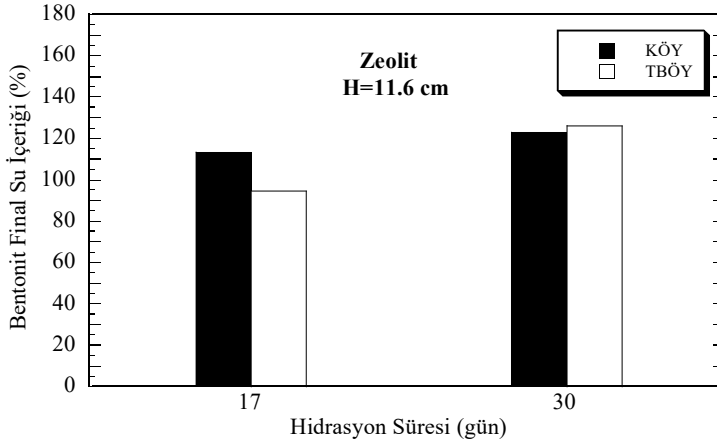
Şekil 8. Farklı görüntü oranında sıkıştırılmış siltli kum üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerin nihai bentonit su içeriklerinin hidrasyon yöntemine bağlı olarak karşılaştırılması

### 3.1.3. Farklı Görüntü Oranında Sıkıştırılmış Zeolit Tabakaları İle GKÖ Hidrasyonu

Yöntem karşılaştırması önceki kısımlarda siltli kum zemin için yapılmış olup, bu zeminin %14 su içeriğinde sıkıştırılarak alt zemin tabakaları hazırlanmıştır. Fakat daha yüksek su içeriğine sahip alt zeminlerin kullanılması durumunda yöntem tipine bağlı olarak bentonit su içeriğinde değişim olup olmayacağı belli değildir. Alt zemin tabakası su içeriğinin artırılmasının GKÖ hidrasyonu üzerinde olumlu etkisinin bulunduğu bilinmektedir.

Literatürde bu etki killi kum ve siltli kumlar için irdelenmiştir [15, 16, 18]. Ancak bu tip zeminlerin daha yüksek su içeriği değerlerinde sıkıştırılması pratikte mümkün olamamaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında kil ve siltli kumlara kıyasla daha yüksek optimum su içeriğine sahip olan ve sıkıştırma davranışı sergileyen zeolit [24] ikinci alt zemin tabakası olarak seçilmiş ve yöntem karşılaştırması bu tabakalar üzerinde hidrate edilen GKÖ'ler için de yapılmıştır.

Sıkıştırılmış zeolit kullanılarak hidrasyon yöntemlerinin GKÖ davranışı üzerindeki etkisi yine 1.14 ve 0.76 görüntü oranına sahip numuneler üzerinde incelenmiştir (örnek boyları eşit tutulmuştur). Yapılan deneylerde yoğun permametre kullanımının gerekliliği ve deney programının sıkışıklığı göz önüne alınarak GKÖ'ler sıkıştırılmış zeolit tabakaları üzerinde 17 ve 30 gün boyunca hidrate edilmiştir. Kullanılan hidrasyon yöntemlerinin GKÖ davranışına etkisi Şekil 9'da verilmiştir. Sıkıştırılmış zeolit üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerin nihai bentonit su içerikleri 17 günlük kür süresi sonunda KÖY ve TBÖY'de sırasıyla %113.1 ve %94.7; 30 günlük kür sonunda ise bir miktar daha artarak KÖY'de 122.8; TBÖY'de 126.1'e çıkmıştır. Elde edilen bentonit su içerikleri sıkıştırılmış siltli kum zemin üzerinde KÖY ve TBÖY ile elde edilen maksimum değerlerden (62 günlük hidrasyon süresi sonunda KÖY'de %66.7; TBÖY'de %68.8) oldukça yüksektir. Diğer bir deyişle GKÖ hidrasyonunda alt zemin tabakası olarak sıkıştırılmış zeolit kullanılmasıyla nihai bentonit su içeriklerinde siltli kuma kıyasla daha kısa bir sürede yaklaşık iki katlık artış gözlenmiştir.

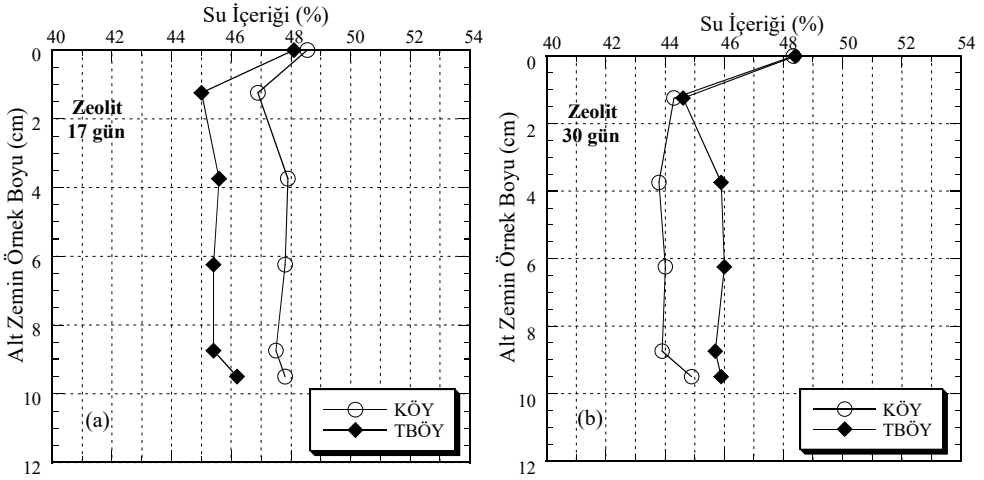


Şekil 9. Farklı görüntü oranında sıkıştırılmış zeolit üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerin nihai bentonit su içeriklerinin hidrasyon yöntemine bağlı olarak karşılaştırılması

Aynı ve farklı görüntü oranlarına sahip siltli kum ile GKÖ hidrasyonlarında TBÖY'den elde edilen nihai bentonit su içerikleri KÖY'den elde edilenlerden %8'e kadar daha yüksek bulunmuştur (Şekil 5 ve Şekil 8). Benzer durum 30 gün boyunca sıkıştırılmış zeolit üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerde de görülmüştür. Bu süre sonunda TBÖY ile hidrate edilen GKÖ, KÖY'dekine kıyasla %3 daha fazla nihai bentonit su içeriği değerine ulaşmıştır. Her

iki yöntem arasındaki fark ne kadar olursa olsun, zeolitin GKÖ hidrasyonuna etkisi siltli kuma göre daha fazladır ve bu durum her iki yöntemle de teyit edilmiştir.

Kullanılan hidrasyon yönteminin alt zemin su içeriği profili üzerindeki etkisi zeolit için de irdelenmiştir (Şekil 10). Şekil 10a'dan da görüleceği gibi 17 günlük hidrasyon süresi sonunda her iki yöntemden elde edilen zeolit su içeriği profilleri siltli kum için elde edilenlerle oldukça benzerlik arz etmektedir. Diğer bir deyişle, GKÖ'ye temas eden en üst zeolit tabakasında su içeriğinde azalma, takip eden tabakada bir miktar artış ve sonrasında stabil değerler bulgulanmıştır (Şekil 10a). Bununla birlikte GKÖ hidrasyonunda TBÖY'ün kullanılması durumunda KÖY'dekine kıyasla daha düşük alt zemin su içeriği değerleri elde edilmiştir. Bu durum sıkıştırılmış zeolitlerin başlangıç su içeriklerinde bir miktar fark olmasından kaynaklanmış olabilir.



Şekil 10. GKÖ hidrasyon yöntemine bağlı olarak sıkıştırılmış zeolitte meydana gelen su içeriği değişimi: a) 17 gün hidrasyon ve b) 30 gün hidrasyon

Daha uzun hidrasyon süresi dikkate alındığında (30 gün), zeolit boyunca meydana gelen su içeriği değişimleri ise Şekil 10b'de gösterilmiştir. Birbirine oldukça yakın başlangıç su içeriği değerine sahip olan zeolitlerin, GKÖ ile temas eden en üst tabakalarında su içerikleri %44.5'e düşmüş ve bu tabakadan sonra hidrasyon yöntemine bağlı olarak su içeriği profilleri değişiklik göstermiştir. KÖY'ün kullanılması durumunda en üst tabakayı takip eden tabakada alt zemin su içeriği %43.8'e düşmüş ve bu değer devam eden tabakalarda yaklaşık olarak sabit kalmıştır. TBÖY'ün kullanıldığı durumda ise ikinci tabakada alt zemin su içeriği artarak %45.9'a çıkmış ve geri kalan tabakalarda da bu değere oldukça yakın su içerikleri elde edilmiştir.

Zeolit su içeriği profilinde meydana gelen bu fark zeolitlerin başlangıç su içeriklerine bağlı olmayıp (zira birbirine çok yakınlardır), üzerlerine yerleştirilen GKÖ'lerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Burada GKÖ özelliği, "birim alana düşen bentonit kütlelerini" ifade etmek için kullanılmıştır. TBÖY'de yerleştirilen GKÖ'nün birim alana düşen bentonit kütlesi 3.92

kg/m<sup>2</sup> iken KÖY'de 4.05 kg/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Birim alanda daha düşük miktarda bentonit bulunması, bentonit su içeriğinin artacağı anlamına gelmektedir (su miktarı daha az miktardaki kuru ağırlığa bölünecektir). Gerçekten de TBÖY'den elde edilen nihai bentonit su içerikleri KÖY'den elde edilenlere kıyasla daha fazladır (%126.1'e karşılık %122.8).

### 3.2. Gözlemsel Yöntem Karşılaştırması

Her iki yöntemle siltli kum alt zemin tabakası üzerinde 62 gün hidrate edilen GKÖ'lerin durumu gözlemsel incelemeye tabi tutulmuştur. Bunun için hidrasyon süresi tamamlandıktan sonra yukarıda bahsedildiği gibi GKÖ'ler kesilmiş ve bentonit tabakası ortaya çıkarılmıştır.

KÖY ile bentonit partiküllerinin şişerek geçirimsiz bir tabaka oluşturduğu, fakat buna rağmen hala partiküller arasında yer yer boşlukların olduğu görülmektedir. Bu boşlukların dağılımı ve boyutları GKÖ'nün hidrolik iletkenlik davranışını değiştirebileceğinden oldukça önem arz etmektedir (Şekil 11).



Şekil 11. Sıkıştırılmış siltli kum üzerinde kontrol örneklî yöntem (KÖY) ile 62 gün hidrasyon sonunda GKÖ'de açığa çıkarılan bentonitin durumu

GKÖ hidrasyonu için uygulanan ikinci yöntemden (TBÖY) elde edilen bentonitin fotoğrafı ise Şekil 12'de gösterilmiştir. GKÖ'nün ortasındaki boşluk, hidrolik iletkenlik deneylerinde

kullanmak üzere alınan örnekten kaynaklanmaktadır. Şekil 12’de de bentonitlerin şişerek geçirimsiz bir tabaka oluşturduğu görülmektedir. Fakat bu yöntemde tabaka üzerindeki çatlakların KÖY’e göre daha yoğun olduğu gözlenmiştir. GKÖ’den arta kalan kısmın genişliğinin az olması (yaklaşık 2 cm) nedeniyle lifler zor kesilmiş; bu durum örneğin örselenmesine ve bentonit tabakası üzerinde doğal olmayan düzlemsel çatlakların oluşmasına sebep olmuştur (Şekil 12). Diğer taraftan TBÖY ile kenarlarda kalan kısmın alanı (Şekil 12), KÖY’deki örneğin alanından (Şekil 11) daha fazladır (98 cm<sup>2</sup>’ye karşılık 79 cm<sup>2</sup>). Bu alan fazlalığı, su içeriğine ilave olarak bentonitin diğer bazı özelliklerinin belirlenmesi istendiğinde, KÖY’e kıyasla TBÖY’den daha fazla bentonit elde edilebileceği anlamına gelmektedir. Daha fazla bentonit ile bu tip uzun soluklu deneylerden elde edilen bulguların yorumlanmasına yardımcı olacak ilave deneyler yapılabilir (serbest şişme, katyon değişim kapasitesi, yer değiştirebilir katyon miktarı, özgül yüzey alan vb).



Şekil 12. Sıkıştırılmış siltli kum üzerinde tek büyük örnekli yöntem (TBÖY) ile 62 gün hidrasyon sonunda GKÖ’de açığa çıkarılan bentonitin durumu

### 3.3. Hidrolik İletkenlik Deney Sonuçları

Sıkıştırılmış siltli kum ve zeolit alt zemin tabakaları üzerinde KÖY ve TBÖY ile hidrate edilen GKÖ’lerin nihai hidrolik iletkenlik sonuçları Çizelge 2’de özetlenmiştir. Siltli kum üzerinde hidrate edilen GKÖ’lerin hidrolik iletkenlikleri alt zemin görüntü oranı, deney yöntemi ve hidrasyon süresinden bağımsız olarak  $1.7 \times 10^{-9}$  cm/s ile  $3.2 \times 10^{-9}$  cm/s arasında

ölçülmüştür. Aynı vurgu, alt zemin tabakası tipi zeolit olduğunda da geçerli olup, GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenlikleri  $1.8 \times 10^{-9}$  cm/s ile  $5.7 \times 10^{-9}$  cm/s arasında bulgulanmıştır. Bu değerler siltli kum tabaka üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerin hidrolik iletkenliklerinden bir miktar fazla olsa da bu farkın deneyler arasındaki küçük değişimlerden (efektif gerilme, hidrolik eğim vb) kaynaklanmış olması oldukça muhtemeldir ve bu nedenle pratikte önemsiz kabul edilebilir.

*Çizelge 2. Farklı alt zemin tabakaları, kür süreleri ve deney yöntemi ile hidrate edilen GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik sonuçları*

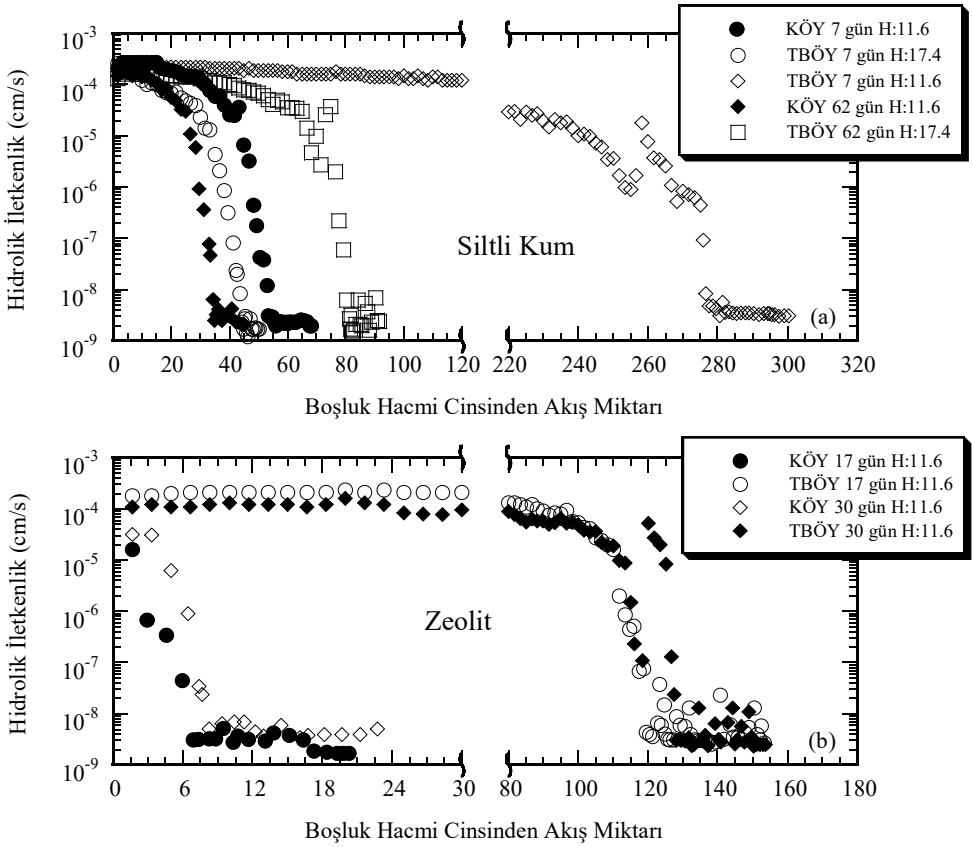
| Deney No | Alt Zemin Tabakası Tipi | Alt Zemin Örnek Boyu (cm) | Alt Zemin Görüntü Oranı | Deney Yöntemi | Hidrasyon Süresi (gün) | Hidrolik İletkenlik (cm/s) |
|----------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|------------------------|----------------------------|
| 1        | Siltli Kum              | 11.6                      | 1.14                    | KÖY           | 7                      | $2.3 \times 10^{-9}$       |
| 2        | Siltli Kum              | 17.4                      | 1.14                    | TBÖY          | 7                      | $1.7 \times 10^{-9}$       |
| 3        | Siltli Kum              | 11.6                      | 0.76                    | TBÖY          | 7                      | $3.2 \times 10^{-9}$       |
| 4        | Siltli Kum              | 11.6                      | 1.14                    | KÖY           | 62                     | $2.6 \times 10^{-9}$       |
| 5        | Siltli Kum              | 17.4                      | 1.14                    | TBÖY          | 62                     | $1.7 \times 10^{-9}$       |
| 6        | Zeolit                  | 11.6                      | 1.14                    | KÖY           | 17                     | $1.8 \times 10^{-9}$       |
| 7        | Zeolit                  | 11.6                      | 0.76                    | TBÖY          | 17                     | $5.7 \times 10^{-9}$       |
| 8        | Zeolit                  | 11.6                      | 1.14                    | KÖY           | 30                     | $4.1 \times 10^{-9}$       |
| 9        | Zeolit                  | 11.6                      | 0.76                    | TBÖY          | 30                     | $2.5 \times 10^{-9}$       |

GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenlikleri birbirine yakın elde edilmiş olsa da hidrolik iletkenlik davranışları arasında önemli farklar elde edilmiştir. Çizelge 2'de verilen hidrolik iletkenlik deneylerinin tümünde başlangıç geçirgenlik değerleri yaklaşık  $2.0 \times 10^{-6}$  cm/s elde edilmiştir. Daha sonra GKÖ'lerden belirli bir "boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM)" kadar su geçişi gerçekleştiğinde hidrolik iletkenlikler azalmaya başlamış ve ortalama  $2.8 \times 10^{-9}$  cm/s seviyelerine kadar inmiştir (Şekil 13). Fakat Şekil 13'te gösterilen hidrolik iletkenlik davranışı deney yönteminden bağımsız olarak elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, uygulanan deney yönteminin GKÖ'lerin hidrolik iletkenlik davranışlarında bir etkisi yoktur.

Hidrolik iletkenlik davranışındaki değişimler, hidrasyon yöntemi veya alt zemin görüntü oranından ziyade hidrasyon süresinden ve dolayısıyla bentonitlerin su içerikleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Hidrasyon sonunda bentonitlerin sahip olduğu su içeriği değerleri düşük olduğu için hidrolik iletkenlik deneyleri sırasında bentonitler bünyelerine su alarak şişmeye devam etmiştir. Hidrasyondan sonra yapılan işleme benzer şekilde hidrolik iletkenlik deneyi tamamlandığında, GKÖ'lerin iğnelenmiş lifleri keskin uçlu maket bıçağıyla kesilmiş ve geotekstiller arasındaki bentonit açığa çıkarılmıştır (Şekil 14). Daha sonra bu

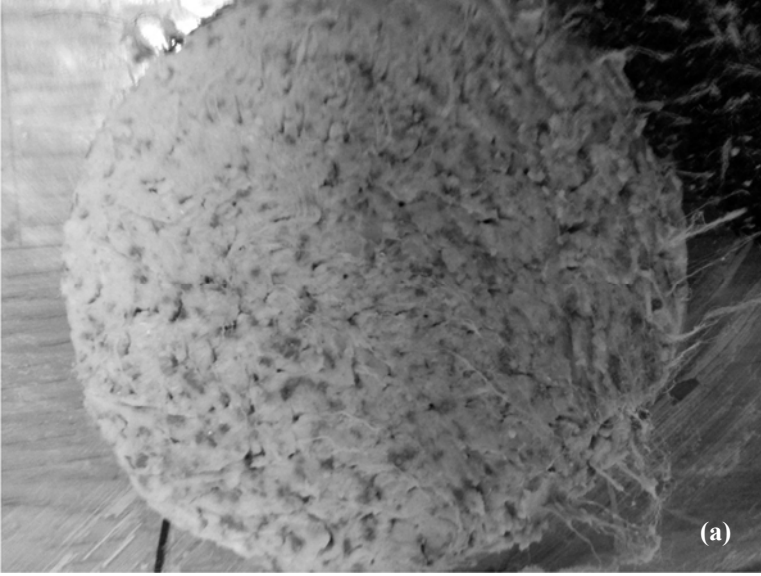
bentonitler, Şekil 11 ve Şekil 12’de verilen hidrasyon sonrasındaki bentonitlerin durumu ile karşılaştırılmıştır.

Hidrasyondan sonra bentonit partüküllerinin topaklar oluşturduğu ve topaklar arasında yer yer boşlukların olduğu görülürken (Şekil 11 ve Şekil 12), hidrolik iletkenlik deneyi sırasında bentonitlerin şişmesiyle GKÖ içinde daha homojen yer kaplayan partüküllerin topaklar arasındaki boşlukları kapattığı gözlenmiştir (Şekil 14). Bu bulgu su içeriği sonuçlarıyla da desteklenmektedir. Sıkıştırılmış siltli kum ve zeolit tabakaları üzerinde hidrate edilen GKÖ’lerin nihai su içerikleri sırasıyla %72 ve %126 iken hidrolik iletkenlik deneyi tamamlandığında bu değerler sırasıyla %186 ve %152’ye yükselmiştir.



Şekil 13. Sıkıştırılmış alt zemin tabakaları üzerinde hidrate edilen GKÖ’lerin hidrolik iletkenlik davranışları: a) Siltli kum ve b) zeolit üzerinde hidrasyon





Şekil 14. Sıkıştırılmış siltli kum üzerinde 62 gün hidrasyon sonunda GKÖ'de açığa çıkarılan bentonitin durumu: a) kontrol örnekli yöntem (KÖY) ve b) tek büyük örnekli yöntem (TBÖY)

#### **4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada GKÖ hidrasyonunda esnek duvarlı permametre hücrelerinin kullanıldığı iki yöntem karşılaştırılmıştır. Yöntem karşılaştırması görüntü oranı ve alt zemin tipine bağlı olarak deney bulguları ve gözlemlerle desteklenmiştir.

GKÖ hidrasyon çalışması alt zemin tabakası olarak siltli kumun kullanıldığı durumda aynı ve farklı görüntü oranlarında sıkıştırılan örnekler için incelenmiştir. Aynı görüntü oranına (GO:1.14) sahip örneklerde TBÖY'den elde edilen nihai bentonit su içeriği KÖY ile elde edilene kıyasla %8 daha yüksektir. Örnek boyu sabit tutularak farklı görüntü oranlarında (KÖY için GO:1.14, TBÖY için GO:0.76) hazırlanan siltli kumlar üzerinde hidrate edilen GKÖ'lerde de TBÖY'de KÖY'e kıyasla %7'ye kadar daha yüksek nihai bentonit su içerikleri elde edilmiştir.

Farklı görüntü oranlarında sıkıştırılan ve siltli kuma kıyasla daha yüksek sıkıştırma su içeriğine sahip zeolitin alt zemin olarak kullanıldığı durumda, 30 gün sonunda her iki yöntemde de nihai bentonit su içerikleri yaklaşık %125 seviyesine çıkmıştır (siltli kumda 62 gün sonunda bu değer %65-70 civarındadır).

Alt zemin tabakası olarak siltli kum ve zeolit kullanıldığında, tabaka yüksekliği boyunca birbirine benzer su içeriği profilleri elde edilmiştir. Diğer bir deyişle GKÖ'ye temas eden en üstteki tabakada su içerikleri ani azalmış ve takip eden tabakalarda artış göstermiştir. Örneğin alt kısımlarına doğru su içeriklerinde görülen artış ise yer çekimi kuvvetiyle kür süresi içerisinde boşluk suyunun aşağıya doğru hareket etmesine atfedilmiştir.

Gözlemsel incelemede, kontrol örneklili yöntem (KÖY) ile bentonitin şişmesi daha iyi resmedilmiştir. Bu yöntemde partiküller arasındaki boşluklar net bir şekilde görülürken, tek büyük örneklili yöntem (TBÖY)'de kesim sırasında yaşanan güçlükten dolayı GKÖ bir miktar örselenmiştir. Bentonitin şişmesi bu yöntemde de görülmüş, fakat kesim sırasında doğal olmayan çatlakların oluşmasına engel olunamamıştır.

GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenliklerinde hidrasyon süresi, alt zemin tipi, deney yöntemi gibi faktörlerin etkisi görülmemiştir. Her iki yöntemle farklı alt zeminlerde hidrate edilen GKÖ'lerin hidrolik iletkenlikleri ortalama  $2.8 \times 10^{-9}$  cm/s ölçülmüştür.

GKÖ'lerin nihai hidrolik iletkenlikleri birbirine yakın olmasına rağmen, hidrolik iletkenlik davranışları farklıdır. Bu farklılıkta hidrasyon sonu bentonit su içeriğinin hidrolik iletkenlik deneyi sırasında daha da artma eğiliminde olması etken olmuştur. Bentonitlerin su içeriklerinin zaman içinde yavaşça artması, hidrolik iletkenlikte de kademeli azalmaya sebep olmuştur. Bu bulgu, bentonitlerin deney sonrasındaki görüntülerinin karşılaştırılmasıyla da teyit edilmiştir.

Yukarıda elde edilenler ışığında her iki yöntemden elde edilen nihai bentonit su içerikleri arasındaki fark pratikte önemsiz kabul edilebilir. Fakat KÖY ve TBÖY'ün birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. TBÖY, tek permametrenin kullanılması açısından avantaj teşkil etmekte ve tek örnekten su içeriği ve hidrolik iletkenlik deneyi için numune alınmasına müsaade etmektedir. Ayrıca, bu yöntemde hidrolik iletkenlik numunesi çıkarıldıktan sonra GKÖ üzerinde arta kalan yüzey alanı KÖY'den elde edilen alana göre yaklaşık %25 daha fazladır. Alandaki bu fark TBÖY'den daha fazla bentonit temin edilebileceği anlamına gelmektedir. Böylece su içeriğine ilave olarak bentonitin fiziko

kimyasal özelliklerinden bazıları da belirlenebilir. KÖY’de ise şişmiş bentonitler daha iyi görüntülenmesine rağmen, aynı anda iki permametre kullanıldığından yöntem pahalı ve zahmetli olmaktadır.

### **Teşekkür**

Bu çalışma kapsamında kullanılan permametre hücreleri 111M718 nolu projeden alınmıştır. TÜBİTAK’a projeye verdiği bu maddi destek için teşekkür ederiz.

### **Semboller**

|      |                              |
|------|------------------------------|
| AR   | : Aspect Ratio               |
| CSM  | : Control Sample Method      |
| GCL  | : Geosynthetic Clay Liner    |
| SLSM | : Single Large Sample Method |
| D    | : Örnek çapı                 |
| L    | : Örnek boyu                 |
| GO   | : Görüntü Oranı              |
| GKÖ  | : Geosentetik Kil Örtü       |
| KÖY  | : Kontrol Örnekli Yöntem     |
| TBÖY | : Tek Büyük Örnekli Yöntem   |
| w    | : bentonit su içeriği        |

### **Kaynaklar**

- [1] Bouazza, A., Geosynthetic Clay Liners, Geotextiles and Geomembranes, 20, 3-17, 2002.
- [2] Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M., Fukagawa, R., Long term Barrier Performance of modified bentonite materials Against Sodium and Calcium Permeant Solutions, Geotextiles and Geomembranes, 26, 14-30, 2008.
- [3] Lee, J-M., Shackelford, C.D., Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131 (1): 64–77, 2005.
- [4] Shan, H.Y., Lai, Y.J., Effect of Hydrating Liquid on the Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners, Geotextiles and Geomembranes, 20 : 19–38, 2002.
- [5] Jo, H. Y., Benson, C. H., Shackelford, C. D., Lee, J. M., Edil, T. B., Long-term Hydraulic Conductivity of a Geosynthetic Clay Liner Permeated with Inorganic Salt Solutions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131 (4), 405-417, 2005.

- [6] Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C. H., Edil, T. B., Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-species Salt Solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (7), 557-567, 2001.
- [7] Benson, C.H., Ören, A.H, Gates, W.P., Hydraulic Conductivity of Two Geosynthetic Clay Liners Permeated with a Hyperalkaline Solution.” *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 206-218, 2010.
- [8] Ören, A. H., Demirkıran H., Geosentetik Kil Örtülerin Hidrolik İletkenliklerinin Laboratuvarında Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, *İMO Teknik Dergi*, 26(4), 7191-7213, 2015.
- [9] Meer, S.R., Benson, C.H., Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed From Landfill Final Covers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5), 550-563, 2007.
- [10] Scalia, J., Benson, C.H., Preferential Flow in Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Final Covers with Composite Barriers, *Canadian Geotechnical Journal*, 47: 1101-1111, 2011.
- [11] Benson, C.H., Thorstad, P.A., Jo, H.Y., Rock S.A., Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners in a Landfill Final Cover, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (7), 814-827, 2007.
- [12] Estornell, P., Daniel, D., Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1592–1606, 1992.
- [13] Petrov, R. J., Rowe, R. K., Quigley, R. M., Selected Factors Influencing GCL Hydraulic Conductivity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8), 683-695, 1997.
- [14] Rayhani, M.T., Rowe, R.K., Brachman, R.W., Take, W.A., Siemens, G., Factors Affecting GCL Hydration Under Isothermal Conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 29 (6): 525–533, 2011.
- [15] Anderson, R., Rayhani, M. T., Rowe, R. K., Laboratory Investigation of GCL Hydration from Clayey Sand Subsoils, *Geotextiles and Geomembranes*, 31, 31-38, 2012.
- [16] Sarabian, T., Rayhani, M.T., Hydration of Geosynthetic Clay Liners from Clay Subsoil Under Simulated Field Conditions, *Waste Management*, 33 (1): 67–73, 2013.
- [17] Barclay, A., Rayhani M.T., Effect of Temperature on Hydration of Geosynthetic Clay Liners in Landfills, *Waste Management & Research*, 31 (3), 265–72, 2013.
- [18] Chevrier, B., Cazaux, D., Didier, G., Gamet, M., Guyonnet, D., Influence of Subgrade, Temperature and Confining Pressure on GCL Hydration, *Geotextiles and Geomembranes*, 33, 1-6, 2012.
- [19] Katsumi, T., Ishimori, H., Ogawa, A., Maruyama, S., Fukagawa, R., Effects of Water Content Distribution on Hydraulic Conductivity of Prehydrated GCLs Against Calcium Chloride Solutions, *Soils and Foundations*, 48 (3), 407-417, 2008.

- [20] Bradshaw, S.L., Benson, C.H., Effect of Municipal Solid Waste Leachate on Hydraulic Conductivity and Exchange Complex of Geosynthetic Clay Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140 (4): 04013038, 2013.
- [21] ASTM D698-07, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup>(600 kN-m/m<sup>3</sup>)), American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2012.
- [22] Ören A.H., Demirkıran H., Geosentetik Kil Örtülerin Hidrolik İletkenliklerinin Laboratuvarında Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma.” *İMO Teknik Dergi*, 26 (129), 7191-7213, 2015.
- [23] ASTM D6766-12, Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2012.
- [24] Ören A.H., Özdamar T., Hydraulic Conductivity of Compacted Zeolites, *Waste Management and Research*, 31, 634-640, 2013.



# Açık Deniz Yapıları Kova Temel Sistemi Davranışı Üzerinde Tekrarlı Yük Frekansının Etkisi

H. Ercan TAŞAN<sup>1</sup>  
C. Taylan AKDAĞ<sup>2</sup>

## ÖZ

Açık deniz yapıları kova temel sistemi davranışının tahmini ile ilgili henüz yeterli bilgi birikimine ulaşılmamıştır. Açık deniz koşullarında temel sistemlerinin ağır tekrarlı yüklerle maruz kalması nedeniyle zeminde kalıcı deplasman ve aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi meydana gelir. Çalışmada çok ayaklı temel sistemi ile tasarlanmış açık deniz yapısının bir kova temelinin eksenel tekrarlı yükler altındaki davranışı sayısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Özellikle yük frekansının davranış üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Suya doygun zemin, hipoplastik malzeme modeli ve iki fazlı üç boyutlu sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Analiz sonuçları, tekrarlı yük frekansının zeminde aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi ve temel deplasman birikimi üzerinde oldukça önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Açık deniz yapıları temeli, kova temel, sonlu elemanlar yöntemi, tekrarlı yük, hipoplastik zemin modeli, iki fazlı model, sayısal analiz, aşırı boşluk suyu basıncı, kalıcı deplasman.

## ABSTRACT

### The Influence of Cyclic Loading Frequency on the Behaviour of Suction-Bucket Foundations for Offshore Structures

The behavior of suction-bucket foundation systems for offshore structures has not been adequately investigated yet. The foundations are subjected to large cyclic loading due to marine conditions which lead to accumulation of soil deformation and excess pore water pressure. A numerical investigation was conducted to study the response of one bucket support of a multipode foundation system under cyclic axial loading. Thereby a fully coupled two-phase model and a hypoplastic constitutive model were used for consideration of accumulation effects in a saturated soil medium. Special emphasis is attached to the influence of cyclic loading frequency on the behavior of the bucket-soil system. The results have

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 23.05.2016 günü ulaşmıştır. 25.07.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.337970

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ercantasan@yahoo.de

2 Türk-Alman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - akdag@tau.edu.tr

indicated that the frequency considerably affects the excess pore water pressure development and the vertical displacement accumulation of the bucket foundation.

**Keywords:** Offshore foundation, suction bucket, finite element method, cyclic loading, hypoplastic model, fully coupled two phase model, numerical analysis, excess pore water, permanent displacement.

## 1. GİRİŞ

Açık deniz yapıları için gerçekleştirilen alternatif temel sistemi arayışları sonucu kova temel sistemi kavramı geliştirilmiştir. Kova temel üst kısmı kapalı geniş çaplı boru tipi çelik silindirden oluşan açık deniz koşullarındaki ağır yüklere dayanıklı bir temel tipidir (Şekil 1). Kova temel tipi kurulum açısından yenilikçi bir yaklaşımı ifade etmektedir [1-3]. Temel, deniz tabanına konumlandırıldığında öncelikle kendi ölü ağırlığı nedeniyle bir miktar oturma gerçekleşmektedir. Bu esnada deniz tabanı ile temel üst plakası arasındaki boşluk deniz suyu ile dolu bulunmaktadır. Boşluktaki suyun deşarjı işlemi ile gelişen penetrasyon basıncı kimi durumlarda uygulanan ek ölü yükler (balast) kullanılarak temelin kurulumu gerçekleştirilir. Üst plaka tabanının deniz tabanına temasına kadar penetrasyona devam edilir.

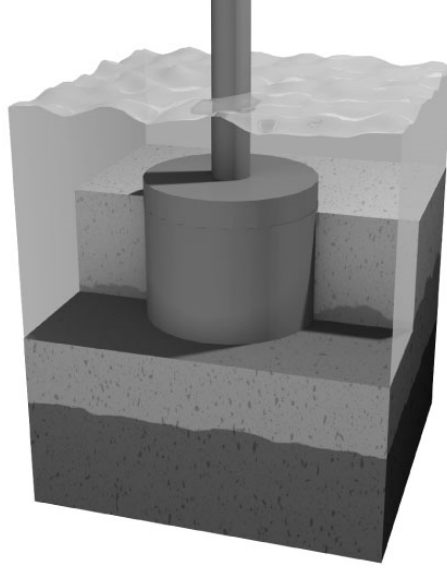
Kurulumun sağlanması için temelin iç bölgesindeki suyun deşarjı sırasında oluşan penetrasyon basıncı ve üst yapı yükleri bileşiminin elbette temelin uç ve çevre sürtünmesinden oluşan direnç yüklerinden daha büyük olması gerekmektedir (Şekil 2). Penetrasyon basıncının oluşturulması esnasında oldukça dikkatli olunmalı ve kontrollü bir prosedür uygulanmalıdır. Temel içinde mevcut boşluktaki suyun deşarj edilmesi esnasında zemin içindeki suyun da çekilmesi sözkonusu olmaktadır. Temelin dış çevresindeki suyun temelin içine doğru akışı kum zeminlerde genellikle yüksek hidrolik eğim ile gerçekleşir ve özellikle homojen kum zeminde borulanma olarak isimlendirdiğimiz olgunun meydana gelmesine neden olabilir [4]. Kritik deşarj basıncında temel ucundaki zeminin efektif gerilme değeri borulanma nedeniyle sıfır değerine ulaşarak zeminin yenilmesine neden olmaktadır ve bu nedenle temel kurulumu başarısızlıkla sonuçlanabilmektedir [5-7].

Açık deniz ortamında kazıklı temel sistemi uygulamasında, kazığın çakılması esnasında oluşan etkiler deniz canlılarının korunumu açısından önemli bir meseledir. Örneğin, Almanya'da kazık çakılması esnasında meydana gelen gürültünün emisyonu konusunda deniz yaşamını korumadan sorumlu onay makamları önemli sınırlamalar getirmiştir. Bu anlamda, kova temel tipi açık deniz yapıları için önemli avantajlar sunmaktadır. Kova temel sisteminin kurulumu esnasında meydana gelen gürültü, kazıkların çakılmasından dolayı oluşan gürültüye göre oldukça düşüktür ve öngörülen sınırlar içerisinde kalmaktadır. Böylelikle gürültünün azaltılmasına yönelik maaliyeti yüksek ek sistemlere ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu nedenle kova temel sistemleri özellikle Almanya'nın Kuzey Denizi'nde kumlu zemin içerisinde önümüzdeki yıllarda kurulacak onlarca açık deniz rüzgar enerjisi çiftlikleri için tercih edilebilir bir alternatif temel tipi olarak sorumlu onay makamlarına tanıtılmıştır.

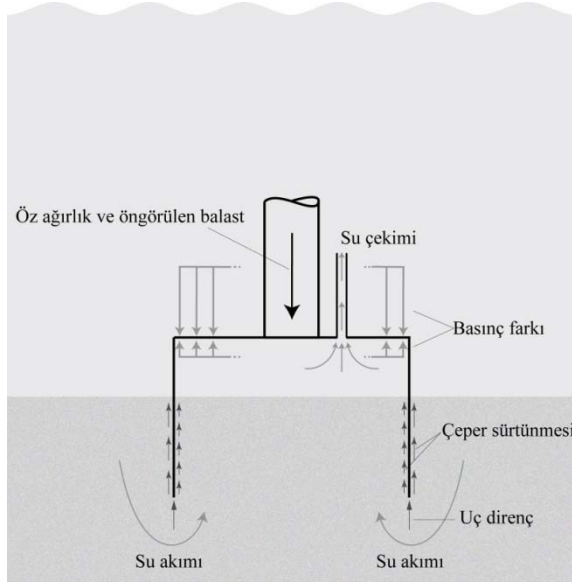
Kova temeller çevre dostu kurulum özelliği taşımasının yanı sıra kurulumu için gerekli zaman ve giderlerin görece düşük olması açısından da avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca kullanım sonrası daha hızlı ve kolay sökülebilen özellikleri nedeniyle de açık deniz yapıları için tercih edilebilir bir alternatif temel potansiyeli taşımaktadır.



Kova temel sistemleri tekil kazık ve ağırlık temel sistemlerinin kimi önemli özelliklerini birarada bulunduran hibrid bir tasarım olduğundan açık deniz rüzgar enerjisi, açık deniz platformları ve açık deniz ölçüm direkleri gibi yapıların temel sistemi olarak kullanılabilir [8-10].

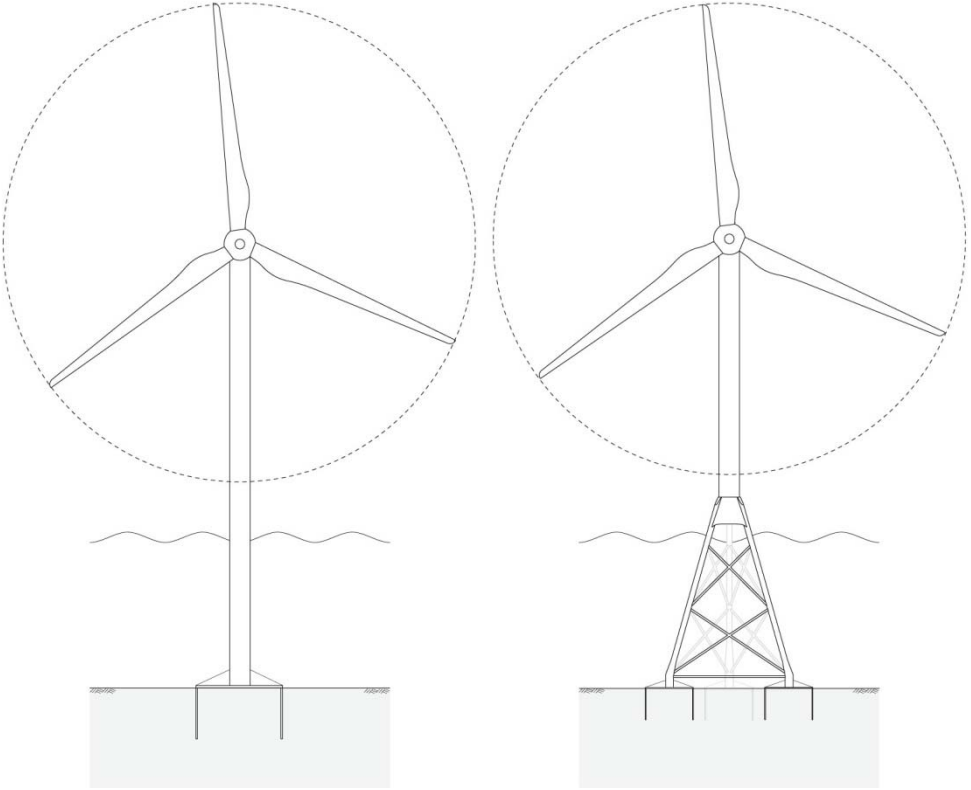


Şekil 1. Açık deniz yapıları için uygulanan kova tipi temel



Şekil 2. Kova temel sistemi kurulumu esnasında etki eden kuvvetler

Kova temel sistemleri tek ayaklı (monopod) ve çok ayaklı temel sistemi (multipod) olmak üzere iki tipte tasarlanmaktadır (Şekil 3). Her iki tip için üst yapıdan temele aktarılan yükler farklılık içerir. Rüzgar, dalga ve akıntıdan oluşan yatay tekrarlı yük üst yapıya etki ederek bir moment yükü oluşturur. Böylelikle tek ayaklı kova temel sistemi eksenel ölü yükün yanı sıra tekrarlı yatay ve moment yüküne maruz kalır. Çok ayaklı temel sistemde yatay tekrarlı yük neticesinde oluşan momentler her bir kova temele eksenel tekrarlı yük olarak transfer edilir. Tekrarlı eksenel yük yatay yükün yönüne göre tekrarlı temele eksenel basınç veya çekme yükü olarak etki eder. Bu çalışmada ele alınmayan eksenel çekme yükleri, açık deniz rüzgar enerjisi türbinleri gibi düşük ağırlığa sahip yapılarda kritik bir durum oluşturmaktadır [11].



*Şekil 3. Kova temel sistemi tasarımı: a-Tek ayaklı kova temel (Monopod) b-Çok ayaklı kova temel (Multipod)*

Kova temel sisteminin boyutlandırılmasında rüzgar, dalga ve akıntıdan kaynaklanan tekrarlı yükün etkisi önemli rol oynamaktadır. Söz konusu yük etkisi nedeniyle temelin tabanında ve çevresindeki zeminde kalıcı deformasyon birikimi, kova temelde kalıcı deplasman veya dönme gerçekleşebilmektedir [12-14]. Vurgulamak gerekir ki kova temel-zemin sisteminin davranışında aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi önemli bir etkiye sahiptir [15, 16].

Suya doygun zemin koşullarında tekrarlı yükleme altında temel-zemin sisteminde meydana gelen deplasman gelişimi yük büyüklüğü, yük frekansı ve drenaj koşullarına doğrudan bağlıdır ve davranış oldukça komplikedir. Açık deniz ortamında suya doygun zemindeki suyun göreceli olarak sıkışamaz nitelikte olması nedeniyle yükleme ve drenaj koşullarına bağlı olarak zeminde aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu gerçekleşebilir. Zemin hidrolik iletkenliğinin ve yükleme periyodunun düşük olduğu, ek olarak suyun drenaj yolunun uzun olduğu koşullarda zemine iletilen gerilmenin sönümlenmesi, suyun drne olması ve boşluk hacminin küçülmesi ani veya hızlı olarak gerçekleşemediğinden öncelikle zeminde tepki olarak aşırı boşluk suyu basıncı birikimi meydana gelir [17, 18].

Açık deniz yapıları temelleri için uygun olan kova temel sisteminin davranışına ilişkin önemli ölçüde bilgi ve deneyim eksikliği bulunmaktadır. Söz konusu yapıların kullanım ömrü boyunca stabilitesinin sağlanabilmesi amacıyla bu alanda kapsamlı araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu anlamda katkı sunacağı düşünülen mevcut çalışmada kova temel-zemin temel sisteminin tekrarlı eksenel yük altındaki davranışı sayısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Analizlerde özellikle tekrarlı yük frekansının aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi ve temel deplasman birikimi üzerindeki etkisine odaklanılmıştır.

## 2. YÖNTEM

Araştırma sayısal analiz yöntemine dayanmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinde suya doygun zeminde tekrarlı yükleme altında oluşabilecek boşluk suyu basınç birikimlerinin elde edilmesi amacıyla geliştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar, hipoplastik malzeme modeli ile birlikte kullanılmıştır.

Kova temel-zemin sisteminin sayısal analizi için çok farklı fiziksel problemlerin simülasyonuna uygun eleman zenginliğine sahip ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Program kullanıcıya arayüz aracılığıyla eleman kütüphanesine probleme uygun eleman ekleme ve ek malzeme modelini uygulama olanağı tanımaktadır [19]. Bu çalışma kapsamında iki fazlı model temel alınarak üç boyutlu sonlu eleman geliştirilmiş ve hipoplastik malzeme modeliyle birlikte ANSYS programına eklenmiştir.

### 2.1. Malzeme Modeli

Zemin gerilme seviyesinin ve birim hacim ağırlığı değişiminin zemin davranışı üzerindeki etkisinin özellikle dikkate alındığı hipoplastik malzeme modeli kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yük altındaki davranışının modellenmesi için oldukça uygun bir malzeme modelidir [20, 21]. Rijitlik, genleşme, büzülme, pik sürtünme açısı, zemin gerilme durumu ve deformasyon yönü modelde dikkate alınan temel parametre ve kavramlardır.

Hipoplastik model aşamalı doğrusal olmayan gerilme deformasyon ilişkisine bağlı malzeme modeli yaklaşımına dayanmaktadır. Hipoplastik modeli genel anlamda aşağıda sunulan fonksiyon (1) ile ifade edebiliriz.

$$\sigma = f(\sigma, \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

Denklemden  $\sigma$  Jaumann objektif gerilme oranını,  $\sigma$  mevcut gerilme durumunu ve  $\dot{\epsilon}$  birim deformasyon oranını ifade etmektedir. Oran ifadesini sonsuz derecede küçük bir zaman aralığındaki artış olarak tanımlayabiliriz.

Hipoplastik malzeme modeli üzerine gerçekleştirilen birçok çalışma mevcuttur. [21-25]. Bu araştırmada Wolffersdorff'un [25] çalışmasına dayanan hipoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Modelde plastik ve elastik deformasyonların tanımlanması amacıyla tek bir tensörel denklem oluşturulmuştur (2) [21, 26].

$$\dot{\sigma} = \mathbf{L} : \dot{\epsilon} + \mathbf{N} \|\dot{\epsilon}\| \quad (2)$$

Denklemden dördüncü dereceden tensör  $\mathbf{L}$  hipoplastik rijitlik tensörünün doğrusal, ikinci dereceden  $\mathbf{N}$  tensörü ise doğrusal olmayan kısmını ifade etmektedir. Wolffersdorff'un çalışmasına dayanan hipoplastik modelinin  $\mathbf{L}$  ve  $\mathbf{N}$  tensörleri denklem (3) den denklem (12) ye kadar ayrıntılı bir şekilde tanımlandığı üzere Matsuoka-Nakai göçme kriteri kullanılarak elde edilmektedir.

$$\mathbf{L} = \frac{f_s a^2}{\hat{\sigma} : \hat{\sigma}} \left( \left( \frac{F}{a} \right)^2 \mathbf{I} + \hat{\sigma} \otimes \hat{\sigma} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{N} = \frac{f_s f_d a}{\hat{\sigma} : \hat{\sigma}} (\hat{\sigma} + \hat{\sigma}_d) \quad (4)$$

$\mathbf{I}$  ve  $\hat{\sigma}$  tensörleri denklem (5) ve denklem (6) da ifade edilmiştir.

$$I_{ijkl} = \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (5)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma}{tr \sigma}; \hat{\sigma}_d = \hat{\sigma} - \frac{\hat{\sigma} : \delta}{3} \delta \quad (6)$$

Skaler gerilme fonksiyonu  $F$  ve  $a$  Matsuoka-Nakai göçme yüzeyini tanımlayan parametreler ile denklem (7) ve denklem (9) de ifade edilmiştir:

$$F = \sqrt{\frac{3\hat{\sigma}_d^2}{8} + \frac{2-\hat{\sigma}_d^2}{2+\sqrt{2} \|\hat{\sigma}_d\| \cos 3\theta}} - \frac{\|\hat{\sigma}_d\|}{2\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$\cos 3\theta = \frac{-\sqrt{6} tr(\hat{\sigma}_d \hat{\sigma}_d \hat{\sigma}_d)}{(\hat{\sigma}_d : \hat{\sigma}_d)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

$$a = \frac{\sqrt{3}(3-\sin \varphi_c)}{2\sqrt{2} \sin \varphi_c} \quad (9)$$

Denklemden  $\varphi_c$  parametresi daneli zeminlerin en gevşek durumu için kritik içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. İlköşegen toplamı olan  $tr$ , matrisin diagonal elemanlarının toplamıdır,  $\delta$  ise ikinci dereceden tensör. Birim hacim ağırlık ve basınç etkilerini dikkate

almak için  $f_s$  ve  $f_d$  parametreleri **L** ve **N** tensörlerine eklenmiştir. Denklem (10) da gösterildiği üzere  $f_s$  basınç değişiminin davranış üzerindeki etkisini ve boşluk oranı değişiminin rijitlik üzerindeki etkisini dikkate almaktadır.

$$f_s = \frac{\frac{h_s(1+e_i)}{n} \left(\frac{e_i}{e}\right)^\beta \left(\frac{-tr\sigma}{h_s}\right)^{1-n}}{3+a^2-\sqrt{3} a \left(\frac{e_{i0}-e_{d0}}{e_{c0}-e_{d0}}\right)^\alpha} \quad (10)$$

Birim hacim ağırlık değişiminin etkisi  $f_d$  büyüklüğü ile kontrol edilmektedir.

$$f_d = \left(\frac{e-e_d}{e_c-e_d}\right)^\alpha \quad (11)$$

$$\frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \exp\left(-\left(\frac{3p}{h_s}\right)^n\right) \quad (12)$$

Kullanılan parametreler arasında boyutlu tek değişken olan  $h_s$ , danelerin sıkışabilirliğini ifade eden bir rijitlik parametresidir. Danenin sertliğine, şekline ve dane çapı dağılımına bağlı bir parametredir. Oransal sıkışma ifadesinde üstel bir parametre olan  $n$ ,  $h_s$  parametresi ile doğrudan ilişkili olup dane büyüklüğü ve dane çapı dağılımına bağlıdır. Gerilmeye bağlı üç sınır boşluk oranı tanımlanmıştır:  $e_{d0}$ , minimum boşluk oranını  $e_{c0}$ , kritik boşluk oranını ve  $e_{i0}$  maksimum boşluk oranını ifade etmektedir. Üstel bir parametre olan  $\alpha$  daneli zeminlerdeki sıkılığın pik sürtünme açısı üzerindeki etkisini tanımlayan bir parametredir. Bir diğer üstel parametre olan  $\beta$  sabit birim deformasyon ve sabit ortalama basınç durumunda sıkılığın artışıyla birlikte artan gerilme oranını ifade eden bir parametredir.

Modelde kullanılan kumun hipoplastik zemin parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Hipoplastik malzeme modeli toplamda sekiz parametre ile tanımlanır [25, 27, 28].

Tekrarlı yüklerin zemin davranışı üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla Wolffersdorff'un [25] çalışmasındaki hipoplastik malzeme modeli Niemunis ve Herle [24] tarafından eklenen beş parametre ile genişletilmiştir. Eklenen parametrelerden  $R$ , danelerarası birim deformasyonu,  $m_R$  ve  $m_T$  rijitlik faktörlerini ifade etmektedir.  $\beta_r$ , danelerarası birim deformasyon gelişiminin etkisini ifade etmektedir.  $\chi$ , rijitliğin azalmasını ifade eden üstel bir parametredir.

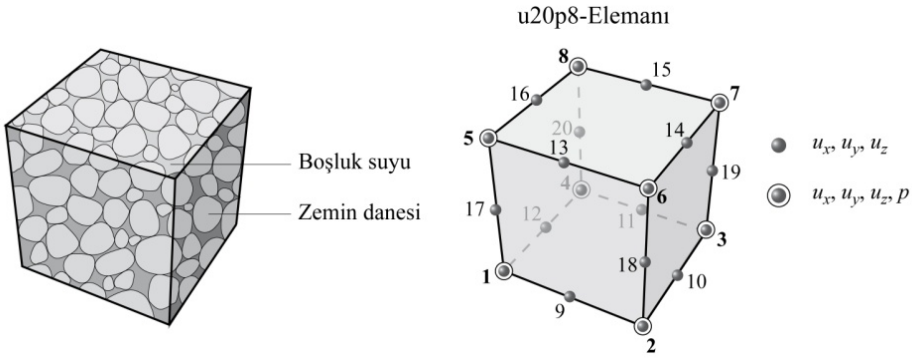
Tablo 1. Nümerik modelde kullanılan kumun özellikleri

| $\varphi_c$ (°) | $h_s$ (MPa)       | $n$   | $e_{d0}$ | $e_{c0}$  | $e_{i0}$ | $\alpha$ | $\beta$ |
|-----------------|-------------------|-------|----------|-----------|----------|----------|---------|
| 32.0            | 3730              | 0.20  | 0.41     | 0.74      | 0.89     | 0.14     | 1.0     |
|                 | $R$               | $m_R$ | $m_T$    | $\beta_r$ | $\chi$   |          |         |
|                 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 5.0   | 2.0      | 0.4       | 6.0      |          |         |

## 2.2. İki Fazlı Model

Bu çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde zeminde aşırı boşluk suyu basıncı gelişiminin belirlenmesi amacıyla iki fazlı model kullanılmıştır. İki fazlı model kullanımı ile suya doygun zemin sonlu elemanlar modelinde tanımlanabilmiş ve böylelikle analizlerde aşırı boşluk suyu basıncı gelişiminin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Boşluk suyunun malzeme davranışı üzerinde etkili olduğu geoteknik problemlerin tanımlanmasında iki fazlı model oldukça elverişli bir modeldir. İki fazlı modelde katı faz zemin danelerini ifade ederken sıvı faz ise boşluk suyunu ifade etmektedir (Şekil 4a). Bu çalışma kapsamında u20p8 olarak isimlendirilen iki fazlı modele dayanan üç boyutlu elemanlar geliştirilmiştir (Şekil 4b). Deplasman tahmini 20 düğüm noktasından oluşan (u20) trikuadratik enterpolasyon fonksiyonlarıyla ve boşluk suyu basıncı tahmini ise 8 köşe düğüm noktasından oluşan (p8) trilineer enterpolasyon fonksiyonlarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Zemin elemanı (a) iki fazlı model (b) üç boyutlu iki fazlı sonlu eleman modeli

Suyun sıkışabilirliğinin ve zemin hidrolik iletkenliğinin oldukça küçük olduğu durumda tekrarlı yükleme altında oluşan aşırı boşluk suyu basıncında meydana gelen salınım nedeniyle geliştirilen sonlu elemanlarda nümerik instabilite problemi ile karşılaşılır [29-32]. Söz konusu etki aynı derecede kullanılan şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı yaklaşım fonksiyonlarında daha açık bir şekilde belirir. Yüksek dereceli bir şekil değiştirme yaklaşım fonksiyonunun seçilmesi ile gerekli olan stabil eleman davranışı sağlanır [32-34].

İki fazlı modelin oluşturulmasında kullanılan temel denklemler [16, 35] referanslarında ayrıntılı olarak açıklanmıştır. İki fazlı sonlu elemanların doğrulamasını gerçekleştirmek amacıyla bir kil tabakasının konsolidasyonu [36] ve Hochstetten kumunun tekrarlı yükler altındaki davranışının drenajsız koşullarda incelendiği [24] araştırma ele alınmıştır [35]. Söz konusu araştırmalardaki zeminler u20p8 iki fazlı elemanlar ile ve hipoplastik malzeme modeli kullanılarak modellenerek doğrulama gerçekleştirilmiştir [35].

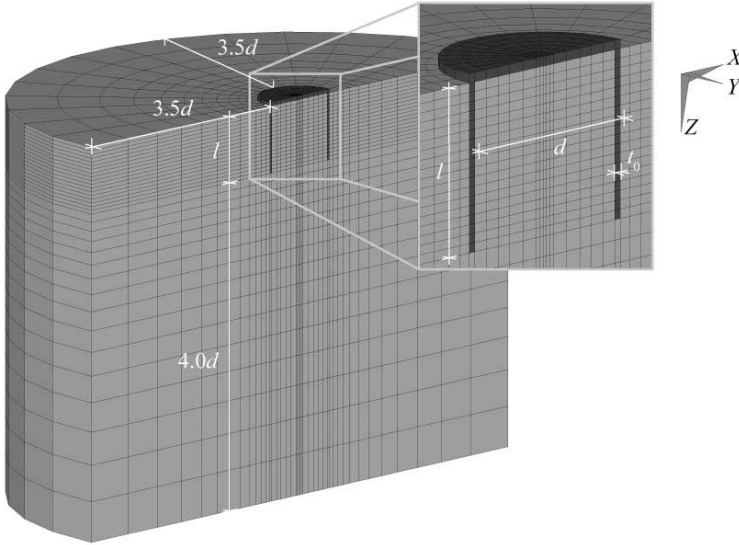
### 3. AÇIK DENİZ KOVA TEMEL-ZEMİN SİSTEMİ SONLU ELEMANLAR MODELİ

Çalışmanın temel amacı özellikle tekrarlı yük frekansına bağlı olarak suya doygun zeminde gelişen boşluk suyu basıncı birikiminin temel-zemin davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Bu amaçla çalışmada özellikle yük frekansının davranış üzerindeki etkisi üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

Her ne kadar yük karakteristiği ve geometrik açıdan temel-zemin sistemi eksel simetrik özelliğe sahip olsa da ilerideki çalışmalarda temel sisteminin yatay ve moment yüklerinden oluşan kombine yükler altındaki davranışının incelenmesi planlandığından sistem üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile modellenmiştir.

Temel, batma derinliği  $l$ , et kalınlığı  $t_0$  ve dış çapı  $d$  olmak üzere üstü kapalı yarım silindir olarak modellenmiştir. Zemin sonlu elemanlar ağı u20p8 iki fazlı elemanlar ile ve temel sonlu elemanlar ağı ise 20 düğüm noktasından oluşan sürekli trikuadratik elemanlar ile oluşturulmuştur.

Şekil 5 de kova çapı,  $d$  ye bağlı olarak sunulan model boyutları yükleme esnasında model sınırlarında herhangi bir etkinin oluşmayacağı yeterli genişlikte tasarlanmıştır. Zemin, kazığın çevresinde  $3.5d$  genişliğinde dairesel olarak ve temel tabanı altında  $4.0d$  derinliğinde modellenmiştir. Sınır koşulları tanımlanırken model tabanı  $x$ ,  $y$ ,  $z$  yönlerinde deplasmanlara kısıtlanmıştır. Benzer bir şekilde model simetri yüzeyi yüzeye dik  $y$  ve model çevresi  $x$ ,  $y$  yönlerinde deplasmanlara kısıtlanmıştır.



Şekil 5. Kova temel-zemin sonlu elemanlar modeli

Zemin yüzeyi geçirimli olarak modellenmiştir. Kesitteki temel-zemin sınır yüzeyleri de dahil olmak üzere diğer sınır yüzeyleri geçirimsiz olarak modellenmiştir. Model toplam gerilme ve boşluk suyu basıncı tanımlanarak kurulmuştur. Böylelikle model yüzeyindeki hidrostatik

basınç ve boşluk suyu basıncı ortalama su derinliği  $h$  dikkate alınarak modelde tanımlanmıştır. (Tablo 2).

Temel, çelik malzeme özellikleri dikkate alınarak elastisite modülü  $E = 2.1 \cdot 10^8$  kN/m<sup>2</sup> ve Poisson oranı  $\nu = 0.3$  malzeme özelliklerinde modellenmiştir. Temel-zemin yüzeyi “surface-to-surface” kontak elemanları ile tanımlanarak sürtünme açısı  $\delta = 21^\circ$  olarak uygulanmıştır. Temel üst plakası rijit olarak modellenmiştir.

Deneyle sonuçları kuru kumun minimum ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla:  $\gamma_{d,\min} = 1.52$  g/cm<sup>3</sup>,  $\gamma_{d,\max} = 1.88$  g/cm<sup>3</sup>, dane birim hacim ağırlığı:  $\gamma_s = 2.66$  g/cm<sup>3</sup> ve hidrolik iletkenliği:  $k_d = 2 \cdot 10^{-4}$  m/s olarak elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan efektif birim hacim ağırlığı  $\gamma'$ , zemin relatif sıkılık  $I_D$  ve permeabilite  $k_d$  değerleri Tablo 2 de sunulmuştur. Çalışma, Kuzey Denizi tabanındaki zemin koşullarına benzer olarak sıkı homojen kum zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, Almanya'nın Kuzey Denizi sınırlarında dört ayaklı kova temel sistemi ile tasarlanmış bir açık deniz platform yapısı dikkate alınmıştır. Analizler platformun bir kova temel sistemi için gerçekleştirilmiştir. Sistemde kova temele etki eden yapısal eksenel statik ölü yük  $V_{\text{stat}}$  Tablo 2 de sunulduğu üzere 22 MN değerindedir. Bunun yanı sıra rüzgar, dalga ve akıntıdan kaynaklanan ve temele eksenel olarak transfer edilen tekrarlı yük  $\tilde{V} = 5$  MN Şekil 6 da görüldüğü şekilde idealize edilmiştir. Böylelikle söz konusu eksenel tekrarlı yükün zeminde oluşturduğu aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi elde edilmiştir. Tekrarlı yüklemeye Kuzey Denizi'nde meydana gelebilecek dalga yükü frekansları dikkate alınarak üç farklı frekansta gerçekleştirilmiştir [37].

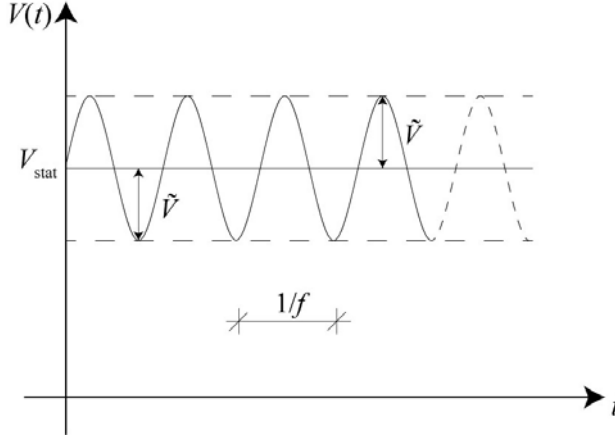
Sonlu elemanlar analizleri birçok aşamada gerçekleştirilmiştir. Başlangıç aşamasında suya doygun zeminin kendi ağırlığından kaynaklanan geostatik gerilme durumu oluşturulmuştur. Sonraki aşamada sürekli elemanlardan oluşan kova temel geometrisi ilgili zemin elemanları (u20p8-Elemente) ile yer değiştirilerek temelin ölü ağırlığı dolayısıyla meydana gelen gerilmeler elde edilmiştir. Takip eden aşamada temele etki eden statik üst yapı ağırlığı  $V_{\text{stat}}$  uygulanmıştır. Statik yüklemeye nedeniyle zeminde meydana gelen boşluk suyu basıncının sönümlenmesinin ardından son aşama olarak tekrarlı eksenel yük Şekil 6 da sunulduğu şekilde uygulanmıştır.

Tablo 2. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan tasarım parametreleri

| Kova temel |      |                | Kum                  |       |                   | Su derinliği |
|------------|------|----------------|----------------------|-------|-------------------|--------------|
| d          | l    | t <sub>0</sub> | $\gamma'$            | $I_D$ | $k_d$             | h            |
| [m]        | [m]  | [m]            | [kN/m <sup>3</sup> ] |       | [m/s]             | [m]          |
| 12.0       | 10.0 | 0.06           | 11.5                 | 0.92  | $2 \cdot 10^{-4}$ | 39.5         |

| Yük               |             |                  |
|-------------------|-------------|------------------|
| $V_{\text{stat}}$ | $\tilde{V}$ | f                |
| [MN]              | [MN]        | [Hz]             |
| 22                | 5           | 0.06, 0.12, 0.24 |





Şekil 6. Tekrarlı yük karakteristiği

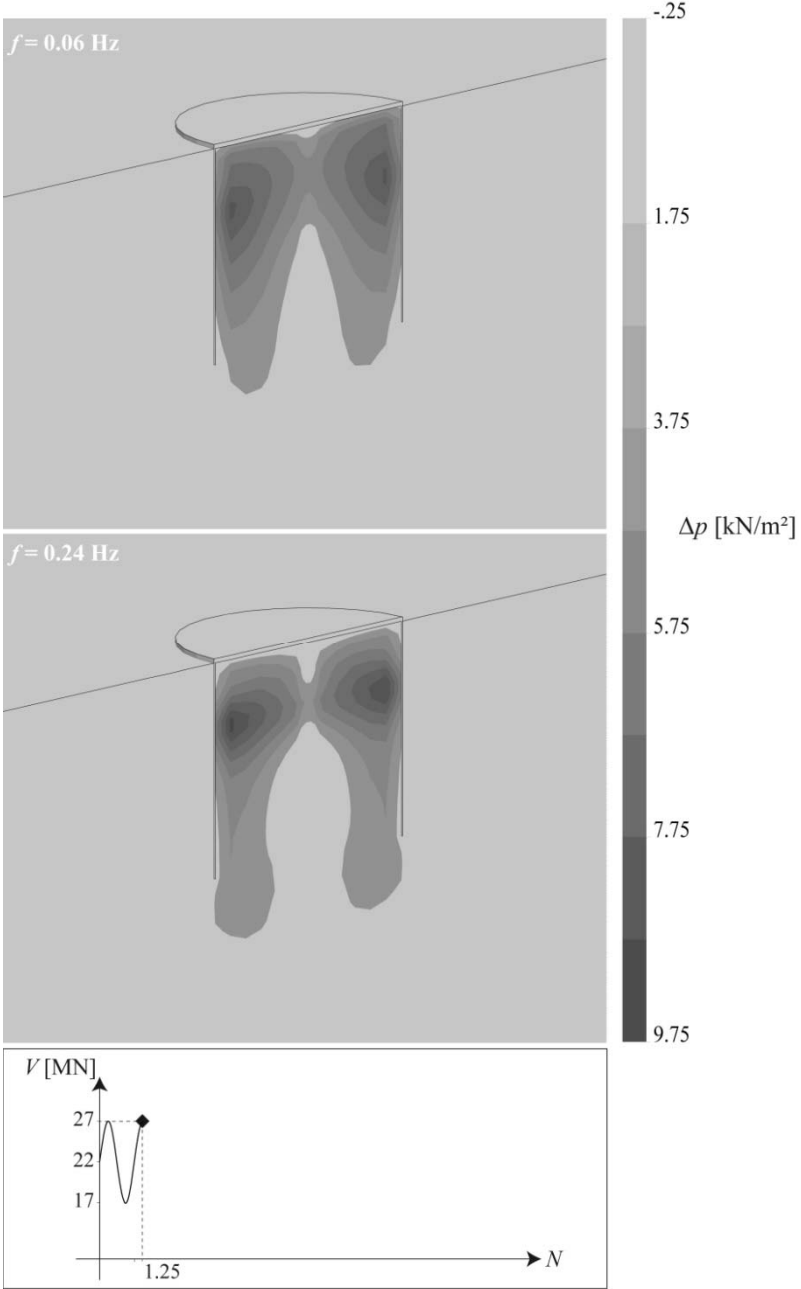
#### 4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Tekrarlı aksenal yükleme analizleri sonucu  $f = 0.06$  Hz ve  $f = 0.24$  Hz frekans durumlarında,  $N = 1.25$ ,  $N = 6.25$  ve  $N = 11.25$  yük tekrar sayıları anında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı ( $\Delta p$ ) gelişimi Şekil 7-9 da sunulmuştur.

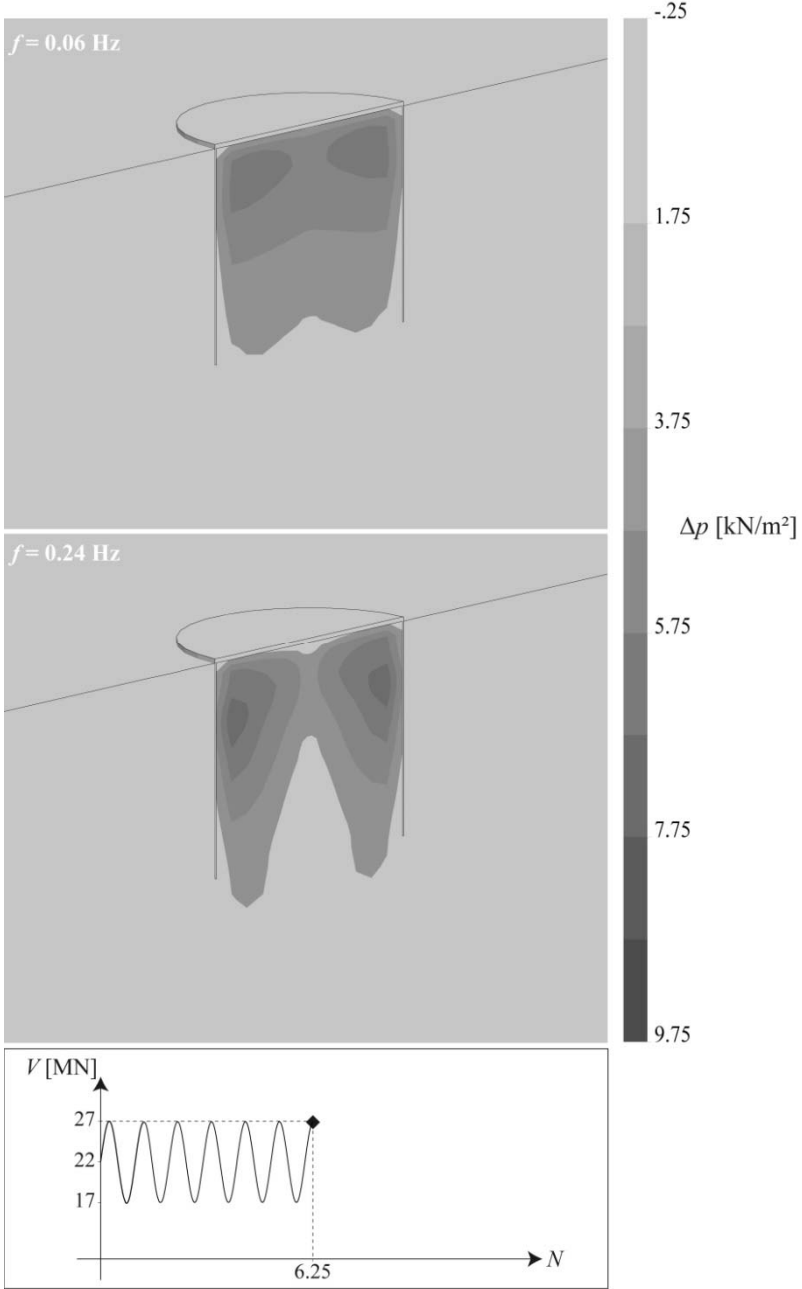
Temel sistemi, uygulanan aksenal yükü temel iç ve dış yüzeyine sürtünme kuvvetleri, temel tabanına uç direnci ve temel üst plakası altındaki zemine basınç gerilmeleri olarak aktarır. Ele alınan örnekte olduğu gibi zemin permeabilitesi ve drenaj koşullarına bağlı olarak suya doygun zeminde tekrarlı yükleme sonucu aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi meydana gelir. Yukarıda ifade edildiği üzere Kuzey Denizi'ndeki tekrarlı yük koşulları dikkate alınarak görece yavaş ( $f = 0.06$  Hz) ve ilkinde göre dört kat daha hızlı ( $f = 0.24$  Hz) iki yükleme koşullarında gerçekleştirilen analizler sonucu zeminde oluşan aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi belirlenmiştir. Belirli yük tekrarlarında elde edilen ve Şekil 7-9 da sunulmuş analiz sonuçları göstermektedir ki her iki yükleme frekansında da özellikle temel içindeki zeminde dikkate değer aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi meydana gelmiştir. Dikkat çekmek isteriz ki en yüksek değerlerde aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi başlangıç yük tekrarlarında meydana gelmiştir (Şekil 7).

Analiz sonuçları göstermektedir ki aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi temel derinliği boyunca meydana gelmiştir. Bu sonuç, tekrarlı yükleme sonucu sadece sürtünme yüzeyinin değil aynı zamanda uç direncinin de aşırı boşluk suyu basıncı gelişiminden etkilendiğini ifade etmektedir.

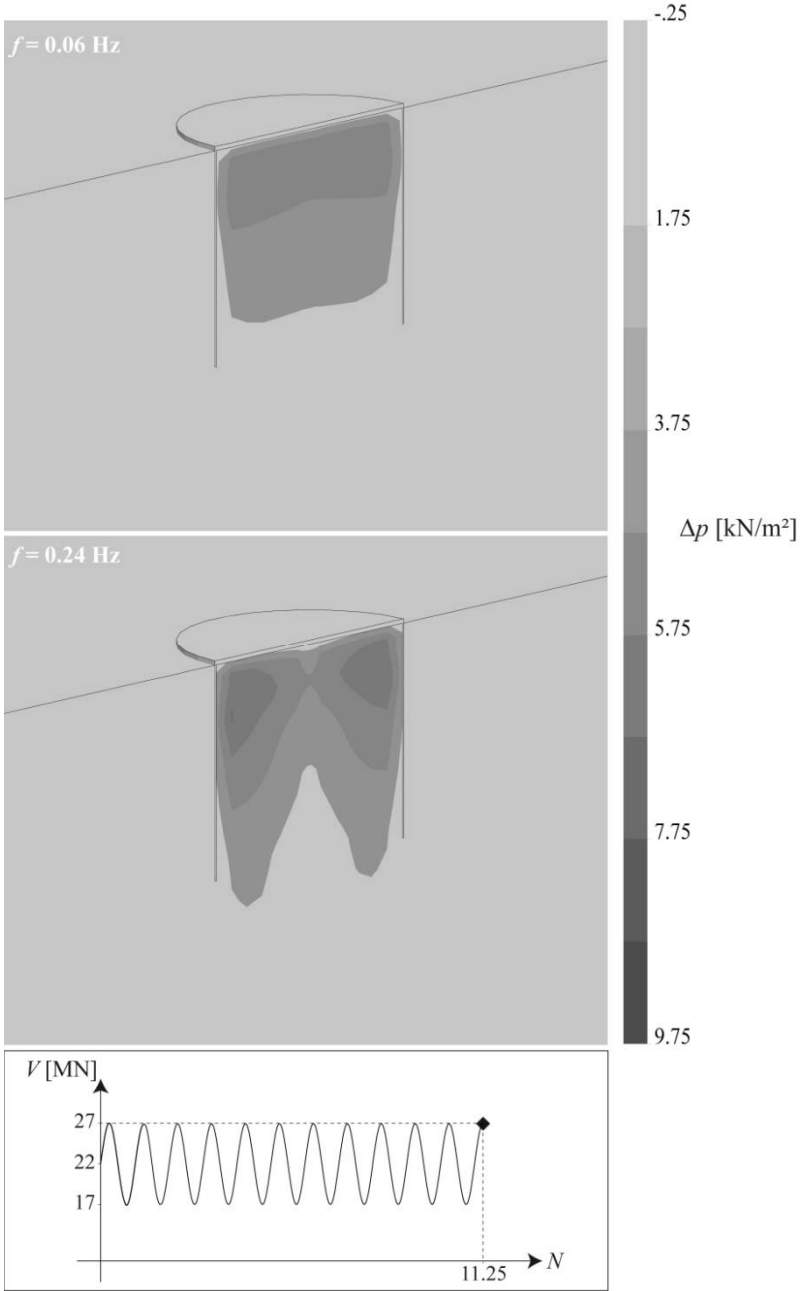
Hızlı yükleme veya yüksek frekans durumunda ( $f = 0.24$  Hz) sadece başlangıç yük tekrarı değil aynı zamanda ilerleyen yük tekrarlarında da yüksek değerlerde aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek frekansta ve ilerleyen yük tekrarlarında yüksek aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi temel içinde derinlik boyunca yayılımını korumuştur. Yavaş yükleme durumunda ( $f = 0.06$  Hz) ise başlangıçta yüksek aşırı boşluk suyu basıncı temel içinde derinlik boyunca dağılım gösterirken devam eden yük tekrar sayılarında aşırı boşluk basınç değeri azalmıştır. Ek olarak aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı ilerleyen tekrar sayılarında lokalize olma özelliğini yitirip temel üst plaka tabanı boyunca yayılma eğilimi göstermiştir (Şekil 8-9).



Şekil 7. Aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi  $\Delta p$ : tekrarlı yük sayısı  $N = 1.25$



Şekil 8. Aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi  $\Delta p$ : tekrarlı yük sayısı  $N = 6.25$

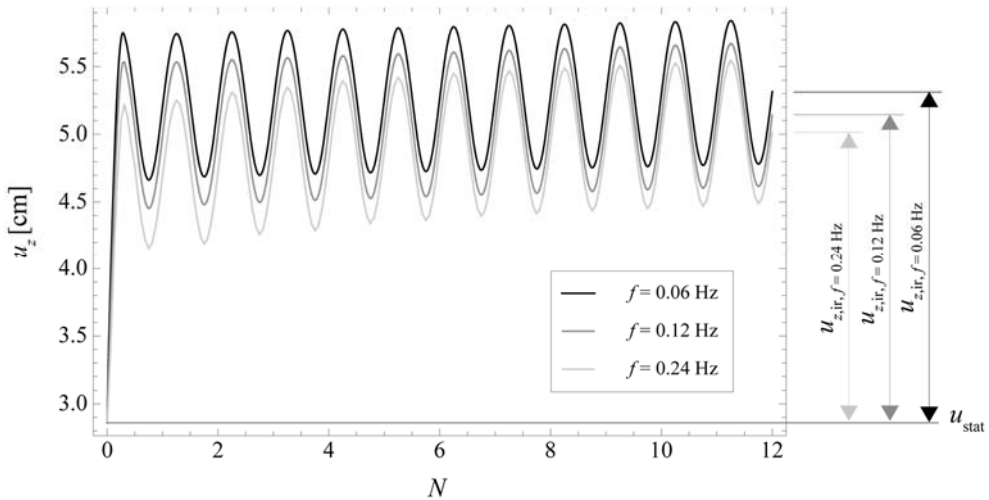


Şekil 9. Aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi  $\Delta p$ : tekrarlı yük sayısı  $N = 11.25$

Sonuçlar, homojen suya doygun kumlu zemin koşullarında yükleme hızının aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yükleme frekansı sadece aşırı boşluk suyu basıncı gelişimini büyüklük olarak değil aynı zamanda yayılım olarak da etkilemiştir.

Sayısal analiz sonuçlarında aşırı boşluk suyu basıncı birikiminin zeminin dayanım ve rijitliğinin tamamen kaybına neden olabileceği değerlere ulaşmadığı saptanmıştır. Örneğin aşırı boşluk suyu basıncı birikimin daha yüksek değerlerde gerçekleştiği hızlı yükleme durumu için ( $f = 0.24$  Hz) ve yük tekrar sayısı  $N=2.25$  anında aşırı boşluk suyu basıncının efektif düşey gerilmeye oranını ifade eden  $\Delta p/(\gamma'z)$  oranı 0.1/ derinliğinde % 56 mertebesinde elde edilmiştir. Başlangıç yük tekrarlarında yüksek değerlerde elde edilen aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenme hızı ilerleyen yük tekrarlarındaki boşluk suyu basıncının gelişme hızından yüksek olduğundan ilerleyen tekrarlarda başlangıç değerlerine göre daha düşük aşırı boşluk suyu basıncı birikimi elde edilmiştir. Bu davranış yük frekansına bağlı bir davranıştır. Birbirini takip eden iki yük arasındaki zaman dilimi azaldıkça sönümlenme hızı düşecektir. Ayrıca zemin hipoplastik malzeme modelince öngörüldüğü üzere ilerleyen tekrarlarda daha düşük boşluk suyu basıncı gelişimi davranışına yük tekrar sayısı arttıkça zemin sıkılığının artması katkı sağlamıştır.

Bu çalışma kapsamında aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi  $N = 11.25$  yük tekrar sayısına kadar incelenmiş ve ilerleyen tekrar sayıları durumu için gelişim numerik hesaplama hatalarının birikimi sebebiyle ele alınmamıştır. Denizel ortamda karşılaşılabilecek çok daha yüksek tekrar sayılarındaki durumun incelenmesinin ilerleyen çalışmalarda uygun zemin modeli ile gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.



Şekil 10. Yük tekrar sayısı-kova temel üst plakası deplasman ilişkisi: Frekans;  $f = 0.06$  Hz,  $0.12$  Hz,  $0.24$  Hz

Analizler sonucu aksel statik ve farklı frekanslara sahip ( $f=0.06; 0.12; 0.24$  Hz) tekrarlı yükleme koşullarında temel üst plakasında meydana gelen deplasman birikimi  $u_z$  elde edilmiştir (Şekil 10). Statik ölü yük nedeniyle üst plakada  $u_{z,stat} = 2.9$  cm lik bir oturma gerçekleşmiştir. Ardından uygulanan ilk tekrarlı yükleme sonrası deplasman artmış ve devam eden tekraralarda deplasman birikiminde azalarak artış gözlemlenmiştir. Uygulanan  $f=0.06$ ,  $f=0.12$ ,  $f=0.24$  Hz yük frekansları durumunda meydana gelen kalıcı deformasyonlar sırasıyla  $u_{z,ir} = 2.5$  cm, 2.3 cm, 2.2 cm olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar göstermektedir ki en yüksek kalıcı deformasyon en düşük frekanslı tekrarlı yükleme durumunda gerçekleşmiştir. Tekrarlı yüklemelerde düşük frekansın etkisi farklı laboratuvar deney ve sayısal analiz çalışmaları ile incelenmiştir [38-40]. Söz konusu araştırmalarda, birbirini takip eden aynı yükler arasındaki zaman farkının zemin deformasyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Düşük frekanslı yükleme durumunda zeminde aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi ve suyun drenajı hızlı yüklemeye göre daha etkin bir şekilde meydana gelmektedir. Böylelikle yavaş yükleme durumunda daha yüksek zemin deformasyonu oluşmaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kova-temelin aksel tekrarlı yükleme altındaki davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde tekrarlı yük etkisi altında zeminlerin modellenmesine uygun hipoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Suya doygun zemin-yapı etkileşimi ve aşırı boşluk suyu basıncı gelişiminin gerçekçi bir şekilde incelenmesi amacıyla zemin iki fazlı üç boyutlu elemanlar ile modellenmiştir. Çalışmada özellikle yük frekansının, başka bir ifade ile tekrarlı yükleme hızının, aşırı boşluk suyu gelişimi ve temel deplasman birikimi üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Bu amaçla analizler üç farklı  $f=0.06, 0.12$  ve  $0.24$  Hz yük frekanslarında gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonucu elde edilen bulgular maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır:

- Aksel tekrarlı yükleme nedeniyle temel içindeki zeminde aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi gerçekleşmiştir. En yüksek değerlerde aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi başlangıç yük tekrarlarında meydana gelmiştir.
- Maksimum aşırı boşluk suyu basıncı yüksek frekanslı tekrarlı yükleme durumunda gerçekleşmiştir. Yüksek frekanslı yükleme durumunda aynı zamanda aşırı boşluk suyu basıncının gelişimi daha derinlere doğru yayılım göstermiştir. İlk tekrar yükünü takip eden tekraralarda aşırı boşluk suyu basıncı azalma eğilimi gösterse de lokalize olma özelliğini kısmen korumuş ve düşük frekanslı yüklemeye göre daha derinlerde oluşmaya devam etmiştir.
- Özellikle düşük frekanslı yüklemelerde ilk yük tekrarını takip eden yük tekrarlarında aşırı boşluk suyu basınç değeri azalmış ve lokalize olma özelliğini yitirme eğilimi göstermiştir.
- Tekrarlı aksel yükleme altında temelde kalıcı deplasman birikimi meydana gelmiştir. Kalıcı deplasman birikimi her yük tekrarında azalan bir artışla gerçekleşmiştir.

- Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar göstermektedir ki aynı yük tekrarında en düşük frekansta en yüksek kalıcı deplasman birikimi oluşmaktadır.
- Araştırmada ele alınan yük, temel sistemi ve zemin koşullarında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi suya doymun zeminin bütünüyle dayanım ve rijitlik kaybına neden olacak nihayi değere ulaşmamıştır.

Günümüz itibarıyla açık deniz yapıları için kova temel sistemi davranışının tahmini ve taşıma kapasitesi ile ilgili henüz pratik bir hesaplama yöntemi bulunmamaktadır. Bu anlamda, çalışmanın ileriki aşamalarında kova temel sisteminin kullanım ömrü boyunca gelişecek deplasman değerlerinin ve birikiminin tahminine yönelik devam eden araştırmalar gerçekleştirilecektir.

### Semboller

|             |   |
|-------------|---|
| $E$         | : Elastisite modülü [N/m <sup>2</sup> ]                               |
| $I_D$       | : Rölatif Sıklık  |
| $N$         | : Yük tekrar sayısı   |
| $R$         | : Hipoplastik malzeme modeli daneler arası birim deformasyonu         |
| $V$         | : Eksenel yük [N]   |
| $V_{stat}$  | : Statik eksenel yük [N]  |
| $\tilde{V}$ | : Tekrarlı eksenel yük büyüklüğü [N]                                  |
| $e_{c0}$    | : Kritik boşluk oranı   |
| $e_{d0}$    | : Minimum boşluk oranı  |
| $e_{f0}$    | : Maksimum boşluk oranı   |
| $d$         | : Kova temel üst plaka çapı [m]                                       |
| $f$         | : Tekrarlı yük frekansı [Hz]  |
| $h$         | : Ortalama deniz taban derinliği [m]                                  |
| $h_s$       | : Hipoplastik malzeme modeli rijitlik parametresi [N/m <sup>2</sup> ] |
| $k_d$       | : Permeabilite [m/s]  |
| $l$         | : Kova temel derinliği [m]  |
| $m_R$       | : Hipoplastik malzeme modeli rijitlik faktörü                         |
| $m_T$       | : Hipoplastik malzeme modeli rijitlik faktörü                         |
| $n$         | : Hipoplastik malzeme modeli: üstel bir parametre                     |
| $p$         | : Boşluk suyu basıncı [N/m <sup>2</sup> ]                             |
| $t$         | : Zaman [s]   |

- $t_0$  : Kova temel et kalınlığı [m]  
 $u_x$  :  $x$ - yönündeki deplasman [m]  
 $u_y$  :  $y$ - yönündeki deplasman [m]  
 $u_z$  :  $z$ - yönündeki deplasman [m]  
 $u_{z,ir}$  :  $z$ - yönündeki kalıcı deplasman [m]  
 $u_{z,stat}$  :  $z$ - yönündeki statik deplasman [m]  
 $\alpha$  : Hipoplastik malzeme modeli parametresi  
 $\beta_r$  : Hipoplastik malzeme modeli: üstel bir parametre  
 $\chi$  : Hipoplastik malzeme modeli: üstel bir parametre  
 $\delta$  : Sürtünme açısı [°]  
 $\Delta p$  : Aşırı boşluk suyu basıncı [N/m<sup>2</sup>]  
 $\gamma'$  : Efektif birim hacim ağırlığı [N/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_{d,min}$  : Minimum kuru birim hacim ağırlığı [N/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_{d,max}$  : Maksimum kuru birim hacim ağırlığı [N/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma_s$  : Dane birim hacim ağırlığı [N/m<sup>3</sup>]  
 $\varphi_c$  : Gevşek durum için kritik içsel sürtünme açısı [°]  
 $\nu$  : Poisson oranı  
 $\sigma^o$  : Jaumann gerilme oranı (2. Dereceden tensör)  
 $\sigma$  : Mevcut gerilme durumu (2. Dereceden tensör )  
 $L$  : Tensörel fonksiyon (4. Dereceden tensör )  
 $N$  : Tensörel fonksiyon (2. Dereceden tensör )  
 $\epsilon$  : Birim deformasyon oranı (2. Dereceden tensör)  
 $F$  : Skaler gerilme fonksiyonu  
 $a$  : Skaler gerilme fonksiyonu

## **Teşekkür**

Çalışmalar, Alman Araştırma Cemiyeti'nin (DFG) katkılarıyla TA 1235/2-1 nolu proje kapsamında yürütülmüştür. Desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.



### **Kaynaklar**

- [1] Byrne, B.W., Houlsby G.T., Foundation for offshore wind turbines, *Phil. Trans. Roy. Soc. London. A* 361, 2909-2930, 2003.
- [2] Zaaïjer, M. B., Comparison of monopile, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine, *Offshore Wind energy in Mediterranean and Other European Seas (OWEMES conference)*, Naples, Italy, 2003.
- [3] Thieken, K., Achmus, M., Schröder, C., On the behavior of suction buckets in sand under tensile loads, *Computers and Geotechnics*, 60, 88-100, 2014.
- [4] Achmus, M., Schröder, C., Installation und Tragverhalten von Bucketgründungen für Offshorebauwerke, *Bautechnik*, 91 (9), 597-608, 2014.
- [5] Houlsby, G.T., Byrne, B.W., Design procedures for installation of suction caissons in sand. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 158(3), 135 –144, 2005.
- [6] Senders, M., Suction caissons in sand as tripod foundations for offshore wind turbines, PhD Thesis, Univ. of Western Australia, Perth, Australian, 2008.
- [7] Ibsen, L.B., Thilsted, C.L., Numerical study of piping limits for installation of large diameter buckets in layered sand. In: T. Benz, S. Nordal (Eds.), *Proceedings of the seventh European conference on numerical methods in geotechnical engineering*, Trondheim, Norway. 921–926, 2010.
- [8] Zhang, J.H., Zhang, L.M., Lu, X.B., Centrifuge modelling of suction bucket foundations for platforms under ice-sheet-induced cyclic lateral loadings, *Ocean Engineering*, 34(8-9), 1069-1079, 2007.
- [9] LeBlanc, C., Design of offshore wind turbine support structures, PhD Thesis, Aalborg Univ., Aalborg, Denmark, 2009.
- [10] Kim, D.-J., Choo, Y.W., Kim, J.-H., Kim, S., Kim, D.-S., Investigation of monotonic and cyclic behavior of tripod suction bucket foundations for offshore wind towers using centrifuge modeling, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140(5), 1–10, 2014.
- [11] Achmus, M., Thieken, K., Numerical Simulation of the Tensile Resistance of Suction Buckets in Sand, *Journal of Ocean and Wind Energy*, 1(4), 231-239, 2014.
- [12] Villalobos, F.A., Model testing of foundations for offshore wind turbines, PhD Thesis, University of Oxford, United Kingdom, 2006.
- [13] Foglia A., Ibsen, L.B., Andersen, L.V., Roesen, H.R., Physical modelling of bucket foundation under long-term cyclic lateral loading, *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore & Polar Engineers, Rhodes, Greece, 667-673, 2012.
- [14] Zhu, B., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139(1), 73–83, 2013.
- [15] Houlsby, G.T., Ibsen, L.B., Byrne, B.W., Suction Caissons for Wind Turbines. In: Gourvenec, Cassidy (Eds.), *Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG2005*, Taylor & Francis Group, London, 2005.

- [16] Taşan, H.E., Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Saugrohrgründungen unter zyklisch axialen Druckeinwirkungen, *Bautechnik*, 92(9), 595–604, 2015.
- [17] Martin, G.R., Finn, W.D.L, Seed, H.B., Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(5), 423-438, 1975.
- [18] Andersen, K.H., Bearing capacity under cyclic loading - offshore, along the coast, and on land. The 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo, 23 November 2007, *Can. Geotech. J.*, 46(5), 513-535, 2009.
- [19] ANSYS, INC., Programmer's manual for ANSYS, Release 14.0., 2011
- [20] Bauer, E., Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials, *Soils and Foundations*, 36(1), 13-26, 1996.
- [21] Gudehus, G., A comprehensive constitutive equation for granular materials, *Soils and Foundations*, 36(1), 1-12, 1996.
- [22] Kolymbas, D., A rate-dependent constitutive equation for soils, *Mech. Res. Comm.*, 4 (6), 367-372, 1977.
- [23] Wu, W., Hypoplasticity as a mathematical model for the mechanical behavior of granular materials, *Publication Series of the Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics, Karlsruhe University*, No: 129, Germany, 1992.
- [24] Niemunis, A., Herle, I., Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range, *Mechanics of Cohesion-Fractional Materials*, 2(4), 279-299, 1997.
- [25] von Wolffersdorff, P.-A., Hypoplastic Relation for Granular Materials with a Predefined Limit State Surface, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1(3), 251-271, 1996.
- [26] J. Lanier, D. Caillerie, R. Chambonn, G. Viggiani, P. Bésuelle and J. Desrues, A general formulation of hypoplasticity, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, 1461-1478, 2004
- [27] Kolymbas, D., Eine konstitutive Theorie für Böden und andere körnige Stoffe, *Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe, Deutschland*, 1988.
- [28] Herle, I., Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste, *Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe, Deutschland*, 1997.
- [29] Vermeer P. A., Verruijt, A., An accuracy condition for consolidation by finite elements, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5, 1-14, 1981.
- [30] Pastor, M., Li, T., Merodo, J. A. F., Stabilized finite elements for harmonic soil dynamics problems near the undrained-incompressible limit, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16, 161-171, 1997.
- [31] Masud, A., Hughes, T. J. R., A stabilized mixed finite element method for Darcy flow, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, 4341- 4370, 2002.

- [32] Zienkiewicz, O. C., Qu, S., Taylor, R. L., Nakazawa, S., The patch test for mixed formulations, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 23 (10), 1873-1883, 1986.
- [33] Babuška, I., The finite element method with lagrangian multipliers, *Numerische Mathematik*, 20 (3), 179-192, 1973.
- [34] Brezzi, F., On the existence, uniqueness and approximation of saddle point problems arising from lagrangian multipliers, *RAIRO 8-R2*, 129-151, 1974.
- [35] Taşan, H. E., Rackwitz F., Savidis, S., Behaviour of cyclic laterally loaded large diameter monopiles in saturated sand. 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE, Trondheim, Norway, 889-894, 2010.
- [36] Booker, J.R., The Consolidation of a Finite Layer Subject to Surface Loading, *International Journal of Soils and Structures*, 10(7), 1053-1065, 1974.
- [37] Offshore Standard DNV-OSJ101 – Design of Offshore Wind Turbine Structures, Det Norske Veritas January, 2014.
- [38] Ghosh, B., Madabhushi, S.P.G., A numerical investigation into effects of single and multiple frequency earthquake motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(8), 691-704, 2003.
- [39] Matesic, L., Vucetic, M., Strain-rate effect on soil secant shear modulus at small cyclic strains, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(6), 536-549, 2003.
- [40] Rascol, E., Cyclic properties of sand: dynamic behaviour for seismic applications, PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Switzerland, 2009.



# Beton Gürültü Bariyeri İçin Perlit Kaplama ve Maliyeti

Metehan ÇALIŞ<sup>1</sup>  
Zübeyde ÖZTÜRK<sup>2</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada; karayolu trafiği kaynaklı çevresel gürültü ile mücadele yöntemlerinden biri olan gürültü bariyerlerinde ses yutuculuğun artırılması amacı ile özellikle beton bariyerler üzerinde uygulanabilecek olan perlit esaslı bir kaplamanın tasarlanması, fiziksel ve akustik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve maliyetleri açısından değerlendirilmesi yapılmaktadır. Çalışmanın devamında elde edilen gürültü seviyesindeki azalma ve gürültüden etkilenen kişi sayısındaki azalma miktarı ekonomik bir fayda olarak ele alınıp, bariyerin inşa maliyeti ve işletme maliyetleri ile karşılaştırılarak perlitli kaplamanın, belli kabuller altında, 50 yıllık yapı ömrü ile inşa edilmesinin ekonomik olup olmayacağı araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme gürültü bariyeri, perlit kaplama, ekonomik analiz.

## ABSTRACT

### Perlite Coating for Concrete Noise Barriers and its Cost

In this stud, perlite based coatings which can be applied to increase sound absorption capability of noise barriers, and especially use of concrete noise barriers, which is one of the forthcoming methods for overcoming the effects of environmental noise in urban areas caused by highway traffic, is examined in terms of design, experimental evaluation of physical and acoustic performance and costs. In the following stages of the study, considering decrease in the noise level in urban areas and reduction in the number of people adversely affected by traffic noise as economical benefits and comparing these with noise barrier construction and operation costs, also with application of perlite based coating, were evaluated, under certain assumptions, to evaluate its economic feasibility during the 50 years assumed life span of a concrete noise barrier.

**Keywords:** Concrete noise barrier, perlite covering, economic analysis.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 01.07.2016 günü ulaşmıştır. 18.04.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.378524

1 TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvar Müdürlüğü, İstanbul - mcalis@tse.org.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ozturkzu@itu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Mevzuatta yer almasına rağmen, ülkemizde gürültü önlemleri yeterince uygulanmamaktadır. Ülkemizdeki yeni yeni gündeme gelmeye başlayan bu önlem türü, Avrupa ve Amerika'daki birçok ülkede yaşam alanları için standart bir çözüm olarak yer almaktadır. Bu makale yazar tarafından yapılan doktora tezinden hazırlanmış olup, çalışmanın bir kısmında, 'Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği' gereği yaşam alanlarında sağlanması gereken gürültü değerlerinin aşılmaması için, trafik kaynaklı gürültünün azaltılmasında kullanılan genellikle gürültü yansıtıcı özellikteki betonarme gürültü bariyerlerinin inşaa ve işletme maliyetleri araştırılmıştır [1]. Çalışmanın pratikte yer alan malzeme geliştirme kısmı, Avrupa Standartlarına uygun şekilde laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile desteklenmiştir. Çalışma deneysel, teorik ve hesaba dayalı bölümlere sahip olup, özgündür. Çalışmaya ait teorik ve hesaplama kısmında ise;

- Perlit esaslı kaplama uygulanmış ve uygulanmamış bariyerlerde, gürültü haritalama yazılımı yardımı ile belirli trafik ve çevre koşulları altında gürültü azaltma performans değerleri,
- Gürültü azaltma performansındaki artışa karşılık gelen inşaa ve işletme maliyetleri ile Fayda/Maliyet oranlarının hesaplanması,
- İnşaa ve İşletme maliyetlerdeki değişimlerin Fayda/Maliyet üzerindeki etkileri,

hakkında elde edilen değerler tablolar ile birlikte karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Ancak makale sayfa sınırlandırılması nedeniyle bu doktora tezinin bir bölümü olan ekonomik analiz kısmına ağırlık verilerek hazırlanmıştır.

## 2. BETON GÜRÜLTÜ BARIYERİ VE PERLİT KULLANIMI

### 2.1. Beton Bariyer

Özellikle otoyol kenarlarında kullanımı günden güne artmakta olan gürültü bariyerleri, gürültünün azaltılmasında etkili olmaları sebebiyle oldukça fazla talep almaktadırlar. Bariyerler genellikle 10-15 dB(A) arası bir gürültü azaltımı sağlayabilirler. Beton, üretimi yapısı ile kalitesi kontrol altında tutulabilen, kolay üretilen, oldukça yaygın kullanımı olan bir yapı malzemesidir. Özellikle beton santrallerindeki ileri teknoloji ve beton üzerine yapılan yoğun Ar-ge çalışmaları sonucu dayanımı yüksek, iklim koşullarına karşı dayanıklı ve her üretimde aynı karakteristikleri sağlayabilen beton üretmek mümkün hale gelmiştir. Beton bariyerlerin diğer bariyer tiplerine göre avantajları şunlardır:

- Beton gürültü perdeleri düşük bakım ihtiyaçları yönüyle en fazla tercih edilen bariyer tipidir.
- Beton, piriz almadan önce veya uygun kalıplar ile beton üzerine istenilen yüzey tipi verilebilmesinden dolayı bununla tasarım yönünden özgün, akustik olarak etkili ve görsel olarak estetik çözümler sunulabilir.
- İmalatında hammadde olarak taş, kum, su ve çimento gibi doğal ve kolay elde edilebilir maddeler kullanıldığından, beton çok zorlu fiziksel şartlar altında dahi yerinde döküm olarak bariyer imalatında kullanılabilir.

- Nitelikli işçi gereksinimi diğer bariyer tiplerine göre daha azdır.
- Trafik kaynaklı etkilerin yanı sıra kullanımı boyunca alınıp satılabilecek bir özelliği bulunmadığından, boyama hariç diğer vandalizm etkilerine karşı en dayanıklı malzemedir.
- Betonun özgül ağırlığı nedeniyle yüzey kütle ve rijitliği oldukça fazladır.

Betonun gürültü perdelerinde kullanımı iki şekilde yapılmaktadır: Yerinde döküm ve prefabrikasyon. Bu iki tip üretimin de birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Genellikle projeye göre değerlendirilerek bir tercih yapılmalıdır. Tercih aşamasında proje süresi, yerinde imalata uygunluk ve prefabrik imalatın yapıldığı yer ile proje alanı arasındaki uzaklık gibi hususlar dikkate alınmalıdır.

## 2.2. Perlit ve Deneysel Çalışma

Perlit ısıyla genleşme özelliği olan, geliştirildiğinde çok hafif ve gözenekli bir hale geçen volkanik bir kayadır. Volkanik kayalar kırıldığında oluşan küçük beyaz tanecikler inciye benzediğinden dolayı, perlitin kelime kökeni “perle”dir. Perlit kayaları renk olarak birbirinden farklı olabilir, ancak tüm perlit kayaları 850-900°C gibi yüksek sıcaklıkta patlatılıp geliştirildikten sonra beyaz rengini alır. Patlayarak genleşme özelliği ile perlit diğer volkanik kayalardan ayrılır. Genleşmiş perlitin rengi kar beyazı ile grimsi beyaz tonları arasında değişmektedir. Patlatılmış perlit, ilk hacmine oranla 4-20 kat arasında hacim kazanmaktadır. Perlit içinde %2-6 arasında değişen oranda su barındırır. Bu su patlatma sırasında yüksek sıcaklık nedeni ile buharlaşarak perlit içinde sayısız küçük baloncuk veya odacık meydana getirir. Bu patlama neticesinde meydana gelen hacim artışı neticesinde kırılmış ham perlitin yaklaşık 1100 kg/m<sup>3</sup> olan ham yoğunluğu patlama sonrasında 30-150 kg/m<sup>3</sup> değerlerine kadar düşer.

Dünya perlit rezervinin yarısından fazlasının Türkiye’de bulunduğu [2] ve Türkiye’nin muhtemel perlit rezervinin yaklaşık 4,5 milyar ton civarında olduğu tahmin edilmektedir [3]. 2011 yılında dünya’da 1,7 milyon ton perlit üretildiği ve bunun büyük bölümünün Yunanistan, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Türkiye tarafından üretildiği belirtilmektedir [4]. Perlit ülkemizde doğuda Erzurum, Kars, Ermenistan sınırları ile batıda İzmir, Çanakkale, Manisa, Dikili, Bergama dolaylarında çıkarılmaktadır. Orta Anadolu’da ise Ankara ve çevresinde perlit kaynakları bulunmaktadır ve bu kaynaklarda yararlanacak mühendislik projelerinin geliştirilmesi gerekir. Bu amaçla yapılan doktora tezinde perlitin kaplama olarak kullanımı için malzemenin uygunluğuna ve akustik yutuculuk katsayısının belirlenmesine yönelik deneysel ve saha çalışmaları yapılmış olmakla birlikte içerik çok geniş olduğu için bu makalede ekonomik analiz kısmına yer verilmektedir.

Patlatılmış perlitin yapı elemanı olarak ısı yalıtımı amaçlı kullanılması, ancak akustik yutuculuk özelliğinin daha önce kullanılmaması bu çalışmaya başlamada belirleyici unsur olmuştur. Hem perlitin kendi boşluğunun hem de yapılan işlemlerden sonra elde edilen boşluklu yapının ses yutuculuk anlamında yeterli bir performans göstererek bir gürültü önlemi olarak kullanılması planlanmıştır. İki deney grubu yaklaşık olarak aynı kalınlıkta hazırlanmış olup, sadece tabakalı yapıları yönü ile birbirinden farklıdır. Kullanılan perlit üretim partileri aynıdır, yani yapısal olarak birbirinden farklı değildir. Yapılan fiziksel

deneylere ait sonuçlarda tasarlanan perlitli plakaların yapısal özelliklerinin önemli ölçüde farklı olmamasından dolayı büyük farklılıklar gözlenmemektedir (Çizelge 1). Özellikle ikinci deney numunesi grubundaki alt ince tabakanın genel yoğunluğu 350 kg/m<sup>3</sup>'ten 400kg/m<sup>3</sup>'e artırmasından dolayı basınç dayanımında da 0,12MPa'dan 0,18MPa'a artış gözlenmiştir. Beton yüzeye yapılan ve tasarlanan perlitli tabakayı beton plakaya bağlayan sıva tabakasının her iki deney grubunda aynı olmasından dolayı, perlit kaplama tabakasının alt tabakaya yapışma mukavemetleri birbirine oldukça yakındır. Çimento esaslı farklı yapıştırıcılar kullanılarak beton yüzeye yapışma mukavemetleri 0,12MPa'dan yukarılara çekilebilir.

Çizelge 1. Fiziksel deneylerin ölçüm sonuçları.

| Deney Adı ve Standart Numarası   | I. Numune Grubu        | II. Numune Grubu       | Değişim                | Değişim (%) |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| TS EN 1015-11 Basınç Dayanımı  | 0,12 N/mm <sup>2</sup> | 0,18 N/mm <sup>2</sup> | 0,06 N/mm <sup>2</sup> | %50         |
| TS EN 1015-12 Bağ Dayanımı (1 cm kalınlığında perlitli sıva ile birlikte)* | 0,12 N/mm <sup>2</sup> | 0,13 N/mm <sup>2</sup> | 0,01 N/mm <sup>2</sup> | %8          |
| TS EN 1015-10 Kuru Birim Hacim Ağırlığı                                    | 351 kg/m <sup>3</sup>  | 405 kg/m <sup>3</sup>  | 54 kg/m <sup>3</sup>   | %15         |

\* kopmalar perlitli sıva ile perlit kaplama tabakaları arasından meydana gelmiştir.

Gürültü bariyerlerinin ses yutum özellikleri hesaplanırken, her frekans aralığındaki değerler yerine insan kulağının en hassas olduğu frekans değerleri dikkate alınır. Bu değerler 250Hz, 500 Hz, 100 Hz ve 2000 Hz alınarak, malzemenin bu frekanslardaki ses yutum katsayısı değerlerinin aritmetik ortalaması alınıp, bulunan sonuç en yakın 0,05 dB'e yuvarlanır ve malzemenin ses yutum katsayısı tek sayılı bir ifade haline dönüştürülmüş olur. ASTM C 423-2a Standardında bu değer Gürültü Azaltma Katsayısı (NRC–Noise Reduction Coefficient) olarak (1) adlandırılmaktadır [5].

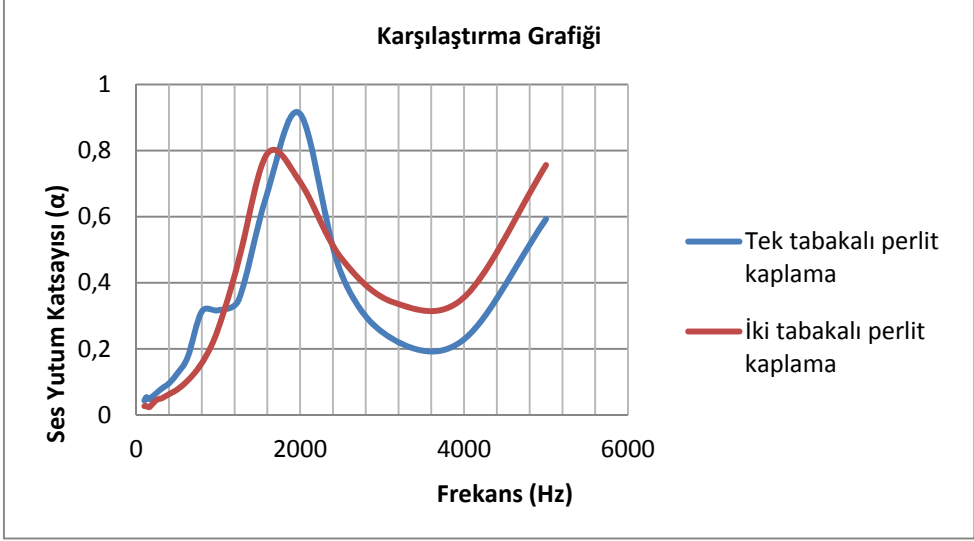
$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (1)$$

NRC değeri 1,0'e yakınsa o malzemeler için ses yutucu özellikte malzemeler denilebilir. Malzemenin NRC değeri 0,4 civarında ise, bu tip malzemeler için orta düzeyli ses yutucu malzeme, NRC değeri 0,3'ten azsa yansıtıcı malzeme denilebilir.

Yapılan akustik ölçümler ile tabakalı yapıdaki 2. grup deney numunelerinde kullanılan ince granüllü patlamış perlit numunesinin, beklenildiği üzere 1250 Hz ve üzerindeki yüksek frekanslarda malzemenin ses yutum özelliğini önemli ölçüde geliştirdiği, ancak orta ve düşük frekanslarda ise mevcut ses yutum performansını azalttığı görülmektedir. NRC ölçüm hesabında kullanılan frekansların ortalaması dikkate alındığında bu durum açıkça ortaya çıkmaktadır. Nitekim ilk numune grubunun NRC değeri 0,36 iken ikinci numune grubunun NRC değeri 0,27 olarak ölçülmüştür.



TS EN 1793-1'e göre değerlendirme yapıldığında  $DL\alpha$  değeri (Tek Değerli A-Seviye Ağırlıklandırılmış Ses Basınç Seviyeleri Farkı) tek tabakalı deney numunesi grubu için 4,69 dB çıkarken, iki tabakalı deney numunesi grubunda bu değer 4,95 dB olarak ölçülmüştür. (Şekil 1).



Şekil 1. Ölçüm sonuçları karşılaştırma grafiği.

TS EN 1793-1'de NRC'den farklı olarak 1/3 oktav bantlarının tüm frekanslarındaki ses yutum katsayıları dikkate alındığı için [6] iki tabakalı deney numunesinin akustik performansı daha iyi sonuçlanmıştır. Her iki deney grubu numunesi ilgili standarda göre A2 sınıfında yer almaktadır.

### 3. EKONOMİK ANALİZ

Gürültü bariyerlerinin inşa ve işletme maliyetleri karar vericiler için belirlenmesi gereken önemli faktörlerdir. Bunun için aşağıda açıklanan hususlar önemlidir:

-Gürültü bariyeri inşa maliyeti; projenin uygulanacağı alan ile yakından ilişkilidir. Arazi maliyeti olarak kamulaştırma maliyeti ortaya çıkmaktadır, ancak bu bedel malzeme seçiminde kullanılan karşılaştırma hesaplarında dikkate alınmamaktadır. Bunun dışında bir bariyerin inşa maliyetini sadece bariyer aks uzunluğu, yükseklik ve kalınlığı ile kullanılacak malzeme türü ile birlikte drenaj, zemin yapısı ve temel tipi, işçilik, imalat yerine uzaklık gibi diğer etmenler de etkilemektedir. Bariyer maliyetlerinin karşılaştırılmasında en büyük problem ise bariyer inşası noktasında maliyeti etkileyen projenin uygulanacağı şehir, projenin büyüklüğü ve inşa süresi, gereklyse kamulaştırma yapılacak arazinin değeri, inşa ve üretim sahaları arasındaki mesafe gibi birçok değişken faktörün bulunmasıdır. Dolayısıyla her projede aynı malzemeler kullanılsa dahi farklı maliyetler ortaya çıkmaktadır. Ancak bu durum ortalama bir maliyet ortaya koymaya engel değildir. Kamulaştırma gibi değişken

kalemlerin karşılaştırma dışı tutulması ve idarelerin ortak bir karşılaştırma listesi oluşturması faydalı olacaktır.

-Bariyerin işletme maliyeti; hizmet ömrü süresince oluşan maliyettir. Yaşam döngü maliyeti olarak da adlandırılır. Bariyerin malzeme tipi, bulunduğu iklim şartları, yüzey dokusu, rengi, diğer parçalarının birbiri ile uyumu (büzülme/genleşme gibi), yola olan mesafesi, kaza güvenliği gibi birçok faktör işletme maliyetini etkilemektedir. Tamir en büyük işletme maliyet kalemlerinden birisidir. Araçların veya araçlardan sıçrayan parçaların bariyere çarpması, bariyer inşası sırasında oluşan kusurların zamanla açığa çıkması, zamanla eskime veya kuvvetli dış etkilere maruz kalma gibi sebepler bariyer tamirini zorunlu kılmaktadır. Bakım ise eskime veya yenilenme gerektirmeden önce bariyeri koruyucu önlemlerin alınmasıdır. Özellikle boyama gibi yüzey kaplama işlemleri bakım kapsamındadır. Tamir ve bakım ile çözülemeyen problemler kısmi veya bütün olarak değiştirilme yolu ile yenilenmektedir.

Toprak sedler hariç tüm bariyerler grafitler için boyama veya temizlenmeye ihtiyaç duyarlar. UV dayanımı düşük olan boyalı bariyerlerde yeniden boyama işlemi uygulanırken, şeffaf bariyerlerde ise parçaların değiştirilmesi söz konusudur. Kay ve diğ.'nin yaptığı araştırmaya göre bakım maliyet hesaplarında, ortalama her 5 yılda bir kez toplam bariyer alanının %1'i kadar alanın grafitiden temizlenmesi gerektiği varsayılmaktadır [7]. Aynı araştırmaya göre, beton bariyerlerin ömrü 50 yıl kabul edilerek, boya uygulanan beton bariyerlerde yeniden boyama her 20 yılda bir kez, sundurma tip boyasız beton bariyerlere estetik amaçlı boyama 25 yılda bir kez, metal bariyerlerde yeniden boyama 10 yılda bir kez yapılmalıdır. Ahşap bariyerlerin ömrü 25 yıl varsayıldığında, prekast beton paneller gibi her 10 yılda panel değişimi öngörülmektedir. Ayrıca hizmet ömrünü dolduran bariyerlerin atık maliyeti de işletme maliyeti içinde değerlendirilmektedir.

### **3.1. Gürültünün Ekonomik Analizinde Kullanılan Tekniklere İlişkin Literatür**

Doğrudan ölçemediğimiz fakat etkilerini gözlemleyip yaşadığımız olguları proje fayda veya zararı olarak hesaba katmak gerekir. Gürültü de ticari olmayan olgulardandır. Ulaşım projelerinin fizibilite onay kılavuzlarında fayda maliyet analizi girdisi olarak gürültünün ekonomik değerinin dikkate alınıp alınmaması durumu ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Bir ulaşım projesinde oluşan çevresel etkilerin ekonomik analizde girdi olarak kullanılmasında en çok kullanılan metot hasar fonksiyonu yaklaşımıdır (damage function approach). Çevresel etki oluşan trafik gürültüsü olarak alınırsa, şu aşamalardan oluşan bir değerlendirme işlemi yapılır [8]:

1. Proje ile oluşan gürültü emisyon değişimi yer, zaman, frekans, seviye, gürültü kaynağı tipi (birden fazla kaynak tipi de olabilir) ile birlikte tanımlanır.
2. Gürültü yayılım modelleri kullanılarak farklı noktalardaki gürültüye maruz kalma miktarı dB(A) ve gürültü indikatörleri (L<sub>dey</sub> ve L<sub>night</sub>) olarak tahmin edilir.
3. Gürültü indikatörleri ile belirlenen gürültü aralıklarında, tepki (response) tipine ait "1 yılda gürültüden en fazla rahatsız olan (HA=highly annoyed) kişi yüzdesi" gibi nihai nokta belirlenir. Tepki tipine ait nihai noktalar ile maruz kalma (exposure) arasında bir bağıntı kurulur. Bu bağıntıya Maruziyet-Tepki Fonksiyonu (Exposure-Response Funtion=ERF) denir.

4. ERF ve nihai noktalar için gerekli bilgi veri tabanı oluşturulur. Örneğin, en fazla rahatsız olan kişi sayısındaki değişimi belirleyebilmek için proje alanındaki etkilenecek bina sayısı, binalardaki daire sayıları, daire başına düşen kişi sayısı, varsa mevcut gürültü önlemleri gibi bilgilerin toplanması gerekmektedir.

5. ERF'ye ait her bir nihai noktanın bir birimlik değişiminin ekonomik değerini bulabilmek için Çevresel Değerleme Teknikleri olarak 2 ana yaklaşımdan biri kullanılır:

-Bu projeye özel temel bir çevresel değerlendirme tekniği olan Belirlenmiş Tercihler Tekniği,

-Mevcut değerlendirme çalışmalarıyla elde edilmiş tahminlerin transferi (fayda transfer teknikleri kullanımı, gürültü değerlendirme çalışmaları üzerine literatür veya veri tabanı taraması kullanımı gibi).

6. Ekonomik fayda/maliyet analizi ile hesaplanan gürültü rahatsızlığındaki azalma veya artışın ekonomik değeri, ilgili etkiye (örneğin; yıllık HA kişi sayısının değişim miktarı) bağlı olarak her bir nihai nokta (örneğin; Euro/HA kişi sayısı/yıl) için hesaplanır. En sonunda ise, ERF'lere ait tüm nihai noktalardan elde edilen değerler toplanır. Yukarıda belirtilen aşamalardaki “çok fazla rahatsız olma” durumu kişiden kişiye değişen ve anketlerle belirlenen bir olgudur. Bu olgunun sosyal ve sosyo-akustik anketlerde değerlendirilebilmesi için Uluslararası Standartlaştırma Organizasyonu (ISO) tarafından ISO/TS 15666 numaralı Teknik Şartname yayımlanmıştır [9]. Bu döküman sadece soru şekilleri, cevap ölçekleri ve sonuçların raporlanma formatını belirlemekte olup, sonuçların analizine yönelik bir kural/kısıt getirmemektedir. Bu teknik şartname kuralları sadece “evde” meydana gelen huzursuzluklar için geçerlidir, denilmektedir. Bu Rehber göre gürültü rahatsızlık ölçeği “kelime” esaslı cevaplar için “hiç-az-orta-çok-aşırı” olmak üzere 5, “sayısal” cevaplar için “0-10 arası” olmak üzere 11 ölçeklidir. “Çok fazla rahatsız olma (HA)” bu ölçek grubu için çok rahatsız ve aşırı rahatsız olma durumlarını kapsamaktadır [9].

Gürültü maliyetinin belirlenmesinde başlıca 3 ana başlık bulunmaktadır:

1. Kaynak Maliyeti: Genel veya özel sağlık sigortası ile doğrudan nakit olarak ödenen sağlık harcamaları bu grupta yer almaktadır.

2. Fırsat Maliyeti: İş zamanının kaybı (performans düşüklüğü nedeni ile üretkenliğin azalması durumu) veya kişisel zaman kaybının (ödemesi olmayan iş dahil fazla çalışma durumundan dolayı kişisel zaman kaybı) maliyeti bu grupta yer almaktadır.

3. Yararsızlık (Dis-utility) Maliyeti: Gürültü nedeni ile kişisel zaman tatminindeki azalma, konforsuzluk veya rahatsızlık, ağrı ve keder, gelecek hakkında ümitsizliğe düşme, aile fertlerine veya başkalarına rahatsızlık verme vb. durumları ele alınmaktadır.

İlk iki madde genel olarak hastalıktan sakınma maliyeti (Cost-of-Illness COI) olarak adlandırılmaktadır. Ulaşım gürültüsünün değerlemesinde genellikle gürültüden duyulan rahatsızlığın kendisi dikkate alınır. Sağlık üzerindeki etkisi veya uyku üzerindeki etkileri kimi zaman dikkate alınırken, algı ve iletişim üzerindeki etkisi ise hiç dikkate alınmamaktadır. Ayrıca bu değerlemede okul, ofis, fabrika gibi alanlarda değil, sadece “konutlarda” meydana gelen trafik gürültü rahatsızlığı hesaba katılmaktadır. Gürültü değerlemesi üzerine büyük etkisi olmasa da, Avrupa’da sadece Fransa ve Danimarka’da gürültünün sağlık üzerindeki etkisi dikkate alınmaktadır [10].

### **3.1.1. Karayolu Kaynaklı Gürültüyü Değerleme Teknikleri**

Otoyol kenarında yaşayan insanların otoyoldan kaynaklanan gürültüden ne kadar etkilendiği akustik ölçümler veya modeller yardımı ile bulunabilir veya tahmin edilebilir. Oluşan etki fayda-maliyet analizine dönüştürülmek istenildiğinde ise farklı birimlerdeki farklı olguların birlikte nasıl değerlendirileceği problemi ortaya çıkmaktadır. Böyle bir çalışmada tüm girdiler ve çıktılar, fayda ve maliyet olarak değerlendirilmesinde, aynı birime dönüştürülmesi gerekir. Tüm soyut ve somut olguları, oluşan gürültünün yaptığı etkiyi de parasal olarak dönüştürmek gerekmektedir. Literatürde çok farklı çevresel değerlendirme sınıflandırmaları bulunsa da genel olarak doğrudan (belirlenmiş tercihler) ve dolaylı (önceki çalışma sonuçlarının transferi) metodlar olarak ayrılabilir.

#### **Açıklanmış Tercihler (stated preferences-sp) Teknikleri**

Açıklanmış tercihler tekniği daha çok piyasa araştırması için kullanılmak amacı ile 1970lerde geliştirilmiştir. Doğrudan ölçüm metodlarından olup, daha çok anket çalışmasına dayalı çalışmalardır. Anket yapılan grup veya topluluğun sorulan sorular karşısında verdiği cevaplara göre herhangi bir mal veya hizmet için en fazla ne kadar ödeyebileceklerinin belirlenmesine yönelik yöntemler grubudur. Bu teknikte en çok kullanılan soru tarzı, belli parametrelerle (ulaşım modu-para-zaman gibi) karşılaştırmalı olarak verilen iki durum karşısında anket grubunun hangisini seçeceğini kesinlik derecesine göre belirlemesi şeklindedir. Kesinlik derecesi “kesinlikle A/B”, “belki A/B” veya “A ve B arasında kararsız” gibi sunulan seçeneklerin anket grubu tarafından işaretlenmesi şeklinde belirlenmektedir. Açıklanmış tercihler metodunun dezavantajlarından biri de verilen cevapların doğruluğudur. Nitekim verilen cevapların ne kadar sağlıklı olduğunun kimi zaman başka metodlarla doğrulanması gerekebilir [11].

#### **Belirlenmiş Tercihler Teknikleri**

Koşullu Değerleme Yöntemi (contingent valuation method-CVM): Doğrudan ölçüm yaklaşımı ile anket grubuna kazanacakları bir fayda için doğrudan ödemek istedikleri vergi veya ödeme şeklinde belirtilmiş tutarın (Ödeme İstekliliği veya WTP–willingness to pay) veya kaybedecekleri bir fayda için kabul edecekleri kendilerine yapılacak ödemenin (Kabul İstekliliği veya WTA–willingness to accept) sorulması ile gerçekleştirilen çalışmadır. Soruların önyargıdan uzak hazırlanması gerekir ve anket yapılan kişileri mümkün olduğunca tanıyabilme imkanı sunmalıdır. CVM’nin en önemli dezavantajı ödeme istekliliği her zaman ödeyebilme gücü anlamına gelmemektedir. Burada dikkat edilecek diğer bir husus da protesto amacı ile verilen aykırı değerlerdir. Belli bir alan dışında kalan aykırı sonuçlar değerlendirme dışına alınmalıdır.

Tercih Modellemesi (choice modelling): Ankete katılanların belli alternatifler arasında seçim yapması talep edilir. Her bir alternatifin altında o alternatife ait tanımlayıcı ve/veya ayırt edici nitelikler bulunmaktadır. Bu nitelikler en fazla 4-5 adet kadar olup, anket grubundan bu alternatifler arasından en çok hangisini diğerlerine tercih ettiğini belirlemek üzere sıralama yapması istenir. Tüketici bu durumda tercihini ayrı ayrı özelliklerin değerlendirilmesi olarak değil, tüm özelliklerin birarada olduğu bir paket olarak gerçekleştirmiş olur.

## Ortaya Çıkan Tercihler (revealed preferences-RP) Teknikleri

Belirlenmiş teknikler metodundaki gibi kuramsal bir alan üzerinde soru sorma şeklinde değil, gerçekleşen tercih ve olayların gözlemlenmesi esasına dayanmaktadır. Kısaca dolaylı ölçüm teknikleridir. Bu tekniklerde piyasadaki tüketicilerin gerçekleştirdikleri davranışlardan, fayda olarak kazanacakları bir hizmete ne kadar ödeyebilecekleri tahmin edilmeye çalışılır. En çok kullanılan RP teknikleri şunlardır:

**Hedonik Ücretleme Yöntemi (hedonic pricing method-HPM):** Büyüklük, yapı, tasarım gibi aynı fiziksel özelliklere ait iki ev arasında dahi fiyat olarak fark olabilir. Bunun nedeni ulaşım modlarına yakınlık, aydınlanma oranı, işe yakınlık, manzara gibi diğer etmenlerdir. Bu durumda tüketiciler bu çevre şartları için ne kadar fazla ödeyebileceklerine karar vermektedirler. Hedonik Yaklaşım bu farkı belirlemeye yönelik bir tekniktir. Değerlendirme olarak denge durumundaki bir piyasadaki konut fiyatlarını dikkate alır.

**Seyahat Maliyeti Yöntemi (travel cost method-TCM):** Genellikle seyahat ve dinlenme hizmetlerinin değerini ölçmek için kullanılan bir methodtur. Seyahat zamanı ve araç kullanımından kaynaklanan maliyetler, genel maliyetler arasında yer almalıdır. Seyahat zamanını maliyet olarak dönüştürürken genellikle birim zaman çalışma maliyeti dikkate alınmaktadır, ancak insanlar çalışma saatleri içerisinde bu tip seyahatler yapmamaktadır. Ayrıca sigorta ve amortisman giderleri bazı değerlendirmelerde yakıt gideri ile birlikte dikkate alınmamaktadır. Bu belirsizlikler, örneğin çalışma saati birim ücretinin %50sinin veya 1/3ünün birim saat maliyeti olarak dikkate alınması gibi belli kabuller ile aşılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise gerçekleştirilen seyahatin bir amaç için gerçekleştiriliyor olmasıdır. Aksi takdirde maliyetlerin amaçlar arasında bölüştürülmesi gerekir.

**Fayda Transfer Yöntemi (benefit transfer method-BT):** Piyasada bulunmayan bir ürün veya gerçekleşmemiş bir faaliyet için yapılan öngörü metodlarından. Farklı bir lokasyon ve şartlarda gerçekleşmiş ürün veya hizmetin, bulunulan konuma transfer edilmesi ile sonuçların öngörülmeye çalışılmasıdır. Anket çalışmalarının uzun zaman alması ve maliyetli olmasından dolayı oldukça faydalı bir yöntemdir. Fayda transfer yönteminde ise 2 ana yaklaşım mevcuttur.

- Tekil Değer Transfer Metodu (basit yöntem)

-Basit Birim Transferi: Fayda transferindeki en kolay yöntem olup, daha önce yürütülen bir çalışma alanından elde edilen ortama fayda (utility) veya kullanılmazlık (dis-utility) değerinin aynı mevzuata tabi olan alan içerisinde ortalama değer olarak kullanılmasıdır.

-Birim Transferi (gelir düzeltme faktörü ile): Eğer tahmini fayda birimi örneğin “Euro/dB/kişi/yıl” ise, aynı politik alan içerisinde olsa bile kişilerin 1 dB değişim için verecekleri rahatsızlık tepki düzeyi birbirinden farklı olacaktır. Bunun ilk nedeni gelir, din, eğitim düzeyi, sosyo-ekonomik durum vb. farklılıklar iken diğer nedeni ise, insanların gürültüden kaçınmak için aynı şartlara sahip olmamalarıdır. Eğer tahmini fayda birimi örneğin “Euro/rahatsız olan kişi sayısı/yıl” şeklinde düzenlenirse, bu kısıtlara takılmadan değerlendirme yapma imkanı oluşacaktır. Ancak ülkeler arasında basit birim transfer metodu doğrudan kullanılmamalıdır. Satınalma gücü paritesi (PPP) indeksi gibi bir karşılaştırma ile birim transfer değeri üzerinde gelir düzeyi düzeltmesi yapılmalıdır. Her ne kadar gelir düzeyi

dikkate alınsa da din, kültür, eğitim düzeyi gibi daha önce sayılan birçok parametre bu dönüşümde kullanılmamaktadır.

- Fonksiyon Transfer Metodu

-Fayda Fonksiyon Transferi: Fayda değerinin kendisinin transfer edilmesinden fayda değerinin bulunmasında kullanılan fonksiyonun transfer edilmesi metodudur.

-Meta Analizi: Sadece bir değerlendirme sonucunda elde edilen fayda fonksiyonunun transferinden, birçok değerlendirme çalışmasının sonucundan ortak bir fayda fonksiyonunun tahmin edilmesi metodudur.

### **3.1.2. Gürültü Bariyeri için Fayda /Maliyet Analizi**

Fayda-maliyet analizi (FMA), proje ömrü boyunca projedeki indirgenmiş girdilerin, diğer bir ifade ile kazanımların projenin indirgenmiş çıktılarına oranlanmasıdır. Girdi ve çıktılar yıllara sari olarak işlem gerektiriyorsa, tüm değerlerin bugünkü değerlere eşitlenmesi gerekmektedir (Bağıntı 2).

$$F/M = \frac{\sum_{t=0}^{m+n} \frac{F_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{m+n} \frac{M_t}{(1+i)^t}} \quad (2)$$

F: Fayda, M: Maliyet, Ft: Projenin t yılındaki faydalar, Mt: Projenin t yılındaki maliyetler, m: Proje inşa süresi, n: Projenin ekonomik ömrü, i: Gerçek faiz oranı (Real Interest Rate) veya indirgeme oranıdır. “i” ile verilen gerçek faiz oranı piyasadaki faiz oranı kavramından farklıdır.

Piyasada kullanılan faiz oranı 3 ana bileşenden oluşmaktadır;

- Enflasyon bileşeni: Bu bileşen alım gücündeki azalmayı göstermektedir.
- Risk bileşeni: Bu bileşen borcun geri ödenmemesi durumundaki riski ifade etmektedir.
- Gerçek faiz oranı: Risksiz faiz de denilen, paranın üretim değerini gösteren ve enflasyon bileşeninden bağımsız genellikle devlet tahvil ve bonusu faiz oranlarından enflasyon oranının çıkarılması ile elde edilen birleşendir.

İndirgeme oranını belirleyen unsurlar şunlardır;

- Borç alınan finansman kaynakları için ödenen faiz oranları
- Sermaye piyasasında geçerli olan faiz oranları (mevduat faizi, bono faizi vb).
- Benzer yatırım konularındaki kârlılık oranları.

Dış borçlanma, özkaynaklar, ticari kredi gibi birden fazla kaynak kullanılıyor ise, birden fazla indirgeme oranı bulunup, bunların ağırlıklı ortalaması alınarak tek bir indirgeme oranı elde edilmektedir. Birçok çevre ekonomisti, fiyatların başlangıç yılına veya istenilen bir tarihe indirgenmesinde kullanılan ve indirim oranı (i) olarak verilen değerlerin hesaplarda kullanılmamasını veya çok düşük bir değer olarak ele alınması gerektiğini ifade etmektedir.

Bir projenin yatırım yapılabilir nitelikte olup olmamasında sadece F/M analizi kullanılmaz. Fizibilite çalışmalarında genellikle belli bir tarihe indirgeme tekniğine dayanan aşağıdaki metotlar da kullanılmaktadır; [12]

- Net Bugünkü Değer (net present value) (NBD-NPV)
- İç Kârlılık Oranı (internal rate of return) (İKO-IRR)
- Fayda/Maliyet Oranı (benefit/cost ratio) (F/M-B/C)
- Geri Ödeme Süresi (payback period).

Avrupa’da gürültü bariyerlerinin ekonomik anlamda yatırım yapmaya değer olup olmadığının karar verilmesinde genel olarak proje analiz tekniklerinden biri olan FMA kullanılmaktadır [13]. Bir gürültü bariyeri için fayda maliyet analizi için fayda ve maliyet olarak temel girdiler şu şekilde özetlenebilir;

Maliyetler (bariyer inşa ve işletme maliyeti): Bariyerin inşa süresince harcanacak tüm kalemlere ait maliyetler ile bariyerin hizmet ömrü boyunca gerektirdiği bakım, onarım, yenileme gibi her türlü işletme maliyetini içermektedir. Genellikle sadece bu iki maliyet türü FMA’nin maliyet kısmı için kullanılmaktadır. Belirlenen servis ömrü için bu aşamada kaplamalı ve kaplamasız beton bariyer tipleri için belirlenen literatür ömrüne göre (50 yıl), 1 km uzunluğunda inşa edilen bir gürültü bariyerinin hizmet ömrü boyunca meydana gelecek tamir bakım ve onarım giderleri işletme gideri olarak hesaplanarak, bugünkü değer (PW=Present Worth) cinsinden Bağıntı (3) kullanılarak [14] güncellenmektedir.

$$PW = ICC + \sum_{k=1}^n FC \left[ \frac{1}{(1+i)^k} \right] \quad (3)$$

PW: Bugünkü değer (Present Worth), ICC: Başlangıç inşa maliyeti (Initial Construction Cost), FC: Bakım giderleri (Future Costs), n: Hizmet ömrü (Number of years), i: İndirgeme oranıdır.

Gürültü bariyerleri bakım giderleri için gereken malzeme ve iş gücü birim fiyatları Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın yayınladığı pozlardan alınmıştır. Türkiye’de bariyer kullanımının henüz yaygınlaşmaması ve bu konuda bir veri tabanının olmamasından dolayı hesaplamalarda kullanılacak değişim, bakım gibi işlem sıklıkları için ise aşağıdaki kabuller dikkate alınacaktır [14];

- Değiştirme: Her 10 yılda 1 kez toplam bariyer uzunluğunun %1’inin değiştiği varsayılmaktadır.
- Genel Boyama: Grafiti (duvar yazıları) önleyici olarak uygulanan boyama aşamasıdır. Her 5 yılda 1 kez bariyer toplam alanının %1’inin boyandığı varsayılmaktadır.
- Koruyucu Boyama: Kendiliğinden desenli veya dokulu beton yüzeyler için boyama gerekmemektedir, ancak bariyer ömrünün yarısında (genellikle 25 yıl) bunların boyandığı varsayılır. Genel anlamda boyanan beton yüzeyler için boyama sıklığı 20 yıldır. Metal yüzeyler için ise 10 yıl dikkate alınmaktadır.
- Çim Biçme ve Arazi İşleri: Sadece toprak sed bariyerler için geçerlidir. Yıllık olarak gerçekleştirilmektedir.

Faydalar (akustik konfor kazanımları): Bariyerin işletme ömrü boyunca, bariyerin konumlanması nedeni ile akustik olarak çevresel gürültü düzeyinde bir azalma meydana gelecektir. İletişimde anlaşılabilirlik, gürültü nedeni ile tetiklenen stres ve kalp rahatsızlıklarında azalma, ev içi akustik yaşam kalitesinin artması, dinginlik, eğitim veriminin artması, gürültü kaynaklı uykusuzluk problemlerinde azalma gibi akustik konforun getireceği birçok fayda bulunmaktadır. Bu faydaların parasal karşılığının bulunmasında daha önce de bahsedilen gürültünün ekonomik değerlendirilmesi metodlarından biri kullanılmaktadır.

Çalışmada Türkiye'deki gürültünün ekonomik analizi için ülke bazında bir çalışma yapılmadığından Avrupa Birliği ülkeleri tarafından Avrupa geneli için yapılan çalışma ve kabuller ile Fayda Transfer (BT) Metodu kullanılacaktır. Avrupa'da gürültüden rahatsız olan insan sayısını bulmak için genellikle  $L_{gag}$  kullanılmaktadır [7]. Gürültüden etkilenme oranı da her gürültü seviyesi için insanlar arasında farklılık göstermektedir. Bu nedenle öncelikle rahatsız olma miktarını gruplayarak tanımlamak gerekmektedir. Dünya Sağlık Örgütü-WHO [15], çevresel etki değerlendirmesinde kullanılan "rahatsızlık (annoyance)" kavramının tanımını "bir gürültü ile başlatılmış hoşnutsuzluk hali" olarak tanımlamaktadır. Bu hoşnutsuzluk halini ülkeler farklı kategorize etmektedirler, ancak genel olarak "az rahatsız", "rahatsız" ve "aşırı rahatsız" olarak 3 seviyede değerlendirilir.

Aşırı rahatsız olan kişiler genellikle yüksek gürültü seviyelerine maruz kalan ve bu gürültü sebebi ile gece uykudan uyanan, kan basıncı yükselen ve kalp rahatsızlığı bulunan kişilerdir. Aşağıda  $L_{gag}$  gürültü seviyesine maruz kalan kişiler üzerinde oluşan rahatsızlık üzerine yapılan bir çalışmada kullanılan formül bulunmaktadır [16]. Burada anket çalışması Avrupa, Kuzey Amerika ve Avustralya bölgelerini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Miedema ve diğ. aşağıdaki modelleri kullanmışlardır, (Bağıntı 4 ve 5):

$$\%A = 1,795 * 10^{-4} (L_{gag} - 37)^3 + 2,11 * 10^{-2} (L_{gag} - 37)^2 + 0,5353 (L_{gag} - 37) \quad (4)$$

$$\%HA = 9,868 * 10^{-4} (L_{gag} - 42)^3 + 1,436 * 10^{-2} (L_{gag} - 42)^2 + 0,5118 (L_{gag} - 42) \quad (5)$$

%A: Rahatsız kişi yüzdesi (% Annoyed) ve %HA: Aşırı rahatsız kişi yüzdesi (% Highly Annoyed).

### **3.2. Yapılan Modellemeye Göre Rahatsızlık Analizi**

Perlitli kaplamanın sağlayacağı gürültü azaltım değerini belirleyebilmek için Datakustik Firmasına ait ve Avrupa Birliği Komisyonu tarafından sonuçları Birlik Ülkelerinde geçerli kabul edilen CadnaA adlı gürültü haritalama yazılımı vasıtasıyla örnek bir alanda modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir [28].

Tezde yapılan ayrıntılı çalışmada mevzuata göre sınır değer üzerinde kalan kişi sayıları hesaplanmıştır, ancak insanların gürültü seviyelerine karşılık gelen rahatsızlık durumları birbirinden farklı olduğu için Miedema ve diğ.'nin yukarıda verilen modeli kullanılarak rahatsızlık analizi yapılmıştır.



Çizelge 2. Rahatsızlık analizi sonucu rahatsız ve aşırı rahatsız kişi sayıları tablosu.

|                  |          | Kişi sayısı ve yüzdesi |       |       |         |         |       |          | Lacivert |
|------------------|----------|------------------------|-------|-------|---------|---------|-------|----------|----------|
| Bariyer          |          | Yeşil                  | Sarı  | Gri   | Turuncu | Kırmızı | Bordo | Mavi     |          |
| 0,3 yutum        | 7mt      | 45 altı                | 45-50 | 50-55 | 55-60   | 60-65   | 65-70 | 70 üzeri |          |
| L <sub>gag</sub> | kişi     | 0,0                    | 59,3  | 42,3  | 32,0    | 34,5    | 26,8  | 15,3     |          |
| L <sub>gag</sub> | %        | 0,0                    | 28,2  | 20,1  | 15,2    | 16,4    | 12,7  | 7,3      |          |
|                  | %A kişi  | 0,00                   | 4,56  | 5,68  | 6,61    | 10,16   | 10,69 | 8,20     |          |
|                  | %HA kişi | 0,00                   | 1,38  | 1,99  | 2,51    | 4,30    | 5,18  | 4,65     |          |
| 0,01 yutum       | 7mt      |                        |       |       |         |         |       |          |          |
| L <sub>gag</sub> | kişi     | 0,0                    | 50,5  | 30,5  | 31,0    | 33,1    | 42,4  | 22,5     |          |
| L <sub>gag</sub> | %        | 0,0                    | 24,0  | 14,5  | 14,7    | 15,8    | 20,2  | 10,7     |          |
|                  | %A kişi  | 0,00                   | 3,88  | 4,10  | 6,39    | 9,75    | 16,96 | 12,09    |          |
|                  | %HA kişi | 0,00                   | 1,17  | 1,43  | 2,43    | 4,13    | 8,22  | 6,86     |          |

Çizelge 3. Rahatsızlık analizine göre limit gürültü değerleri üzerinde etkilenen kişi sayısı.

| Bariyersiz Durum  | Kişi sayısı        | % nüfus        | Toplam kişi        | Toplam %*       |
|---|--------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| L <sub>gag</sub> sınıır değerine göre $\geq 63,2$ dB(A) | 149                | %70,7          | 149                | %70,7           |
| L <sub>gag</sub> %A                                     | 72                 | %34,4          | 109                | %51,9           |
| L <sub>gag</sub> %HA                                    | 37                 | %17,5          |                    |                 |
| <b>7 mt Yansıtıcı Beton Bariyer</b>                     | <b>Kişi sayısı</b> | <b>% nüfus</b> | <b>Toplam kişi</b> | <b>Toplam %</b> |
| L <sub>gag</sub> sınıır değerine göre $\geq 63,2$ dB(A) | 82                 | % 38,8         | 82                 | % 38,8          |
| L <sub>gag</sub> %A                                     | 53                 | % 25,3         | 77                 | % 36,8          |
| L <sub>gag</sub> %HA                                    | 24                 | % 11,5         |                    |                 |
| <b>7 mt Perlit Kaplamalı Yutucu Beton Bariyer</b>       | <b>Kişi sayısı</b> | <b>% nüfus</b> | <b>Toplam kişi</b> | <b>Toplam %</b> |
| L <sub>gag</sub> sınıır değerine göre $\geq 63,2$ dB(A) | 59                 | % 28,2         | 59                 | % 28,2          |
| L <sub>gag</sub> %A                                     | 46                 | % 21,9         | 66                 | % 31,4          |
| L <sub>gag</sub> %HA                                    | 20                 | % 9,5          |                    |                 |

\* Örnek alandaki toplam kişi sayısı: 210

Diğer bir ifade ile, mevzuatta verilen limite göre görece olarak daha düşük gürültü seviyesine maruz kalan insanlar da aşırı rahatsız veya rahatsız olabilirler. Bu durum limit değerlerden bağımsız olarak hesaplanmaktadır.

Rahatsızlık analizi 7m yüksekliğindeki perlit kaplamalı ve yansıtıcı bariyerlerden elde edilen değerler üzerinden yapılmıştır. Her bir  $L_{gag}$  aralığı için ortalama yüzde (%) rahatsızlık değeri yeniden hesaplanmıştır (Çizelge 2-3). Tabloda 7m perlit kaplamalı gürültü bariyeri için yapılan incelemeden  $L_{gag}$  sınırı üzerinde kalan sayısından daha fazla sayıda kişinin rahatsız ve aşırı rahatsız kişi toplamına sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Miedema ve diğ. çalışmasında bu değerın 45 dB(A) gibi daha düşük gürültü seviyeleri için de hesaplanıyor olmasıdır [16].

### **3.3. Gürültü Modelleme Sonucuna Göre Perlitli Kaplamanın Ekonomik Analizi**

Gürültü bariyerlerinin inşasında karar vericiler açısından fizibilite anlamında değerlendirmeye alınabilecek çok fazla sayıda parametre bulunmamaktadır. Özellikle fayda kısmında sadece bariyer konumlandırılması sebebi ile oluşan gürültü azalması yer almaktadır. Bu da ekonomik olarak parasal bir değere dönüştürüldüğünde, etkilenen kişi sayısına bağlı olarak, genellikle büyük maddi karşılığı ortaya çıkmamaktadır. Bu nedenle birçok gürültü bariyeri projesi tek başına ekonomik anlamda yatırım yapılabilir nitelikte değildir. Gürültü bariyerleri genellikle yeni bir otoyol inşası gibi büyük projelerin içerisinde toplam fayda ve maliyetler içerisinde değerlendirilmektedir. Mevcut yollar ve yapılar için ise genellikle mevzuatın istediği değerleri sağlayabilmek ve çevrede yaşayan insanların hem akustik hem de psikolojik anlamda rahatlaması adına yatırım yapılabilirliğine bakılmaksızın sosyal sorumluluk gereği yerel yönetim ve otoyol idareleri tarafından inşa olunmaktadır. Ancak bu ekonomik değerlendirme yöntemleri, gürültü bariyerleri için yatırım yapılabilir çıkmasa bile, birden fazla seçenek arasından en ekonomik çözümün bulunmasında da kullanılmaktadır.

Beton gürültü bariyerleri bilindiği üzere, çevre şartlarına en dayanıklı bariyer tiplerindedir. Ayrıca diğer bariyer türlerine göre daha az bakım maliyetine sahiptirler. Beton gürültü bariyeri üzerine perlitli kaplama uygulaması gerçekleştirildiğinde elde edilecek kazanımlar fayda ile ifade edilecektir. Ekonomik fizibilite etüdünde, proje konusu olan perlit esaslı gürültü bariyer kaplamasının yapılması durumunda ortaya çıkacak faydalar ve maliyetler genel ekonomi açısından değerlendirilmiştir. Bu amaçla, göz önüne alınan değerlendirme dönemi içinde, projenin yapılması (perlit kaplamalı gürültü bariyeri inşası) ve yapılmaması (perlit kaplamalı olmayan normal betonarme gürültü bariyeri inşası) durumlarındaki ekonomik maliyetler göz önüne alınarak, projenin yapılmasıyla ekonomik maliyetlerde ortaya çıkacak azalmalar projenin net faydası olarak hesaplanmıştır. Ekonomik değerlendirmede, projenin ekonomik net güncelleştirilmiş değeri (NPV, net present value), ekonomik iç verimlilik oranı (EIRR, economic internal rate of return) ve fayda / maliyet oranı (B/C, benefit /cost ratio) hesaplanmıştır.

Tabloda (4) yutucu ve yansıtıcı bariyer tiplerinde hesaba katılan inşa ve işletme kalemleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Bariyeri perlit kaplamanın maliyeti hesaplanırken, kaplama maliyeti ve gerektirdiği bakım işlemi maliyetinden, bu kaplamanın yapılması dolayısı ile yapılmayacak olan, genel boyama işlemi gibi yansıtıcı beton bariyere ait bazı işlem maliyetleri çıkarılmıştır. Yansıtıcı beton gürültü bariyer inşa maliyeti için bariyere ait detaylı bir proje yapılmamış olup, Bakanlık tarafından yayımlanan yapı yaklaşık maliyetleri üzerinden benzeşim yapılarak, dikkate alınmış ve hesaplanmıştır. Tezde belirlenen bariyer uzunluğu 80 m dir. Yapılacak maliyet hesapları 80mlik bariyer üzerinden gerçekleştirilmiştir. Maliyetler 2015 yılı sabit fiyatları ile Amerikan Doları (\$) cinsinden hesaplanmıştır. TL (Türk Lirası) olarak hesaplanan değerler, T.C. Merkez Bankası 2015 yılı aylık ortalama dolar kuru üzerinden hesaplanarak, yıllık ortalama yaklaşık 1 \$=2,73 TL dolar kuru esas alınarak dolar değerine dönüştürülmüştür. Aynı şekilde Euro/Dolar paritesi 2015 yılı için ortalama 1,11 olarak hesaplanmıştır [17].

Çizelge 4. İnşa ve işletme maliyetleri genel karşılaştırma ve işlem sıklığı tablosu.

| İnşa ve işletme listesi                                     | İşlem Sıklığı |   | 7 mt Yansıtıcı Beton Bariyer | 7 mt Perlit Kaplamalı Yutucu Beton Bariyer |
|---|---------------|---|------------------------------|--|
|   | İNŞA          | BAKIM   |                              |  |
| Bariyer İnşa Maliyeti                                       | 1 kez         | -   | ✓                            | ✓  |
| Kaplama İnşa Maliyeti                                       | 1 kez         | -   | -                            | ✓(+)                                       |
| Bariyer kısmi değişimi                                      | -             | 10 yılda 1 kez<br>Bariyer uzunlunun<br>%1'i kadar           | ✓                            | ✓  |
| Kaplama kısmi değişimi                                      | -             | Yılda 1 kez<br>Bariyer uzunlunun<br>%5'i kadar <sup>1</sup> | -                            | ✓(+)                                       |
| Bariyer genel boyama  | -             | 20 yılda 1 kez<br>Bariyer alanının<br>tamamı                | ✓(-)                         | -  |
| Kaplama genel boyama  | -             | -   | -                            | -  |
| Bariyer koruyucu boyama (grafiti gibi)                      | -             | 5 yılda 1 kez<br>Bariyer alanının %1'i<br>kadar             | ✓(-)                         | -  |
| Kaplama koruyucu boyama (grafiti gibi) <sup>2</sup>         | -             | -   | -                            | -  |
| Kaplama tıkanıklık temizliği (vakumlu süpürge) <sup>3</sup> | -             | Her yıl 2 kez   | -                            | ✓(+)                                       |
| Bariyer çevresi temizliği                                   | -             | 5 yılda 1 kez   | ✓                            | ✓  |

<sup>1</sup> Literatürde yer alamayan, tasarlanan perlitli kaplama malzemesine ait kabul  
<sup>2</sup> Kendiliğinden desenli veya dokulu yüzeyler için koruyucu boyama gerekmemektedir.  
<sup>3</sup> Yıkama yapılması durumunda tıkanıklık zamanla daha fazla ve kalıcı hale gelmektedir. Bu nedenle vakumlu temizleme yöntemi seçilmiştir.  
(+ ) Maliyet toplamına girecek kalemler  
(- ) Kaplama nedeni ile gerçekleştirilmesine gerek duyulmayacağından maliyet toplamından çıkarılacak kalemler

### 3.3.1. Fayda Hesabı

Perlit kaplama işleminin gerçekleşmesi öncesinde ve sonrasında rahatsız olan ve aşırı rahatsız olan toplam kişi sayıları arasındaki fark perlit kaplamanın akustik olarak ne kadar kişiyi rahatsız olma durumundan kurtardığına dair bir göstergedir. Bu ifade “para birimi”/“(aşırı) rahatsız olan kişi sayısındaki değişim”/“süre” olarak verilmektedir. Buradaki fayda hesabında perlitli kaplama yapılması öncesinde ve sonrasında “(aşırı) rahatsız olan kişi” sayıları arasındaki fark, daha önce verilen rahatsızlık analiz sonuçları ile limit gürültü değerleri üzerinde etkilenen kişi sayısı karşılaştırma tablosundan elde edilmiştir, Çizelge 5.

Çizelge 5. Rahatsızlık analizine göre limit gürültü değerleri üzerinde etkilenen kişi sayısı farkı

| Kişi sayısı                                 | 7 mt Yansıtıcı Beton Bariyer | 7 mt Perlit Kaplamalı Yutucu Beton Bariyer | $\Delta$ Fark (kişi sayısı) |
|---|------------------------------|--|-----------------------------|
| Lgag sınıır değerine göre $\geq 63,2$ dB(A) | 82                           | 59   | 23                          |
| Lgag %A                                     | 53                           | 46   | 7                           |
| Lgag %HA                                    | 24                           | 20   | 4                           |
| Lgag %HA+%A                                 | 77                           | 66   | 11                          |

Avrupa 6. Çerçeve Programında 2002-2006 yılları arasında tamamlanan HEATCO (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment) Projesinde ise gürültü rahatsızlık seviyesine göre elde edilen parasal değerler Çizelge 6’da verilmektedir [18].

Çizelge 6. Karayolu gürültüsü için önerilen ekonomik değer tablosu.

| Rahatsızlık Kategorisi          | Euro/rahatsız kişi/yıl (2006 yılı) | Euro/rahatsız kişi/yıl (2015 yılı güncelleme)* |
|---------------------------------|------------------------------------|--|
| Aşırı Rahatsız (Highly Annoyed) | 85                                 | 104  |
| Rahatsız (Annoyed)              | 85                                 | 104  |
| Az Rahatsız (Little Annoyed)    | 37                                 | 45   |
| Rahatsız Değil (Not Annoyed)    | 0                                  | 0  |

\* Avrupa Merkez Bankası verilerine göre 2006-2015 yılları arası ortalama enflasyon oranı yaklaşık %2,0 olarak alınmıştır [19].

Verilen değerın doğrudan kullanılmasındaki sakıncadan dolayı Avrupa genelinden elde edilen tekil değerin transferinde Gayrisafı Yurtiçi Hasıla (GYİH) oranları kullanılarak bu değer Türkiye için adapte edilmiştir. Avrupa Birliğinin satınalma gücü paritesinden (PPP) elde edilen GYİH 2015 yılı değeri ve Türkiye’nin GYİH değerleri, Çizelge 7 verilmektedir [20].

Çizelge 7. GYİH 2015 değerleri ve oran tablosu.

| Ülke/Birlik                       | US Dolar |
|-----------------------------------|----------|
| <b>Avrupa Birliği</b>             | 37.148   |
| <b>Amerika</b>                    | 55.805   |
| <b>Türkiye</b>                    | 20.438   |
| <b>Türkiye/AB GYİH Oranı (%)</b>  | % 55     |
| <b>Türkiye/ABD GYİH Oranı (%)</b> | % 37     |

Bu durumda 2015 yılı verilerine güncelleme yapıldığında, aşırı rahatsız ve rahatsız kişilerin sayısındaki azalma için 104 Euro/rahatsız kişi/yıl olarak verilen gürültünün ekonomik değeri Türkiye için yaklaşık 57,2 Euro/rahatsız kişi/yıl olarak elde edilmektedir. Bu değer Euro/Dolar parite dönüşümü yapıldığında yaklaşık 63,5 \$/rahatsız kişi/yıl olarak elde edilmektedir.

### 3.3.2. Gürültü Bariyeri İnşa Maliyeti

Bu bölümde kıyaslama açısından yurtiçi ve yurtdışı beton gürültü bariyeri imalatına ait analiz bölümü verilmektedir. Amerikan Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından hazırlanan 2010 yılı verilerine dayalı olarak bariyer yüksekliğine bağlı olarak bariyer tipinin birim fiyatı verilmektedir [21].

Buna göre 7m beton bariyer için ortalama birim inşa maliyeti, yıllık enflasyon oranı Amerika için yaklaşık %2 olarak kabul edilerek, fiyat güncellemesi yapıldığında, 2015 yılı için yaklaşık 380 \$/m<sup>2</sup> olmaktadır. Avrupa geneli için, gürültü bariyeri ile ilgili bariyer türüne bağlı olarak verilmiş detaylı bir maliyet çalışması veri tabanı bulunmamaktadır. Avrupa Yol Yöneticileri Birliği (Conference of European Directors of Road-CEDR) üyesi olan ülkelerin %80'inde gürültü bariyerlerinin bakımı ile ilgili bir prosedür bulunmamaktadır. Maliyetler ülkeden ülkeye değişse de genel olarak inşa maliyeti olarak 400€/m<sup>2</sup> ve bakım maliyeti olarak da 77€/m (yükseklikten bağımsız) alınması tavsiye edilmektedir [22]. T.C. Merkez Bankası 2015 yılı ortalama Euro/Dolar paritesine göre Avrupa için inşa maliyeti yaklaşık olarak 440 \$/m<sup>2</sup> ve genel bakım maliyeti 84,5 \$/m hesaplanmaktadır.

Türkiye'de gürültü bariyerlerinin inşa ve bakım maliyetleri ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu konuda Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın her yıl yayımladığı yapı yaklaşık birim maliyet cetveli değerlendirilebilir. 2015 yılında yayımlanan maliyet cetveline göre, 2-A grubu yapılar olan "palplanlı ve ankrajlı perde ve istinat duvarları" ile gürültü bariyerleri yapısal olarak benzeştirilerek 2-A grubundaki "ve benzeri diğer yapılar" başlığı altında incelenebileceği düşünülmüştür. Buna göre yapı birim yaklaşık maliyeti istinat duvarları için 270 TL/m<sup>2</sup> (yaklaşık 100 \$/m<sup>2</sup>) olarak verilmiştir [23]. Beton gürültü bariyeri inşa maliyeti Amerika için 380 \$/m<sup>2</sup> (Transfer Metodu ile Türkiye için 140 \$/m<sup>2</sup>), Avrupa için 440 \$/m<sup>2</sup> (Transfer Metodu ile Türkiye için 242 \$/m<sup>2</sup>) ve Türkiye için 100 \$/m<sup>2</sup> olarak elde edilmektedir. Hesaplarda gürültü bariyeri inşa maliyeti olarak 100 \$/m<sup>2</sup> değeri kullanılacaktır.

### 3.3.3. Perlitli Kaplamanın İnşa Maliyeti

Perlitli kaplama malzemesine yakın ürünler incelendiğinde, 33x33 cm granit seramik kaplama malzemesinin (Bakanlık Poz No: 26.007-103C Açıklama: 33x33cm düz yüzeyli, her renk desenli sırlı porselen (granit) karo ile fugalı duvar ve cephe kaplama yapılması) fiyat davranışı ile örtüşen yıllara sari fiyat değişikliği olacağı öngörülmüştür.

Bu malzemenin seçilmesindeki bazı temel hususlar şunlardır:

- Her iki ürünün imalatında doğal kaynakların (kil ve perlit) kullanılması
- Seramik sektörünün hızlı ve seri üretim teknolojisine sahip olması
- Her iki ürünün de imalatında yüksek sıcaklık işleminin yer alması
- Her iki ürün için de öngörülen imalat boyutlarının benzer olması (yaklaşık 30x30 cm)
- Her iki nihai ürününün de kırılğan ve hassas yapıda olması (taşım ve montaj maliyetleri açısından). Çizelge 8’de granit seramik ürüne ait ürün fiyat değişimi bulunmaktadır.

Çizelge 8. 33x33 cm boyutlu granit seramik birim fiyat değişim tablosu.

| Yıl  | 2009  | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014* | 2015* |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TL/m <sup>2</sup>  | 24,15 | 24,31 | 22,85 | 23,15 | 25,98 | 24,83 | 25,09 |
| * Bayındırlık pozu 2014 ve 2015 yılları için bu kod altında yayımlanmadığı için regresyon analizi ile elde edilmiştir. |       |       |       |       |       |       |       |

Perlitli kaplama malzemesinin seri üretim yapılabilmesi için detaylı bir maliyet analizi ayrı bir çalışma konusu olabilecek niteliktedir. Bu nedenle perlit kaplama malzemesinin birim fiyatının seri üretim halinde granit seramik gibi değişim gösterdiği ve birim fiyatının yaklaşık 25,09 TL/m<sup>2</sup> (yaklaşık 9,2 \$/m<sup>2</sup>) olduğu kabul edilmiştir. Bu şekilde perlitli inşa malzemesinin imalat maliyeti için belirli bir birim fiyat belirlenmiştir.

### 3.3.4. Bariyer Boyama Maliyeti

Üzerinde perlitli kaplama olmayan yansıtıcı beton gürültü bariyerinin hem genel boyama hem de grafiti gibi estetik bozuklukları gidermek amacı ile uygulanan koruyucu boyama için silikon esaslı dış cephe boyası (Poz No:27.560/7 Açıklama: Silikon esaslı dış cephe boyası (su bazlı) yapılması ) seçilmiştir. Çizelge 9’da silikon esaslı dış cephe boyasının son yıllardaki birim fiyat değişim tablosu bulunmaktadır.

Çizelge 9. Silikon esaslı dış cephe boyası (su bazlı) yapılması işine ait birim fiyatlar.

| Yıl  | 2009  | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014* | 2015* |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TL/m <sup>2</sup>  | 11,44 | 11,59 | 12,36 | 12,83 | 13,36 | 13,84 | 14,35 |
| * Bayındırlık pozu 2014 ve 2015 yılları için bu kod altında yayımlanmadığı için regresyon analizi ile elde edilmiştir. |       |       |       |       |       |       |       |

Üzerinde perlitli kaplama bulunmayan beton gürültü bariyerinin boyanması işi birim fiyatının yaklaşık 14,35 TL/m<sup>2</sup> (yaklaşık 5,3 \$/m<sup>2</sup>) olduğu kabul edilmiştir.

### 3.3.5. Perlit Kaplama Plakası Tıkanıklık Temizleme Maliyeti

Üzerinde perlitli kaplama olan yutucu beton gürültü bariyerinin yutuculuk oranı yıllara göre trafik kaynaklı kirleticilerden dolayı gözeneklerin tıkanması ile düşmektedir. Bu durumda başlangıç yılında elde edilen akustik performans yıllar geçtikçe azalmakta ve bariyerin akustik performansı da giderek bozulmaktadır. Bu durum poroz beton ve poroz asfalt olarak da kullanılan yol yüzey kaplama malzemelerinde de meydana gelmektedir. Yol yüzeyi hem vakumlanıp hem de basınçlı su ile yıkanarak gözenekler ve gözenekler arası kanalların açık kalması sağlanmaya çalışılmaktadır. Dikey konumlanmış gürültü bariyerinin tıkanması, kirleticilerin araç lastikleri ile taşınması daha kolay olduğundan, poroz asfalt veya poroz betona göre daha zordur.

Burada perlitli kaplama malzemesinin tıkanmasına sebep olabilecek belli başlı hususlar şunlar olabilir;

- Taşıt egzoz emisyonlarından kaynaklanan kirletici partiküller
- Araçların çamurlu su sıçratması
- Kar kürüme araçlarının kirli kar yığınlarını yol kenarındaki bariyere doğru kürümesi
- Yük taşıyan araçlardan dökülebilecek kirletici malzemeler
- Kuş, böcek ve bitkiler tarafından taşınan malzemeler ile sarmaşık tipi bitkilerin kaplamayı örtmesi.

Birim maliyet çalışmalarında Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yayımladığı birim fiyat cetvelinde yer alan 'benzer işler'den faydalanılmıştır. Yol süpürgesinin yol yüzeyi üzerinde gerçekleştirdiği temizlik işlemi (Poz No: KGM/03.554/1 Açıklama: Süpürge makinasının (vakumlu) 1 saatlik ücreti (yaklaşık 130 HP+81HP gücünde) benzer işlem olarak seçilmiştir. Çizelgeden (10) de görüleceği üzere birim fiyat cetveline bu iş kalemi 2012 yılında alınmıştır.

Çizelge 10. Yol süpürme makinası işletme birim fiyat tablosu.

| Yıl     | 2009 | 2010 | 2011 | 2012   | 2013   | 2014   | 2015   |
|---------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| TL/saat | -    | -    | -    | 139,36 | 149,68 | 168,88 | 161,45 |

Verilen birim fiyat ücreti TL/saat bazında verilmiş olduğundan bunun bariyer üzerindeki işlemlere uygulanabilmesi için TL/m<sup>2</sup> cinsine çevrilmesi gerekmektedir. Bu noktada seçilen aracın dikey konumlanmış bariyeri temizleyebilmesi için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Seçilen araç ile 1 saatte 400 m<sup>2</sup> bariyer alanı temizlenebilmektedir.
- Araç yol-bariyer mesafesi olan 4 m mesafede rahatlıkla engelsiz bir şekilde çalışabilmektedir.

- Aracın bariyer yüksekliği olan 7 m'ye ulaşabilecek uygun donanımı mevcuttur.
- Araç 1 seferde yaklaşık 400 m<sup>2</sup> bariyer alanını süpürüp yıkamaya yetecek kadar atık haznesi ve su deposuna sahiptir.

Perlitli kaplama malzemesinin 1 saatte gerçekleştirebileceği temizlenme alan miktarı değiştikçe maliyet de değişecektir. Temizlenme alanı ise temizleme süresini belirleyen araç temizleme kapasitesi ile operatöre bağlıdır. Bu iş kalemi içinde aracın çalışması için gerekli olan yakıt, aracın kendi amortisman değeri ve bir adet operatör makinist ve bir adet operatör yardımcının maliyetleri yer almaktadır. Bu şekilde perlitli inşa malzemesinin vakumlu makine ile temizlenmesi maliyeti için belirli bir birim fiyat belirlenmiştir.

Yurtdışında özellikle araç park sahalarında kullanılan poroz asfalt ve poroz beton asfalt kaplamaların vakum makinesi ile yılda 3-4 kez temizlenme sıklığı ile temizleme maliyeti 2000m<sup>2</sup> lik bir park alanı için 400\$-500\$ olarak verilmektedir [24] Bu durumda Türkiye'deki temizleme işleminin de yapılan kabuller çerçevesinde birim fiyatı yaklaşık (tek seferde yapılacak bir işlem için) 0,15 \$/m<sup>2</sup> (yaklaşık 0,4 TL/m<sup>2</sup>) olarak hesaplanmaktadır.

### **3.3.6. Yıllık Enflasyon Oranının Belirlenmesi**

Uzun süreli tahmin modellerinde kullanılmak üzere projelerde alınması öngörülen 2015, 2020 ve 2050 yılları için enflasyon oranlarının farklı kaynaklarda farklı değerlerine rastlamak mümkündür. Enflasyon 2015 yılı için %8,8 olarak gerçekleşmiştir. Trading Economics Firmasının enflasyon tahminlerine göre 2020 yılı için % 6,1 ve 2030 yılı için %4,08 değerleri öngörülmektedir [25] İngiliz Pwc Firması ise enflasyon tahminini 2017 yılı için %7,5 ve 2022'ye kadar da %7,0 olarak vermektedir [26]. Türkiye'deki Ulaşım Altyapısının Değerlendirilmesi için Teknik Destek başlığı ile hazırlanan Avrupa Birliği projesinde ise bu değerler 2023 yılı için %4 ve 2050 yılı için de %3 olarak verilmektedir [27]. Bu verilerden yola çıkarak bu çalışmadaki fiyat güncellemeleri aşağıdaki Tabloda (11) yer alan tarihlere karşılık gelen ve güvenli tarafta kalınarak alınan yaklaşık değerler ile yapılacaktır:

*Çizelge 11. Türkiye için tahmini uzun dönem enflasyon değerleri.*

| Yıllar          | 2015-2020 | 2020-2030 | 2050'ye kadar | 2050 sonrası |
|-----------------|-----------|-----------|---------------|--------------|
| Enflasyon Oranı | %7,0      | %5,0      | %5,0          | %4,0         |

### **3.3.7. Faydanın Net Bugünkü Değere Çevrilmesi**

Verilen bu değerlere göre Fayda Transfer Metodu (Basit Birim Transferi Metodu) uygulandığında elde edilen gürültünün ekonomik fayda değeri belirlenerek, fayda değeri özet Tablosu (12) verilmektedir [26, 27, 28].



Çizelge 12. Perlitli kaplama ile elde edilen gürültü azaltımının indirgenmiş fayda değeri.

| Durum  | Kişi sayısı<br>%HA+%A | $\Delta$ Fark<br>(%HA+%A<br>kişi sayısı) | 50 yıl için<br>indirgenmiş<br>fayda değeri<br>(US \$) <sup>1</sup> | 50 yıl için<br>kaplamanın<br>fark fayda<br>değeri (US \$) <sup>2</sup> |
|--|-----------------------|--|--|--|
| Bariyersiz   | 109                   | -  | -  | -  |
| Yansıtıcı 7m<br>bariyer  | 77                    | 32                                       | 224.941 \$   | -  |
| Yutucu 7m bariyer  | 66                    | 43                                       | 302.264 \$   | 77.323 \$  |
| <sup>1</sup> 50 yıl için her bir durumun bariyersiz duruma göre toplam fayda fark değeri               |                       |  |  |  |
| <sup>2</sup> 50 yıl için perlit kaplamalı durumun yansıtıcı bariyer durumuna göre ek fayda fark değeri |                       |  |  |  |

### 3.3.8. Maliyetlerin Net Bugünkü Değere Çevrilmesi

Maliyet hesabında Türkiye'deki yapım işlerine ait malzemelerdeki fiyatlar referans olarak alınmış ve daha önce verilen 50 yıllık enflasyon oranları üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan maliyete ait kabuller ve değerler (2015 yılı) özet olarak aşağıda sıralanmaktadır:

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| Bariyer inşa maliyeti                                 | 100 \$ /m <sup>2</sup>            |
| Perlit kaplama maliyeti                               | 9,2 \$/m <sup>2</sup>             |
| Perlitli kaplama tıkanıklık temizleme                 | 0,15 \$/m <sup>2</sup>            |
| Bariyer genel ve koruyucu boyama                      | 5,3 \$/m <sup>2</sup>             |
| Diğer genel kabullerin özeti aşağıda sıralanmaktadır: |                                   |
| Bariyer ömrü  | 50 yıl                            |
| Bariyer uzunluğu                                      | 80 m                              |
| Bariyer yüksekliği                                    | 7,0 m                             |
| Perlit kaplama yenileme sıklığı                       | Yılda 1 kez toplam alanın %5'i    |
| Tıkanıklık temizlik sıklığı                           | Yılda 2 kez                       |
| Bariyer genel boyama sıklığı                          | 20 yılda 1 kez                    |
| Bariyer koruyucu boyama sıklığı                       | 5 yılda 1 kez toplam alanın %1'i  |
| Bariyer kısmi değişimi                                | 10 yılda 1 kez toplam alanın %1'i |
| Bariyer çevresel temizliği ve genel bakım             | Yılda 1 kez (maliyet: 51,1 \$/m)  |

Yapılan maliyet hesapları aşağıdaki 3 durum için gerçekleştirilmiştir (Bağıntı 6);

**Durum 1:** Bariyersiz duruma göre yansıtıcı BA bariyer inşası durumu

**Durum 2:** Bariyersiz duruma göre perlit kaplamalı BA bariyer inşası durumu

**Durum 3:** Yansıtıcı bariyerli duruma göre perlit kaplama inşası durumu.

$$\Delta \sum_{t=0}^{50} M_t = \sum_{t=0}^{50} M_{pk} - \sum_{t=0}^{50} M_{yb} \quad (6)$$

$M_t$  : Toplam net maliyet (durum 3)

$M_{pk}$  : Perlit kaplamalı gürültü bariyeri maliyeti

$M_{yb}$ : Yansıtıcı bariyer maliyetidir. İndirgenmiş maliyet değerleri Tablosu 13'deki gibidir [29, 30].

Çizelge 13. İndirgenmiş maliyet değerleri tablosu.

| Durum                | İndirgenmiş maliyet değeri (US \$) <sup>1</sup> | Perlit esaslı kaplamanın fark maliyet değeri (US \$) <sup>2</sup> |
|----------------------|---|---|
| Bariyersiz           | -   | -   |
| Yansıtıcı 7m bariyer | 167.389 \$                                      | -   |
| Yutucu 7m bariyer    | 204.466 \$                                      | 37.077 \$   |

<sup>1</sup> 50 yıl için her bir durumun bariyersiz duruma göre toplam maliyet fark değeri  
<sup>2</sup> 50 yıl için perlit kaplamalı durumun yansıtıcı bariyer durumuna göre ek maliyet fark değeri

### 3.4. Fayda Maliyet Analizi

Beton gürültü bariyerinin inşası ile beton gürültü bariyerinin perlitli kaplama olarak inşasının fayda maliyet analizi bu bölümde gerçekleştirilmiş olup, ayrıca her iki durumun birbiri ile kıyaslaması da gerçekleştirilmiştir. Perlitli kaplama malzemesi için elde edilen F/M ve İKO oranı Çizelge 14'de verilmektedir.

Çizelge 14. Perlitli kaplama malzemesi için elde edilen F/M ve İKO oranı tablosu.

| Durum  | 50 yıl için fayda değeri [\$]* | 50 yıl için maliyet değeri [\$]* | F/M değeri** | İKO*** |
|--|--------------------------------|----------------------------------|--------------|--------|
| 7m yutucu bariyer inşası durumu                | 302.264                        | 204.466                          | 1,48         | %5,5   |
| 7m yansıtıcı bariyer inşası durumu             | 224.941                        | 167.389                          | 1,34         | %6,4   |
| Yansıtıcı Bariyerin Yutucuya çevrilmesi durumu | 77.323                         | 37.077                           | 2,09         | %12,4  |

\* İndirgenmiş fayda ve maliyet değerleri  
\*\* F/M analiz değerinin  $\geq 1,0$  olması projenin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.  
\*\*\* İndirgenmemiş fayda maliyet nakit akış değerlerinden elde edilmiştir. İKO değerinin indirgeme oranı olarak seçilen %2,5 dan fazla olması, projenin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Perlitli kaplama malzemesi için elde edilen NBD ise Çizelge 15'de verilmektedir.

Çizelge 15. Perlitli kaplama malzemesi için elde edilen NBD tablosu.

| Durum   | 50 yıl için fayda değeri<br>[\$]* | 50 yıl için maliyet değeri<br>[\$]* | NBD [\$]**    |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| 7m yutucu bariyer inşası durumu   | 302.264                           | 204.466                             | <b>97.798</b> |
| 7m yansıtıcı bariyer inşası durumu  | 224.941                           | 167.389                             | <b>57.552</b> |
| Yansıtıcı Bariyerin Yutucuya çevrilmesi durumu  | 77.323                            | 37.077                              | <b>40.246</b> |
| * İndirgenmiş fayda ve maliyet değerleri<br>** NBD'in >0 olması projenin uygulanabilir olduğunu göstermektedir. |                                   |                                     |               |

Çizelgedeki sonuçlar perlit kaplamanın maliyet analizi sonucunda uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Türkiye’de oldukça zengin şekilde bulunan perlitin bir kaplama malzemesi olarak gürültü bariyerlerinde kullanımının uygun olup olmadığının irdelendiği bu çalışmada, patlatılmış perlitin yüksek sıcaklık altında camsılaştırma ve ardından soğutma işlemlerinden sonra kazandığı gözenekli yapı ile iyi bir ses yutucu yapıya kavuştuğu görülmüştür. Perlit esaslı kaplama ile kaplanan bir bariyer, gerçekleştirilen akustik testler sonucunda belirlendiği üzere TSEN 1793-1 Standardına göre A2 sınıfı ses yutuculuğa sahip gürültü bariyeri olarak sınıflandırılmaktadır. Piyasada yer alan birçok gürültü bariyerinin ses yutum performansı A2 sınıfında yer aldığından bu özelliği ile perlitli kaplamanın trafik gürültüsü ile mücadelede kullanılabilir nitelikte olduğu görülmektedir.

Gürültü haritalama sonuçlarının, etkilenen kişi sayılarındaki yüzdesel değişiklik cinsinden verilmesi sonuçların nüfusa bağlı olmadan, istenilen parametreler için değişiminin izlenmesine olanak vermektedir. Bu durum sonuçların esnek bir şekilde yorumlanmasını da olanaklı kılmaktadır. Böylelikle seçilen alandaki nüfus yoğunluğu arttığında, etkilenen (rahatsız ve aşırı rahatsız) kişi sayısındaki değişim yüzdesel olarak nüfusa yansıtılarak yeni kişi sayıları üzerinden yeni bir fayda hesabı gerçekleştirilmesine, böylelikle ekonomik analizlerin kolaylıkla yeniden yapılabilmesine imkan sağlamaktadır. Hatta gürültü ölçüm zaman dilimleri için gün içi nüfus (gündüz ve gece farklı nüfus sayıları) değişikliklerinin olması durumunda fayda değerleri yeniden hesaplanabilecektir. (F/M oranı, İKO ve NBD) değerlendirmesinde perlit esaslı kaplamalı gürültü bariyer inşasının belirlenen alan ve koşullar için ekonomik olarak faydalı olacağı saptanmıştır. Ülkemizdeki rezervi oldukça fazla olan perlitin değerlendirilme yollarından biri olarak perlitli bariyer kaplamasının gürültü azaltma açısından etkin ve ekonomik olduğu bu makalede detaylı olarak ortaya konmaktadır. Kaynaklarımızın etkin kullanımı ülkemizin kalkınması için üzerinde önemle

durulması gereken konulardan biridir. Bu nedenle tarafımızca çalışmanın ve sonucunun önemli olduğu düşünülmektedir.

### **Kaynaklar**

- [1] Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Ve Yönetimi Yönetmeliği (2015). T. C. Resmi Gazete, 29536, 18 Kasım 2015.
- [2] Houssa, C. E. (1999). Talking Turkey, An Update on the Turkish Minerals Industry. *Industrial Minerals*, 379, 21-47.
- [3] Uyanık, T. (2010). Sektörel Rapor: Madencilik (HS: 25,26,27,6802). Ankara: Ekonomi Bakanlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi (İGEME) Raporu.
- [4] Bolen, W. P. (2011). USGS Mineral Commodity Summaries 2011. U.S. Geological Survey.
- [5] ASTM. (2002). Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method. (ASTM C423-02).
- [6] TSE. (2002). Yol Trafik Gürültüsünü Azaltan Sistemler Akustik Performansın Tayini İçin Deney Metodu Bölüm 1: Ses Absorpsiyonunun Temel Özellikleri (TS EN 1793-1). Erişim: <http://www.tse.org.tr>.
- [7] Morgan, S. M., Kay, D. H., & Bodapati, S. N. (2001). Study of Noise Barrier Life-Cycle Costing, *Journal of Transportation Engineering*, 127(3), 230-236.
- [8] Navrud, S. (2011). State-of-the-art in Valuation of Transportation Noise [Power Point Sunumu]. Erişim Tarihi: 7 Haziran 2016 Adres: [http://www.czp.cuni.cz/tranext/files/6-Navrud-State-of-the-art\\_in\\_valuation\\_of\\_transportation\\_noise.pdf](http://www.czp.cuni.cz/tranext/files/6-Navrud-State-of-the-art_in_valuation_of_transportation_noise.pdf)
- [9] ISO. (2003). Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. (ISO/TS 15666). Erişim: <http://www.tse.org.tr>.
- [10] Nijland, H., & Wee, B. (2008). Noise valuation in ex-ante evaluations of major road and railroad projects. *EJTIR*, 3(8), 216-226.
- [11] Kroes E. P., Sheldon R. J. (1988). Stated Preferences Methods, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol XXII, No:1, p 11-25.
- [12] Salverda, M., & Hawkins, R. (2003). ICRA Learning Resources: Cost Benefit Analysis
- [13] European Commission Working Group On Health And Socio-Economic Aspects. (2003). Valuation of Noise Position Paper. Erişim tarihi: 1 Ocak 2016, Adres:[http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/valuatio\\_final\\_12\\_2003.pdf](http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/valuatio_final_12_2003.pdf).
- [14] Morgan, S. M., Kay, D. H., & Bodapati, S. N. (2001). Study of Noise Barrier Life-Cycle Costing, *Journal of Transportation Engineering*, 127(3), 230-236.
- [15] WHO. (1980). WHO Environmental Health Criteria 12–Noise. Geneva: World Health Organisation.

- [16] Miedema, M. E., & Oudshoorn, G. M. (2001). Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals, - Environmental Health Perspectives, 109(4), 409-416.
- [17] Url-1. < [http://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kur2015\\_tr.html](http://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kur2015_tr.html)>, Erişim tarihi: 01.03.2016
- [18] HEATCO. (2006). Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Sixth Framework Programme, (Contract No: 2002-SSP-1/502481), Stuttgart: European Commission EC-DG TREN. Erişim tarihi: 21 Ocak 2013 Adres: <http://www.heatco.ier.uni-stuttgart.de>.
- [19] Url-2. < <https://www.ecb.europa.eu/stats/prices/hicp/html/inflation.en.html>>, Erişim tarihi: 09.05.2016.
- [20] Url-3. <<http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=21510>>, Erişim tarihi: 09.05.2016.
- [21] FHWA. (2010). Noise Barrier design handbook. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2011, Adres:[http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/noise\\_barriers/design\\_construction/design/index.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/noise_barriers/design_construction/design/index.cfm)
- [22] Value for Money in Road Traffic Noise Abatement (Report: CEDR Road Noise 2009-2013). Paris: Conference of European Directors of Roads (CEDR).
- [23] Mimarlık Ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında Kullanılacak 2015 Yılı Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğ (2013). T. C. Resmi Gazete, 29300, 19 Mart 2015.
- [24] WisDOT Research & Library Unit. (2012). Transportation Synthesis Report: Comparison of Permeable Pavement Types. (Rapor No: TSR-2011). Wisconsin: WisDOT Research & Library Unit Report.
- [25] Url-4. <<http://tr.tradingeconomics.com/turkey/forecast>>, Erişim tarihi: 05.06.2016.
- [26] Url-5<<http://www.pwc.co.uk/economic-services/global-economy-watch/gew-projections.jhtml>>, Erişim tarihi: 06.06.2016.
- [27] Mueller, R. (2007). Technical Assistance to Transportation Infrastructure Needs Assessment for Turkey. Final Report (TINA Turkey) Joint Venture.
- [28] DataKustik CadnaA Noise Prediction Software (Versiyon 4.1) [Computer Software]. Greifenberg, Germany: DataKustik GmbH.



***TEKNIK NOT***





# Şehiriçi Yollarda Üstyapıların Mevcut Performansını Belirlemek İçin Bir Yöntem

Ufuk KIRBAŞ<sup>1</sup>

Mustafa KARASAHİN<sup>2</sup>

## ÖZ

Şehiriçi yolların üstyapılarını yöneten sistem(ler)in bulunması zorunluluğu kaçınılmazdır. Üstyapıların yönetimini sağlamak amacıyla kurulan bir sistemde en zor olan adımın, üstyapıların mevcut performansını belirlemek olduğu bilinmektedir. Üstyapıların yapısal performansı ile sürüş konforu arasında güçlü bir ilişkinin olduğu yapılan birçok çalışmada saptanmıştır. Çalışmada, bir karayolu üstyapısının mevcut performansını gösteren PCI değerleri ile araç içinde oluşan düşey titreşim parametreleri arasındaki ilişkiler araştırılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Böylelikle, üstyapının performansını belirlemede kullanılan PAVER sisteminin zor ve meşakkatli olan arazi çalışmaları minimuma indirilerek, ülkemizde yerel yönetimlerin üstyapı yönetiminde kullanabileceği hale getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Üstyapı yönetim sistemi, ISO 2631-1, titreşim, paver sistemi, PCI.

## ABSTRACT

### A Method for Determining Existing Pavement Performance in Urban Roads

The obligation of establishing system(s) that manage the suitability of road pavements in urban roads is inevitable. In a system which is established with the aim of ensuring the management of the pavements, the most difficult step is known to be determining the performance of the existing pavements. Many studies identified that there is a strong relationship between the structural performance of the pavements and the ride quality. In this study a prediction model was created by investigating the relationships between PCI that indicates the existing performance of a road pavement, and the vertical vibration parameters experienced inside the vehicle. Thus, the difficult and arduous terrain works of the PAVER system used for determining the pavement performance has been reduced by this work and a system has been made available for local governments to be used for pavement management.

**Keywords:** Pavement management system, ISO 2631-1, vibration, paver system, PCI.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 16.02.2015 günü ulaşmıştır. 25.07.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.373899

1 Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun - ufuk.kirbas@omu.edu.tr

2 İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - mkarasahin@gelisim.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Karayolu ağlarında güvenlik ve konforu sağlayan en önemli unsurun yol üstyapısı olduğu bilinmektedir. Bir üstyapıdan olması gerektiği gibi faydalanabilmek için belirli aralıklarda planlı bir şekilde bakım ve onarımlar yapmak şarttır. Ülkemizde şehiriçi yolların yol yapım, bakım, onarım ve işletmesinden sorumlu olan yerel yönetimlerin belediyeler olduğu bilinmektedir. Genel olarak belediyelerde, üstyapı yapım, bakım ve onarım ile ilgili sorumluluklar ana arter ve daha yüksek önemdeki şehiriçi yollarda büyükşehir veya il merkezi türü belediyelerde iken, önem düzeyi ana arterin altındaki olan yollarla ilçe belediyelerindedir.

Üstyapıların mevcut performansları çeşitli teknikler kullanılarak belirli indeksler aracılığıyla sayısal olarak ifade edilebilmektedir [1]. İndeks değerlerine ulaşmada kullanılan yöntemler karmaşık olmanın yanında oldukça yüksek altyapı yatırımları da gerektirmektedir [2]. Özellikle orta ve küçük ölçekli belediyelerin bu maliyetleri karşılayabilmeleri çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Çalışmada, bir üstyapı yönetim sisteminde (ÜYS) en zor adım olan üstyapıların mevcut performansını belirleyebilmek için oldukça kolay ve göreceli olarak ucuz bir yöntem önerilmiştir. Aynı zamanda bu yöntemle teknik şartnamelerde yer almayan, yeni imal edilen üstyapıların sürüş konforu açısından kalite kontrolü de yapılabilecektir.

## 2. ÜSTYAPI YÖNETİM KAVRAMI

ÜYS planlama, programlama, tasarım, yapım, bakım, onarım ve yenileme işlemlerinin tamamını içeren çalışma programıdır [3]. ÜYS kavramı, 1950'li yıllardan beridir çalışılan, teknolojinin gelişmesi ile yeniliklere kavuşarak günümüze gelmiş bir konudur. Amerikan mühendislik standartlarından biri olarak ASTM E1889 - 97(2009) koduyla ÜYS standardı da yayınlanmıştır [4].

Ulusal yol ağlarında üstyapının mevcut performansını belirlemek için genellikle cihazlarla yapılan ölçümlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu maksatla, çoğunlukla yüzey pürüzlülüğünü ifade eden uluslararası düzgünsüzlük indeksinin (IRI) kullanıldığı çalışmalarda görülmektedir. Dünya Bankası tarafından geliştirilen standart çerçevesinde değerlendirilen IRI'nın üstyapı tasarımında kullanılan hizmet düzeyi (PSI) ile doğrudan ilişkili olduğu çalışmalarda belirtilmektedir [1, 5]. Üstyapı değerlendirmelerinde ikinci olarak defleksiyon verilerinin (FWD) tercih edildiği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, şehiriçi yollarda da ÜYS çalışmalarının yapıldığı bilinmektedir. Damman (Arabistan), Lizbon (Portekiz) ve Amerika'da Bowling Green (Kentucky), Chittenden (Vermont), Dublin (Ohio), Folsom (California), Los Angeles (California) gibi daha birçok şehirin ÜYS çalışmalarını anlatan kaynak bulunmaktadır [6, 7]. Şehiriçi yollarda üstyapıların mevcut performansını belirlemede çoğunlukla yüzey bozulma verilerinin tercih edildiği görülmektedir. Ağırlıklı olarak tercih edilen indekslerin üstyapı durum indeksi (PCI), üstyapı durum oranı (PCR), üstyapı yüzey değerlendirme ve oranlama sistemi (PASER) ve kalan servis ömrü (RSL) indekslerinin olduğu belirlenmiştir [1, 2, 8].

Ayrıca, ivmeölçerler yardımıyla üstyapının mevcut performansını belirleme konusunda araştırmacıların, ağırlıklı olarak üstyapıdaki yüzey bozulma verileri ve/veya düzgünsüzlük verileri ile aracın düşey yöndeki titreşim verilerinin karşılaştırılması konusuna yöneldiği görülmektedir. Çalışmalarda, ivme verilerinin araç dinamiği modellerinde titreşim verisi

olarak veya yüzey bozulma verileri ve düzgünsüzlük verileri ile korelasyonlarının araştırılmasında kullanıldığı belirlenmiştir. Dahası, bu ilişkiler matematiksel olarak oldukça iyi ifade edilebilmelerinden dolayı sürüş konforunu gerçek zamanlı olarak yansıtabilen sürüş simülasyon sistemlerinin oluşturulduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir. Diğer bir deyişle günümüz teknolojisi kullanılarak tasarımı yapıldıktan sonra imal edilecek bir üstyapıda zamanla oluşacak bozulmalar ve bu bozulmaların sürücülere etkisi ile yolun hizmet seviyesinin henüz yol yapılmadan belirlenebileceği anlaşılmaktadır [9-13].

### 3. METODOLOJİ

PAVER sistemi, rastgele dağılım prensiplerine göre seçilen örnek alanlarda, ASTM D 6433-11 kodlu bozulma tanımlama kılavuzuna göre toplanan yük, iklim ve diğer sebeplerden kaynaklanan bozulma verilerinin değerlendirilerek, üstyapının mevcut performansını ortaya koyan bir değerlendirme prosedürüdür [2, 14]. PAVER sisteminde 0 – 100 arasında bir değerle üstyapıların mevcut performansını gösteren PCI değeri olarak 100 hiç bozukluk bulunmayan en iyi derecedeki üstyapıyı 0 ise tamamen bozulmuş kullanılamayacak derecedeki üstyapıyı ifade etmektedir. PCI, üstyapıya ait bozulma tipi, bozulma yoğunluğu ve bozulma miktarı bileşenlerinin ortak değerlendirilmesi sonucunda üstyapının mevcut performansını gösteren bir indekstir. Çalışmada, Samsun ili sınırlarında farklı türde belediyelerin sorumluluğunda, farklı hizmet seviyelerindeki 20 adet karayolunda ve 98 adet kesimde, diğer bir deyişle yaklaşık olarak 55.750 m uzunluğundaki yolda PAVER sistemine göre üstyapıların mevcut performansları belirlenmiştir. Değerlendirme kesimlerinin seçiminde veri çeşitliliği ve model doğruluğunu arttırmak için farklı tipte, farklı yoğunluk düzeyinde ve farklı miktarlarda bozulmaların görülebilmesi kriterlerine dikkat edilmiştir.

Üstyapıların yüzey düzgünsüzlüğünün araç içerisinde düşey doğrultuda ölçülen titreşim ile yüksek derecede ilişkili olduğu bilinmektedir [10]. Literatürde araştırmacılar tarafından titreşim verilerini, konforu ifade etmek amacıyla analiz etmek için en çok ISO 2631-1 kodlu standartın tercih edildiği görülmektedir [15, 16]. Standartta taşıt içinde maruz kalınan 3 boyutlu ivme ölçüm verilerinin farklı pozisyonlarda (oturarak, ayakta durarak ve sırt üstü uzanarak) ölçüm noktaları ile ortalama titreşimi yansıtan ağırlıklandırılmış karekök ortalama ( $a_w$ ) ve mekanik şokları yansıtan maksimum aktarılan titreşim değeri (MTVV) değerlendirme parametrelerinin hesap prensipleri açıklanmaktadır. Standart tüm vücudun maruz kaldığı titreşimi değerlendirebilmek için ivmeölçerin sürücünün hemen altında, sürücü ile temas halinde ve kauçuk bir yatak içerisinde olması gerektiğini tavsiye etmektedir. İvme ölçümleri 1/3 oktav bantlarına ayrılarak ve frekans ağırlık filtrelerinde tanımlanan kazançları uygulanarak, ilgili eksen doğrultusunda ağırlıklandırılmış toplam titreşim değerleri ( $a_w$ ) (1) nolu bağıntı ile elde edilir.

$$a_w = \left[ \sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Burada  $a_w$ , frekans ağırlıklandırılmış ivmeyi,  $w_i$ , ilgili frekans tanımlanan ağırlık faktörünü,  $a_i$  ise i inci 1/3 oktav bandı için ivmelenme ortalama karekök değerini göstermektedir [15]. ISO 2631-1 standartına göre hareketli karesel ortalama (the runnig rms method) değerlendirme yöntemi sabit kısa zaman aralıklarında oluşan rastlantısal şok ve kişiye aktarılan titreşimlerin değerlendirmesinde uygulanan yöntemdir. Belirlenen bir zaman

aralığında oluşan  $a_w(t_0)$  değerinin maksimumu bulunarak MTVV parametresi üretilmektedir.  $a_w(t_0)$  (2) ve MTVV (3) nolu bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$MTVV = \max[a_w(t_0)] \quad (3)$$

Burada  $a_w(t)$ , anlık frekans ağırlıklandırılmış ivmelenme değerini  $\tau$ , hareketli ortalama zaman dilimini  $t$ , ölçüm değişkenini ve  $t_0$ , ölçüm zamanını ifade etmektedir.

Çalışmada üç adet ivmeölçer, GPS anteni ve veri kayıt cihazı (datalogger)'ndan oluşan ivme ölçüm seti ile aynı yollarda düşey doğrultudaki titreşim verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen titreşim verileri ISO 2631-1 standardına göre değerlendirilmiş, PCI değerleri belirlenen yol kesimlerinde  $a_w$  ve MTVV değerleri elde edilmiştir. Düşey titreşim ölçümleri, Euro Car segment değerlendirmesine göre 4100-4600 mm uzunluk aralığında alt orta sınıf C segmentine giren station wagon türünde bir araçla yapılmıştır. Ölçümler sırasında ivmeölçerler, sürücü koltuğu (üzerinde sürücü var) ve orta aks üzeri (ayak hizası) olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilmiştir. Ölçümler sırasında taşıtın sabit bir şeritte, sabit bir hızda ve en az 20 km/sa hızda olması ölçüm kriterleri olarak kabul edilmiştir [5].

En uygun ölçüm hızını belirlemek amacıyla farklı tür ve yoğunlukta bozulmaların görüldüğü bir yolda düşey ivme ölçümleri 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda her şerit için ayrı ayrı yapılmıştır. Öte yandan, yapılan değerlendirmenin geliştirilmesi için aracın mekanik yapısından kaynaklı oluşan düşey titreşimlerin etkisinden kurtulmak amacıyla, boyuna eğimi sifıra yakın ve yüzey bozulması hiç olmayan yeni imal edilmiş bir yolda (PCI = 100) her bir ölçüm hızı için ve her bir ölçüm noktası için ayrı ayrı kalibrasyon parametreleri üretilmiştir. Böylece, herhangi bir yolda yapılan ölçüm sonrasında bulunan parametrik titreşim değerlerinden kalibrasyon için bulunan parametrik titreşim değerlerinin çıkarılması ile düzeltilmiş titreşim parametreleri (düz. $a_w$ , düz.MTVV) bulunmuştur.

Kesimlerin PCI değerleri ile sürücü koltuğu  $a_w$  parametresi değerleri arasında yapılan istatistik değerlendirmelerde en yüksek korelasyonun 40 km/sa hızda oluşmasından dolayı en uygun ölçüm hızı olarak 40 km/sa kabul edilmiştir [17]. Fakat uygulamada, şehiriçi trafik koşullarında, belirli bir şeritte tam olarak belirli bir hızda gitmenin trafik, yolların boyuna eğimi gibi geometrik kısıtlar vb. muhtelif sebeplerle sabit hızın korunmasının mümkün olmadığı görülmüştür. Ölçümler sırasında, cihaz dahilinde bulunan gps anteni ile bir saniye aralıkla hız verileri de kaydedilmiştir. Dolayısıyla değerlendirmede, 1 sn aralıklarla toplanan araç hızının aritmetik ortalaması kesimin ortalama hızı olarak kabul edilmiş ve kesimlere ait hız bileşenleri elde edilmiştir.

#### 4. DEĞERLENDİRMELER

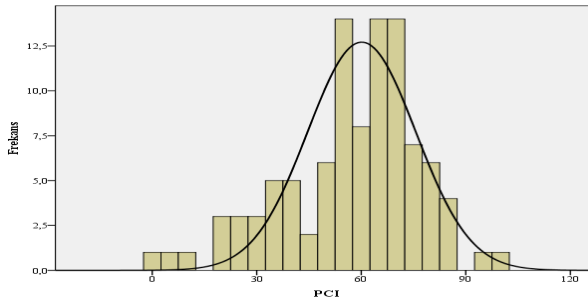
Çalışmada, kesimlerin PCI değerini ivme ölçümlerinden tahmin edebilen bir regresyon modeli oluşturulmuştur. Öncelikle yapılan analizlerin birbirlerine karşı rölatif doğrulukları incelenmiştir. Güvenirlik analizinde kullanılan modellerden biri de Alfa Modelidir. Alfa ( $\alpha$ ) katsayısına bağlı olarak ölçeğin güvenirliliği  $0.00 \leq \alpha < 0.40$  ise ölçek güvenilir değildir, 0.40

$\leq \alpha < 0.60$  ise ölçeğin güvenirliliği düşük,  $0.60 \leq \alpha < 0.80$  ise ölçek güvenilir ve  $0.80 \leq \alpha < 1.00$  ise ölçek yüksek derecede güvenilir bir ölçek olduğu kabul edilmektedir [18]. Sürücü koltuğu ve orta aks üzeri ölçüm noktalarında titreşim ölçümünden üretilen  $a_w$  ve MTVV titreşim parametrelerinin hız faktörü ile birlikte veya ayrı olacak şekilde değerlendirilmesiyle her kesim için 8 adet farklı parametre üretilmiştir. Parametrelerin alfa değeri  $\alpha = 0.841$  olarak bulunmuştur. Verilerin ‘yüksek derecede güvenilir’ olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu parametrelerin birbirlerine göre korelasyonları Çizelge 1.’de görülmektedir. Aşağıdaki çizelgede alt indislerden SK= Sürücü Koltuğu, OAU= Orta Aks Üzeri ölçüm yerlerinde yapılan titreşim ölçümlerinden üretilen parametreleri göstermektedir.

Çizelge 1. Modelleme çalışmasında kullanılacak parametreler ve korelasyonlar.

|                          | düz. $a_w$ SK | düz. $a_w$ OAU | düz. $a_w$ SK / ln(Hız) | düz. $a_w$ OAU / ln(Hız) | düz.MTVV SK | düz.MTVV OAU | düz.MTVV SK / ln(Hız) | düz.MTVV OAU / ln(Hız) |
|--------------------------|---------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| düz. $a_w$ SK            | 1.000         | 0.930          | 1.000                   | 0.927                    | 0.708       | 0.648        | 0.711                 | 0.650                  |
| düz. $a_w$ OAU           | 0.930         | 1.000          | 0.932                   | 0.999                    | 0.586       | 0.692        | 0.591                 | 0.696                  |
| düz. $a_w$ SK / ln(Hız)  | 1.000         | 0.932          | 1.000                   | 0.930                    | 0.703       | 0.644        | 0.707                 | 0.647                  |
| düz. $a_w$ OAU / ln(Hız) | 0.927         | 0.999          | 0.930                   | 1.000                    | 0.579       | 0.686        | 0.584                 | 0.691                  |
| düz.MTVV SK              | 0.708         | 0.586          | 0.703                   | 0.579                    | 1.000       | 0.802        | 1.000                 | 0.799                  |
| düz.MTVV OAU             | 0.648         | 0.692          | 0.644                   | 0.686                    | 0.802       | 1.000        | 0.802                 | 1.000                  |
| düz.MTVV SK / ln(Hız)    | 0.711         | 0.591          | 0.707                   | 0.584                    | 1.000       | 0.802        | 1.000                 | 0.800                  |
| düz.MTVV OAU / ln(Hız)   | 0.650         | 0.696          | 0.647                   | 0.691                    | 0.799       | 1.000        | 0.800                 | 1.000                  |

Çizelge 1’de korelasyonların oldukça yüksek ve birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun, regresyon analizinde oldukça sık karşılaşılan kolinerite (bağımlılık) problemiyle karşılaşılmasına neden olacağı için adım adım her bir değişken ayrı ayrı değerlendirilerek PCI tahmin modeli oluşturulmuştur.



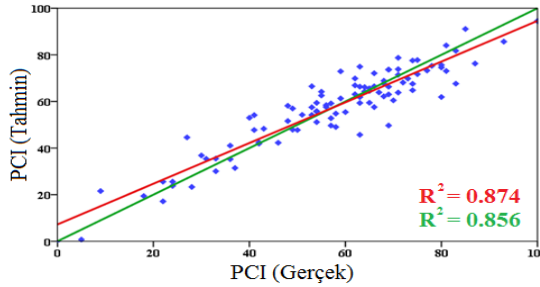
Şekil 1. PCI değerlerinin normal dağılım histogramı.

Bir regresyon modelinin kurulmasında modellenecek bağımlı değişkenin normal dağılıma uygun olması gerekmektedir. Bu amaçla, tahmin modelinde bağımlı değişken PCI değerlerinin normal dağılıma uygunluğunu test etmek amacıyla tek örneklem kolmogorov smirnov testi uygulanmıştır. Değerlendirme sonucunda, çift kuyruklu anlamlılık değeri  $0.175 > 0.05$  bulunarak PCI değerlerinin %95 güven aralığında normal dağılıma uygun olduğu saptanmıştır. Ayrıca, histogram grafiği aşığıdaki Şekil 1'de görülmekte olan PCI değerlerinin önemli miktarda çarpıklık arz etmemektedir.

Yapılan değerlendirmeler sonucu ölçüm hızı, sürücü koltuğu üzeri düz.a<sub>w</sub> ve orta aks üzeri düz.a<sub>w</sub> ve düz.MTVV bileşenlerinin en uygun değişkenler olduğu saptanmıştır. Bu değişkenlere bağlı olarak üretilen PCI tahmin modeli aşığıdaki şekildedir.

$$PCI = \frac{-453.472 * \text{düz.a}_{w \text{ SK}}}{\ln(\text{Hız})} + \frac{-196.310 * \text{düz.a}_{w \text{ OAU}}}{\ln(\text{Hız})} + 5.227 * \text{düz.MTVV}_{\text{OAU}} + 94.508$$

Burada düz.a<sub>w SK</sub> bileşeni düzeltilmiş a<sub>w</sub> Sürücü Koltuğu 'nu (m/sn<sup>2</sup>), düz.a<sub>w OAU</sub> bileşeni düzeltilmiş a<sub>w</sub> Orta Aks Üzeri 'ni (m/sn<sup>2</sup>), düz.MTVV<sub>OAU</sub> bileşeni düzeltilmiş MTVV Orta Aks Üzeri 'ni (m/sn<sup>2</sup>) ve Hız bileşeni kesimin ortalama ölçüm hızını (km/sa) göstermektedir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında regresyon değeri 0.874 (R = 0.935) gibi oldukça yüksek bir ilişki yakalanabilmiştir. Gerçek ve model kullanılarak elde edilen PCI değerleri arasındaki farklar grafik olarak Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. PCI değerleri arasındaki farklar.

Çizelge 2. PCI Tahmin Modeli istatistik verileri

|  | Sabitler   |           | t      | Anlam. | Korelasyonlar |        | Kolinerite    |
|--|------------|-----------|--------|--------|---------------|--------|---------------|
|  | Katsayılar | Std. Hata |        |        | PCI ile       | Anlam. | Kondüsyon İn. |
| <b>Sabit</b>                               | 94.508     | 1.824     | 51.817 | .000   |               |        | 1             |
| <b>düz.a<sub>w SK</sub><br/>/ ln(Hız)</b>  | -453.472   | 73.158    | -6.199 | .000   | -.923         | .000   | 5.496         |
| <b>düz.a<sub>w OAU</sub><br/>/ ln(Hız)</b> | -196.310   | 49.460    | -3.969 | .000   | -.904         | .000   | 7.088         |
| <b>düz.MTVV<sub>OAU</sub></b>              | 5.227      | 2.264     | 2.309  | .023   | -.563         | .000   | 17.371        |

Oluşturulan modele ait istatistik parametreler Çizelge 2’de görülmektedir. Gerek katsayılarla gerekse korelasyon değerlerinde istatistik anlamlılık değeri 0.05’den küçük yani, bulunan sonuçların istatistik olarak %95 anlamlılık sınırında olduğu görülmektedir. Bu değerlendirmeye göre bağımsız değişkenler arasında önemli bir kolinerite probleminin olmadığı görülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Üstyapıların mevcut performansının sürüş konforunu en iyi yansıttığı kabul edilen, araç içinde oluşan düşey doğrultudaki titreşim değerleri ile yapılabileceği düşünülmüştür. Çalışmada, PAVER sisteminin zor ve meşakkatli olan arazi çalışmalarının azaltılması hedeflenmiştir. Nihai çıktı olarak, PCI değerini titreşim verileri aracılığıyla tahmin edebilen tahmin modeli oluşturulmuştur. Regresyon yöntemi kullanılarak geliştirilen modelde, eldeki verilerin model kurulması açısından zaruri istatistiki kısıtları sağladığı tespit edilmesinden sonra ölçüm hızı, sürücü koltuğu düz. $a_w$ , orta aks üzeri düz. $a_w$  ve düz.MTVV bağımsız değişkenlerini kullanan bir PCI tahmin modeli üretilmiştir. Tahmini ve gerçek veriler arasında 0.8738 ( $R = 0.935$ ) gibi oldukça yüksek bir doğrusal ilişki yakalanabilmiştir.

Üretilen model yardımıyla herhangi bir yerel yönetimin sorumluluğunda bulunan, üstyapıları bitümlü sıcak karışım türündeki bir karayolu ağına ait ağ düzeyinde bir ÜYS kurmasının oldukça kolay ve işlevsel olacağı düşünülmektedir. Şüphesiz ki yapılan bu çalışma yardımıyla hayata geçirilecek bir ÜYS çerçevesinde kesimlere ait bakım&onarım veya yenileme uygulama projelerinin oluşturulabilmesi için yerinde gözlem ve ölçümlerin yapılması gerekmektedir.

### Semboller

|                         |   |
|-------------------------|---|
| PCI                     | : Üstyapı performans indeksi (Pavement Condition Index);            |
| $a_w$                   | : Frekans Ağırlıklandırılmış Karekök Ortalama ivme;                 |
| $a_w(t_0)$              | : Bir zaman aralığında frekans ağırlıklandırılmış karesel ortalama; |
| $\tau$                  | : Hareketli ortalama zaman dilimini;                                |
| $t$                     | : Ölçüm değişkenini;  |
| $t_0$                   | : Ölçüm zamanı;   |
| $\alpha$                | : Cronbach alfa katsayısı;  |
| MTVV                    | : Maksimum Aktarılan Titreşim Değeri;                               |
| düz. $a_w$ SK           | : Sürücü koltuğu düzeltilmiş $a_w$ parametresi ( $m/sn^2$ );        |
| düz. $a_w$ OAU          | : Orta aks üzeri düzeltilmiş $a_w$ parametresi ( $m/sn^2$ );        |
| düz.MTVV <sub>SK</sub>  | : Sürücü koltuğu düzeltilmiş MTVV parametresi ( $m/sn^2$ );         |
| düz.MTVV <sub>OAU</sub> | : Orta aks üzeri düzeltilmiş MTVV parametresi ( $m/sn^2$ );         |
| Hız                     | : Kesimin ortalama ölçüm hızı ( $km/sa$ );                          |

## Teşekkür

Yazarlar çalışmaya desteğinden dolayı İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür eder.

## Kaynaklar

- [1] Haas, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J.P., Modern Pavement Management, Krieger Pub. Co., Malabar, Florida, USA, 1994.
- [2] Shahin, M.Y., Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots, Springer, New York, 2005.
- [3] Kırbaş, U., Karaşahin, M., Performance Models For Hot Mix Asphalt Pavements In Urban Roads, Construction and Building Materials, 116, 281-288, 2016.
- [4] ASTM, E1889-97: Standard Guide for Pavement Management Implementation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [5] ASTM, E 950: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [6] Wolters, A., Zimmerman, K., Schattler, K., Rietgraf, A., Implementing Pavement Mangement System for Local Agencies, Research Rep., Illinois, ICT-11-094-1, 2011.
- [7] Picado-Santos, L., Ferreira, A., Antunes, A., Carvalheira, C., Santos, B., Bicho, M., Quadrado, I., Silvestre, S., Pavement Management System For Lisbon, Thomas Telford Ltd, pp. 157-165, 2004.
- [8] Shahin, M.Y., Kohn, S.D., Pavement Maintenance Management for Roads and Parking Lots, Research Rep., U.S. Army Construction Engineering Res. Lab., 1981.
- [9] Terzi, S., Modeling for Pavement Roughness Using the ANFIS Approach, Advances in Engineering Software, 57, 59-64, 2013.
- [10] Cantisani, G., Loprencipe, G., Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits, Journal of Transportation Engineering, 136(9), 818-826, 2010.
- [11] Griffin, M.J., Discomfort From Feeling Vehicle Vibration, Vehicle System Dynamics, 45(7-8), 679-698, 2007.
- [12] Ahlin, K., Granlund, N.O.J., Relating Road Roughness and Vehicle Speeds to Human Whole Body Vibration and Exposure Limits, International Journal of Pavement Engineering, 3(4), 207-216, 2002.
- [13] Bolling, A., Jansson, J., Hjort, M., Lidström, M., Nordmark, S., Schammar, H.k., Sjögren, L., An Approach for Realistic Simulation of Real Road Condition in a Moving Base Driving Simulator, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 11(4), 41009, 2011.
- [14] ASTM, D 6433-11: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.



- [15] ISO, 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General Requirement, ISO, Geneva, Switzerland, 1997.
- [16] Griffin, M.J., Handbook Of Human Vibration, Academic Press, London, UK, 2012.
- [17] Kırbaş, U., Şehiriçi Yollarda Üstyapı Bakım Yönetim Sistemi Kurulması, Türkiye Örneği, Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, 2013.
- [18] Kalaycı, Ş., SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2006.



# TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI

## TEKNİK DERGİ YAZIM KURALLARI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210 x 297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalı, kağıdın sol ve sağ yanında 40 mm, üst ve alt yanlarında 52.5 mm boşluk bırakılmalıdır.
2. Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 25 sayfadan, teknik notlar 6 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, kağıda basılmış bir örneğiyle birlikte, elektronik ortamda (CD veya e-posta eki) gönderilmelidir.
4. Metin yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık kısa (en çok 10 kelime) ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) diğer dilde başlık, öz ve anahtar kelimeler, (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. İki dildeki öz çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. Gerekli görüldüğünde, öz(ler) yazara sorulmadan yeniden yazılabilir. En az üç tane anahtar kelime verilmelidir. İki dildeki başlık ve öz ve anahtar kelimeler birinci sayfaya sığdırılmalı, birinci sayfanın altında on satır boş bırakılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır (TS1212).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sıra ile (önce Latin, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, herbirine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.
12. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.
13. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir.
14. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.
15. Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde verilmiş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:  
Kaynak makale ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, makalenin tam başlığı, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları, yıl.  
Örnek : Naghdi, P. M., Kalnins, A., On Vibrations of Elastic Spherical Shells. J. Appl. Mech., 29, 65-72, 1962.  
Kaynak kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, kitabın adı, cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, yayımlandığı yıl.  
Örnek : Kraus. H., Thin Elastic Shells, New York. Wiley, 1967.  
Kaynak bildiri ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, bildirinin adı, konferansın adı, yapıldığı yer, yıl.  
Kaynak tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, tezin adı, derecesi, sunulduğu üniversite, yıl.  
Kaynak rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer, yıl.
16. Teknik Dergi’de yayımlanmış bir yazı ile ilgili tartışma yazıları, en fazla iki sayfa olmalı, değinilen noktaları somut ve kısa biçimde ifade etmeli, yazarı değil içeriği eleştirmeli ve nezaket kurallarına uygun bir dille yazılmalıdır. Yazar yanıtları da yukarıda belirtilen ilkelere uygun olmalıdır.
17. Aynı bir sayfada düzenlenmiş bir bilgi notu yazı ile birlikte gönderilmelidir. Bilgi notunda, (i) yazar adları, iş ve ev adresleri ile telefon numaraları, (ii) yazarların kısa birer özgeçmişleri ve (iii) yazarlarca imzalanmış olan “Bu yazının tümüyle özgün bir çalışmanın ürünü olduğunu ve daha önce, bu veya buna benzer bir biçimiyle, hiçbir yerde yayımlanmadığını, dürüstlük içinde bildiririm.” notu bulunmalıdır.

# İÇİNDEKİLER

Aykırı Değerlerin Tespiti ve Taşkın Debilerinin Hesabı için Bir Yöntem  
Geliştirilmesi ..... 8339

**Mahsum AYDIN, Ahmet TUNA**

Harç Tipi Kaplamaların Yüzey Özelliklerinin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalar  
ile Karşılaştırılması ..... 8365

**Ali TOPAL, Mehmet GÜNEŞ, Derya KAYA, Burak ŞENGÖZ**

Geosentetik Kil Örtü Hidrasyon Yönteminin Alt Zemin Koşullarına Bağlı  
Olarak Değerlendirilmesi ..... 8385

**Tuğçe ÖZDAMAR KUL, Ali Hakan ÖREN**

Açık Deniz Yapıları Kova Temel Sistemi Davranışı Üzerinde Tekrarlı  
Yük Frekansının Etkisi ..... 8411

**H. Ercan TAŞAN, C. Taylan AKDAĞ**

Beton Gürültü Bariyeri İçin Perlit Kaplama ve Maliyeti ..... 8433

**Metehan ÇALIŞ, Zübeyde ÖZTÜRK**

## TEKNİK NOT

Şehiriçi Yollarda Üstyapıların Mevcut Performansını Belirlemek İçin  
Bir Yöntem ..... 8459

**Ufuk KIRBAŞ, Mustafa KARASHAHİN**