

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ VE ÜÇ FAZLI KOMPOZİTLERİN
ELASTİK MODÜLÜNÜN BELİRLENMESİ

AHMET ONUR AKOL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adnan ÇOLAK

EDİRNE-2024

Ahmet Onur AKOL'un hazırladığı “**İKİ VE ÜÇ FAZLI KOMPOZİTLERİN ELASTİK MODÜLÜNÜN BELİRLENMESİ**” başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Mimarlık** Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Adnan ÇOLAK

.....

Prof. Dr. Turgay COŞGUN

.....

Doç. Dr. Hatice KIRAN ÇAKIR

.....

Tez Savunma Tarihi: 01/07/2024

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığımı onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Adnan ÇOLAK
Tez Danışmanı

.....

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

.....
Prof. Dr. Muharrem Tolga SAKALLI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

01 / 07 / 2024

Ahmet Onur AKOL

İmza

Yüksek Lisans Tezi

İki ve Üç Fazlı Kompozitlerin Elastik Modülünün Belirlenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Mimarlık Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, iki ve üç fazlı kompozitlerin mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik sonuçları sunulmuştur. Literatürdeki mevcut denklemlerin bu malzemeler için deneysel olarak elde edilen elastisite modülleri ve basınç dayanımlarını tanımlayıp tanımlamadığı araştırılmıştır. Bu sonuçlara uymayan bazı denklemler modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş Sherban denklemi ile yapılan hesaplamalar, bu denklemin sıradan ve silis dumanlı çimento hamurlarının gözenekliliğe bağlı mekanik özelliklerini tahmin etmede oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Epoksi emülsiyonu içeren betonların basınç dayanımındaki azalmalar, karışıma silis dumanı eklenerek en aza indirilebilmektedir. Önerilen denklemler, hem su/çimento oranına hem de agrega/çimento oranına bağlı olarak betonun basınç dayanımındaki değişiklikleri açıklamaktadır. Elde edilen sonuçlardan, epoksi emülsiyonu ve silis dumanı içeren Portland çimentolu betonların maksimum basınç dayanımlarının bu denklemler ile hesaplanabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca bu tip betonların gerilme ve şekil değiştirme davranışlarını tanımlamak için Çolak modeli önerilmiştir. Bu model, en yüksek gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirmeye kadar eğrinin tüm özelliklerini yansıtmaktadır. Böylece eğrinin altında kalan alan sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmış ve betonların kırılma tokluğu belirlenmiştir. Beyaz Portland çimentosu ve alçı karışımından oluşan iki fazlı kompozitlerin elastisite modülleri Reuss, modifiye Paul, modifiye Ishai ve Popovics modelleri ile hassas bir şekilde belirlenmiştir. Beyaz Portland çimentosu, alçı ve kireç içeren üç fazlı kompozitlerin elastisite modülleri Çolak modeli ile hassas bir şekilde hesaplanmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki uyum, denklemleri türetmek ve değiştirmek için kullanılan varsayımların doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Yıl : 2024

Sayfa Sayısı : 83

Anahtar Kelimeler : Çimento Hamuru, Silis Dumanı, Porozit, Mekanik Özellikler, Modelleme, Alçı, Kireç



Master Thesis

Determination Of Modulus Of Elasticity Of Two And Three Phase Composites

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Department Of Architecture

ABSTRACT

In this study, the experimental and theoretical results of mechanical properties of two- and three-phase composites are presented. It was investigated whether the existing equations in the literature describe the experimentally obtained elastic moduli and compressive strengths for these materials. Some equations that do not fit these results have been modified. The calculations performed with the modified Sherban equation show that this equation is very successful in predicting the porosity-dependent mechanical properties of ordinary and silica fume cement pastes. The reductions in compressive strength of concretes containing epoxy emulsion can be minimized by adding silica fume to the mixture. The proposed equations explain the changes in the compressive strength of concrete depending on both the water to cement ratio and the aggregate to cement ratio. From the results obtained, it was understood that the maximum compressive strengths of Portland cement concretes containing epoxy emulsion and silica fume can be calculated by these equations. In addition, Çolak model has been proposed to define the stress and strain behaviour of these types of concretes. This model reflects all the properties of the curve up to the strain corresponding to the peak stress. Thus, the area under the curve was calculated by the finite difference method and the fracture toughness of the concretes was determined. The modulus of elasticity of two- phase composites, consisting of a mixture of white Portland cement and gypsum were determined precisely by Reuss, modified Paul, modified Ishai and Popovics models. Elasticity modules of three-phase composites containing white Portland cement, gypsum and lime were calculated precisely with Çolak model. The agreement between theoretical

and experimental results proves the correctness of the assumptions used to derive and modify the equations.

Year : 2024

Number of Pages : 83

Keywords : Cement Paste, Silica Fume, Porosity, Mechanical Properties, Modelling, Gypsum, Lime



ÖNSÖZ

Bu çalışma, iki ve üç fazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel ve teorik olarak araştırmaktadır. Literatürdeki denklemlerin, malzemelerin deneysel olarak elde edilen elastisite modüllerini ve basınç dayanımlarını tanımlayıp tanımlamadığı incelenmiş ve uygun olmayan denklemler modifiye edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çimento bazlı malzemelerin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan denklemlerin doğruluğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın ortaya çıkarılmasında bilgi ve tecrübesi ile her alanda yoluma ışık tutan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Adnan ÇOLAK'a (Trakya Üniversitesi), her zaman yanımda olan ve sürekli desteğini esirgemeyen eşime ve aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	5
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ TANIMLAYAN DENKLEMLER	5
2.1. Kompozitlerin Elastisite Modülünü Gözenekliliğe Bağlı Olarak Tanımlayan Denklemler.....	5
2.1.1. Modifiye Edilmiş Paul Modeli.....	5
2.1.2. Modifiye Edilmiş Ishai Modeli.....	7
2.1.3. Pabst ve Gregorova Modeli.....	7
2.1.4. Modifiye Edilmiş Sherban Modeli.....	8
2.2. Kompozitlerin Basınç Dayanımını Gözenekliliğe Bağlı Olarak Tanımlayan Denklemler.....	8
2.2.1. Modifiye edilmiş Sherban Modeli.....	8
2.2.2. Lian Modeli.....	8
2.3. Kompozitlerin Basınç Dayanımını Su/Çimento ve Agrega/Çimento Oranlarına Bağlı Olarak Tanımlayan Denklemler (Çolak Modelleri).....	9

2.4. Kompozitlerin Gerilme-Şekil Değişirme Davranışını ve Kırılma Tokluğunu Tanımlayan Denklemler (Çolak Modelleri)	11
2.5. Kompozitlerin Bileşimine Bağlı Olarak Elastisite Modülünü Tanımlayan Denklemler	12
2.5.1. İki Fazlı Kompozitler için Mikromekanik Modeller	12
2.5.2. Voigt Modeli.....	12
2.5.3. Reuss Modeli	14
2.5.4. Modifiye Edilmiş Paul Modeli	15
2.5.5. Modifiye Edilmiş Ishai Modeli.....	17
2.5.6. Popovics Modelleri.....	18
2.6. Üç Fazlı Kompozitler için Mikromekanik Modeller	19
2.6.1. Shaffer Modeli	19
2.6.2. Çolak Modeli I.....	19
2.6.3. Çolak Modeli II	21
BÖLÜM 3	24
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24
3.1. Silis Füme Karışımli Çimento Hamurları için Malzeme ve Yöntem	24
3.2. Epoksi Emülsiyonlu ve Silis Dumanlı Betonlar için Malzeme ve Yöntem	25
3.3. Portland Çimentosu-Alçı ve Portland Çimentosu-Alçı-Kireç Karışımları için Malzeme ve Yöntemler	29
BÖLÜM 4	31
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Portland Çimento Hamurlarının Mekanik Özelliklerindeki Gözenekliliğe Bağlı Değişimi	31
4.2. Elastisite Modülleri.....	31
4.3. Basınç Dayanımları	32
4.4. Hesaplanan Elastisite Modüllerinin Deneysel Verilerle Karşılaştırılması	33
4.4.1. Modifiye Edilmiş Paul Modeli	33
4.4.2. Spriggs Modeli	34
4.4.3. Phani ve Niyogi Modeli.....	35
4.4.4. Sherban Modeli.....	36
4.5. Hesaplanan Basınç Dayanımlarının Deneysel Verilerle Karşılaştırılması	37
4.5.1. Ryshkewitch-Duckworth Modeli	37

4.5.2. Bal'shin Modeli.....	38
4.5.3. Sherban Modeli.....	39
4.6. Portland Çimentolu Betonların Mekanik Özelliklerinde Silis Dumanı ve Epoksi Emülsiyonuna Bağlı Değişim.....	40
4.6.1. Basınç Dayanımları	40
4.6.2. Hesaplama Yöntemi	41
4.7. Kırılma Tokluğu	46
4.8. Beyaz Portland Çimentosu-Alçı Karışımlarının Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	47
4.8.1. Reuss Modeli	47
4.8.2. Modifiye Edilmiş Paul Modeli	48
4.8.3. Modifiye Edilmiş Ishai Modeli.....	49
4.8.4. Popovics Modeli	50
4.9. Beyaz Portland Çimentosu-Alçı-Kireç Karışımlarının Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	50
BÖLÜM 5	53
SONUÇLAR	53
5.1. Silis Dumanı Katkılı Portland Çimentosu Hamurlarına İlişkin Sonuçlar	53
5.2. Silis Dumanlı ve Epoksi Emülsiyonlu Portland Çimentolu Betonlara İlişkin Sonuçlar.....	53
5.3. Portland Çimentosu-Alçı ve Portland Çimentosu-Alçı-Kireç Karışımlarına İlişkin Sonuçlar.....	54
KAYNAKLAR	55
EK:	61
DENKLEMLERİN TÜRETİLMESİ	61
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

a	Modeldeki gözenek geometrisiyle ilgili bir parametre
m	Gözenekli malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlayan parametre
Δ	Matrisin yer değiştirmesi
Δ_u	Birim hücrenin yer değiştirmesi
Δ_0	Gözenek bölgesinde paralel olarak düzenlenmiş matrisin yer değiştirmesi
Δ_c	Betonun gözenek bölgesinde yer değiştirmesi
Δ_1	Bağlayıcı 1'in yer değiştirmesi
Δ_2	Bağlayıcı 2'nin yer değiştirmesi
Δ_3	Bağlayıcı 3'ün yer değiştirmesi
ϵ	Kompozitin Şekil değiştirme oranı
ϵ_u	Birim hücrenin Şekil değiştirme oranı
ϵ_0	Gözenek bölgesinde paralel olarak düzenlenmiş matrisin Şekil değiştirme oranı
ϵ_c	Betonun gözenek bölgesindeki Şekil değiştirme oranı
ϵ_1	Bağlayıcı 1'in Şekil değiştirme oranı
ϵ_2	Bağlayıcı 2'nin Şekil değiştirme oranı
σ	Basınç dayanımı

σ_u	Birim hücre üzerindeki gerilme
σ_0	Gözenek bölgesinde paralel olarak düzenlenmiş matrisin üzerindeki gerilme
σ_m	Betonun maksimum basınç dayanımı
σ_c	Beton üzerindeki gerilme
σ_a	Betonun su/çimento oranının herhangi bir değerine karşılık gelen basınç dayanımı
σ_1	Bağlayıcı 1 üzerine etki eden gerilim
σ_2	Bağlayıcı 2 üzerine etki eden gerilim
σ_3	Bağlayıcı 3 üzerine etki eden gerilim
F	Birim hücre üzerine etki eden kuvvet
E	Elastisite modülü (GPa)
E_0	Gözenek bölgesinde paralel olarak düzenlenmiş matrisin elastisite modülü (GPa)
E_m	Matris fazlarının elastisite modülleri
E_c	Çimento fazlarının elastisite modülleri
E_1	Bağlayıcı 1'in elastisite modülü (GPa)
E_2	Bağlayıcı 2'nin elastisite modülü (GPa)
E_3	Bağlayıcı 3'ün elastisite modülü (GPa)
E_{2f}	Lifli bileşenlerin elastisite modülleri
E_{2s}	Çeşitli bileşenlerin elastisite modülleri
V_1	Bağlayıcı 1'in hacim oranı (%)

V_2	Bağlayıcı 2'nin hacim oranı (%)
V_3	Bağlayıcı 3'ün hacim oranı (%)
V_{fs}	Katı bileşenlerin hacim oranı (%)
V_{ms}	Matris bileşenlerinin hacim oranı (%)
V_{mp}	Polimer bileşenlerinin hacim oranı (%)
p	Gözeneklilik
p_0	Dayanımların sıfıra yaklaştığı gözeneklilik oranı
M	Kütle
M_0	Katı maddenin mekanik özellikleri
P	Toplam uygulanan basınç
P_1	Bağlayıcı 1 üzerindeki basınç
P_2	Bağlayıcıyı 2 üzerindeki basınç
ρ	Yoğunluk (Kg/lt)
n	Basınç dayanımını belirleyen parametre
b	Basınç dayanımı hesaplamasına ilişkin katsayı
c	Ultrason hızı (km/s)
e	Üs veya katsayı
B	Malzeme parametreleri
A	Agrega içeriği
c	Çimento içeriği

w Su içeriği

t Zaman

β Su-çimento oranı ile ilgili parametre

λ Basınç dayanımı hesaplamasını etkileyen sınır koşulları ve su-çimento oranından türetilen parametre



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Prizmatik boşluk içeren birim hücre modeli.....	5
Şekil 2.2. Voigt birim hücre modeli.....	13
Şekil 2.3. Reuss birim hücre modeli	14
Şekil 2.4. Prizma şekilli bir faza sahip birim hücre modeli	15
Şekil 2.5. Shaffer birim hücre modeli	19
Şekil 2.6. Önerilen model I için birim hücre modeli	20
Şekil 2.7. Önerilen model II için birim hücre modeli.	22
Şekil 3.1. Sıradan beton için gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	27
Şekil 3.2. %10 silis dumanı içeren beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	27
Şekil 3.3. %10 epoksi emülsiyonu içeren beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	28
Şekil 4.1. Modifiye Edilmiş Paul modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.2. Spriggs modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.	35
Şekil 4.3. Phani ve Niyogi modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.	36
Şekil 4.4. Sherban modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.	37
Şekil 4.5. Ryshkewitch-Duckworth modeli ile hesaplanan basınç dayanımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.6. Bal'shin modeli ile hesaplanan basınç dayanımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.	39

Şekil 4.7. Sherban modeli ile hesaplanan basınç dayanımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.	40
Şekil 4.8. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin sıradan betonlar için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması.	42
Şekil 4.9. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %10 silis dumanı içeren betonlar için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması.	42
Şekil 4.10. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %10 epoksi emülsiyonu içeren betonlar için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması.	43
Şekil 4.11. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması.	43
Şekil 4.12. Eşitlik 2.50'nin deneysel verilerle karşılaştırılması.	47
Şekil 4.13. Eşitlik 2.64'ün deneysel verilerle karşılaştırılması.	48
Şekil 4.14. Eşitlik 2.78'in deneysel verilerle karşılaştırılması.	49
Şekil 4.15. Eşitlik 2.79'un deneysel verilerle karşılaştırılması.	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Betonların bileşimi (kg/m^3).....	25
Çizelge 3.2. Malzemelerin özgül ağırlığı (kg/dm^3).....	26
Çizelge 4.1. Sıradan betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları.....	44
Çizelge 4.2. %10 silis dumanı içeren betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları.....	44
Çizelge 4.3. %10 epoksi emülsiyonu içeren betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları.....	45
Çizelge 4.4. %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı içeren betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları.....	45
Çizelge 4.5. Eşitlik 2.33 ile hesaplanan parametreler.....	46
Çizelge 4.6. Eşitlik 2.95 ile hesaplanan teorik değerlerin deneysel verilerle karşılaştırılması.....	51
Çizelge 4.7. Eşitlik 2.108 ile hesaplanan teorik değerlerin deneysel verilerle karşılaştırılması.....	52

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İki ve üç fazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için gözeneklilik, gerilme ve şekil değiştirme davranışları ve bileşimlerine bağlı olarak birçok model geliştirilmiştir. Gözenekliliğe bağlı olarak geliştirilen denklemler, metal-seramik (Bal'shin, 1949), alçı sıva (Çolak, 2006c), Portland çimento ve trikalsiyum silist hamurları (Helmut ve Turk, 1966) gibi malzemelerin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında başarıyla kullanılmıştır. Bu denklemler silis dumanı içeren çimento hamurlarının dayanım ve elastik özelliklerinin hesaplanması için de uygun olabilmektedirler. Ancak Khalil (1996), silis dumanı içeren çimento hamurlarının özgül yüzey alanı ve toplam gözenek hacmindeki değişimin sertleşmiş çimento hamurunun gözenek yapısı ve gözenek geometrisinin değişmesine neden olduğunu belirtmiştir. Baştan (2008) tarafından yapılan çalışmada, karışımdaki silis dumanı miktarı arttıkça silis dumanı içeren çimento hamurlarının basınç dayanımının ve elastisite modülünün değiştiği gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerdeki artış veya azalışlar denklemi tanımlayan katsayıların değerlerinde de değişime neden olacaktır. Bu nedenle silis dumanı içeren çimento hamurlarında test sonuçlarını tahmin etmek için çok değişkenli denklemler kullanmak daha uygundur. Bu amaçla literatürdeki denklemler incelenmiş ve silis dumanı içeren çimento hamurlarına uygulanabilirlikleri araştırılmıştır. Teorik veya deneysel olarak türetilen bazı denklemler modifiye edilmiştir. Bu denklemler ile yapılan hesaplamalar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemenin diğer bir yolu ise malzemelerin gerilme ve şekil değiştirme davranışlarını tanımlayan bağıntıları kullanmaktır. Bu tür denklemler genel olarak silis dumanı ve polimer bazlı katkıların betonun mekanik

özelliklerini nasıl ve ne ölçüde etkilediğini araştırmak için kullanılmıştır. Bu amaçla daha önce yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

Sellevold ve Radjy (1983), çimentoya ağırlıkça %8-16 oranında silis dumanı ekleyerek yüksek dayanımlı betonlar elde etmişlerdir. Betona eklenen bir diğer önemli katkı türü de polimer esaslı katkılardır. Bu tür katkılar genel olarak su/çimento oranını azaltmak, homojen bir karışım elde etmek ve betonun dayanıklılık özelliklerini artırmak için kullanılır. Genellikle karışıma %5-20 oranında ilave edilirler (Ohama, 1987). Schulze (1999) tarafından yapılan çalışmada stiren-akrilik kopolimer ile çok yüksek eğilme mukavemetine sahip harçlar üretilmiştir. Zappia, Sandrolini ve Motori (1990) de karışımda suda dağılabilen bisfenol A bazlı epoksi reçine kullanarak eğilme mukavemeti yüksek harçlar elde etmişlerdir. Aggarwal, Thapliyal ve Karade (2007), çalışmalarında epoksi emülsiyonlarının betonun basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Ancak polimerlerin çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girme olasılığı vardır. Chandra, Berntsson ve Flodin (1981), kirecin kalsiyum iyonları ile stiren-metakrilat polimer dispersiyonunun karboksilat grupları arasında çapraz bağ oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu durum polimer dispersiyonunun çökmesine yol açmıştır (Chandra ve ark., 1981). Bu tür kimyasal etkileşimler betonun kırılma parametrelerinde değişikliklere neden olabilir. Nagaraj, Sundura Raja Iyengar ve Kameswara Rao (1988), karışıma doğal kauçuk lateks ekleyerek betonun deformasyon kapasitesini artırmıştır. Mai ve Cotterell (1986), betona %10 epoksi emülsiyonu ekleyerek maksimum kırılma tokluğu elde etmişlerdir. Epoksi emülsiyonlu betonlarda çatlak gelişim direncindeki artış eğilme dayanımlarında da artışa neden olmuştur (Mai ve Cotterell 1986). Xiao ve Gu'ya (2009) göre epoksi emülsiyonlu çimento harçlarının eğilme mukavemeti karışımdaki epoksi emülsiyon miktarı ile orantılı olarak artmaktadır. Li, Zuo, Dong ve Xing (2020), epoksi emülsiyonlu çimento harçlarının performansını artırmak için karışıma inorganik katkılar eklemiştir. Elde edilen mekanik özellikler katkı türüne bağlı olarak değişmektedir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar silis dumanı ve polimer esaslı katkıların betonun mekanik özelliklerini artırdığını göstermektedir. Ancak polimer katkılı betonlarda en önemli zayıflık basınç dayanımındaki azalmadır. Bu çalışma, epoksi emülsiyonlu betonların basınç dayanımındaki azalmayı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla sıradan çimento, epoksi emülsiyonlu çimento, silis dumanlı çimento ve epoksi emülsiyon-

silis dumanlı çimento ile üretilen betonlarda su/çimento oranındaki değişimlerin basınç dayanımını nasıl ve ne şekilde etkilediği araştırılmıştır. Farklı su/çimento oranlarında üretilen betonların basınç dayanımları belirlenmiştir. Betonların maksimum basınç dayanımlarını belirlemek için Çolak (2006a) ve Çolak (2006b) tarafından geliştirilen matematiksel denklemler kullanılmıştır. Ayrıca sıradan çimento, epoksi emülsiyonu içeren çimento, silis dumanlı çimento ve epoksi emülsiyon-silis dumanlı çimentolar ile üretilen betonların gerilme ve şekil değiştirme davranışları Çolak modeli (2005a) ve Çolak modeli (2005b) ile tanımlanmış ve kırılma toklukları hesaplanmıştır.

Yukarıda tanımlandığı üzere kompozitlerin mekanik özellikleri, kompoziti oluşturan malzemelerin karışım oranlarına bağlı olarak belirlenebilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda mikromekanik teoriler kullanılarak birçok denklem geliştirilmiştir. Feng, Mai ve Qin (2003), kompozitlerin elastik özelliklerini belirlemek için hem iç içe geçen hem de dağılmış fazları dikkate alan bir mikromekanik model geliştirmiştir. Wegner ve Gibson (2000), iç içe geçen fazlı kompozitlerin elastik özelliklerini tanımlamak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Horny ve Schulz (2022), çalışmalarında iç içe geçen metal-seramik kompozitlerin elastik özelliklerini belirlemek için yeni nesil bir algoritma sunmuştur. Wang, Zhou, Li ve Liang (2022), fazlar arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak iç içe geçen faz kompozitlerinin mekanik davranışını tanımlayan yeni bir mekanik model geliştirmiştir. Lezgy-Nazargah'ın (2015) araştırması ve Lezgy-Nazargah ve Eskandari-Naddaf'ın (2018) sonraki çalışmaları, piezoelektrik fiber kompozitlerin termo-elektro-mekanik özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlamış ve bu çalışmalar doğrultusunda yeni bir mikromekanik model geliştirilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda türetilen mikromekanik denklemler, iki ve üç fazlı kompozitlerin elastik özelliklerini tanımlamak için başarıyla kullanılmaktadır. Bu modeller aynı zamanda metal-metal (Krishna, Kumar, Swapna, Rao & Bhargava, 2017), polimer-polimer (Kadambi, Luniya & Dhattrak, 2021) ve seramik-seramik (Rodeghiero ve ark., 1998) matrisli kompozitlerin özelliklerini belirlemek için de uygundur. Metal-seramik gibi malzemelerin karışımından oluşan kompozitler için de başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Poniznik, Salit, Basista & Gross, 2008). Ayrıca, bu denklemler çimento, alçı ve kireç gibi yapı malzemelerinin karışımından oluşan kompozitlerin elastisite modülünü belirlemek için de kullanılabilir.

Literatürde beyaz Portland çimentosu-alçı ve beyaz Portland çimentosu-alçı-kireç karışımlarının elastisite modülü için ise çok az veri bulunmaktadır. Bu konuda Ekşi (2021) tarafından yapılan çalışmada bu tür kompozitlerin statik elastisite modülleri deneysel olarak belirlenmiş olup Portland çimentosu-alçı karışımlarında alçı miktarı arttıkça elastisite modülünün azaldığı tespit edilmiştir. Genel olarak bu tür karışımların basınç dayanımı ve dayanıklılık özellikleri detaylı olarak açıklanmıştır (Dolezelova, Svora & Vimmrova, 2017).

Bu çalışmada, karışıma giren fazların kompozitin elastisite modülünü nasıl ve ne şekilde etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla, beyaz Portland çimentosu ve alçı karışımından oluşan iki fazlı kompozitlerin elastisite modülü deneysel olarak belirlenmiştir. Bu veriler, literatürde yaygın olarak kullanılan modeller yardımıyla hesaplanan teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çolak modelleri (2005b), beyaz Portland çimentosu, alçı ve kireç karışımları ile üretilen üç fazlı kompozitlerin elastisite modülünü tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu modellerle hesaplanan teorik sonuçların deneysel verilerle uyumlu olup olmadığı tartışılmıştır.

BÖLÜM 2

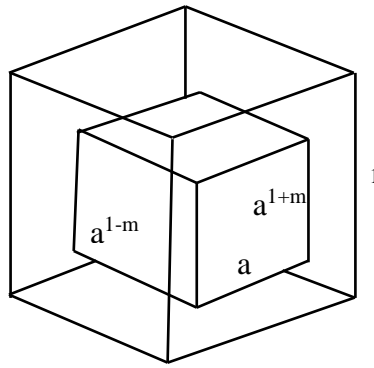
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ TANIMLAYAN DENKLEMLER

2.1. Kompozitlerin Elastisite Modülünü Gözenekliliğe Bağlı Olarak Tanımlayan Denklemler

Aşağıda açıklanan modeller deneysel veya teorik olarak türetilmiştir.

2.1.1. Modifiye Edilmiş Paul Modeli

Paul modeli (1960) Şekil 2.1'de gösterildiği üzere birim hücrede prizmatik bir boşluk oluşturularak modifiye edilmiştir. Denklemin türetilmesinde eşit gerilme prensibi kullanılmıştır. Denklemin türetilme yöntemi aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.1. Prizmatik boşluk içeren birim hücre modeli.

Birim hücrenin yer değiştirmesi, gözenek bölgesinde paralel olarak düzenlenmiş matrisin yer değiştirmesi ile kalan matrisin yer değiştirmesinin toplamına eşittir. Bu denklem matematiksel olarak aşağıdaki gibidir.

$$\Delta_u = \Delta_0 + \Delta \quad (2.1)$$

Birim hücrenin yer değiştirmesini tanımlayan bu bağıntı, Şekil değiştirme teoremine göre aşağıdaki gibidir.

$$\epsilon_u = \epsilon_0(1 - a^{1+m}) + \epsilon a^{1+m} \quad (2.2)$$

EŞitlik 2.2, Hooke yasasına (Timoshenko ve Goodier, 1951) göre gerilme cinsinden aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\sigma_u}{E} = \frac{\sigma_u}{E_0}(1 - a^{1+m}) + \frac{\sigma}{E_0}a^{1+m} \quad (2.3)$$

Birim hücreye etki eden gerilme aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_u = F \quad (2.4)$$

Bu denklemde;

F; birim hücre üzerine etki eden kuvveti temsil eder.

Gözenek bölgesinde paralel olarak düzenlenmiş matris üzerine etki eden gerilme aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{F}{(1-a^{2-m})} \quad (2.5)$$

EŞitlik 2.4'teki σ_u değeri ve EŞitlik 2.5'teki σ değeri EŞitlik 2.3'te yerine konduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{F}{E} = \frac{F}{E_0}(1 - a^{1+m}) + \frac{F}{E_0(1-a^{2-m})}a^{1+m} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{(1-a^{1+m})}{E_0} + \frac{a^{1+m}}{E_0(1-a^{2-m})} \quad (2.7)$$

Yukarıdaki denklemde cebirsel işlemler tamamlandığında denklem aşağıdaki Şekli alır.

$$E = E_0 \left(\frac{1-a^{2-m}}{1-a^{2-m}+a^3} \right) \quad (2.8)$$

Birim hücrenin gözenekliliği aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$p = a^3 \quad (2.9)$$

Gözenek geometrisini tanımlayan a parametresinin EŞitlik 2.9'daki değeri EŞitlik 2.8'de yerine konularak denklemin son hali elde edilir.

$$E = E_0 \left(\frac{1 - p^{\frac{2-m}{3}}}{1 - p^{\frac{2-m}{3}} + p} \right) \quad (2.10)$$

$m=0$ Paul denklemini (1960) tanımlar.

2.1.2. Modifiye Edilmiş Ishai Modeli

Ishai modeli (1965), birim hücrede prizmatik bir boşluk oluşturularak modifiye edilmiştir.

Bu durum Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Denklem türetilmesinde eşit gerilme prensibi kullanılmıştır. Denklem türetilme yöntemi aşağıda verilmiştir.

Birim hücrenin yer değiştirmesi, gözeneksiz matrisin yer değiştirmesine eşittir. Bu denklem matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta_u = \Delta_0 \quad (2.11)$$

Yer değiştirmeyi tanımlayan bağıntı Eşitlik 2.11'de yerine konduğunda aşağıdaki bağıntı elde edilir (Timoshenko ve Goodier, 1951).

$$\frac{F}{E} = \frac{F}{E_0(1 - a^{2-m})} \quad (2.12)$$

Eşitliğin son hali Eşitlik 2.9'daki a değerinin Eşitlik 2.12'de yerine konulmasıyla elde edilir.

$$E = E_m \left(1 - p^{\frac{2-m}{3}} \right) \quad (2.13)$$

$m=0$ Ishai denklemini (1965) tanımlar.

2.1.3. Pabst ve Gregorova Modeli

Pabst ve Gregorova (2004) kırılğan malzemelerin elastisite modülünün gözenekliliğe bağımlılığını ifade eden yeni bir denklem önermiştir. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$E = E_0 \left(1 - p \right) \left(1 - \frac{p}{p_0} \right) \quad (2.14)$$

p_0 ; elastisite modülünün sıfır olduğu gözenekliliği temsil eder.

2.1.4. Modifiye Edilmiş Sherban Modeli

Sherban (1973) gözenekli malzemelerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için aşağıdaki denklemi türetmiştir.

$$M = M_0(1 - p^2)^2 e^{-bp} \quad (2.15)$$

Bu denklemde;

M ; gözenekli malzemelerin mekanik özelliklerini temsil eder,

M_0 ; katı maddeinin mekanik özelliklerini temsil eder,

p ; gözenekliliği temsil eder.

Elastisite modülü için bu denklemin modifiye edilmiş şekli aşağıda verilmiştir.

$$E = E_0(1 - ap^n)^m e^{-bp} \quad (2.16)$$

Bu denklemde;

a , n , m ve b malzeme parametreleridir.

Bu çok değişkenli denklem, parametrelerin değerine bağlı olarak doğrusal, kuvvet ve üstel tip denklemleri temsil eder. Böyle bir denklem ile yapılan hesaplamalar deneysel sonuçlara çok yakın sonuçlar vermektedir.

2.2. Kompozitlerin Basınç Dayanımını Gözenekliliğe Bağlı Olarak Tanımlayan Denklemler

2.2.1. Modifiye edilmiş Sherban Modeli

Basınç dayanımları için Eşitlik 2.16'nın modifiye edilmiş formu aşağıdaki şekildedir.

$$\sigma = \sigma_0(1 - ap^n)^m e^{-bp} \quad (2.17)$$

2.2.2. Lian Modeli

Lian, Zhuge ve Beecham (2011), gözenekli betonun dayanımını belirlemek için aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$\sigma = B\sqrt{(1 - p)^m e^{-np}} \quad (2.18)$$

B , m ve n malzeme parametreleridir.

2.3. Kompozitlerin Basınç Dayanımını Su/Çimento ve Agrega/Çimento Oranlarına Bağlı Olarak Tanımlayan Denklemler (Çolak Modelleri)

Betonun maksimum basınç dayanımını su/çimento ve agrega/çimento oranlarına bağlı olarak belirlemek için Çolak (2006a) ve Çolak (2006b) tarafından geliştirilen denklemler aşağıda tanımlanmıştır.

Bu denklemlerden ilki olan (Çolak, 2006a) denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \left[\frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m^{(n-1) + \left(\frac{w}{c}\right)_a}}{\left(\frac{w}{c}\right)_m^{(n-1) + \frac{w}{c}}} \right]^n \quad (2.19)$$

Bu denklemde;

σ Portland çimentolu betonun basınç dayanımı,

σ_a Portland çimentolu betonun su/çimento oranının herhangi bir değerine karşılık gelen basınç dayanımı,

w/c su/çimento oranı,

$(w/c)_a$ su/çimento oranının herhangi bir değeri,

A/c agrega/çimento oranı,

n bir parametre,

σ_m Portland çimentolu betonun maksimum basınç dayanımı,

$(w/c)_m$ Portland çimentolu betonun maksimum basınç dayanımına karşılık gelen su/çimento oranıdır.

$(w/c)_m$ değeri kürlenme süresine bağlıdır ve sabit bir değere ulaşır. Bu durum tam olarak aşağıdaki denklem ile tanımlanır (Çolak, 2006a).

$$\left(\frac{w}{c}\right)_m = 0.23 \frac{\sqrt{t}}{(1+\sqrt{t})} \quad (2.20)$$

Bu denklemde;

t kürlenme süresidir.

Çolak (2006b) istatistiksel analizden elde edilen sonuçlara dayanarak, agrega/çimento oranı ile $(w/c)_m$ ($n-1$) arasında aşağıdaki ilişkiyi bulmuştur.

$$\left(\frac{w}{c}\right)_m (n-1) = 1 + \frac{A}{c} \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21'in Eşitlik 2.19'da yerine konulmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \left[\frac{1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_a}{1 + \frac{A}{c} + \frac{w}{c}} \right]^n \quad (2.22)$$

Çolak (2006b) tarafından geliştirilen Eşitlik 2.22 ile betonların basınç dayanımları kolaylıkla hesaplanabilmektedir. n parametresinin büyüklüğü Eşitlik 2.21 ile hesaplanır. Seitablaiev (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, bu denklem ile hesaplanan sonuçlar ile deneysel veriler arasında mükemmel bir uyum olduğu gösterilmiştir.

Diğer bir denklem ise aşağıdaki formül ile verilmektedir (Çolak, 2006b).

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \frac{\left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_a\right]^{\frac{n \left(\frac{w}{c}\right)_a}{\left(\frac{w}{c}\right)_m}}}{\left[1 + \frac{A}{c} + \frac{w}{c}\right]^{\frac{n \frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_m}}} \quad (2.23)$$

Eşitlik 2.23'teki n parametresinin değeri aşağıda verilmiştir.

$$n = \frac{\left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_a\right]}{\left\{ \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right] \ln \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right] + \left(\frac{w}{c}\right)_m \right\}} \quad (2.24)$$

Betonun basınç dayanımını su/çimento ve agrega/çimento oranlarına bağlı olarak tanımlayan bir başka denklem daha vardır. Geniş bir su/çimento oranı aralığında geçerli olması beklenen bu denklem aşağıdaki formül ile verilmektedir (Çolak, 2006b).

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \frac{\left(\frac{A}{c}\right) \left(\frac{w}{c}\right)_m \ln \left(\frac{A}{c}\right)}{\left(\frac{A}{c}\right) \left(\frac{w}{c}\right)_m \ln \left(\frac{A}{c}\right) + \frac{w}{c}} \quad (2.25)$$

Bu denklemler Neville (1997) tarafından tanımlanan eğrinin özelliklerini temsil etmektedir. Bu denklemlerde katsayı büyük ölçüde azaltılmıştır. Bu nedenle, bu denklemlerdeki parametreler iki test sonucuna dayalı olarak hesaplanabilir.

2.4. Kompozitlerin Gerilme-Şekil Değişirme Davranışını ve Kırılma Tokluğunu Tanımlayan Denklemler (Çolak Modelleri)

Aşağıdaki denklem Çolak (2005a) ve Çolak (2005b) tarafından katkılı ve katkısız betonların gerilme ve şekil değişirme davranışlarını tanımlamak için önerilmiştir.

$$\sigma = \frac{a\epsilon}{(1+b\epsilon)^{c\epsilon}} \quad (2.26)$$

Bu denklemde;

σ gerilme değeri,

ϵ şekil değişirme,

a, b, c parametrelerdir.

Parametrelerin değerleri aşağıdaki sınır koşullarına göre belirlenir.

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = 0 \text{ ve } \sigma = \sigma_m, \quad \epsilon = \epsilon_m \text{ de} \quad (2.27)$$

Bu denklemde;

σ_m en yüksek gerilimdir,

ϵ_m en yüksek gerilmeye karşılık gelen şekil değişirmedi,

c parametresinin değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$c = \frac{1}{\epsilon_m} \left[\frac{(1+b\epsilon_m)}{(1+b\epsilon_m) \ln(1+b\epsilon_m) + b\epsilon_m} \right] \quad (2.28)$$

a parametresinin değeri aşağıda verilmiştir.

$$a = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} (1 + b\epsilon_m)^{\left[\frac{(1+b\epsilon_m)}{(1+b\epsilon_m) \ln(1+b\epsilon_m) + b\epsilon_m} \right]} \quad (2.29)$$

Eşitlik 2.26'da a ve c parametrelerinin değerleri yerine konduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} \epsilon^{\frac{(1+b\epsilon_m)^{\left[\frac{(1+b\epsilon_m)}{(1+b\epsilon_m) \ln(1+b\epsilon_m) + b\epsilon_m} \right]}}{(1+b\epsilon)^{\left[\frac{(1+b\epsilon_m)}{(1+b\epsilon_m) \ln(1+b\epsilon_m) + b\epsilon_m} \right]}} \frac{\epsilon}{\epsilon_m}} \quad (2.30)$$

b parametresi için aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$b = \frac{1}{\epsilon_m} \quad (2.31)$$

Bu eşitlik Eşitlik 2.30'da yerine konulduğunda denklemin son hali elde edilir.

$$\sigma = \sigma_m \frac{\epsilon}{\epsilon_m} \frac{2^{\left(\frac{2}{2\ln 2 + 1}\right)}}{\left(1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_m}\right)^{\left(\frac{2}{2\ln 2 + 1}\right) \frac{\epsilon}{\epsilon_m}}} \quad (2.32)$$

$2/(2\ln 2 + 1)$ sabiti deneysel sonuçlara uyum sağlamak için bir parametre olarak kabul edilmiştir. $2/(2\ln 2 + 1)$ sabiti β parametresi ile temsil edilir. Bu durumda Eşitlik 2.32 aşağıdaki gibi olur.

$$\sigma = \sigma_m \frac{\epsilon}{\epsilon_m} \frac{2^\beta}{\left(1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_m}\right)^\beta \frac{\epsilon}{\epsilon_m}} \quad (2.33)$$

Eşitlik 2.33 ile test sonuçlarına göre hesaplanan gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'te verilmiştir. Bu şekillerden, önerilen denklem ile deneysel sonuçlar arasında mükemmel bir uyum olduğu açıkça görülmektedir. Eşitlik 2.33 ile hesaplanan parametrelerin büyüklükleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

2.5. Kompozitlerin Bileşimine Bağlı Olarak Elastisite Modülünü Tanımlayan Denklemler

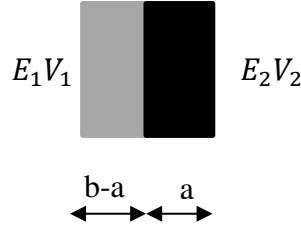
2.5.1. İki Fazlı Kompozitler için Mikromekanik Modeller

Mikromekanik modeller, eşit gerilme ve eşit şekil değiştirme kurallarına göre türetilir (Clyne ve Hull, 2019).

2.5.2. Voigt Modeli

Voigt modeli (1889), paralel olarak düzenlenmiş fazlardan oluşur. Bu modelin birim hücre modeli Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Modeli türetmek için kullanılan yöntem eşit şekil değiştirme kuralına dayanmaktadır. Bu yöntem; toplam kuvvet, faz I ve faz II üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşittir şeklinde açıklanabilir ve aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.34)$$



Şekil 2.2. Voigt birim hücre modeli.

Hooke yasasının (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme ve şekil değiştirme ilişkilerine göre kuvveti düzenleyerek aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\sigma_c b^2 = \sigma_1(b^2 - ab) + \sigma_2 ab \quad (2.35)$$

$$E_c \epsilon_c = E_1 \epsilon_1 \left(1 - \frac{a}{b}\right) + E_2 \epsilon_2 \frac{a}{b} \quad (2.36)$$

Faz I, faz II ve birim hücrenin yer değiştirmelerinin aynı olduğu varsayılarak aşağıdaki denklemler yazılır.

$$\Delta_c = \Delta_1 = \Delta_2 = \Delta \quad (2.37)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_1 = \epsilon_2 = \frac{\Delta}{b} \quad (2.38)$$

Bu denklem eşitlik 2.36'da yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$E_c = E_1 \left(1 - \frac{a}{b}\right) + E_2 \frac{a}{b} \quad (2.39)$$

Faz I ve faz II'nin hacim kesirleri aşağıdaki gibidir.

$$V_1 = \frac{(b-a)b^2}{b^3} = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \quad (2.40)$$

$$V_2 = \frac{ab^2}{b^3} = \frac{a}{b} \quad (2.41)$$

Yukarıdaki denklemde (a/b) ve $(1-a/b)$ yerine faz I ve faz II'nin hacim kesirleri yazılarak denklemin aşağıdaki son hali elde edilir.

$$E_c = E_1 V_1 + E_2 V_2 \quad (2.42)$$

Bu denklem Voigt (1889) bağıntısı olarak adlandırılır.

2.5.3. Reuss Modeli

Reuss modeli (1929) seri olarak düzenlenmiş fazlardan oluşmaktadır. Bu modelin birim hücre modeli Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Modeli türetmek için kullanılan yöntem eşit gerilme kuralına dayanmaktadır. Bu yöntem aşağıda açıklanmıştır: Birim hücrenin yer değiştirmesi faz I ve faz II'nin yer değiştirmelerinin toplamına eşittir. Bu denklem şu şekilde verilir:

$$\Delta_c = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (2.43)$$



Şekil 2.3. Reuss birim hücre modeli

Denklemden yer değiştirmeler yerine Hooke yasasının (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları yazılarak aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\epsilon_c b = (b - a)\epsilon_1 + a \epsilon_2 \quad (2.44)$$

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{a}{b} \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (2.45)$$

Birim hücre, faz I ve faz II üzerindeki gerilmeler eşittir. Bu varsayıma göre denklem matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma_c = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P}{b^2} \quad (2.46)$$

Bu denklem eşitlik 2.45'te yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{1}{E_c} = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \frac{1}{E_1} + \frac{a}{b} \frac{1}{E_2} \quad (2.47)$$

Faz I ve faz II'nin hacim kesirleri aşağıda verilmiştir.

$$V_1 = \frac{(b-a)b^2}{b^3} = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \quad (2.48)$$

$$V_2 = \frac{ab^2}{b^3} = \frac{a}{b} \quad (2.49)$$

Yukarıdaki denklemde birim hücreyi tanımlayan (a/b) ve ($1-a/b$) değerleri yerine hacim kesirleri yazılır ve böylece denklemin aşağıdaki son hali elde edilir.

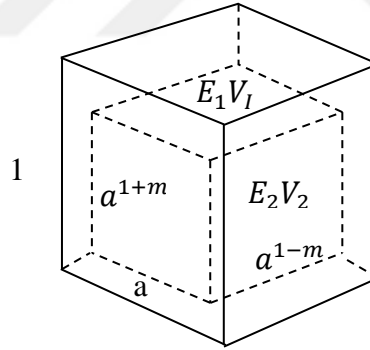
$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} \quad (2.50)$$

Bu denklem Reuss ilişkisi (1929) olarak adlandırılır.

2.5.4. Modifiye Edilmiş Paul Modeli

Paul modeli (1960) birim hücre içinde küp şeklinde bir fazdan oluşmaktadır. Bu model, birim hücrede prizma benzeri bir faz kullanılarak değiştirilmiştir. Birim hücrenin modifiye edilmiş şekli Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Bu değişiklik deneysel sonuçlarla modelin yeterince uyuşması için yapılmıştır. Modeli türetmek için kullanılan yöntem eşit gerilme kuralına dayanmaktadır. Bu yöntem aşağıda açıklanmıştır: Birim hücrenin yer değiştirmesi, faz I ve faz I ile faz II'nin paralel olarak düzenlendiği bölgenin yer değiştirmelerinin toplamına eşittir. Bu eşitlik aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\Delta_c = \Delta_1 + \Delta \quad (2.51)$$



Şekil 2.4. Prizma şekilli bir faza sahip birim hücre modeli

Yer değiştirme bağıntıları yerine Hooke yasasının (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\epsilon_c = \epsilon_1(1 - a^{1+m}) + \epsilon a^{1+m} \quad (2.52)$$

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_c}{E_1}(1 - a^{1+m}) + \frac{\sigma_c a^{1+m}}{E} \quad (2.53)$$

Birim hücre üzerine etki eden kuvvet, faz I ve faz II üzerine etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Bu durum aşağıdaki denklem ile verilir.

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.54)$$

Kuvvetin Hooke yasasının gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları cinsinden yazılmasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir (Timoshenko ve Goodier, 1951)

$$\sigma_c = \sigma_1(1 - a^{2-m}) + \sigma_2 a^{2-m} \quad (2.55)$$

$$E\epsilon = E_1\epsilon_1(1 - a^{2-m}) + E_2\epsilon_2 a^{2-m} \quad (2.56)$$

Faz I ve faz II'nin paralel olduğu bölgede, bu bölgenin, faz I ve faz II deformasyonları birbirine eşittir. Bu denklem şu şekilde verilir:

$$\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2 = \frac{\Delta}{a^{1+m}} \quad (2.57)$$

Bu eşitlikler eşitlik 2.56'da yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$E = E_1(1 - a^{2-m}) + E_2 a^{2-m} \quad (2.58)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{(1-a^{1+m})}{E_1} + \frac{a^{1+m}}{E_1(1-a^{2-m})+E_2 a^{2-m}} \quad (2.59)$$

$$n = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.60)$$

$$\frac{E_1}{E_c} = (1 - a^{1+m}) + \frac{a^{1+m}}{(1-a^{2-m})+na^{2-m}} \quad (2.61)$$

Yukarıdaki denklemlerde cebirsel işlemler yapıldıktan ve n yerine (E_2/E_1) yazıldıktan sonra denklem aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{E_c}{E_1} = \left[\frac{1+(n-1)a^{2-m}}{1+(n-1)(a^{2-m}-a^3)} \right] \quad (2.62)$$

Modifiye edilmiş Paul Modeli bağıntısının aşağıdaki son şekli, yukarıdaki denklemde birim hücre modelini tanımlayan a değeri yerine faz II'nin aşağıdaki hacim oranının yazılmasıyla elde edilir.

$$V_2 = a^3 \quad (2.63)$$

$$\frac{E_c}{E_1} = \left[\frac{1+(n-1)V_2^{\frac{2-m}{3}}}{1+(n-1)(V_2^{\frac{2-m}{3}} - V_2)} \right] \quad (2.64)$$

$m=0$ Paul denklemini (1960) tanımlar.

2.5.5. Modifiye Edilmiş Ishai Modeli

Ishai modeli (1965), yukarıdaki modelde açıklandığı gibi birim hücre içinde küp şeklinde bir fazdan oluşur. Deneysel sonuçlara uyum sağlamak için birim hücre içinde prizma şeklinde bir faz kullanılmış ve hacmi tanımlayan parametrenin üstel katsayısı değiştirilmiştir. Geometrisi bu şekilde modifiye edilen birim hücre Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Modeli türetmek için kullanılan yöntem eşit şekil değiştirme kuralına dayanmaktadır. Bu yöntem aşağıda açıklanmaktadır. Faz I ve faz II'nin paralel olduğu bölgedeki kuvvetlerin toplamı birim hücreye etki eden kuvveti verir. Bu denklem gerilme cinsinden aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\sigma_c = \sigma_1(1 - a^{2-m}) + \sigma_2 a^{2-m} \quad (2.65)$$

Eşit şekil değiştirme kuralına göre, birim hücrenin, faz I'in ve faz I ile faz II'nin seri olduğu bölgenin yer değiştirmeleri eşit olmalıdır. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\Delta_c = \Delta_1 = \Delta + \Delta_2 \quad (2.66)$$

Aşağıdaki denklemler, yer değiştirme yerine Hooke yasasının (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme ve şekil değiştirme bağıntılarının yazılmasıyla elde edilmiştir.

$$\epsilon_c = \epsilon_1 = \epsilon(1 - a^{1+m}) + \epsilon_2 a^{1+m} \quad (2.67)$$

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_1} (1 - a^{1+m}) + \frac{\sigma_2}{E_2} a^{1+m} \quad (2.68)$$

Eşitlik 2.68 kullanılarak, birim hücre, faz I ve faz II üzerindeki gerilmeler, birim hücre geometrisini tanımlayan boyutlar cinsinden tanımlanır. Bu durumda, gerilmeler aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1}{E_1} E_c \quad (2.69)$$

$$\frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_1} (1 - a^{1+m}) + \frac{\sigma_2}{E_2} a^{1+m} \quad (2.70)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_2 \sigma_1}{(1-a^{1+m})E_2 + a^{1+m}E_1} \quad (2.71)$$

Aşağıdaki denklemlerde n , faz II'nin elastisite modülünün faz I'in elastisite modülüne oranını temsil eder. Matematiksel olarak aşağıdaki denklemle tanımlanır.

$$n = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.72)$$

$$\sigma_2 = \frac{n\sigma_1}{(1-a^{1+m})n+a^{1+m}} \quad (2.73)$$

Eşitlik 2.69 ve 2.71'in Eşitlik 2.70'de yerine konulmasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{\sigma_1 E_c}{E_1} = \sigma_1 (1 - a^{2-m}) + \frac{n\sigma_1 a^{2-m}}{(1-a^{1+m})n+a^{1+m}} \quad (2.74)$$

$$\frac{E_c}{E_1} = \frac{n(1-a^{1+m})+a^{1+m}+a^3(n-1)}{n(1-a^{1+m})+a^{1+m}} \quad (2.75)$$

$$\frac{E_c}{E_1} = \left[1 + \frac{a^3}{\left(\frac{n}{n-1}-a^{1+m}\right)} \right] \quad (2.76)$$

Faz II'nin hacim oranı aşağıdaki denklemle verilir.

$$V_2 = a^3 \quad (2.77)$$

Yukarıdaki denklemde a yerine faz II'nin hacim kesrini koyarak ve cebirsel işlemleri tamamlayarak, modifiye edilmiş Ishai denkleminin aşağıdaki son şekli elde edilir.

$$\frac{E_c}{E_1} = \left[1 + \frac{V_2}{\left(\frac{n}{n-1}-V_2^{\frac{1+m}{3}}\right)} \right] \quad (2.78)$$

$m = 0$ Ishai denklemini (1965) tanımlar. Ishai ve Cohen (1967), taneli epoksi kompozitlerin elastik özelliklerini teorik olarak yukarıdaki denklemin $m = 0$ 'a karşılık gelen formuyla belirlemişlerdir.

2.5.6. Popovics Modelleri

Popovics ve Erdey (1970), iki fazlı kompozit malzemelerin elastisite modülünü tahmin etmek için aşağıdaki modelleri önermiştir. Bu modeller Voigt ve Reuss bağıntılarının bir kombinasyonundan oluşmaktadır.

$$E_c = A(E_1V_1 + E_2V_2) + \frac{B}{\left(\frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2}\right)} \quad (2.79)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{A}{(E_1V_1 + E_2V_2)} + B \left(\frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} \right) \quad (2.80)$$

2.6. Üç Fazlı Kompozitler için Mikromekanik Modeller

2.6.1. Shaffer Modeli

Shaffer (1964) birim hücre modeli Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Bu model iki farklı faz ve üç farklı hacim kesrinden oluşmaktadır. Shaffer yukarıdaki birim hücre modelini kullanarak aşağıdaki denklemi elde etmiştir (Shaffer, 1964).

$$E_2 = E_m V_{mp} + E_{2s} (1 - V_{mp}) \quad (2.81)$$

$$E_{2s} = \frac{E_{2f} E_m}{E_m V_{fs} + E_{2f} V_{ms}} \quad (2.82)$$



Şekil 2.5. Shaffer birim hücre modeli

Yukarıdaki denklemler (Daniel ve Ishai, 2006) kaynağından alınmıştır. E_2 ; lifli kompozitlerin elastisite modülü, E_m ; matrisin elastisite modülü, E_{2f} ; lifin elastisite modülü, V_{mp} ; birim hücrede paralel düzende matris hacmi, V_{fs} ; lifi hacmi, V_{ms} ; birim hücrede seri düzende matrisin hacmidir (Daniel ve Ishai, 2006).

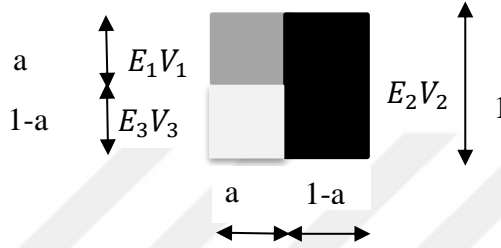
Aslında, bu denklem iki faz içeren kompozitlerin elastisite modülünü tahmin etmek için kullanılır. Üç farklı faz içeren kompozit malzemeler için geçerli değildir. Bununla birlikte, birim hücrenin üç farklı hacim kesrinde tasarlanması bir fark yaratmıştır. Bu nedenle, üç farklı faz içeren kompozitlerin birim hücrelerinin tasarımı için bir örnek teşkil edebilen bu model üç fazlı kompozitler bölümünde ele alınmıştır.

2.6.2. Çolak Modeli I

Çolak modeli I'de (2005b) faz I ve faz III'ün seri olarak düzenlendiği yapıya faz II paralel olarak bağlanmıştır. Bu şekilde oluşan birim hücre modeli Şekil 2.6'da

görülmektedir. Çolak modeli I (2005b), üç farklı faz içermesi nedeniyle Shaffer modelinden (1964) farklılık göstermektedir. Modeli türetmek için kullanılan yöntem eşit şekil değiştirme kuralına dayanmaktadır. Bu yöntem aşağıda açıklanmıştır. Birim hücrenin yer değiştirmesi faz II'nin yer değiştirmesine eşittir. Faz I ve faz III'ün yer değiştirmelerinin toplamı birim hücrenin yer değiştirmesine eşittir. Bu eşitlik matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_3 = \Delta_2 \quad (2.83)$$



Şekil 2.6. Önerilen model I için birim hücre modeli

Yukarıdaki yer değiştirme bağıntıları yerine Hooke yasasının (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\epsilon_c = \epsilon_1 a + \epsilon_3 (1 - a) = \epsilon_2 \quad (2.84)$$

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma_1}{E_1} a + \frac{\sigma_3}{E_3} (1 - a) = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (2.85)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_2}{E_c} \sigma \quad (2.86)$$

$$\sigma_1 = \frac{\frac{\sigma}{E_c}}{\frac{a}{E_1} + \frac{(1-a)}{E_3}} \quad (2.87)$$

Yukarıdaki denklemlerde, σ_1 faz I ve faz III üzerindeki gerilmeyi ve σ_2 faz II üzerindeki gerilmeyi temsil etmektedir. Birim hücre üzerine etki eden toplam P kuvveti, faz I ve faz III üzerine etki eden P_1 kuvveti ile faz II üzerine etki eden P_2 kuvvetinin toplamına eşittir. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.88)$$

Yukarıdaki denklemin gerilme cinsinden yazılmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \sigma_1 a + \sigma_2 (1 - a) \quad (2.89)$$

Bu denklemde σ_1 ve σ_2 için elde edilen değerler yerine konulduğunda aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\sigma = \frac{\frac{\sigma}{E_c}}{\frac{a}{E_1} + \frac{(1-a)}{E_3}} a + \frac{E_2}{E_c} \sigma (1 - a) \quad (2.90)$$

$$E_c = E_2 (1 - a) + \frac{E_1 E_3}{E_3 a + E_1 (1 - a)} a \quad (2.91)$$

Birim hücreyi tanımlayan a ve $(1-a)$ ifadeleri yerine hacim kesirleri konulduğunda aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V_1 = a^2 \quad (2.92)$$

$$V_2 = (1 - a) \quad (2.93)$$

$$V_3 = a(1 - a) \quad (2.94)$$

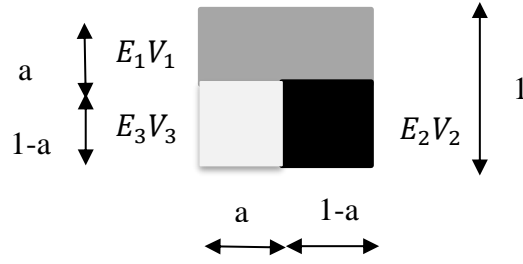
Yukarıdaki denklemlerde a ve $(1-a)$ yerine hesaplanan hacim kesirleri yazılır ve denklemin aşağıdaki son hali elde edilir.

$$E_c = E_2 V_2 + \frac{E_1 E_3}{E_3 V_1 + E_1 V_3} V_1 \quad (2.95)$$

2.6.3. Çolak Modeli II

Çolak modeli II'de (2005b) faz I, faz II ve faz III'ün paralel olarak düzenlendiği yapıya seri olarak bağlanmıştır. Bu şekilde tasarlanan birim hücre modeli Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Çolak modeli II (2005b), Çolak modeli I'de olduğu gibi üç farklı faz içermektedir. Bu nedenle Shaffer modelinden (1964) farklılık göstermektedir. Modelin türetilmesinde kullanılan yöntem eşit gerilme kuralına dayanmaktadır. Bu yöntem aşağıda açıklanmıştır: Birim hücrenin yer değiştirmesi, faz I ve faz II'nin yer değiştirmelerinin toplamına eşittir. Faz II'nin yer değiştirmesi faz III'ün yer değiştirmesine eşittir. Bu eşitlikler matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_3 \quad (2.96)$$



Şekil 2.7. Önerilen model II için birim hücre modeli.

Yukarıdaki yer değiştirme bağıntıları yerine Hooke yasasının (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\epsilon_c = \epsilon_1 a + \epsilon_2(1 - a) = \epsilon_1 a + \epsilon_3(1 - a) \quad (2.97)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_3 \quad (2.98)$$

Birim hücreye etki eden toplam P kuvveti, II. faza etki eden kuvvet P_2 ve III. faza etki eden P_3 kuvvetinin toplamına eşittir. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$P = P_2 + P_3 \quad (2.99)$$

Yukarıdaki denklemin gerilme cinsinden yazılmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \sigma_2(1 - a) + \sigma_3 a \quad (2.100)$$

Hooke yasasını tanımlayan eşitlik (Timoshenko ve Goodier, 1951) gerilme yerine kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = E_2 \epsilon_2(1 - a) + E_3 \epsilon_2 a \quad (2.101)$$

Bu denklemden, faz II'nin şekil değiştirmesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2(1-a) + E_3 a} \quad (2.102)$$

Bu denklem, birim hücrenin elastisite modülünü tanımlayan modeli elde etmek için Eşitlik 2.101'de yerine konulursa aşağıdaki denkleme ulaşılır.

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma}{E_1} a + \frac{\sigma}{E_2(1-a) + E_3 a} (1 - a) \quad (2.103)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{a}{E_1} + \frac{(1-a)}{E_2(1-a) + E_3 a} \quad (2.104)$$

Birim hücreyi tanımlayan a ve $(1-a)$ ifadeleri yerine hacim kesirleri konulduğunda aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V_1 = a \quad (2.105)$$

$$V_2 = (1 - a)^2 \quad (2.106)$$

$$V_3 = a(1 - a) \quad (2.107)$$

Yukarıdaki denklemde a ve $(1-a)$ yerine hesaplanan hacim kesirleri yazılır ve denklemin aşağıdaki son hali elde edilir.

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2 V_2 + E_3 V_3} \quad (2.108)$$

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Silis Füme Karışımı Çimento Hamurları için Malzeme ve Yöntem

Numunelerin üretiminde sıradan Portland çimentosu kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,25 ile 0,45 arasında değiştirilerek çimentoya ağırlıkça %10 ve %20 silis dumanı ilave edilmiştir. Çimento ve silis dumanından oluşan toz karışıma yukarıda belirtilen oranlarda su ilave edilmiş ve bu karışım mikserde homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra akışkan çimento hamuru 4x4x16 cm³ ve 4x4x4 cm³lük kalıplara dökülmüştür. Kalıplar polietilen torba içerisinde bir gün boyunca laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kalıptan çıkarılan numuneler 27 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar ortamında 22±2 °C ve %65 bağıl nemde bir gün bekletilmiştir. Bu süre sonunda numuneler hassas terazide tartılarak laboratuvar koşullarında kütleleri belirlenmiştir. Örnekler 105 °C'de etüvde kurutulduktan ve sabit ağırlığa gelene kadar desikatörde bekletildikten sonra tartılmıştır. Bu şekilde hesaplanan kütleler laboratuvar koşullarındaki kütlelerden çıkarılarak, numunelerin nem içeriği yaklaşık %5 olarak hesaplanmıştır. Numunelerin gözenekliliği Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Ultrason hızı ölçümleri 4x4x16 cm³ hacmindeki numuneler üzerinde yapılmıştır. Ultrason hızları 2,7 ila 3,9 km/s arasında değişmektedir. Numunelerin eğilme dayanımları yaklaşık 4,5 ila 6,4 MPa arasında değişmektedir. Birim hacim kütlesi ve ultrason hızı ölçüm sonuçları kullanılarak numunelerin elastisite modülü aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Timoshenko ve Goodier, 1951).

$$E = \rho c^2 \quad (3.1)$$

E ; numunenin elastisite modülünü (GPa) temsil eder,

ρ ; birim hacim kütlesini (Kg/lt) temsil eder,

c ; ultrason hızını (km/s) temsil eder.

Numunelerin basınç dayanımı 4x4x4 cm³ hacmindeki numuneler üzerinde yapılmıştır.

3.2. Epoksi Emülsiyonlu ve Silis Dumanlı Betonlar için Malzeme ve Yöntem

Betonun bileşimi ve beton üretiminde kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları sırasıyla Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir. Kırma kireçtaşı I ve II'nin maksimum tane boyutu 16 mm'nin altındadır. Nehir kumunun maksimum tane boyutu 4 mm'dir. Sıradan Portland çimentosu, kırılmış kireçtaşı I ve II, nehir kumu ve silis dumanından oluşan bir toz karışımı mikserde karıştırılmıştır.

Çizelge 3.1. Betonların bileşimi (kg/m³)

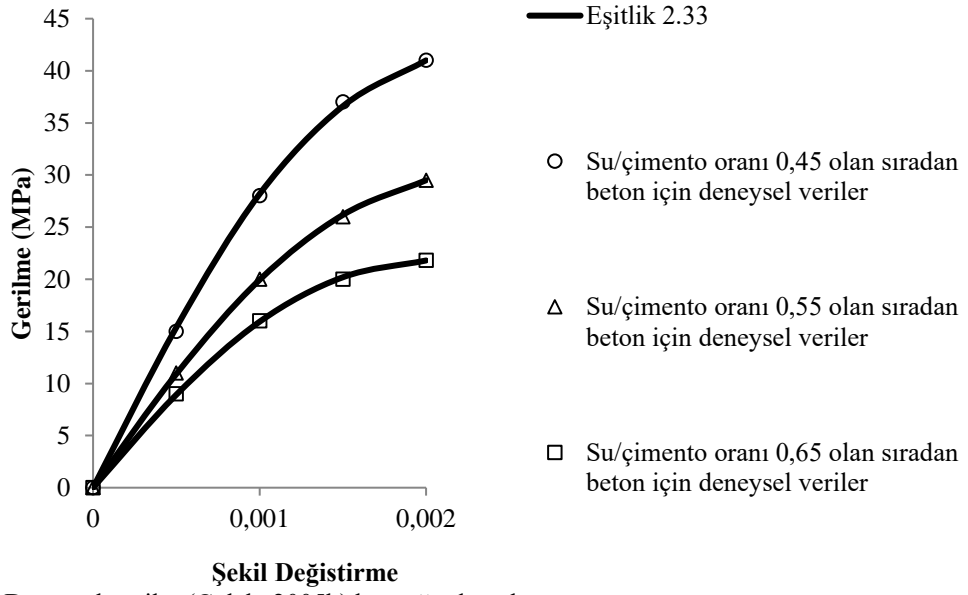
Çimento	Kum	Kırma Kireçtaşı I	Kırma Kireçtaşı II	Su	Silis dumanı	Epoksi emülsiyon	Süper Akışkanlaştırıcı
350	980	460	310	157	-	-	3.5
350	980	460	310	192.5	-	-	1.75
350	980	460	310	227.5	-	-	1
350	955	460	310	157	35	-	4.5
350	955	460	310	192.5	35	-	3.5
350	955	460	310	227.5	35	-	2
350	980	460	310	157	-	35	1.5
350	980	460	310	192.5	-	35	1
350	980	460	310	227.5	-	35	0.5
350	955	460	310	157	35	35	3
350	955	460	310	192.5	35	35	2
350	955	460	310	227.5	35	35	1

Deneyel veriler (Çolak, 2005b) kaynağından alınmıştır

Çizelge 3.2. Malzemelerin özgül ağırlığı (kg/dm³)

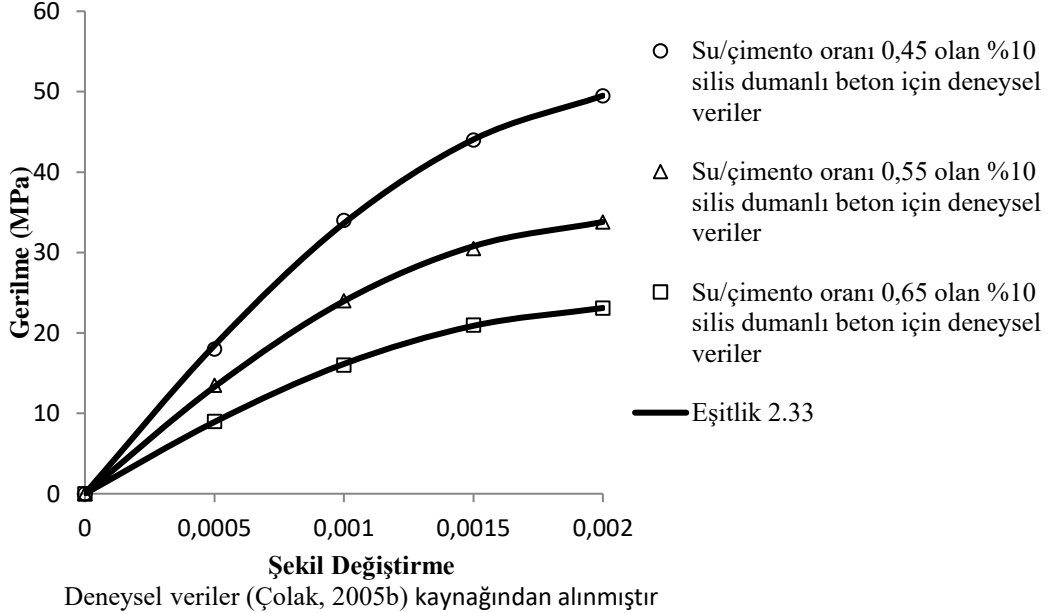
Sıradan Portland Çimentosu	Kum	Kırma Kireçtaşı I	Kırma Kireçtaşı II	Silis dumanı
3.1	2.61	2.7	2.71	2.33
Deneysel veriler (Çolak, 2005b) kaynağından alınmıştır.				

Daha sonra bisfenol A'nın diglisidil eteri ve trimetil heksametilen diamine karışımından oluşan epoksi emülsiyonu beton karışım suyu ile karıştırılarak toz karışıma ilave edilmiştir. Bu karışım homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Karışımların dökülebilir kıvamda olmasını sağlamak amacıyla karışımlara %0,286 ile %1,2 arasında değişen oranlarda naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı da ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, akışkan beton 15x30 cm'lik silindirik kalıplara dökülmüştür. Bir gün sonra kalıptan çıkarılan numuneler polietilen torba içerisinde 20±2 °C ve %65 bağıl nemde 27 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bu süre sonunda polietilen torbalardan çıkarılan numuneler laboratuvarında bir gün bekletildikten sonra basınç testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'de verilmiştir. Test edilen numunelerin nem içeriği yaklaşık %5'tir. Çimento dozajı 350 kg/m³'tür. Agregâ/çimento oranı 5'tir. Karışıma çimento ağırlığının %10'u oranında epoksi emülsiyonu eklenmiştir. Aynı oran silis dumanı için de geçerlidir. Su/çimento oranı 0,45 ile 0,65 arasında değiştirilmiştir. Numunelerin basınç altındaki yer değiştirmeleri kompressometre ile belirlenmiştir. Yer değiştirme ölçümleri %0,1 hassasiyetle yapılmıştır. Şekil değiştirme oranı, yer değiştirme ölçümünün ilk ölçü uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanmıştır. Gerilme, test sırasında uygulanan kuvvetin numunenin alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme test sonuçları Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.



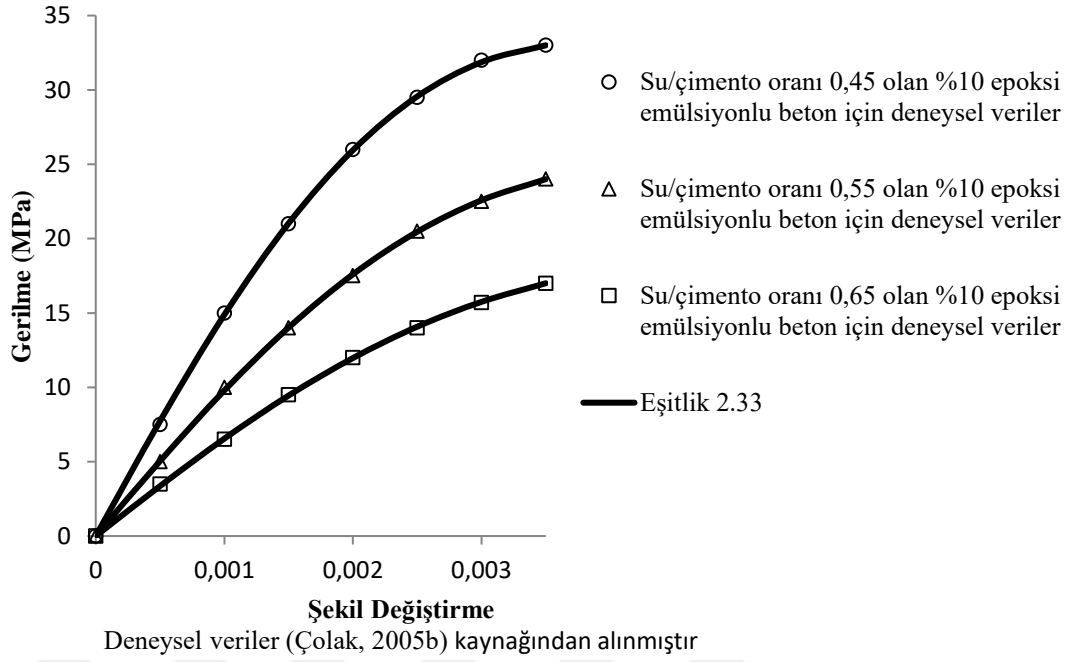
Deneysel veriler (Çolak, 2005b) kaynağından alınmıştır.

Şekil 3.1. Sıradan beton için gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

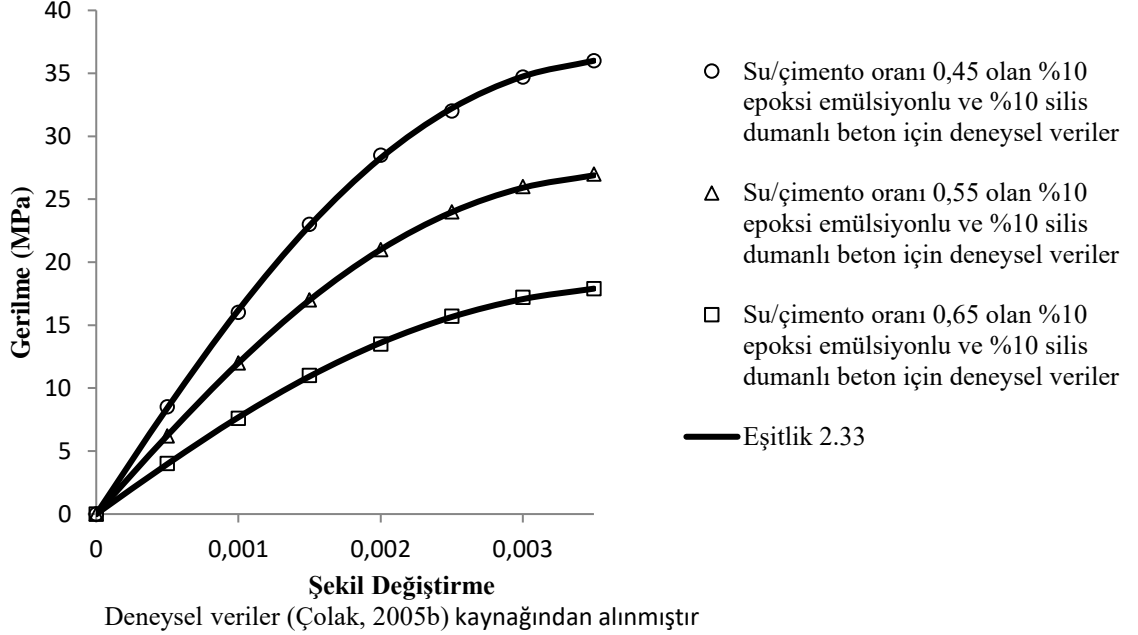


Deneysel veriler (Çolak, 2005b) kaynağından alınmıştır

Şekil 3.2. % 10 silis dumanı içeren beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.



Şekil 3.3. %10 epoksi emülsiyonu içeren beton için gerilme-şekil değişirme eğrisi.



Şekil 3.4. %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı içeren beton için gerilme-şekil değişirme eğrisi.

3.3. Portland Çimentosu-Alçı ve Portland Çimentosu-Alçı-Kireç Karışımları için Malzeme ve Yöntemler

Numunelerin üretiminde kullanılan malzeme ve yöntemin tanımı aşağıda verilmiştir. Beyaz Portland çimentosu ve alçı karışımlarındaki Beyaz Portland Çimentosu miktarı kütlece %10 ila %90 arasında değiştirilmiştir. Burada bağlayıcı, iki fazlı kompozitlerde beyaz Portland çimentosu ve alçı karışımlarından, üç fazlı kompozitlerde ise beyaz Portland çimentosu, alçı ve kireç karışımlarından oluşmaktadır. Kalıplanabilir bir malzeme elde edebilmek için karışımların su/bağlayıcı oranı %50 olarak seçilmiştir. Bu oran Vicat sondası ile belirlenen su/bağlayıcı oranıdır. Testlerde Vicat sondasının penetrasyon derinlikleri 35 ile 40 mm arasında değişmiştir. Karışımdaki malzemelerin incelik modüllerinin farklı olması bu durumu yaratmıştır. Malzemeler birbirine karıştırılarak kuru bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra bu karışıma su ilave edilerek plastik bir hamur elde edilene kadar karıştırılmıştır. Elde edilen akışkan hamur 15x15x15 cm³ ölçülerindeki kalıplara dökülmüş ve daha sonra kalıplara vibrasyon uygulanarak düzgün bir döküm elde edilmiştir. Bu şekilde dökümü yapılan numuneler laboratuvar koşullarında 20±2° C'de ve %65 bağıl nemde 24 saat bekletilmiştir. Bu süre boyunca kalıpların üzeri polietilen torba ile kapatılmıştır. Bu şekilde bekletilen numuneler kalıptan çıkarılarak polietilen torbalara yerleştirilmiş ve 27 gün boyunca kürlenmiştir. Kürlenme süresi sonunda polietilen torbalardan çıkarılan numuneler 1 gün süreyle laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Bazı numunelerin nem içeriğini belirlemek için hassas terazi kullanılmıştır. Bu numunelerin laboratuvar koşullarındaki ağırlıkları belirlenmiştir. Bu numuneler etüvde kurutulduktan sonra desikatörde sabit ağırlığa kadar soğutulmuştur. Bu şekilde kurutulan ve soğutulan numuneler tekrar tartılmış ve sonuçlar laboratuvar koşullarında elde edilen ağırlıklardan çıkarılmıştır. Böylece numunelerin laboratuvar koşullarındaki nem içeriğinin yaklaşık olarak %5 olduğu hesaplanmıştır. Numunelerin basınç altındaki yer değiştirmeleri kompresometre ile belirlenmiştir. Deplasman ölçümleri %0,1 hassasiyetle yapılmıştır. Numunelerin elastisite modülleri, gerilme ve şekil değiştirmenin orantılı olduğu bölgedeki veriler kullanılarak belirlenmiştir. Hesaplama Hooke yasasını ifade eden denklem (Timoshenko ve Goodier, 1951) kullanılmıştır. Örneğin sertleşmiş beyaz Portland çimento hamurunun 0,001 şekil değiştirme oranına karşılık gelen 28 günlük basınç gerilmesi değeri 10 MPa'dır. Hooke denklemi (Timoshenko ve Goodier, 1951) kullanılarak yapılan hesaplamada sertleşmiş

beyaz Portland çimento hamuru için 10 GPa elastisite modülü belirlenmiştir. Aynı hesaplamalar krlenmiş sıva, kireç ve iki ve üç fazlı kompozitler için de yapılmıştır. Üç fazlı kompozitlerin elastisite modülü sadece %50 beyaz Portland çimentosu + %40 alçı + %10 kireç ve %40 beyaz Portland çimentosu + %50 alçı + %10 kireç içeren karışımlar için belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar izelge 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Yukarıda bahsedilen fiziksel ve mekanik deneyler TS 699 (2009)'a uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak standartta bu tür kompozitlerin kürlenme koşulları hakkında herhangi bir açıklama bulunmamaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi numuneler polietilen torba içerisinde laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Deneysel veriler üç numune için elde edilen sonuçların ortalamasıdır. Örneğin, sertleştirilmiş beyaz Portland çimento hamurlarının deneysel olarak belirlenen elastisite modülleri sırasıyla 9,5, 9,7 ve 10,8 GPa olarak bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonucunda ortalama değer 10 GPa, standart sapma ise 0,7 olarak hesaplanmıştır. Aynı hesaplamalar diğerleri için de yapılmıştır.

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Portland Çimento Hamurlarının Mekanik Özelliklerindeki Gözenekliliğe Bağlı Değişimi

Sıradan ve silis dumanlı çimento hamurlarının elastisite modüllerinde ve basınç dayanımlarında gözeneklilik nedeniyle meydana gelen değişiklikler aşağıda tartışılmaktadır.

4.2. Elastisite Modülleri

Sıradan ve silis dumanı katkılı çimento hamurlarının elastisite modülleri için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Bu şekillerden, sıradan çimento hamurlarının su/çimento oranı arttıkça elastisite modüllerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Örneğin, su/çimento oranının %25'ten %45'e çıkması gözenekliliğin %33'ten %43'e çıkmasına ve elastisite modülünün 34,72 GPa'dan 20,99 GPa'ya düşmesine neden olmuştur. Aynı durum %10 silis dumanı içeren çimento hamurları için de geçerlidir. %10 silis dumanı içeren çimento hamurlarında su/çimento oranının %25'ten %45'e çıkması, gözenekliliğin %29'dan %40'a çıkmasına ve elastisite modülünün 37,93 GPa'dan 19,89 GPa'ya düşmesine neden olmuştur. Aynı şekilde, %20 silis dumanlı çimento hamurları da benzer bir davranış göstermektedir. %20 silis dumanı içeren çimento hamurlarında su/çimento oranının %25'ten %45'e çıkması, gözenekliliğin %27'den %34'e çıkmasına ve elastisite modülünün 38,83 GPa'dan 18,18 GPa'ya düşmesine neden olmuştur. Sıradan çimento hamurlarının %25 su/çimento oranındaki gözeneklilik ve elastisite modüllerinin %10 silis dumanı içeren çimento hamurlarıninkine karşılaştırılması sonucunda, sıradan çimento hamurlarına göre %10 silis dumanı içeren

çimento hamurlarının gözenekliliğinde %12'lik bir azalma ve elastisite modülünde %9'luk bir artış gözlemlenmiştir. %25'lik su/çimento oranındaki sıradan çimento hamurlarının gözeneklilik ve elastisite modülleri ile %20 silis dumanı içeren çimento hamurlarının gözeneklilik ve elastisite modülleri karşılaştırıldığında, %20 silis dumanlı çimento hamurlarının sıradan çimento hamurlarına göre gözenekliliğinde %18'lik bir azalma, elastisite modülünde ise %12'lik bir artış olduğu anlaşılmaktadır. %10 ve %20 silis dumanı içeren çimento hamurlarının %25 ila %45 su/çimento oranı aralığındaki gözeneklilikleri sıradan çimento hamurlarına göre azalmıştır. Bu hamurların elastisite modülü %25 ila %35 su/çimento oranı aralığında artmıştır. Bununla birlikte, %40 ila %45 su/çimento oranı aralığında elastisite modülünde sıradan çimento hamurlarına kıyasla önemsiz bir düşüş gözlenmiştir. Sonuç olarak, elastisite modülündeki artış düşük su/çimento oranlarında oldukça belirgindir.

4.3. Basınç Dayanımları

Sıradan ve silis dumanı katkılı çimento hamurlarının basınç dayanımlarına ilişkin deneysel sonuçlar Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. Bu sonuçlardan, sıradan çimento hamurlarının basınç dayanımının, çimentodaki su arttıkça azaldığı anlaşılmaktadır. Örneğin, su/çimento oranının %25'ten %45'e çıkması sıradan çimento hamurlarının gözenekliliğinin %33'ten %43'e çıkmasına ve dayanımlarının 44,81 MPa'dan 38,11 MPa'ya düşmesine neden olmuştur. Sıradan çimento hamuruna silis dumanı eklenmesi gözenekliliğin azalmasına neden olmuştur. Gözeneklilik, %10 silis dumanı içeren çimento hamurlarında %29 ila %40 arasında, %20 silis dumanı içeren çimento hamurlarında ise %27 ila %34 arasında değişmektedir. Basınç dayanımları %25 su/çimento oranında karşılaştırıldığında, %10 silis dumanı içeren çimento hamurunun basınç dayanımının sıradan çimento hamurlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, %25 su/çimento oranında çimento hamuruna %20 silis dumanı eklenmesi, çimento hamurlarının basınç dayanımının 40,3 MPa'a kadar düşmesine neden olmuştur. Çimentoya %30 su oranında elde edilen basınç dayanımlarının karşılaştırılması sonucunda, sıradan ve silis dumanı katkılı çimento hamurlarının basınç dayanımları arasında önemli bir fark olmadığı anlaşılmıştır. %35 su/çimento oranında çimento hamuruna %10 silis dumanı ilavesi, sıradan çimento hamurlarına kıyasla gözeneklilikte %8, basınç dayanımında ise %16 azalmaya neden olmuştur. Çimento hamuruna %35

su/çimento oranında %20 silis dumanı ilavesi, sıradan çimento hamurlarına kıyasla gözeneklilikte %25 ve basınç dayanımında %7 azalmaya neden olmuştur. Silis dumanı çimento hamurları için %40 su/çimento oranında elde edilen sonuçlar, %35 su/çimento oranında elde edilen sonuçlara benzerdir. Sıradan çimento hamurlarına silis dumanı eklenmesinin neden olduğu gözeneklilikteki değişiklikler ve basınç dayanımındaki artış veya azalışlar aynı eğilimi göstermiştir. Sıradan ve %10 silis dumanı içeren çimento hamurlarının %45 su/çimento oranında gözeneklilikleri ve basınç dayanımları karşılaştırıldığında, bu çimento hamurlarının sıradan çimento hamurlarına göre gözenekliliklerinde %7, basınç dayanımlarında ise %26 azalma olduğu tespit edilmiştir. %45 su/çimento oranındaki çimento hamuruna %20 silis dumanı ilavesi, sıradan çimento hamurlarına göre bu çimento hamurlarının gözenekliliğinde %21, basınç dayanımında ise %32 azalmaya neden olmuştur. Bu sonuçlara göre, sıradan çimento hamuruna %10 silis dumanı ilavesi, %25 su/çimento oranında basınç dayanımlarını artırmaktadır. %20 silis dumanı katkılı çimento hamurlarının gözenekliliğinde %25 su/çimento oranında önemli bir azalma görülmektedir. Buna rağmen, bu hamurların basınç dayanımı sıradan çimento hamurlarına kıyasla çok az azalmıştır.

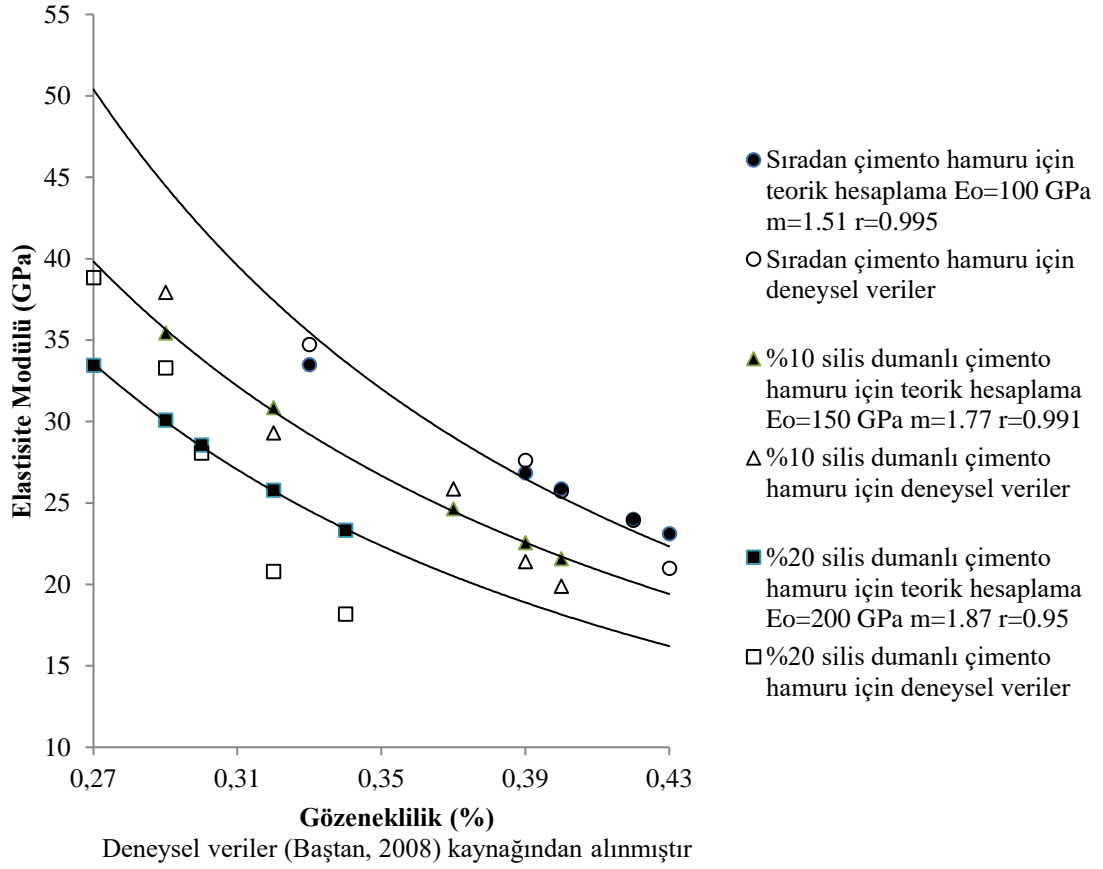
4.4. Hesaplanan Elastisite Modüllerinin Deneysel Verilerle Karşılaştırılması

Bölüm 2’de verilen modellerle hesaplanan elastisite modülleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

4.4.1. Modifiye Edilmiş Paul Modeli

Paul modeli (1960) deneysel sonuçlara uyması için uygun bir katsayı ile değiştirilmiştir. Sıradan ve %10 silis dumanı katkılı çimento hamurlarının elastisite modülü, %27 ila %43 gözeneklilik aralığında modifiye edilmiş Paul modeli ile doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. İstatistiksel analizden elde edilen korelasyon katsayıları 1’e çok yakındır. Modifiye edilmiş Paul modeli ile hesaplanan sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki mükemmel uyum Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Ancak, %20 silis dumanı içeren çimento hamuru için elde edilen deneysel sonuçlar ile modifiye edilmiş Paul modeli ile hesaplanan sonuçlar arasında bazı farklılıklar vardır. Bu numuneler için elde edilen korelasyon katsayısı 0,95’tir. Silis dumanı arttıkça denklemin E_0 ve m

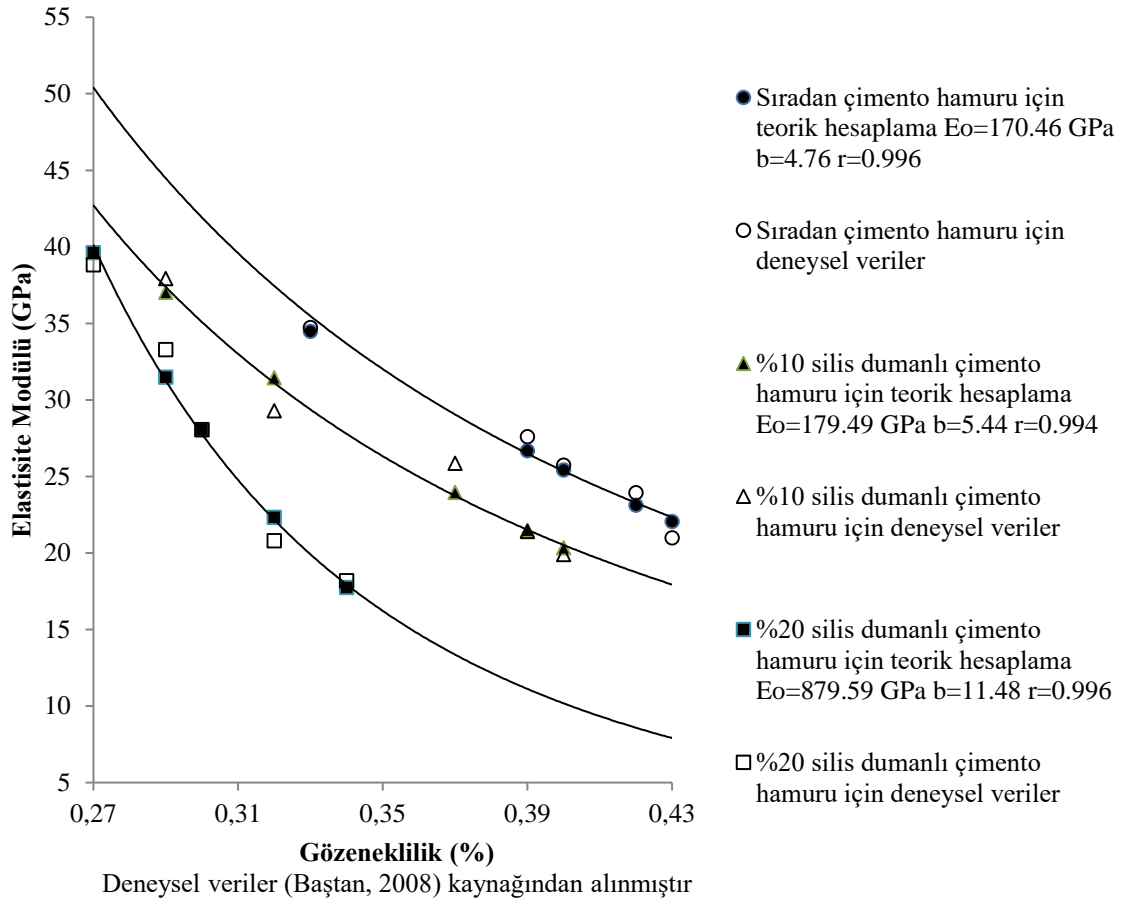
katsayılarının büyüklüğü artmaktadır. Hesaplanan m değerlerinden çimento hamurunun basık küremsiye benzer bir gözenek geometrisine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.1. Modifiye Edilmiş Paul modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

4.4.2. Spriggs Modeli

İstatistiksel analiz, modifiye edilmiş Sherban modelinin m parametresinin büyüklüğü sıfır alınarak yapılmıştır. Bu durumda model Spriggs (1961) denklemini vermektedir. Bu model, %27 ila %43 gözeneklilik aralığında sıradan ve silis dumanlı çimento hamurları için elde edilen test sonuçlarıyla mükemmel bir uyum içindedir. Bu uyum Şekil 4.2’de görülebilir. Denklem E_0 katsayısı sıradan çimento hamurları için 170,46 GPa, %10 silis dumanı içeren çimento hamurları için 179,49 GPa ve %20 silis dumanı içeren çimento hamurları için 879,59 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin sıradan ve silis dumanı içeren çimento hamurlarının sıfır gözeneklilikteki elastisite modülünü temsil etmesi beklenemez. Bunlar sadece %27 ila %43 gözeneklilik aralığındaki elastisite modüllerini hesaplamak için kullanılan katsayılardır.



Şekil 4.2. Spriggs modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

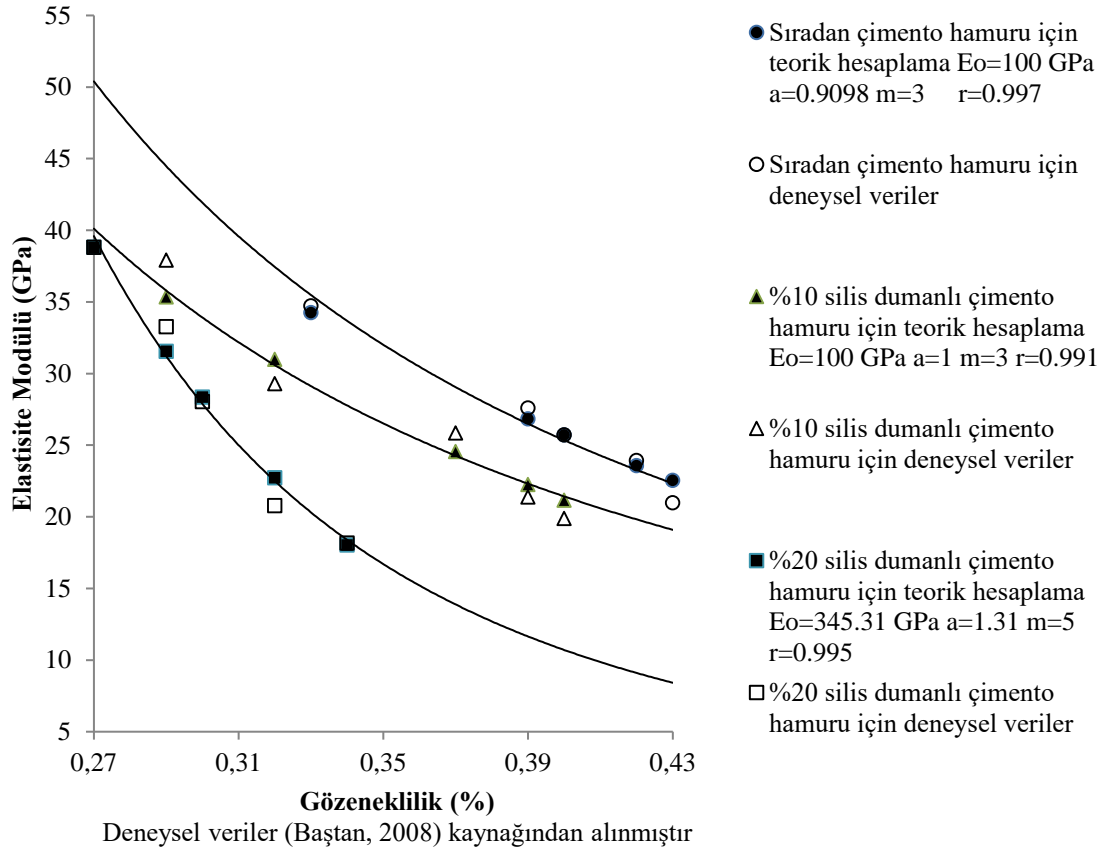
4.4.3. Phani ve Niyogi Modeli

Bir başka istatistiksel analizde, modifiye Edilmiş Sherban modelinin b ve n parametrelerinin büyüklükleri sırasıyla sıfıra ve bire eşit alınmıştır. Bu sabitler ile modifiye edilmiş Sherban modeli, Phani ve Niyogi (1987) modeline dönüşmektedir. Bu model ile hesaplanan elastisite modülleri deneysel değerlere çok yakındır. Bu uyum Şekil 4.3'te görülebilir. %10 silis dumanı içeren çimento hamuru için elde edilen verilerin hesaplanmasında a ve m parametreleri için sırasıyla 1 ve 3 değerleri bulunmuştur. Bu değerlerin Eşitlik 2.16'da yerine konulmasıyla aşağıdaki Powers denklemi elde edilir.

$$E = E_0(1 - p)^3 \quad (4.1)$$

Powers (1961) bu denklemi gözenekli çimento hamurlarının elastisite modülünü belirlemek için kullanmıştır. %20 silis dumanı içeren çimento hamuru için elde edilen deneysel verilerle Eşitlik 2.16'nın m parametresi 5 ve E_0 parametresi yaklaşık 345 GPa

olarak hesaplanmıştır. Sıradan ve %10 silis dumanı içeren çimento hamurlarının E_0 ve m parametreleri aynıdır. Ancak sıradan çimento hamurlarında istatistiksel analiz sonucu hesaplanan a parametresi %10 silis dumanı içeren çimento hamuruna göre %10 daha azdır. Denklemin parametrelerinde önemli bir değişiklik olmaması, deneysel sonuçları tanımlayan eğrilerin aynı özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

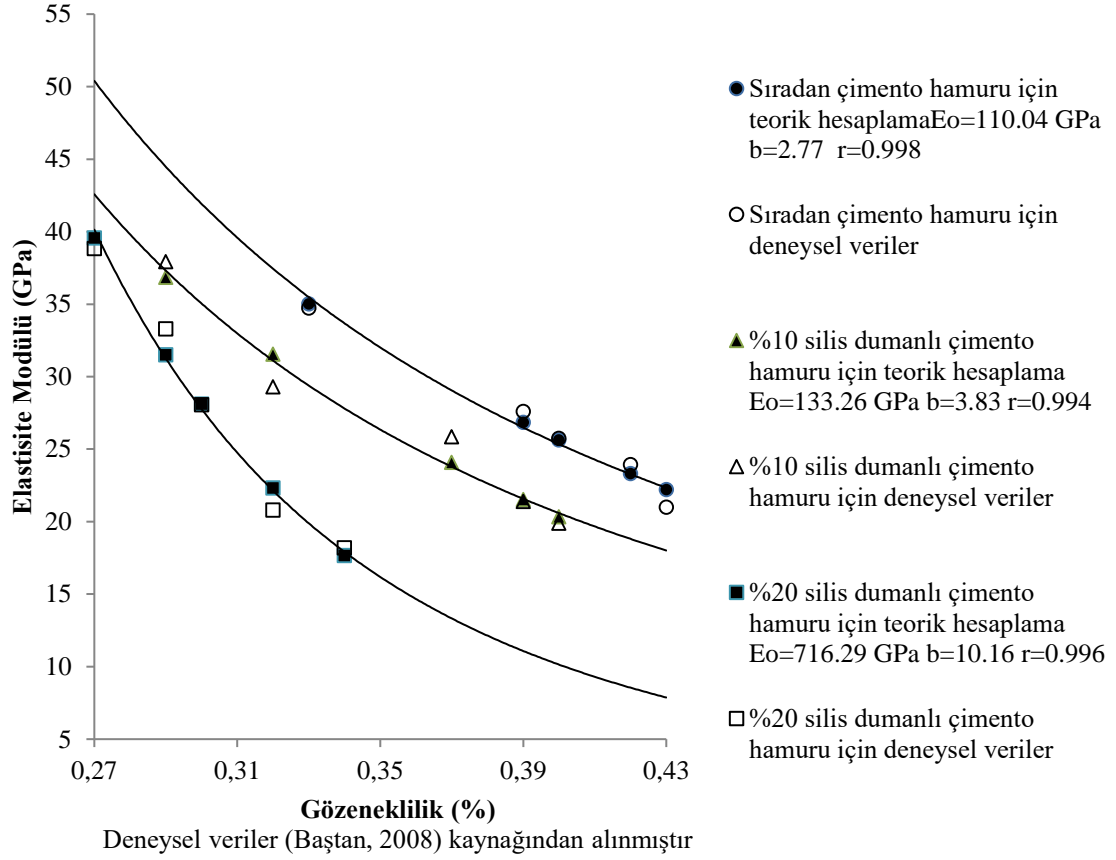


Şekil 4.3. Phani ve Niyogi modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

4.4.4. Sherban Modeli

Eşitlik 2.16'daki n ve m parametrelerinin büyüklüğü 2'ye ve a parametresinin büyüklüğü 1'e eşit alınarak istatistiksel analiz yapılmıştır. Bu durumda, modifiye edilmiş Sherban modeli, Sherban modeline (1973) dönüşür. Şekil 4.4'ten Sherban modeli (1973) ile hesaplanan elastisite modülü ile deneysel değerler arasında mükemmel bir uyum olduğu görülebilir. Denklemin E_0 parametresi sıradan çimento hamurları için 110.04 GPa ve %10 silis dumanı katkılı çimento hamurları için 133.26 GPa olarak bulunmuştur. Denklemin b parametresi pozitif olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayılarının bire

çok yakın olması, Sherban modelinin (1973) sıradan ve silis dumanı katkılı çimento hamurlarının elastik özelliklerini belirlemek için yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4. Sherban modeli ile hesaplanan elastisite modüllerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

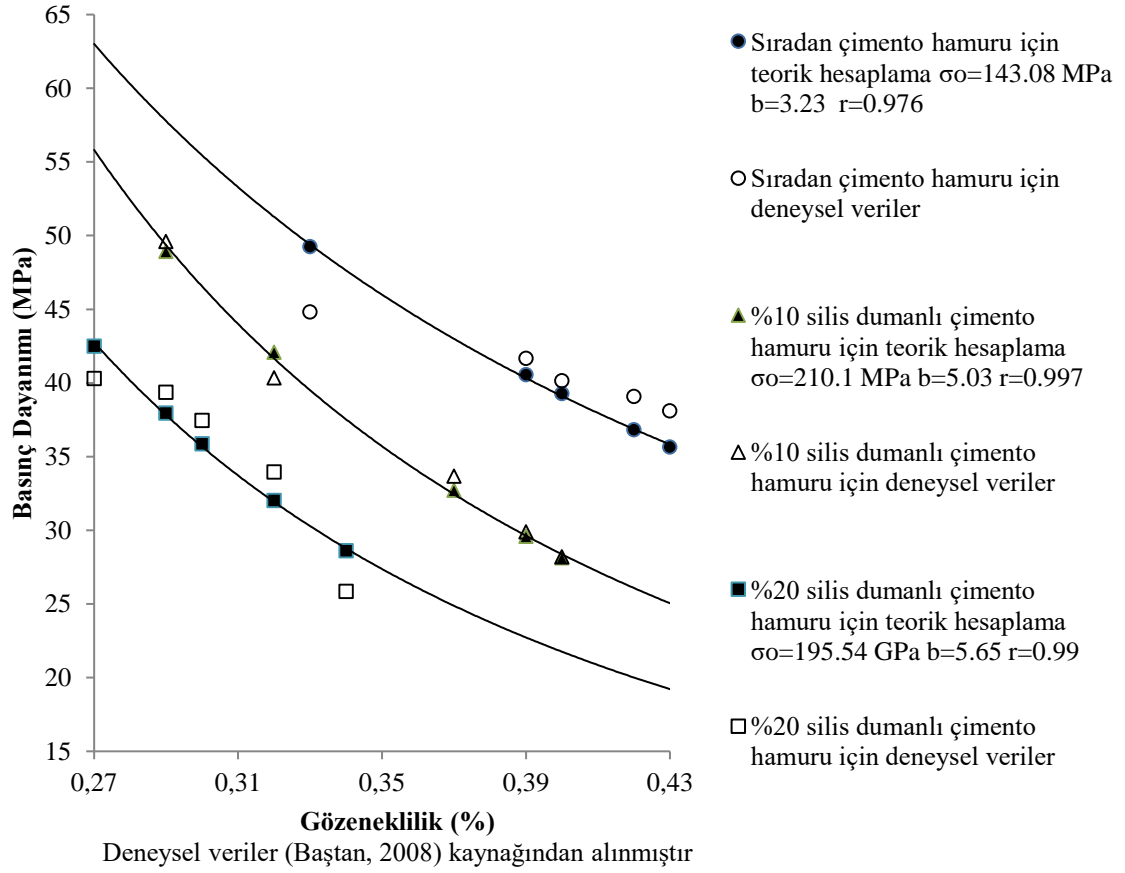
4.5. Hesaplanan Basınç Dayanımlarının Deneysel Verilerle Karşılaştırılması

Bölüm 2’de verilen modellerle hesaplanan basınç dayanımları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

4.5.1. Ryshkewitch-Duckworth Modeli

İstatistiksel analiz, Eşitlik 2.16’daki m parametrelerinin büyüklüğü sıfıra eşit alınarak yapılmıştır. Bu durumda, modifiye edilmiş Sherban modeli Ryshkewitch (1953)-Duckworth (1953) modeline dönüşür. Sıradan ve silis dumanı içeren çimento hamurlarının basınç dayanımları bu model ile tam olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.5’te görülebileceği gibi, teorik hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasında mükemmel bir

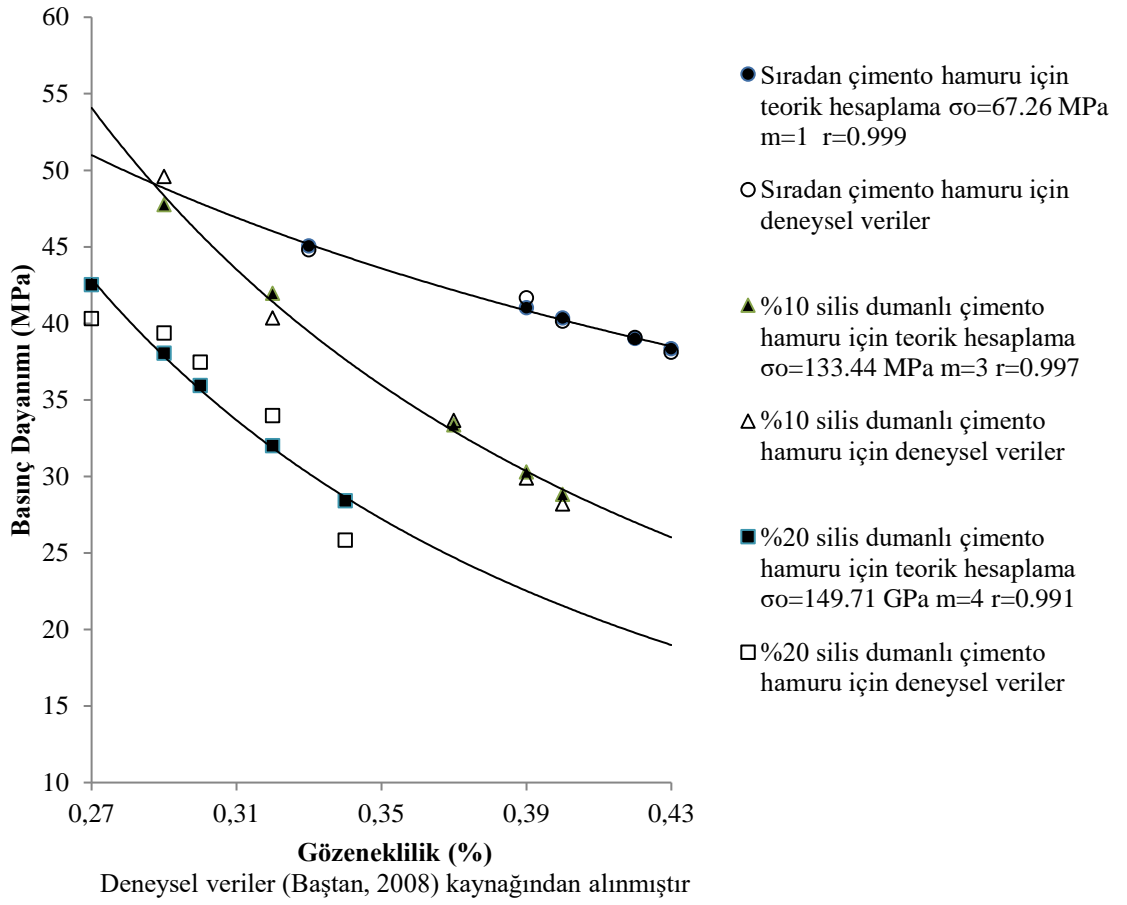
uyum vardır. İstatistiksel analiz sonucunda hesaplanan korelasyon katsayıları bire çok yakındır.



Şekil 4.5. Ryshkewitch-Duckworth modeli ile hesaplanan basınç dayanımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

4.5.2. Bal'shin Modeli

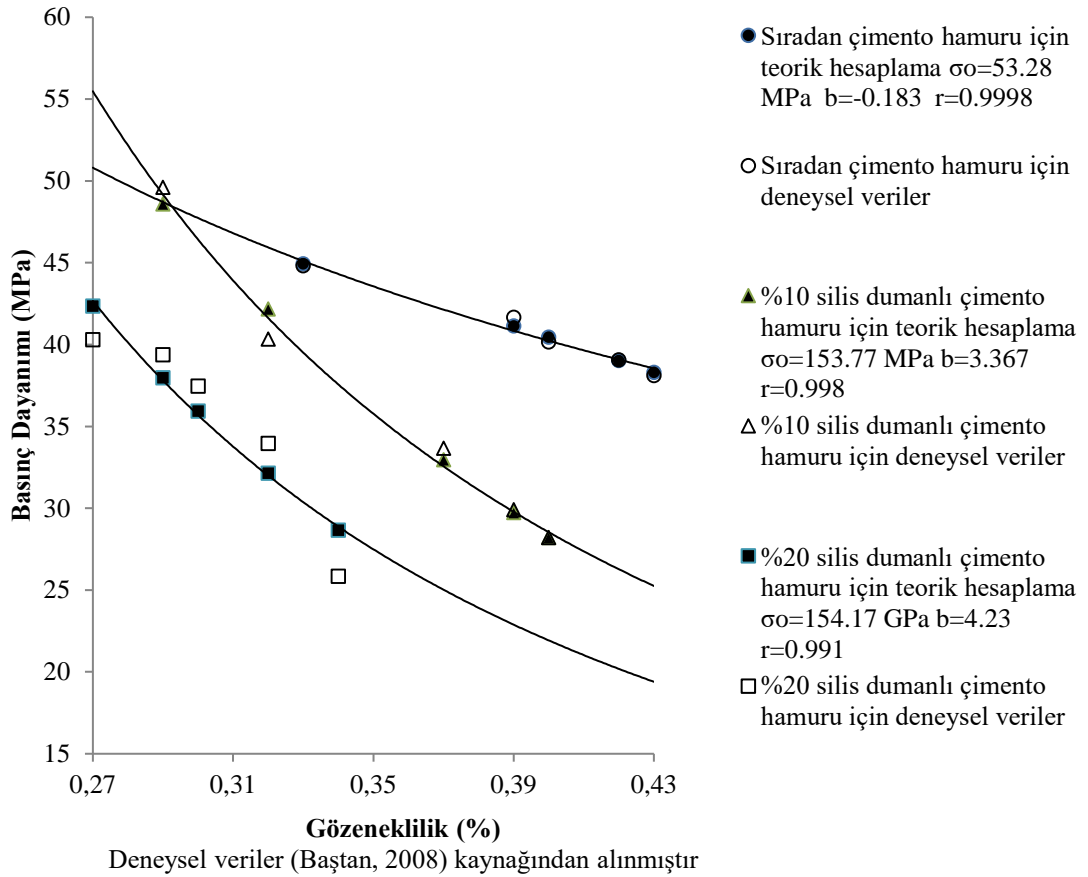
Başka bir istatistiksel analizde, Eşitlik 2.16'daki b parametresinin büyüklüğü sıfır, a ve n 'nin büyüklükleri ise bir olarak alınmıştır. Bu durumda, modifiye edilmiş Sherban modeli Bal'shin (1949) modelini temsil etmektedir. Şekil 4.6'dan da görüleceği üzere, bu model ile sıradan ve silis dumanı içeren çimento hamurlarının basınç dayanımları için çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Denklem σ_0 parametresi sıradan çimento hamurları için 67,26 MPa, %10 silis dumanı içeren çimento hamurları için 133,44 MPa ve %20 silis dumanı içeren çimento hamurları için 149,71 MPa olarak hesaplanmıştır. Denklem m parametresi 1 ile 4 arasında değişmektedir. İstatistiksel analiz sonucunda hesaplanan korelasyon katsayıları bire çok yakındır.



Şekil 4.6. Bal'shin modeli ile hesaplanan basınç dayanımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

4.5.3.Sherban Modeli

İstatistiksel analiz, Eşitlik 2.16'nın n ve m parametrelerinin büyüklüğü 2'ye ve a parametresinin büyüklüğü 1'e eşit alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, modifiye edilmiş Sherban modeli Sherban modeline (1973) dönüşür. Sıradan ve silis dumanı içeren çimento hamurlarının elastisite modülü için bu modelle yapılan hesaplamalar Şekil 4.7'de gösterilen deneysel sonuçlarla uyumludur. Korelasyon katsayılarının bire yakın olması bunun bir göstergesidir. Denklemin σ_0 parametresi sıradan çimento hamuru için 53,28 MPa ve %10 ve %20 silis dumanı içeren çimento hamurları için yaklaşık 154 MPa olarak hesaplanmıştır. Sıradan çimento hamurlarının verilerinin değerlendirilmesinde denklemin b parametresi negatif olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Sherban modeli ile hesaplanan basınç dayanımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

4.6. Portland Çimento lu Betonların Mekanik Özelliklerinde Silis Dumanı ve Epoksi Emülsiyonuna Bağlı Değişim

Katkılı ve katkısız betonların basınç dayanımları ve gerilme-şekil değiştirme davranışları ile ilgili tartışma aşağıda sunulmuştur. Numunelerin basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilmiştir.

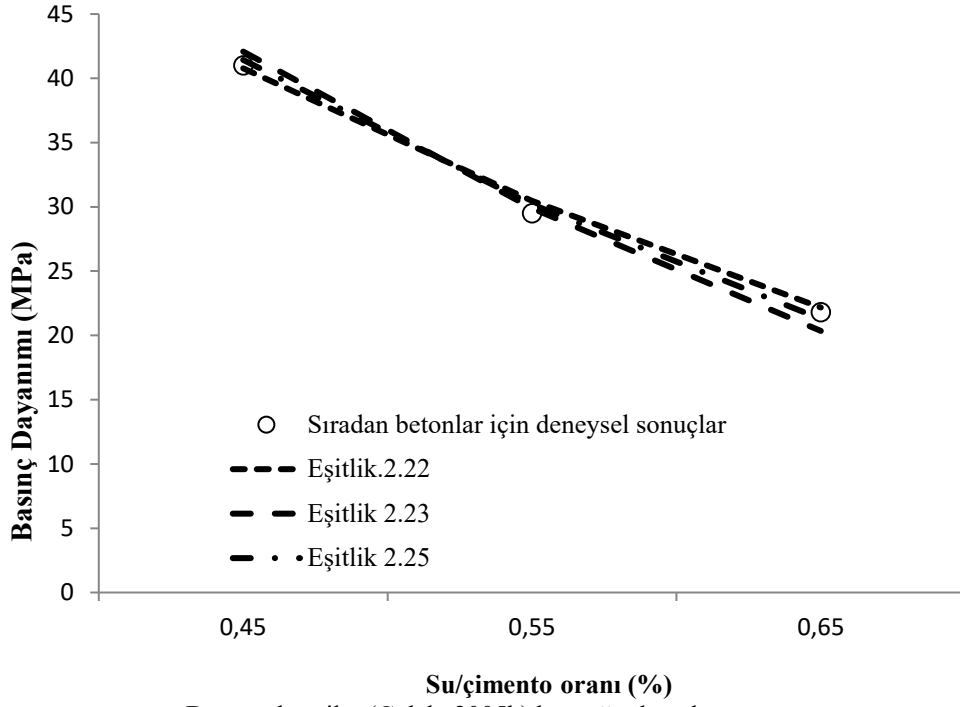
4.6.1. Basınç Dayanımları

Silis dumanı içeren betonların basınç dayanımları sıradan betonlara kıyasla önemli ölçüde artmıştır. %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı içeren betonların dayanımının sıradan betonlara göre %12-18 oranında azaldığı görülmüştür. Su/çimento oranının %65'ten %45'e düşürülmesi basınç dayanımı azalma oranlarını %33 azaltmaktadır. Beton basınç dayanımındaki azalmalar epoksi emülsiyonu içeren numunelerde daha belirgin hale gelmiştir. Bu betonların basınç dayanımı, sıradan beton

dayanımından yaklaşık %19,5 ila %22 daha azdır. Su/çimento oranının %65'ten %45'e düşmesi basınç dayanımı azalma oranlarını %11 azaltmaktadır. Bu sonuçlar, epoksi emülsiyonunun neden olduğu dayanım kayıplarının su/çimento oranının azaltılmasıyla en aza indirilebileceğini net bir şekilde göstermektedir. Silis dumanının dayanım kazanımları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, %10 epoksi ve %10 silis dumanı içeren betonların basınç dayanımları, %10 epoksi emülsiyonu içeren betonların basınç dayanımları ile karşılaştırılmıştır. %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı içeren betonların basınç dayanımı, %10 epoksi emülsiyonu içeren betonlara kıyasla %5 ila %9 oranında artmıştır. Su/çimento oranının %65'ten %45'e düşmesi dayanım artış oranında %80'lik bir yükselmeye neden olmuştur. Bu sonuç, epoksi emülsiyonlu betona silis dumanı ilavesinin dayanım kayıplarını azalttığını göstermektedir. Bu karşılaştırmadan, hem su/çimento oranındaki düşüşün hem de silis dumanı ilavesinin dayanım kazanımlarından sorumlu olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca, epoksi emülsiyonunun neden olduğu dayanım kayıpları, betonların maksimum basınç dayanımına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, maksimum basınç dayanımlarını hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır. Aşağıda detayları verilen bu yöntem, iki denklemi çözme ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

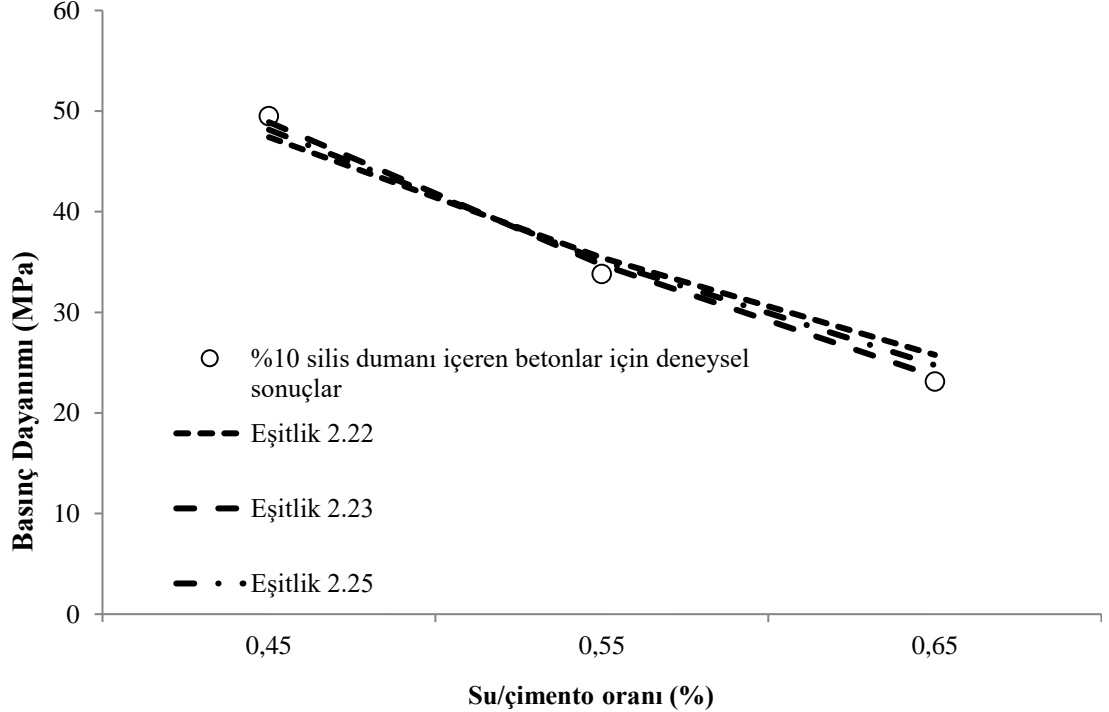
4.6.2.Hesaplama Yöntemi

İlk olarak, $(w/c)_m$ değeri Eşitlik 2.20 kullanılarak hesaplanır. Bu parametre kürlenme süresine bağlı olarak değişir ve sabit bir değere ulaşır ve değeri 0,183 ila 0,23 arasında değişir. Bu $(w/c)_m$ değerleri, iyice ve tamamen hidrate edilmiş Portland çimentosunun buharlaşmayan su içeriğine karşılık gelir (Lea, 1970). Herhangi bir su çimento oranına (w/c) karşılık gelen basınç dayanımı σ_a deneysel olarak belirlenir. Eşitlik 2.22'de kullanılacak n parametresinin büyüklüğü Eşitlik 2.21'den belirlenir. Eşitlik 2.23'teki n parametresinin büyüklüğü Eşitlik 2.24 kullanılarak hesaplanır. Hesaplamalarda A/c oranı 5 olarak alınır. Hesaplanan bu parametreler denklemlere yerleştirilerek beton basınç dayanımları belirlenir. Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11 Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 kullanılarak yapılan teorik hesaplamaları göstermektedir.



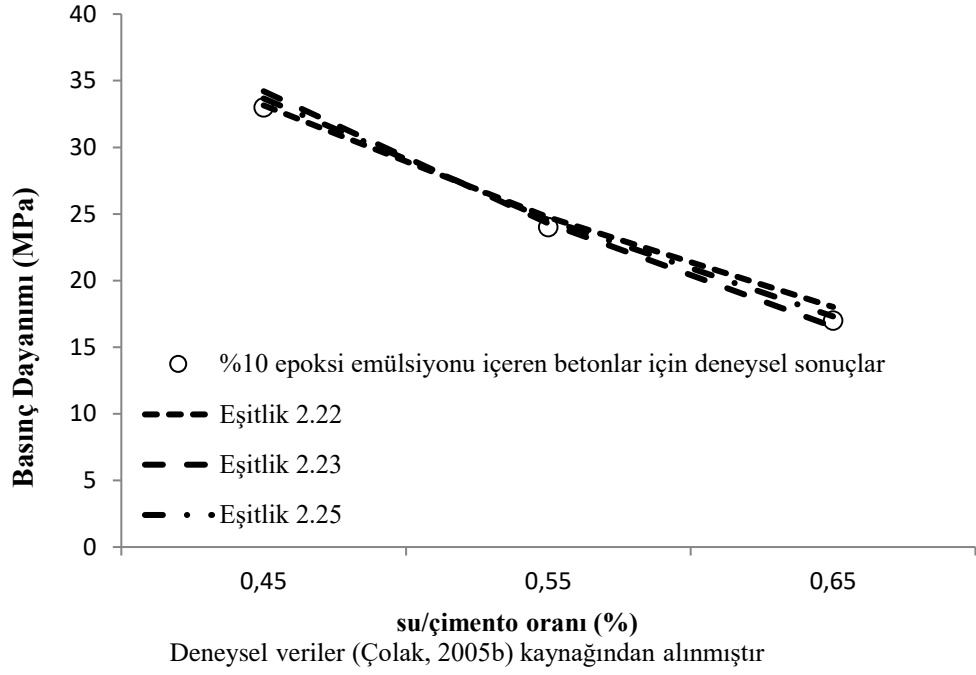
Deneyel veriler (Çolak, 2005b) kaynağından alınmıştır

Şekil 4.8. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin sıradan betonlar için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması

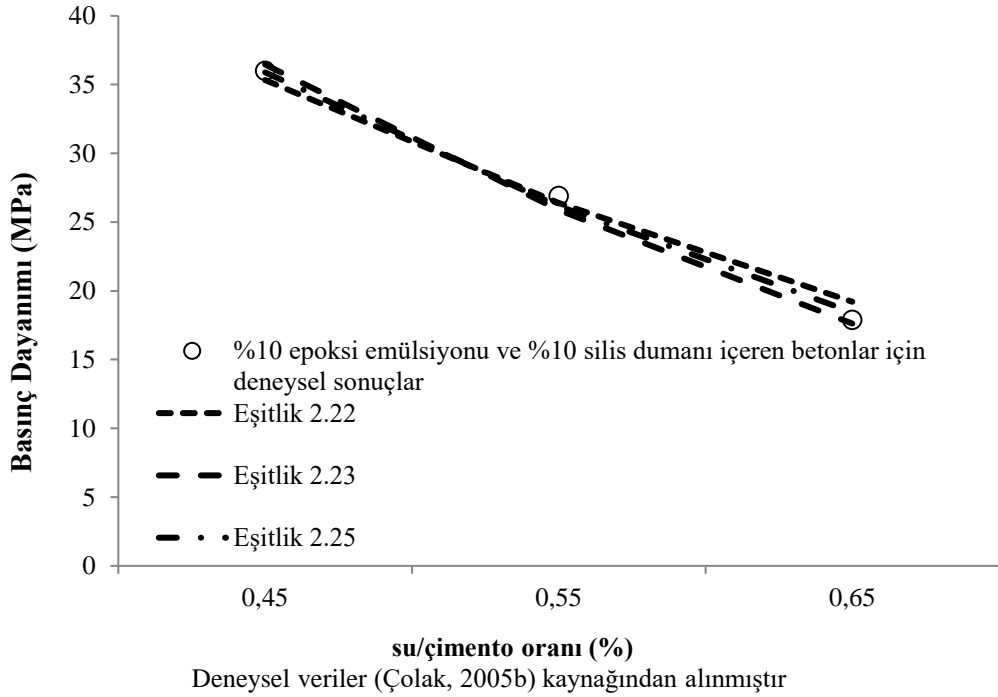


Deneyel veriler (Çolak, 2005b) kaynağından alınmıştır

Şekil 4.9. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %10 silis dumanı içeren betonlar için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 4.10. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %10 epoksi emülsiyonu içeren betonlar için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 4.11. Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması

Sıradan betonlarda, Eşitlik 2.22 ve 2.25 deneysel sonuçlara çok yakın basınç dayanımı değerleri vermektedir. Ancak, %65 su/çimento oranında Eşitlik 2.23 ile hesaplanan basınç dayanımı değerleri deneysel sonuçlardan biraz farklıdır. %10 silis dumanı içeren betonlarda Eşitlik 2.23 ve 2.25 ile çok benzer sonuçlar elde edilmiştir. %65 su/çimento oranında Eşitlik 2.22 deneysel sonuçlardan biraz sapmaktadır. %10 epoksi emülsiyonu içeren betonlarda Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç, epoksi emülsiyonu için elde edilen deneysel verilerin teorik sonuçlarla uyumlu olmasından kaynaklanmaktadır. %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı içeren betonlar için Eşitlik 2.23 ve 2.25 ile hesaplanan basınç dayanımları deneysel değerlere yakındır. Eşitlik 2.22 ile %65 su/çimento oranında elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlardan biraz farklıdır. Genel olarak Eşitlik 2.22, 2.23 ve 2.25 ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. %65'lik su/çimento oranı için elde edilen küçük farklılıklar eğrilerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Portland çimentolu betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sıradan betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları

	$(w/c)_m$	σ_m (MPa)	$(w/c)_a$	σ_a (MPa)	A/c	n
Eşitlik 2.22	0.1934	64.26	0.55	30.47	5	32
Eşitlik 2.23	0.1934	70.12	0.55	30.47	5	0.5391
Eşitlik 2.25	0.1934	67.03	0.55	30.47	5	-

Çizelge 4.2. %10 silis dumanı içeren betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları

	$(w/c)_m$	σ_m (MPa)	$(w/c)_a$	σ_a (MPa)	A/c	n
Eşitlik 2.22	0.1934	74.69	0.55	35.50	5	32
Eşitlik 2.23	0.1934	81.47	0.55	35.50	5	0.5391
Eşitlik 2.25	0.1934	77.90	0.55	35.50	5	-

Çizelge 4.3. %10 epoksi emülsiyonu içeren betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları

	$(w/c)_m$	σ_m (MPa)	$(w/c)_a$	σ_a (MPa)	A/c	n
Eşitlik 2.22	0.1934	52.24	0.55	24.76	5	32
Eşitlik 2.23	0.1934	56.99	0.55	24.76	5	0.5391
Eşitlik 2.25	0.1934	54.49	0.55	24.76	5	-

Çizelge 4.4. %10 epoksi emülsiyonu ve %10 silis dumanı içeren betonların 28 günlük basınç dayanımını hesaplamak için kullanılan denklemlerin katsayıları

	$(w/c)_m$	σ_m (MPa)	$(w/c)_a$	σ_a (MPa)	A/c	n
Eşitlik 2.22	0.1934	55.67	0.55	26.39	5	32
Eşitlik 2.23	0.1934	60.74	0.55	26.39	5	0.5391
Eşitlik 2.25	0.1934	58.07	0.55	26.39	5	-

Eşitlik 2.22, Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.25 ile hesaplanan maksimum basınç dayanımı değerleri sıradan betonlarda 64,26 ila 70,12 MPa, silis dumanı içeren betonlarda 74,69 ila 81,47 MPa, epoksi emülsiyonlu betonlarda 52,24 ila 56,99 MPa, epoksi emülsiyon ve silis dumanı içeren betonlarda ise 55,67 ila 60,74 MPa arasında değişmektedir. Bu teorik sonuçlar, epoksi emülsiyonu ve silis dumanı içeren betonlarda çok yüksek dayanımlar elde edilebileceğini göstermektedir. Bu betonların maksimum basınç dayanımı sadece epoksi emülsiyonlu betona göre yaklaşık %6,6 daha yüksektir. Sonuç olarak, epoksi emülsiyonunun neden olduğu dayanım düşüşleri, karışıma silis dumanı eklenerek azaltılabilir. Abrams (1919) ve Popovics (1990) modelleri ile belirli bir su/çimento oranı aralığında kesinlikle başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Ancak bu modeller betonun maksimum basınç dayanımı hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir.

Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'deki deneysel verilerden epoksi emülsiyonlu ve silis dumanlı betonların basınç dayanımlarının sıradan betonlara göre biraz daha düşük olduğu

anlaşılmaktadır. Ancak, dayanımdaki bu düşük azalma, kırılma tokluğundaki artış nedeniyle ihmal edilebilir. Bunu kanıtlamak için numunelerin gerilme ve şekil değiştirme davranışları incelenmiş ve kırılma tokluğu hesaplanmıştır. Betonların gerilme ve şekil değiştirme davranışını tanımlayan model ve kırılma tokluğunun hesaplanmasına ilişkin detaylar aşağıda verilmiştir.

4.7. Kırılma Tokluğu

Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'teki eğrilerin altında kalan alanlar sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmış ve betonların kırılma toklukları belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te verilen sonuçlardan epoksi emülsiyonu ve silis dumanı içeren betonlarının kırılma tokluklarının oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu tip betonların sünek bir davranış göstermesi ve çok yüksek deformasyon kapasitesine sahip olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır.

Çizelge 4.5. Eşitlik 2.33 ile hesaplanan parametreler

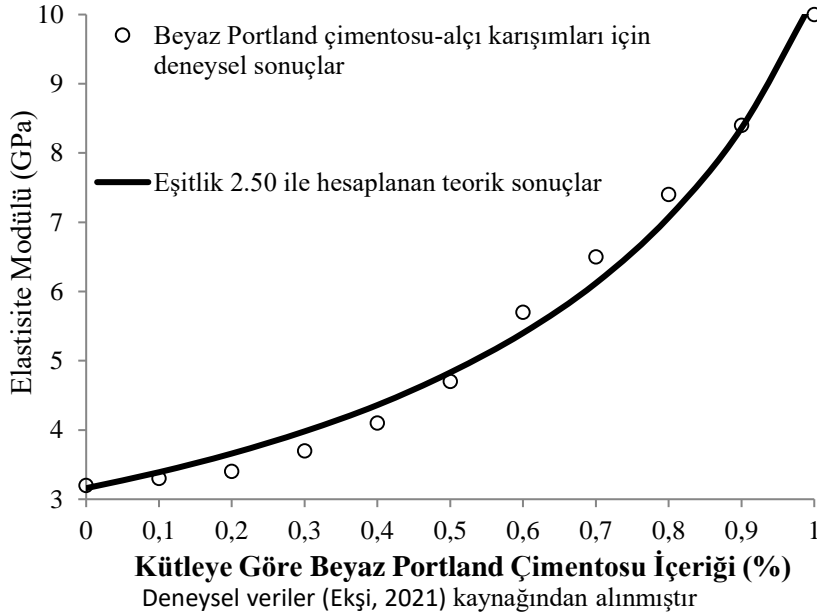
Beton Türü	Parametreler	Su/çimento oranı (%)		
		45	55	65
Sıradan Beton	Elastisite modülü (GPa)	31.879	22.6	18.6
	Kırılma tokluğu (kJ/m ³)	51	36	28
	β	0.6370	0.6144	0.7725
% 10 Silis dumanlı beton	Elastisite modülü (GPa)	38.196	27.656	18.537
	Kırılma tokluğu (kJ/m ³)	61	42.9	29
	β	0.6260	0.7105	0.6825
% 10 Epoksi emülsiyonlu beton	Elastisite modülü (GPa)	15.691	10.209	6.779
	Kırılma tokluğu (kJ/m ³)	74	51	35
	β	0.7348	0.5742	0.4812
% 10 Epoksi emülsiyonlu ve % 10 silis dumanı içeren beton	Elastisite modülü (GPa)	17.075	12.641	8.058
	Kırılma tokluğu (kJ/m ³)	80	60	39
	β	0.7313	0.7179	0.6560

4.8. Beyaz Portland Çimentosu-Alçı Karışımlarının Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Beyaz Portland çimentosu-alçı karışımından oluşan iki fazlı kompozitler için elde edilen deneysel sonuçlar, mevcut ve modifiye edilmiş modellerle hesaplanan teorik verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Çolak (2005b) tarafından üç fazlı kompozitler için önerilen modellerin geçerliliği, teorik verilerin beyaz Portland çimentosu-alçı-kireç karışımı için elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak test edilmiştir. Hesaplamalarda Reuss, Popovics, modifiye edilmiş Paul ve Ishai modelleri beyaz Portland çimentosu-alçı karışımlarının deneysel sonuçlarıyla en uyumlu denklemler olarak belirlenmiştir. Test sonuçları Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'te verilmiştir.

4.8.1.Reuss Modeli

Reuss modeli Eşitlik 2.50 ile verilmektedir. Bu denklemin deneysel verilere uyumu Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



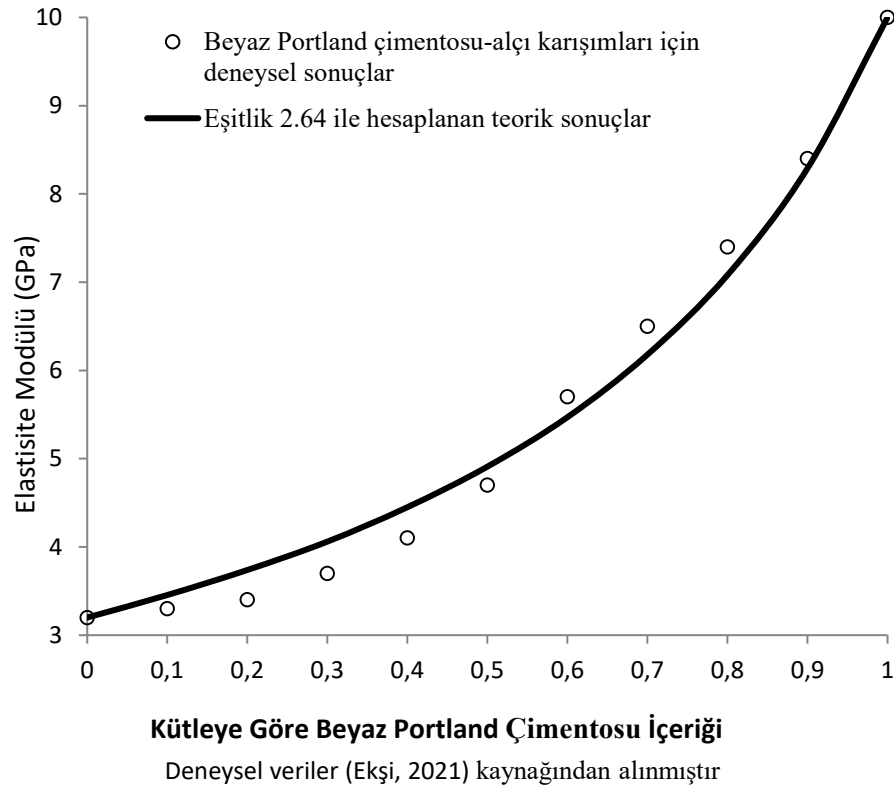
Şekil 4.12. Eşitlik 2.50'nin deneysel verilerle karşılaştırılması

Hesaplamalarda E_1 için 10 GPa ve E_2 için 3,2 GPa alınmıştır. Şekil 4.12'den de görülebileceği gibi, teorik hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum vardır. Eğrinin eğiminde %50 beyaz Portland çimentosu ikamesinde bir artış görülmektedir. Bu noktadan sonra eğrinin eğimi artmaya devam etmektedir. Başka bir

deyişle, %50 beyaz Portland çimentosu ikamesinden sonra elastisite modülündeki artış belirginleşmektedir. Reuss modeli ile hesaplanan sonuçlar %50 beyaz Portland çimentosu ikamesine kadar deneysel değerlerin biraz üzerindedir. Bu ikameden sonra teorik sonuçlar deneysel sonuçların biraz altında kalmaktadır. Buna rağmen, denklemin geçerliliğinin %10 ila %90 beyaz Portland çimentosu ikamesi aralığında olduğu söylenebilir.

4.8.2.Modifiye Edilmiş Paul Modeli

Bu model Eşitlik 2.64 ile verilmektedir. Bu denklemin deneysel verilere uyumu Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



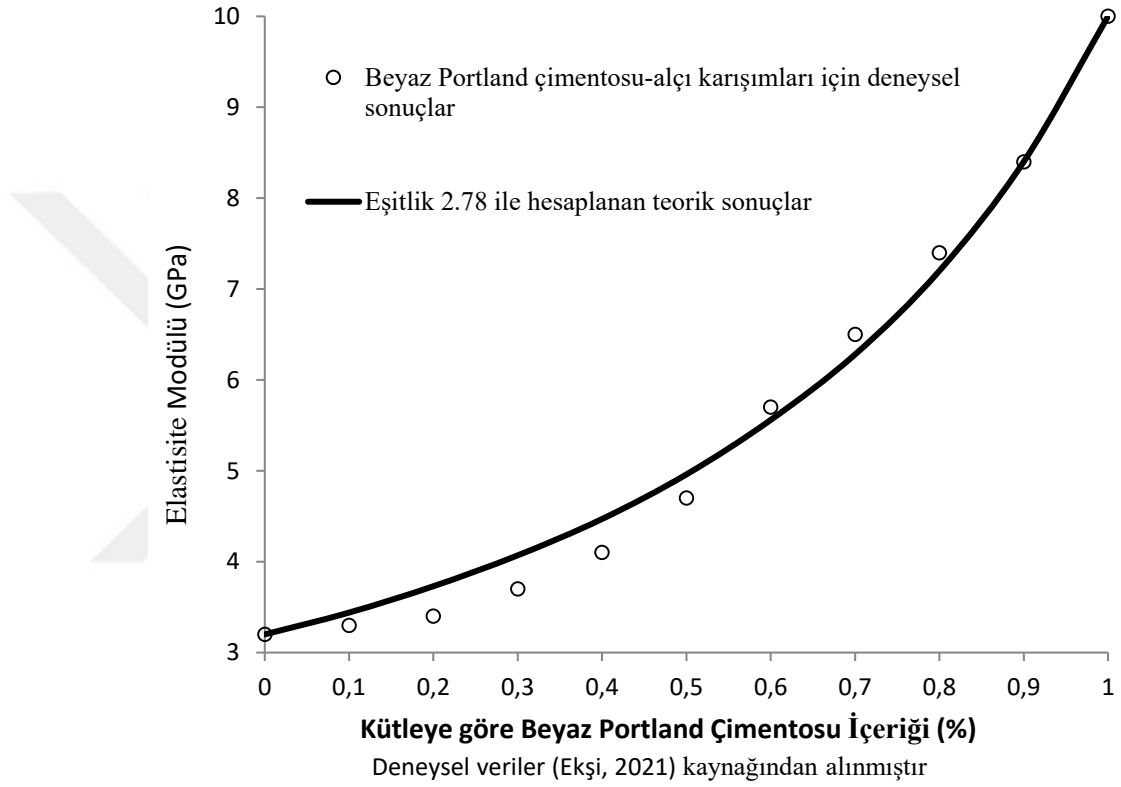
Şekil 4.13. Eşitlik 2.64'ün deneysel verilerle karşılaştırılması

Hesaplamalarda E_1 için 3,2 GPa ve E_2 için 10 GPa değerleri alınmıştır. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre m katsayısının değeri 1,841 olarak hesaplanmıştır. Bu katsayı sayesinde deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlanmıştır. Modifiye edilmiş Paul modeli ile hesaplanan sonuçlar, %50 beyaz Portland çimentosu ikamesine kadar deneysel sonuçların biraz üzerindedir. Şekil 4.13'teki sonuçlardan bu denklemin %50 ila %100

arasındaki beyaz Portland çimentosu ikamelerinde daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

4.8.3.Modifiye Edilmiş Ishai Modeli

Bu model Eşitlik 2.78 ile verilmektedir. Bu denklemin deneysel verilere uyumu Şekil 4.14'te gösterilmektedir.

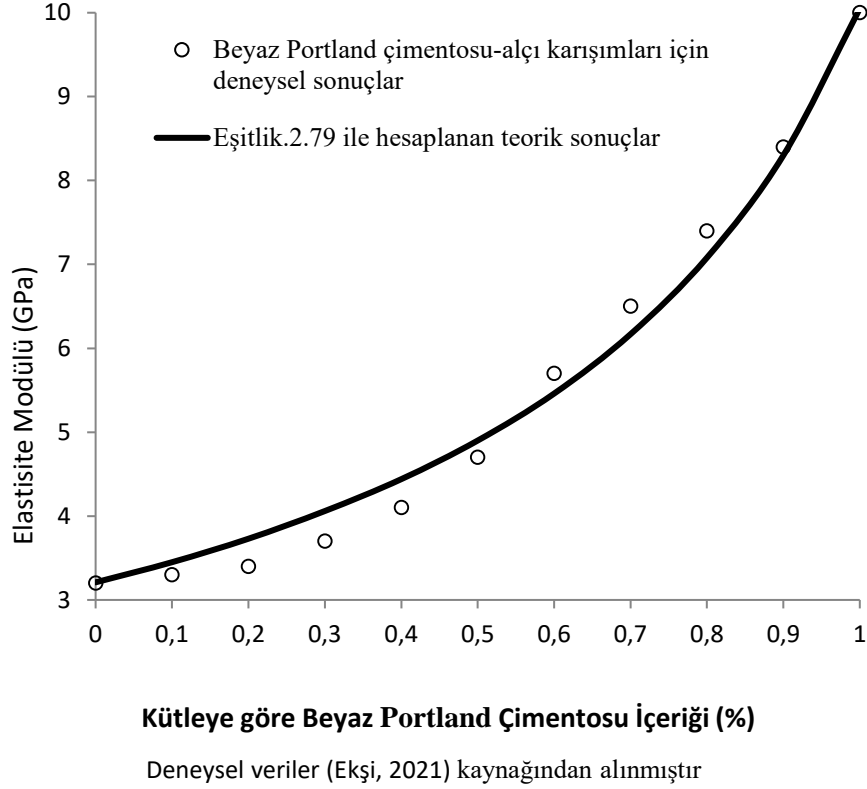


Şekil 4.14. Eşitlik 2.78'in deneysel verilerle karşılaştırılması

Hesaplamalarda E_1 için 3,2 GPa ve E_2 için 10 GPa alınmıştır. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre m katsayısının değeri 1,487 olarak hesaplanmıştır. Bu katsayı nedeniyle deneysel sonuçlar iyi bir şekilde eşleşmiştir. %0 ila %50 beyaz portland çimentosu ikamesi aralığında, Ishai modeli ile teorik olarak hesaplanan elastisite modülü deneysel değerlerden biraz daha yüksektir. Öte yandan, %50 ila %100 beyaz Portland çimentosu ikamesi aralığında teorik sonuçlar deneysel verilere çok yakındır. Bu nedenle, Ishai denkleminin geçerliliği %50 ila %100 beyaz Portland çimentosu ikame edildiği aralıktadır.

4.8.4. Popovics Modeli

Bu model Eşitlik 2.79 ile verilmiştir. Bu denklemin deneysel verilere uyumu Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Eşitlik 2.79'un deneysel verilerle karşılaştırılması

Hesaplamalarda E_1 için 10 GPa ve E_2 için 3,2 GPa değerleri alınmıştır. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda modeli tanımlayan A ve B katsayılarının değerleri sırasıyla 0,01588 ve 0,98937 olarak hesaplanmıştır. A katsayısının değerinin sıfıra çok yakın olması birim hücredeki baskın fazın Reuss modeli olduğunu açıklamaktadır. Bu model ile yapılan teorik hesaplamalar, %50'ye kadar beyaz Portland çimentosu ikame edildiği durumda deneysel sonuçlardan çok az farklılık göstermektedir. Bu nedenle, denklemin geçerliliği %50 ila %100 beyaz Portland çimentosu ikamesi aralığındadır.

4.9. Beyaz Portland Çimentosu-Alçı-Kireç Karışımlarının Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Eşitlik 2.95 ile hesaplanan teorik değerler, beyaz Portland çimentosu-alçı-kireç karışımları için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Her bir karışım oranına

karşılık gelen teorik hesaplamalar Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu hesaplamalarda E_1 için 1,2 GPa, E_2 için 10 GPa ve E_3 için 3,2 GPa değerleri alınmıştır. Çizelge 4.6'da verilen sonuçlardan teorik hesaplamaların deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. %50 Beyaz Portland çimentosu, %40 alçı ve %10 kireç içeren karışım için Eşitlik 2.95 ile hesaplanan elastisite modülü deneysel sonuçtan yaklaşık %5 farklıdır. Aynı durum %40 beyaz Portland çimentosu, %50 alçı ve %10 kireç içeren karışımlar için de geçerlidir. Bu karışım için Eşitlik 2.95 ile hesaplanan elastisite modülü ile deneysel sonuç arasında sadece %4 fark vardır. Sonuç olarak Eşitlik 2.95 ile başarılı sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Beyaz Portland çimentosu-alçı-kireç karışımlarının elastisite modülü beyaz Portland çimentosu miktarına bağlı olarak değişmektedir. Karışımdaki Portland çimentosu miktarının %50'den %40'a düşmesi elastisite modülünün 4,87'den 4,23 GPa'ya düşmesine neden olmuştur.

Çizelge 4.6. Eşitlik 2.95 ile hesaplanan teorik değerlerin deneysel verilerle karşılaştırılması

Karışım oranı (%)			Teorik Sonuçlar (GPa)	Deneysel Sonuçlar (GPa)
Beyaz Portland Çimentosu	Alçı	Kireç		
50	40	10	5.1	4.87
40	50	10	4.417	4.23
Deneysel veriler (Ekşi, 2021) kaynağından alınmıştır.				

Eşitlik 2.108 ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7'de verilmiştir. Eşitlik 2.108 ile hesaplanan elastisite modülü değeri 6.149 ila 6.4755 GPa arasında değişmektedir. Bu değerler deneysel değerlerden daha yüksektir. Karışımdaki alçı miktarı arttıkça elastisite modülünün artması beklenmemektedir. Eşitlik 2.108 ile %50 beyaz Portland çimentosu, %40 alçı ve %10 kireç içeren kompozitler için hesaplanan elastisite modülü deneysel sonuçtan %26 daha yüksektir. Buna karşın, %40 beyaz Portland çimentosu, %50 alçı ve %10 kireç içeren kompozitler için Eşitlik 2.108 ile hesaplanan elastisite modülü ile deneysel sonuç arasında %53'lük bir fark vardır. Bu sonuçlar, 28 gün boyunca kürlen

numunelerin elastisite modülünün Eşitlik 2.108 ile tahmin edilemeyeceğini açıkça göstermektedir.

Çizelge 4.7. Eşitlik 2.108 ile hesaplanan teorik değerlerin deneysel verilerle karşılaştırılması.

Karışım oranı (%)			Teorik Sonuçlar (GPa)	Deneysel Sonuçlar (GPa)
Beyaz Portland Çimentosu	Alçı	Kireç		
50	40	10	6.149	4.87
40	50	10	6.4755	4.23

Deneysel veriler (Ekşi, 2021) kaynağından alınmıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

5.1. Silis Dumanı Katkılı Portland Çimentosu Hamurlarına İlişkin Sonuçlar

1. Sıradan çimento hamuruna silis dumanı eklenmesi mekanik özelliklerde ve gözeneklilikte değişikliklere neden olur. Elastisite modülündeki artış, düşük su/çimento oranında belirginleşmektedir. Su/çimento oranı %25 olan %10 silis dumanlı çimento hamurlarının basınç dayanımı normal çimento hamurlarına göre biraz daha yüksektir.
2. Sıradan ve %10 silis dumanı içeren çimento hamurlarının elastik özellikleri modifiye Edilmiş Paul modeli ile doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Sherban modeli ile sıradan ve silis dumanı içeren çimento hamurlarının hem basınç dayanımı hem de elastik özellikleri için %27 ila %43 gözeneklilik aralığında son derece başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde yer alan doğrusal, kuvvet ve üstel denklemler modifiye edilmiş Sherban modeli ile tanımlanabilmektedir. Bu denklemleri tanımlayan katsayıların büyüklüğü, deneysel sonuçlara ve istatistiksel analizde kullanılan hesaplama yöntemine bağlı olarak değişebilir. Hesaplanan katsayılar modifiye edilmiş Sherban denklemine yerleştirilerek fiziksel olayı tanımlayan fonksiyon ya da fonksiyonlar kolaylıkla belirlenebilir.

5.2. Silis Dumanlı ve Epoksi Emülsiyonlu Portland Çimentolu Betonlara İlişkin Sonuçlar

1. Epoksi emülsiyonlu betonların basınç dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Basınç dayanımındaki bu kayıp, su/çimento oranının düşürülmesi ve silis dumanı eklenmesi ile minimize edilebilir.

2. Eşitlik 2.22, Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.25 kullanılarak, sıradan çimento, epoksi emülsiyonlu çimento, silis dumanı içeren çimento ve epoksi emülsiyon-silis dumanı içeren çimento ile yapılan betonların basınç dayanımlarını belirlemek mümkündür. Bu betonlarda maksimum basınç dayanımlarına karşılık gelen su-çimento oranları analitik bağıntılar yardımıyla hesaplanabilmektedir.
3. Sıradan çimento, epoksi emülsiyonu içeren çimento, silis dumanı içeren çimento ve epoksi emülsiyon-silis dumanı içeren çimento ile üretilen betonun gerilme ve şekil değiştirme davranışı Eşitlik 2.33 ile tanımlanabilir. Böylece sonlu farklar yöntemi ile eğri altında kalan alan hesaplanarak betonun kırılma tokluğu belirlenebilir.
4. Epoksi emülsiyonu ve silis dumanı içeren betonların kırılma tokluğu, katkı maddesi içermeyen betonlardan önemli ölçüde daha yüksektir. Epoksi emülsiyonu katkısı, betonların basınç dayanımındaki küçük azalmaların ihmal edilebilir seviyede olmasına yol açar.

5.3. Portland Çimentosu-Alçı ve Portland Çimentosu-Alçı-Kireç Karışımlarına İlişkin Sonuçlar

1. Beyaz Portland çimentosu-alçı karışımlarının elastisite modülleri Reuss modeli ile başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Bu modelde, herhangi bir karışım oranına karşılık gelen elastisite modülü, beyaz Portland çimentosu ve alçıtaşının deneysel olarak belirlenen elastisite modülleri kullanılarak teorik olarak hesaplanabilmektedir.
2. Modifiye edilmiş Paul, modifiye edilmiş Ishai ve Popovics modelleri deneysel verilere çok yakın sonuçlar vermiştir. Ancak, bu modeller beyaz Portland çimentosu ve alçının elastisite modülleri ile birlikte bir katsayı da içermektedir. Bu nedenle, doğru tahminler için deneysel sonuçlara ihtiyaç vardır.
3. Voigt ve Reuss modellerinin birleşimi olan Popovics modeli ile yapılan hesaplamalarda Reuss modelinin baskın faz olduğu tespit edilmiştir.
4. Çolak Modeli I, beyaz Portland çimentosu-alçı-kireç karışımlarının elastisite modülünü belirlemek için uygun bir modeldir. Bu denklem ile teorik olarak hesaplanan elastisite modülleri deneysel değerlerden çok farklı değildir.

KAYNAKLAR

Abrams, D.A. (1919). *Design of Concrete Mixtures*. Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute, Chicago, May.

Aggarwal, L.K., Thapliyal, P.C., & Karade, S.R. (2007). Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions. *Construction and Building Materials*, 21, 379-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.007>

Bal'shin, M.Y. (1949). Relation of mechanical properties of powder metals and their porosity and the ultimate properties of porous metal-ceramic materials. *Doklady Akademii nauk SSSR* 67(5)831-834.

https://www.researchgate.net/publication/285324190_Relation_of_mechanical_properties_of_powder_metals_and_their_porosity_and_the_ultimate_properties_of_porous_metalceramic_materials

Baştan, Ö. A. (2008). Portland çimentolu hamurların mekanik özelliklerinin basit matematiksel modeller yardımıyla tahmini. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=6IGSpCmQZHcSkxQALa295w&no=JOBaZfqxa9f41BC3Ym9kMw>

Chandra, S., Berntsson, L., & Flodin, P. (1981). Behaviour of Calcium Hydroxide with styrene-methacrylate polymer dispersion, *Cement and Concrete Research*, 11(1), 125-129. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90015-6)

Çolak, A. (2005a). Properties of plain and latex modified Portland Cement Pastes and concretes with and without superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1510-1511. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.012>

Çolak, A. (2005b). Estimation of the mechanical properties of two and three phase composites, Technical Note, Unpublished Data.

- Çolak, A. (2006a). A new model for the estimation of compressive strength of Portland cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 36, 1409-1413. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.002>
- Çolak, A. (2006b). Estimation of compressive strength of Portland cement concrete depending on the water to cement and aggregate to cement ratios, Technical note, Unpublished Data.
- Çolak, A. (2006c). Physical and Mechanical Properties of Polymer-Plaster Composites, *Materials Letters*, 60(16), 1977-1982. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.12.062>
- Clyne, T.W., & Hull, D. (2019). An introduction to composite materials, Third Edition, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139050586>
- Daniel, I.M., & Ishai, O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, New York.
- Dolezelova, M., Svora, P., & Vimmrova, A. (2017). Ternary gypsum-based materials: Composition, properties and utilization, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 251, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012036>
- Duckworth, W. (1953). Discussion of Ryshkewitch paper by Winston Duckworth, *Journal of the American Ceramic Society*, 36(2), 68. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1953.tb12838.x>
- Ekşi, Y.K. (2021). Farklı türde bağlayıcı içeren kompozitlerin elastisite modülünün belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=v7BkNnnepTnbhn8rNR77LTJLQqt97yuxxYgLJjWjnFLB6iSsI2IDGZtp7M9gfv-Z>
- Feng, X.Q., Mai, Y.W., & Qin, Q.H. (2003). A micromechanical model for interpenetrating multiphase composites. *Computational Materials Science*, 28 (3-4) 486-493. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2003.06.005>
- Helmut, R.A., & Turk, D.H. (1966). Elastic moduli of hardened Portland cement and tricalcium silicate pastes: Effect of porosity, Symposium on Structure of Portland cement pastes and concretes, Highway Research Board, Special report No.90, Washington D.C., 135-144. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr90/90-012.pdf>

Horny, D., & Schulz, K. (2022). Analysis of interpenetrating metal ceramic composite structures using an enhanced random sequential absorption microstructure generation algorithm. *Journal of Materials Science, Metals and Corrosion*, 57, 8869-8889. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07180-1>

Ishai, O. (1965). Discussion on article by U.J. Counto. *Magazine of Concrete Research*, 17(52), 142-151. <https://doi.org/10.1680/mac.1965.17.52.142>

Ishai, O., & Cohen, L.J. (1967). Elastic properties of filled and porous epoxy composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 9(8), 539-546. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(67\)90053-7](https://doi.org/10.1016/0020-7403(67)90053-7)

Kadambi, P., Luniya, P., & Dhatrak, P. (2021). Current advancements in polymer/polymer matrix composites for dental implants: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 46(1), 740-745. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.396>

Khalil, Kh. A. (1996). Pore structure and surface area of hardened cement pastes containing silica fume. *Materials Letters*, 26(4-5), 259-264. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(95\)00235-9](https://doi.org/10.1016/0167-577X(95)00235-9)

Krishna, M.G., Kumar, K.P., Swapna, M.N., Rao, J.B., & Bhargava, N.R.M.R. (2017). Metal-Metal Composites-An Innovative Way for Multiple Strengthening. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8085-8095. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.148>

Lea, F.M. (1970). *The chemistry of cement and concrete*. Edward Arnold, London

Lezgy-Nazargah, M. (2015). A micromechanics model for effective coupled thermos-electro-elastic properties of macro fiber composites with interdigitated electrodes. *Journal of Mechanics*, 31(2), 183-199. <https://doi.org/10.1017/jmech.2014.73>

Lezgy-Nazargah, M., & Eskandari-Naddaf, H. (2018). Effective coupled thermos-electro-mechanical properties of piezoelectric structural fiber composites: A micromechanical approach. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 29(4), 496-513. <https://doi.org/10.1177/1045389X17711787>

Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4294-4298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005>

Li, H., Zuo, J., Dong, B., & Xing, F. (2020). Effect of lamellar inorganic fillers on the properties of epoxy emulsion cement mortar. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 18. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-0395-3>

Mai, Y-W., & Cotterell, B. (1986). Porosity and mechanical properties of epoxy resin modified cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 16, 646-652. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90037-2)

Nagaraj, T.S., Sundura Raja Iyengar, K.T., & Kameswara Rao, B. (1988). Superplasticized natural rubber latex modified concretes. *Cement and Concrete Research*, 18, 138-144. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90131-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90131-7)

Neville, A.M. (1997). *Properties of Concrete*, Fourth and Final Edition, John Wiley & Sons, Inc., 271-729.

Pabst, W., & Gregorova, E. (2004). New relation for the porosity dependence of the effective tensile modulus of brittle materials. *Journal of Materials Science*, 39, 3501-3503. <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000026961.12735.2a>

Paul, B. (1960). Prediction of elastic constants of multiphase materials, *Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining Engineers*, 218(1), 36-41. <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD0210631.pdf>

Phani, K.K., & Niyogi, S.K. (1987). Young's modulus of porous brittle solids. *Journal of Materials Science*, 22, 257-263. <https://doi.org/10.1007/BF01160581>

Poniznik, Z., Salit, V., Basista, M., & Gross, D. (2008). Effective elastic properties of interpenetrating phase composites. *Computational Material Science*, 44(2), 813-820. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.06.010>

Popovics, S. (1990). Analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship, *American Concrete Institute Materials Journal*, 87(5), 517-529. <https://doi.org/10.14359/1944>

Popovics, P., & Erdey, M.R.A. (1970). Estimation of the modulus of strength of concrete-like composite materials. *Matériaux et Constructios*, 3(16), 253-260. <https://doi.org/10.1007/BF02474013>

Powers, T.C. (1961). Fundamentals aspects of shrinkage of concrete. *Revue des Matériaux*, 544, 79-85.

Reuss, A. (1929). Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und*

Mechanik, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 9(1), 49-58.
<https://doi.org/10.1002/zamm.19290090104>

Rodeghiero, E.D., Moore, B.C., Wolkenberg, B.S., Wuthenow, M., Tse, O.K., & Giannelis, E.P. (1998). Sol-gel synthesis of ceramic matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 244(1), 11-21. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00821-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00821-6)

Ryshkewitch, E. (1953). Compression strength of porous sintered alumina and zirconia, 9th communication to ceramography. *Journal of the American Ceramic Society*, 36(2), 65-68. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1953.tb12837.x>

Shaffer, B.W. (1964). Stress-strain relations of reinforced plastics parallel and normal to their internal filaments. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 2(2), 348. <https://doi.org/10.2514/3.2287>

Seitablaiev, E. (2019). *Beton dayanımının su/çimento ve agrega/çimento oranlarına bağlı olarak belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=ICmkju6uMhSgFDZwHHkmww&no=uIHlqtlMblD7fBM9LFtoCQ>

Sellevoid, E.J., & Radjy, F.F. (1983). Condensed silica fume (microsilica) in concrete: water demand and strength development. in: V.M. Malhotra (Ed), The use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, *American Concrete Institute*, 79, 677-694, Detroit, Michigan. doi: 10.14359/6718

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/6718>

Schulze, J. (1999). Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, 29(6), 909-915. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00060-5)

Sherban, H.E. (1973). Influence of porosity on mechanical properties of materials obtained by powder metallurgical method. *Powder metallurgy*, 9, 57.

Spriggs, R. M. (1961). Expression for effect of porosity on elastic modulus of polycrystalline refractory materials, particularly aluminium oxide. *Journal of the American Ceramic Society*, 44(12), 628-629. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1961.tb11671.x>

- Timoshenko, S., & Goodier, J.N. (1951). *Theory of Elasticity*, New York, NY: McGraw-HillBook Company. <http://parastesh.usc.ac.ir/files/1538886893033.pdf>
- TS 699. (2009). Doğal Yapı Taşları – İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri
- Ohama, Y. (1987). Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes, *American Concrete Institute Materials Journal*, 84(6), 511-518. <https://doi.org/10.14359/2463>
- Voigt, W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen der Physik*, 274(12), 573-587. <https://doi.org/10.1002/andp.18892741206>
- Xiao, L., Jin, Y., & Gu, L. (2009). Preparation and properties of a new composite of epoxy emulsion (EEM) modified cement. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 24, 843-845. <https://doi.org/10.1007/s11595-009-5843-5>
- Wang, X., Zhou, Y., Li, J., Li, H., & Liang, X. (2022). Discussion of a new mechanical model for interpenetrating phase composites under compression considering constituent phase interactions. *AIP Advances*, 12, 035051. <https://doi.org/10.1063/5.0084540>
- Wegner, L.D., & Gibson, L.J. (2000). The mechanical behaviour of interpenetrating phase composites - I: modelling. *International Journal of Mechanical Science*, 42(5), 925-942. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00025-9)
- Zappia, G., Sandrolini, F., & Motori, A. (1990). Premix PCC materials: mechanical properties as a function of technological factors. *Materials and Structures*, 23, 436-441. <https://doi.org/10.1007/BF02472026>

EK:

DENKLEMLERİN TÜRETİLMESİ

Betonun maksimum basınç dayanımını su/çimento oranına bağlı olarak teorik olarak belirleyen denklem Çolak (2006a) tarafından geliştirilmiştir. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$\sigma = \frac{\alpha \frac{w}{c}}{\left(\beta + \lambda \frac{w}{c}\right)^n} \quad (1a)$$

Bu denklem Neville (1997) tarafından tanımlanan eğrinin özelliklerini temsil etmektedir. Aşağıdaki sınır koşulları eğrinin özelliklerine dayanarak elde edilir.

$$\frac{d\sigma}{d\left(\frac{w}{c}\right)} = 0 \text{ ve } \sigma = \sigma_m, \quad \frac{w}{c} = \left(\frac{w}{c}\right)_m \quad de \quad (2a)$$

Eşitlik 1a'nın parametreleri olan λ ve α bu sınır koşullarına göre belirlenir.

$$\lambda = \frac{\beta}{(n-1)\left(\frac{w}{c}\right)_m} \quad (3a)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_m \beta^n \left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^n}{\left(\frac{w}{c}\right)_m} \quad (4a)$$

Eşitlik 1a'da λ ve α değerlerinin yerine konulmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \sigma_m \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_m} \left[\frac{1 + \frac{1}{n-1}}{1 + \frac{\frac{w}{c}}{(n-1)\left(\frac{w}{c}\right)_m}} \right]^n \quad (5a)$$

Bu denkleme göre beton, maksimum basınç dayanımına su içeriğinin buharlaşması sabitlendiğinde ulaşır. $(w/c)_m$ 'ye karşılık gelen σ_m biliniyorsa, herhangi bir su/çimento oranına karşılık gelen basınç dayanımı kolayca hesaplanabilir. σ_m 'nin büyüklüğünü deneysel olarak belirlemek için birçok girişimde bulunulabilir. Bununla birlikte, su/çimento oranının herhangi bir değerine karşılık gelen basınç dayanımı kullanılarak hassas hesaplamalar yapılabilir. Bu durumda, σ_m aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$\sigma_m = \sigma_a \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \left[\frac{1 + \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_a}{(n-1)\left(\frac{w}{c}\right)_m}}{1 + \frac{1}{n-1}} \right]^n \quad (6a)$$

Eşitlik 5a'da σ_m yerine konularak denklemin son hali elde edilir.

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \left[\frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m (n-1) + \left(\frac{w}{c}\right)_a}{\left(\frac{w}{c}\right)_m (n-1) + \frac{w}{c}} \right]^n \quad (7a)$$

Bu denklemdaki $(w/c)_m$ değeri aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır (Çolak, 2006a).

$$\left(\frac{w}{c}\right)_m = 0.23 \frac{\sqrt{t}}{(1+\sqrt{t})} \quad (8a)$$

$(w/c)_m (n-1)$ ile agrega/çimento oranı arasında bir bağıntı vardır. Bu bağıntı aşağıdaki gibi verilmektedir (Çolak, 2006b).

$$\left(\frac{w}{c}\right)_m (n-1) = 1 + \frac{A}{c} \quad (9a)$$

Eşitlik 9a'nın Eşitlik 7a'da yerine konulmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilir (Çolak, 2006b).

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a} \left[\frac{1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_a}{1 + \frac{A}{c} + \frac{w}{c}} \right]^n \quad (10a)$$

Yukarıdaki denklem ile betonların basınç dayanımlarını hem su/çimento hem de agrega/çimento oranına bağlı olarak hesaplamak mümkündür. n 'nin büyüklüğü Eşitlik 9a'dan hesaplanır.

Betonun basınç dayanımını su/çimento ve agrega/çimento oranlarına bağlı olarak tanımlayan bir diğer denklem aşağıda verilmiştir (Çolak, 2006b).

$$\sigma = \frac{a \frac{w}{c}}{\left(1 + \frac{A}{c} + \frac{w}{c}\right)^{b \frac{w}{c}}} \quad (11a)$$

Bu denklemde, katsayı değeri büyük ölçüde azaltılmıştır. Eşitlik 2a'nın sınır koşullarından, b ve a parametrelerinin değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$b = \frac{\left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right]}{\left(\frac{w}{c}\right)_m \left\{ \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right] \ln \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right] + \left(\frac{w}{c}\right)_m \right\}} \quad (12a)$$

$$a = \frac{\sigma_m}{\left(\frac{w}{c}\right)_m} \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right]^n \quad (13a)$$

Eşitlik 13a'daki n parametresinin değeri aşağıda verilmiştir

$$n = \frac{\left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right]}{\left\{ \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right] \ln \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right] + \left(\frac{w}{c}\right)_m \right\}} \quad (14a)$$

Eşitlik 11a'da a ve b parametrelerinin yerine konulmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \sigma_m \frac{\frac{w}{c}}{\left(\frac{w}{c}\right)_m} \frac{\left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right]^n}{\left[1 + \frac{A}{c} + \frac{w}{c}\right] \frac{w}{\left(\frac{w}{c}\right)_m}} \quad (15a)$$

σ_m 'nin büyüklüğü su/çimento oranının herhangi bir değeri için elde edilen basınç dayanımı değerine bağlı olarak bulunabilir.

$$\sigma_m = \sigma_a \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right]^{n \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m}{a}}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_m\right]^n} \quad (16a)$$

Eşitlik 15a'da σ_m yerine konularak denklemin son hali elde edilir.

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c} \left[1 + \frac{A}{c} + \left(\frac{w}{c}\right)_a\right]^{n \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_a}{a}}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a \left[1 + \frac{A}{c} + \frac{w}{c}\right] \frac{w}{\left(\frac{w}{c}\right)_a}} \quad (17a)$$

Eşitlik 17a, su-çimento ve agrega-çimento oranlarına bağlı olarak betonun basınç dayanımını tanımlayan bir formüldür. Bu denklem, $(1 + A/c + w/c)$ yerine A/c konularak daha da basitleştirilebilir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi olacaktır (Çolak, 2006b).

$$\sigma = \frac{a \frac{w}{c}}{\left(\frac{A}{c}\right)^{b \frac{w}{c}}} \quad (18a)$$

Eşitlik 2a'nın sınır koşullarından, b ve a parametrelerinin değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$b = \frac{1}{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)} \quad (19a)$$

$$a = \frac{\sigma_m}{\left(\frac{w}{c}\right)_m} \left(\frac{A}{c}\right)^{\frac{1}{\ln\left(\frac{A}{c}\right)}} \quad (20a)$$

Eşitlik 18a'da a ve b parametrelerinin değerleri yerine konduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma = \sigma_m \frac{\left(\frac{w}{c}\right) \frac{\left(\frac{A}{c}\right)^{\frac{1}{\ln\left(\frac{A}{c}\right)}}}{\left(\frac{w}{c}\right)_m \frac{w}{c}}}{\left(\frac{A}{c}\right) \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)}{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)}} \quad (21a)$$

σ_m aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_m = \sigma_a \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_a \frac{\left(\frac{A}{c}\right) \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)}{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a \frac{1}{\left(\frac{A}{c}\right)^{\frac{1}{\ln\left(\frac{A}{c}\right)}}}} \quad (22a)$$

Eşitlik 22a'da σ_m için elde edilen bağıntı Eşitlik 21a'da yerine konularak denklemin son hali elde edilir.

$$\sigma = \sigma_a \frac{\frac{w}{c} \frac{\left(\frac{A}{c}\right) \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_a \ln\left(\frac{A}{c}\right)}{\left(\frac{w}{c}\right)_a \ln\left(\frac{A}{c}\right)}}{\left(\frac{w}{c}\right)_a \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)}{\left(\frac{A}{c}\right) \frac{\left(\frac{w}{c}\right)_m \ln\left(\frac{A}{c}\right)}}} \quad (23a)$$

Eşitlik 10a, 17a ve 23a analitik hesaplamalar açısından diğer eşitliklere göre avantaj sağlamaktadır. Bu fonksiyonlar betonun gerçek fiziksel davranışını temsil etmekte ve sınır koşullarını karşılamaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Onur AKOL

Eğitim ve Akademik Durum

İlkokul	:	Cumhuriyet İlkokulu KÜTAHYA
Lise	:	Ali Güral Anadolu Lisesi KÜTAHYA
Lisans Derecesi	:	Yıldız Teknik Üniversitesi İSTANBUL
Yabancı Dil	:	İngilizce, Almanca