

## Şıkıştırılmış Kil Zeminlerin Şişme Basıncının Belirlenmesinde Bulanık Mantık Yaklaşımı

Ömür ÇİMEN<sup>1\*</sup>, S. Nilay KESKİN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 01.07.2024, Kabul / Accepted: 06.10.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

### Anahtar Kelimeler

Kil zeminler,  
Şişme basıncı,  
Bulanık mantık

**Öz:** Bu çalışmada kil zeminlerde önemli bir mühendislik problemi olan şişme basıncının belirlenmesinde bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla kilin şişme basıncını etkileyen parametrelerden olan plastisite indisi, başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınmıştır. Öncelikle şişme basıncı ve etki eden parametreler bulanık alt kümelerle ayrılmıştır. Bulanık kural tabanı oluşturulmuş ve Fortran dilinde programlanmıştır. Daha sonra şişme potansiyeli yüksek olan üç kil numunesi üzerinde sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Şişme deneyleri için altı farklı başlangıç su muhtevası ve yedi farklı kuru birim hacim ağırlıkta numuneler kompaksiyonla hazırlanmıştır. Deneyden elde edilen şişme basıncı değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Şişme basıncının yüksek olduğu durumlarda, bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basınçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum hata yaklaşık %10 iken, çok düşük şişme basıncı değerlerinde maksimum hatanın %30'u aştığı görülmüştür. Şişme basıncı tahmininde ortalama hata miktarı ise %9.73 olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile bulanık mantık yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; sıkıştırılmış killerde şişme basıncının tahmininde bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği görülmektedir.

## Fuzzy Logic Approach in Determining Swelling Pressure of Compacted Clay Soils

### Keywords

Clay soils,  
Swelling pressure,  
Fuzzy logic

**Abstract:** In this study, the fuzzy logic method was used to determine the swelling pressure, which is an important engineering problem in clay soils. For this purpose, plasticity index, initial water content and dry unit volume weight values, which are among the parameters affecting the swelling pressure of clay, were taken into consideration. First of all, swelling pressure and affecting parameters are divided into fuzzy subsets. The fuzzy rule base was created and programmed in Fortran language. Then, constant volume swelling experiments were performed on three clay samples with high swelling potential. For swelling experiments, samples with six different initial water contents and seven different dry unit volume weights were prepared by compaction. The swelling pressure values obtained from the experiment were compared with the values obtained from the fuzzy logic model. In cases of high swelling pressure, the maximum error between the swelling pressures obtained from the fuzzy logic model and the experimental results was around 10%, while it was observed that the maximum error exceeded 30% at very low swelling pressure values. The average amount of error in inflation pressure estimation was obtained as 9.73%. When the experimental results are compared with the results obtained from the fuzzy logic method, it is seen that the fuzzy logic method can be used in estimating the swelling pressure in compacted clays.

\* Sorumlu yazar: omurcimen@sdu.edu.tr

## 1. Giriş

Killi zeminlerin su emerek hacimlerinin artması ya da hacim artışının engellenmesi durumunda, aşırı basınç göstermeleri zeminlerin şişme özelliği olarak bilinir. Şişen zeminler, karayolu, havaalanı kaplamalarında, su kanallarında, az katlı yapılarda büyük zararlar ortaya çıkarabilen bir problemdir [1-4]. Killi zeminlerin şişme mekanizmasını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler üç grupta toplanabilir: Birinci grup, zeminin kütlesi ve danelerin fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Başlangıç su muhtevası, danelerin tipi vb. özellikler bu grupta düşünülür. İkinci grup, yerleşim koşullarını veya çevresel koşulları göstermektedir. Uygulanan basınç, sınır koşulları, zemin tabakasının jeolojik tarihi vb. bu gruba girer. Üçüncü grup ise ıslanmada kullanılan suyun özellikleri ile ilgilidir. Suyun elektro kimyasal özellikleri, su-kil ilişkisi gibi özellikler bu grupta ele alınır [5-8].

Chen [9], su muhtevasındaki küçük bir değişikliğin bile (yaklaşık %1-2 oranında dahi) ciddi bir şişmeye neden olabileceğini, şişen zeminlerin başlangıç su muhtevasının şişmenin miktarını kontrol ettiğini belirtmiştir. Tabii su muhtevası %15 'in altında olan killerin, şişme açısından tehlikeli olduğunu, böyle killerin %35 oranından daha fazla suyu kolaylıkla adsorbe edebildiklerini, su muhtevası %30 'un üzerindeki killerde şişmenin daha önceden meydana geldiğinin anlaşıldığını ve daha düşük oranlarda bir şişme beklenildiğini belirtmiştir. Ayrıca, başlangıç su muhtevası ile direk ilişkili olan kilin kuru birim hacim ağırlığının şişmenin bir belirleyicisi olduğunu ve  $17.62 \text{ kN/m}^3$  'den daha yüksek kuru birim hacim ağırlıklı zeminlerin yüksek şişme potansiyeli gösterebileceklerini belirtmiştir. Geoteknik mühendisliğinde sıkıştırılmış zeminlerin kullanıldığı dolgularda, genellikle  $16.0-20.83 \text{ kN/m}^3$  aralığındaki kuru birim hacim ağırlıkların kullanıldığını ve şişmeye dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Aynı kuru birim hacim ağırlıktaki numuneler için başlangıç su muhtevasının artmasıyla, şişmenin azaldığı gösterilmiştir. Bu duruma uygunluk derecesinin artmasıyla adsorbe çekim kuvvetinin azalmasının neden olduğu belirtilmiştir. Rötne limitine ulaşana kadar, başlangıç su muhtevasının, şişme ve şişme basıncı üzerinde çok küçük etkiye sahip olduğu, rötne limitinin üzerindeki su muhtevalarında ise, şişmenin ve şişme basıncının başlangıç su muhtevasının artmasından daha çok etkilendiği belirtilmiştir. Sabit su muhtevasında, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla şişme basıncının arttığı gösterilmiştir [5, 10].

Şişme karakteristiklerini oluşturan şişme basıncı ve şişme potansiyelinin belirlenmesi için pek çok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler üç grup halinde düşünülebilir:

1. Mineralojik yöntemler: X-Ray difraksiyonu, diferansiyel termal analiz, boya adsorbsiyonu, kimyasal analiz, elektron mikroskop yöntemi.
2. Dolaylı yöntemler: Kilin kıvam limitleri özellikleri, PVC yöntemi, aktivite yöntemi, emme basıncı yöntemi, ampirik bağıntılar.
3. Doğrudan ölçüm: Bir kilin şişme yüzdesi ve şişme basıncının deneysel olarak belirlendiği en iyi yöntemdir. En yaygın olarak kullanılan doğrudan ölçüm tekniği odometre yöntemidir. Odometre deneyleri uzun zaman gerektirdiği için literatürde şişme probleminin tahmini ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, araştırmacılar odometre deney sonuçlarını kullanarak, numunelerin fiziksel ve indeks özellikleri ile korelasyonlar oluşturmaktadırlar [11-12].

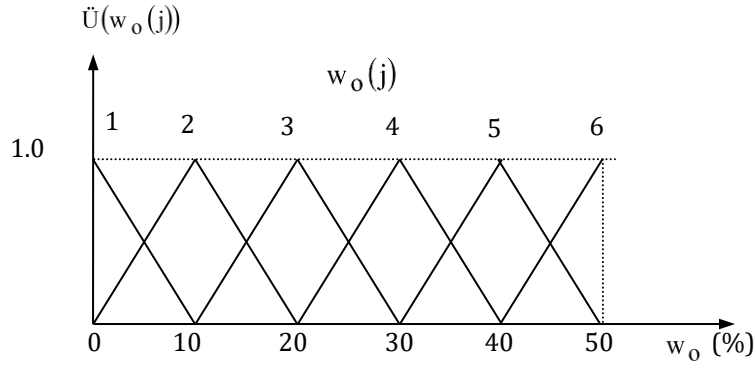
Üç fazlı bir malzeme olan zemin, homojen ve izotrop olmayan bir yapıya sahiptir. Bu özelliğinden dolayı zeminler, birçok belirsizlikler taşımaktadır. Kil zeminlerin şişme davranışı da birçok belirsizlikler içermektedir. İlk olarak, Zadeh (1965) tarafından kullanılan bulanık mantık metodu farklı disiplinlerde geniş uygulama alanlarına sahiptir [13]. Zeminle ilgili konulara da uygulanabilmektedir [14-22]. Zeminlerde şişme basıncının tahmin edilebilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yanal ve düşey şişme basınçlarının tahmini için yapay sinir ağları (ANN) ve uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır [23]. Zemin su tutma eğrileri kullanılarak şişme basıncının tahminini araştırmışlardır [24]. Sabit hacimli şişme basıncının emme deney metodları yardımıyla ampirik bir şekilde tahmin edildiği çalışmalar mevcuttur [25, 26]. Bazı fiziksel zemin özelliklerini kullanarak şişme basıncının tahmin edildiği çalışmalar yaygındır [27-28]. Şişme basıncının tahmininde kıvam limitleri ve kil miktarı girdi olarak kullanılarak bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır [29]. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında bulanık sınıflandırma aşamaları önerilmiştir [30]. Sıkıştırılmış kilin serbest şişme basıncı ve şişme yüzdesinin tahmininde ampirik yöntemlerden yararlanılmıştır [31]. Yapay sinir ağları modeli şişme basıncının tahmin edilmesinde ve şişme basıncı ile serbest basınç mukavemetinin belirlenmesinde kullanılmıştır [32-34]. Bu çalışmada ise, sabit hacimli şişme basıncının belirlenmesinde bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır. Şişme basıncının tahmin edilmesi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisi kullanılarak bulanık mantık yönteminin uygulandığı bir çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farklı yönü kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisi girdi parametrelerini kullanarak bulanık mantık yönteminin uygulanmasıdır.

## 2. Materyal ve Metot

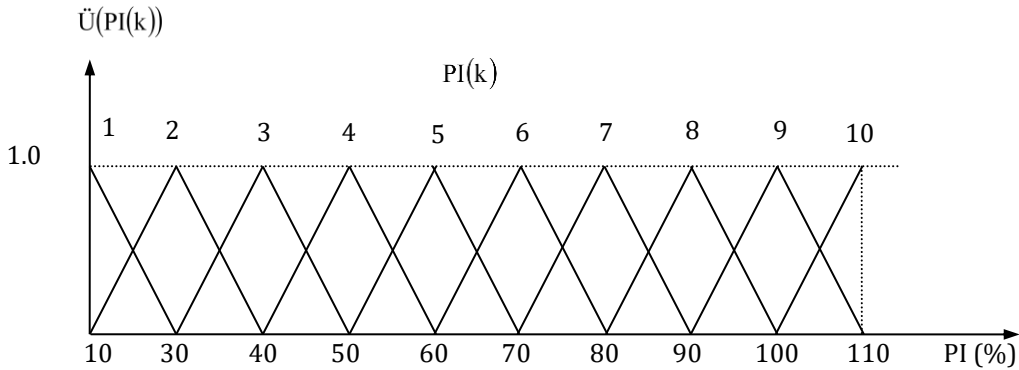
### 2.1. Bulanık model parametreleri

Zadeh 'in geliştirdiği bulanık mantık modellemesinde, belirsizliklerin ortaya koyulduktan sonra daha güvenilir olarak dikkate alınabilecekleri bu tekniğin ana fikrini oluşturmaktadır. Bulanık mantık metodu sözel verileri işlemekte etkin bir metottur [13]. Bu metotta, sözel bilgileri bilgisayarlara kurallar yardımıyla tanıtarak bulanık işlemler yapılmaktadır. Genel olarak, klasik küme şeklinde ortaya çıkan değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık kümenin, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin hepsinin 1 üyelik derecesine sahip olması yerine, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Böylece, bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul

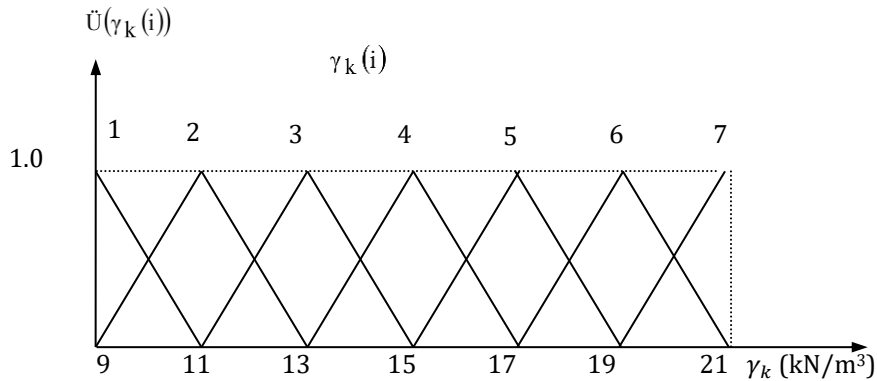
edilir. Alt kümelerin fonksiyonları da birbirinden farklı olabilmektedir. Literatürde işlem kolaylığı sebebiyle en çok üçgen alt kümeler kullanılmaktadır [35]. Bu çalışmada da üçgen alt kümeler kullanılmıştır. Şişme basıncına etki eden 3 girdi parametresi (kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi) dikkate alınmıştır. Bu girdi parametrelerinin seçilmesinde bunların şişme basıncı üzerinde çok etkili olmaları, uygulama aşamasında her zeminde belirlenen parametreler olması gibi sebepler düşünülmüştür. Kuru birim hacim ağırlık alt kümeleri Şekil 1'de, başlangıç su muhtevası alt kümeleri Şekil 2'de ve plastisite indisi alt kümeleri ise Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 1. Kuru birim hacim ağırlık alt kümeleri [20]



Şekil 2. Başlangıç su muhtevası alt kümeleri [20]



Şekil 3. Plastisite indisi alt kümeleri [20]

Kuru birim hacim ağırlık için sınır şartları 9-21 kN/m<sup>3</sup>, başlangıç su muhtevası için sınır şartları %0-

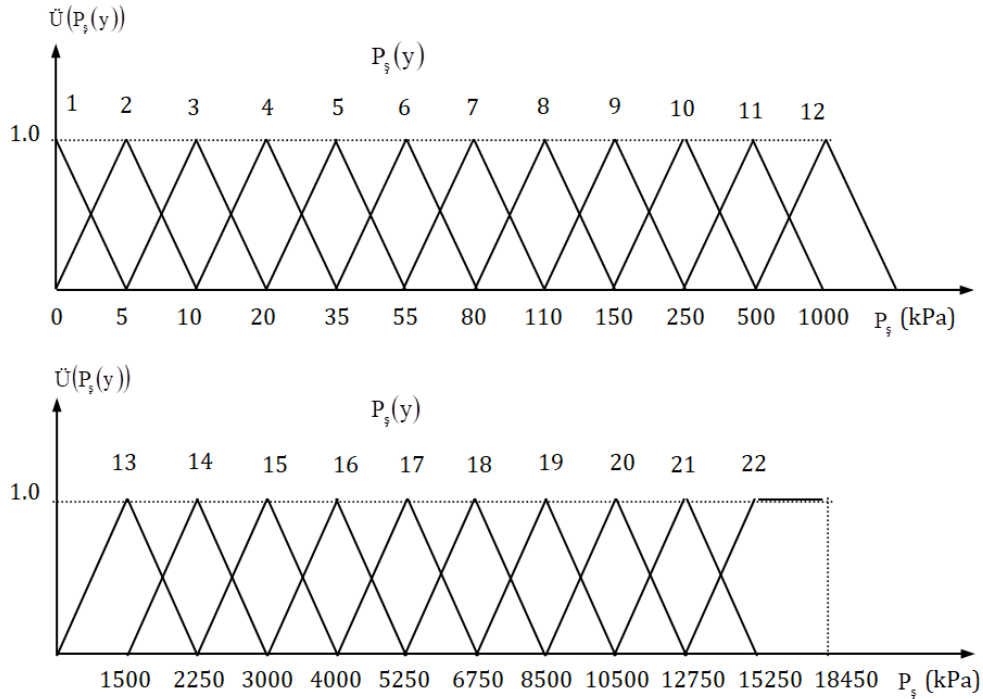
%50, plastisite indisi için sınır şartları %10-%110 olarak dikkate alınmıştır. Bu sınır şartlarına göre kuru birim hacim ağırlık 7, su muhtevası 6, plastisite indisi ise 10 alt kümeye ayrılmıştır. Alt küme sayılarının belirlenmesinde şişme konusundaki çalışmalardan yararlanılmıştır. Çıktı olarak bulunması hedeflenen şişme basıncı alt kümeleri Şekil 4 de verilmiştir. Sabit hacimli şişme basıncı için sınır şartları 0-18450 kPa olarak dikkate alınmıştır. Sabit hacimli şişme basıncı bulanık kümesi 22 alt kümeye ayrılmıştır.

Bu şekillerde  $\tilde{U}(\gamma_k(i))$ ,  $\tilde{U}(w_o(j))$ ,  $\tilde{U}(PI(k))$  ve  $\tilde{U}(P_s(y))$ , sırasıyla, kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası, plastisite indisi ve şişme basıncı bulanık kümelerinin üyelik derecelerini gösterirken,  $\gamma_k(i)$ ,  $w_o(j)$ ,  $PI(k)$  ve  $P_s(y)$  ilgili parametrelerin bulanık küme gruplarını ve i, j, k ve y değişkeni ise, ilgili bulanık kümenin ait olduğu alt kümeyi göstermektedir.

Bu üç parametrenin rastgele değerleri için şişme basıncının tahmini olarak belirlenebildiği bir bilgisayar programı yazılmıştır. Programda kullanılan 7 x 6 x 10 = 420 adet kuraldan bir tanesi aşağıda örnek olarak verilmiştir:

$$\text{EĞER } \gamma_k(i) = \gamma_k(3) \text{ ve } w_o(j) = w_o(4) \text{ ve } PI(k) = PI(5) \\ \text{İSE } P_s = EB|P_s(7), P_s(8), P_s(9)| \quad (1)$$

Denklem (1) 'de  $\gamma_k(i)$  kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesini,  $w_o(j)$  başlangıç su muhtevası bulanık alt kümesini,  $PI(k)$  plastisite indisi bulanık alt kümesini ve  $P_s(z)$  şişme basıncı bulanık alt kümesini göstermektedir. Denklem (1), kuru birim hacim ağırlık değerinin 3 no'lu kuru birim hacim ağırlık bulanık alt kümesinde, başlangıç su muhtevası değerinin 4 no'lu su muhtevası bulanık alt kümesinde ve plastisite indisinin de 5 no'lu plastisite indisi bulanık alt kümesinde olması durumunu göstermektedir. Şişme basıncı ise 7, 8 ve 9 no'lu şişme basıncı bulanık alt kümelerinden oluşmaktadır. "EĞER-İSE" kural tablosu Bulgular kısmında verilmiştir.



Şekil 4. Şişme basıncı alt kümeleri [20]

## 2.2. Deneylerde kullanılan numunelerin tanıtılması

Bu çalışmada, farklı bölgelerden temin edilen üç farklı yüksek plastisiteli örselenmiş kil numunesi kullanılmıştır. Numuneler üzerinde elek analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılarak numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zemin sınıfları tespit edilmiştir. Standart kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelerin en iyi şartlarda sıkılaşabileceği optimum su muhtevaları ve

bu su muhtevalarında elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Deneylerde ASTM Standartları uygulanmıştır [36-41]. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 1 'de verilmiştir.

Özellikleri belirlenen numuneler üzerinde ASTM D4546 [37] 'da önerilen sabit hacimli şişme deneyi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin numuneleri No.40 eleğinden elenmiştir. Elenen numuneler 24 saat etüvde bekletildikten sonra, optimum su

muhtevasının kuru ve ıslak tarafında olacak şekilde, önceden belirlenen farklı başlangıç su muhtevalarında (%15, %20, %25, %30, %35, %40) karıştırılarak hazırlanmışlardır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerin her aşamasında saf su kullanılmıştır. Farklı su muhtevalarında olacak şekilde hazırlanan numuneler, çapı 7.10-7.50 cm ve yüksekliği 1,60-2,00 cm arasında değişen ödometre ringlerine farklı kuru birim hacim ağırlıklarda (11.5

kN/m<sup>3</sup>, 13.0 kN/m<sup>3</sup>, 14.0 kN/m<sup>3</sup>, 15.0 kN/m<sup>3</sup>, 16.0 kN/m<sup>3</sup>, 17.0 kN/m<sup>3</sup>) olacak şekilde sıkıştırılmışlardır. Deneyler öncelikle, sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevaları için daha sonra, sabit bir su muhtevasında ve farklı kuru birim hacim ağırlıklar için ayrı ayrı yapılmıştır. Sıkıştırma sırasında, numunelerin su muhtevalarının değişmemesine ve homojen bir sıkışma sağlanmasına özen gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Zemin numunelerinin özellikleri [20].

Özellikler	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Likit limit (%)	75	73	66
Plastik limit (%)	21	26	28
Plastisite indisi (%)	54	47	38
Rötre limiti (%)	7	13	10
Özgül ağırlık	27.4	27.7	28.1
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	16.1	16.0	15.2
Optimum su muhtevası (%)	23	23	27
Çakıl (%)	1	1	0
Kum (%)	6	3	2
Silt + Kil (%)	93	96	98
Renk	Dark grey	Red	Red
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH

Başlangıç su muhtevası %40 olduğunda numuneleri 16.0 kN/m<sup>3</sup> kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırmak mümkün olamamıştır. Aynı şekilde 17.0 kN/m<sup>3</sup> kuru birim hacim ağırlıkta da, sadece %15 ve %20 su muhtevalarındaki numuneler sıkıştırılabilmıştır.

Hazırlanan sıkıştırılmış numunelerin altına ve üstüne poroz kağıt ve poroz taş yerleştirilerek ödometre hücresine konulmuştur. Hücreye yerleştirilen numuneye alt poroz taş seviyesine kadar saf su ilave edilerek, numunenin kapiler yolla su alması sağlanmıştır. Şişme deneylerinde, numune su alırken ödometre hücresi üzerindeki deformasyon saatinin sıfırda kalmasını sağlayacak şekilde sürekli yükleme yapılmıştır. Şişme olmayacak şekilde numuneye uygulanan basınç sürekli arttırılmış ve düşey deformasyon saatinin ibresi sıfırda sabit tutulmuştur. Şişmenin engellendiği nihai basınç, şişme basıncı olarak alınmıştır. Deney sonuçları Bulgular kısmında verilmiştir.

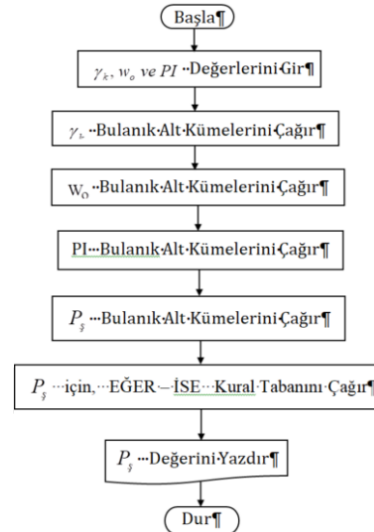
### 3. Bulgular

Kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve plastisite indisinin girdi, sabit hacimli şişme basıncının ise çıktı olarak bulunacağı bulanık mantık modellemesinden oluşturulan EĞER-İSE kuralları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'de killerin kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisi değerleri için hazırlanmış, toplam 7x6x10=420 adet kural mevcuttur. Bu kurallar ve bulanık mantık hesaplama kuralları, Fortran programlama dilinde yazılarak, sıkıştırılmış bir kil numunesinin sahip olduğu kuru birim hacim ağırlığı, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine göre şişme basıncının tahmini

mümkün olmaktadır. Hazırlanan programın akış şeması ise Şekil 5 'de görülmektedir.

Bulanık mantık kuralları uygulanarak belirlenen çıktının durulaştırılması gerekmektedir. Durulaştırma işlemi, bulanıklaştırma işleminin tersidir. Yani, bulanık ifadelerden kesin ifadelere geçiş yapılmaktadır. Bulanık çıkarımdan tek sayılı bir tasarım büyüklüğünün elde edilmesi istenilirse, bunun için durulaştırma işlemi uygulanmalıdır. Durulaştırma işlemleri için literatürde birçok yöntem kullanılmaktadır [31].

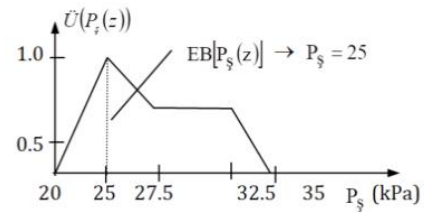


**Şekil 5.** Sıkıştırılmış killi zeminlerin şişme basınçlarının tahmini için Fortran dilinde yazılmış programın akış şeması [20]

**Tablo 2.** Şişme basıncı tahmini için oluşturulmuş bulanık model kuralları [20]

$\gamma_k$ alt küme numarası	$w_o$ alt küme numarası	PI alt küme numarası									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	2	1	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	3	1	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
	4	1	1-3	1-5	3-6	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17
	5	1	1-2	1-3	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	6	1	1	1-2	1-3	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
2	1	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	2	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	3	1	2-4	4-5	6-7	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	4	1	1-4	2-5	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
	5	1	1-2	1-4	2-5	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17
	6	1	1	1-2	1-4	2-5	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15
3	1	1	6-7	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
	2	1	5-6	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21
	3	1	3-5	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20
	4	1	1-5	3-6	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
	5	1	1-3	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17
	6	1	1-2	1-3	1-4	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15
4	1	1	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22	21-24
	2	1	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22
	3	1	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22
	4	1	2-4	4-6	6-7	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	5	1	1-3	2-4	4-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18
	6	1	1	1-2	2-4	4-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16
5	1	1	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22
	2	1	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22
	3	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	4	1	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21
	5	1	1-3	3-5	5-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19
	6	1	1-2	1-3	3-5	5-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17
6	1	1	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22	22
	2	1	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20	19-22	21-22
	3	1	4-7	6-9	8-11	10-13	12-15	14-17	16-19	18-21	20-22
	4	1	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
	5	1	1-4	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18	17-20
	6	1	1-2	1-4	3-6	5-8	7-10	9-12	11-14	13-16	15-18
7	1	1	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22	22
	2	1	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22
	3	1	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-22
	4	1	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
	5	1	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
	6	1	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18

Bu çalışmada birkaç durulaştırma uygulaması örnek olarak verilmiştir. En büyük üyelik ilkesi kullanılarak yapılan durulaştırmanın diğer bir adı yükseklik yöntemidir. Bu yöntemin kullanılması için tepeleri olan çıkarımlara gerek vardır. Şekil 6 'da gösterilen bu çalışmadaki probleme uygulanan, durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (2) kullanılmaktadır. Kısaca ifade etmek gerekirse, en büyük üyelik derecesine sahip olan değer, bulanık işlemler sonucunda elde edilen şişme basıncı değeri olarak alınır.

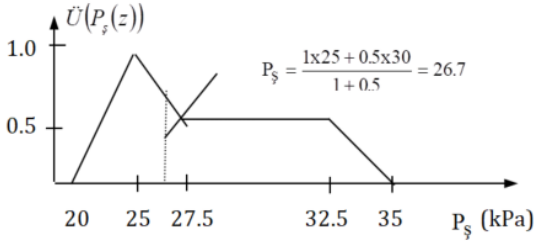


**Şekil 6.** En büyük üyelik derecesi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması [20]

$$P_s = EB|P_s(z)| \quad (2)$$

Ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak yapılacak durulaştırmada simetrik bir üyelik fonksiyonunun bulunması gereklidir. Böylece, çıkışı oluşturan bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının her biri sahip oldukları en büyük üyelik derecesi değeri ile çarpılarak, ağırlıklı ortalamaları alınır. Şekil 7 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (3) kullanılmaktadır.

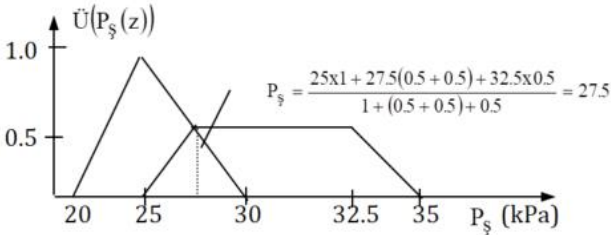
$$P_s = \frac{\sum \bar{U}(P_s(z))P_s(z)}{\sum \bar{U}(P_s(z))} \quad (3)$$



Şekil 7. Ağırlıklı ortalama yöntemi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması [20]

Kullanılan durulaştırma işlemleri arasında en hızlı olan yöntem toplamların merkezi (COS) yöntemidir. Bu yöntemde iki bulanık kümenin birleşimi yerine, kümelerin alanlarının cebirsel toplamları kullanılır. Bu hesaplama tarzı ağırlıklı ortalama durulaştırmasına benzemektedir. Ancak toplamların merkezi yönteminde ağırlıklar ilgili üyelik fonksiyonlarının alanlarıdır. Ortalama ağırlıklar yönteminde ise bu her bir üyelik derecesidir. Toplamların merkezi yönteminin dezavantajı, örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir. Şekil 8 'de gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması için Denklem (4) kullanılmıştır.

$$P_s = \frac{\int P_s(z) \cdot \sum_{i=1}^n \bar{U}(P_s(z)) dP_s(z)}{\sum_{i=1}^n \bar{U}(P_s(z)) dP_s(z)} \quad (4)$$



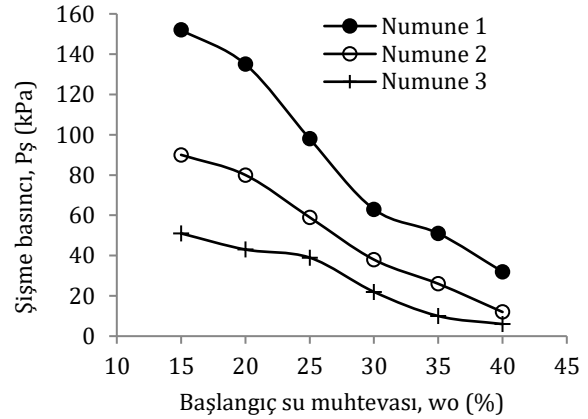
Şekil 8. Toplamların merkezi durulaştırmasının şişme basıncının belirlenmesine uygulanması [20]

Bütün bulanıklık işlemlerinin sonucunda, ulaşılan harmanlanmış çıkarımların durulaştırılması ile sayısal değerlerin elde edilmesi, mühendislerin tasarım, kontrol ve planlama işlemlerinde kullanabilmeleri için gereklidir. Burada sunulan durulaştırma yöntemlerinden hangisinin en iyi olduğu, kullanıcının ilgilendiği sorunla ilişkili olarak, bazı durumları önceden bilmesine bağlıdır. İncelenen olayın sürekli olup olmadığı, durulaştırmadan sonra

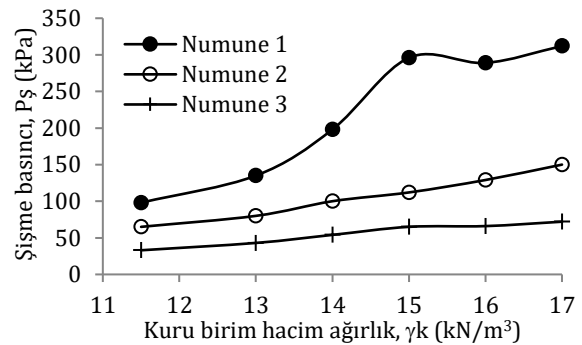
varılan sonucun belirsiz, ikilemlili veya çok cevaplı olmaması, basit olması, sonuçların makul ve mantıklı olması önemlidir. Ayrıca, en önemli şart, durulaştırma sonucunda elde edilen tek değer, ölçülmüş verilerle uyum sağlaması önemlidir. Bu çalışmada şişme basınçlarının durulaştırma hesaplanmasında en büyük üyelik derecesi yöntemiyle elde edilen şişme basıncı değerleri kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış bir kilin şişme basıncının tahmin edilmesi için oluşturulmuş bulanık modelden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri ve aralarındaki yüzde hata miktarları Tablo 3 'de verilmiştir.

Tablo 3 'de verilen deney sonuçlarına göre, örnek olması açısından, sabit bir kuru birim hacim ağırlık için farklı su muhtevalarına göre değişen şişme basınçlarına ve sabit bir su muhtevası için farklı kuru birim hacim ağırlıklara göre değişen şişme basınçlarına ait ilişkiler, sırasıyla, Şekil 9 ve Şekil 10 'da çizilmiştir. Şekil 9 'a göre başlangıç su muhtevası artarken şişme basıncının azaldığı, Şekil 10 'a göre ise kuru birim hacim ağırlık artarken şişme basıncının arttığı görülmektedir.



Şekil 9.  $\gamma_k=13.0 \text{ kN/m}^3$  için başlangıç su muhtevası ile şişme basıncı ilişkileri



Şekil 10.  $w_0=\%20$  için kuru birim hacim ağırlık ile şişme basıncı ilişkileri

Tablo 3 'de gösterilen hata miktarları, Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, tüm deney

sonuçlarına göre ortalama karesel hataların karekök (RMSE) değeri Denklem (6) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{Hata}(\text{şişme}) = \frac{P_s^* - P_s}{P_s} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_s^* - P_s)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Burada,  $P_s^*$  bulanık mantık modelinden elde edilen sabit hacimli şişme basıncı değerlerini,  $P_s$  deneysel çalışmalardan elde edilen şişme basıncı değerlerini ve  $n$  ise toplam veri sayısını göstermektedir.

**Tablo 3.** Deney sonuçları, bulanık modelden tahmin edilen sonuçlar ve hata miktarları [20]

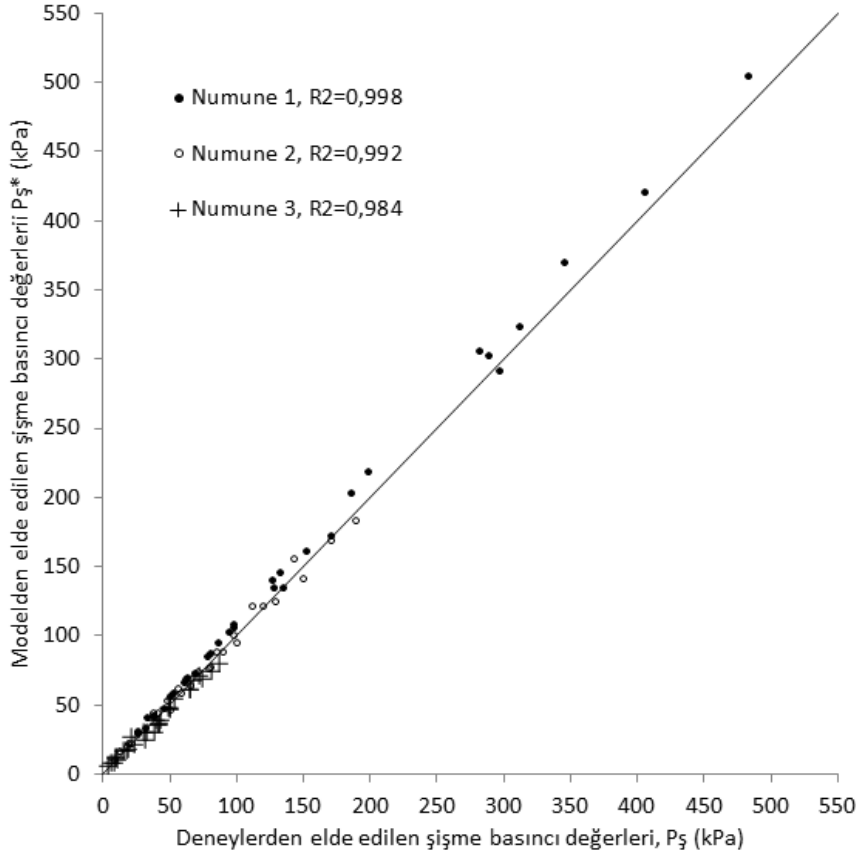
$\gamma_k$ kN/m <sup>3</sup>	Wo %	Numune 1			Numune 2			Numune 3		
		$P_s$ kPa	$P_s^*$ kPa	Hata %	$P_s$ kPa	$P_s^*$ kPa	Hata %	$P_s$ kPa	$P_s^*$ kPa	Hata %
11.5	15	126	140.6	11.59	79	76.1	-3.67	42	36.2	-13.81
	20	98	108.0	10.2	65	64.3	-1.08	33	29.4	-10.91
	25	86	95.4	10.93	50	46.7	-6.60	24	20.5	-14.58
	30	53	58.5	10.38	26	30.7	18.08	18	16.6	-7.78
	35	33	41.1	24.55	19	22.5	18.42	10	11.5	15.00
	40	26	30.3	16.54	8	10.7	33.75	4	5.5	37.50
13.0	15	152	161.0	5.92	90	88.1	-2.11	51	46.9	-8.04
	20	135	134.6	-0.30	80	77.9	-2.62	43	38.9	-9.53
	25	98	106.0	8.20	59	58.7	-0.51	39	29.5	-24.36
	30	63	69.5	10.32	38	42.7	12.37	22	25.8	17.27
	35	51	56.0	9.80	26	29.6	13.85	10	12.3	23.00
	40	32	33.5	4.69	12	16.7	39.17	6	7.8	30.00
14.0	15	281	306.0	8.90	120	121.9	1.58	68	67.6	-0.59
	20	198	219.0	10.60	100	94.5	-5.50	54	53.7	-0.56
	25	132	145.6	10.30	71	73.7	3.80	42	35.5	-15.48
	30	78	85.1	8.97	48	52.9	10.21	31	29.3	-5.48
	35	61	66.0	8.20	26	29.5	13.46	15	16.7	11.33
	40	37	41.7	12.70	18	20.1	11.67	9	8.1	-10.00
15.0	15	345	370.1	7.28	143	155.8	8.95	74	68.3	-7.70
	20	296	291.7	-1.45	112	122.2	9.11	65	60.5	-6.92
	25	170	172.6	-1.53	85	88.7	4.35	51	46.5	-8.82
	30	94	102.7	9.26	56	62.1	10.2	40	38.5	-3.75
	35	69	73.2	6.09	38	43.5	14.47	19	18.0	-5.26
	40	45	47.6	5.78	21	22.6	7.62	11	9.9	-10.00
16.0	15	405	420.3	3.78	171	169.5	-0.88	82	74.0	-9.76
	20	289	302.2	4.57	129	124.8	-3.26	66	60.8	-7.88
	25	186	203.6	9.10	98	100.0	2.04	49	48.2	-1.63
	30	128	135.0	5.47	62	68.3	9.70	41	35.5	-13.41
	35	81	87.2	7.65	41	44.1	7.56	32	23.8	-25.63
	40	45	47.6	5.78	21	22.6	7.62	11	9.9	-10.00
17.0	15	483	504.7	4.49	189	183.2	-3.07	88	79.8	-9.32
	20	312	324.1	3.88	150	141.4	-5.73	72	71.1	-1.25

93 adet deneyden elde edilen şişme basıncı sonuçlarının aritmetik ortalaması 86,9 kPa iken, modelden elde edilen şişme basınçlarının aritmetik ortalaması 89,7 kPa olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının medyan değeri 61,0 kPa, model sonuçlarının ise 60,8 kPa'dır. Şişme basınçlarının Denklem (5) 'e göre hesaplanan ortalama hata değeri %9,73 olarak ve Denklem (6) 'ya göre RMSE değeri 7,76 kPa olarak belirlenmiştir.

Bulanık mantık modelinden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme

basıncı değerlerinin karşılaştırılması, ayrıca Şekil 11 'de grafik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, bulanık modelden elde edilen tahmini şişme basıncı değerleri ile deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri uyum içerisindedir. Her bir numune için  $R^2$  değerleri şekil üzerinde verilmiş, tüm deney sonuçlarına ait  $R^2$  değeri ise 0,996 olarak elde edilmiştir. Ayrıca deney sonuçları ile model sonuçlarının 1:1 doğrusu üzerinde saçılımları da teklif edilen bulanık mantık modelinin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.





**Şekil 11.** Deneylerden elde edilen şişme basıncı değerleri ile bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basıncı değerlerinin karşılaştırılması [20]

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, killi zeminlerin şişme basınçlarının bulanık mantık yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Killi zeminlerin şişme davranışları üzerinde zemin cinsi, mineralojik yapısı, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, doygunluk derecesi, permeabilite, tabii veya sıkıştırılmış zemin olması, gerilme tarihçesi gibi birçok parametre etkili olmaktadır. Şişme basıncı değerinin tahmininde, bu parametrelerden; kilin plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su muhtevası gibi etkenler dikkate alınmıştır. Farklı plastisite indisine sahip kil numuneleri, farklı kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevasında olacak şekilde kompaksiyonla hazırlanmışlardır. Bu numuneler üzerinde, ödometre deney sistemi kullanılarak sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır.

Yapılan şişme deneylerinden, sabit su muhtevasında ve sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış zeminlerin plastisite indisi arttıkça, zeminin şişme basıncının arttığı görülmüştür. Sabit kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numunelerde ise, başlangıç su muhtevasının artmasıyla şişme basıncının azaldığı görülmüştür. Aynı su muhtevasında, fakat farklı kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan şişme basıncı deney sonuçlarına göre, kuru birim hacim

ağırlığın artmasıyla şişme basıncının arttığı belirlenmiştir.

Şişme basıncı deneyleri oldukça uzun zaman alan deneylerdir. Bu çalışmada, sıkıştırılmış killi zeminlerin sabit hacimli şişme basıncının tahmin edilmesinde bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Şişme basıncının yüksek olduğu durumlarda, bulanık mantık modelinden elde edilen şişme basınçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum hata miktarı %10 dolaylarındayken, çok düşük şişme basıncı değerlerinde maksimum hata miktarının %30 'un üzerine çıktığı görülmüştür. Şişme basıncı tahmininde ortalama hata miktarı ise %9,73 olarak elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen şişme basıncı sonuçlarının aritmetik ortalaması 86,9 kPa iken, modelden elde edilen şişme basınçlarının aritmetik ortalaması 89,7 kPa olarak hesaplanmıştır. Şişme basıncının ortalama karesel hataların karekök (RMSE) değeri 7,76 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları ile model sonuçlarının karşılaştırılmasından  $R^2$  değeri 0,996 olarak elde edilmiştir. Şişme basıncının tahmininde yüksek şişmenin olduğu durumlarda bulanık mantık modelinin kullanılabileceği görülmüştür. Daha düşük şişme basınçları için şişme basıncı alt kümelerinin sayısının artırılması önerilmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma, “Killi Zeminlerin Şişme ve Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bulanık Model (Fuzzy Logic) Yaklaşımı” başlıklı 310 nolu projeden üretilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederler.

## Etik Beyanı

*Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.*

## Kaynakça

- [1] Petry, T.M., Little, D.N. 2002. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—history, Practice, and Future, J. Mater. Civ. Eng., 14 (6), 447–460.
- [2] Bell, F.G. 2007. Engineering Geology, 2nd edition, Butterworth-Heinemann.
- [3] Al-Mukhtar, M., Khattab, S., Alcover, J.F. 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil, Eng. Geol., 139-140, 17–27.
- [4] Jamsawang, P., Abdulyamet, B., Voottipruex, P., Jongpradist, P., Likitlersuang, S., Tantayopin, K. 2023. The free swell potential of expansive clays stabilized with the shallow bottom ash mixing method, Engineering Geology, 315, 107027.
- [5] El-Sohby, M.A., Rabba, E.A. 1981. Some factors affecting swelling of clayey soils, Geotech. Engineering, 12, 19-39.
- [6] Nelson, J.D. and Miller, D.J. 1992. Expansive Soils Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley & Sons, 253 p.
- [7] Elsharief, A.M., Zumrawi, M.E., Salam, A.M. 2014. Experimental Study of Some Factors Affecting Swelling Pressure, University of Khartoum Engineering Journal, 4(2), 1-7.
- [8] Smaida, A., Mekerta, B., Gueddouda, M.K. 2021. Physico-mechanical stabilization of a high swelling clay, Construction and Building Materials, 289, 123197.
- [9] Chen, F.H. 1988. Foundations on Expansive Soil, American Elsevier Science Publ., New York, 280p.
- [10] Komine, H., Ogata, N. 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, Can. Geotech. J., 31, 478-490.
- [11] Erol, O., Dhowian, A.W. 1990. Swell behaviour of arid climate shales from Saudi Arabia, Quaterly journal of Engr. Geology, 23, 243-254.
- [12] Basma, A.A. 1993. Prediction of Expansion Degree for Natural Compacted Clays, Geotech. Test. J., 16(6), 542–549.
- [13] Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338-353.
- [14] Juang C.H., Wey, J.L., Elton, D.J. 1991. Model for capacity of single piles in sand using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 17(12), 1920-1931.
- [15] Juang, C.H., Lee, D.H., Sheu, C. 1992. Mapping slope failure potential using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 118(3), 475-494.
- [16] Juang, C.H., Huang, X.H., Holtz, R.D., Chen J.W. 1996. Determination relative density of sands from CPT using Fuzzy sets, J. Geotechnical Engineering, 122(1), 1-6.
- [17] Nawari, N.O., Liang, R. 2000. Fuzzy-based approach for determination of characteristic values of measured geotechnical parameters, Can. Geotech. J., 37, 1131-1140.
- [18] Zhang, Z. and Tümay, M.T. 1999. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil clasification, J. Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 125(3), 179-186.
- [19] Çimen, Ö., Keskin, S.N. 2001. Emme kapasitesinin zamana bağlı ilerleyişinin bulanık mantıkla belirlenmesi, Mühendislikte Modern Yöntemler Sempozyumu, İstanbul, 64-71.
- [20] Çimen, Ö. 2002. Killi Zeminlerin Şişme ve Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bulanık Model (Fuzzy Logic) Yaklaşımı, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 175s.
- [21] Avci, Y., Ekmen, A.B. 2023. Artificial intelligence assisted optimization of rammed aggregate pier supported raft foundation systems based on parametric three-dimensional finite element analysis, Structures, 56, 105031.
- [22] Ekmen, A.B., Avci, Y. 2024. Development of novel artificial intelligence functions based on 3D

- finite element method using February 6 Kahramanmaraş Seismic Records for earthquake effects prediction in various soils, *Engineering Geology*, 336, 107570.
- [23] İkizler, B., Vekli, M., Doğan E., Aytekin, M., Kocabaş F. 2014, Prediction of swelling pressures of expansive soils using soft computing methods, *Neural Comput. Applic.*, 24, 473-485.
- [24] Hu, H., Vanapalli, S.K. 2016. Prediction of the variation of swelling pressure and 1-D heave of expansive soils with respect to suction using the soil water retention curve as a tool, *Can. Geotech. J.*, 53, 1-22.
- [25] Erzin, Y., Erol, O. 2007. Swell pressure prediction by suction methods, *Engineering Geology*, 92(3-4), 133-145.
- [26] Ikechukwu A.F., Mostafa, M.M.H, 2022. Swelling Pressure Prediction of Compacted Unsaturated Expansive Soils, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 59,119-134.
- [27] Elbadry, H. 2017. Simplified reliable prediction method for determining the volume change of expansive soils based on simply physical tests, *HBRC Journal*, 13,353-360.
- [28] Agbelele, K.J., P’Kla, A., Houanou, K.A., Dara, K.S., Degan, G., Gbaguidi Aisse G. 2020. Estimation of the Swelling Pressure of the Clayey Soils of the TCHI Depression in Benin for the Good Holding of the Equipment’s, *Journal of Scientific and Engineering Research*, 7(4), 183-190.
- [29] Gokceoglu, C. 2021. A practical linguistic fuzzy inference system for indirect determination of swelling pressure of expansive soils, *Academia Letters*.
- [30] Hozatlıoğlu, D.T., Yılmaz, I. 2023. A Fuzzy Classification Process for Swelling Soils, 10, 474-487.
- [31] Çimen, Ö., Keskin S.N., Yıldırım, H. 2012. Prediction of Swelling Potential and Pressure in Compacted Clay, *Arab J Sci Eng.*, 37, 1535-1546.
- [32] Taherdangkoo, R., Tyurin, V., Shehab, M., Ardejani, F.D., Tang, A.M., Narmandakh, D., Butscher, C. 2023. An efficient neural network model to determine maximum swelling pressure of clayey soils, *Computers and Geotechnics*, 162, 105693.
- [33] Jalal, F.E., Iqbal, M., Khan, W.A., Jamal, A., Onyelowe, K. 2024. ANN-based swarm intelligence for predicting expansive soil swell pressure and compression strength, *Scientific Reports*, 14, 14597.
- [34] Aneke, F., Onyelowe, K.C., Ebid, A.M. 2024. AI-Based Estimation of Swelling Stress for Soils in South Africa, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11, 1049-1072.
- [35] Sen, Z. 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Publications of Water Foundation, Turkey (in Turkish).
- [36] ASTM D854, 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- [37] ASTM D1140, 2017. Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- [38] ASTM D422, 2014. Standard Test Method for Particle- Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- [39] ASTM D4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- [40] ASTM D698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- [41] ASTM D4546. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D.