

## **Silt Biriminde (Kastamonu, Türkiye) Yapılan Menard Presiyometre, Standart Penetrasyon ve Laboratuvar Denev Sonuçları Arasındaki İlişkilerin Araştırılması**

Celal AğAN\*

### **ÖZ**

Zeminlerin deformasyon özelliklerinin belirlenmesi geoteknik tasarımların en önemli unsurlarındandır. Laboratuvar testlerinin zemin kütlelerini yeterince temsil edememesi, güvenilirlerin ise pahalı olması çeşitli arazi deneylerin geliştirilmesini sağlamıştır. Menard presiyometre testi geoteknik incelemelerde oldukça doğru sonuçlar vermesinin yanında fazla zaman, maliyet ve tecrübe gerektirmektedir. Bu nedenle bu parametrelere daha ucuz yöntemlerle ve deneysel denklemlerle ulaşmak ihtiyacı doğmaktadır. Bu çalışmada Kastamonu’da yürütölen bir incelemede kumlu siltlerde elde edilen Menard presiyometre, standart penetrasyon ve bazı laboratuvar test verileri arasındaki korelasyonlar incelenmiş, regresyon analizleri yapılmış, determinasyon katsayıları yüksek denklemler elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Menard presiyometre testi, standart penetrasyon testi, laboratuvar testi, korelasyon, silt, Türkiye.

### **ABSTRACT**

#### **Examination of Relationships Between Menard Pressuremeter, Standard Penetration and Laboratory Tests Data on The Silty Soil (Kastamonu, Turkey)**

Determining the deformation characteristics of soils is one of the most important parameters of geotechnical designs. Since the laboratory tests could not represents soil masses and obtaining reliable specimens is expensive, various in-situ tests have been developed. Menard pressuremeter test gives realistic results, but it requires excessive time, cost and experience. Hence, cheaper methods are needed to obtain parameters indirectly. In this study correlations between Menard pressuremeter, standard penetration and some laboratory tests data are investigated during a research conducted for the sandy silt in Kastamonu. Equations were derived with regression analyses which yielded high coefficients of correlation.

**Keywords:** Menard Pressuremeter Test, Standard Penetration Test, Laboratory Test, Correlation, Silty Soil, Turkey.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 16.10.2012 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa - agancelal@hotmail.com

## 1. GİRİŞ

Saha incelemeleri ve zemin karakteristiklerinin belirlenmesi geoteknik tasarımların en önemli unsurlarındandır. Bu veriler bozulmamış numuneler üzerinde yapılan laboratuvar testleriyle de elde edilebilirler. Ancak bozulmamış numune almadaki zorluklar laboratuvar test sonuçlarını şüpheli kılmaktadır. Sondajlardan ve/veya araştırma çukurlarından elde edilen numunenin her ne kadar bozulmamış numune olduğu varsayılsa da, sondaj itkisi, sondaj dönme hareketi, sondaj suyu, sondaj hava basıncı, sondaj devir sayısı, numunenin orijinal yerinden koparılması, hava ile teması, deney yapılana kadar geçen süre vb. gibi etkenler yüzünden, bu numunenin tam anlamıyla bozulmamış numune olduğunu iddia etmek pek mümkün olmamaktadır. Laboratuvar testlerinin zemin ve kaya kütlelerini yeterince temsil edememesi, güvenilir laboratuvar testlerinin ise oldukça pahalı yöntemler olması, arazi deneylerin önemini gittikçe arttırmaktadır [1]. Geoteknik incelemelerde en yaygın bilinen iki arazi testi Menard presiyometre testi (MPT) ve standart penetrasyon testidir (SPT). Her iki test de zemin karakteristiklerinin belirlenmesinde ve içerisinde uygulandıkları temel sondajlarının derinlikleri boyunca dayanım parametrelerini elde etmekte kullanılırlar. Geoteknik incelemelerde MPT testleri oldukça doğru sonuçlar vermesinin yanında, diğer arazi testlerine kıyasla oldukça zaman, maliyet ve tecrübe gerektirmektedir. Özellikle de ülkemizde, taşıma gücü ve oturma miktarı hesaplamalarında genellikle sadece laboratuvar ve/veya SPT sonuçları kullanılmaktadır. Bu nedenle MPT testlerinden elde edilen parametrelere daha basit ve ucuz olan test yöntemleriyle ve ampirik denklemlerle ulaşmak ihtiyacı doğmaktadır.

Kayalarda [2–9] ve zeminlerde [1, 10–25] yapılan arazi testlerinin birbirleriyle ve laboratuvar deneyleriyle aralarında olan korelasyonlar bugüne kadar pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Ancak MPT ve SPT arasındaki korelasyonu incelemiş çok az sayıda çalışma mevcuttur. Diğer yandan zemin türleri çok geniş bir yelpaze sundukları için tüm zemin türleri için bu korelasyonların ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. MPT ve SPT arasındaki korelasyonu killi zeminlerde [16, 20, 22 ve 23], Fransa’da 9 farklı zeminde [17], kumlu-siltli killerde [18], kumlu ve killi zeminlerde [19], çimentolanmış kumlarda [21], siltli kumlarda [24], alüvyon ve kil zeminlerde [25] ve Hong Kong’da bozunmuş granit zeminde [26] inceleyen araştırmacılar olmuştur. Buna rağmen, gerek araştırmacıların çalışmalarını tek bir zemin tipi üzerinde yoğunlaştırmamaları, gerekse de zeminlerin aynı tip olsalar dahi çok farklı özelliklerde olabilmeleri nedeniyle MPT ve SPT arasındaki korelasyonu temsil edecek bir evrensel ampirik denklem henüz kabul edilmemiştir.

Bu çalışmanın amacı Kastamonu ilinde kumlu silt zemin içerisinde yapılan bir geoteknik inceleme sırasında elde edilen MPT verileriyle, SPT ve bazı laboratuvar verilerini korele etmek, böylelikle basit ve ucuz yöntem verilerini kullanarak daha pahalı ancak daha güvenilir yöntem verilerine ulaşmayı sağlayacak ampirik denklemler geliştirmektir. Bu kapsamda; (i) arazi test verileri arasında, (ii) arazi ve laboratuvar test verileri arasında ve (iii) laboratuvar test verileri arasında korelasyonlar irdelenmiş olup regresyon analizleriyle ampirik denklemler türetilmiştir. Geliştirilen denklemlerin güvenle kullanılabilirliği ortalama karesel hata kökü (OKHK) yöntemiyle test edilmiştir. Son olarak, elde edilen denklemler, literatürde başka araştırmacılar tarafından geliştirilen denklemlerle karşılaştırılmıştır. Farklı veriler arasında regresyon analizleriyle korelasyonlar kurulması [20, 27–34] ve bu çalışmalardan elde edilen denklemlerin güvenilirliğinin determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) ve OKHK analizleriyle sınanması [20, 35–41] daha önce de pek çok

araştırmacı tarafından başarıyla uygulanmış yöntemlerdir.

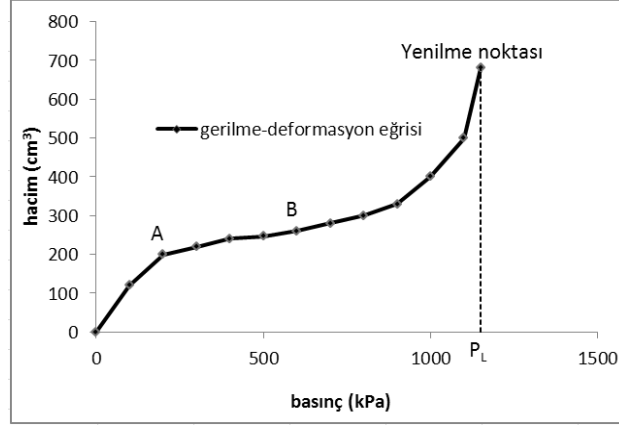
Kumlu silt zeminlerde MPT ve SPT arasındaki korelasyonu daha önce inceleyen herhangi bir çalışmaya literatür taramalarında rastlanılmaması, bu çalışmanın sonuçlarını daha da önemli kılmaktadır. Elde edilen korelasyon ve bağıntıların mevcut literatür eksikliğinin giderilmesine katkıda bulunması ve bu çalışmaya benzer koşul ve kısıtlamalara sahip geoteknik projelerde çalışan mühendislere yarar sağlaması umut edilmektedir.

## 2. MPT VE SPT YÖNTEMLERİNİN TANITIMI

Zemin içerisinde yerleştirilen bir ekipmanla zeminin yanal deformasyon karakteristiklerinin ölçülmesi fikri ilk olarak 1930'lu yıllarda ortaya atılmıştır [42]. Ancak geliştirilen bu ekipmanın kullanım aşamasında pek çok zorlukla karşılaşmıştır. Bu ekipman daha sonra geliştirilerek "Menard Presiyometresi" adını almıştır [43]. Ekipmanın gelişmesine paralel olarak, gerekli bağıntıların ortaya konulmasıyla geoteknik tasarımlarda ve araştırmalarda MPT önemli bir yer edinerek son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Belli bir deney seviyesindeki zeminin yanal deformasyon karakteristiklerini ölçmekte kullanılan MPT, özellikle laboratuvar test numunesi alınamayacak kadar zayıf, eklemli, bozunmuş vb. zeminlerde ve baraj, köprü, yüksek binalar vb. gibi büyük hayati önem taşıyan ağır yapıların inşa edileceği zeminlerin etütlerinde tercihen kullanılmaktadır. Daha sonraki yıllarda gevşek zeminlerde sondaj örselenmesinin azaltılması amacıyla, kendinden delgili presiyometre test (self-boring) ekipmanı da geliştirilmiştir. MPT ekipmanı okuma ünitesi, sonda, basınçlı hava tüpü ve hortum olmak üzere 4 ana kısımdan oluşmaktadır. Sondaj deliğinden içeri gönderilen sonda, 44 mm veya 66 mm çaplarında olup ana gövde, basınçlı hava hücresi ve basınçlı su hücresi olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır. Kuyu içerisinde yani deney seviyesinde basınçlı havayla sondanın şişirilmesiyle, sondaj kuyusu cidarlarına 60 saniyede bir artacak şekilde baskı uygulanır ve zemin deforme edilmeye başlanır. Uygulanan basınç zemini yenerse, kuyu cidarları deforme olmaya başlar ve basınçlı su hücresine ilave su gönderilmeye başlanır. Sondaya gönderilen su miktarı her 15, 30 ve 60 saniyede bir kaydedilir. İşte uygulanan bu basınç düzeyi zeminin yenilmeye uğradığı basıncı, gönderilen su miktarı ise bu basınç karşısında zeminde elde edilen deformasyon miktarını temsil etmektedir. Böyle bir deney grafiği aşağıdaki Şekil 1'de görülmektedir.

Şekildeki 0 noktası ile A noktası arasında geçen bölge, sondanın şişerek kuyu cidarlarına yaslandığı bölgedir. Sonda bu kısımda boş bölgede serbestçe şiştiği için düşük bir basınçla fazla miktarda deformasyon elde edilmiş gibi görünmektedir. Oysaki sondanın yük almaya başladığı kısım, A noktasından sonraki kısımdır. A noktasıyla B noktası arasında ise zemin artan basınca dayanım göstermektedir. Bu kısımdaki elastik deformasyon geçici bir deformasyona temsil etmektedir. B noktasından sonra zemin gelen basınca karşı artık kalıcı deformasyona uğramaya başlamaktadır. B noktası aşıldıktan sonra uygulanan yük geri alınsa bile, kalıcı deformasyon nedeniyle zemin 0 noktasına tekrar gelemeyecektir.

B noktasından sonra basınç artırılmaya devam edilirse, yenilme basıncı ve/veya akma basıncı noktası ve/veya limit basınç ( $P_L$ ) denilen noktaya varılacaktır.  $P_L$  değeri ile zeminlerin taşıma gücü hesaplamaları yapılmaktadır. A ile B noktaları arasındaki çizgisel kısmın eğiminden ise, zemine ait Menard elastik modülü ( $E_{MPT}$ ) hesaplanmaktadır.  $E_{MPT}$  değeri ile zeminlerin oturma miktarı hesaplamaları yapılmaktadır. Hesaplama bağıntıları ve MPT detayları için literatüre bakılabilir [1, 10, 44–49].



Şekil 1. Tipik bir gerilme-deformasyon grafiği

İlk olarak 1920'lerin sonlarında ABD'de geliştirilen SPT, zeminin penetrasyon direncini ölçmeye yarayan bir yöntemdir. Kuzey ve Güney Amerika'da yapılan klasik zemin etütlerinin % 85-90'ında SPT yönteminin kullanıldığını bildirmiştir [50]. SPT yöntemi kolay kullanımı sayesinde zemin etütlerinde ülkemizde de en yaygın kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak, deneyin uygulandığı zemin içerisinde bulunan çakıl ve blok malzemeler bu deneyin güvenilirliğini azaltmaktadır. 63.5 kg ağırlığındaki tokmağın, 760 mm yükseklikten, dakikada 30-40 defa olacak şekilde zemine serbest düşmesiyle 450 mm penetre olması için gerekli düşüş sayısının (SPT-N) belirlenmesiyle test sonuçlanmıştır. SPT-N değeri çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ampirik bağıntılarda kullanılarak zeminin taşıma gücü, oturma miktarı ve sıvılaşma riski gibi geoteknik özellikleri hesaplanabilir. Ucuz ve hızlı bir yöntem olan SPT testi, izlenilen yöntemden, kendiri halat yerine metal halat kullanılmasından, zeminin bloklu ve çakıllı bir yapıda bulunmasından, tokmağın sekme yapmasından vb. gibi etkenlerden ciddi anlamda etkilenmektedir. Testi etkileyen parametreler çeşitli araştırmacılar tarafından ayrıntılı olarak irdelenmiştir [51, 52]. Dünya genelinde yapılan zemin incelemelerinde bilinen ve kullanılan en yaygın yöntemlerin başında geldiği için, bu çalışmada test yöntemi hakkında detaya girilmemiştir. Yöntem hakkında detaylı bilgi için literatüre bakılabilir [11, 50, 53-55].

### 3. YÖNTEM

Bu çalışmadaki test sonuçları Kastamonu ilinde yapılmış bir zemin etüt çalışmasından elde edilmiştir. Çalışma alanı altta Paleojen Akgöl Üyesi (genellikle 15-50 m kalınlığa sahip silttaşı, kumtaşı ve kiltası ardalanması) ve üstte Eosen Karakaya Üyesi yer almaktadır. Karakaya Üyesi genellikle 0-15 m kalınlığa sahip çakıllı, killi ve kumlu siltten oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki arazi ve laboratuvar deneyleri bu jeolojik birim içerisinde yapılmıştır. Siltler sarımsı-kahverengi görünümündedirler [56].

MPT, SPT ve laboratuvar testleri kapsamında her biri 15 m olacak şekilde, 8 adet (SK-1'den SK-8'e kadar) temel sondaj kuyusu açılmış ve tüm kuyularda SPT ve MPT testleri arızalı olarak uygulanmıştır. Kuyular dönele sondaj yöntemleriyle ve mümkün olduğunca

az sondaj suyu kullanılarak açılmıştır. Zayıf ve eklemli zeminlerde dönel sondaj yöntemlerinin kuyu içerisinde deney yapılacak zemini fazlasıyla örselediğini belirtmiş, bunun yerine auger delgi yönteminin kullanılmasını önerilmiştir [3]. Ancak, bu çalışmada proje aciliyetlerinin olması, laboratuvar deneyleri için numune alınacak olması ve kuyu derinliklerinin fazla olması auger yönteminin kullanılmasını mümkün kılmamıştır.

Toplam 56 adet SPT testi bu kuyuların 1–13 m'leri arasında ve 2 m'de bir olacak şekilde kendir halat kullanılarak yapılmıştır. SPT-N darbe sayıları gerekli düzeltmeler uygulanarak  $N_{60}$  değerlerine dönüştürülmüştür. Enerji düzeltme faktörü olarak Türkiye için kabul görmüş değer olan 0.75 tercih edilmiştir [57, 58]. SPT testleri sırasında [53] ve [54]'ün önerileri izlenmiştir.

Yine toplamda 56 adet MPT testi bu kuyuların (SK-1'den SK-8'e kadar) 2–14 m'leri arasında ise, 2 m'de bir olacak şekilde yapılmıştır. Deneylerden zemine ait Menard elastik modülü ( $E_{MPT}$ ) ve limit basınç ( $P_L$ ) değerleri hesaplanmıştır. MPT testleri için 44 mm çapında sonda kullanılmıştır. MPT testleri sırasında [47]'nin önerileri izlenmiştir.

Arazi testi amacıyla açılmış olan 8 adet kuyunun sadece 3 tanesinden laboratuvar test numuneleri (SK-1, SK-2 ve SK-3) alınmıştır. Test numuneleri SPT deneylerinin uygulandığı seviyelerden mümkün olabildiğince örselenmemiş ve fazla sayıda olacak şekilde toplanmaya çalışılmıştır. Efektif içsel sürtünme açısı ( $\theta'$ ) ve efektif kohezyonun ( $c'$ ) belirlenebilmesi amacıyla 16 adet üç eksenli basınç deneyi (konsolidasyonlu ve drenajlı) ve 16 adet birim hacim ağırlık ( $\gamma$ ) deneyi olmak üzere toplam 32 adet laboratuvar deneyi [59]'un önerileri izlenerek yapılmıştır. Deney yapılan numuneler üzerinde daha sonra elek analizleri tatbik edilmiş ve tane boyutuna göre zemin sınıflamaları yapılmıştır.

Arazi ve laboratuvar verileri toplandıktan sonra, arazi ( $E_{MPT}$  ve  $N_{60}$ ) ve laboratuvar test verileri ( $c'$ ,  $\theta'$  ve  $\gamma$ ) arasında korelasyonlar irdelenmiş ve ampirik denklemler türetilmiştir. Türetilen denklemlerle hesaplanan tahmini değerler ile deneylerden elde edilen ölçüm değerleri karşılaştırılarak regresyon analizine tabi tutulmuş ve elde edilen denklemlerin kullanım açısından güvenilirlikleri irdelenmiştir. MPT deneylerinden elde edilen  $E_{MPT}$  ve  $P_L$  değerleri birbirilerine bağımlı parametreler oldukları için,  $P_L$  korelasyonlarının ayrıca irdelenmesine gerek görülmemiştir.

Son olarak bu çalışma kapsamında elde edilen  $E_{MPT}$  ve  $N_{60}$  arasındaki ilişkiyi gösteren denklem, aynı amaçla başka araştırmacılar tarafından geliştirilen denklemlerle karşılaştırılmıştır. Microsoft Excel yazılımı ile korelasyon ve regresyon analizleri ( $R^2$ ) ve ortalama karesel hata kökü (OKHK) yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bir denklemin  $R^2$  değerinin mümkün olduğunca 1'e yakın olması, OKHK değerinin ise mümkün olduğunca 0'a yakın olması o denklemin güvenilirliğinin göstergesi olacaktır. Ortalama hata olarak da adlandırılan OKHK yöntemi, Denklem (1) yardımıyla aşağıda sunulduğu şekilde hesaplanmaktadır.

$$OKHK = [(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \dots + \varepsilon_n^2)/(n-u)]^{0.5} \quad (1)$$

Bu denklemde n ölçüm sayısını, u ise bilinmeyen sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada bir bilinmeyenli denklemler üzerine çalışıldığından u sayısı 1 olarak kabul edilmiştir.  $\varepsilon$  ise her bir ölçüm için yapılan hatayı ifade etmekte olup, Denklem (2) yardımıyla aşağıda şekilde hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \text{ölçülen değer} - \text{gerçek değer} \quad (2)$$

Yukarıda da bahsedildiği gibi SPT ve laboratuvar deneyleri kuyuların 1–13 m’leri arasında ise 2 m’de bir olacak şekilde yapılmışken, MPT deneyleri aynı kuyuların 2–14 m’leri arasında, 2 m’de bir olacak şekilde yapılmıştır. MPT deneylerinin SPT ve laboratuvar deneylerinden 1’er metre farklı derinlik seviyelerinde yapılmış olmasının korelasyon kurma çalışmaları sırasında karışıklıklara yol açacağı düşünülmüş ve MPT, SPT ve laboratuvar deneylerinin aynı derinlik seviyelerinde yapılmış olduğu varsayılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR VE KORELASYONLAR

15 m derinliğe sahip olan 8 adet temel sondajda yeraltı su seviyesi genellikle 5–7 m arasında değişmiştir. Laboratuvar deneyleri tamamlandıktan sonra aynı numuneler üzerinde elek analizleri ve tane boyutuna göre zemin sınıflamaları yapılmıştır. Kıvam limit deneyleri yapılmadığından su muhtevası ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma sistemi tatbik edilememiştir. Tüm sondajlarda benzer sonuçlar alındığından sondaj kuyularından elde edilmiş genelleştirilmiş stratigrafik dizilim Tablo 1’de sunulmuştur.

*Tablo 1. Elek analizine göre genelleştirilmiş zemin profili*

Derinlik (m)	Yeraltı Su Seviyesi (m)	Zemin Tanımlaması	Açıklamalar
0.0 – 0.5	5-7	Bitkisel toprak	
0.5 – 6.0		Silt	% 60 Silt, % 25 Kum, % 10 Kil ve % 5 Çakıl
6.0 – 7.0		Kil	% 55 Kil, % 30 Silt, % 10 Kum ve % 5 Çakıl
7.0 – 15.0		Silt	% 65 Silt, % 25 Kum, % 7 Kil ve % 3 Çakıl

Çalışma kapsamında 8 adet kuyuda yapılan MPT ve SPT deney derinlikleri ve sonuçları aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir.

*Tablo 2. MPT ve SPT deney derinlikleri ve deney sonuçları*

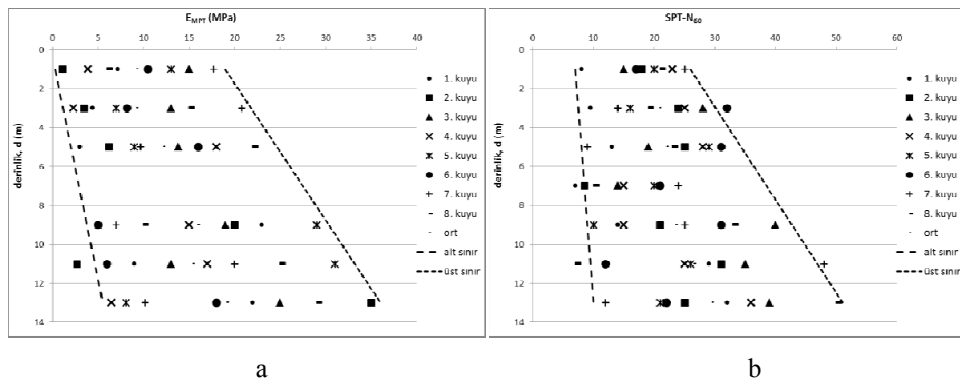
derinlik (m)	SK – 1		SK – 2		SK – 3		SK – 4		SK – 5		SK – 6		SK – 7		SK – 8	
	$E_{MPT}$ (MPa)	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$	$E_{MPT}$	$N_{60}$
1	7.2	8	1.1	18	15	15	3.9	23	13	20	10	17	18	25	6.1	21
3	4.4	10	3.5	24	13	28	2.3	25	7.0	16	8.2	32	21	14	15	19
5	3.0	13	6.2	25	14	19	18	28	9.0	29	16	31	9.7	9	22	23
7	4.0	7	3.0	9	7.6	14	2.1	15	12	20	5.7	21	3.5	24	9.6	10
9	23	14	20	21	19	40	15	15	29	10	5.0	31	7.0	25	10	33
11	9.0	29	2.7	31	13	35	17	25	31	26	6.0	12	20	48	25	7
13	22	32	35	25	25	39	6.5	36	8.1	21	18	22	10	12	29	50

Açılan 8 adet kuyunun sadece 3 tanesinden laboratuvar deneyleri için numune almak mümkün olabilmiş, alınan numunelerin derinlikleri ve üzerlerinde yapılan laboratuvar test sonuçları aşağıdaki Tablo 3’de verilmiştir. Görüldüğü üzere 7. metrede her üç kuyudan da laboratuvar numunesi almak mümkün olmamıştır. Karot sandıkları üzerinde yapılan incelemelerde bunun sebebinin Tablo 1’de de görüleceği gibi, 6–7 m arasındaki suya doymuş kil tabakasının neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. Laboratuvar deney derinlikleri ve deney sonuçları

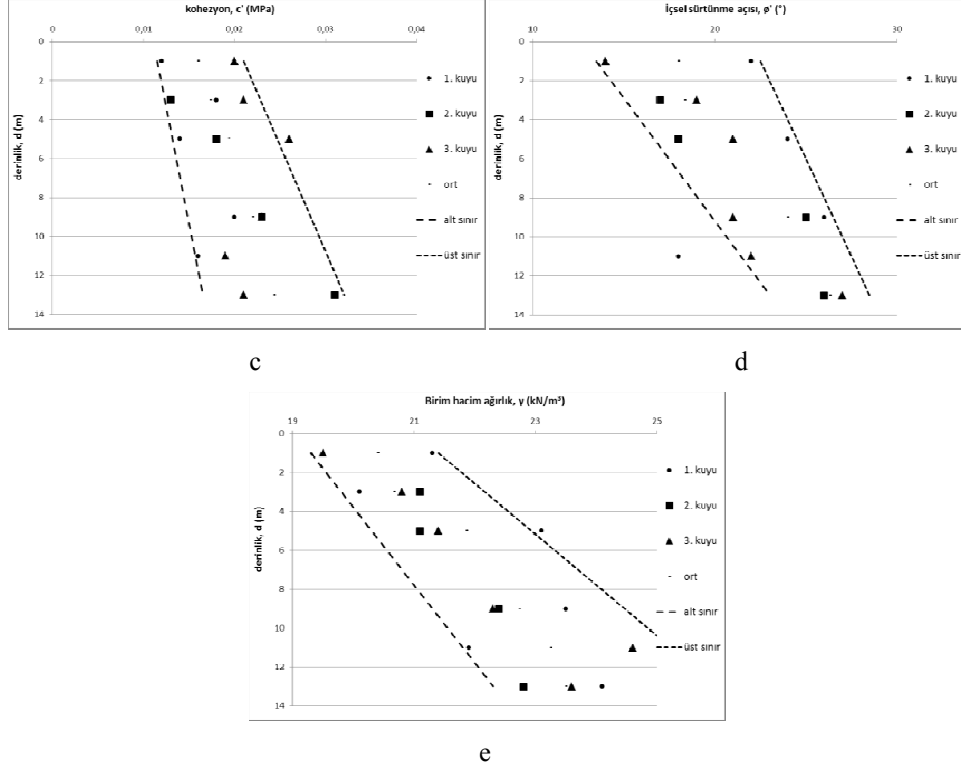
derinlik (m)	SK – 1			SK – 2			SK – 3		
	c' (MPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (MPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (MPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	0.012	22	21.3	-	-	-	0.020	14	19.5
3	0.018	19	20.1	0.013	17	21.1	0.021	19	20.8
5	0.014	24	23.1	0.018	18	21.1	0.026	21	21.4
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0.020	26	23.5	0.023	25	22.4	0.023	21	22.3
11	0.016	18	21.9	-	-	-	0.019	22	24.6
13	0.021	26	24.1	0.031	26	22.8	0.021	27	23.6

Tablo 2 ve 3’de sunulan elde edilmiş verilerin çapraz korelasyonları incelenerek bu değişkenlerin birbirlerini ne derece etkiledikleri araştırılmıştır. Korelasyon çalışmalarında öncelikle MPT verileri SPT ve laboratuvar verileriyle, daha sonra SPT verileri laboratuvar verileriyle ve son olarak da laboratuvar verileri kendi aralarında irdelenmiş, korelasyonlar ve ampirik denklemler elde edilmiştir. Bu çalışma kumlu silt birimindeki korelasyonları incelediğinden ve sondaj karot sandıkları üzerinde yapılan incelemelerde çalışma alanı stratigrafisinde 6–7 m arasında suya doymuş kil tabakası bulunduğuundan (Tablo 1), bu seviyelerde elde edilen tüm veriler bu çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.



Şekil 2. Kumlu silt zeminde derinliğe bağlı olarak (a)  $E_{MPT}$ , (b)  $SPT-N_{60}$ , (c)  $c'$ , (d)  $\phi'$ , (e)  $\gamma$  verilerinde gözlenen değişimler

*Silt Biriminde (Kastamonu, Türkiye) Yapılan Menard Presiyometre, ...*



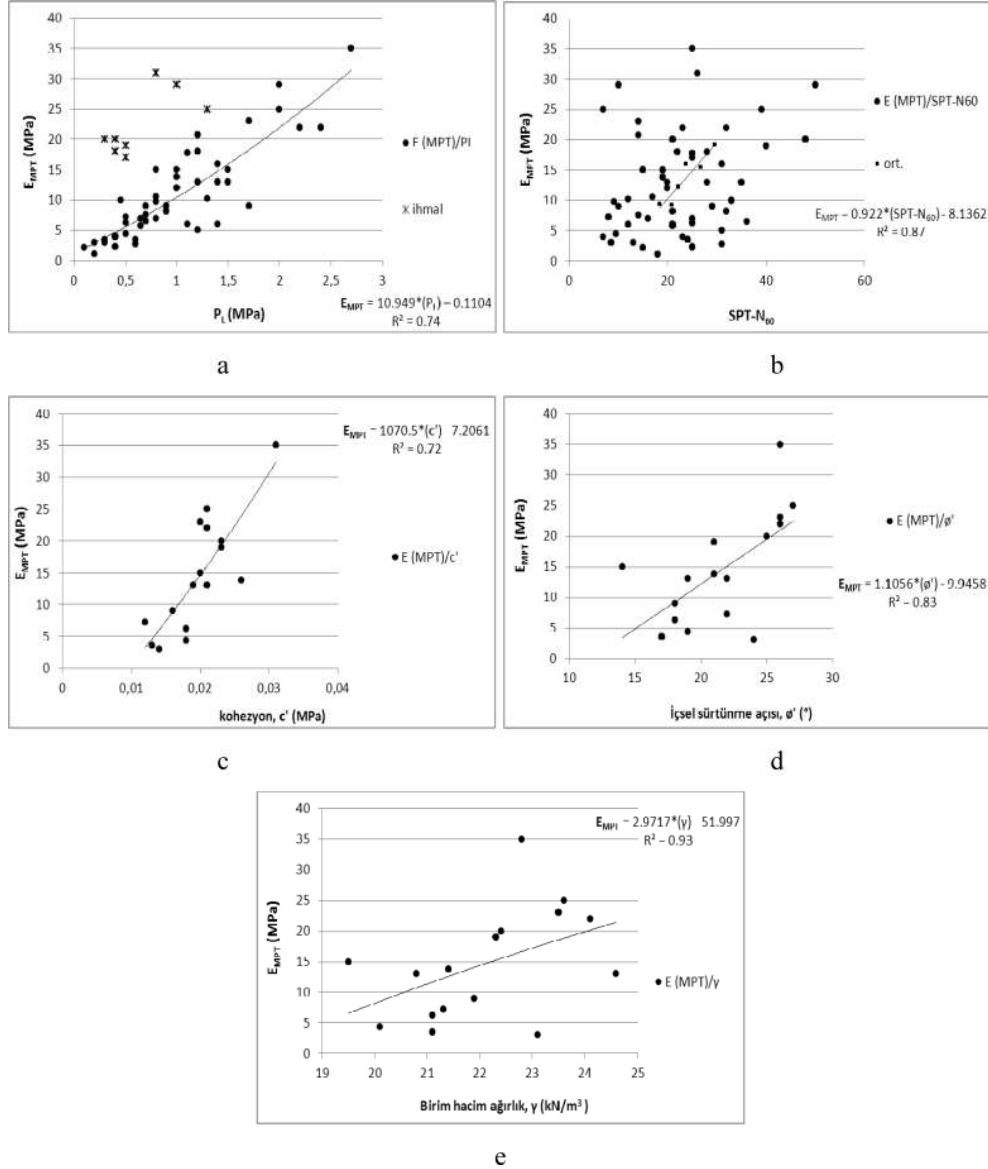
Şekil 2. Kumlu silt zeminde derinliğe bağlı olarak (a)  $E_{MPT}$ , (b)  $SPT-N_{60}$ , (c)  $c'$ , (d)  $\phi'$ , (e)  $\gamma$  verilerinde gözlenen değişimler (devam)

8 adet kuyudan elde edilen deney verilerinin ( $E_{MPT}$ ,  $N_{60}$ ,  $c'$ ,  $\phi'$  ve  $\gamma$ ) derinliğe (d) bağlı olarak değişimi Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 2'de görüldüğü gibi, kuyulardan elde edilen deney verileriyle ( $E_{MPT}$ ,  $N_{60}$ ,  $c'$ ,  $\phi'$  ve  $\gamma$ ) ile derinlik (d) arasında her kuyu için bir bant aralığında dağılım olduğu gözlenmiştir.

#### 4.1. MPT korelasyonları

Bu bölümde MPT ile elde Menard elastik modülü ( $E_{MPT}$ , 56 adet) sonuçlarının MPT ile elde Menard limit basıncı ( $P_L$ , 56 adet),  $SPT-N_{60}$  (56 adet), kohezyon ( $c'$ , 16 adet), içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ , 16 adet) ve birim hacim ağırlık ( $\gamma$ , 16 adet) değerlerine bağlı olarak değişimi irdelenmiş, muhtemel ilişkiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları Excel yazılımında değerlendirilmiş, ilişkilerin denklemleri, determinasyon katsayıları ( $R^2$ ) ve OKHK değerleri belirlenmiştir. Sonuç grafikleri toplu olarak aşağıdaki Şekil 3'de sunulmuştur.





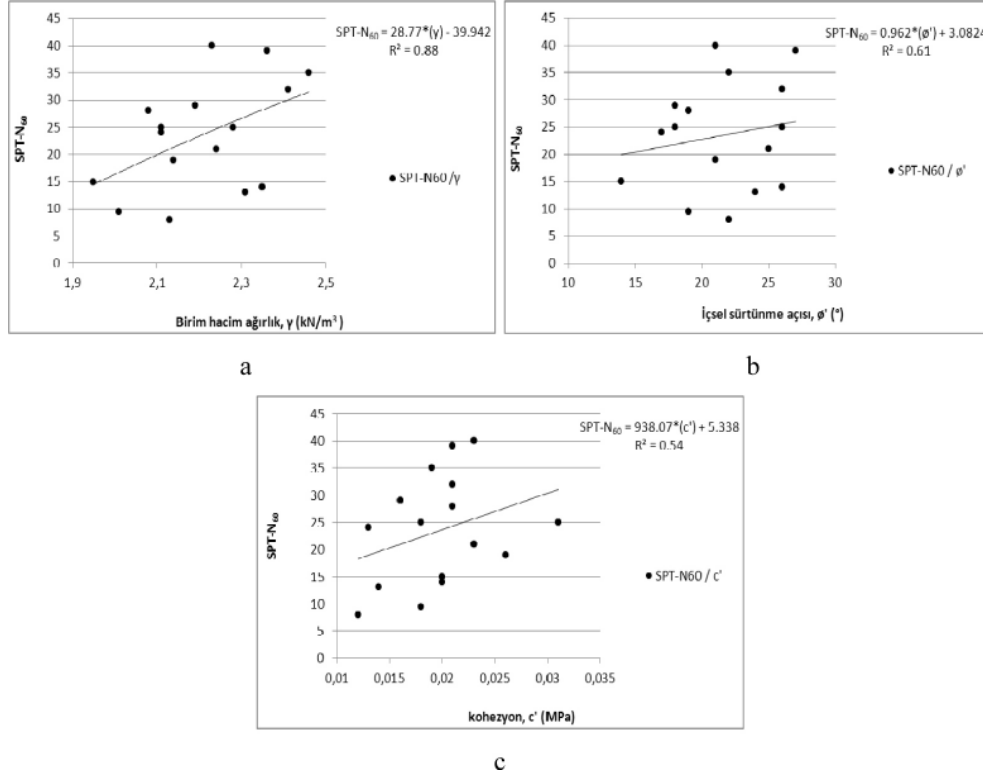
Şekil 3. Kumlu silt zeminde elde edilen  $E_{MPT}$  ile (a)  $P_L$  arasındaki, (b) SPT- $N_{60}$  arasındaki, (c)  $c'$  arasındaki, (d)  $\phi'$  arasındaki ve (e)  $\gamma$  arasındaki korelasyonlar

Şekil 3'den görüldüğü gibi 8 kuyudan elde edilen arazi test değerlerinin ve 3 kuyudan elde edilen laboratuvar test değerlerinin ortalamalarının dikkate alınmasıyla  $E_{MPT}$  ile  $P_L$ , SPT- $N_{60}$ ,  $c'$ ,  $\phi'$  ve  $\gamma$  değerleri arasında anlamlı ilişkiler tespit edilmiş ve güvenilirliği yüksek denklemler geliştirilmiştir ( $R^2$  ve OKHK değerlerine göre). Örneğin,  $E_{MPT}$  ile  $P_L$  arasında

türetilen denklemin  $R^2$  değeri 0.74 olarak bulunmuştur. Bu denklemi kullanarak tahmini olarak hesaplanan  $E_{t(MPT)}$  değerleriyle, deneylerle ölçülmüş olan  $E_{MPT}$  değerleri arasında OKHK değeri 3.13 olarak bulunmuştur. Elde edilen tüm denklemler ve bu denklemlerin  $R^2$  ve OKHK değerleri toplu olarak Tablo 4’de sunulmuştur.

#### 4.2. SPT korelasyonları

Bu bölümde ise SPT ile elde edilen  $SPT-N_{60}$  (56 adet) sonuçlarının birim hacim ağırlık ( $\gamma$ , 16 adet), içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ , 16 adet) ve kohezyon ( $c'$ , 16 adet) değerlerine bağlı olarak değişimi irdelenmiş, muhtemel bir ilişki tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları Excel yazılımında değerlendirilmiş, ilişkilerin denklemleri, determinasyon katsayıları ( $R^2$ ) ve OKHK değerleri belirlenmiştir. Sonuç grafikleri toplu olarak aşağıdaki Şekil 4’de sunulmuştur.



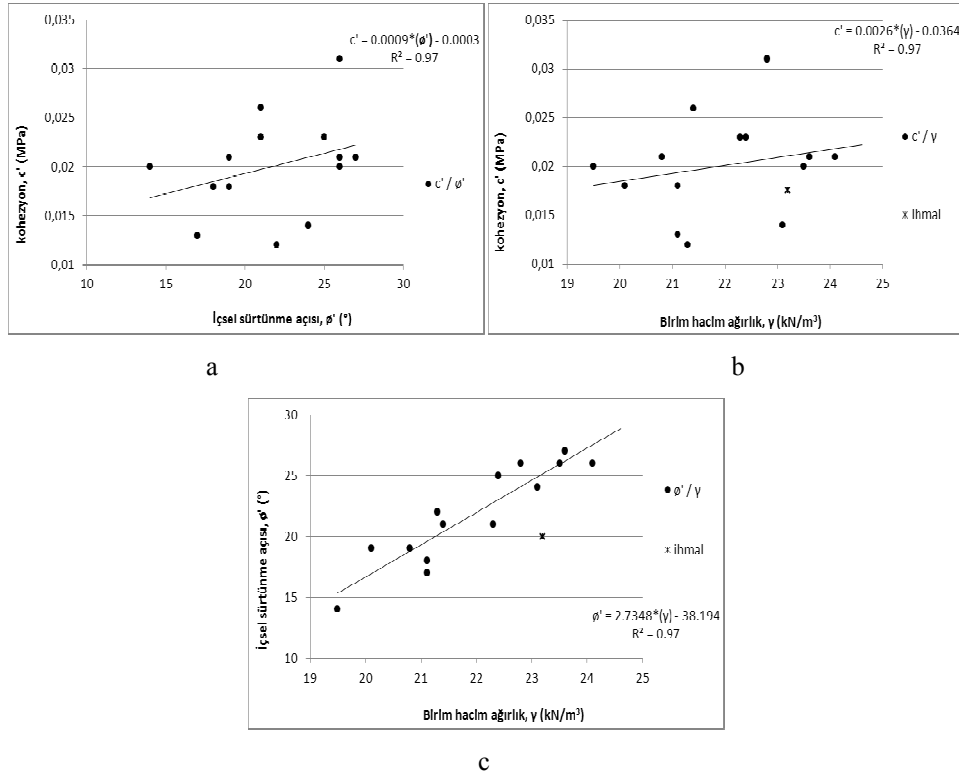
Şekil 4. Kumlu silt zeminde elde edilen  $SPT-N_{60}$  ile (a)  $\gamma$  arasındaki, (b)  $\phi'$  arasındaki ve (c)  $c'$  arasındaki korelasyonlar

Şekil 4’den görüldüğü gibi 8 kuyudan elde edilen arazi test değerlerinin ve 3 kuyudan elde edilen laboratuvar test değerlerinin ortalamalarının dikkate alınmasıyla  $SPT-N_{60}$  verileriyle

$\gamma$  verileri arasında anlamlı ilişkiler tespit edilmiştir (Şekil 4.a). SPT- $N_{60}$  verileriyle  $\phi'$  ve  $c'$  verileri arasında ise herhangi bir anlamlı ilişki belirlenmemiştir (Şekil 4.b ve 4.c). Elde edilen tüm denklemler ve bu denklemlerin  $R^2$  ve OKHK değerleri toplu olarak Tablo 4'de sunulmuştur.

#### 4.3. Laboratuvar deneyleri korelasyonları

Son olarak bu bölümde de laboratuvar deneyleriyle elde edilen kohezyon ( $c'$ , 16 adet), içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ , 16 adet) ve birim hacim ağırlık ( $\gamma$ , 16 adet) değerleri arasında muhtemel ilişkiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları, Excel yazılımında değerlendirilmiş, ilişkilerin denklemleri, determinasyon katsayıları ( $R^2$ ) ve OKHK değerleri belirlenmiştir. Sonuç grafikleri toplu olarak aşağıdaki Şekil 5'de sunulmuştur.



Şekil 5. Kumlu silt zeminde elde edilen laboratuvar verilerinden (a)  $c'$ - $\phi'$  arasındaki, (b)  $c'$ - $\gamma$  arasındaki ve (c)  $\phi'$ - $\gamma$  arasındaki korelasyonlar

Şekil 5'den görüldüğü gibi 3 kuyudan elde edilen laboratuvar test değerlerinin ortalamalarının dikkate alınmasıyla  $c'$  verileriyle  $\phi'$  ve  $\gamma$  verileri arasında güçlü ilişkiler

tespit edilmiştir (Şekil 5.a ve 5.b). Aynı zamanda  $\sigma'$  verileriyle  $\gamma$  verileri arasında güçlü ilişkiler tespit edilmiştir (Şekil 5.c).

Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm ampirik denklemler ve bu denklemlerin  $R^2$  ve OKHK değerleri toplu olarak Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Çalışmada elde edilen eşitlikler

Parametreler	Denklem no	Denklemler*	$R^2$	OKHK
$E_{MPT}$ ve $N_{60}$	(3)	$E_{MPT} = 0.922 * (N_{60}) - 8.1362$	0.87	1.43
$E_{MPT}$ ve $P_L$	(4)	$E_{MPT} = 10.949 * (P_L) - 0.1104$	0.74	3.13
$E_{MPT}$ ve $c'$	(5)	$E_{MPT} = 1070.5 * (c') - 7.2061$	0.72	2.01
$E_{MPT}$ ve $\sigma'$	(6)	$E_{MPT} = 1.1056 * (\sigma') - 9.9458$	0.83	1.62
$E_{MPT}$ ve $\gamma$	(7)	$E_{MPT} = 2.9717 * (\gamma) - 51.997$	0.93	1.07
$N_{60}$ ve $\gamma$	(8)	$N_{60} = 28.77 * (\gamma) - 39.942$	0.88	1.42
$c'$ ve $\sigma'$	(9)	$c' = 0.0009 * (\sigma') - 0.0003$	0.97	< 0.1
$c'$ ve $\gamma$	(10)	$c' = 0.0026 * (\gamma) - 0.0364$	0.97	< 0.1
$\sigma'$ ve $\gamma$	(11)	$\sigma' = 2.7348 * (\gamma) - 38.194$	0.97	1.37
$N_{60}$ ve $\sigma'$	(12)	$N_{60} = 0.962 * (\sigma') + 3.0824$	0.61	2.52
$N_{60}$ ve $c'$	(13)	$N_{60} = 938.07 * (c') + 5.338$	0.54	2.73

\* $E_{MPT}$ ,  $P_L$  ve  $c'$  parametrelerinin birimleri MPa.  $\gamma$  parametresinin birimi  $kN/m^3$ .

Tablo 4'den de görüldüğü gibi kumlu silt zeminde yapılan arazi ve laboratuvar testlerinden elde edilen değerler arasında determinasyon katsayıları oldukça yüksek ilişkiler tespit edilmiştir. Sadece  $N_{60}$  ile  $\sigma'$  ve  $c'$  değerleri determinasyon katsayıları tatminkar düzeyde yüksek ilişkiler belirlenememiştir. Bunun sebebinin silt birim içerisindeki bazı iri kum tanecikleri olduğu düşünülmektedir. Bu kum tanecikleri yer yer çakıl boyutuna varabilmekte,  $\sigma'$  ve  $c'$  değerlerinin elde edildiği üç eksenli basınç deneylerinin sonuçlarını oldukça etkileyebilmektedir. İri çakılların SPT deneylerinde tokmak sekmelerine neden oldukları ve yanıtıcı deney sonuçlarına sebep oldukları bilinmektedir.

Tablo 4'deki sonuçlarda dikkat çeken diğer bir nokta ise, bu çalışmada SPT'ye ( $N_{60}$ ) kıyasla MPT sonuçlarının ( $E_{MPT}$ ) zemin parametreleriyle ( $c'$ ,  $\sigma'$  ve  $\gamma$ ) daha yakın ilişki içerisinde olduğudur. Bunun MPT ve SPT deneylerinin farklı özelliklere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha önce belirttiği gibi, iki test yönteminin deney süreleri farklıdır [2]. MPT deneyinde uygulanan basınç esnasında zemine deformasyon için zaman tanınırken, SPT deneyinde tokmağın zemine ani düşürülmesi sonucunda zemine deformasyon için zaman tanınmamaktadır. MPT deneyinde zeminin basınca karşı deformasyon ve plastisite özellikleri, SPT deneyinde ise zeminin basınca karşı ani direnci ölçülmektedir. Başka bir deyişle MPT deneyiyle zeminlerin zamana bağlı basınç-

deformasyon özellikleri daha doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Bundan dolayı MPT deney sonuçlarıyla ( $E_{MPT}$ ) zemin parametreleri ( $c'$ ,  $\phi'$  ve  $\gamma$ ) arasında daha iyi korelasyonlar sağlanması beklenen bir sonuçtur.

Son olarak, bu çalışmada elde edilen MPT ve SPT korelasyonları daha önceki çalışmalarda elde edilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Korelasyon karşılaştırma çalışmalarında sadece MPT deneylerinden elde edilen  $E_{MPT}$  ile SPT deneylerinden elde edilen  $N_{60}$  verileri kullanılmıştır. Denklemler ve sonuçları Tablo 5’de topluca sunulmuştur.

Tablo 5. Bazı çalışmadan elde edilen eşitliklerin karşılaştırılması

$E_{MPT}$ ve $N_{60}$ Korelasyonları	Denklemler	$R^2$	OKHK	Veri sayısı
Bu çalışma (3)	$E_{MPT} = 0.922 * (N_{60}) - 8.1362$	0.87	1.43	56
[20]	$E_{MPT} = 0.288 * (N_{60})^{1.4}$	0.74	5.65	52
[26]	$E_{MPT} = 0.946 * (N_{60})^{0.8125}$	0.51	5.74	28
[18]	$E_{MPT} = 388.6 * (N_{60})^{1.4} + 4554$	0.91	9.96	52
[19]	$E_{MPT} = 1.610 * (N_{60})^{0.71}$	0.72	8.99	52
[25]	$E_{MPT} = 0.500 * (N_{60})$	0.88	5.05	206

Bu sonuçlara göre, tüm çalışmalarda elde edilen denklemler kabul edilebilir korelasyonlar sunmasına rağmen, 0’a en yakın OKHK değerini bu çalışmada elde edilen Denklem (3) sağlamıştır. İkinci en iyi korelasyonu [25]’in, üçüncü en iyi korelasyonu ise [20]’nin önerdiği denklemler sağlamıştır.

Diğer yandan, çeşitli araştırmacıların geliştirdiği yüksek determinasyon katsayılı denklemler diğer bir araştırmacının verileriyle aynı başarıyı gösterememektedir. Örneğin, bu çalışmadan elde edilen Denklem (3)’ün OKHK değeri 1.43 olarak bulunmuşken, [20] tarafından geliştirilen denklemin aynı deney verilerine uygulanması halinde OKHK değeri 11.87’ye yükselmektedir. Bu denemenin tersi yapıldığında da aynı problem baş göstermiştir. Yani, [20] tarafından geliştirilen denklemin OKHK değeri 5.65 olarak bulunmuşken, bu çalışmadan elde edilen Denklem (3)’ün [20]’nin verilerine tatbik edildiğinde OKHK değeri 11.25’e yükselmektedir. Görüldüğü gibi, şu anki verilerle tüm zeminler için geçerli bir denklem türetildiğini söylemek henüz mümkün değildir. [21] de geliştirdiği denklemlerle elde ettiği tahmini değerlerin, gerçekte ölçümlerle elde ettiği değerlerden daha düşük olduğunu belirtmiş, gerçeğe daha yakın denklemler elde edebilmek için daha fazla çalışmaya ve veriye ihtiyaç duyulduğunu vurgulamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada MPT deney sonuçlarıyla ( $E_{MPT}$ ) SPT deney sonuçları ( $N_{60}$ ) arasında çok başarılı korelasyon çalışmaları yapılmıştır. Ancak, arazi verileriyle laboratuvar verileri arasındaki korelasyon çalışmalarında aynı oranda başarıdan söz etmek mümkün değildir. Çünkü zeminin dayanım parametrelerini çok etkileyen nem içeriği ve plastisite indisi gibi fiziksel parametreler korelasyon çalışmalarında dikkate alınmamış, sadece birkaç

zemin parametresi ( $c'$ ,  $\phi'$  ve  $\gamma$ ) korelasyon çalışmalarında dikkate alınmıştır. Bu noksanlık, bu çalışmanın en zayıf yönünü teşkil etmektedir. Dolayısıyla bundan sonra diğer araştırmacılar tarafından yapılacak çalışmalarda, bu çalışmadaki parametrelere ilave olarak zemine ait nem içeriği ve kıvam limitleri parametrelerinin de korelasyon çalışmalarına dahil edilmesi önerilir.

## 5. YORUM VE ÖNERİLER

Deformasyon özellikleri ve dayanım parametreleri zemin davranışını en iyi temsil edecek parametrelerdir. Bu veriler genellikle laboratuvar ölçekli deneylerden elde edilmektedir ancak laboratuvar deneyleri için alınan numunelerin ne derece bozulmamış numune oldukları akıllarda her zaman soru işaretleri doğurmaktadır. Laboratuvar deneyleriyle ilgili soru işaretlerini ortadan kaldırmak için çeşitli arazi test yöntemleri zamanla geliştirilmiştir. Yerinde ölçüm yapan bu testler mümkün olabilecek en doğru sonuçları vermekte ancak zaman, maliyet ve tecrübe gerektirmesi arazi testlerini her zaman uygulanabilir kılmamaktadır. İşte bu nedenle zeminin dayanım parametrelerini önceden tahmin etmeye yönelik çeşitli ampirik denklemler çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir.

MPT ve SPT tüm dünyada en yaygın olarak bilinen arazi test yöntemlerindedir. MPT testleri oldukça doğru sonuçlar vermesinin yanında diğer arazi testlerine kıyasla da oldukça zaman, maliyet ve tecrübe gerektirmektedir. İşte bu nedenle, daha basit ve ucuz olan SPT yöntemi ve çeşitli laboratuvar verileriyle MPT testlerinden elde edilen parametrelere ampirik denklemlerle ulaşmak ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda pek çok araştırmacı çeşitli zemin türlerinde çalışmalar yapmış, ancak MPT ve SPT yöntemleri arasındaki korelasyonu kumlu silt zeminlerde daha önce araştırmış herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada Kastamonu ilinde yürütülen detaylı bir geoteknik inceleme programından elde edilen MPT, SPT ve laboratuvar deney verileri arasındaki korelasyonlar incelenmiş, MPT testlerinden elde edilen  $E_{MPT}$  değerlerine ampirik denklemlerle ulaşmaya çalışılmıştır. Arazi ve laboratuvar yapılan MPT, SPT ve laboratuvar testlerinden elde edilen  $E_{MPT}$ ,  $P_L$ ,  $N_{60}$ ,  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\gamma$  değerleri arasında 11 adet ampirik denklem geliştirilmiş ve bu denklemlerin 9'unda yüksek determinasyon katsayıları ( $R^2 = 0.72-0.98$ ) tespit edilmiştir. Sadece  $N_{60}$  verileriyle  $\phi'$  ve  $c'$  verileri arasında tatminkar düzeyde yüksek determinasyon katsayılı ilişkiler ( $R^2 = 0.54-0.61$ ) belirlenememiştir. Bu durumun silt birim içerisindeki bazı iri kum taneciklerinin üç eksenli basınç ve SPT sonuçlarını saptırmasından kaynaklandığı akla ilk olarak gelmektedir. Ancak,  $\phi'$  ve  $c'$  değerlerinin diğer parametrelerle yüksek determinasyon katsayılı ilişkiler göstermesi üç eksenli basınç deney sonuçlarıyla ilgili şüpheleri en aza indirmektedir.  $E_{MPT} - P_L$  verileri arasında korelasyonun yüksek olması beklenen bir durumdur çünkü her iki veri de MPT yönteminden elde edilmektedir. Ancak MPT, SPT ve laboratuvar test verileri arasındaki korelasyonun çoğunlukla yüksek olması oldukça dikkat çekici bir unsurdur.

Dikkat çeken bir diğer sonuç ise, çeşitli araştırmacıların geliştirdiği yüksek determinasyon katsayılı denklemlerin, diğer bir araştırmacının verileriyle aynı başarıyı gösterememesi olmuştur. [21]'de ve bu çalışmada da belirtildiği gibi, gerçeğe daha yakın denklemler elde edebilmek için daha fazla çalışmaya ve veriye ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde MPT ve SPT yöntemleri arasındaki korelasyonun kumlu silt zeminlerde daha önce araştırılmamış olması bu çalışma kapsamında türetilen  $R^2$  değerleri yüksek ve OKHK değerleri düşük ampirik denklemlerin önemini artırmaktadır. Ancak, yerinde yanal ve düşey zemin basınçlarının belirlenmesi ve bu basınç değerlerinin zemin parametreleri üzerine etkilerini irdeleyen ek araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Presiyometre testlerinde sondajın kuyularda örselenmelere neden olduğu ve bu örselenmeyi en aza indirmek için burgu (auger) yöntemiyle delgi yapılması gerektiği belirtilmiştir [3]. Ancak, bu çalışmada gerek projenin acilen gerçekleştirilme ihtiyaçları, gerekse de laboratuvar deneyleri için numune alınmasına önceden karar verildiğinden burgu sondaj yöntemi kullanmak mümkün olmamıştır. Deney sondajlarının burgu yöntemiyle yapılması halinde elde edilen bağıntıların güvenilirliğinin ve  $R^2$  değerlerinin nasıl etkileeneceği bu çalışmadaki soru işaretlerindedir.

Bu çalışmanın en zayıf yönü ise, korelasyon çalışmalarında sadece birkaç zemin parametresinin ( $c'$ ,  $\sigma'$  ve  $\gamma$ ) dikkate alınması ve zeminin dayanım parametrelerini çok etkileyen nem içeriği ve fiziksel parametrelerin (özellikle plastisite indisi) dikkate alınmaması olarak gösterilebilir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, bu çalışmadaki parametrelere ilaveten zemine ait nem içeriği ve kıvam limitleri parametrelerinin de korelasyon çalışmalarına dahil edilmesi önerilir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bağıntıların mevcut literatüre katkı yapması umut edilmektedir. Ancak elde edilen bağıntıların bu çalışmadakine benzer olarak kumlu silt zeminlerde benzer koşul ve kısıtlamalara sahip geoteknik mühendislik tasarımlarında kullanılması önerilir. Ayrıca, bu denklemlerin başka sahalarda güvenilirliğinden emin olunana kadar, geoteknik araştırmaların şimdilik ön safhasında, sadece ön fikir edinmek amacıyla kullanılması önerilir. Diğer araştırmacılar tarafından benzer zeminlerde yapılacak ilave araştırmalarla daha güvenilir ampirik denklemlerin geliştirilebileceği düşünülmektedir. [60]'ın da belirttiği gibi, bölgesel korelasyonlar global korelasyonların elde edilmesinde ilk adımı oluşturmaktadır.

### Semboller

- $c'$  : Efektif kohezyon  
 $d$  : Derinlik  
 $E_{MPT}$  : Menard elastik modülü  
 $kg$  : Kilogram  
 $kN/m^3$  : Kilonewton/metreküp  
 $m$  : Metre  
 $MPa$  : Megapascal  
 $MPT$  : Menard presiyometre testi  
 $OKHK$  : Ortalama karesel hata kökü  
 $P_L$  : Menard limit basıncı

- $R^2$  : Determinasyon katsayıları  
SPT : Standart penetrasyon testi  
SPT-N : Standart penetrasyon testi darbe sayısı  
SPT-N<sub>60</sub>: Standart penetrasyon testi düzeltilmiş darbe sayısı  
 $\emptyset'$  : Efektif içsel sürtünme açısı  
 $\gamma$  : Birim hacim ağırlık  
~ : Yaklaşık  
> : Büyüktür  
< : Küçüktür

### **Teşekkür**

Yazar arazi testlerindeki yardımlarından dolayı İ. Ümit ERDEM'e, M. Müfit GÜVEN'e ve Atilla TURABİK'e, yorumlarıyla makaleye katkıda bulunan Zehra AĞAN'a, Editör ve hakem kuruluna teşekkürlerini sunar.

### **Kaynaklar**

- [1] Mair R.J., Wood D.M., Pressuremeter testing methods and interpretation, CIRIA, ISSN:0-408-02434-8, 1987.
- [2] Isik N.S., Doyuran V., Ulusay R., Assessment of Deformation Modulus of weak rock masses from Pressuremeter Tests and seismic surveys. Bull Eng Geol Environ 67, s 293–303, 2008.
- [3] Isik N.S., Ulusay R., Doyuran V., Deformation Modulus of heavily jointed-sheared and block greywackes by Pressuremeter Tests: Numerical, experimental and empirical assessments. Eng Geol 101, s 269–282, 2008.
- [4] Lashkaripour R.G., Ajalloeian R., Determination of silica sand stiffness, Engineering Geology 68, 2003.
- [5] Kayabasi A., Gokceoglu C., Ercanoglu M., Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study, Int J Rock Mech Min Sci 40 (1), s 55-63, 2003.
- [6] Gokceoglu C., Sonmez H., Kayabasi A., Predicting deformation moduli of rock masses, Int J Rock Mech Min Sci 41 (2), s 337-341, 2003.
- [7] Sonmez H., Gokceoglu C., Nefeslioglu H.A., Kayabasi A., Estimation of rock modulus, Int J Rock Mech Min Sci 43 (2), s 224-235, 2006.
- [8] Sharma P.K., Singh T.N., A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial strength index, Bull Eng Geol Environ 67, s 17–22, 2008.



- [9] Hobbs N.B., Dixon J.C., In situ testing for bridge foundations in the devonian marl, Proceedings of the conference on in situ investigations in soils and rocks, British Geotechnical Society, London, May 13-15, s 31–38, 1969.
- [10] Baguelin F., Jezequel J.F., Shields D.H., The Pressuremeter and foundation engineering, Trans Tech Publications, 1978.
- [11] Kulhawy F.H., Mayne P.W., Manual on estimating soil properties for foundation design, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1990.
- [12] Akca N., Correlation of SPT–CPT data from the United Arab Emirates, Eng Geol 67 (3/4), s 219–231, 2003.
- [13] Hasancebi N., Ulusay R., Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. Bull Eng Geol Environ 66, s 203–213, 2007.
- [14] Windle D., Wroth C.P., The use of a self boring pressuremeter to determine the undrained properties of clays, Ground Engineering 10 (6), s 37–46, 1997.
- [15] Arulrajah A., Nikraz H., Bo M.W., In-situ testing of Singapore marine clay at Changi, Geotech Geol Eng 23, s 111–130, 2005.
- [16] Ohya S., Imai T., Matsubara M., Relationship between N value by SPT and LLT Pressuremeter Results, Proceedings, 2. European symposium on penetration testing 1, s 125–130, 1982.
- [17] Gonin H., Vandangeon P., Lafeullade M.P., Correlation study between standard penetration and Pressuremeter Tests, Rev Fr Geotech 58, s 67–78, 1992.
- [18] Yagiz S., Akyol E., Sen G., Relationship between the Standard Penetration Test and the Pressuremeter Test on sandy silty clays: a case study from Denizli, Bull Eng Geol Environ 67, s 405–410, 2008.
- [19] Bozbey I., Togrol E., Correlation of standart penetration test and Pressuremeter data: a case study from Istanbul, Turkey, Bull Eng Geol Environ 69, s 505-515, 2010.
- [20] Kayabasi A., Prediction of pressuremeter modulus and limit pressure of clayey soils by simple and non-linear multiple regression techniques: a case study from Mersin, Turkey, Environ Earth Sci 66, s 2171-2183, 2012.
- [21] Lee M.J., Hong S.J., Choi Y.M., Lee W., Evaluation of deformation modulus of cemented sand using CPT and DMT, Eng Geol 115, s 28-35, 2010.
- [22] Akça N., Correlation of SPT-CPT data from United Arab Emirates, Eng Geol 67, s 219-231, 2003.
- [23] Cassan M., Les essays in situ en mecanique des sols, Construction, No 10, s 337–347, 1968.
- [24] Waschkowski E., Penetrometretres dynamiques, Comtes rendus des journess des laboratoires des ponts et chaussees, Saint-Brieue, 19-21 Novembre, s 1–37, 1974.

- [25] Yaman G., Prediction of geotechnical properties of cohesive soils from in-situ tests: an evaluation of a local database, Thesis, METU, Ankara, s 161, 2007.
- [26] Chiang Y.C., Ho Y.M., Pressuremeter method for foundation design in Hong Kong, Proceedings of sixth Southeast Asian conference on soil engineering 1, s 31–42, 1980.
- [27] Apte M.G., Price P.N., Nero A.V., Revzan K., Predicting New Hampshire indoor radon concentrations from geologic information and other covariates, *Env Geol* 37, s 181–194, 1999.
- [28] Uddameri V., Using statistical and artificial neural network models to forecast potentiometric levels at a deep well in South Texas, *Environ Geol* 51, s 885–895, 2007.
- [29] Benavente D., Cueto N., Martinez–Martinez J., Garcia Del Cura M.A., Canaveras J.C., The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks, *Environ Geol* 52, s 197–206, 2007.
- [30] Sivrikaya O., Models of compacted fine-grained soils used as mineral liner for solid waste, *Environ Geol* 53, s 1585–1595, 2008.
- [31] Iphar M., Yavuz M., Ak H., Prediction of ground vibrations resulting from the blasting operations in an open-pit mine by adaptive neuro-fuzzy inference system, *Env Geol* 56, s 97–107, 2008.
- [32] Gunaydin O., Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks, *Environ Geol* 57, s 203–215, 2009.
- [33] Yagiz S., Gokceoglu C., Application of fuzzy inference system and nonlinear regression models for predicting rock brittleness, *Expert Syst Appl* 37, s 2265–2272, 2010.
- [34] Chen-Chang L., Cheng-Haw L., Hsin-Fu Y., Hung-I L., Modeling spatial fracture intensity as a control on flow in fractured rock, *Environ Earth Sci* 63, s 1199–1211, 2011.
- [35] Yagiz S., Gokceoglu C., Sezer E., Iplikci S., Application of two non-linear prediction tools to the estimation of tunnel boring machine performance, *Eng Appl Artif Intell* 22, s 818–824, 2009.
- [36] Alvarez Grima M., Babuska R., Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples, *Int J Rock Mech Min Sci* 36, s 339–349, 1999.
- [37] Finol J., Guo Y.K., Jing X.D., A rule based fuzzy model for the prediction of prediction of petrophysical rock parameters, *J Petr Sci Eng* 29, s 97–113, 2001.
- [38] Gokceoglu C., A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition, *Eng Geol* 66 (1–2), s 39–51, 2002.
- [39] Gokceoglu C., Zorlu K., A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock, *Eng Appl Artif Intell* 17 (1), s 61–72, 2004.

- [40] Zorlu K., Gokceoglu C., Ocakoglu F., Nefeslioglu H.A., Acikalin S., Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models, *Eng Geol* 96 (3/4), s 141–158, 2008.
- [41] Dagdelenler G., Sezer E.A., Gokceoglu C., Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters, *Expert Syst Appl* 38, s 7476–7485, 2011.
- [42] Kogler F., *Baugrundpru fung im bohrloch*, Der bauingenieur, 1933.
- [43] Menard L., *An apparatus for measuring the strength of soils in place*, Thesis, University of Illinois, 1957.
- [44] Centre D'Etudes Menard, *The Menard Pressuremeter Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design*, No.26, Sols Soils, France, 1975.
- [45] Clarke B.G., *Pressuremeters in geotechnical design*, Blackie Academic and Professional, Chapman & Hall, London, 1995.
- [46] Coduto, D.P., *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*, California State Polytechnic University, Publisher: Prentice Hall, 1999.
- [47] ASTM D4719, *Standard test method for pre-bored Pressuremeter Testing in soils* ASTM International, West Conshohocken, 2000.
- [48] Lee K.M., Rowe R.K., Deformation caused by surface loading and tunnelling: the role of elastic anisotropy, *Geotechnique* 39 (1), s 125–140, 1989.
- [49] Schields D.H., Bauer G.E, Determination of Modulus of Deformation of sensitive clay using laboratory and in situ tests, *Proceedings of ASCE special conference, In situ measurement of soil properties 1*, Raleigh, s 395–421, 1975.
- [50] Bowles J.E., *Foundation analysis and design*, 5th edn, McGraw-Hill, USA, 1997.
- [51] Thorburn S., *Field testing: the standard penetration test*, Hawkins AB (ed) *Site investigation practice: Assessing BS (British Standard) 5930*, British Standards Institution, HMSO, London, s 31–32, 1986.
- [52] Skempton A.W., *Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation*, *Geotechnique* 36 (3), s 425-447, 1986.
- [53] British Standards Institution, *BS EN ISO 22476-3: Geotechnical investigation and testing - Field testing – B.S.I.*, London, (Part 3: Standard penetration test), 2007.
- [54] ASTM D1586, *Standard test method for penetration test and split- barrel sampling of soils*, ASTM International, West Conshohocken, 1999.
- [55] Aggour M.S., Radding W.R., *Standard Penetration Test (SPT) correction*, Research report submitted to Maryland Department Of Transportation, Report No. SP007B48, State Highway Administration, 2001.

- [56] Sengun M., Keskin H., Akcoren F., Altun I., Sevin M., Akat U., Armagan F., Acar S., Geology of the Kastamonu region and geological constraints for the evolution of the Paleotethyan domain, Geological Bulletin of Turkey 13, s 1-16, 1990.
- [57] Birand A., Shallow foundations, Teknik Yayınevi (in Turkish), 2006.
- [58] Sivrikaya O., Togrol E., Determination of undrained strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey, Eng Geol 82, s 52–69, 2006.
- [59] ISRM (International Society for Rock Mechanics), “The complete ISRM suggested methods rock characterization, testing and monitoring:1974-2006”, Editors: R. Ulusay, J.A. Hudson, ISBN: 978-975-93675-4-1, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, s 613, 2007.
- [60] Phoon K.K., Kulhawy F.H., Evaluation of geotechnical variability, Can Geotech J 36, s 625–639, 1999.