

## Zeolit-Bentonit Karışımlarının Farklı Sıcaklıklar Altında Sıkışma İndisinin Hesaplanmasında Ampirik ve Deneysel Yöntemlerin Karşılaştırılması

Esra GÜNERİ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

\*<sup>1</sup> esra.guneri@idu.edu.tr

(Geliş/Received: 01/03/2024;

Kabul/Accepted: 10/09/2024)

**Öz:** Zeminlerin mühendislik özellikleri yapıların tasarım ve uygulama aşamasında oldukça büyük önem arz etmektedir. Eksik ya da hatalı belirlenen parametreler istenmeyen birçok olumsuz sonuca neden olabilmektedir. En önemli mühendislik parametrelerinden biri olan sıkışma indisinin tayini, üzerindeki yapının hasar almaması, sürekliliği ve yeni bir iyileştirmeye ihtiyaç duyulmaması için en doğru şekilde belirlenmelidir. Sıkışma parametrelerinin belirlenmesinde, konsolidasyon deneyleri kullanılabilirliği gibi literatürde ortaya konan ampirik ilişkilerden de yararlanılabilmektedir. Bu çalışmada zeolit-bentonit ve yosun katkılı karışımların konsolidasyon deneylerinden sıkışma indisi ( $C_c$ ) oda sıcaklığı ve 40°C’de belirlenmiştir. Karışımların ısı değişimlerine karşı mühendislik özelliklerini koruyabilmesi amaçlandığı için deneyler iki farklı sıcaklık koşulunda gerçekleştirilmiştir. Killi zeminler için önerilen iki farklı ampirik ilişkiden yararlanılarak, aynı karışımlar için hesaplamalar yapılmış ve deneysel yöntem sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuçların ampirik ilişkilerle belirlenen farklılık miktarları yüzdesel olarak belirlenerek, formülasyonların doğruluk dereceleri değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Ampirik, bentonit, deneysel, sıkışma, zeolit.

### Comparison of Empirical and Experimental Methods in Calculating the Compression Index of Zeolite-Bentonite Mixtures

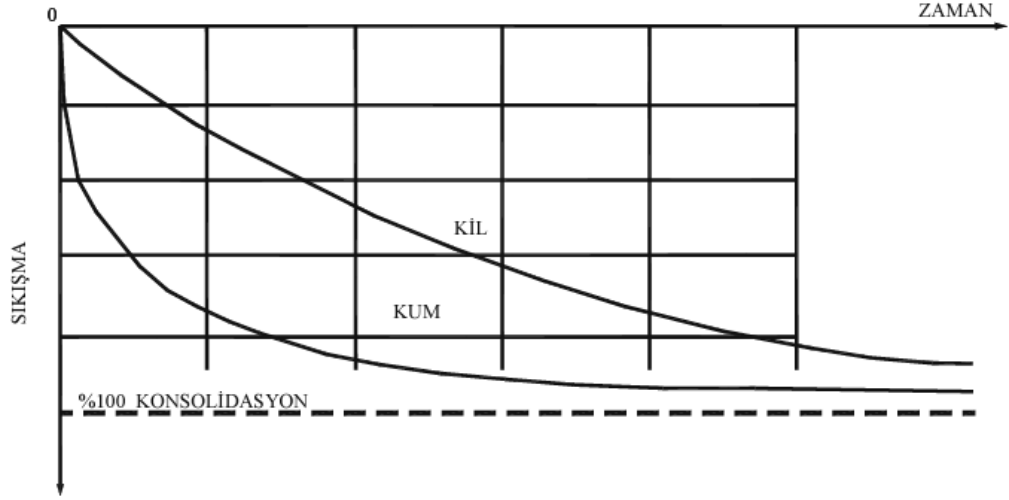
**Abstract:** Engineering properties of soils are of great importance in the design and application phase of structures. Incomplete or incorrectly determined parameters can cause many undesirable negative consequences. The correct determination of the compression index, one of the most important engineering parameters, must be determined in the most accurate way to prevent damage to the structure on it, its continuity and the need for a new improvement. Compression parameters can be determined through consolidation experiments, and empirical relationships revealed in the literature can also be used. In this study, the compression index ( $C_c$ ) was determined from the consolidation tests of zeolite-bentonite and seaweed-added mixtures at room temperature and under 40°C. Since it was aimed that the mixtures could preserve their engineering properties against thermal changes, the tests were carried out under two different temperature conditions. Using different empirical relationships suggested for clayey soils, calculations were made for the same mixtures and compared with the experimental method results. The degree of accuracy of the formulations was evaluated by determining the percentage differences of the results from those determined by empirical relations.

**Key words:** Empirical, bentonite, experimental, compression, zeolite.

#### 1. Giriş

Mühendislik parametrelerinin dizayn aşamasında doğru öngörülmesi ve hesap aşamasında doğru belirlenmesi birçok açıdan önem arz etmektedir. Hidrolik iletkenlik, sıkışma ve kayma dayanımı davranışı ve daha birçok konu inşaat mühendisliği alanında geoteknik açıdan önem taşımaktadır. Zeminlerin sıkışma miktarının belirlenmesi ani ve konsolidasyon oturumlarının toplamına bağlıdır. Ani oturmalar bir anda gerçekleşirken, konsolidasyon oturması iki aşamalı olup birincil ve ikincil olmak üzere ayrılmaktadır ve zamana bağlıdır [1]. Zeminlerin ince ya da iri daneli olmasına bağlı olarak beklenen ve hesaplanan oturma davranışı farklılaşmaktadır. Kumlu zeminlerde ani yani elastik oturma hesaba katılırken (elastik davranış hâkim olmamakla birlikte), killi zeminlerde ise zaman faktörü devreye girerek yüklemenin etkisi ile zeminde oluşan aşırı boşluksuyu basınçlarının sönmülmesi beklenmektedir [1]. Aşırı boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi önemli bir mekanizmadır ve eğer sönmülmezse yapının hasar almasına kısmi ya da genel göçmeye neden olabilmektedir. Aynı zamanda aşırı boşluk suyu basınçları formüsel ve mekanizma olarak da efektif gerilmeyi azaltıcı bir parametredir [2]. Zeminlerin sıkışma hızları ve zemin danelerinin yer değiştirerek yeni konumlarına geçmeleri danelerin rijitliği ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 1) [1].

\* Sorumlu yazar: [esra.guneri@idu.edu.tr](mailto:esra.guneri@idu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1840-2118



Şekil 1. Killi ve kumlu zeminler için konsolidasyon-zaman ilişkisi grafiği [3].

Zeminlerin sıkışma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla konsolidasyon deneyinden yararlanılmaktadır. Bu deney kapsamında konsolidasyon hücresi boyutları doğrultusunda zemin numuneleri hazırlanarak numuneler farklı gerilmeler altında sıkışmaya maruz bırakılmaktadır ve sıkışmanın tamamlanmasının ardından üzerindeki gerilme değeri kademeli olarak azaltılarak numunenin şişme davranışı da incelenmektedir. Konsolidasyon deneyinden sıkışma indisi, hacimsel sıkışma katsayısı, konsolidasyon katsayısı gibi parametreler elde edilmektedir. Konsolidasyonda gerçekleşen mekanizma fazla suyun zeminin bünyesindeki boşluklardan dışarı atılması yani drene olması durumunu temsil etmektedir [4]. Literatürde var olan çalışmalar sıcaklık artışı, azalışı ya da döngü barındıran durumlarda zeminlerin sıkışma davranışının değiştiğini göstermiştir. Yüksek sıcaklık altında birincil konsolidasyon fazla suyun boşluklardan dışarı atılmasını ifade ederken, ikincil konsolidasyon danelerin yeniden bir dizilime geçmesi “rearrangement” davranışını temsil etmektedir [4]. Araştırmalar sıcaklık arttıkça genellikle sıkışma miktarının arttığını ortaya koymaktadır. Sıcaklıkla birlikte moleküllerin enerjisinin arttığı, danelerin bu enerjiye bağlı olarak hareketinin arttığı ve zemin daneleri arasındaki bağların zayıfladığı bilinmektedir [5]. Kopan bağlarla birlikte sıkışma miktarı da artış göstermektedir.

Sıkışma parametrelerini belirlemek amacıyla birçok ampirik ilişki ve formüller bulunmaktadır. Zeminin sahip olduğu boşluk oranı, özgül ağırlık, likit limit, plastik limit, iri ya da ince daneli olma özellikleri gibi parametreler yardımıyla konsolidasyon deneyi olmadan sıkışma bilgisine ulaşılabilmektedir. Bu ilişkiler birçok deney, araştırma ve doğrulama sonucunda kurulmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde likit ve plastik limit, 200 ve 4 No.lu eleklerden geçen yüzdelere, doğal su içeriği, kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranı gibi parametreler kullanılarak killi zeminlerin sıkışma indisinin istatistiksel yöntemlerle belirlendiği görülmüştür [6]. Kahraman tarafından yapılan çalışmada ise 560 adet konsolidasyon deney verisi kullanılarak, zemin indeks özelliklerini içeren istatistiksel ilişkiler ortaya konmuştur [7].

Artan dünya nüfusu ve enerji ihtiyacı sıcaklık parametresini incelenecek parametreler arasında en tepeye taşımıştır. Zeminlerin sıcaklık varlığındaki davranışı, dizayn aşamasında belirlenen parametrelerin değişmesine neden olarak, farklılık göstermekte ve önem arz etmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte zeminlerin hacimsel deformasyon, kayma mukavemeti, hidrolik iletkenlik gibi mühendislik özelliklerinde değişiklikler olduğu literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir. Yüksek sıcaklıkların kil üzerindeki hacimsel deformasyon davranışının gerilme geçmişi, mineraloji ve su içeriği gibi birçok farklı faktöre bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir [8]. Literatürdeki çalışmalar oda sıcaklığından 40°C’ye geçildiğinde sıkışma miktarının arttığını göstermektedir. Bu davranış yüksek sıcaklıklarda numunenin yapısının bozulması ve konsolidasyon hızının artmasıyla ilişkilidir [9]. Aynı zamanda artan sıcaklıkla birlikte zemin danelerinin enerjisi ve daneler arasındaki bağların zayıflaması sonucu sıkışma miktarı artmaktadır [4, 5]. Yapılan araştırmalar zeminlerin mühendislik parametrelerinin sıcaklık artışı ve sıcaklık döngüsünden etkilendiğini ortaya koymuştur [10]. Bu sebeple zeminlere ilave edilecek katkı malzemelerinin önemi giderek artmıştır. Isısal değişimlere mukavemeti yüksek, sürdürülebilir ve çevre dostu katkı malzemesi belirlemek oldukça güçtür. Çeşitli cürufur, kimyasallar katkı malzemesi olarak halihazırda kullanılmaktadır. Isısal değişimlere karşı Danimarka gibi soğuk ülkelerde çatı kaplamada kullanılan, denizlerde yetişen, çevreye dost ve bir su bitkisi olan deniz yosunu terminolojik adıyla “Zostera marina” bu çalışma kapsamında katkı malzemesi olarak belirlenmiştir [11].

Katkısız karışım, bentonitin yüksek sıkışma-büzülme potansiyeli ve düşük kayma mukavemeti gibi özelliklerinin nispeten daha iyi mukavemete sahip zeolit ile belli oranda birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Zemin iyileştirmede kullanılacak katkı malzemelerinin çevre dostu, sürdürülebilir olması ve değerlendirilebilen atık malzeme olması önemlidir. Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla bilimsel adı *Zostera marina* olan deniz yosunu kullanılmıştır. *Zostera marina* termal değişimlere karşı dayanıklıdır, soğuk ülkelerde özellikle bina izolasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır ve ülkemizde de izolasyon, dolgu malzemesi, ilaç endüstrisi, ilaç ve oyuncak yapımı gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında, deniz yosununun iyileştirici etkisine yüksek sıcaklıklar altında ulaşılması hedeflenmiştir.

Bilindiği üzere, enerji geo-yapıları etrafında kullanılacak tampon malzemelerin bu alanlarda oluşacak yüksek sıcaklığı ortamdaki uzaklaştırılabilmesi için termal açıdan bazı özelliklere (termal iletkenlik, özgül ısı, sıkışma indisi, hidrolik iletkenlik, kendiliğinden sızdırmazlık vs.) sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple bu çalışmada deneyler önce oda sıcaklığı daha sonra 40°C’de gerçekleştirilmiştir. Katı atık depolama alanları, gömülü güç kabloları gibi enerji yapı ve tesisleri etrafında yaklaşık olarak bu sıcaklık değerlerinin oluştuğu bilindiğinden, oluşturulan deniz yosunu katkılı karışımların bu sıcaklıklar değerlerinde performe edilmesi öngörülmüştür [8].

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarına kurutulmuş deniz yosunu katkısı ilave edilerek, oda sıcaklığı ve 40°C’de konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin tamamlanması ile konsolidasyon parametreleri belirlenmiştir. Karışımlara ait temel mühendislik parametrelerinden “LL” kullanılarak ampirik bağıntularla sıkışma indisi belirlenmiştir. Sıkışma indisi  $C_c$ ’nin deneylerden ve ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan zeolit, bentonit ve deniz yosunu yerel firmalardan tedarik edilmiştir. Zeolit ve bentonit numunelerine ait özgül ağırlık değerleri sırası ile 2,40 ve 2,70 olarak belirlenmiştir. Zeolit numunesinin oda sıcaklığı altında likit limit değeri %50 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan bentonite ait oda sıcaklığı altında likit ve plastik limit değerleri ise sırası ile %476 ve %70 olarak bulunmuştur. Deniz yosunu, kurutulmuş halde temin edilmiştir. Katkısız karışımdaki zeolit oranı %60 seçilirken, bentonit oranı %40 olacak şekilde kullanılmıştır. Karışımlardaki yosun katkısı oranı ise %10 ve %20 olarak tercih edilmiştir. Islak haldeki karışıma ait görsel Şekil 2’de verilmiştir.

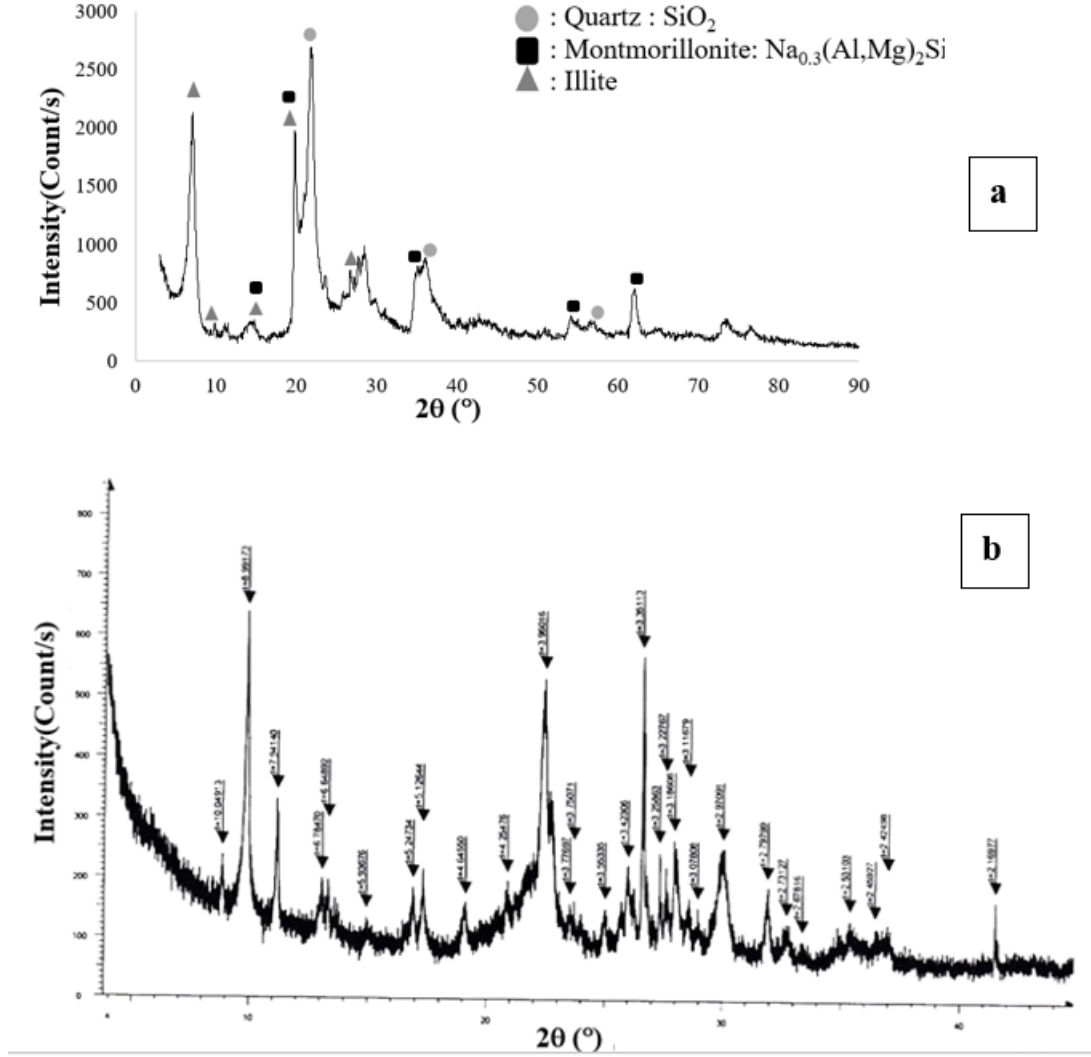
**Tablo 1.** Malzemelere ait fiziko-kimyasal özellikler.

Özellik	Zeolit	Bentonit
Özgül ağırlık	2,40	2,70
Likit limit (%)	50,0	476,0
Plastik limit (%)	N.P.	70,1
pH	7,6	9,5



**Şekil 2.** Kurutulmuş yosun katkılı ıslak zeolit-bentonit karışımı.

Tablo 1’de zeolit ve bentonite ait özellikler verilmiştir. Deneylerde kullanılan bentonit Na-bentonittir. Deniz yosunu habitatu su olan, su altı yaprak uzunluğu en fazla 1100 mm olan ve su altı yaprak genişliği 2-12 mm arasında değişen bir bitkidir [11].



Şekil 3. a) Bentonit ve b) zeolit numunesine ait XRD analiz sonucu.

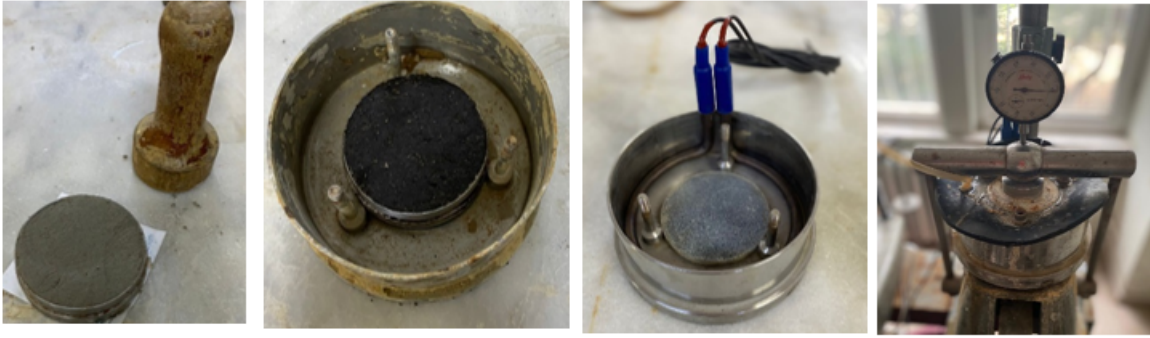
X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, Thermo Scientific ARL X’TRA ekipmanı ile 0,1° 2θ/s tarama hızı ve 60 kV, 5-60 mA radyasyonla 0° ila 89° odaklama geometrisinde gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda kullanılan harflendirmelerde “B” bentoniti, “Z” zeoliti ve “Y” kurutulmuş deniz yosununu temsil etmektedir. XRD analizi sonucunda bentonit numunesinin ise illit, montmorillonit ve kuvars minerallerini içerdiği görülmüştür (Şekil 3a). Zeolitin içerisinde ise klinoptilolit, kuvars, feldspat ve illit-mikanın bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 3b).

## 2.2. Yöntemler

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (40°C) altında konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneye tabi tutulacak numunelerin önce kompaksiyon deneyleri [12] gerçekleştirilerek  $w_{opt}$  ve  $V_{d,max}$  parametreleri elde edilmiştir. Böylece zeminin sıkıştırılması sağlanarak zemin boşluklarındaki havanın dışarı atılması, zeminin kayma mukavemetinin artırılması, permeabilitesinin azaltılması ve sıkışabilirliğinin azaltılması gibi etkiler sağlanmış olmaktadır. Belirlenen parametrelere göre numuneler

hazırlanarak önce oda sıcaklığı, daha sonra 40°C sıcaklık altında deneyler yürütülmüştür. Deneylerde karışımlar oluşturulurken malzemeler kuru halde tartılmış olup, ilk olarak toplam kuru ağırlığın %10 ve %20'si katkı malzemesi olacak şekilde eklenmiştir. Kalan ağırlığın %40' ı bentonit numunesi ve geriye kalan miktar ise zeolit olarak belirlenmiştir. Karışımlar optimum su içeriği değerine göre püskürtme metodu ile ıslatılarak, önce kuru halde olmak koşulu ile karıştırılarak oluşturulmuştur.

Oda sıcaklığı altında (22~24°C) gerçekleştirilen konsolidasyon deneyleri ASTM D2435'e göre yapılmıştır [13]. Yüksek sıcaklık olarak tanımlanan "40°C" sıcaklık altındaki deneylerde ise numunelerin ısıtılması amacı ile hücre içerisine yerleştirilen ısı halkasından yararlanılmıştır. Isıtmanın sağlanmasının ardından sıcaklığın 40°C'ye sabitlenmesi için termostat kullanılmıştır. Deneyler sıcaklık varlığında başlatılıp, aynı sıcaklıkta sonlandırılmıştır. Her iki sıcaklık koşulu altında da yüklemeler gerçekleştirilip, deformasyonlar tamamlandıktan sonra boşaltma aşamasına geçilerek karışımların şişme değerleri de elde edilmiştir. Şekil 4'te sıkıştırma işlemi sonrasında konsolidasyon hücresine yerleştirilmiş yosun katkılı karışıma ait görsel verilmiştir. Deneylerin son bulmasının ardından numuneler etüve bırakılarak, sonuçlar sıkışma parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlamıştır.



Şekil 4. Sıkıştırılmış karışımlar ve 40°C'de kullanılan konsolidasyon deney ekipmanları.

Çalışmanın ampirik bağıntılardan yararlanılan bölümünde Tablo 2'de verilen formülasyonlardan yararlanılmıştır. Killi zeminler için önerilen ve bünyesinde likit limit parametresi barındıran bu formülasyonlar her bir karışım için oda sıcaklığı ve 40°C sıcaklık altında sıkışma indisinin ( $C_c$ ) belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır. Formüllerde kullanılan likit limit değerleri karışımların oda sıcaklığı ve 40°C'deki değerleridir. Numuneler etüve 40°C'de 24 saat süre boyunca tutulduktan sonra likit limit deneyleri tekrarlanarak yeni sonuçlara ulaşılmıştır. Likit limit deneyleri gerçekleştirilirken, numunelerde oluşabilecek nem kaybının en aza indirilmesi açısından ortam sıcaklığının 22° ile 24°C arasında olmasına özen gösterilmiştir. Terzaghi-Peck (1967), sıkışma indisinin belirlenmesi amacı ile örselenmiş killer için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir [14]. Örselenmemiş numuneler için ise 0,007 katsayısının yerine 0,009 kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. EM1110-1-1904 [15] ise kullanılan bir diğer ampirik formüldür.

Tablo 2. Sıkışma indislerinin ( $C_c$ ) belirlenmesinde kullanılan ampirik bağıntılar.

Referans	Sıkışma İndisi
Terzaghi-Peck (1967) [14]	$C_c = 0,007 \times (LL - 10)$
EM1110-1-1904 [15]	$C_c = 0,01 \times (LL - 13)$

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Kompaksiyon deney sonuçları göstermiştir ki; katkısız karışımın  $w_{opt}$  değeri %53 iken, bu değerler %10 ve %20 deniz yosunu katkısı ile sırasıyla %55 ve %60 değerine yükselmiştir. Katkısız zeolit-bentonit karışımında maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri 9,9 kN/m<sup>3</sup> iken %10 ve %20 deniz yosunu katkısı ile bu değerler sırasıyla 9,6 ve 9,4 kN/m<sup>3</sup>'e düşmüştür.

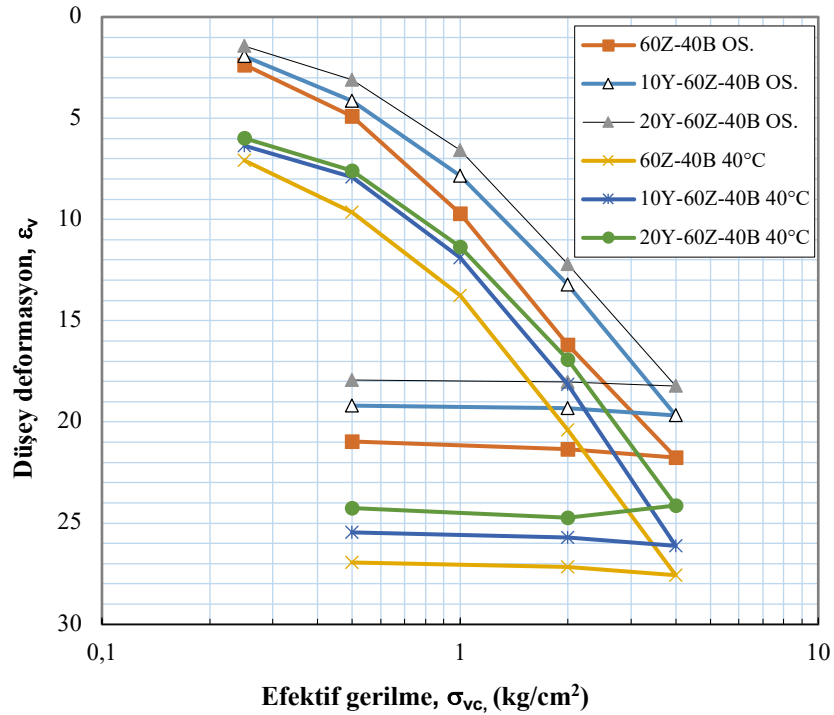
Bu çalışmada, katkısız ve kurutulmuş deniz yosunu katkılı zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve 40°C'de likit limit ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sıkışma indisi  $C_c$ , likit limit parametresini içeren ampirik bağıntılar kullanılarak ayrıca belirlenmiştir. Ampirik formüller kullanılırken,

likit limit değerlerinin doğru temsili açısından her sıcaklık koşulu için istenilen veriler o koşullar altında elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konmuştur.

Likit ve plastik limitler zeminlerin mühendislik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmayı ve zeminin farklı evreleri arasında geçişi sağlayan parametrelerdir [16]. Farklı sıcaklık değerlerinde (15~35°C ve 6~35°C) yapılan deneylerde plastik limit ( $w_p$ ) değerinin düştüğü gözlenirken [17, 18], 2~41°C arasında yapılan başka bir çalışmada da düzensiz bir trend olduğu gözlenmiştir [19]. Bu bulguların aksine kaolin örneğinin  $w_L$  değerinin yüksek sıcaklıklarda arttığı gösterilmiştir [20].

**Tablo 3.** Oda sıcaklığı ve 40°C’de belirlenen likit limit değerleri.

	Oda Sic.	40°C
Karışım	LL (%)	LL (%)
60Z-40B	180	215
60Z-40B-10Y	194	253
60Z-40B-20Y	200	266



**Şekil 5.** Karışımlara ait oda sıcaklığı (OS) ve 40°C’de sıkışma eğrileri.

Bu çalışmada zeolit-bentonit karışımlarının katkılı ve katkısız halde yapılan likit limit belirleme çalışmaları sonucunda sıcaklık artışı ile likit limit değerlerinin, zeminlerin yapısının birbirinden farklı olması ve killi zeminlerin su tutma kapasitesinin daha yüksek olması, spesifik yüzey alanının sıcaklık değişimleriyle değişmesi gibi etkenlerle değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tablo 3’de verilen farklı sıcaklık koşullarına maruz bırakılan numunelerin likit limit değerlerinin sıcaklıkla beraber arttığı görülmüştür. Daha büyük yüzey alanına sahip bir kil mineralinin, daha küçük bir yüzeye göre daha fazla su tutması mümkündür ve bu sebeple sıcaklık artışından da yüzey daha fazla etkilenecektir [21]. Ayrıca ortaya çıkan farklılıkta zemin mineralojisinin etkisi de

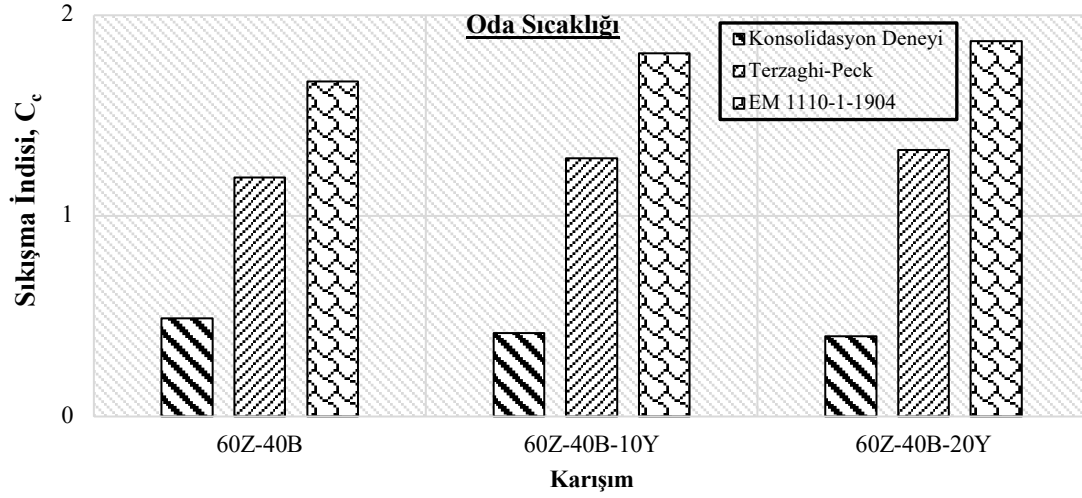
göz ardı edilemez. Bentonit gibi yüksek dereceli tiksotropik bir kil, daha yüksek bir sıcaklıkta pıhtılaşabilir ve dolayısıyla artan bir likit limit değeri gösterebilir. Spesifik yüzey alanı (SSA) ve zemin mineralojisi gibi farklı faktörler, sıcaklık varlığında kıvam limitlerini değiştirir, viskoziteyi ve hidrolik iletkenliği de etkiler [17].

Şekil 5'te deniz yosunu katkılı zeolit-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı ve 40°C'de sıkışma eğrileri verilmiştir. Deniz yosunu katkısının, her iki sıcaklık koşulu altında da katkısız karışımın sıkışma miktarını azaltıcı etkide bulunduğu görülmektedir. 40°C'deki numunelerin, oda sıcaklığındaki numunelerle kıyaslandığında, sıkışma miktarının daha fazla olması artan sıcaklıkla birlikte sıkışma miktarının artmasından kaynaklanmaktadır ve literatürle paralellik göstermektedir [8].

**Tablo 4.** Ampirik ilişkiler ve deneysel yöntemlerle hesaplanan sıkışma indisleri ( $C_c$ ).

Karışım	Sıkışma İndisi, $C_c$ (Oda Sıc.)			Sıkışma İndisi, $C_c$ (40°C)		
	Deneysel	Terzaghi-Peck [10]	EM 1110-1-1904 [11]	Deneysel	Terzaghi-Peck [10]	EM 1110-1-1904 [11]
60Z-40B	0,48	1,19	1,67	0,65	1,43	2,02
60Z-40B-10Y	0,41	1,28	1,81	0,62	1,70	2,40
60Z-40B-20Y	0,40	1,33	1,87	0,61	1,79	2,53

Terzaghi-Peck (1967) [14] ve EM1110-1-1904 [15] tarafından önerilen ampirik sıkışma formülleri sonucunda 60Z-40B karışımı için oda sıcaklığı altında konsolidasyon deneyinden elde edilen sonuçlara kıyasla, sırasıyla yaklaşık 2,4 ve 3,4 kat daha yüksek sıkışma miktarı elde edilmiştir. %10 ve %20 kurutulmuş deniz yosunu katkısı ile bu oranların yaklaşık 3~4 kat arttığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık (40°C) altında ise 60Z-40B karışımı için oturma miktarı deneysel verilere kıyasla 2~3 kat artış göstermiştir. Yüzdesele ifade etmek gerekirse 60Z-40B karışımının deneysel yöntemle 0,488 olarak belirlenen  $C_c$  değeri %40 sapma göstererek 1,19 değerine ulaşmıştır (Şekil 6). Konsolidasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar yosun katkısının sıkışmayı azaltıcı etkiye sahip olduğunu ortaya koyarken, ampirik ilişkiler içerisinde likit limit (LL) parametresi barındırdığından ve sıcaklık artışı gerçekleştiğinde numunelerin likit limit değerlerinde artış gerçekleştiğinden dolayı katkılı karışımların sıkışmayı arttırıcı bir etkide bulunduğunu göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan ampirik formüller örselenmiş killi zeminler için önerilmiş olup, deneylerde kullanılan numunelerin kil içeriğinin (%40 bentonit) yüksek olmasına rağmen, farklı zemin tipi ve katkı malzemesi de içermesinden dolayı elde edilecek sonuçların farklılaşmasına etken olmuştur. Ampirik formüllerin birçok deneme ve tecrübe sonucunda elde edildiği bilinirken, konsolidasyon deneyini gerçekleştirmenin bir ölçme olduğu ve numune bazında sonuç belirlenmenin daima mühendislik açısından daha elzem olduğu görülmektedir. Görülmektedir ki; bu çalışma kapsamında kullanılan ampirik bağıntılar, yüksek hata payı ile sadece oda sıcaklığını temsil edebilmektedir.



Şekil 6. Oda sıcaklığı altında  $C_c$ 'nin değişimi.

Deniz yosununun sürdürülebilir, çevre dostu ve hali hazırda doğada yetişen bir su bitkisi olması sebebi ile temini kolay ve maliyeti düşük olmaktadır. Katkı oranlarının gelecekteki çalışmalarda artırılması ile birlikte, ekonomik açıdan daha da uygun bir hal alabilecektir. Deniz yosununa göre nispeten daha maliyetli ancak karışım bazında kullanılması uygun olan ve bu çalışmada kullanılan zeolit ve bentonitin de katkı ile birlikte kullanımı ekonomik açıdan çalışmayı destekleyici niteliktedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneylerde, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarından yararlanılmıştır. Yazar, bu destek için minnettardır. Bu çalışmada E.G., fikir sahibi olup deneyleri gerçekleştirmiş, sonuçları yorumlamış ve makaleyi yazmıştır.

#### Kaynaklar

- [1] Yüksel B. Konsolidasyon Süresince Kil Yapısındaki Değişimin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [2] Çinicioğlu SF. Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı. İMO İstanbul 19.02.2005.
- [3] Cernica JN. Geotechnical Engineering. Soil Mechanics, 1995. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [4] Jarad N. Temperature impact on the consolidation and creep behaviour of compacted clayey soils. Mechanics of materials [physics.class-ph]. Université de Lorraine. 2016. English. NNT :2016LORR0251.
- [5] Gupta B. Creep of saturated soil at different temperatures. Master Thesis, The University of British Columbia, Canada. 1964.
- [6] Orhan M, Işık NS, Özer M, Toprak B. Killi Zeminlerin Sıkışma İndisinin İstatistiksel Yöntemlerle ve Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmin Edilmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 2236-2241, 13-15 Mayıs 2009.
- [7] Kahraman E. Konsolidasyon Özelliklerinin Arttırılmış Veri Seti İle İstatistiksel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [8] Cekerevac C and Laloui L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. Int J Numer Anal Meth Geomech, 28: 209-228, 2004.
- [9] Towhata I, Kuntiwattanaku P, Seko I and Ohishi K. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. Soils Found, 1993.
- [10] Laloui L. Thermo-mechanical behavior of soils. Revue Française de Genie Civil.,5(6), 809-843, 2001.
- [11] Delaney A, Frangoudes K and Ii SA. Society and Seaweed Understanding the Past and Present. 2016.
- [12] ASTM: D698-12. 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>)). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1-13, 2012.
- [13] ASTM D2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [14] Terzaghi K and Peck RB. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley, New York, 1967.
- [15] Department Of the Army. EM 1110-1-1904. U.S. Army Corps of Engineers. CEMP-ES. Washington, DC 20314-1000. Engineer Manual. No. 1110-1-1904.



- [16] Atterberg A. Die Plastizität der Tone, Internationale Mitteilungen für Bodenkunde 1911, 1, 10–43.
- [17] Youssef MS, Sabry A, Ramli AH. EI. Temperature changes and their effects on some physical properties of soils. in: Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 1, pp. 419-421, 1961.
- [18] Ctori P. The effects of temperature on the physical properties of cohesive soils. Ground Engineering, 22 (5), 26-27. 1989.
- [19] Laguros JG. Effect of temperature on some engineering properties of clay soils Highway Res. Board Spec. Rep., 103 pp.186-193. 1969.
- [20] Tippet T. An investigation into the effect of temperature upon the Atterberg Limits and mechanical properties of cohesive soils. Undergraduate Project Report, Lanchester Polytechnic, Coventry.1976.
- [21] Jefferson I and Rogers CDF. Liquid limit and the temperature sensitivity of clays, Engineering Geology, Volume 49, Issue 2, 1998, Pages 95-109, ISSN 0013-7952.