

# YÜKSEK KALSİYUMLU UÇUCU KÜLLERİN ÇİMENTO NUMUNELERİNDE MEYDANA GETİRDİĞİ GENLEŞME MİKTARLARININ TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK ALTERNATİF YAKLAŞIMLAR

## ALTERNATIVE APPROACHES FOR ESTIMATING OF THE EXPANSION QUANTITY ORIGINATED FROM HIGH CALCIUM INCLUDED FLY ASHES ON THE CEMENT SPECIMENS

Serkan SUBAŞI<sup>a</sup>, Ahmet BEYÇİOĞLU<sup>b</sup> ve Mustafa ÇULLU<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Düzce, Türkiye, serkansubasi@duzce.edu.tr

<sup>b</sup> Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Düzce, Türkiye, abeycioglu@duzce.edu.tr

<sup>c</sup> Hacettepe Üniversitesi, Polatlı Teknik Bilimler MYO, Ankara, Türkiye, mcullu@hacettepe.edu.tr

### Özet

Bu çalışmanın amacı Yatağan ve Soma termik santrallerinden elde edilen yüksek kalsiyum içerikli uçucu küllerin çimento numunelerinde kullanımı ile ortaya çıkan genleşme miktarlarının tahmin edilmesine yönelik alternatif modeller oluşturmaktır.

Bu amaçla, karışım içerisinde çimento ile %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında Yatağan ve Soma Termik santrallerinin uçucu külleri ikame edilerek, her bir karışım için 6 adet 25x25x285 mm boyutlarında genleşme örnekleri hazırlanmıştır. Her bir grup için karışımda kullanılacak su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre Akma tablası deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Çimento harç çubuklarında genleşme deneyi ASTM C 151 standardında belirtilen esaslara uygun olarak otoklav metodu ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uçucu küller üzerinde kimyasal analiz gerçekleştirilerek kullanılan UK'lerde genleşmeye neden olan MgO miktarları ölçülmüştür. Çalışmada uçucu kül ikame oranları ve MgO miktarlarına bağlı olarak çimento genleşme miktarını tahmin eden çoklu lineer regresyon ve bulanık mantık modelleri oluşturulmuştur. Tahmin modellerinden elde edilen veriler gerçek genleşme miktarları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, her iki yöntem ile çimento genleşme miktarlarının tahmin edilmesinin mümkün olduğu, ancak bulanık mantık yönteminin genleşme miktarlarını çoklu lineer regresyona göre daha yüksek oranda başarı ile tahmin ettiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Uçucu Kül, Çimento, Genleşme, Bulanık Mantık, Regresyon.

### Abstract

The aim of this study is to constitute the alternative models for estimating the expansion quantities originated from using the high calcium included fly ashes on cement specimens and use of the high calcium included fly ashes obtained from the Yatagan and Soma Thermic Centrals.

For this purpose, 6 numbers of 25x25x285 mm dimensions expansion specimens were prepared for each concrete

mix design which produced by substitution 0%, 10%, 20%, 30% ve 40% amount of the fly ashes obtained from

Yatagan and Soma Thermic Centrals with cement. Water content for each mixture was determined performing the flow table test and using flow factor obtained from ASTM C230, C109 and C1437 Standards. Expansion test on the cement mortar bar was performed with autoclave method in accordance with the ASTM C 151 Standard. Besides, MgO content caused the expansion in the cement mortar was determined with chemical analysis. Multi linear regression and fuzzy logic models estimated the expansion quantity of cement depended on the fly ash substitution quantity and MgO content were established. The values obtained from the estimation model were evaluated comparatively with the experimental values.

As a result, it is seen that estimation of the cement expansion quantity for both methods is possible; however the fuzzy logic method was estimated the expansion quantity of the cement excellently than the multiple linear regression method.

**Keywords:** Fly ash, cement, expansion, fuzzy logic, regression.

### 1. Giriş

Çimento içinde bulunabilen CaO ve MgO'un gecikmiş hidratasyonları da betonda genleşmelere ve çatlamalara yol açabilmektedir. Döner fırında yüksek sıcaklıklarda pişerek kristal yapıya sahip olan bu bileşenler diğer çimento bileşenlerinden daha geç reaksiyon gösterirler. Bu nedenle çimento içindeki miktarının sınırlı olması istenir [1,2]. Bu oksitlerin hidratasyonu sonunda sertleşmiş çimento hamurunda genleşme olduğundan, beton yapılarda iç gerilmeler ve çatlamlar meydana gelebilmektedir [3,4].

Çimentolarda istenmeyen bir bileşik olan kristal yapıdaki magnezyum göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü, normal sıcaklıkta çok yavaş hidrate olur ve bundan dolayı ileriki zamanlarda genleşmeye neden olur. Bu gecikmiş genleşme betonun yapısına, çimentonun katılması evresinde serbest kirecin hidratasyonundan dolayı olan erken genleşmeden daha çok zarar verir. ASTM C151 gibi otoklav genleşme testi MgO, CaO veya her ikisini içeren

çimentoların dayanıklılığını tanımlamak için dizayn edilmiştir [5]. Betonun otoklav genişemesi, MgO ve uçucu kül eklenmesine ayrıca otoklav ısı ve zamanına bağlıdır, ama genişeme miktarı MgO miktarının yükselmesiyle hızla yükselir [4,5]. Bu durum çimentonun mekanik dayanıklılığının kaybına ve daha yüksek genişeme değerine sebep olur. Literatür incelendiğinde araştırmacıların özellikle MgO'dan kaynaklı genişemeler üzerinde çalışma yaptıkları görülmektedir [6,7].

MgO'in suyla reaksiyonundan %118 hacim genişemesine neden olan Mg(OH)<sub>2</sub> oluşur. MgO suyla çok yavaş reaksiyona girer, bunun sonucu olarak çimento sertleştikten sonra genişemeye neden olmaktadır [7]. Standartlarda normal portland çimentosunun MgO içeriği %5 den az olması gerektiği ifade edilmektedir [8].

Ülkemizde açığa çıkan uçucu küllerin büyük bölümü yüksek kireç içeriklidir ve uçucu kül özellikleri santralden santrale, hatta aynı santralde zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilmektedir [1]. Genellikle F sınıfı uçucu kül küresel yapısı nedeniyle betonun işlenebilme özelliğini iyileştirmekte, taze betonda su kusmayı (terleme) azaltmakta, betonun hidratasyon ısısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne imkân tanımakta, puzolanik reaksiyon sayesinde betonun uzun dönemli mukavemetine katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu yararlı özellikleri uçucu külün beton üretiminde yaygın olarak kullanımına ve araştırmaların bu konu üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır [2]. Buna karşılık, uçucu kül betonun erken dayanımını düşürebilmekte ve özellikle yüksek kireç içerikli (C sınıfı) uçucu külün betonda yüksek oranda kullanımı ise betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açabilmektedir [9].

Araştırmacılar tarafından beton içinde %40, %50, %60, %70 gibi yüksek oranda C sınıfı uçucu kül kullanımının çimento harç çubukları üzerinde genişeme oranları tayin edilmiş ve uçucu kül oranının artması ile harç çubuklarının genişeme miktarının da arttığı görülmüştür. Çimento veya uçucu külde bulunan serbest kireç yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığı için beton içinde çok yavaş ve uzun sürede hidrate olabildiği belirtilmektedir [10]. Mehta ve Pritz (1981), yüksek MgO'li çimento ile büzülme çatlaklarını telafi etmeye çalışmışlardır. [11].

Bu araştırmada, uçucu kül ikame edilen çimento numunelerinde karışım içerisinde artan MgO miktarına bağlı olarak meydana gelebilecek genişeme miktarını belirleyebilecek tahmin modelleri oluşturulmaya çalışılmıştır.

## 2. Çoklu Lineer Regresyon

Çoklu lineer regresyon analizi birden fazla değişken arasındaki ilişkilerin bir matematiksel eşitlik ile açıklanması süreci olarak tanımlanmaktadır.

Gerçek hayatta birçok modelin açıklaması için iki veya daha fazla açıklayıcı değişkene gerek duyulmaktadır. Birden çok açıklayıcı değişkenli modeller çoklu regresyon modeli olarak adlandırılmaktadır [12]. Çoklu doğrusal regresyon denkleminin formüle edilmiş biçimi Denklem 1' de verilmiştir.

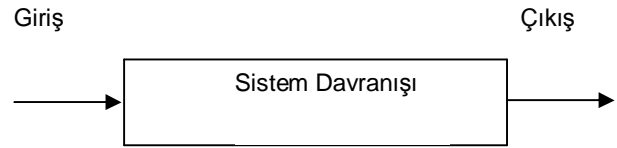
$$y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_nX_n + \epsilon \quad (1)$$

Model denklemlerde,  
Y= Bağımlı değişkeni  
X<sub>i</sub>=Bağımsız değişkenleri  
b<sub>i</sub>= Hesaplanan katsayı parametreleri  
ε = Hata terimini ifade etmektedir.

## 3. Bulanık Mantık

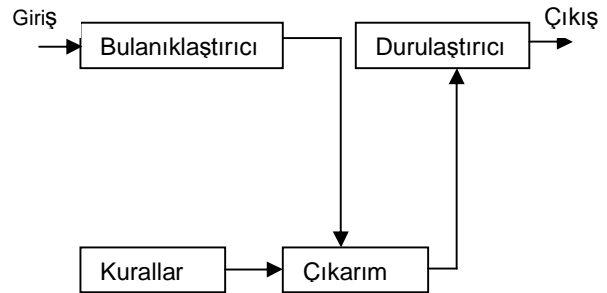
Bulanık ilkeler hakkında ilk bilgiler, Zadeh (1965) tarafından literatüre mal edilmiştir. Önceleri bulanıklaştırmanın kesin olan bilimsel ilkelere uymadığı ve hatta bilime karşı geldiği ileri sürülmesine rağmen, 1975 yılında Mamdani ve Assilian (1975) tarafından yapılan bir kontrol uygulaması, bulanık kavram ve sistemlerin dikkat kazanmasına neden olmuştur [13,14]. Bulanık modelleme, bulanık modelin yapısıyla ilgilenen sistem tanımlamasının yeni bir koludur ve örnek bir veri seti ile tanımlanan, bilinmeyen bir sistemin davranışını tahmin eder ve açıklar. Klasik matematiğe dayanan sistem modellemesi, eksik tanımlanmış ve belirsiz sistemler için pek uygun değildir. Bunun aksine, bulanık mantık sistemi, hassas nicel analizler kullanmadan insan bilgisinin ve yaklaşım süreçlerinin nitel taraflarını modelleyebilir. Son yıllarda yeni konular arasında ilk sırayı tutan bulanık küme, mantık ve sistemler hemen her mühendislik dalında uygulanır hale gelmiştir. Bulanık mantığın en geçerli olduğu iki durumdan ilki, incelenen olayın karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması durumunda kişilerin görüş ve yargılarına yer vermesi, ikincisi ise insan muhakemesine, kavrayışlarına ve karar vermesine gereksinim gösteren hallerdir.

Genellikle bilinen matematik, stokastik veya kavramsal sistemlerin hemen hepsi Şekil 1'de görülen üç ayrı birimden ibarettir. Bunlar giriş, bu girişi çıkışa dönüştüren ve sistem davranışı olarak isimlendirilen bir kutu ve buradan çıkış kısımlarıdır. Bu birimlerin hepsinde sayısal veri çıkış veya işlemler yapılmaktadır [15].



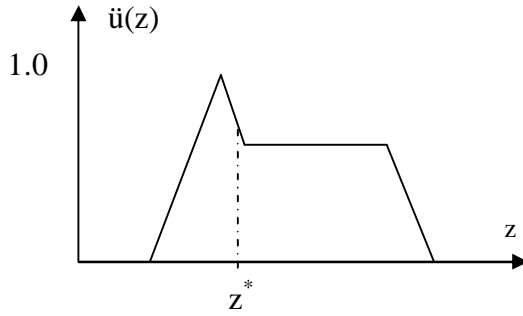
Şekil 1. Klasik sistem

Bulanık sistemlerin bu klasik tasarımdan farkı sistem davranışı kısmının dörde ayrılarak Şekil 2'de gösterildiği gibi kendi aralarında bağlantılı dört birimin olmasıdır.



Şekil 2. Bulanık mantık

Giriş değerleri çoğunlukla kesin değerlerdir. *Bulanıklaştırıcının* görevi, bulanık kümeler (burada girdiler bulanık üyelik fonksiyonları tarafından tanımlanan bulanık değişkenlerdir) içine kesin sayıları haritalamaktır. *Kurallar* "Eğer-İse" kurallarının oluşturduğu bulanık mantığı esas alır. Durulaştırma birimi ise kurallardan alınan sözel ifadelerin sayısal değere dönüştürüldüğü birimdir. Model sonuçlarının sayısal olarak alındığı durulaştırma biriminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı ise Ağırlık merkezi (centroid) yöntemidir [16]. Bu yöntemin çalışma prensibi Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Centroid yöntemi durulaştırması

## 4. Materyal ve Metod

### 4.1. Materyal

Araştırmada CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Deney numunelerinin hazırlanmasında Yatağan ve Soma Termik santralinden elde edilen uçucu küller kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küllere ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

### 4.2. Metod

#### 4.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması

Deney örneklerinin hazırlanmasında TS EN 196-1 standardında belirtilen CEN referans kumu kullanılmıştır. Her bir grup için karışımda kullanılacak su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre Akma tablası deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiştir [17-20]. Örneklerin hazırlanmasında kullanılan malzemelere ait karışım oranları Çizelge 3'te verilmiştir.

Araştırmada kullanılan uçucu kül karışım içerisinde %0, %10, %20, %30 ve %40'lik oranlarda çimento ile yer değiştirilerek (ikame edilerek) konulmuştur.

Çizelge 1. Çimento Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal kompozisyon		Fiziksel özellikler	
SiO <sub>2</sub> (%)	20,32	Priz başlangıcı (sa/dk)	01:58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,59	Priz sonu (sa/dk)	02:57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,09	Hacim sabitliği (mm Toplam)	2
CaO (%)	62,50	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3172
MgO (%)	1,74	Mekanik özellikler	
SO <sub>3</sub> (%)	3,29	Basınç dayanımı (MPa)	
Na <sub>2</sub> O (%)	0,34	2. Gün	30,8
K <sub>2</sub> O (%)	0,91	7. Gün	39,5
Kızdırma kaybı (%)	1,18	28.Gün	56,0
Çözünmeyen kalıntı (%)	0,31		
S.CaO (%)	0,93		

Çizelge 2. Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal kompozisyon	Yatağan U.Külü	Soma U.Külü
SiO <sub>2</sub> (%)	50,77	47,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	21,13	20,17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,17	3,96
CaO (%)	12,44	18,35
MgO (%)	4,53	7,05
SO <sub>3</sub> (%)	1,33	0,86
Na <sub>2</sub> O (%)	0,24	0,82
K <sub>2</sub> O (%)	2,54	1,39

Çizelge 3. Çimento örneklerine ait karışım oranları

Uçucu Kül İkame Miktarı	Çimento Miktarı (gr)	Yatağan U.Külü		Soma U.Külü	
		W/C	Su miktarı (ml)	W/C	Su miktarı (ml)
%0	450	0,49	220,5	0,51	229,5
%10	405	0,56	252	0,56	252
%20	360	0,58	261	0,60	270
%30	315	0,60	270	0,62	279
%40	270	0,63	283,5	0,65	292,5

#### 4.2.2. Otoklav metodu ile çimento hacim genişleme tayini

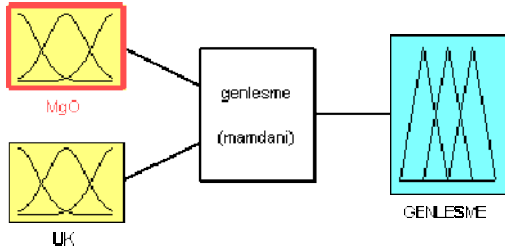
Deney her bir karışım grubu için 6 adet 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan çimento harç çubukları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Örnekler 2MPa basınçlı buhar kazanına yerleştirilerek 3 saat boyunca buhar kürüne tabi tutulmuştur. Deney örneklerinin boyları deney öncesinde ve deney sonrasında 0,001 mm hassasiyetle ölçülerek örneklerdeki boy değişimleri % olarak hesaplanmıştır. Deney ASTM C 151 ve TS 11052 standardında belirtilen kurallara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [5,21]. Deneyde kullanılan otoklav Şekil 4'de görülmektedir.



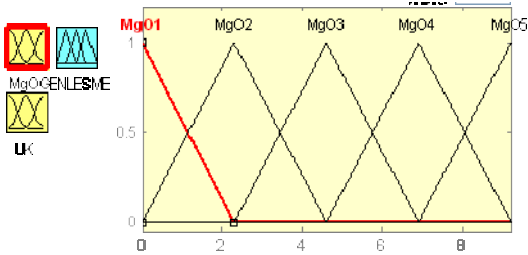
Şekil 4. Deneyde kullanılan yüksek basınçlı buhar kürü kazanı (otoklav)

#### 4.2.3. Oluşturulan bulanık mantık modeli

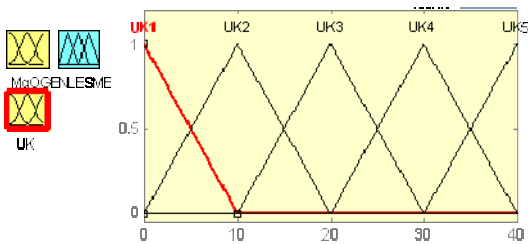
Bulanık model oluşturulurken, MATLAB-Bulanık Mantık Toolbox kullanılmıştır. Şekil 5' de geliştirilen modelin genel görünümü verilmiştir. Ayrıca geliştirilen modelde girdiler ve çıktı için çalışma konusuyula ilgili kazanılmış deneyimler kullanılarak belirlenen üyelik fonksiyonlarının görünümü Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8' de verilmiştir.



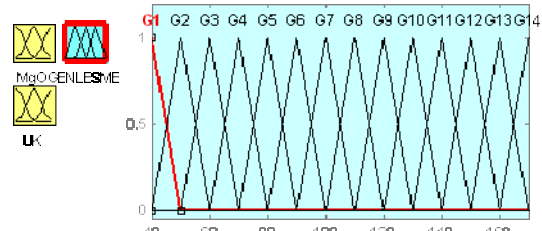
Şekil 5. Modelin genel görünümü



Şekil 6. MgO için üyelik fonksiyonları

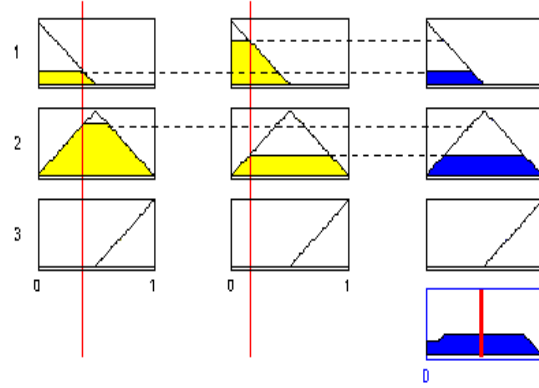


Şekil 7. Uçucu Kül için üyelik fonksiyonları



Şekil 8. Basınç dayanımı için üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinden sonraki aşamada, bulanık kural tabanı oluşturulmuştur. Bulanık kural tabanı, EĞER yani öncül kısımda girdi parametreleri; İSE yani çıkarım kısmında ise çıktı değeri elde edilecek şekilde sözel bilgilerden oluşmaktadır. Bulanık modelde kuralların birbiri ile harmanlanmasında VE operatörü kullanılmıştır. İki girdili bir sistemde VE bağlacı, En Büyük-En Küçük (EB-EK) kuralı gereğince her iki girdinin üyelik derecelerinden küçük olanın üyelik derecesini çıktının üyelik derecesi olarak almaktadır (Şekil 9). Ayrıca çalışmada durulaştırma yöntemi olarak ise ağırlık merkezi (centroid) yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 9. Ve operatörü çalışma prensibi

## 5. Bulgular ve Tartışma

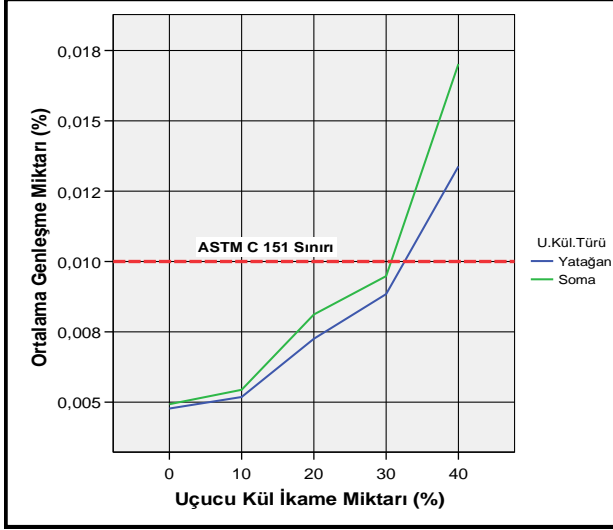
### 5.1. Deneysel Bulgular

Hazırlanan çimento harç çubukları üzerinde otoklav metodu ile genleşme miktarları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Çimento hacim genleşme miktarına ait açıklayıcı istatistikler

	Uçucu Kül İkame Türü	Uçucu Kül Miktarı (%)	N	Ortalama Genleşme		
				(%)	Std. Hata	Minimum Maksimum
Yatağan	0	5	0,0048	0,00035	0,0039	0,0056
	10	5	0,0052	0,00062	0,0032	0,0066
	20	5	0,0073	0,00048	0,0061	0,0089
	30	5	0,0088	0,00031	0,0078	0,0098
	40	5	0,0134	0,00218	0,0089	0,0212
Soma	0	5	0,0049	0,00021	0,0045	0,0057
	10	5	0,0054	0,00049	0,0042	0,0067
	20	5	0,0081	0,00021	0,0078	0,0089
	30	5	0,0095	0,00058	0,0076	0,0109
	40	5	0,0170	0,00236	0,0109	0,0213

Her iki UK türü için deney sonucunda elde edilen standart hata değerlerinin birbirine yakın olduğu, %40 oranında UK ikame edilen numunelerde standart hata değerlerinin diğer gruplara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak çimento hacim genişleme miktarlarını gösteren grafik Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Çimento hacim genişleme miktarlarına ait grafik

Soma Termik santralinden temin edilen uçucu külün Yatağan termik santralinden elde edilene göre daha fazla genişleme göstermektedir ve her iki uçucu kül türünde de %30 ikameden sonra ASTM C 151 "Standart test method for autoclave expansion of portland cement" standartında çimento genişmesi için belirtilen maksimum limit olan %0,01'lik genişleme miktarını aşmaktadır [5].

### 5.2. Çoklu Lineer Regresyon Bulguları

DeneySEL çalışma sonucunda elde edilen veriler üzerinde çoklu lineer regresyon uygulanmıştır. Uçucu kül ikame miktarı ve MgO miktarına bağlı olarak genişleme değerlerinin tahmini için çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi sonucunda genişleme miktarını tahmin eden  $Y=a+bX_1+cX_2$  model denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde;

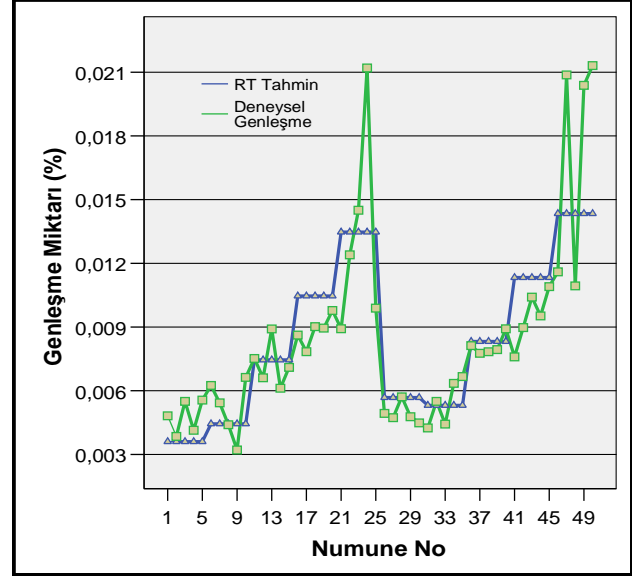
$Y$ = Genleşme Miktarı (%)

$X_1$ = Uçucu kül ikame miktarı (%)

$X_2$ = Uçucu küldeki MgO miktarı (%)

$a$ ,  $b$ ,  $c$ = regresyon katsayılarını ifade etmektedir.

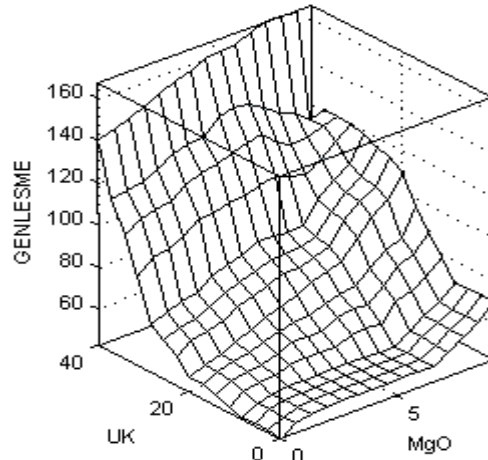
Çoklu lineer regresyon analizi sonucunda  $r^2=0,63$  determinasyon katsayısına sahip olan  $Y=0,0043+0,00027X_1-0,00021X_2$  model denklemi elde edilmiştir. Elde edilen regresyon model denkleminin tahmin ettiği genişleme değerleri ile deney sonuçlarının karşılaştırılmasına ait grafik Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11. DeneySEL genişleme ve RT'nin tahmin ettiği genişleme değerleri

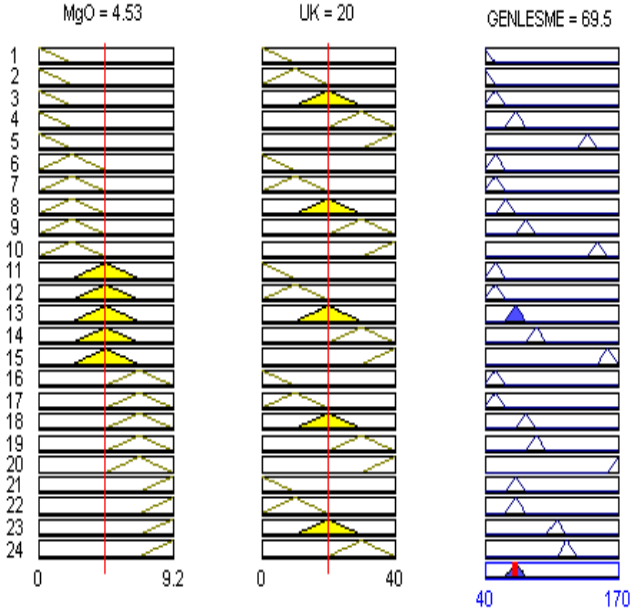
### 5.3. Bulanık Mantık Modeli Bulguları

Bulanık mantık modelinde tanımlanan kurallara göre girdiler ile çıktı arasında oluşan ilişimi gösteren grafik Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 12. Oluşturulan kurallara göre girdiler ile çıktı arasındaki ilişki

Şekil 12' de görüldüğü gibi UK ve MgO miktarının artması çimento hacim genişmesini arttırmaktadır. Geliştirilen modelde kurallara göre ortaya çıkan bu ilişki literatürde bilinen ilişki ile benzerlik göstermektedir. Bulanık mantık modelinde kurallar oluşturulduktan sonra modelin tahmin ettiği sonuçları belirlemek için Şekil 13'te görülen durulaştırma ekranı kullanılmıştır. Durulaştırma ekranında en sonda bulunan sütun modelin sayısal olarak tahmin ettiği (durulaştırılmış) değeri göstermektedir.

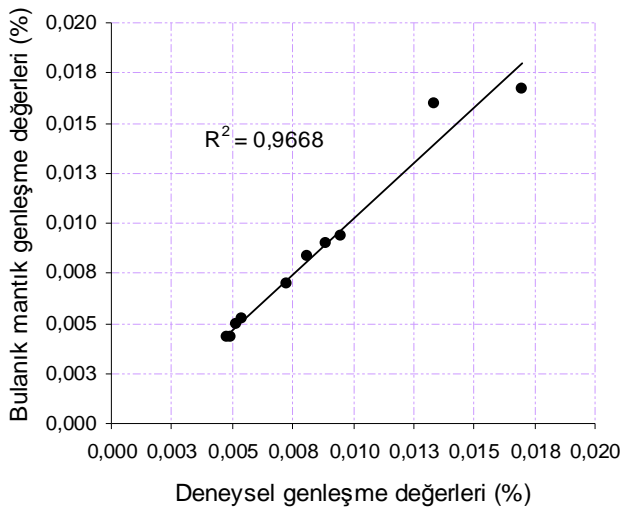


Şekil 13. Bulanık mantık modeline ait durulaştırma ekranı

Durulaştırma işleminden sonra modelden elde edilen sonuçlar ve deney sonuçları girdilere bağlı olarak Çizelge 5'te verilmiştir. Ayrıca aralarındaki ilişki grafiği de Şekil 14'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Modelden elde edilen sonuçlar ve deney sonuçları

MgO (%)	Uçucu Kül (%)	Deney sonuçları	Model sonuçları
0	0	0,004774	0,004290
4,53	10	0,005184	0,005000
4,53	20	0,007252	0,006950
4,53	30	0,008842	0,008960
4,53	40	0,013382	0,016000
7,05	10	0,005439	0,005230
7,05	20	0,008115	0,008340
7,05	30	0,009481	0,009330
7,05	40	0,017020	0,016700



Şekil 14. Bulanık model ve deney sonuçları arasındaki ilişki

Modelden elde edilen veriler ile deney sonuçları arasında serpm grafiği incelendiğinde oluşturulan bulanık mantık modelinin genişleme değerlerini %3 gibi düşük bir oranda hata ile tahmin ettiği görülmektedir.

## 6. Sonuçlar

Çalışmada Yatağan ve Soma termik santrallerinden elde edilen yüksek kalsiyum içerikli uçucu küllerin çimento numunelerinde kullanımı ile ortaya çıkan genişleme miktarlarının tahmin edilmesi amacıyla, karışım içerisinde çimento ile %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında Yatağan ve Soma Termik santrallerinin uçucu külleri ikame edilerek, genişleme örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde otoklav yoluyla genişleme deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül ikame oranları ve MgO miktarlarına bağlı olarak çimento genişleme miktarını tahmin eden çoklu lineer regresyon ve bulanık mantık modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Soma Termik santralinden temin edilen uçucu külün Yatağan termik santralinden elde edilene göre daha fazla genişleme gösterdiği, her iki uçucu kül türünde %30 ikamesinden sonra çimento numunelerinin ASTM C 151 standartında belirtilen maksimum limit olan %0,01'lik genişleme miktarını aştığı tespit edilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda çoklu lineer regresyon yöntemiyle oluşturulan modelin genişleme miktarlarını % 37 oranında hata ile, geliştirilen bulanık mantık modelinin ise % 3 oranında hata ile tahmin ettiği belirlenmiştir. Oluşturulan bulanık modelinin genişleme miktarlarını regresyon yöntemine göre %34 oranında daha doğru tahmin ettiği görülmektedir. Sonuç olarak bulanık mantık modelinin deney sonuçlarını tahmin etmede güçlü bir yöntem olduğu görülmüştür.

## Kaynaklar

- [1]. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", DEÜ. Müh. Fak. Yayın No: 298, DEÜ., 282 sayfa., İzmir, 2002.
- [2]. Turhan, Y.E., "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, s:42, 2003.
- [3]. Malhotra, V.M., Mehta, P.K., "High Performance, High Volume Fly Ash Concrete" Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., 101 page, Ottawa, 2002.
- [4]. Liu, Z., Tang, M., Cui, X., "Expansion of Cement Containing Crystalline Magnesia With and Without Fly Ash and Slag", Cement, Concrete & Aggregates, Vol 20, Issue 1, 6 page, June, 1998.
- [5]. ASTM C 151, Standart test method for autoclave expansion of portland cement, *American Society For Testing And Materials*, 2001.
- [6]. Pei-wei, G, Sheng-xing, W, Xiao-lin, L, Min, D, Ping-hua, L., "Soundness evaluation of concrete with MgO", Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 1, Pages 132-138, January 2007.
- [7]. Ali, M.M., Mullick, A.K., "Volume Stabilisation of High MgO Cement: Effect of Curing Conditions and Fly Ash Addition", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1585-1594, 1998.

- [8]. TS EN 197-1, Genel çimentolar- Birleşim özellikleri ve uygunluk kriterleri, 2002.
- [9]. Liu, Z., Tang, M., Cui, X., "Expansion of Cement Containing Crystalline Magnesia With and Without Fly Ash and Slag", *Cement, Concrete & Aggregates*, Vol 20, Issue 1, 6 page, June, 1998.
- [10]. Yazıcı, H., "Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve Sülfürik Asit Dayanıklılığı", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 11, Sayı: 3, Sayfa: 443-448, Denizli, 2005.
- [11]. P.K. Metha, D. Pritz, Magnesium Oxide additive for producing selfstress in mass-concrete, Proceeding of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, France, vol III, 180, pp. v6-v9, 1981.
- [12]. Şen, Z., Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, ISBN: 9758509233, Bilge Kültür Sanat Yayınevi, İstanbul, 2001.
- [13]. Zadeh, L. A., Fuzzy Sets. Information and Control, 8, 3, 38-53, 1965.
- [14]. Mamdani, ve Assilian, An Experiment In Linguistic Synthesis With A Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7, 1, 1-3, 1975.
- [15]. Kişi, Ö., Karahan, M. E., Şen, Z., Nehirlerdeki Aski Maddesi Miktarının Bulanık Mantık İle Modellenmesi. itüdergisi/d Mühendislik Cilt:2, Sayı:3, 43-54, 2003.
- [16]. Beycioğlu, A., Endüstriyel Atıkların Hafif Beton Özelliklerine Etkilerinin Bulanık Mantık Yöntemiyle Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [17]. TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, 2002.
- [18]. ASTM C230/C230M-98e2 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement
- [19]. ASTM C109/C109M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- [20]. ASTM C1437-99 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
- [21]. TS 11052, Çimentolar-Uzama Tayini-Otoklav Metodu, 1993.