

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN ALKALİ SİLİKA
REAKSİYONU DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI**



Sabri KÖKMEN

Eylül, 2022

İZMİR

TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

Sabri KÖKMEN

Eylül, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SABRİ KÖKMEN, tarafından **PROF.DR. KAMİLE TOSUN FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan “**TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kamile Tosun FELEKOĞLU

Yönetici

Prof. Dr. Selçuk TÜRKEK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatımın başından sonuna kadar bilgi ve birikimi ile beni yönlendiren, lisansüstü eğitimime başlamamda bana destek veren, çalışmalarımda tüm soru ve sorunlarımı sabırla dinleyen ve çözüme kavuşturan danışmanım Sn. Prof. Dr. Kamile Tosun Felekoğlu'na,

Özellikle deneysel çalışmalarım sırasında engin bilgisi ve tecrübesi ile bana yol gösterici olan Sn. Prof. Dr. Burak Felekoğlu'na,

Tez çalışmam boyunca hem kuramsal hem de uygulama kısımlarında değerli görüşleriyle beni yönlendiren ve destek olan, deneysel çalışmalarımda bilgisayar ve yazılım ile ilgili konularda katkı sağlayan Araş. Gör. Dr. Muhammer Keskinates'e

Laboratuvar çalışmalarım süresince büyük bir özveri ile desteklerini gösteren Bayram Tutkun'a ve Vedat Saruhan'a

Tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi olarak desteğini esirgemeyen sevgili aileme, lisans ve lisansüstü eğitim hayatımın her anında yanımda olan ve sonsuz destek veren sevgili eşim Öğr. Gör: Dr. Eda Can Kökmen'e

Teşekkürlerimi sunarım.

Sabri KÖKMEN

TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Betonarme yapıların ekonomik süresini tamamlaması açısından beton kalitesi ve dayanıklılığı oldukça önemli bir faktördür. Beton, yapının ömrü boyunca durabilite yönünden birçok farklı etkiye maruz kalmaktadır. Bu etkilerden birisi de Alkali-silika reaksiyonudur (ASR). ASR, betonun dayanıklılığında negatif etki yaratır. Bu negatif etkinin oluşumu, beton içerisindeki agregalardan kaynaklı silislerin çimentodan gelen alkaliler ile beton çözeltisi içerisinde reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Reaksiyon sonucu oluşan alkali-silika jeli nem (rutubet) ile etkileşime girerek jelde genleşir. Bu genleşme beton içerisinde içsel çekme gerilmelerine yol açarak betonda harita şeklinde görülebilen çatlaklara sebep olup betonun dayanımında oldukça olumsuz bir durum yaratmaktadır.

Literatürde tasarlanmış çimento esaslı kompozit (engineering cementitious composite-ECC) olarak adlandırılan ECC, mikro mekanik tasarım ile yüksek süneklik kapasitesine sahiptir ve çoklu çatlak davranışı sergilemektedir. Betonun hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerinde önemli performans değişimleri gösteren ECC üretilmeye başlanması ile betonun durabilite, süneklik, tokluk, vb. birçok özelliğinin geliştiği gözlenmiştir. Bu çalışmada, lifli çimento esaslı kompozitlerde reaktif agrega kullanılmasının ASR üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda çekme deneyi uygulanan numunelerde çekme dayanımı, birim şekil değiştirme, ilk çatlak dayanımı ve tokluk değerleri araştırılmıştır. Sonuçlara göre lif etkisi ASR'den kaynaklanan genleşmeyi %15 azaltmıştır. En yüksek çekme dayanımı, bazalt agregası ile hazırlanan hava kürü, 90 günlük, 1. set, boncuksuz kontrol serisinde gözlenmiştir (3,83 MPa). En büyük tokluk değeri ise bazalt agregası ile hazırlanan hava kürü, 28 günlük, 1. set, boncuksuz yüksek fırın cürufu serisinde gözlenmiştir (14,63 kJ/m³).

Anahtar kelimeler: Alkali-silika reaksiyonu, çekme dayanımı, ECC

INVESTIGATION OF ALKALI SILICA REACTION RESISTANCE OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES

ABSTRACT

Concrete quality and durability are quite important factors in terms of completing the economic period of concrete structures. Concrete structure is exposed to many different effects in terms of durability during lifetime. One of these effects is the Alkali-silica reaction (ASR). ASR is a reaction between the reactive silica in the concrete aggregates (opal, chert, chalcedony and quartz) and the alkalis (sodium oxide and potassium oxide) in the pore solution of hydrated cement paste. This reaction negatively affects the durability and service life of the concrete. The reaction of the alkali-silica gel with moisture causes expansion of the gel. This expansion causes internal tensile stresses and causes cracks in the concrete. These cracks, which can be seen in the form of maps, cause a very negative situation in the strength of concrete.

Engineering cementitious composites, simply named ECC in literature, have high ductility capacity with its micro mechanical design and exhibit multiple crack behavior. With the production of ECC, which show significant performance changes in both physical and chemical properties of concrete, it has been observed that the durability, ductility, toughness, etc. of concrete have improved. In this study, the effects of using reactive aggregates in fiber cement-based composites on ASR were investigated. According to the results, the fibre effect has decreased the expansion resulted from ASR by 15%. The highest tensile strength was observed in the air-curing, 90-day, 1st set, beadless control series (3.83 MPa) for basalt aggregate. The highest toughness value was observed in the air-curing, 28-day, 1st set, beadless blast furnace slag series for basalt aggregate (14.63 kJ/m³).

Keywords: Alkali-silica reaction, tensile strength, ECC

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xv
KISALTMALAR.....	xvi

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)	1
1.1.1 Alkali Silika Reaksiyonunun Tarihsel Geçmişi.....	2
1.1.2 Alkali Silika Reaksiyonunun Mekanizması.....	3
1.1.3 Alkali Silika Reaksiyonunun Kimyası.....	4
1.1.3.1 Agregada Pesimum Kavramı.....	5
1.2 Alkali Silika Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler.....	6
1.2.1 Karışım Oranlarının Etkisi.....	6
1.2.2 Reaktif Agreganın Cinsinin ve Tane Büyüklüğünün Etkisi.....	6
1.2.3 Alkalilerin Etkisi.....	7
1.2.4 Rutubetin Etkisi.....	8
1.2.5 Sıcaklığın Etkisi.....	9
1.2.6 Diğer Faktörlerin Etkisi.....	9
1.3 Alkali Silika Reaksiyonu Hasarlarının Teşhis Yöntemleri.....	10
1.3.1 Alkali Silika Reaksiyonu Hasarlarının Teşhisi.....	10
1.3.2 Alkali Silika Jelleri.....	11
1.3.3 Genleşme ve Çatlama.....	11
1.3.4 Parça Atma.....	12
1.3.5 Yer Değiştirmeler.....	13
1.4 ASR Hasarlarının Teşhisinde Kullanılan Yöntemler.....	13
1.4.1 Kimyasal Metot ASTM C 289.....	14

1.4.2 Harç Çubuğu Deneyi ASTM C 227.....	15
1.4.3 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi ASTM C 1260.....	16
1.4.4 Beton Prizma Deneyi ASTM C 1293.....	17
1.4.5 Petrografik Analiz ASTM C 295.....	18
1.5 Alkali Silika Reaksiyonunu Önleme Yöntemleri.....	19
1.6 Lifli Betonlarda Alkali Silika Reaksiyonu.....	19

BÖLÜM İKİ – TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER.....21

2.1 ECC Tasarımının Temel Prensipleri.....	21
2.2 ECC'nin Mekanik Özellikleri.....	23
2.3 ECC'nin Durabilite Özellikleri.....	27
2.3.1 Donma-çözülme Etkisi.....	27
2.3.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	28
2.3.3 Sülfat Etkisi.....	28
2.3.4 Korozyon Etkisi.....	29
2.4 ECC'nin Tasarımında Kullanılan Lifler.....	30
2.4.1 Polietilen Lifler (PE)	31
2.4.2 Polivinil Alkol Lifler (PVA)	31
2.4.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP)	31
2.5 ECC'nin Kullanım Alanları.....	32

BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....37

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı.....	37
3.2 Kullanılan Malzemeler.....	39
3.2.1 Çimento.....	39
3.2.2 Bazalt Agregası.....	41
3.2.3 Ahmetli Agregası.....	41
3.2.4 Yüksek Fırın Cürufu.....	42
3.2.5 Taş Tozu.....	43
3.2.6 Kalsine Kaolin.....	44

3.2.7 Polivinil Alkol (PVA) Lifler.....	45
3.2.8 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı.....	46
3.2.9 Polipropilen Boncuk.....	46
3.3 Kompozitlerin Karışım Oranları ve Üretimi.....	47
3.4 Deney Yöntemi.....	48
3.4.1 Tek Eksenli Çekme Deneyi.....	51
3.4.2 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi.....	52

BÖLÜM DÖRT – DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....54

4.1 Kompozitlerin ASTM C 1260’a Göre Genleşme Kapasitelerinin Değerlendirilmesi.....	54
4.1.1 Bazalt kompozitlerin Lifli-lifsiz Değerlendirilmesi.....	54
4.1.2 Ahmetli kompozitlerin Lifli-lifsiz Değerlendirilmesi.....	56
4.2 Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	58
4.2.1 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	58
4.2.1.1 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	60
4.2.1.2 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi.....	62
4.2.1.3 Bazalt 1. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	65
4.2.1.4 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	68
4.2.2 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	71
4.2.2.1 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	73
4.2.2.2 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi.....	75
4.2.2.3 Bazalt 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	76

4.2.2.4 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	79
4.2.3 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	80
4.2.3.1 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	83
4.2.3.2 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelерinin Değerlendirilmesi.....	85
4.2.3.3 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	87
4.2.3.4 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	89
4.2.4 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	91
4.2.4.1 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	93
4.2.4.2 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelерinin Değerlendirilmesi.....	95
4.2.4.3 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	98
4.2.4.4 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	100
4.2.5 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	102
4.2.5.1 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	104
4.2.5.2 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelерinin Değerlendirilmesi.....	106
4.2.5.3 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	108
4.2.5.4 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	110
4.2.6 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi.....	112
4.2.6.1 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	115

4.2.6.2 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değişirme Yüzdelерinin Değerlendirilmesi.....	117
4.2.6.3 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi.....	119
4.2.6.4 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	121
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR.....	124
KAYNAKLAR.....	127

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 ASR jelinin mikroskobik görüntüsü.....	2
Şekil 1.2 ASR sonucu betonda meydana gelen bozulma.....	3
Şekil 1.3 ASR'nin karakteristik bozulması.....	4
Şekil 1.4 Tipik bir pesimum reaktif agrega içeriği grafiği.....	5
Şekil 1.5 Rölatif nemin beton prizmalardaki genleşmeye etkisi.....	8
Şekil 1.6 Deneysel çalışma sonucu elde edilen çimento hamuruna sızan ASR ürünü.....	10
Şekil 1.7 ASR hasarına maruz kalmış yapılardan görüntüler.....	12
Şekil 1.8 Pop-out ile yüzeyden ayrılmış agrega tanesi.....	13
Şekil 1.9 Parapet elemanı, Val de Mare barajı, Jersey.....	13
Şekil 1.10 Alkalinitede azalma (Rc), çözünen siliste azalma (Sc) grafiği (ASTM C 289).....	15
Şekil 1.11 25x25x285 mm boyutlarındaki örnekler.....	16
Şekil 1.12 Agrega ince kesitinden alınan EDS analiz örneği.....	19
Şekil 2.1 ECC kompozitin eğilme yükleri altındaki sünek davranışı.....	22
Şekil 2.2 Yalın beton ile yüksek ve düşük lif içerikli kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	23
Şekil 2.3 ECC kompozitlerde eğilme etkisi altında görülen çoklu çatlak davranışı.....	24
Şekil 2.4 Betonarme çerçevelerde düğüm noktasında plastik mafsall oluşumu.....	25
Şekil 2.5 Mikro mekanik modelin ana kriterleri.....	26
Şekil 2.6 ECC'nin tipik çekme-birim şekil değiştirme grafiği ile ortalama çatlak açıklıkları.....	27
Şekil 2.7 ECC numunelerinin çevrimlerden sonraki görüntüsü.....	28
Şekil 2.8 ECC numunelerinin(ASTM C 1260) genleşme grafiği.....	29
Şekil 2.9 Kırılma modları.....	30
Şekil 2.10 PVA lifler.....	31
Şekil 2.11 Mitaka barajında su yalıtımı tadilatı amacıyla ECC uygulaması.....	33
Şekil 2.12 Japonya'da beton istinat duvarında ECC ile yapılan tamirat çalışması.....	34
Şekil 2.13 Yokohama'daki Nabeaure gökdeleni, prefabrik ECC bağ kirişlerinin sismik dayanım amacıyla yapının çekirdeğinde kullanımı.....	35

Şekil 2.14 Michigan’da bulunan köprü tabliyesinde ECC yama tadilatı uygulaması.	36
Şekil 3.1 CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu.....	40
Şekil 3.2 Bazalt agregası	41
Şekil 3.3 Ahmetli agregası	42
Şekil 3.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu.....	43
Şekil 3.5 Taş tozu	44
Şekil 3.6 Kalsine kaolin.....	44
Şekil 3.7 Polivinil alkol lifler.....	45
Şekil 3.8 Polipropilen boncuk.....	47
Şekil 3.9 Hobart mikser/karışım hazırlanması ve lif takviyesi.....	49
Şekil 3.10 Numunelerin hazırlanması/numunelerin 24 saat kür sonrası.....	50
Şekil 3.11 Hava küründe bırakılan numuneler/NaOH küründe bırakılan numuneler.	50
Şekil 3.12 Tek eksenli çekme deneyi numune ve LVDT’lerin düzenekteki yerleşimi.	51
Şekil 3.13 ECC’nin ilk çatlak dayanımı, çekme dayanımı, birim şekil değiştirme ve tokluk kapasitesinin değerlendirilmesi.....	53
Şekil 4.1 Bazalt kompozitlerin ASTM C 1260’a göre genleşme sonuçları.....	55
Şekil 4.2 Ahmetli kompozitlerin ASTM C 1260’a göre genleşme sonuçları.....	57
Şekil 4.3 Bazalt 1. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	59
Şekil 4.4 Bazalt 1. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları.....	60
Şekil 4.5 Bazalt 1. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları.....	61
Şekil 4.6 Bazalt 1. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	63
Şekil 4.7 Bazalt 1. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	64
Şekil 4.8 Bazalt 1. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları.....	65
Şekil 4.9 Bazalt 1. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları.....	67
Şekil 4.10 Bazalt 1. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri.....	69
Şekil 4.11 Bazalt 1. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri.....	70
Şekil 4.12 Bazalt 2. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	72
Şekil 4.13 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları.....	73
Şekil 4.14 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları.....	74
Şekil 4.15 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	75
Şekil 4.16 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	76
Şekil 4.17 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları.....	77

Şekil 4.18 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları.....	78
Şekil 4.19 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri.....	79
Şekil 4.20 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri.....	80
Şekil 4.21 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	81
Şekil 4.22 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	82
Şekil 4.23 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları.....	83
Şekil 4.24 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları.....	84
Şekil 4.25 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	85
Şekil 4.26 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	86
Şekil 4.27 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları.....	87
Şekil 4.28 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları.....	88
Şekil 4.29 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri.....	89
Şekil 4.30 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri.....	90
Şekil 4.31 Ahmetli 1. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri....	92
Şekil 4.32 Ahmetli 1. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları.....	93
Şekil 4.33 Ahmetli 1. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları.....	94
Şekil 4.34 Ahmetli 1. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	96
Şekil 4.35 Ahmetli 1. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	97
Şekil 4.36 Ahmetli 1. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları.....	98
Şekil 4.37 Ahmetli 1. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları.....	99
Şekil 4.38 Ahmetli 1. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri.....	100
Şekil 4.39 Ahmetli 1. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri.....	101
Şekil 4.40 Ahmetli 2. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri..	103
Şekil 4.41 Ahmetli 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları.....	104
Şekil 4.42 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları.....	105
Şekil 4.43 Ahmetli 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri...	106
Şekil 4.44 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri...	107
Şekil 4.45 Ahmetli 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları.....	108

Şekil 4.46 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları.....	109
Şekil 4.47 Ahmetli 2. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri.....	110
Şekil 4.48 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri.....	111
Şekil 4.49 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	113
Şekil 4.50 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	114
Şekil 4.51 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları.....	115
Şekil 4.52 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları.....	116
Şekil 4.53 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	117
Şekil 4.54 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri.....	118
Şekil 4.55 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları.....	119
Şekil 4.56 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları.....	120
Şekil 4.57 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri.....	121
Şekil 4.58 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri.....	122

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Geleneksel beton ile ECC'nin özelliklerinin karşılaştırılması.....	22
Tablo 3.1 Bazalt ve Ahmetli 1. Set kompozitlerin deney planı	38
Tablo 3.2 Bazalt ve Ahmetli 2. Set kompozitlerin deney planı	38
Tablo 3.3 Bazalt ve Ahmetli 1. Set kompozitlerin deney süreci planı	38
Tablo 3.4 Bazalt ve Ahmetli 2. Set kompozitlerin deney süreci planı	38
Tablo 3.5 Bazalt ve Ahmetli numune serilerine ait numune kodlaması.....	39
Tablo 3.6 CEM I 42,5 R Tipi Portland çimento kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	
Tablo 3.7 Bazalt agregası fiziksel özellikleri.....	41
Tablo 3.8 Ahmetli agregası fiziksel özellikleri.....	42
Tablo 3.9 Yüksek fırın cürufu fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	43
Tablo 3.10 Taş tozu fiziksel özellikleri.....	44
Tablo 3.11 Kalsine kaolin fiziksel özellikleri.....	45
Tablo 3.12 PVA liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	46
Tablo 3.13 Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri.....	46
Tablo 3.14 Bazalt içeren kompozitlerin 1m ³ karışım oranları.....	47
Tablo 3.15 Ahmetli kumu içeren kompozitlerin 1m ³ karışım oranları.....	48

KISALTMALAR

ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
ECC	: Engineered Cementitious Composites
ASTM	: American Society For Testing and Materials
CSA	: Kanada Standardı
S/Ç	: Su Bölü Çimento Oranı
PE	: Polietilen Lif
PVA	: Polivinil Alkol Lif
HTPP	: High Tenacity Polypropylene Fiber
S/B	: Su Bölü Bağlayıcı
C	: Kontrol
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
LPCK	: Lime Powder Calsine Kaolin
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer
ÇD	: Çatlak Dayanımı
BŞD	: Birim Şekil Değiştirme
İÇD	: İlk Çatlak Dayanımı
VD	: Ve Diğerleri

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Dünyada ve ülkemizde insanların ihtiyaçları dahilinde alt yapı veya üst yapı olarak betonarme yapılar kullanılmaktadır. Bu yapıların ekonomik ömrünü tamamlayana kadar kullanılması beklenir. Fakat servis ömrü boyunca betonun işlevini kaybetmesine yönelik, beton bileşimindeki malzemelerin fiziksel veya kimyasal yapısından kaynaklanan iç ya da çevresel etkiler oluşur. Kimyasal etki kapsamına giren önemli bir faktör olarak Alkali-silika reaksiyonu (ASR) gösterilebilir. Bu tez çalışmasında, reaktif agregalar ile hazırlanan harç numunelerinde ASR etkisinden kaynaklı genişlemenin yaratacağı durabilite ve dayanım sorunlarını azaltmak, hatta engellemek için tasarlanmış çimento esaslı kompozit (Engineering Cementitious Composites-ECC) tasarımı kullanarak üretim yapılması ve bu reaksiyona etkisi araştırılmıştır. Agreganın reaktivite potansiyeli ASTM C 1260 standardına uygun olarak gerçekleştirilen hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile belirlenir. Enkesit olarak büyük yapılar olan köprü, tünel ve viyadük, beton yollar ayrıca otoparklarda, parke bordür taşlarında ve çevre koşullarına direkt olarak maruz kalan beton elemanlarda meydana gelen bu reaksiyon önemli teknik ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır.

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (ECC), mikro mekanik prensiplerle tasarlanmış yüksek performanslı, lif takviyeli çimento esaslı kompozitin özel bir türüdür (Li, Fukuyama ve Mikame 1998). Minimize edilmiş lif miktarıyla, hacimce %2'den daha az lif takviyesi uygulanarak birbirini izleyen çoklu mikro çatlak davranışı ve yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip yüksek performanslı bir kompozit olacak şekilde tasarlanmıştır (Li, 1993).

ECC, geleneksel betona kıyasla çok daha yüksek tokluğa sahiptir. Ayrıca çekme ve eğilme gerilmeleri altında deformasyon kapasitesi %2,5-4'e kadar çıkan ECC kompozitler rapor edilmiştir (Fisher ve Li, 2002).

1.1 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

Alkali silika reaksiyonu (ASR) betonarme yapılarda durabilite açısından büyük hasar yaratan önemli bir kimyasal reaksiyondur. İçerisinde reaktif silis bulunduran

agregalar ile çimentodan kaynaklı beton içerisinde eriyik halde bulunan alkalilerin reaksiyonu sonucu alkali jel ürünleri ortaya çıkmaktadır. Bu jel ürünlerinin nem (rutubet) ile birleşimi sonucunda beton içerisinde jel hacim artışı kazanarak genişir. Genleşme, beton içerisinde içsel çekme gerilmelerinin artışı ile betonda çatlamalara yol açmaktadır (Ramyar, 2013).

- Alkali + Reaktif silika → Alkali-silika jel ürünleri
- Alkali-silika jeli + Nem → Genleşme

(Farny ve Kosmatka, 1997)



Şekil 1.1 ASR jelinin mikroskopik görüntüsü (Yasin, 2015)

1.1.1 Alkali Silika Reaksiyonunun Tarihsel Geçmişi

1920’li ve 1930’lu yıllarda ABD’de Kaliforniya’daki beton yapılarda nedeni belli olmayan şekilde çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Bu yapıların yıkılması sonucu ile de ASR ortaya çıkmıştır. Yıkım sonrası oluşturulan raporlarda beton malzemelerinin standartlara uygun olmasına rağmen yapım yılından sonraki birkaç yıl içerisinde çatlakların oluştuğu bilgisi yer almıştır. Genellikle harita çatlağı şeklinde görülen çatlaklardan jel çıkışı ve betonda patlamalar olduğu görülmüştür. Alkali-silika reaksiyonu olarak adlandırılan bu tür çatlakların kimyasal bir reaksiyon sonucu olduğu Stanton tarafından 1940 yılında açıklanmıştır (Bektaş, 2002).

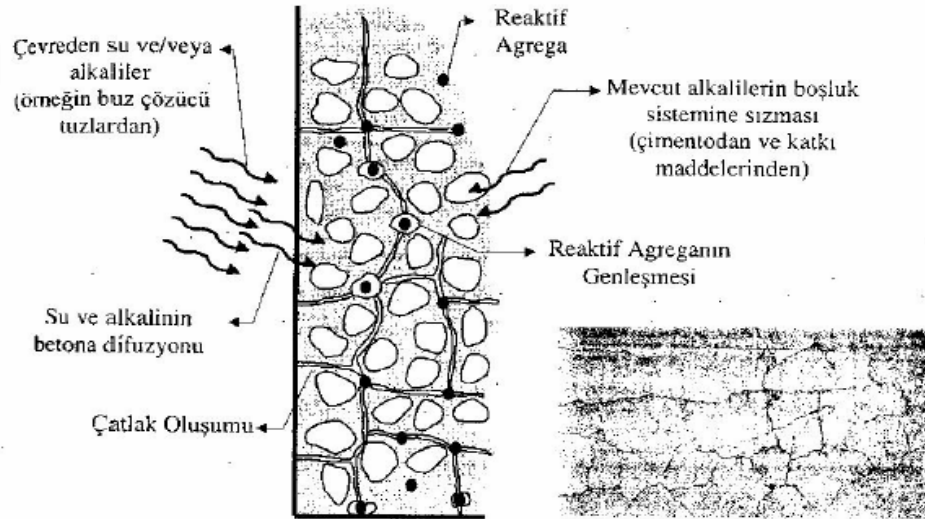
Türkiye’de ise ASR ilk defa 1995 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından İzmir’de bazı betonarme köprü ayaklarında gözlemlenmiştir. Japon mühendislerden destek alınarak, harita şeklinde oluşan bu çatlakların sebebinin bulunması için

incelemeler yapılmıştır. İnceleme sonucunda Gediz ve Nif nehirlerinin yatak ve teraslarından alınan agregalardaki reaktif silislerin reaksiyona girerek bu çatlamlara neden olduğu tespit edilmiştir (Andiç, 2002).

1.1.2 Alkali Silika Reaksiyonunun Mekanizması

ASR mekanizması, agrega içindeki reaktif silis ve gözeneklerdeki hidroksil iyonlarının arasında oluşan bir tepkimedir. Kalsiyum iyonları hidratasyon ürünleri ile etkileşime girer fakat potasyum ve sodyum tepkimeye girmeyerek çözeltide kalır. Daha sonra kalan potasyum ve sodyum iyonları zamanla kalsiyum silikat hidrat mono sülfatı oluşturacak şekilde kısmen bir birleşme gerçekleştirir. Gözenekli çözeltideki alkaliler ile çimentoda bulunan çözülebilir alkaninin miktarı orantılıdır. Silis yüzeyine doğru harekete geçen hidroksil iyonları, eğer kristalin yapıya sahip silis ile karşılaştıysa korunmalı bölgede kalır fakat zayıf kristalin yapıya sahip silis ile karşılaştıysa agrega bütününde yapının parçalanmasına sebep olan pek çok zayıf nokta yaratır (Hobbs, 1988; Stark, 1994; Diamond, 1980).

Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonun bozulma mekanizması ve tipik çatlak görünümü Şekil 1.2’te görülmektedir.



Şekil 1.2 ASR sonucu betonda meydana gelen bozulma (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002)

Jelin büyümesi için rölatif nemin %80’den daha yüksek olması gerekmektedir. ASR’ den kaynaklı oluşan jelin büyümesiyle oluşan gerilmeler betonun çekme

mukavemetini aşarsa bundan dolayı çatlaklar meydana gelir. Çatlakların başlama yerleri rastgele olduğunda harita şeklindeki, ASR'nin karakteristik hasar modeli meydana gelir. Çatlakların yerleri, agrega üzerindeki reaktif silislerin yerleri ve etrafındaki hidroksil iyonlarının varlığı tarafından belirlenir (Hobbs, 1988).



Şekil 1.3 İzmir Adnan Menderes Havalimanı pist ve taksi yol betonunda oluşan ASR çatlakları (Andiç-Çakır, 2007)

ASR etkisine maruz kalan bir yapıda ortaya çıkan harita şeklindeki çatlaklar betonun mekanik özelliklerinde önemli ölçüde azalma yaratmaktadır.

1.1.3 Alkali Silika Reaksiyonunun Kimyası

ASR oluşmasında boşluk çözeltisi oldukça önemli bir faktördür. Hidratasyon sonucu oluşan iyonların taşınması boşluk çözeltisinde meydana gelir. Çözeltide bulunan yeterli miktarda alkali, agregadaki silis ve ortamdaki nem ile ASR oluşumunu gerçekleştirir. Yeterli miktarda alkali tanımı ise çimento alkali içeriğinin eşdeğer Na_2O değeri %0,6'yı aşması demektir. Portland çimentosunun alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$(\text{Na}_2\text{O})_e = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \quad (1.1)$$

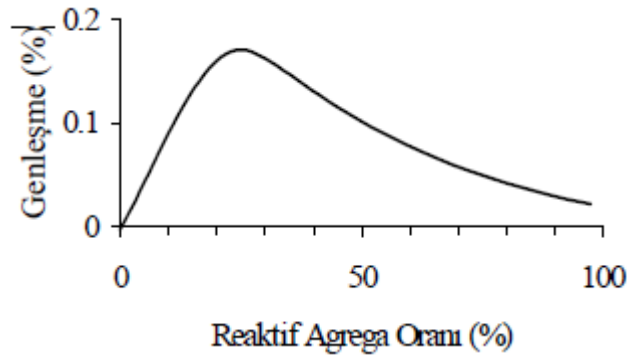
Ayrıca alkaliler, çimento dışında; agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine girebilir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

1.1.3.1 Agregada Pesimum Kavramı

Betonda agregadan gelen reaktif bileşenler ile genleşme arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır. Reaktif bileşenlerin oranı genleşme üzerinde değişim sağlamaktadır. En yüksek genleşmeyi sağlayan reaktif bileşenler oranına “pesimum oran” denir. Reaktif bileşenler oranı bunun altında veya üstünde olduğunda, genleşme azalmaktadır. Pesimum oran hem agregadaki reaktif malzemeden hem de betonun alkali içeriği miktarından kaynaklanır. Farklı reaktivite potansiyeli olan bileşenler için Pesimum oran farklılık gösterebilmektedir. Reaktif agregaların olası pesimum oranlarının bilinmesi farklı reaktif bileşen oranlarında hazırlanan deneme karışımlarıyla bulunabilmektedir (Ramyar, 2013).

ASR genleşmesini azaltmak için, çimentodan gelen alkali bileşenlerini azaltmak amacıyla genellikle mineral katkı kullanılması uygun görülmektedir. Mineral katkı ikamesi ile pesimum oran seviyesinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Ancak, özellikle düşük alkali içerikli çimento yerine kullanılan bazı uçucu küllerin daha fazla genleşmeye neden olduğu görülmüştür. Bu etkinin, uçucu kül tarafından sisteme ilave edilen suda çözülen alkalilerden kaynaklandığı belirtilmiştir (Ramyar, 2013).

Pesimum oranının, ASR sonucu betonda oluşturduğu genleşmenin etkisini gösteren tipik bir eğri Şekil 1.4’te verilmiştir.



Şekil 1.4 Tipik bir pesimum reaktif agregası içeriği grafiği (French, 1980)

Grafikte ASR etkisi sonucu betonda oluşan genleşme düşey ekseninde, kullanılan agreganın içindeki reaktif agregası oranı ise yatay ekseninde gösterilmiştir. Eğrinin tepe noktası, reaktivite sonrası en yüksek genleşmenin gerçekleştiği pesimum reaktif

agrega içeriğini göstermektedir. Şekil 1.4'te grafikte pesimum oranı %25'tir. Eğrinin şekli çimento çeşidinden, kompozisyonundan, oranından, agrega özelliklerinden ve aynı zamanda alkali miktarından da etkilenmektedir (Swamy, 1990).

1.2 Alkali Silika Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler

Reaktif silis, yüksek alkali ve ortamda suyun bulunması ASR'nin oluşması için temel unsurlardandır. Su, agrega, mineral katkı, kimyasal katkı ve alkalisii yüksek çimento, ASR'nin iç kaynak unsurları olarak bilinmektedir. Betona dış kaynaklardan da alkali girişı olabilmektedir ki bunların en önemlisi buz çözücü tuzlardır. ASR'yi etkileyen iç ve dış faktörler aşağıda özetlenmiştir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

- Agreganın reaktifliği
- Reaktif agreganın oranı ve gradasyonu
- Boşluk suyu alkali konsantrasyonu
- Suyun varlığı ve miktarı
- Hava sıcaklığı ve rutubet gibi ortam koşulları
- Çimento tipi ve miktarı
- Buz çözücü tuzlar, aktif silis içeren yüzey sertleştiriciler gibi dış kaynaklar

1.2.1 Karışım Oranlarının Etkisi

Karışım oranları ASR etkisinin oluşumunda, betonun geçirimliliği de ASR etkisinin ilerlemesinde büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle daha geçirimsiz bir beton için karışım bileşenlerinin optimum bir oranda ve betonun daha homojen olması gerekmektedir. Homojen bir karışım sayesinde ASR etkisine karşı önlem alınması sağlanmaktadır. Düşük su/çimento oranları, çimento miktarının artışı ve mineral katkı malzemesinin kullanımı gibi önlemler sayesinde geçirimliliği az bir yapı oluşur. Geçirimliliğin azalması sayesinde hidroksil iyonlarının betondaki hareketi kısıtlanarak ASR gelişimi engellenebilir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

1.2.2 Reaktif Agreganın Cinsinin ve Tane Büyüklüğünün Etkisi

ASR bileşenlerinde agregaların morfolojik yapısı ASR oluşumunda oldukça önemlidir. Reaktif agregaların şekil yapısı, tane boyutu ASR için tepkime hızına etki etmektedir. Sıcaklık artışı ve zamanla beraber agregadaki silis çözelti içerisindeki

alkalilerle tepkimeye girer. Fakat çoğu mineraller önemsiz sayılacak derecede tepkime verirler. Kuvars, opal, kristobalit, kalsedon ve tridimit kuvars reaktif silika mineralleri olarak sıralanabilir (Andiç, 2002).

Tane büyüklüğünün ASR'ye etkisi ile ilgili araştırmalar 1940 yılından beri yapılmaktadır. Reaktif agreganın mineralojik ve fiziksel özelliklerinden kaynaklanan tane boyutu farklılığı genleşmelerde etkili bir faktördür. Bu araştırmalarda (Andiç, 2002);

- Reaktif agrega tane boyutu ve yapısının ASR hızı ile ilişkisi,
- Kaba agregaların zaman-genleşme ilişkisi,
- Geçirimlilik ve reaksiyon arasındaki ilişki varlığı.

Yapılan çalışmalarda agrega tane boyutu ve köşeliliğin farklılığının betonda ASR genleşmesine etkisi araştırılmıştır. Bazı araştırmacılar, tane boyutu azaldıkça genleşmelerin arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak boyut 20 μm altına düştüğünde genleşmenin aynı oranda artmadığı belirlenmiştir. Başka bir çalışmada büyük agrega (1-5 mm) taneleri kullanıldığında genleşmeyi geciktirdiği tespit edilmiştir. Reaktif agrega için belirlenen boyut 0.15 ile 10 mm arasındadır, ancak agrega boyutu azaldıkça genleşmenin arttığı belirlenmiştir (Andiç, 2002).

1.2.3 Alkalilerin Etkisi

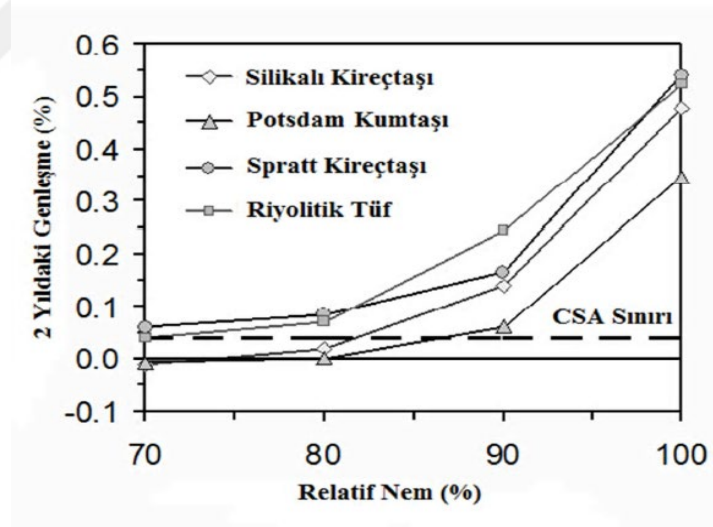
Beton, içerisinde alkali (Na^+ , K^+) ve hidroksil (OH^-) iyonları ile dolu sayılamayacak kadar çok gözenekte boşluk çözeltisi bulunmaktadır. ASR oluşması için gözenekteki çözeltideki alkali seviyesi oldukça yüksek olmalıdır. Aşağıda beton alkali kaynakları belirtilmiştir (Farny ve Kosmatka, 1997):

- Alkalilerin başlıca kaynağı çimento minerallerinin hidratasyonundan dolayı gelen alkalilerdir.
- Çözünen tuzlardan gelen alkaliler, alkalilerin yaygın bir kaynağıdır.
- Çimento yerine ikame edilen diğer tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler,

- Bazı agregaların kendisi alkaliler için potansiyel olabilir. ASR sırasında agreganın kafes sistemi bozulmaya başladığı için alkaliler ortaya çıkmaktadır. Bu alkaliler, sonradan daha ileri seviyede ASR oluşumu için etken olmaktadır

1.2.4 Rutubetin Etkisi

Su, ASR’de iki temel etki yaratmaktadır. Etkilerden ilki, iyonların taşınımını sağlamak, ikincisi ise higroskopik jel tarafından emilip şişerek betonda genleşmelere ve sonrasında çatlaklara sebep olmaktır. Bu durumun gerçekleşmesi ortamda yeterli derecede nemin bulunmasıyla ilgilidir. Yeterli derecede nem, kimyasal reaksiyonun devam edebilmesini ve reaksiyon sonucu oluşan jelin genleşmesini sağlar. Rölatif nemin %70’in altında olduğu durumlarda beton içerisindeki kimyasal reaksiyon, genleşmelere neden olmazken, nem %80’in üzerine çıktığı zaman reaksiyon hızlı bir şekilde gerçekleşip, yüksek genleşmelere neden olur. Şekil 1.5’te reaktif agregalar ile yapılan çalışmada %80 nem aşıldığı koşullarda Kanada standardı (CAN/CSA A23.2 25A) tehlike sınırı olan %0.15’i aştığı görülmektedir (Pedneault, 1996).



Şekil 1.5 Rölatif nemin beton prizmalardaki genleşmeye etkisi (Pedneault, 1996)

Yüksek derecede nem, emilimi arttırır ve böylelikle betonda daha fazla genleşme gerçekleşir. Genleşme ile geçirimliliğin artması alkali iyonlarının iletimine ve reaksiyonun hızlanmasına neden olur. Karışım oranlarında değişimler sağlayarak kompozit içinde alkalilerin iletimi de azaltılmış olur. Reaksiyon oluşması ve genleşme önlenmiş olur (Farny ve Kosmatka, 1997).

Yapılarda her noktada nem miktarı aynı derecede olmayabilir. Farklı noktalarda farklı miktarlarda bulunan nem değerleri, ASR sonucu ortaya çıkacak zararın da farklı derecede olmasına sebep olmaktadır. Özellikle yapıya gelen sürekli veya sabit bir nem kaynağı varsa bu bölümler, yapının kuru bölümlerine göre ASR'den dolayı daha ciddi zararlar görmektedir (Farny ve Kosmatka, 1997).

1.2.5 Sıcaklığın Etkisi

ASR etkisi iklim koşullarına göre değişiklik göstermektedir. ASR hasarının oluşmasındaki en önemli etken olan nem faktörü sebebiyle sıcak iklim koşullarındaki yapılar, soğuk iklim koşullarındaki yapılara göre bu reaksiyondan daha fazla etkilenmektedir. Reaksiyon hızı, ortam sıcaklığı ve nem artışı ile artmaktadır. Sıcaklık artışı, agregaların çoğunluğunda aşırı termal gerilmelere sebep olur. Yapılan çalışmalarda aynı koşullar altındaki harç örneklerinin 13-20°C ve 38°C boy değişimlerinin ölçümleri yapılmıştır. 38°C 'deki harç örneklerinde daha yüksek genleşmelerin olduğu belirlenmiştir. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir (Andiç, 2002).

1.2.6 Diğer Faktörlerin Etkisi

ASR genelde betonun içyapısından kaynaklansa da dış alkaliler ve betonun üretim aşamalarında uygulanan farklı yöntemler ASR'yi etkileyebilmektedir. S/Ç oranının düşük olması, buhar kürü, geçirimsizliğin azaltılması, mineral katkı kullanımı gibi uygulamalar nemin ve alkalilerin beton içerisindeki iletimini azalttığı için ASR genleşmelerini de azaltmaktadır.

Dış alkali kaynağı olarak adlandırdığımız deniz suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları özellikle geçirimli betonlar ve/veya çatlak oluşmuş betonlarda ASR genleşmelerini artırır. Yapılan bir çalışmada 500 kg/m³ normal Portland çimentosu ve reaktif andezit agrega ile hazırlanan beton örnekler iki farklı koşulda deniz suyuna maruz bırakılmıştır. Yarısına kadar deniz suyuna batırılan örneklerde, tamamen deniz suyuna batırılan örneklere göre daha hızlı ASR genleşmesi gerçekleşmiştir. Deniz suyunun sertleşmiş betonda ASR genleşmelerini artırıcı etkisi, hidrate C₃A ve

Ca(OH)_2 bileşenlerinin NaCl ile oluşan reaksiyon sonucu OH^- miktarının artması nedeniyledir (Andiç, 2002).

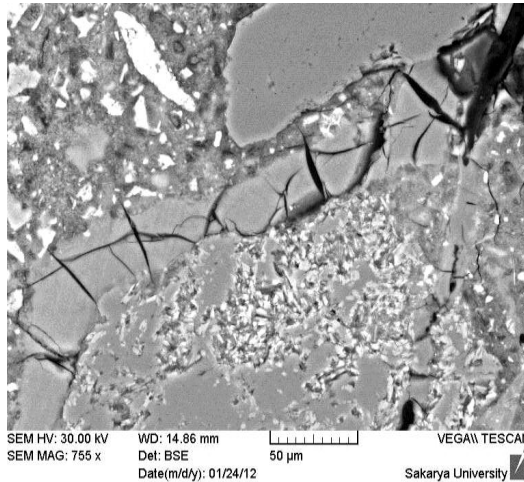
1.3 Alkali Silika Reaksiyonu Hasarlarının Teşhis Yöntemleri

Alkali silika reaksiyonu hasarının belirlenebilmesi için hem kimyasal hem de fiziksel özelliğinden yararlanılarak çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

1.3.1. Alkali Silika Reaksiyonu Hasarlarının Teşhisi

ASR hasarının tespiti için en belirgin özellik gözle yapılan kontrollerdir. Beton yüzeyinde görülen harita şeklindeki çatlaklar ASR hasarını tespit eden en belirgin durumdur. Ayrıca, görsel incelemelerde beton yüzeyinde, genleşmeler ve çatlaklar dışında renk değişimleri ve dökülmeler de tespit edilmektedir.

Beton üzerinde yapılan petrografik analiz çalışmaları sayesinde de ASR tespitleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada beton yüzeyinden alınan numuneler mikroskop altında incelenerek reaktif agrega ve ASR ürünleri tespit edilmiştir. Bu tespit yönteminde hasar seviyesini belirlemek oldukça zordur (Ramyar, 2013). Şekil 1.6 a'da çimento hamuruna sızan ASR ürünü Şekil 1.6.b'de ise ASR jelinin mikroskop altındaki analizi görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.6 Deneysel çalışma sonucu elde edilen çimento hamuruna sızan ASR ürünü (Yıldırım, 2013 / Kişisel arşiv, 2022)

1.3.2 Alkali silika jelleri

ASR ürünlerinin oluşumu, boşluk çözeltisinin dağılımına, reaktif silisin yapısına, ortam sıcaklığına ve reaksiyon ürünlerinin etkisine bağlı olarak farklılık göstermektedir. ASR oluşumu sonrası betonun çatlaklarında gözlemlenen jel, genelde şeffaf ve reçinemsi bir yapıdadır. Kompozisyon farklılıklarından dolayı jel yapısında viskozite değerleri açısından önemli derecede farklılıklar bulunmaktadır. Bazı jeller yeterince sıvı olup çatlaklar arasında yer değiştirmeler yaparak beton boşluklarını doldurmaya çalışır. Gözle yapılan teşhislerde görüldüğü gibi jeller hava ile etkileşime girerek bir süre sonra karbonatlaşır, beyaz ve kuru bir yapıya dönüşür. Ardından bu jellerde kuruma çatlakları gözlenir (Yıldırım, 2013).

ASR jellerinin kimyasal kompozisyonu üç kategoride toplanabilir (Yıldırım, 2013);

- Düşük seviyede reaksiyona uğramış ve şişmiş silis,
- Saf alkali silikat çözeltileri veya çeşitli alkali ve su içeriklerinde jeller,
- Sabit kompozisyonda (su içerikleri hariç) iki komponentli basit karışımlar.

1.3.3 Genleşme ve çatlama

ASR etkisinin ilk olarak gözle görülebilen en belirgin özelliği beton üzerinde oluşan harita şeklindeki ağ çatlaklarıdır. Bu çatlakların betonda yapısal nedenlerden kaynaklanan çatlaklardan (oturma, kesme vb.) ayırt edilmesi oldukça kolaydır. Beton yüzeyinin ıslatılması ile çatlaklarla ilgili tespitler rahatça yapılabilmektedir. Petrografik incelemeler sayesinde de betonda meydana gelen ASR çatlakları tespit edilmektedir. Petrografik analizlerde bu jeller tüm boşluklarda görülebilir. Harita şeklindeki çatlaklar birbiri ile birleşerek betonda gerilme yönünde çatlaklar oluşturur. (Yıldırım, 2013; Aydın, 2012). Şekil 1.7’de ASR nedeniyle yapılarda meydana gelen harita çatlakları görülmektedir (Yıldırım, 2013)

 a- ASR nedeniyle köprü parapet duvarlarında oluşan harita çatlakları	 b-Otoyol bariyerinde şiddetli ASR sonucu oluşan harita çatlakları (Bolu Dağı, 2011)	 c-Şiddetli ASR sonucu 30 yıllık bir köprünün kanat duvarlarında oluşan harita şeklindeki çatlaklar
 d-ASR etkisi altında kalan köprü güvertesinde oluşan boyuna çatlaklar	 e-Karayolunda oluşan ASR ile ilişkili boyuna çatlaklar	 f-ASR etkisi sonucu beton kiriş prekastta oluşan boyuna çatlama

Şekil 1.7 ASR hasarına maruz kalmış yapılardan görüntüler (Yıldırım, 2013)

1.3.4 Parça atma

ASR etkisi sonucu beton içerisinde oluşan jellerin şişmesi sonucunda parçalanmış agregalar çimento hamurunu dışarıya doğru iter (Şekil 1.8). “pop out” adı verilen bu yüzey patlamaları ve parçalanmaları ASR’nin en yaygın belirtileridir. Parça atma olayı şu aşamalarda gerçekleşir (Aydın, 2012);

- Yakın agregalar arasındaki aderans zayıflar.
- Agreganın çimento hamuru ile oluşturduğu reaksiyon duvarı kırılır.
- Reaksiyon duvarında oluşan hasar agregayı koruyamaz ve agregada da kırılma gerçekleşir.
- Agregada üzerinde oluşan jel koruyucu duvarda oluşan harç tabakasını dışarıya iter



Şekil 1.8 Pop-out ile yüzeyden ayrılmış agrega tanesi (Aydın, 2012)

1.3.5 Yer değiştirmeler

ASR hasarlarının tipik bir belirtisi olarak yer değiştirmeler de söylenebilir. Bazı saha örneklerinde farklı zamanlarda dökülen betonların diğerlerinden daha şiddetli etkilendiği görülmektedir (Şekil 1.9). Val de Mare barajında beton elemanlardan birinin diğerine göre 50 mm civarında deplasman yaptığı görülmektedir.



Şekil 1.9 Parapet elemanı, Val de Mare Barajı, Jersey (Poole, 1992)

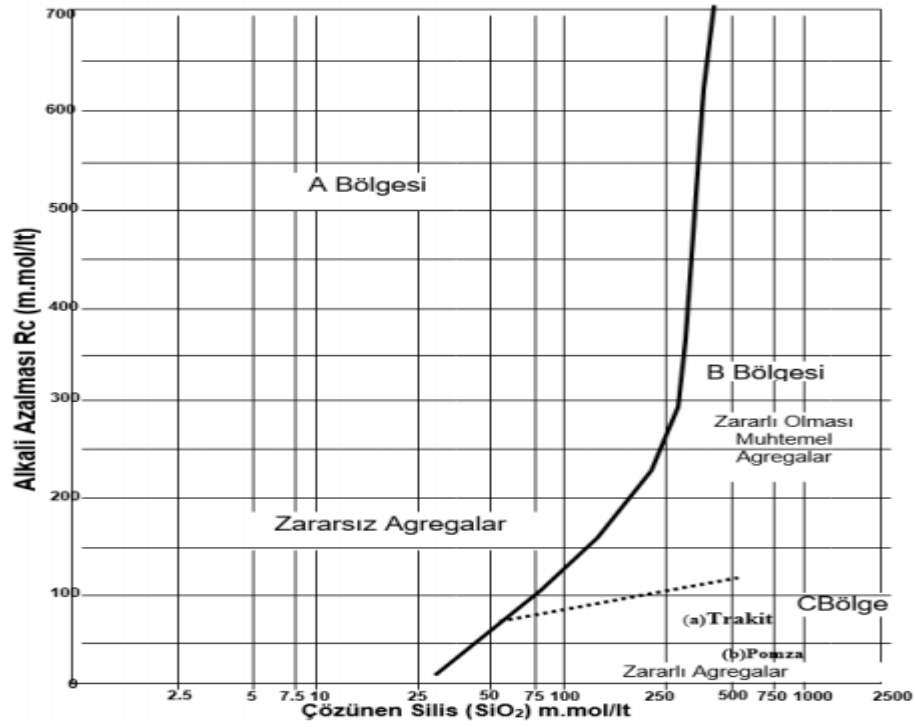
1.4 Alkali silika reaksiyonu hasarlarının teşhisinde kullanılan yöntemler

ASR hasarının belirlenebilmesi için hem kimyasal hem de genleşme özelliğinden yararlanılarak çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

Kimyasal yöntem (ASTM C 289), harç çubuk yöntemi (ASTM C 227), hızlı harç çubuk yöntemi (ASTM C 1260), beton prizma testi (ASTM C 1293) ve Petrografik Analiz (ASTM C 295) olmak üzere en çok kullanılan test metotları görülmektedir. Tüm bu metotlar incelendiğinde hızlı deney metotları arasında istatistiksel olarak en güvenilir test metodu hızlandırılmış harç çubuğu metodudur. Ayrıca uzun süreli metotlar arasında en gerçekçi sonuçları veren ise beton prizma metodudur.

1.4.1 Kimyasal metot-ASTM C 289

Hızlı kimyasal test metodu olarak da adlandırılan bu test yönteminde agregalar kırım işleminden geçirilerek ayrıştırıcı elekler sayesinde 150-300 µm'lik inceliğe getirilir. Kırım sonrasında agregaların yüzeyinde ve içerisinde toz ve ince parçacıklar kalabilir. Bunların temizlenmesi için yıkama işlemi yapılır. Bu malzemeler 1 gün boyunca 105±5 °C etüvde kurutma işlemine tabi tutulur. Etüvden alınan 25'er gramlık üç adet örnek malzeme, 80 °C'de 1 gün boyunca hazırlanan alkali çözelti içerisinde (25ml 1N Sodyum Hidroksit) bekletilir. Daha sonra çözeltiden 10 ml alınır ve 200 ml'lik balon-jojenin içerisine dökülür. Balon-jojeyi 200 ml'ye kadar tamamlamak için kalan seviyeye damıtılmış su katılır. Çözelti süzme işleminden sonra "asitte titre" (TA) ölçümü kullanılarak alkalinite ve çözünmüş siliste görülen azalma miktarı belirlenir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda grafik üzerinde işaretleme yapılır ve agregaların düştüğü bölge bulunur. Grafikte Sc çözünmüş silisi, Rc ise alkalinitedeki azalma miktarını gösterir. Şekil 1.10'da zararlı, zararsız veya potansiyel zararlı şeklinde üç adet bölge bulunur (Varol, Ayhan ve Vural, 2019). Agregalar bu üç bölgeden hangisine denk geliyorsa o şekilde tanımlanır. ASTM C 289 yönteminde hızlı reaksiyona giren agregalar yavaş reaksiyona giren agregalara göre daha çok güvenilirdir. Kimyasal yöntem, agregaların reaktivite seviyesini belirlemede yeterli olmadığından dolayı diğer test yöntemlerine başvurmak da gereklidir (Ramlochan, Thomas ve Gruber, 2000).



Şekil 1.10 Alkalinite azalma (R_c), çözünen siliste azalma (S_c) grafiği (ASTM C 289)

1.4.2 Harç Çubuğu Deneyi-ASTM C 227

Bu yöntemde reaktif agrega ile üretilen harç çubuklarının genleşmesi ölçülür. Reaktivite potansiyeli belirli kür koşullarında 25x25x285 mm boyutlarında üretilen harç çubuklarının boy değişimlerinin (genleşme yüzdeleri) ölçülmesi ile belirlenir. En az 4 adet numune hazırlanır ve harç kalıplara iyice şişlenerek sıkıştırılmadan önce 7 mm çapında ve 32 mm boyundaki pirinçten yapılmış pimlerin kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmesi gerekmektedir. Tamamen suda kalacak şekilde 24 saat boyunca 38 °C’de kürleme işlemi uygulanır. 14. günden başlanarak belirli periyotlarla 12 ay veya daha uzun süre boy ölçümleri yapılır. ASTM C 33 standardına göre, reaktif olmayan agrega için genleşmeler altı ayda %0,10 ve üç ayda %0,5’in altında olmalıdır. Reaktif agregada farklılıkların anlaşılabilmesi için daha uzun süreli genleşmeler de kaydedilmelidir (Çelik, Yurter, Sabiha ve Yeprem, 2004).

Harç çubuğu metodunun en önemli faydası, çimento-agrega bileşimlerinin ASR’ye yararlı bir ortam yaratıp yaratmadıklarının ölçülmesidir. Malzemelerin çok yüksek reaktiviteye sahip olmaması durumunda daha net bir sonuç alınabilmesi için yaklaşık 12 ay geçmesini beklemek gerekmektedir (Çelik, Yurter, Sabiha ve Yeprem, 2004).

1.4.3 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi-ASTM C 1260

Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi, İlk olarak Güney Afrika Ulusal Araştırma Bürosu (NBRI) tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Boy değişimi esasına dayanan bu yöntemde reaktif agregalar ile hazırlanan numuneler 14 gün boyunca yüksek alkaliniteli bir çözelti içerisinde yüksek sıcaklık altında bırakılır. 14 günlük bu süre nedeniyle hızlandırılmış harç çubuğu deneyi diğer tüm test yöntemlerine göre oldukça hızlıdır (Dinçdemir, 2015).

Standartlara göre bu yöntemde S/Ç=0,47 ve kütlece agrega/çimento=2,25 oranında hazırlanan karışımlar 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülür. Kalıptan alınan numuneler 24 saat boyunca %100 bağıl nem altında ve 80 °C sıcaklıktaki su içerisinde kürlenmeye bırakılır. Sudan çıkış ölçümleri yapıldıktan sonra 80 °C NaOH çözeltisine (900 saf suya 40 gr. sodyum hidroksit) konulur. Şekil 1.11’de kalıplara alınan numuneler ve NaOH kürü çözeltisine koyulan numuneler görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.11 25x25x285 mm boyutlarındaki örnekler (a), 1N NaOH çözeltisi (b) Kişisel arşiv, 2021)

NaOH çözeltisine konulduktan sonra devam eden 3, 7 ve 14. günlerde boy ölçümleri alınır. Birim boy değişim yüzdelerini belirlemek amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$\%L = (\Delta L / L) \times 100$$

(1.2)

Eşitlikte;

- $\% L = \text{Boy Değişim Yüzdesi}$
- $\Delta L = \text{Örneğin Boy Değişimi (mm)}$
- $L = \text{Örneğin ilk uzunluğu (mm)}$

ASTM C 1260' a göre boy yüzdelerindeki değişim aşağıdaki değerlendirmeye göre yapılmaktadır.

- Boy değişimi, 14. gün sonunda %0,1'den küçükse 'Agrega zararsız bölgededir'
- Boy değişimi, 14 gün sonunda %0,1-%0,2 arasında ise deney süresi uzatılarak örneklerin 28 günlük boy değişimleri ölçülür.
- Boy değişimi, 14. gün sonunda %0,2'den büyükse 'Agrega potansiyel olarak zararlıdır.'

Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi, agreganın reaktivite potansiyelinin belirlenmesi kullanılabilir. Şiddetli ve daha hızlı deney koşullarından dolayı, sahada gayet düzgün bir performans gösterdiği düşünülen agregalar bu deney sonucunda reaktif olarak belirlenebilir. Normal şartlar altında kullanılan betonlar bu yöntem koşullarındaki gibi yüksek seviyelerde alkali ve sıcaklıklarla karşılaşmadıkları için agrega performansları tam sonuç veremeyebilir. (Farny ve Kosmatka, 1997).

Agregaların reaktif olup olmadığına karar verirken bu durumun da önemli derecede dikkate alınmasında fayda vardır. Bu şiddetli deney koşulları olumsuz bir durum gibi gözükse de deney süresinin oldukça kısa olması ve pratikliği sebebiyle araştırmalarda kullanılması tercih sebebi olmaktadır.

1.4.4 Beton Prizma Deneyi-ASTM C 1293

ASR nedeniyle betonda meydana gelen boy değişimlerinin ve agregaların reaktivitelerinin belirlenmesini sağlayan bir metottur. Bu deney, 75x75x285 mm boyutlarındaki numuneler ile gerçek boyutlardaki hasarların en net şekilde ölçülebildiği bir yöntemdir. ASR'nin kimyasal etkisi ve performansı üzerine

Stanton'un 1940 yılında yaptığı çalışmalardan sonra birçok test metodu geliştirilmiştir. En uygun ve sağlıklı sonucu Beton Prizma testi / RILEM AAR-3)'nin verdiği görülmüştür (Dinçdemir, 2015).

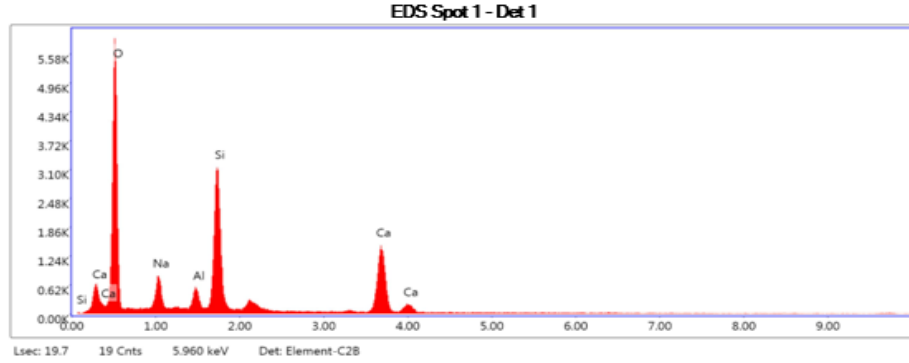
Bu deneyde örnekler %100 bağıl nem ve 38 °C altında, sızdırmayan bir kap içerisine konularak saklanmaktadır. Deneyde kullanılan numuneler, standartlara uygun olarak çimento içeriği 420 kg/m³, su/çimento oranı 0.42 ile 0.45 arasında olmak üzere hazırlanıp, deneyler standart koşullar altında yapılmaktadır. Bu koşullar altında korunan örneklerin boylarındaki değişiklikler ilk gün alınan ölçümler ile karşılaştırılır. Yapılan ölçümler %0.001'lik hassasiyet ile gerçekleştirilmektedir. Yapılan ölçümler 7., 28. ve 56. gün sonrasında yapılan ölçümler akabinde 3., 6., 9., 12. aylardan sonra tekrar ölçüm yapılır. 1 yılın sonunda meydana gelen genleşme %0,04 veya daha çok ise agrega reaktivite potansiyeli yüksek olarak tanımlanmaktadır. (Dinçdemir, 2015).

1.4.5 Petrografik Analiz-ASTM C 295

Kayaçlardan alınan parçaların içerisinde bulunan minerallerin cinslerinin ve yüzdelerinin belirlenmesi işlemine "Petrografik Analiz" denilmektedir. Mikroskop yardımı ile agregaların ince kesitlerinde yapılan incelemeler sonucunda agrega içeriğinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların belirlenmesi sağlanır. Alkali silika reaksiyonu için en önemli element silisin saptanmasında faydalı olan yöntemlerden diğerleri XRD analizi ve taramalı elektron mikroskobudur (Subaşı, Çullu ve Bolat, 2010). Şekil 1.12'de EDS analizi yapılan bir agrega ince kesiti örneği görülmektedir.

EDS Spot 1

kV: 15 Mag:10000 Takeoff: 38.4 Live Time(s): 19.7 Amp Time(μs):0.96 Resolution:(eV)130.3



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	52.80	68.50	2045.31	8.66	0.1750	1.0596	0.3129	1.0000
NaK	6.88	6.21	335.16	8.58	0.0322	0.9579	0.4879	1.0016
AlK	3.01	2.32	246.69	6.56	0.0208	0.9358	0.7335	1.0052
SiK	16.50	12.20	1487.73	3.96	0.1286	0.9552	0.8124	1.0038
CaK	20.81	10.78	860.65	2.93	0.1843	0.8957	0.9821	1.0065

Şekil 1.12 Agregat ince kesitinden alınan EDS analiz örneği

1.5 Alkali Silika Reaksiyonunu Önleme Yöntemleri

ASR'nin önlenmesi için birden fazla yöntem vardır ancak aslında önemli olan ASR'nin oluşmasını sağlayan ana etkenleri ortadan kaldırmaktır. Bu önlemlerden başlıcaları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Subaşı, Çullu ve Bolat, 2010):

- Reaktif agreganın saptanması ve agregat seçimi
- Alkalilerin azaltılması ve çimento seçimi
- Rutubet ve geçirimsizliğin azaltılması
- Mineral katkı maddesi kullanılması
- Lif kullanımı

1.6 Lifli Betonlarda Alkali Silika Reaksiyonu

Lifli kompozitler geleneksel betona göre daha yüksek sünekliğe ve tokluğa sahiptirler. Lifli kompozitlerin ASR etkisine karşı olumlu sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Lifli kompozitlerde ASR etkisi direncini incelemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır.

Yapılan çalışmalardan birinde, kompozitlerin içerisine bir tip elik lif ve iki farklı tipte polipropilen lif kullanımı ile ASR etkisine karşı direnci araştırılmıştır. Kompozitler 30 gün boyunca alkali ortamda bekletilmiştir. elik lifler çatlamaya bağlı genleşmeyi önlerken polipropilen liflerin genleşmeyi önleyemediği belirlenmiştir (Bektaş ve Turanlı, 2002).

Yapılan diğer çalışmalarda, yalın, polipropilen lif ve polipropilen lif-elyaf hibrit karışım olarak hazırlanan karışımlar 136 gün boyunca ASR etkisine maruz bırakılmıştır. Mikrotomografi ile maksimum ve minimum gri tonlama ölçümleri yapılarak alınan sonuçlar doğrultusunda polipropilen ve hibrit karışımın yalın karışıma göre ASR etkisini %15 oranında azalttığı ortaya çıkmıştır (Hernandez-Cruz vd., 2016). Kompozitlerde lif (elik, polimer) kullanımının ASR etkisini engellemediği fakat çatlama ve deformasyonlarda azaltıcı etkisi olduğu 3 yıl süresince devam eden testler sonucu ortaya çıkarılmıştır (Giaccio vd., 2019).

BÖLÜM İKİ

TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER

2.1 ECC Tasarımının Temel Prensipleri

Beton malzemesi ile tasarlanan yapılar çoğaldıkça ve tasarımlar büyüdükçe beton dayanım performansının arttırılması önemli bir gereklilik olmuştur. Yüksek dayanım performansı için son yıllarda farklı karışım uygulamaları kullanılmaktadır. Tasarımları nedeniyle hem yüksek dayanım hem de yüksek bir süneklik gerektiren yapılar için birçok kompozit malzeme geliştirilmiştir. Karışımlarda beton içerisine ilave edilen farklı türlerde lifler kullanılarak dayanımı yüksek ve daha sünek bir yapı elde edilebilmektedir (Erol, 2017).

ECC ile ilgili çalışmalar 90'lı yıllarda Victor Li ve ekibi tarafından başlatılmıştır. İlerleyen yıllarda geliştirilerek matriste oluşan çatlakların arttırılması ve çatlak genişliklerinin minimum seviyede tutulması ile liflerin köprüleme etkisi arttırılması sağlanmıştır. Üretimi sırasında genellikle hacimce %2 oranında rastgele dağılmış, kısa polimerik lifler kullanılarak oluşturulan ECC, çekmede deformasyon sertleşmesi gösteren ultra düktil bir malzemedir (Fukuyama ve Mikame, 1998). Geleneksel betonla kıyaslandığında ECC çok yüksek bir tokluğa sahiptir. Farklı kombinasyonlar uygulanarak optimize edilmiş bir beton tasarımı ile ECC'nin çekme birim deformasyon kapasitesi %4'lere kadar çıkabilmektedir (Li ve Kanda, 1998).

Şekil 2.1'de görülen çoklu çatlak davranışı gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit (patentli ismi: Engineered Cementitious Composites – ECC), ağır yüklemeler altında yüksek hasar toleransı ve normal servis şartlarında yüksek dayanıklılık göstermesi için mikro-mekanik olarak tasarlanmış sünek, lif donatılı çimento esaslı bir kompozittir (Li, 1997; Li, Wang ve Wu, 2001; Li, 2003).



Şekil 2.1 ECC kompozitin eğilme yükleri altındaki sünek davranışı (Li, 1997)

ECC karışımları geleneksel karışımlardan ayıran en önemli özelliği süneklik ve aynı zamanda enerji yutma kapasitesidir. ECC kompozitler ortalama %3-5 oranında çekme-Şekil değiştirme kapasitesine sahiptir. Bu kapasite geleneksel karışımlardan yaklaşık 300 kat daha fazladır. Tablo 2.1’de ECC ve geleneksel karışımların farklı özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 2.1 Geleneksel beton ile ECC’nin özelliklerinin karşılaştırılması (Erol, 2017)

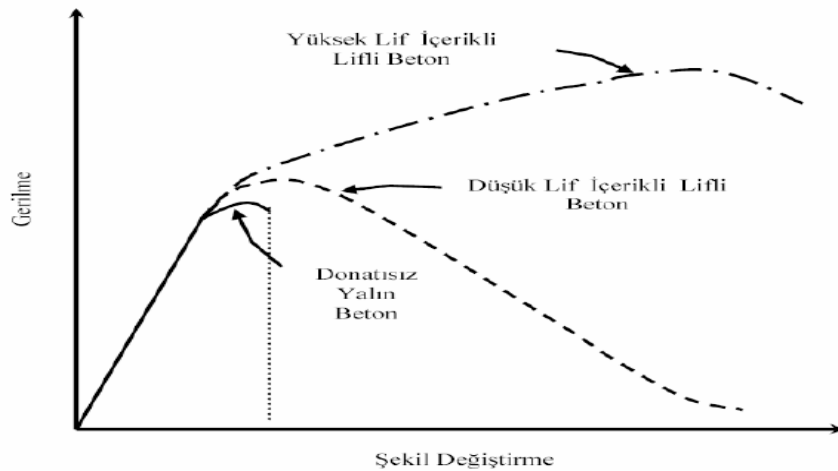
	Geleneksel Beton	ECC
Boyutsal uyumluluk	Zayıf	Geleneksel betonla çok uyumlu
Şekil değiştirme kapasitesi	0,01%-0,02%	2-5% (yaklaşık 200-500 kat daha sünek)
Eğilmede çekme dayanımı (Mpa)	5-8 Mpa	10-14 (yaklaşık iki kat daha yüksek)
Basınç dayanımı (Mpa)	30-60 Mpa	40-150 (üç katı kadar daha yüksek)
Kısıtlanmış rötre	1 mm	0,03 mm
Geçirimlilik (m/s)	$1,7 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-10}$
Dona karşı dayanım	Hava sürüklenmişse iyi	En az hava sürüklenmiş beton kadar dayanıklı
Yorulma mukavemeti	Zayıf	Geleneksel betona oranla en az on kat daha iyi
Çatlama/ Tabakalanma	Gevrek	Sünek
Korozyona dayanım	Zayıf	Üst düzey

ECC'lerin yapılarda kullanımında her ne kadar normal beton ile karşılaştırıldığında daha fazla maliyetli olduğu gözlense de bu ürünlerin yapıya olan katkıları fayda-maliyet gözetilerek değerlendirilmelidir. Bu ürünlerin üretiminde hammadde maliyetlerinden kaynaklı giderler fazla olsa da uzun dönemde durabiliteye olan katkıları bu malzemelerin ticarileşmesinde önemli katkılar sağlayacaktır. Buna ek olarak, geleneksel betona kıyasla daha hafif, esnek ve yüksek erken mukavemet değerlerine sahip olacak şekilde üretilbilmeleri bu malzemelerin birçok uygulama alanında ön plana çıkmalarına yardımcı olacaktır (Erol, 2017).

2.2 ECC'nin Mekanik Özellikleri

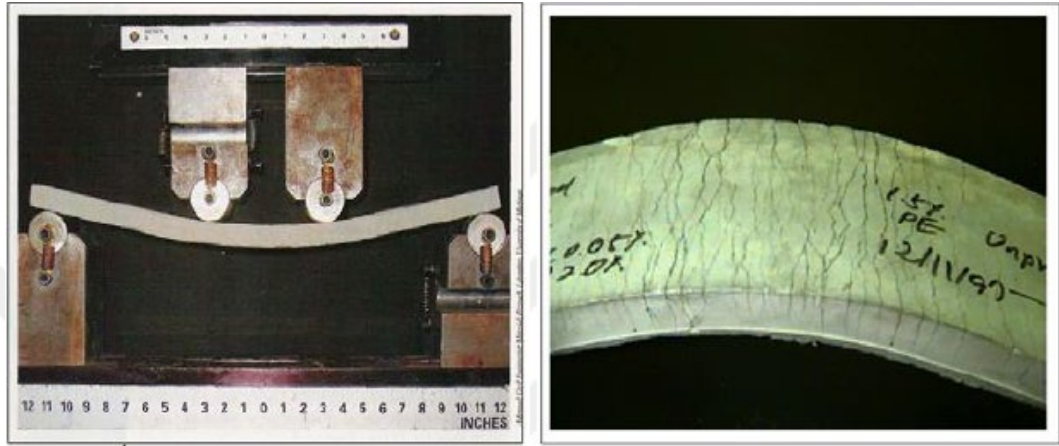
Çimento esaslı kompozitlerde istenilen performansın elde edilmesi için matris-lif kombinasyonunun optimizasyonu en önemli koşuldur. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, tokluğu ve çatlak direnci gibi özelliklerinin geliştirilmesi bu optimizasyon sayesinde en verimli haline ulaşır.

Şekil 2.2'te ECC kompozitlerde mekanik özelliklerin artırılması amacıyla matris içerisine farklı tip ve oranlarda lifler koyulmaktadır. Matris içerisinde liflerin kayma etkisi oluşturması sebebiyle mekanik etkilerin karşılanması sağlanmaktadır. Bu etkinin en iyi şekilde karşılanabilmesi için lif-matris aderansı oldukça önemlidir. En uygun kombinasyon seçilmelidir. Kompozitin içeriğindeki lif-matris uyumuna bağlı olarak mekanik yüklemeler altındaki davranışlar da değişmektedir (Ersoy, 2001).



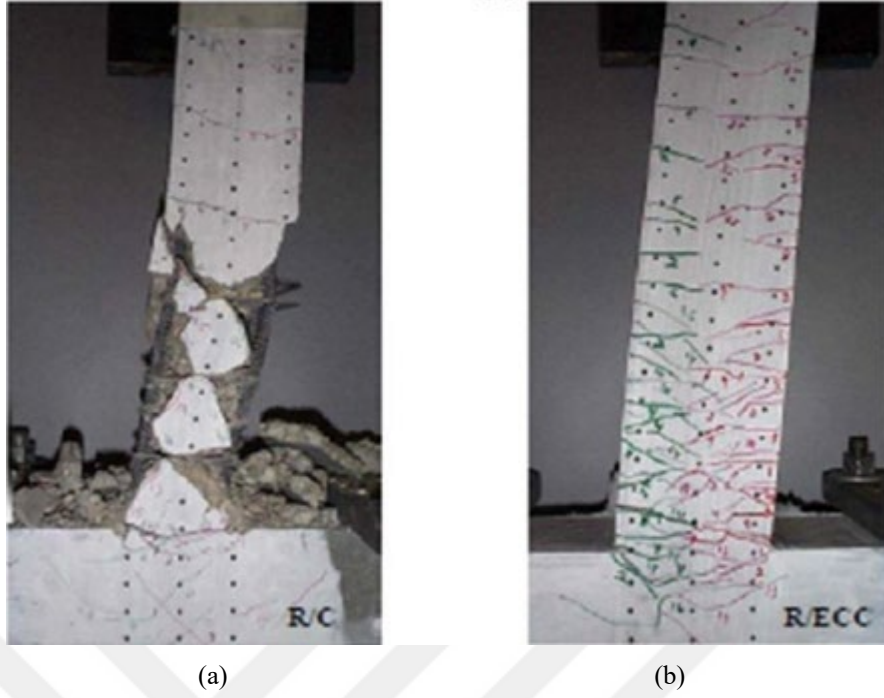
Şekil 2.2 Yalın beton ile yüksek ve düşük lif içerikli kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Bentur ve Mindness, 2006)

ECC beton tasarımı rastgele dağılmış, kısa polimerik lifler ile uygun bir matris-lif tasarımı sağlanarak eğilme etkisi altında oldukça yüksek bir süneklığe ve tokluğa sahip olması amaçlanmıştır (Şekil 2.3). Çatlak genişliği sınırlı kalmak koşuluyla çoklu çatlak davranışı göstermekte ve aynı zamanda kompozitin yük taşıma kapasitesini de artırmaktadır (Li ve Kanda 1998).



Şekil 2.3 ECC kompozitlerde eğilme etkisi altında görülen çoklu çatlak davranışı (Li ve Kanda 1998)

Betonarme yapılarda kolon-kiriş bağlantıları yapının ayakta kalması açısından en önemli noktalardır. Düğüm noktalarında oluşan plastik mafsalları geleneksel beton ile ECC arasında belirgin performans farklılıkları göstermektedir. Yapılan bir deneysel çalışmada geleneksel beton yapılarında bu düğüm noktalarında plastik mafsalları oluşumu ile bölgedeki beton tabakasında tamamen dökülme yaşanmıştır (Şekil 2.4.a). Fakat, ECC ile yapılan kolon-kiriş düğüm noktalarında plastik mafsalları oluşumu sonrasında çoklu çatlak davranışı sayesinde yük taşıma kapasitesi artmış ve yaklaşık %10 deformasyon oluşmuştur. Aynı zamanda yapının bütünlüğü korunmuştur (Şekil 2.4.b) (Fischer ve Li, 2002b).



Şekil 2.4 Betonarme çerçevelerde düğüm noktasında plastik mafsall oluşumu, a) Klasik betonarme düğüm noktası, b) Matrisi lifli mikro beton (ECC) olan betonarme düğüm noktası (Fischer ve Li, 2002b)

Prof. Dr. Victor Li ve ekibi tarafından geliştirilen mikro-mekanik teori iki kritere dayanır. Birincisi enerji kriteri, ikincisi dayanım kriteridir. Çoklu çatlak davranışının sağlanması ve sünekliğin artırılması amacıyla lif-matris dağılımı uygun şekilde ayarlanmalıdır. İki kriterin gerçekleşmesi bu sayede gerçekleşebilmektedir. (Li, 2012).

Dayanım kriterine göre arayüzeyde bulunan başlangıç kusurundan dolayı çatlak oluşumunun başlayabilmesi için çekme gerilmesinin (σ_{cr}) çatlaktaki liflerin köprüleme gerilmesinden (σ_0) düşük olması gerekir (Şekil 2.5). Aynı zamanda köprüleme gerilmesi ile çekme gerilmesi arasındaki farkın artmasını sağlayarak daha çok çatlak oluşumu sağlanmaktadır.

$$\sigma_{cr} < \sigma_0$$

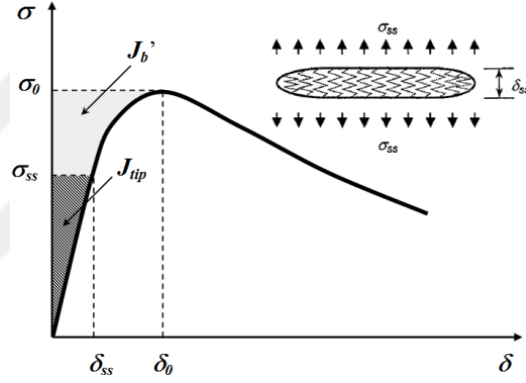
(2.1)

Enerji kriterinde ise kırılma tokluğunun azaltılmasını matris içerisine yerleştirilen kusur boyut ve dağılımının değiştirilmesiyle sağlayarak çatlak potansiyelini arttırmak

amaçlanmaktadır. Matris içerisinde oluşturulan kusur basınç ve çekme dayanımında büyük ölçüde düşüş göstermez ve matrisin enerji yutma kapasitesi artar. Aynı zamanda mekanik özellikler korunurken çoklu çatlak artışı sağlanmıştır.

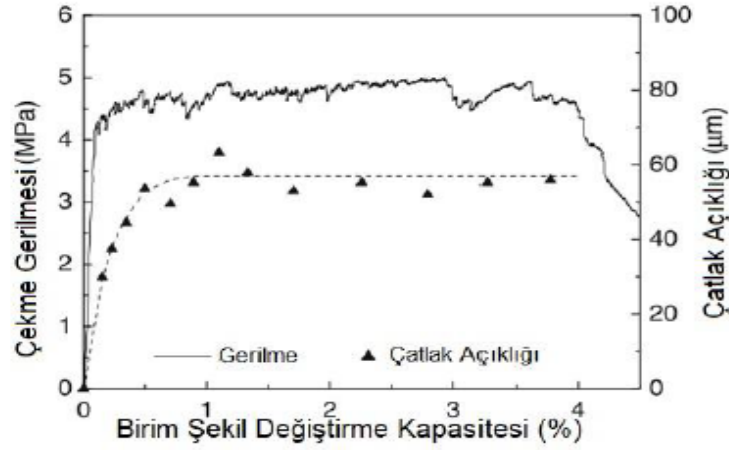
$$J_{tip} = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (2.2)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2.3)$$



Şekil 2.5 Mikro mekanik modelin ana kriterleri (Gödek, 2016)

ECC'nin çekme gerilmeleri altındaki tipik gerilme–birim şekil değiştirmesi grafiği Şekil 2.6'da görülmektedir. Grafikte, açılan her yeni çatlak gerilme diyagramındaki ani düşüşlerden gözlenebilir. Oluşan çatlaklar birim şekil değiştirmeyi arttırırken çatlak genişliklerinin de 60µm civarında sabit kaldığı söylenebilir (Wang ve, Li, 2005).



Şekil 2.6 ECC'nin tipik çekme -birim Şekil değiştirme grafiği ile ortalama çatlak açıklıkları (Wang ve Li, 2005)

2.3 ECC'nin Durabilite Özellikleri

ECC'nin durabilite açısından etkilendiği birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerden bazıları aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.3.1 Donma-çözülme Etkisi

Beton malzemesi ekonomik ömrü boyunca dış etkilere maruz kalmaktadır. Servis ömrünü azaltan bu dış etkilere biri de donma-çözülme etkisidir. Betonun donma-çözülme etkisine karşı korumak için beton içeriği ve boşluk yapısı oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalar sonucunda betonun içeriğinde çimento hamurunda oluşturulan düzgün dağılmış hava gözeneklerinin bu etkiye karşı direnç gösterdiği bilinmektedir. Beton karışımına ilave edilen hava sürükleyici katkıları sayesinde düzgün şekilde dağılmış hava gözenekleri oluşturularak donma-çözülme etkisi azaltılmaktadır. (Güler, 2020).

Özel tasarımlar için hazırlanan ECC'nin donma-çözülme etkisine maruz kalan yapılarda kullanılması durumunda durabilite özelliklerini en verimli şekilde sağlaması gerekmektedir. ECC'nin donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığının incelenmesi için ASTM C666'ya uygun olarak, hava sürüklenmemiş ECC numuneleri donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılarak test edilmiştir (Şahmaran ve Li., 2009). ECC numuneleri deney numunesi, hava sürüklenmemiş beton numuneleri ise referans

numune olarak test edilmiştir. Test standartlarına göre 110. döngüye gelindiğinde ciddi hasarlara maruz kalan normal beton numuneler donma-çözülme kabininden çıkarılmıştır. Fakat ECC numunelerinde 300 döngüden sonra bile dinamik modülünde azalma gözlenmemiştir. 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmış olan ECC numuneleri ve ıslak kürde bırakılmış numunelerin yüzey durumları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 ECC numunelerin çevrimlerden sonraki görüntüsü (a) ıslak kür ve (b) donma-çözülme etkisi (Şahmaran ve ark., 2009)

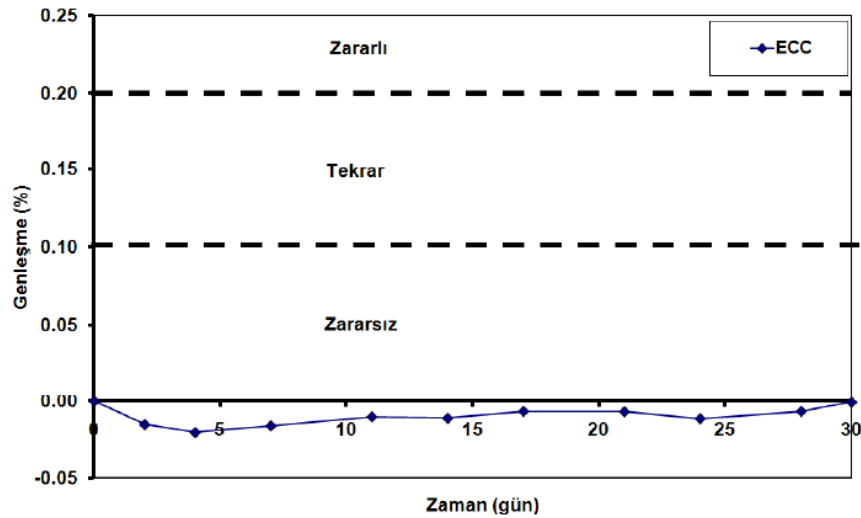
2.3.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Betonun durabilitesi açısından bir diğer dış etken yüksek sıcaklık etkisidir. Bu etki betonda hacim sabitliğinde bozulma yaratır ve dayanımda oldukça etkili bir dayanım azalmasına neden olmaktadır (Ali ve diğ. 2004). Hacim sabitliğinin bozulmasını takiben devam eden sıcaklık artışlarında beton yüzeyinde çatlaklar oluşur ve hatta kopmalar başlamaktadır (Ichikawa ve England, 2004). Yüksek sıcaklık etkisine karşı beton yüzeyinde oluşan etkileri incelemek amacıyla son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan birinde hacim sabitliğinin bozulmasını önlemek amacıyla özel tasarımlar için kullanılan ECC betonlara farklı türlerde lifler ilave edilerek yüksek sıcaklık etkisinde oluşan çatlakların önlenmesi amaçlanmıştır. PVA lifler, betonda yaşanan parçalanmaları engellemek ve dayanımda yaşanan azalmaları engellemek için kullanılmaktadır (Sakr, ve EL-Hakim, 2005).

2.3.3 Alkalinite Etkisi

Çimento içeriğindeki boşluk suyunda bulunan alkali ortam, kimyasal etkiler, deniz suyu vb. gibi yüksek alkali ortamlar normal betonlara etkili derecede hasar verebilir. ECC’de ise mikromekanik özelliklerle (çok ince taneli kum, yüksek hacimde uçucu

kül ve mikro lifler) tasarlanan bir kompozit olmasına rağmen yüksek alkali ortam, çatlaklardan veya matris yoluyla ECC malzemesinin mikro yapısında ve kompozit özelliklerinde değişikliklere yol açabilir. Şahmaran ve Li 2008 yılında ECC'nin alkali-silika reaksiyonu (ASR) etkisine karşı dayanıklılığını incelemişlerdir. ECC numunelerine ASTM C 1260'a uygun olarak hızlandırılmış harç çubuğu deneyi uygulanmıştır. Her 5 günde boy değişimleri ölçülerek 30 gün boyunca ölçüm yapılmıştır. Şekil 2.8'de ASTM C 1260'a göre sınıflandırma grafiği ve ECC numunelerinin davranışı gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere zararsız sınır altında kalan ECC numunelerinin davranış grafiği, numunelerde genleşme olmadığını göstermektedir. ECC'de reaktif olmayan agrega kullanılması genleşme yaşanmamasında önemli bir etki sayılmaktadır. Reaktif agrega kullanılan ECC numunelerinde, yüksek hacimde kullanılan uçucu külün zamanla girdiği puzolanik reaksiyonlar ve mikro fiber liflerin etkisi sayesinde genleşme olmaması beklenmektedir (Şahmaran ve Li, 2008).



Şekil 2.8 ECC numunelerinin (ASTM C 1260) genleşme grafiği (Şahmaran ve Li, 2008)

2.3.4 Korozyon Etkisi

Betonun en çok maruz kaldığı kimyasal etkilerden birisi korozyon etkisidir. Betonarme bir yapının korozyona uğraması sonucu donatılarda paslanma meydana gelir. Bu paslanma nedeniyle hacim genleşmesi yaşayan donatı beton içerisinde içsel gerilmeler yaratır. Bu durum betonun dış yüzeyinde kabuk atma davranışı olarak kendisini belli eder ve betonun servis ömründe ciddi derecede azalma meydana getirir. ECC tasarımların içeriği nedeniyle donatılardaki paslanma sebebiyle oluşan içsel

gerilmelere karşı dirençli bir yapı olduğu düşünülmektedir. Bu direnç çoklu çatlak davranışı sayesinde gerçekleşmektedir. Yapılan bir araştırmada beton numune ve ECC numune ile hazırlanan döşeme içine konik çelik bir çubuk sıkıştırılarak, korozyona uğramış demirdeki genleşme etkilerini göstermek amacıyla kabuk atma sonucu numunede meydana gelen değişim gözlenmiştir. Bu değişimin dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Normal betonun gevrek davranış göstererek tek ve derin çatlak oluşumu ile yüzeyde kopmalar yaşadığı gözlenmiştir. ECC’de ise oluşan mikro çatlaklar çoklu çatlak davranışını ortaya koyarak oldukça sünek bir yapı sağlamıştır. Sonuca göre beton numunede beklenen bir davranış olan gevrek davranış gözlenmiş ve parçalanmalar görülürken ECC numunesi çoklu çatlak davranışı sayesinde sünek bir davranış sergilemiştir (Şekil 2.9) (Şahmaran ve Li, 2010).



Şekil 2.9 Kırılma modları a) Beton numunesi ve b) ECC numunesi (Şahmaran ve Li, 2010)

2.4 ECC Tasarımında Kullanılan Lifler

ECC tasarımında en önemli detaylardan birisi istenilen mekanik özelliklere uygunluğun sağlanmasıdır. Liflerin işlenebilirlik üzerinde büyük bir etkisi görülmektedir. Tasarımda liflerin homojen şekilde dağılması için lifler düşük dozajlarda kullanılmalıdır. Hızla gelişen polimer teknolojisi sayesinde farklı özelliklerde pek çok polimerik lif üretilmiştir. Sıklıkla tercih edilen lifler Polietilen (PE), Polivinil alkol (PVA) ve High Tenacity Polypropylene Fiber (HTPP) liflerdir (Felekoğlu vd., 2014).

2.4.1 Polietilen Lifler (PE)

Polietilen lifler, yüksek elastisite modülü, yüksek çekme dayanımı, agresif kimyasallar karşısında direnç, yüksek aşınma dayanımı ve düşük özgül ağırlığı ile yüksek süneklik ve yüksek dayanım sağlaması istenen ECC tasarımlarda tercih edilmektedir. PE lifler yüzeylerinin hidrofobik olması nedeniyle çimento hamuru fazı ile etkileşimi yoktur. Bu nedenle kullanıldığı çimentolu sistemin hamur fazı ile kimyasal etkileşim göstermez ve sıyrılma özelliği oldukça yüksektir. PE lifler, ECC tasarımına kazandırdığı üstün özelliklerden dolayı tercih edilse dahi yüksek maliyeti alternatif lif arayışlarına sebep olmaktadır (Duyal, 2020).

2.4.2 Polivinil Alkol Lifler (PVA)

PVA lifler, yalın betonun sünekliğini artırarak betonun dinamik özelliklerini geliştirir. Ayrıca, lif takviyesinin gevrek malzemelerin mukavemetini, sünekliğini ve tokluğunu iyileştirmenin etkili bir yolu olduğu belirtilebilir (Noushini vd.,2013). En iyi fiber takviyeli beton işlevini elde etmek için, fiberlerin nispeten daha yüksek bir elastisite modülüne, daha yüksek çekme dayanımına (geleneksel betonun çekme dayanımından en az %200-300 daha fazla) ve çekme deformasyonunda önemli ölçüde daha yüksek uzamaya sahip olması beklenir (Naaman vd., 2001). Şekil 2.10'da çalışmamızda kullandığımız PVA lif örneği görülmektedir.



Şekil 2.10 PVA lifler (Kişisel arşiv, 2022)

2.4.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP)

“High Tenacity Polypropylene Fiber” (HTPP) olarak adlandırılan lifler, 10-12 mikron çapında ve 0,8-1,5 cm uzunluğunda olan liflerdir. HTPP liflerin çekme

dayanımları ortalama 800-900 MPa'dır. Optimum matris-lif aderansı, HTPP liflerin kararlı çoklu çatlak davranışına ve %4'e varan çekme birim deformasyon kapasitesine ulaşmasını sağlar (Felekoğlu ve diğ., 2014). ECC tasarımında HTPP liflerin kullanımı için en uygun doz, hacimce %2 olarak bildirilmiştir. Bu oran daha azaltılırsa, lif kullanımı ECC'nin doygun kararlı çatlak oluşturma durumunu riske atabilir. Benzer biçimde, HTPP liflerin yüksek dozda kullanımı liflerin karışım içerisinde kümelenmesine (aglomerasyon) neden olabilmektedir (Tosun Felekoğlu vd., 2017).

2.5 ECC'nin Kullanım Alanları

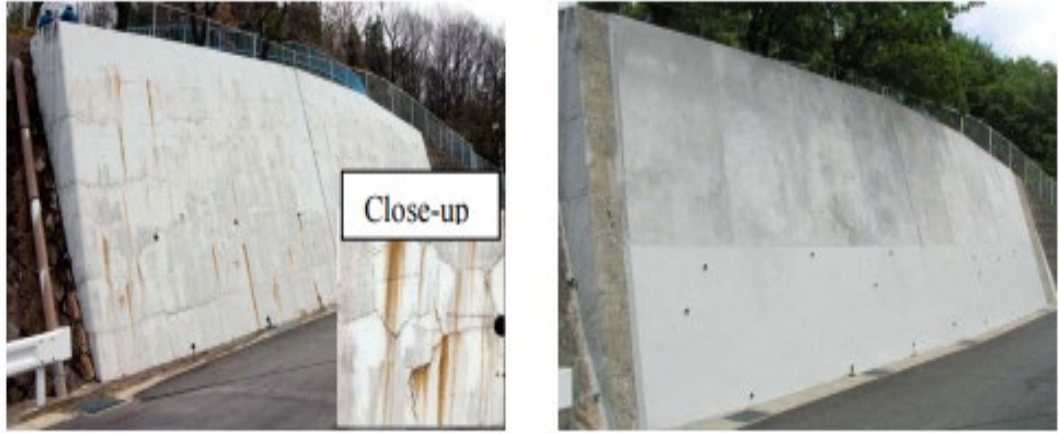
Gösterdiği yüksek performans sayesinde ECC birçok farklı alanda kullanılmıştır. ECC'nin kullanıldığı projeler aşağıda gösterilmiştir:

Şekil 2.11'de ECC malzemesi kullanılarak Japonya'nın Hiroshima-Prefecture bölgesindeki 60 yıllık bir baraj gövdesinde uzun yıllar boyunca meydana gelen ağır hasarın tamiratını göstermektedir. Baraj gövdesinde çatlaklar, su sızıntıları ve kabuk atmalar meydana gelmiştir. ECC, su geçirmez kaplama olarak 20 mm kalınlığında olmak üzere barajın kaynak tarafında kalan bölgesine püskürtme yöntemi ile uygulanmıştır (Kojima vd., 2004).



Şekil 2. 11 Mitaka Barajında su yalıtımı tadilatı amacıyla ECC uygulaması (Kojima ve diğ., 2004)

Şekil 2.12’de yapılan başka bir çalışmada ECC’ nin çoklu çatlak davranışı ve mikro çatlakların zamanla iyileşmesi özelliği, kimyasal bir reaksiyon olan alkali silika etkisine karşı da kullanılmıştır. Japonya’da 18m genişliğinde ve 5m derinliğinde bir beton istinat duvarında oluşan betonun alt tabakasında meydana gelen çatlakların ilerlemesini önlemek amacıyla 50-70 mm kalınlığında ECC kullanılmıştır. ECC performansının incelenip bir önceki tamiratta kullanılan normal beton uygulaması ile kıyaslanması amacıyla tamirat sonrasında sürekli olarak gözlem yapılmıştır. Maksimum çatlak genişlikleri sırasıyla normal betonda 0,2 mm ve 0,3mm bulunurken ECC kullanılarak yapılan tamirat sonrasında maksimum çatlak genişlikleri 50 μm ve 120 μm ’un altında bulunmuştur (Rokugo, Kunieda, ve Lim, 2005).

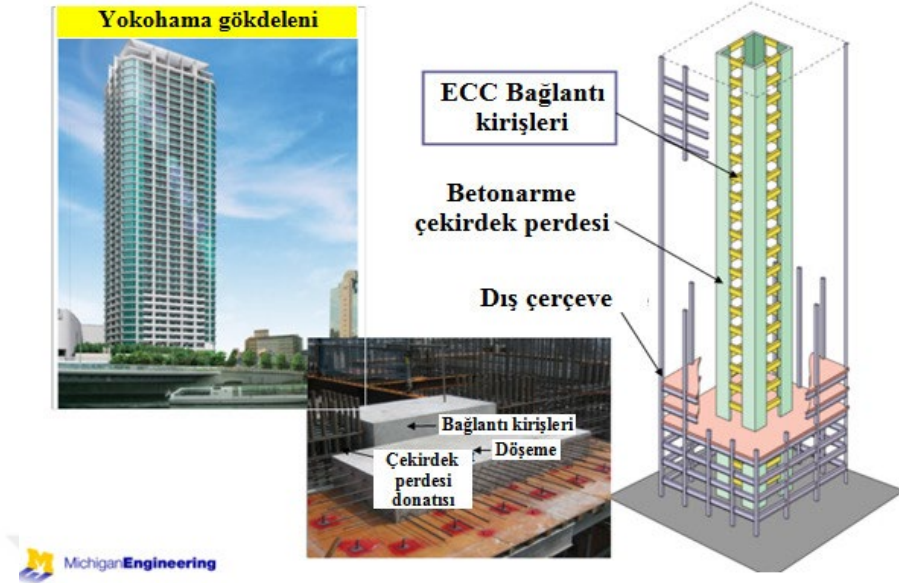


Şekil 2.12 Japonya’da beton istinat duvarında ECC ile yapılan tamirat çalışması (Rokugo, Kunieda, ve Lim, 2005)

Japonya’nın yoğun deprem bölgesinde olması nedeniyle yüksek yapıların deprem etkisine karşı stabilitesini koruyabilmesi, ECC’nin yüksek enerji yutma kapasitesi sayesinde gerçekleşmektedir. Bu uygulamada yüksek yapıların çekirdek birleşimlerindeki bağ kirişlerinde ECC kullanılmıştır (Şekil 2.13). Kajima şirketinin ürettiği prefabrik ECC bağ kirişlerinin bağlantılarının kolay olması sebebiyle sismik bölgelerdeki uygulamalarda kullanılması yaygınlaşmıştır (Kunieda ve Rokugo 2006).



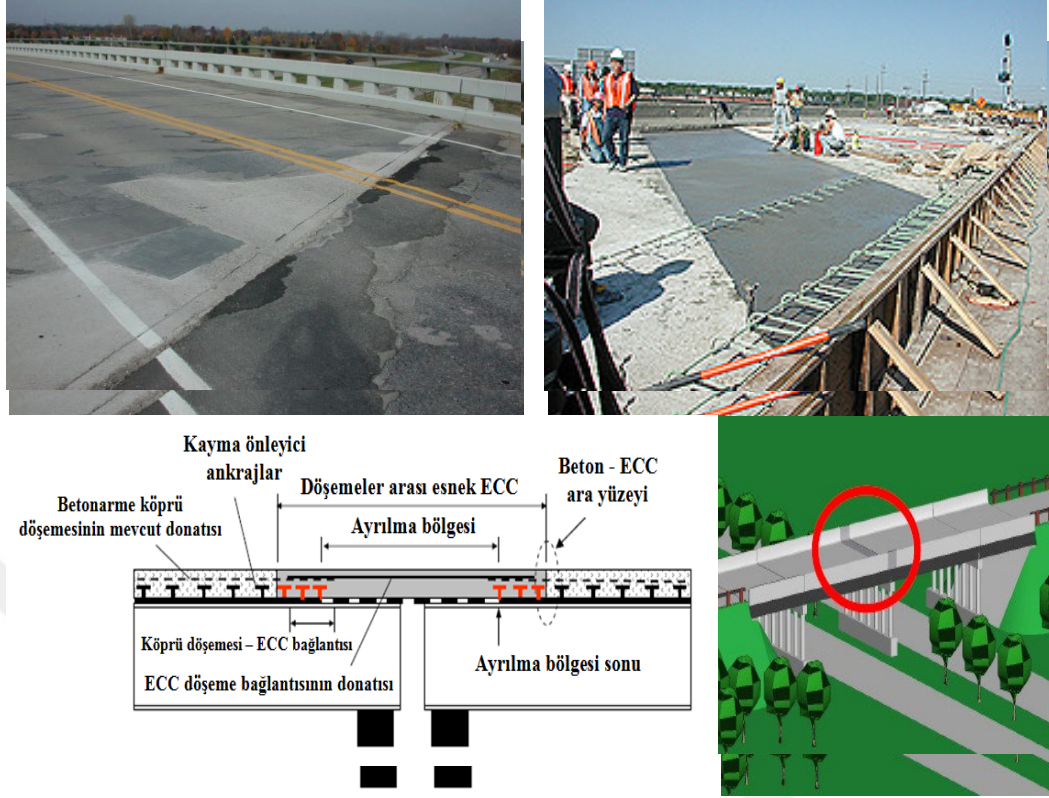
(a)



(b)

Şekil 2.13 Yokohama'daki Nabeaure Gökdeleni, prefabrik ECC bağ kirişlerinin sismik dayanım amacıyla yapının çekirdeğinde kullanımı (Kunieda ve Rokugo 2006)

Şekil 2.14'te ECC, Birleşik Devletlerde, 2002 yılında beton bir köprü tabliyesinde tadilat uygulamasında kullanılmıştır. Köprülerde geniş açıklıklar ve rüzgar etkisi sebebiyle oluşan sallanma hareketleri betonda çatlaklar meydana getirmemesi için derzler oluşturularak yapılmaktadır. Bu derzlerin belli seviyelerde olması bir sınırlama yaratmaktadır. ECC ise mikro çatlaklar sayesinde salınım hareketi sonrası oluşan yüksek enerji yutma kapasitesini karşılamaktadır. Li ve Lepech (2004), Michigan Ulaştırma Dairesi iş birliği ile köprü tabliyesinde tadilat çalışmalarına başlamıştır. Yapılan tadilat çalışmasında köprünün bir kısmı normal beton ile diğer kısmı ise ECC malzemesi ile yapılmıştır (Şekil 2.14). Michigan kışının sert etkisi yapıyı donma-çözülme etkisine maruz bırakmıştır. Normal beton ile ECC betonun köprüdeki hareketli yükleri karşılaması araştırılırken bu etki nedeniyle malzemelerin donma-çözülme dayanımı da araştırılmıştır. Bu iki sert etki altında ECC kullanılarak yapılan onarımda mikro çatlak genişliği $50 \mu\text{m}$ 'un altında kalırken, beton kullanılarak yapılan onarım kısmında ise 3.5 mm 'den büyük bölgesel çatlaklar oluşmuştur. Oldukça büyük bir fark yaratan bu araştırma sonrası 2005 yılında normal beton ile tadilat yapılan bölgede ECC kullanılarak yeniden tadilat yapılmıştır (Li ve Lepech, 2004).



Şekil 2.14 Michigan’da bulunan köprü tabliyesinde ECC yama tadilatı uygulaması (Li ve Lepech, 2004)

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, mühendislik özellikleri geliştirilmiş kompozitlerde Alkali silika reaksiyonu (ASR) etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda alkali silika reaksiyonu (ASR) etkisi direncini incelemek amacıyla iki farklı reaktif agrega (Bazalt ve Ahmetli Kumu) kullanılarak sabit $S/B=0,5$ ve hacimce %2 oranında “Polivinil Alkol Lif (PVA)” kullanılarak ECC örnekleri hazırlanmıştır. Her iki reaktif agreganın serileri, 1.set ve 2. set olarak farklı yaş (28 gün ve 90 gün) ve farklı kür (hava kürü ve NaOH kürü) koşullarına maruz bırakılmıştır. Her agrega için 1. set toplam 96, 2. set ise toplam 48 numune ile hazırlanmıştır. Ayrıca, ASR etkisine karşı direnci arttırmak için çoklu çatlak davranışını geliştirmek amacıyla hacimce %3 oranında 3-4 mm çapında “Polipropilen Boncuk” ilave edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardaki karışımlar şematik olarak Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Tablo 3.3’te ve Tablo 3.4’te ise 1.set ve 2.set numunelerinin deney süreç planı verilmiştir. Tablo 3.3’te 1.set olarak tanımladığımız, Bazalt ve Ahmetli agregaları ile hazırlanan numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra ilk olarak 28 gün hava kürüne daha sonra ilave olarak 28 gün ve 90 gün süresinde hem hava hem de NaOH kürüne maruz bırakılmıştır. Tablo 3.4’te 2. set olarak tanımladığımız, Bazalt ve Ahmetli agregaları ile hazırlanan numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra direkt olarak ilk 28 gün NaOH küründe daha sonra ilave olarak 28 gün ve 90 gün süresinde NaOH kürüne maruz bırakılmıştır.

- Agregası çeşidi Bazalt (B) Ahmetli (A),
- Bağlayıcı çeşidi KONTROL (C), yüksek fırın cürufu (YFC), taş tozu-kalsine kaolin (LPCK),
- Boncuklu numuneler (B), boncuksuz numuneler (NB),
- Birinci set (1), ikinci set (2),
- Hava kürü (H), NaOH kürü (N),
- 28. Yaş kürü (28), 90. Yaş kürü (90) olarak tanımlanmıştır.

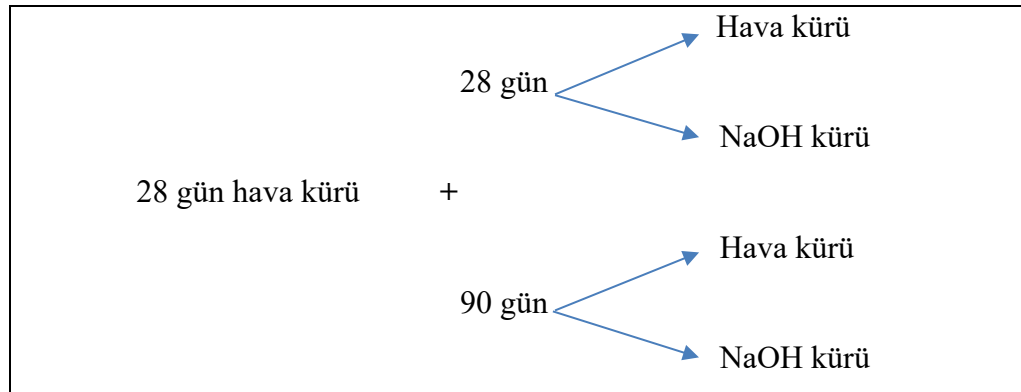
Tablo 3.1 Bazalt ve Ahmetli 1. set kompozitlerin deney planı

REAKTİF AGREGA (1. SET)			
HAVA KÜRÜ (H)		NaOH KÜRÜ (N)	
BONCUKLU (B)	BONCUKSUZ (NB)	BONCUKLU (B)	BONCUKSUZ (NB)
KONTROL	KONTROL	KONTROL	KONTROL
YFC	YFC	YFC	YFC
LPCK	LPCK	LPCK	LPCK

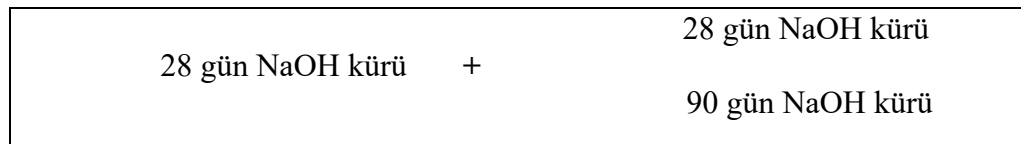
Tablo 3.2 Bazalt ve Ahmetli 2. set kompozitlerin deney planı

REAKTİF AGREGA (2. SET)	
NaOH KÜRÜ (N)	
BONCUKLU (B)	BONCUKSUZ (NB)
KONTROL	KONTROL
YFC	YFC
LPCK	LPCK

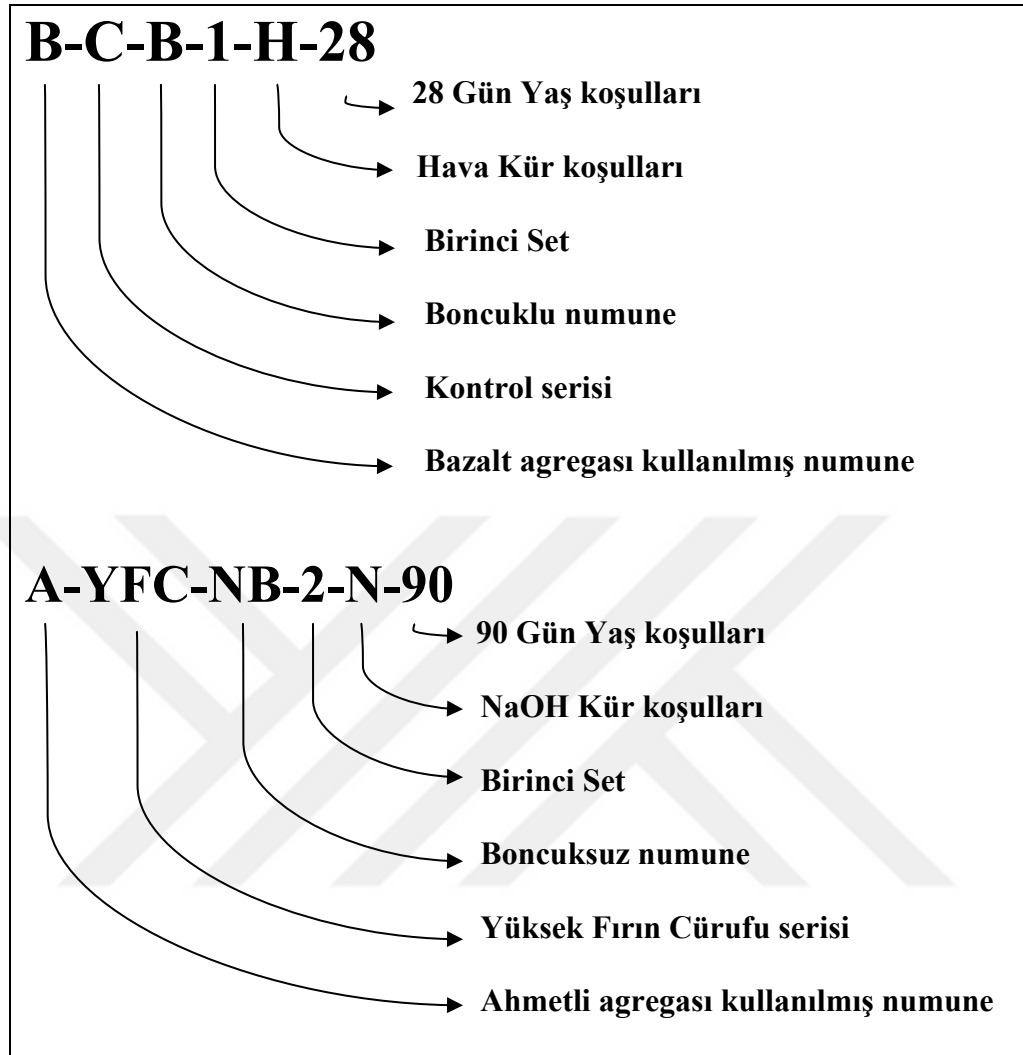
Tablo 3.3 Bazalt ve Ahmetli 1. set kompozitlerinin deney süreci planı



Tablo 3.4 Bazalt ve Ahmetli 2. set kompozitlerinin deney süreci planı



Tablo 3.5 Bazalt ve Ahmetli serilerine ait numune kodlaması



3.2 Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Çimento

Deneysel çalışmada, Batıçim A.Ş'den temin edilmiş olan CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır (şekil 3.1).



Şekil 3.1 CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu (Kişisel arşiv, 2022)

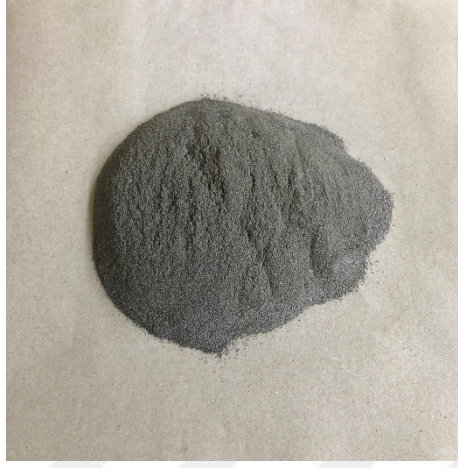
Üretici tarafından beyan edilen kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 CEM I 42,5 R tipi Portland çimento kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Çimento Özellikleri CEM I 42,5 R	
CaO (%)	62,98
SiO ₂ (%)	20,21
Al ₂ O ₃ (%)	5,53
Fe ₂ O ₃ (%)	2,2
MgO (%)	1,48
SO ₃ (%)	3,24
Na ₂ O (%)	0,22
K ₂ O (%)	0,83
Kızdırma kaybı	3,17
Serbest CaO	0,79
Çözünmeyen kalıntı	0,66
Toplam alkali (%)	0,77
LSF	93,63
C3S	53,25
C2S	14,34
C3A	9,02
C4AF	7,34
Toz yoğunluk	3,11
Blaine	3388
Eleme 32 mikronüstü (%)	23,93
Eleme 45 mikronustu (%)	14,67
Eleme 90 mikronustu (%)	1,93
Hacim genişmesi (mm)	0
Priz başlangıç çimento	145
Priz bitiş çimento	187
1. gun çimento dayanım (MPa)	13,82
2. gun çimento dayanım (MPa)	24,3
7 gun çimento dayanım (MPa)	42,1
28 gun çimento dayanım (MPa)	47,9

3.2.2 Bazalt Agregası

Bazalt agregası Dere Beton firması tarafından temin edilmiştir (Şekil 3.2). Agreganın fiziksel özellikleri Tablo 3.7’te verilmiştir.



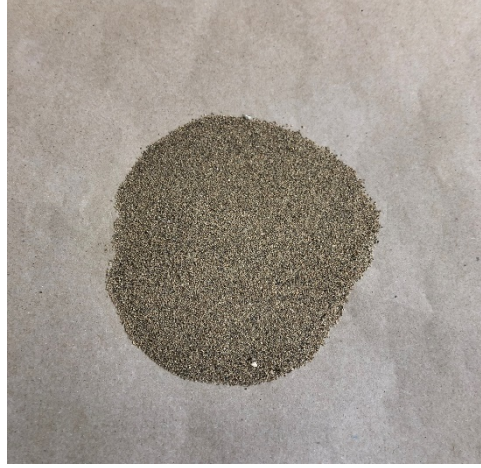
Şekil 3.2 Bazalt agregası (Kişisel arşiv, 2022)

Tablo 3.7 Bazalt agregası fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık (kuru)	2.66
Özgül ağırlık (kuru-yüzey doygun)	2.67
Su emme (%)	1.5
Gevşek birim hacim ağırlık (kg/m ³)	1.68
Sıkışık birim hacim ağırlık (kg/m ³)	1.82
İncelik modülü	1.63

3.2.3 Ahmetli Agregası

Ahmetli agregası Manisa ili Ahmetli ilçesi bölgesinde Dere yataklarından alınmıştır (Şekil 3.3). Yapılan deneyler sonucu agreganın fiziksel özellikleri Tablo 3.8 verilmiştir.



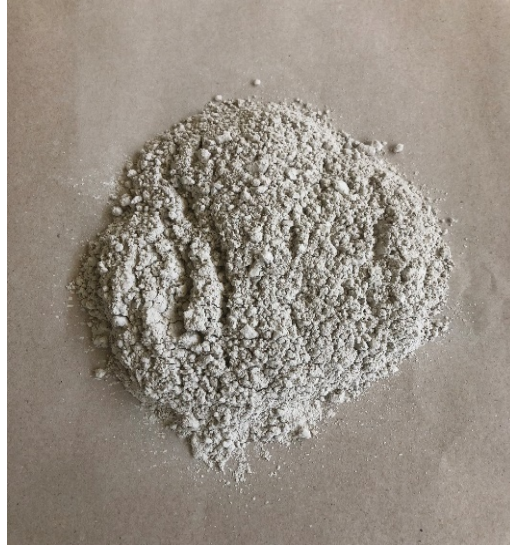
Şekil 3.3 Ahmetli agregası (Kişisel arşiv, 2022)

Tablo 3.8 Ahmetli agregası fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık (kuru)	2.56
Özgül ağırlık (kuru-yüzey doygun)	2.61
Su emme (%)	1.42
Gevşek birim hacim ağırlık (kg/m ³)	1.46
Sıkışık birim hacim ağırlık (kg/m ³)	1.55
İncelik modülü	1.79

3.2.4 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Çalışma kapsamında kompozitlerin hazırlanmasında Bursa Beton firmasından temin edilen öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır (Şekil 3.4). YFC'nin üretici tarafından beyan edilen fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.9'da verilmiştir.



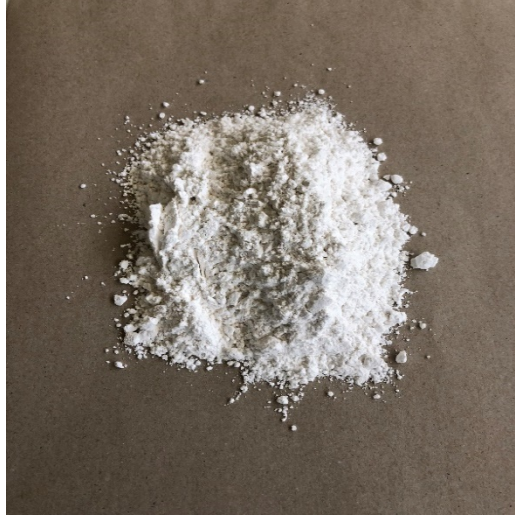
Şekil 3.4 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (Kişisel arşiv, 2022)

Tablo 3.9 Yüksek fırın cürufu fiziksel ve kimyasal özellikleri

SiO₂ (%)	38,35
Al₂O₃ (%)	12,91
Fe₂O₃ (%)	1,13
CaO (%)	38,31
MgO (%)	5,53
SO₃ (%)	0,20
S²⁻(%)	0,52
Cl⁻(%)	0.014
CaO+MgO/ SiO₂ (%)	1,14
Kızdırma Kaybı (%)	0,03
Özgül Ağırlık (g/cm³)	2,89
Özgül Yüzey (cm²/g)	5222
45µm elek üstü (%)	0,6

3.2.5 Taş Tozu

Deneysel çalışmalarda kullanılan taş tozu Kimtaş Kireç sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından temin edilmiştir (Şekil 3.5). Taş tozu %90 oranında saflıkta kalsitten oluşmaktadır. Aynı zamanda kütlece en büyük %4 oranında MgCO₃ içermektedir. Taş tozunun fiziksel özellikleri Tablo 3.10’da verilmiştir.



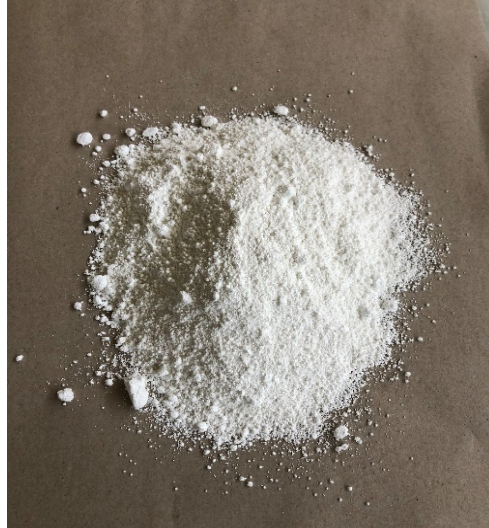
Şekil 3.5 Taş Tozu (Kişisel arşiv, 2022)

Tablo 3.10 Taş tozu fiziksel özellikleri

Tür	Renk	Özgöl Ağırlık	0,5 mm üstü geçme %'si	pH
Kireç taşı tozu	Açık kahverengi	2,69	22	11-12

3.2.6 Kalsine Kaolin

Kalsine kaolinli kompozitlerin üretiminde, OPTISIL PS-20 ticari isimli kalsine kaolin kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kullanılan kalsine kaolinin fiziksel özellikleri Tablo 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.6 Kalsine Kaolin (Kişisel arşiv, 2022)

Tablo 3.11 Kalsine kaolin fiziksel özellikleri

Beyazlık (%)	> 93,5	SiO₂	52 ± 0,5
Granülometri (-2µm) (%)	88 ± 2	Al₂O₃	45 ± 0,5
Görsel Görüntüleme 325 mesh	< 0,003	Fe₂O₃	< 0,35
Reaktivlik indeksi	1,62	TiO₂	< 0,5
Yağ emme (%)	65 ± 5	CaO	< 0,3
PH değeri	6,0 – 7,0	MgO	< 0,2
Tane dağılımı (µm)	< 55	K₂O	< 0,05
Nem içeriği (%)	< 0,5	Na₂O	< 0,15
Özgül ağırlık	2,5		

3.2.7 Polivinil Alkol (PVA) Lifler

Polivinil alkol liflerinde dikkat çeken en önemli özellik yüzeylerinin ağırlıkça %1,2 içeriğinde özel bir su itici (hidrofobik) yağ ile kaplanmış olmasıdır. Bu özellik ile lif arasında bulunan ara yüzden optimum özellikler elde edilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında deneylerde kullanılan PVA lifler şekil 3.7’de gösterilmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Polivinil alkol lifler (Kişisel arşiv, 2022)

Tablo 3.12 PVA liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Lif Uzunluğu (mm)	Lif Çapı (µm)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1,3	12	39	42,8	1620	6

3.2.8 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

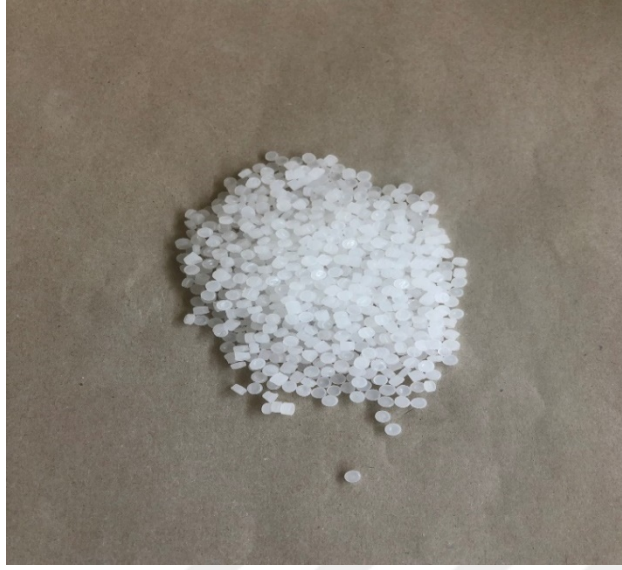
Çalışmada kullanılan ADVA FLOW 375 N ismi ile tanımlanan polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı Grace firması tarafından temin edilmiştir. TS EN 934-2' e göre yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı sınıfına dahildir. Firmanın beyan ettiği katkı özellikleri Tablo 3.13'te verilmiştir.

Tablo 3.13 Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri

İçeriği	Modifiye sentetik karboksilat polimeri	
Yapı	Homojen, sıvı	İlgili Standart
Yoğunluk(20 °C)	1,065 g/cm ³	(TS781 ISO758, 1998)
Ph(20 °C)	4,0	(TS6365 EN 1262, 2005)
Toplam Klorür Miktarı (%)	<0,10M	(TS 1116 EN ISO 1158, 1999)
Alkali miktar (%)	<7,0M	(TS EN480-12, 2008)
Önerilen dozaj	Toplam çimento miktarının %0,5-2,0	

3.2.9 Polipropilen Boncuk

Deneyssel çalışmamızda numunelerimizde boşluk modifikasyonu yaratmak amacıyla POLYSER plastik ve kimyevi hammaddeler firmasının ürettiği düşük yoğunluklu polipropilen taneler kullanılmıştır (Şekil 3.8). Tane boyutları 3-4 mm çapındadır. Hidrofob yapısı nedeniyle kompozit ile aderansları oldukça zayıftır.



Şekil 3.8 Polipropilen Boncuk (Kişisel arşiv, 2022)

3.3 Kompozitlerin Karışım Oranları ve Üretimi

Bu çalışmada Bazalt ve Ahmetli agregası ile tasarlanan karışımlara polivinil alkol lif (PVA) takviyesi yapılarak numuneler hazırlanmıştır. Kontrol, YFC ve LPCK olmak üzere üç farklı karışım tasarlanmıştır. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kimyasal katkı ve hacimce %3 oranında polipropilen boncuk ilavesi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan numunelerin karışım oranları Tablo 3.14 ve Tablo 3.15'te verilmiştir.

Tablo 3.14 Bazalt içeren kompozitlerin 1 m³ karışım oranları

NUMUNE KODLAMALARI MALZEMELER (Kg/m ³)	ÇİMENTO (kg)	AGREGA (kg)	YÜKSEK FIRIN CÜRUFU (kg)	TAŞ TOZU (kg)	KALSİNE KAOLİN (kg)	KATKI (kg)	SU (kg)	TOPLAM
B-C-B	776	776	0	0	0	1.6	388	2013
B-C-NB	800	800	0	0	0	1.6	400	2029
B-YFC-B	578	771	193	0	0	1.6	385	2000
B-YFC-NB	596	795	199	0	0	1.6	398	2016
B-LPCK-B	376	752	0	188	188	1.6	376	1954
B-LPCK-NB	388	776	0	194	194	1.6	388	1968

*Tüm karışımlarda hacimce %2 oranında lif kullanılmıştır.

*Boşluk modifikasyonunu arttırmak amacıyla hacimce %3 oranında PP boncuk ilavesi kullanılmıştır.

Tablo 3.15 Ahmetli kumu içeren kompozitlerin 1 m³ karışım oranları

NUMUNE KODLAMALARI MALZEMELER (Kg/m ³)	ÇİMENTO (kg)	AGREGA (kg)	YÜKSEK FIRIN CÜRUFU (kg)	TAŞ TOZU (kg)	KALSİNE KAOLİN (kg)	KATKI (kg)	SU (kg)	TOPLAM
A-C-B	784	784	0	0	0	1.6	392	2033
A-C-NB	809	8.9	0	0	0	1.6	404	2050
A-YFC-B	584	779	195	0	0	1.6	389	2020
A-YFC-NB	602	803	201	0	0	1.6	402	2036
A-LPCK-B	380	760	0	190	190	1.6	380	1973
A-LPCK-NB	392	784	0	196	196	1.6	392	1988

*Tüm karışımlarda hacimce %2 oranında lif kullanılmıştır.

*Boşluk modifikasyonunu arttırmak amacıyla hacimce %3 oranında PP boncuk ilavesi kullanılmıştır.

3.4 Deney Yöntemi

Tez çalışması kapsamında ASR etkisi olması için reaktif agregalar kullanılmıştır. Elekten geçirilen Bazalt ve Ahmetli agregaları 0.5 mm boyutlarında kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Agregaların reaktivite potansiyelini ölçmek amacıyla hazırlanan örnekler lifli (PVA), lifsiz ve boncuklu (B) ve boncuksuz (NB) olmak üzere hızlandırılmış harç çubuğu metoduna tabi tutulmuştur. Örnekler NaOH çözeltisi içerisinde bırakılarak 1-5-7-10-14 ve 28 gün boyunca genleşme ölçümleri yapılmıştır. 14. gün sonundaki boy değişimlerine göre sonuçlar; %0,1'den küçükse 'Agrega zararsız bölgededir', %0,1-%0,2 arasında ise deney süresi uzatılarak örneklerin 28 günlük boy değişimleri ölçülür. %0,2'den büyükse 'Agrega potansiyel olarak zararlıdır' tanımlaması yapılmıştır.

Çalışma kapsamında reaktif agregalar ile çimento (C), yüksek fırın cürufu (YFC) ve taş tozu-kalsine kaolin (LPCK) olmak üzere 3 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda 30 lt kapasiteli, 3 farklı karıştırma devrine (56, 104, 185 dev/dk) sahip Hobart tipi mikser kullanılmıştır (Şekil 3.9a).



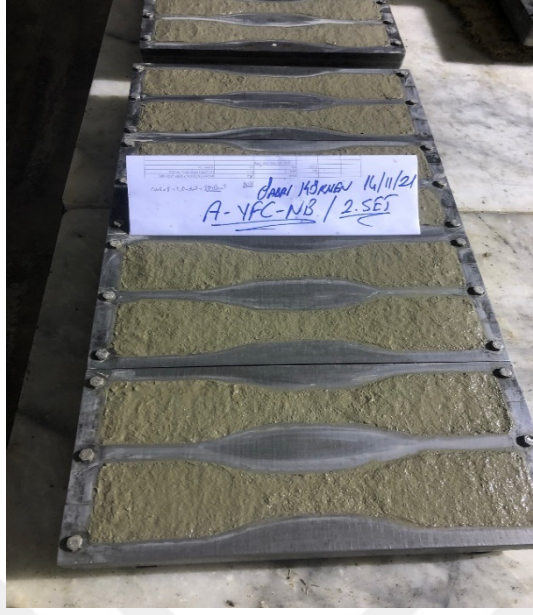
(a)



(b)

Şekil 3.9 a) Hobart mikser b) Hobart mikserde karışım hazırlanması ve lif takviyesi (Kişisel arşiv, 2022)

Karışım hazırlanırken ilk olarak toz malzemelerin 2 dk boyunca birinci devirde çalıştırılmasından sonra su ve katkı ilavesi yapılmıştır. Yapılan ilaveler aynı devirde 1 dk daha çalıştırıldıktan sonra 2 dk boyunca ikinci devirde karıştırılmıştır. Homojen ve akıcı bir matris elde edildikten sonra Şekil 3.9 b’de görüldüğü gibi lif ilavesi yapılarak 2 dk ikinci devirde ve 3 dk üçüncü devirde karıştırılmıştır. El ile kontrol yapılarak topaklanma olup olmadığına bakılmıştır. Topaklanma varsa ek bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Topaklanma olmayan karışımlara düzensiz boşluk yaratmak amacıyla boncuk ilavesi yapıldıktan sonra üçüncü devirde 1 dk daha karıştırılmıştır. Her karışımdan 8’er adet 25x60x330mm boyutlarındaki numune prizmatik kalıplara alınmıştır (şekil 3.10a). Kalıplara sıkıştırma işlemi olarak kısa süreli vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Her agrega tipi için 1. Set 12 döküm ve 96 adet prizmatik numune, 2. Set için 6 döküm 48 prizmatik numune hazırlanmıştır. Numunelerin üzeri plastik film ile kapatılarak 2 gün boyunca kalıp içerisinde bekletilmiştir. Kalıplardan sökülen numuneler 1. Set ve 2. Set için 28 ve 90 gün boyunca farklı kür koşullarında bırakılmıştır.



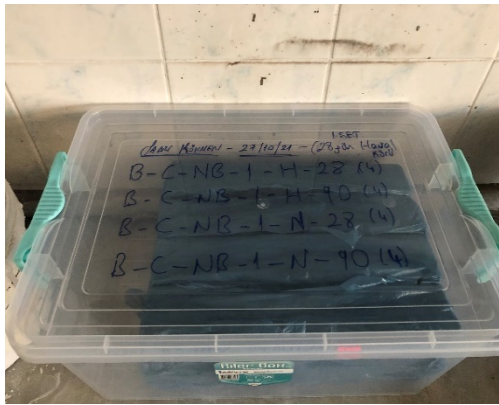
(a)



(b)

Şekil 3.10 a) Numunelerin hazırlanması b) Numunelerin 24 saat kür sonrası (Kişisel arşiv, 2022)

Karışımlardan 1. Set numunelerin tamamı ilk olarak 28 gün hava küründe bırakılmıştır. İlk 28 günün sonuna ilave olarak 28 ve 90 gün boyunca numuneler hava kürü ve NaOH çözeltisi olarak ayrı kür koşullarına maruz bırakılmıştır (şekil 3.11a) (şekil 3.11b). 2. Set numuneler ise ilk 28 gün direkt olarak NaOH çözeltisi içerisinde bırakıldıktan sonra ilave 28. ve 90. günlerini de NaOH çözeltisi içerisinde geçirmişlerdir. Kürleri tamamlanan numuneler 1 gün kurutulmuş ve ardından çekme deneyi uygulanmıştır.



(a)



(b)

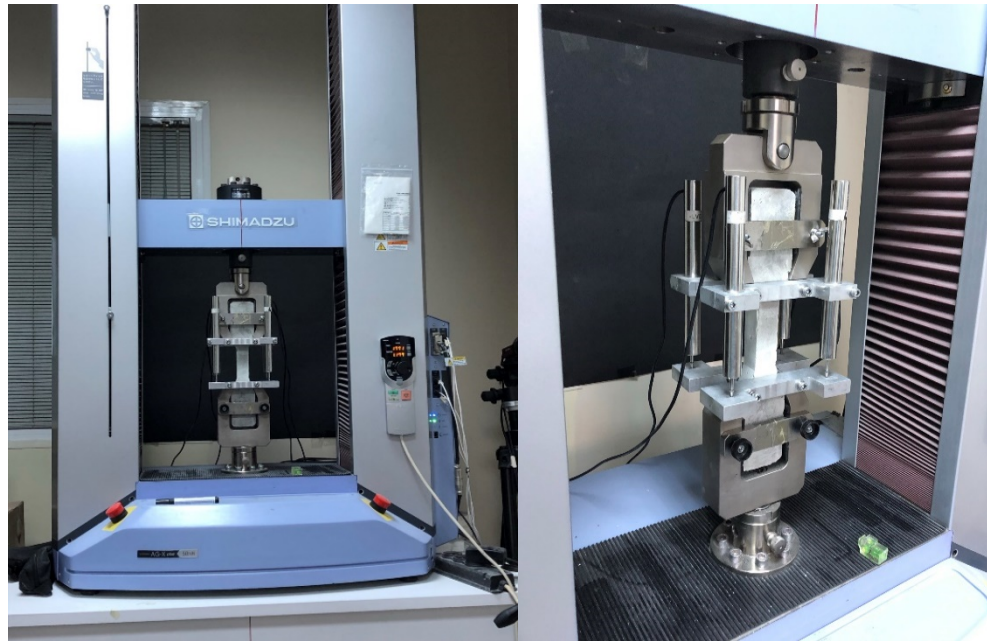
Şekil 3.11 a) Hava küründe bırakılan numuneler b) NaOH küründe bırakılan numuneler (Kişisel arşiv, 2022)

3.4.1 Tek Eksenli Çekme Deneyi

Kemik şeklinde olan numunelerimizin tek eksenli çekme deneyi, SHIMADZU marka 50kN kapasiteli çekme cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.12). Trapezium yazılım programı ile hazırlanan metotlar sayesinde numunelere deney sırasında uygulanacak parametreler düzenlenmiştir. Hazırladığımız metotta yükleme hızı 0,5 mm/dk olarak belirlenmiştir.

Tek eksenli çekme deneylerinde dikkat edilmesi gereken en önemli durum numunelerin yuvasına düzgün bir şekilde yerleştirilmesidir. Çene mesafesi 95-98 mm arasındadır. Oynar başlık sebebiyle yerleştirme sırasında oluşabilecek eksantriste nedeniyle yükleme sırasında hatalı gerilmeler meydana gelebilir. Bu gibi durumlara engel olmak amacıyla numuneler yuvasına hem düzgün hem de vidalar yardımı ile yeterli ölçüde sıkılarak boşlukları alınmış şekilde yerleştirilmelidir.

Çekme deneyi sayesinde belirlenmesi amaçlanan birim şekil değiştirmeler, cihaz üzerinde tasarlanmış olan ve numunenin ön ve arka tarafına ikişer adet denk gelecek şekilde bulunan toplam dört adet “Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü” (Linear Variable Differential Transformer – LVDT) aracılığı ile tespit edilmiştir. LVDT’den alınan değerlerin ortalaması kullanılarak birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.12 Tek eksenli çekme deneyi numune ve LVDT’lerin düzenekteki yerleşimi (Kişisel arşiv, 2022)

3.4.2 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneyisel çalışmalar kapsamında hazırlanan numunelerimizin öncelikle hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile ASTM C 1260' a göre genleşme değerleri ölçülmüştür. Çekme deneyi uygulanarak ise mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Çekme deneyi için hazırlanan numuneler cihaza yerleştirilirken ön ve arka taraflarına yerleştirilen LVDT'lerden kaynaklanan burulma ve basınç gibi farklı gerilmeler çıkmaması amacıyla kontrolleri yapılmıştır. Deney sonucunda LVDT'lerden alınan sonuçların ortalama değerleri kullanılarak Gerilme – Birim Şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler sayesinde inceleme yaptığımız çekme dayanımları (ÇD), birim şekil değiştirme (BŞD) yüzdeleri, ilk çatlak dayanımları (İÇD) ve çekme tepe noktası (Tokluk) kapasitesi değerleri belirlenmiştir.

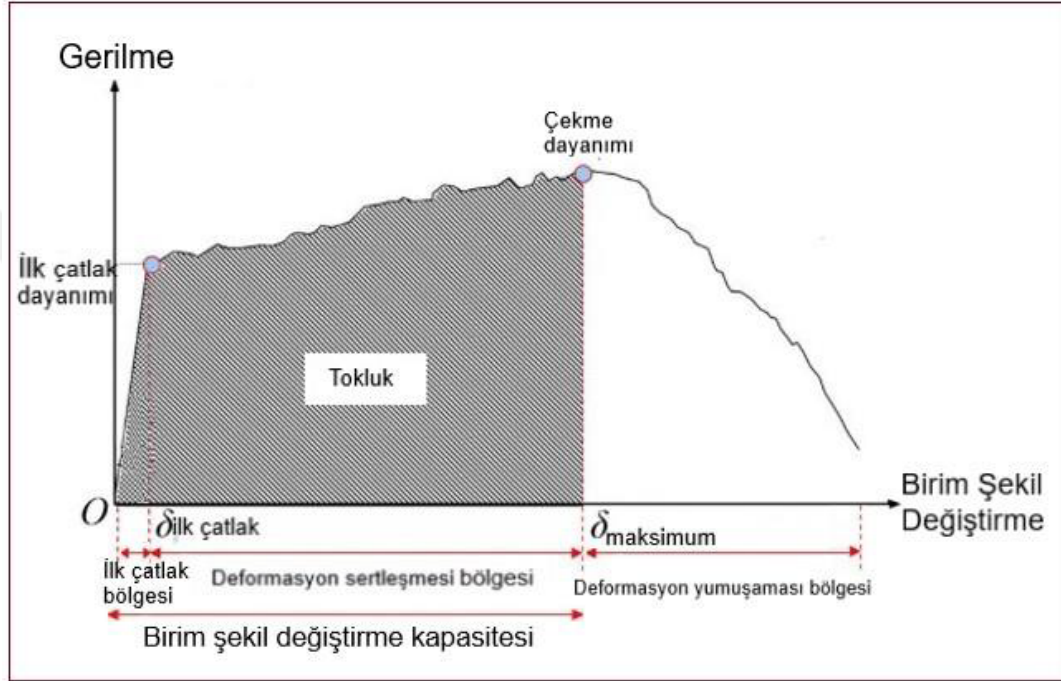
Çekme dayanımları, grafiklerden alınan gerilme değerlerinin numunelerin çene mesafesi arasında kalan bölgenin enkesit alanına bölünmesi ile bulunmuştur. Gerilme değerleri alınırken maksimum gerilme, 0,95 ve 0,90 gerilmeleri belirlenmiştir. Bu gerilmelere karşılık gelen yatay eksendeki değerler birim şekil değiştirme değerleri olarak belirlenmiştir. Çalışmamızda maksimum gerilme değerine denk gelen değerler kullanılmıştır.

Numunelere uygulanan yükleme sırasında gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde lineer elastik bölgede meydana gelen ilk sapma değeri ilk çatlak dayanımını göstermektedir. İlk çatlak dayanımı kompozitin matris özellikleri ile ilişkilidir (Tosun-Felekoglu ve Felekoglu, 2013).

Bazı grafiklerde kompozitlerin matrislerindeki farklılık nedeniyle lineer elastik bölgede ani bir kırılma yaşanmadan sürekli bir eğilim azalması meydana gelmektedir. Bu şekilde oluşan grafiklerde ilk çatlak dayanımının belirlenmesi için lineer elastik bölgede oluşan eğilime iki adet teğet çizilerek, bu teğetlerin kesiştiği noktanın gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi üzerindeki izdüşümü ilk çatlak yükü olarak belirlenmiştir (Tosun-Felekoglu ve Felekoglu, 2013).

Deformasyon yumuşaması gözlenen gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde malzemenin göçme anına kadar olan alanının hesaplaması ile tokluk değeri belirlenir (Şekil 3.13). Bu değer, malzemenin yük altında sönümlendiği enerji olarak tanımlanır.

ECC gibi deformasyon sertleşmesi gösteren kompozitlerde, tokluk hesabında ilk çatlak bölgesi ile deformasyon sertleşmesi bölgesinde grafik eğrisi altında kalan alanlar hesaplanmakta ve yumuşama davranışı görülen bölgenin alanı dikkate alınmamaktadır. Kompozitin taşıdığı yük, en büyük yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar kademeli olarak artmaktadır. Kademeli şekilde olmasından dolayı alan hesaplamasında birçok alan meydana gelmektedir (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019).



Şekil 3.13 ECC'nin ilk çatlak dayanımı, çekme dayanımı, birim şekil değiştirme kapasitesi ve tokluk kapasitesinin belirlenmesi (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019)

BÖLÜM DÖRT

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde iki farklı reaktif agrega kullanılarak hazırlanan üç farklı karışım serisi, boşluk modifikasyonu ilavesi ile farklı kür koşulları altında bırakılan kompozitlerin ASTM C 1260 genleşmesi, çekme dayanımı (ÇD), birim şekil değiştirme (BŞD), ilk çatlak dayanımı (İÇD) ve çekme tepe noktası (Tokluk) değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

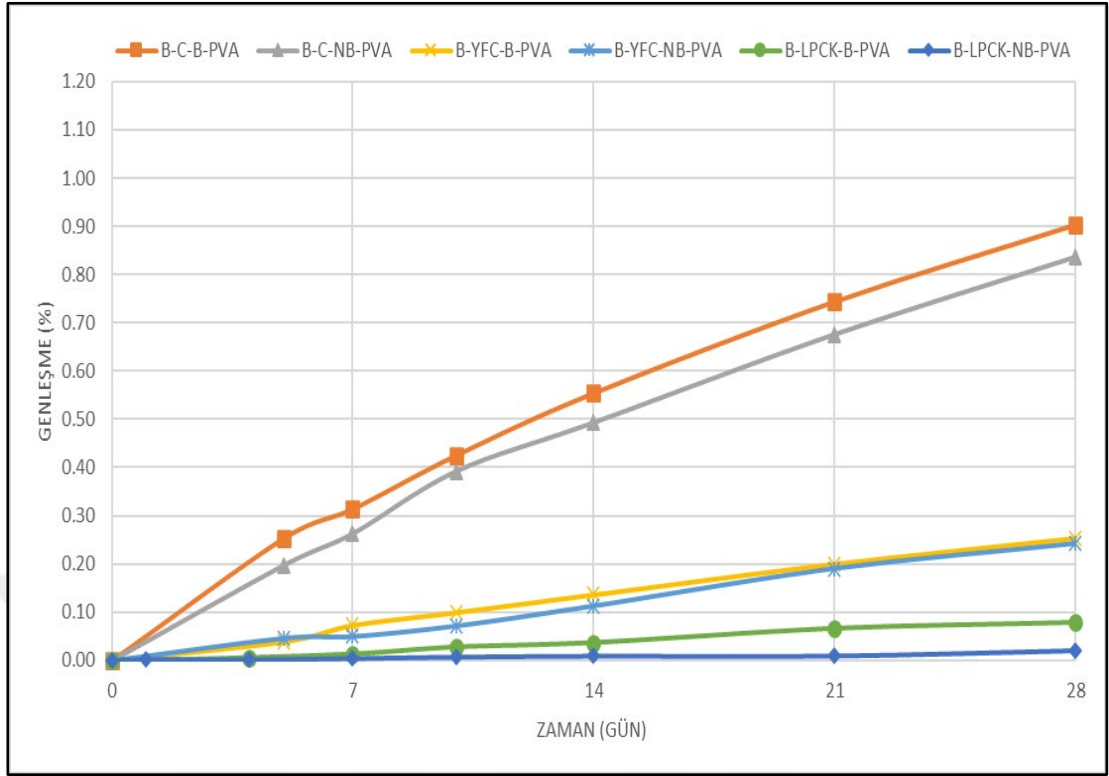
Karışımlar üç farklı reçete olarak, kontrol serisi (C), yüksek fırın cürufu serisi (YFC) ve taş tozu-kalsine kaolin serisi (LPCK) hazırlanmıştır.

4.1 Kompozitlerin ASTM C 1260'a Göre Genleşme Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

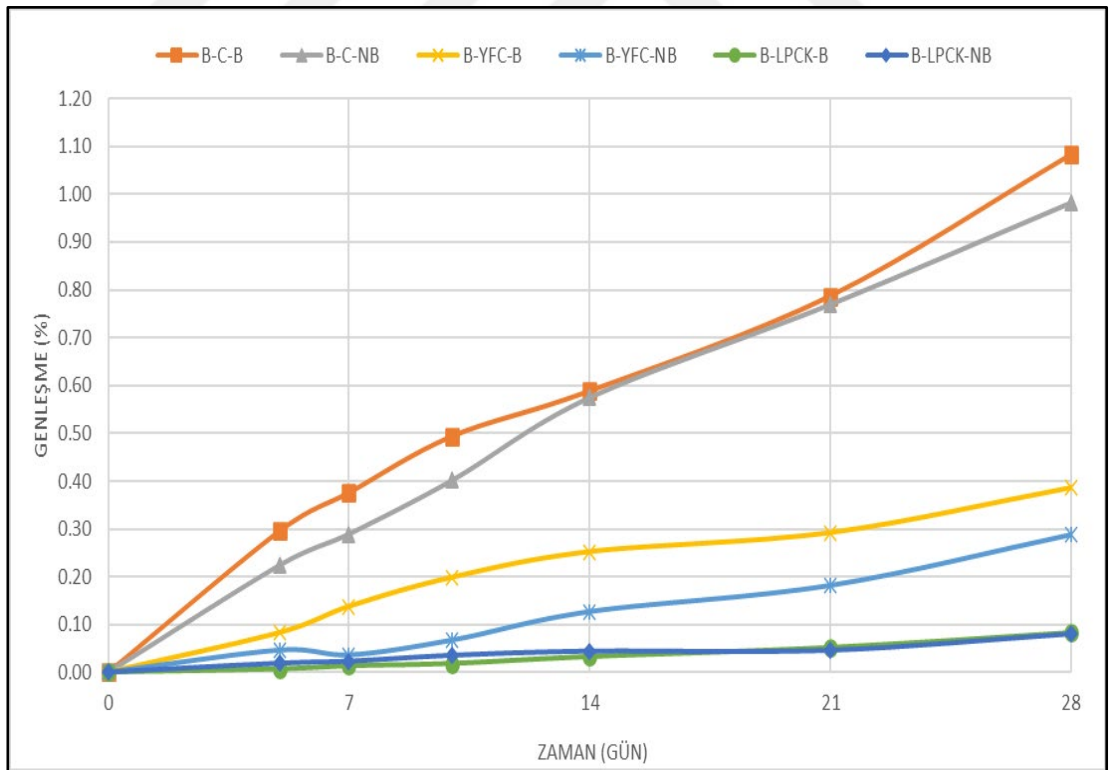
Deney çalışmasının ilk aşamasında Bazalt ve Ahmetli agregaları ile hazırlanan üç farklı karışım serisi kompozitlerinin reaktiflik derecesini ölçmek amacıyla lifli-lifsiz olarak ASTM C 1260'a göre karşılaştırmaları yapılmıştır.

4.1.1 Bazalt Kompozitlerin Lifli-Lifsiz Değerlendirilmesi

ASTM C 1260' a göre boşluk modifikasyonu olan/olmayan Bazalt kompozitlerin lifli ve lifsiz olarak karşılaştırılması Şekil 4.1'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1 Bazalt kompozitlerin ASTM C 1260'a göre genleşme sonuçları a) lifli b) lifsiz

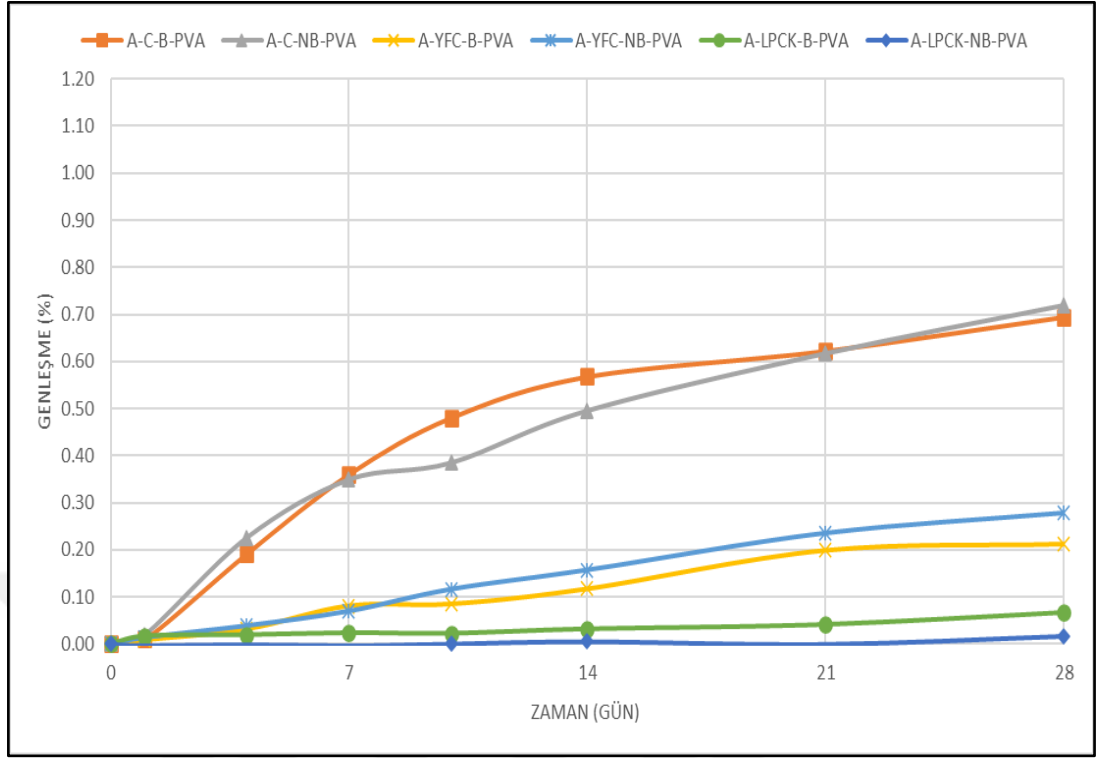
Şekil 4.1’de bulunan grafiklerde Bazalt agregası ile hazırlanan üç farklı karışım serilerinin (C-YFC-LPCK) boşluk modifikasyonu olan/olmayan Şekilde lifli ve lifsiz olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.1.a lifli, Şekil 4.1.b lifsiz numunelerinin verilerini göstermektedir. Grafiklere göre, kontrol serisi lifsiz numuneler, tüm seriler içerisinde en fazla genleşmeyi gösteren seri olmuştur (%1.082). Bunun nedeninin, serinin lifsiz ve puzolanik malzeme (YFC veya LPCK) içermemesi olduğu düşünülmektedir.

Lif etkisinin değerlendirilmesi açısından lifli kompozitlerde lifsiz kompozitlere göre daha az genleşme gözlemlenmiştir. Lifsiz kompozitlerin genleşme yüzdesinin lifli kompozitlerin genleşme yüzdesine göre yaklaşık %15 daha fazla olduğu bulunmuştur. Alkali-silika etkisine karşı liflerin genleşmeyi azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir.

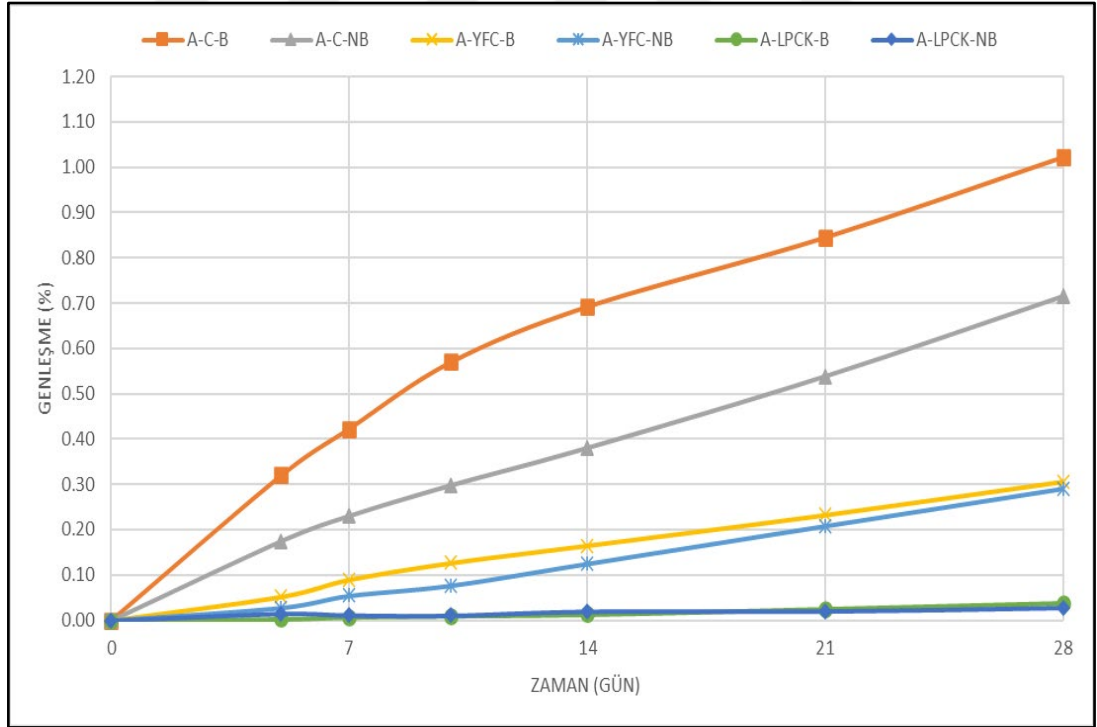
Boşluk modifikasyonu, lifli ve lifsiz kompozitlerde ayrı ayrı değerlendirildiğinde, boşluk modifikasyonu olan numunelerin daha fazla genleştiği görülmüştür. Bunun asıl nedeni hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde çözeltinin 80 °C’de bulunması zorunluluğudur.

4.1.2 Ahmetli Kompozitlerin Lifli-Lifsiz Değerlendirilmesi

ASTM C 1260’ a göre boşluk modifikasyonu olan/olmayan Ahmetli kompozitlerin lifli ve lifsiz olarak karşılaştırılması Şekil 4.2’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.2 Ahmetli kompozitlerin ASTM C 1260'a göre genleşme sonuçları a) lifli b) lifsiz

Şekil 4.2’de bulunan grafiklerde Ahmetli agregası ile hazırlanan üç farklı serinin (C-YFC-LPCK) boşluk modifikasyonu olan/olmayan şekilde lifli ve lifsiz olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.2.a lifli, Şekil 4.2.b lifsiz numunelerin verilerini göstermektedir. Grafiklere göre, kontrol serisi lifsiz numuneler, tüm seriler içerisinde en fazla genleşmeyi gösteren seri olmuştur (%1.022). Bunun nedeninin, serinin lifsiz ve puzolanik malzeme (YFC veya LPCK) içermemesi olduğu düşünülmektedir.

Lif etkisinin değerlendirilmesi açısından lifli kompozitlerde lifsiz kompozitlere göre daha az genleşme gözlemlenmiştir. Ahmetli agregasında da lifli kompozitler lifsiz kompozitlere göre daha az genleşme göstermiştir. Alkali-silika etkisine karşı liflerin genleşmeyi azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.

Boşluk modifikasyonu açısından incelediğimizde lifli numunelerde C serilerinde herhangi bir etki gözlenmemiştir. Fakat YFC serilerinde boncuksuz numuneler boncuklu numunelere göre daha fazla genleşme gösterirken LPCK serisi numunelerinde ise boncuklu numuneler boncuksuz numunelere göre daha fazla genleşme göstermiştir. Lifsiz numunelerde ise C serilerinde boncuklu numunelerde boncuksuz numunelere göre yaklaşık %25 fazla genleşme gözlenmiştir. YFC serisi ve LPCK serisi numunelerinde ise boncuklu ve boncuksuz numuneler arasında genleşme açısından etkileyici bir fark görülmemiştir.

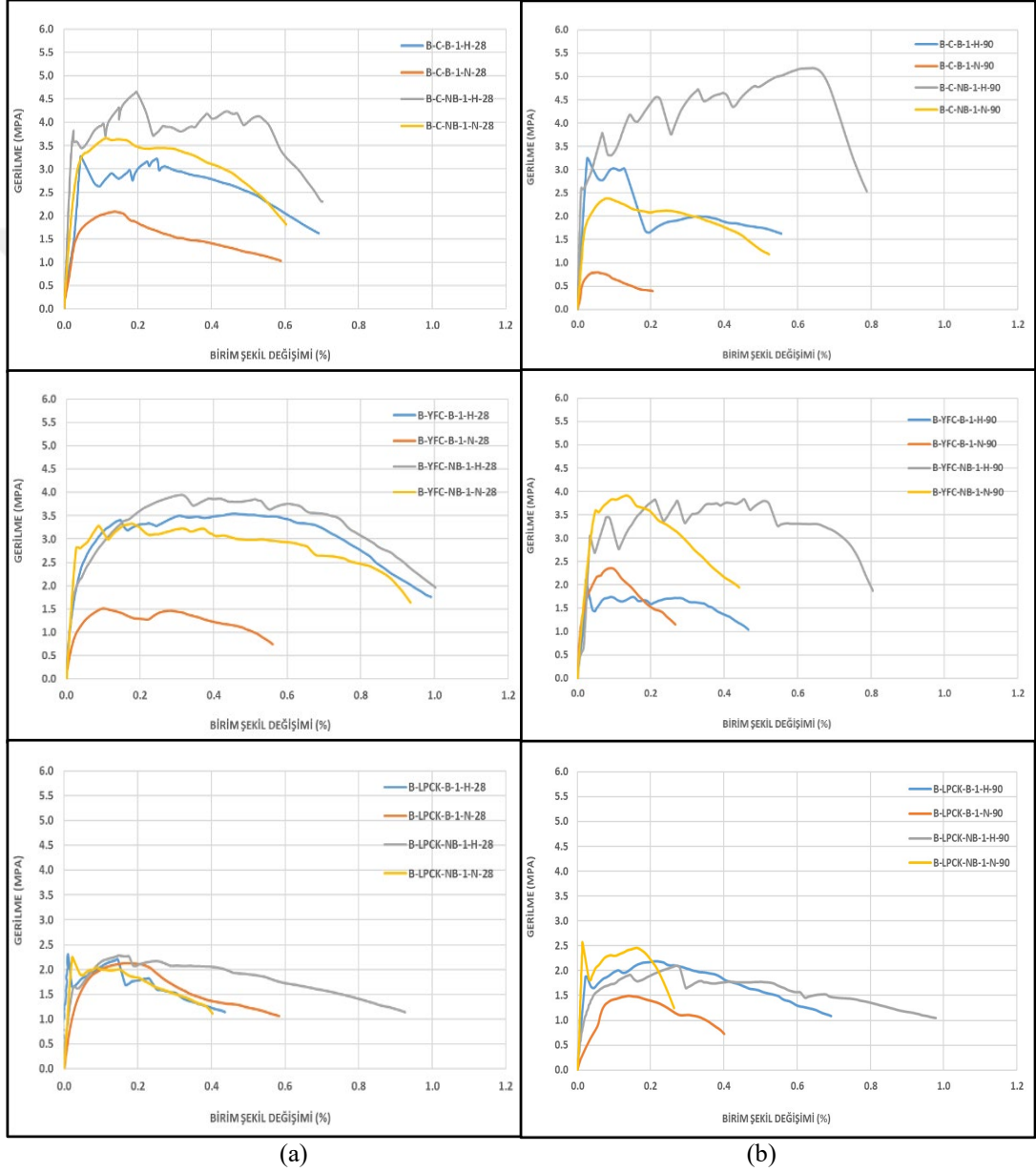
4.2 Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Karışımlar üç farklı reçete olarak, kontrol (C) serisi, yüksek fırın cürufu serisi (YFC) ve taş tozu-kalsine kaolin serisi (LPCK) hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan tüm karışımlara çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucu alınan veriler doğrultusunda numunelerin ECC tasarımının mekanik özellikleri ilkesinde %2 birim şekil değiştirme özelliğini sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, numuneler ECC olarak değil lifli kompozitler olarak değerlendirmeye alınmıştır.

4.2.1 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Deney çalışmasının bu aşamasında Bazalt agregaları ile üç farklı karışım olarak hazırlanan Bazalt 1. set kompozitlerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan, farklı kür

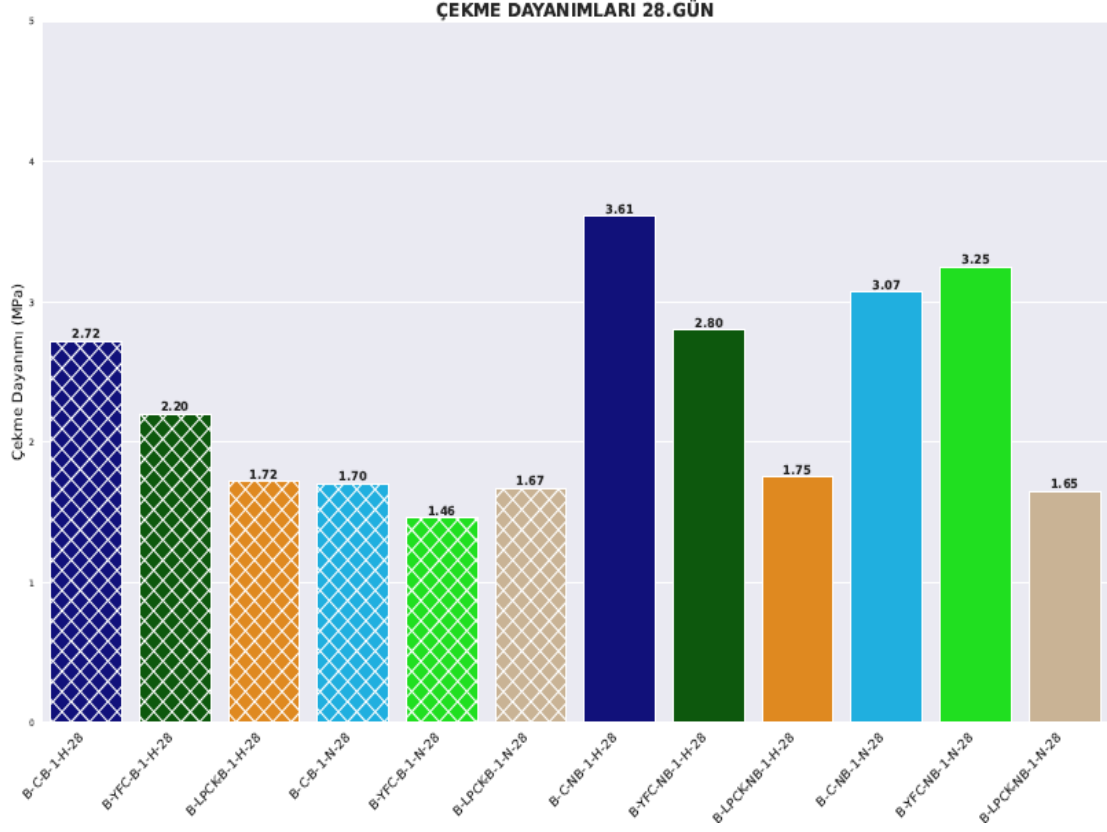
koşulları altında bulunan numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda alınan veriler doğrultusunda Şekil 4.3'te 28 günlük ve 90 günlük **gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri** oluşturulmuştur. Bu grafiklerin değerlendirilmesi sonucu kompozitlerin **çekme dayanımları, birim şekil değiştirme yüzdeleri, ilk çatlak dayanımları ve çekme tepe noktası (tokluk) değerleri** belirlenmiştir.



Şekil 4.3 Bazalt 1. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri a) 28 gün b) 90 gün

4.2.1.1 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında çekme dayanımları (ÇD) açısından karşılaştırılmıştır.

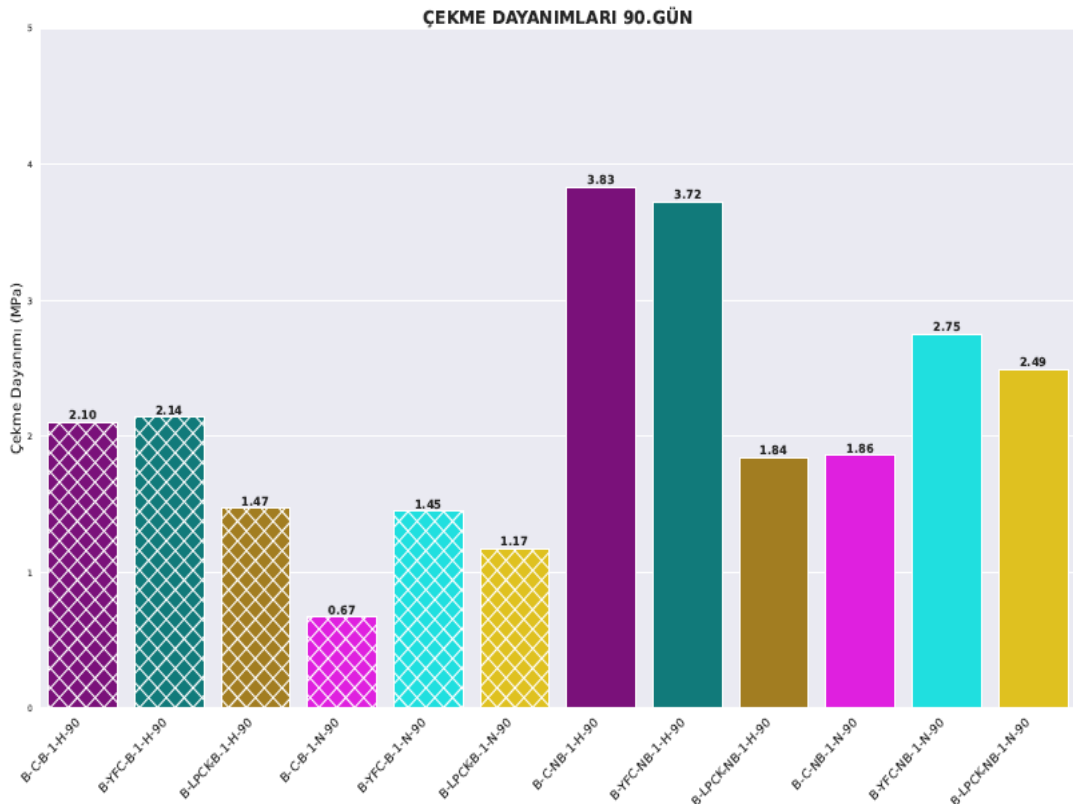


Şekil 4.4 Bazalt 1. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları

Şekil 4.4'te Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün çekme dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek ÇD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (B-C-NB-1-H-28) gözlenmiştir (3.61 MPa). Bu sonucun diğer serilere göre çimento oranındaki yüksek dozaj ve kusur etkisi olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük dayanım ise YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-YFC-B-1-N-28) gözlenmiştir (1.46 MPa). Boncuklu karışımlarda tüm numunelerde geçirimsizliğin artması nedeniyle hava kürüne göre ASR etkisi altındaki karışımlarda daha düşük sonuçlar ortaya çıkmıştır. Boncuksuz numunelerde ise puzolan katkısı ilavesi sayesinde ASR etkisine karşı direnç sağlandığı gözlemlenmiştir.

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin ÇD değerlerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından C serisi ve YFC serilerinde çekme dayanımlarında yaklaşık %20 bir değer kaybı yaratmıştır. LPCK serilerinde ise boşluk modifikasyonu her iki kür etkisi altında dahi çekme dayanımlarında belirgin bir değişiklik göstermemiştir.

Hava kürü ve NaOH kürü etkileri açısından değerlendirme yapıldığında, hava küründe kalan C serilerinin boncuklu numunelerinde NaOH küründe kalan C serilerinin boncuklu numunelerine göre ciddi oranlarda düşüş yaşanmıştır (%30). YFC serilerine bakıldığında ise boşluk modifikasyonunun, NaOH küründe kalan numunelerde hava küründe kalan numunelere göre ÇD değerinde azalma yarattığı görülmüştür. Boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde ise aksine NaOH küründe hava kürüne karşı yaklaşık %25'lik bir artış göstermiştir. Bu artışın puzolan aktivitesi ve kompozitte kusur etkisinin olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. LPCK serilerinde ise hem kür etkisi açısından hem de boşluk modifikasyonu açısından bu serilerde herhangi bir yarattığı gözlenmemiştir.



Şekil 4.5 Bazalt 1. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları

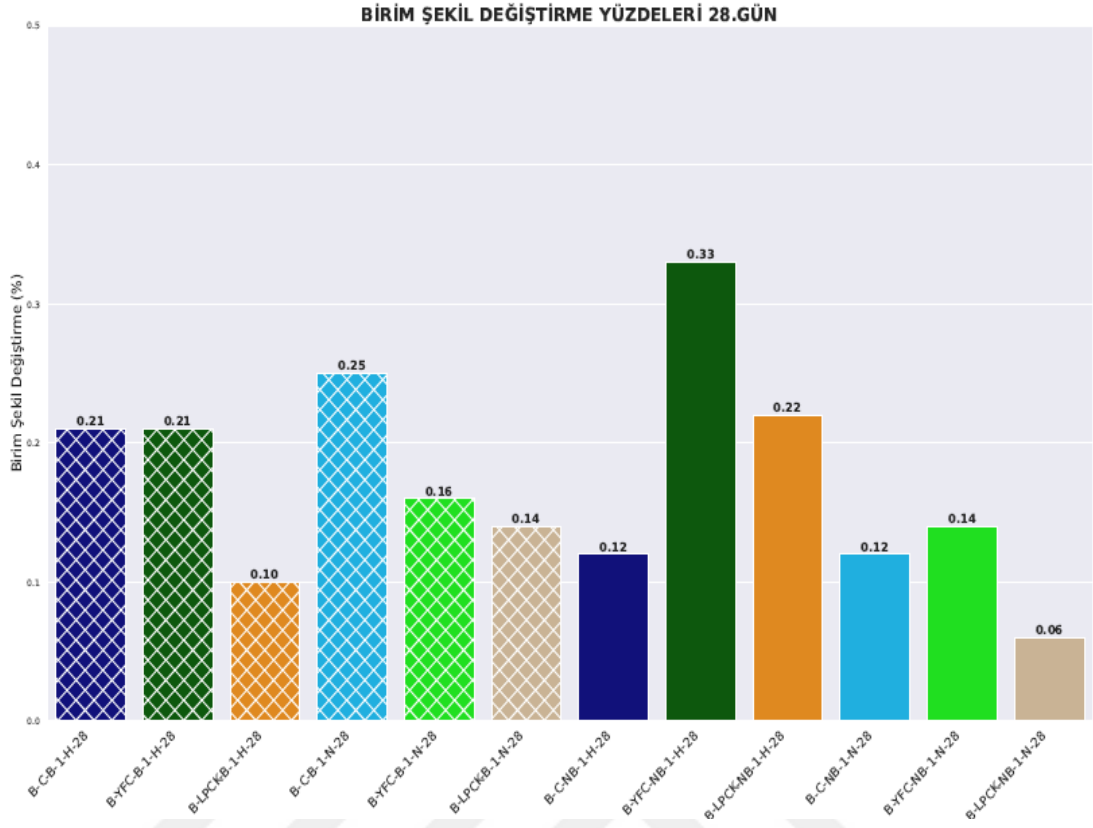
Şekil 4.5'te Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün çekme dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek ÇD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (B-C-NB-1-H-90) ve hava kürü etkisi altındaki YFC serisi boncuksuz numunelerde (B-YFC-NB-1-H-90) gözlenmiştir (3.83 ve 3.72 MPa). Bu sonucun diğer serilere göre çimento oranındaki yüksek dozaj, kusur etkisi olmaması ve YFC puzolan katkısının 90 günlük kür boyunca daha çok reaksiyona girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı serinin 28 günlük ölçümlerinde ÇD 3.61 MPa olarak ölçülmüştür. Burada yaş etkisinin de farkı görülmektedir. En düşük dayanım ise YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-YFC-B-1-N-90) gözlenmiştir (0.67 MPa). NaOH kürü ve kusur etkisinin bu sonucun ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yine aynı serinin 28 günlük ölçümlerinde ÇD 1.46 MPa olarak ölçülmüştür.

ASR etkisi nedeniyle, boncuklu numunelerde yaş etkisinden dolayı 90 günlük değerler 28 günlük değerlerden daha düşük olarak ölçülmüştür. Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin ÇD değerinde yaklaşık %50 seviyelerinde azalmaya neden olduğu gözlenmiştir.

Hava kürü ve NaOH kürü etkileri açısından değerlendirme yapıldığında, boşluk modifikasyonu olan/olmayan serilerde hava küründe kalan seriler NaOH küründe kalan serilere göre ÇD değeri daha yüksek sonuçlar vermiştir. Sadece boşluk modifikasyonu olmayan NaOH küründe kalan LPCK serilerinde, hava küründe kalan LPCK serilerine göre yaklaşık %30'luk bir artış gözlenmiştir.

4.2.1.2 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında birim şekil değiştirme (BŞD) yüzdeleri açısından karşılaştırılmıştır.

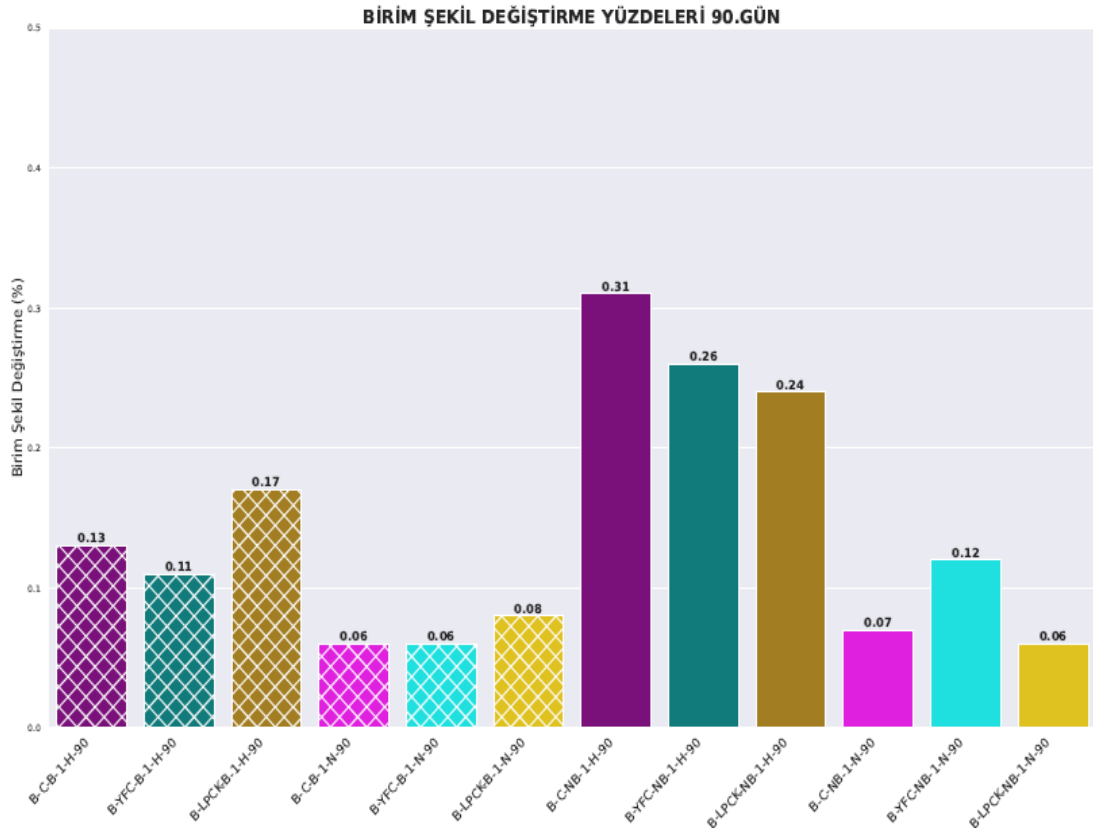


Şekil 4.6 Bazalt 1. Set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.6’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1.set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün birim şekil değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek birim şekil değiştirme değeri hava kürü etkisi altındaki YFC serisi boncuksuz numunelerde (B-YFC-NB-1-H-28) gözlenmiştir (%33). En düşük BŞD (%) ise LPCK serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-LPCK-NB-1-N-28) gözlenmiştir (%0.06). ASR etkisine karşı direncin sağlanamadığı bu seride gözlemlenmiştir. Boncuk, hava kürü etkisi altındaki YFC ve LPCK serisi numunelerin BŞD değerinde ortalama %75 bir artış yaratırken, NaOH kürü etkisi altındaki YFC ve LPCK serisi numunelere BŞD yüzdesinde ortalama %30 bir düşüş yaratmıştır.

Boşluk modifikasyonu olan serilerde hava kürü ve NaOH kürü etkileri açısından değerlendirme yapıldığında hava kürü C serilerinin NaOH kürü serilerine göre %20 oranında artış gösterdiği, YFC serilere bakıldığında ise %20 oranında bir düşüş, LPCK serilerinde ise %40’lık bir artış gözlemlenmiştir.

Boşluk modifikasyonu olmayan serilerde hava kürü ve NaOH kürü etkileri açısından değerlendirme yapıldığında hava kürü C serilerinde NaOH kürü C serilere göre hiçbir değişim gözlenmezken, YFC serilerinde %50, LPCK serilerinde ise %70'lık bir düşüş gözlemlenmiştir.



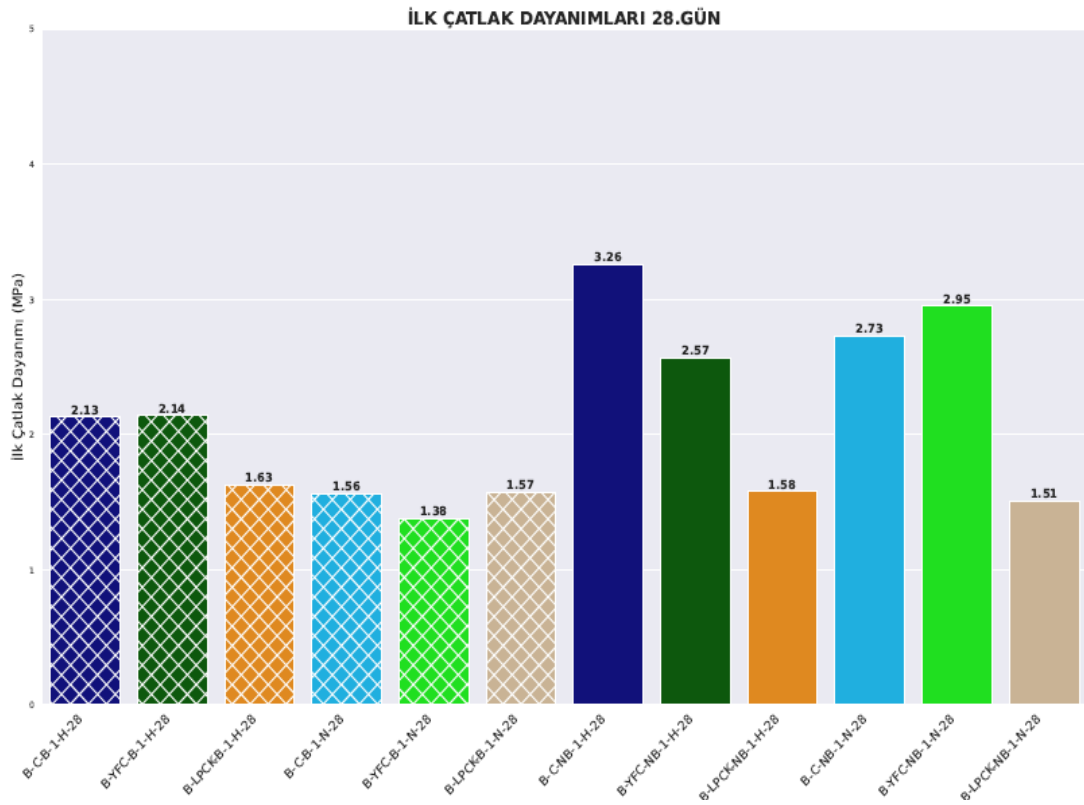
Şekil 4.7. Bazalt 1. Set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.7’de Bazalt agregası ile hazırlanan 1.set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün BŞD yüzdeleri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (B-C-NB-1-H-90) gözlenmiştir (%31). En düşük BŞD (%) ise LPCK serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (B-LPCK-NB-1-N-28), C serisinde ve YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-C-B-1-N-90) (B-YFC-B-1-N-90) gözlenmiştir (%0.06).

Boncuk olan/olmayan serilerde hava kürü ve NaOH kürü etkileri açısından değerlendirme yapıldığında tüm serilerde hava küründe kalan numuneler NaOH küründe kalan numunelere göre çok yüksek oranlarda daha yüksek bir BŞD yüzdesi göstermiştir. ASR etkisine direncin yaş açısından değerlendirmesi yapıldığında, 90 günlük kürün 28 günlük küre göre reaksiyondan kaynaklı genleşmeler nedeniyle oldukça olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı belirlenmiştir.

4.2.1.3 Bazalt 1. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında ilk çatlak dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.8 Bazalt 1. Set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları

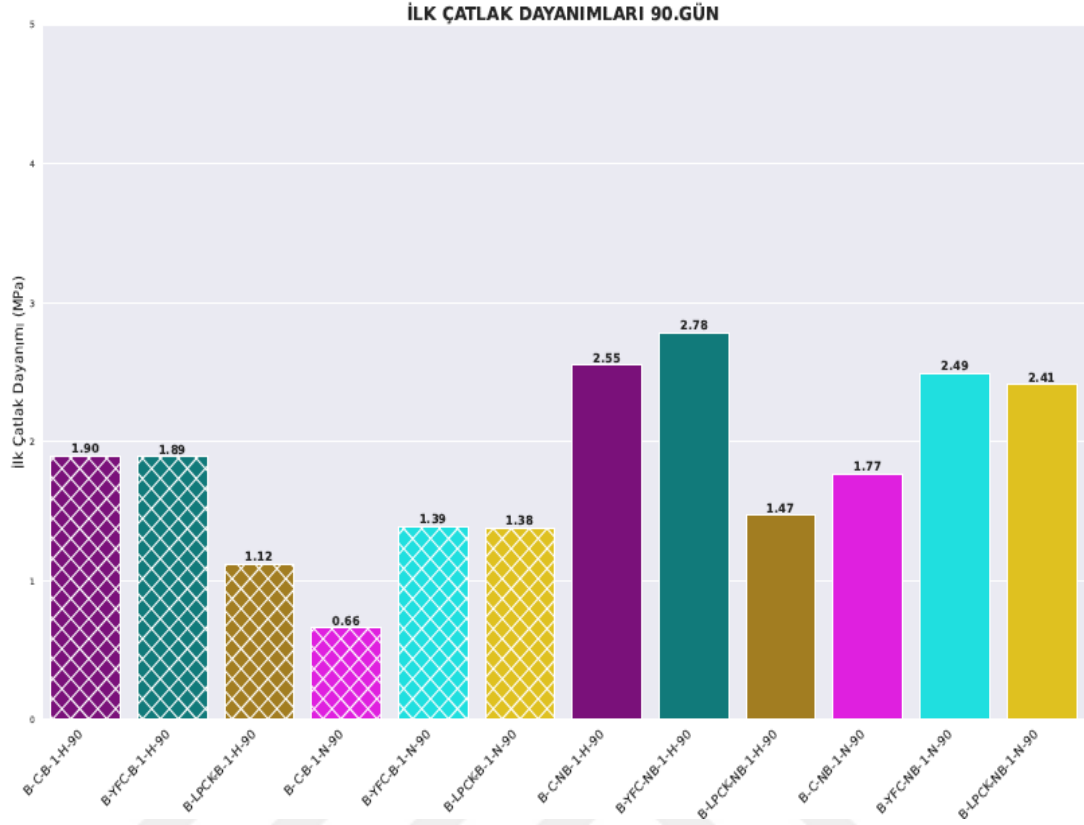
Şekil 4.8’de Bazalt agregası ile hazırlanan 1. Set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün ilk çatlak dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek İÇD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (B-C-NB-1-H-28) gözlenmiştir (3.26 MPa). Bu sonucun diğer serilere göre çimento oranındaki yüksek dozaj ve kusur etkisi olmamasından

kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük dayanım ise YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-YFC-B-1-N-28) gözlenmiştir (1.38 MPa). NaOH kürü ve kusur etkisinin bu sonucun ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Çimento oranı yüksek olan C serileri NaOH küründen etkilenirken, puzolan katkı ve çimento oranı daha düşük olan YFC ve LPCK serileri NaOH küründen daha az etkilenmiştir.

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin İÇD değerlerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından C ve YFC grubu serilerinde çekme dayanımlarında yaklaşık %25 bir değer kaybı yaratmıştır. LPCK serilerinde ise boşluk modifikasyonu her iki kür etkisi altında dahi çekme dayanımlarında belirgin bir değişiklik göstermemiştir.

Tüm seriler için boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde hava kürü ve NaOH kürü açısından inceleme yapıldığında C serilerinde hava küründe NaOH kürüne göre %15'lik bir artış yaşanırken, YFC ve LPCK serisi numunelerinde ise benzer bir etki yaşanmıştır.

Tüm serilerin ÇD değerleri ile İÇD değerlerini incelediğimizde grafik değerleri benzer özellikler gösterirken İÇD değerleri ÇD değerlerinin ortalama %85'ine denk geldiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.9 Bazalt 1. Set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.9’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1. Set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün ilk çatlak dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek İÇD değeri hava kürü etkisi altındaki YFC serisi boncuksuz numunelerde (B-YFC-NB-1-H-90) gözlenmiştir (2.78 MPa). Bu sonucun YFC ikamesinin 90 gün boyunca reaktivitesini devam ettirmesi ve kusur etkisi olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük dayanım ise C serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-C-B-1-N-90) gözlenmiştir (0.66 MPa). NaOH kürü, kusur etkisi ve çimento oranı bu sonucun ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Çimento oranı yüksek olan C serileri NaOH küründen etkilenirken, puzolan madde ilaveli ve çimento oranı daha düşük olan YFC serileri NaOH küründen daha az etkilenmiştir. Hatta LPCK serilerinde NaOH kürü değerlerinde artış gözlenmiştir.

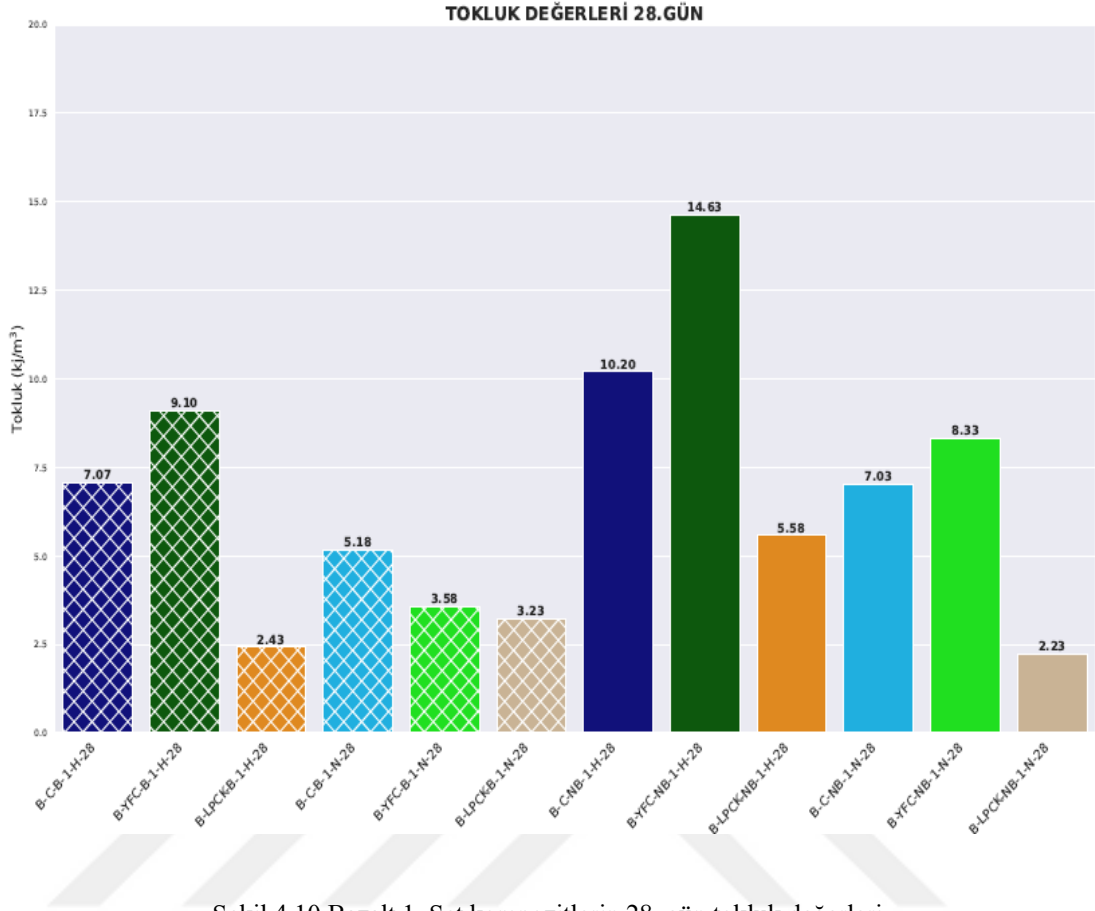
Tüm serilerde kusur etkisi açısından inceleme yapıldığında İÇD değerlerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından C ve YFC grubu serilerinde ilk çatlak dayanımlarında değer kaybı yaratmıştır. LPCK serilerinde ise boşluk modifikasyonu NaOH kürü hava kürüne göre %20'lik bir artış gözlenmiştir.

Tüm seriler için boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde hava kürü ve NaOH kürü açısından inceleme yapıldığında C serilerinde hava küründe NaOH kürüne göre %30, YFC serilerinde %10'luk bir düşüş yaşanırken LPCK serisi numunelerinde ise %40'lık bir artış gözlenmiştir. Serideki çimento oranının diğer serilere göre düşük olmasından dolayı bu artışın gerçekleştiği düşünülmektedir.

Tüm serilerin ÇD değerleri ile İÇD değerlerini incelediğimizde grafik değerleri benzer özellikler gösterirken İÇD değerleri boşluk modifikasyonu olan numunelerde ÇD değerlerinin ortalama %90, boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde ise ortalama %80'ine denk geldiği gözlemlenmektedir.

4.2.1.4 Bazalt 1. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında tokluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır.



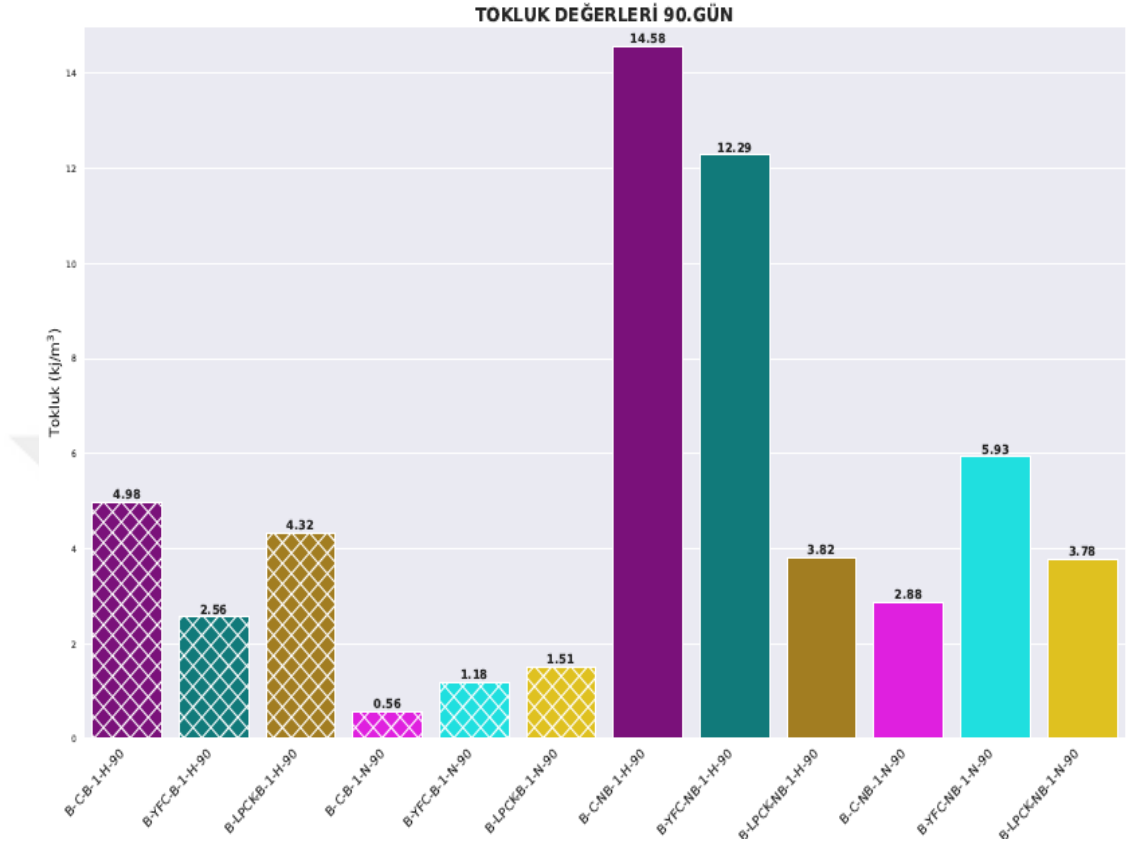
Şekil 4.10 Bazalt 1. Set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri

Şekil 4.10’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1.set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, BŞD yüzdesinin de en yüksek olduğu, hava kürü etkisi altındaki YFC serisi boncuksuz numunelerde (B-YFC-NB-1-H-28) gözlenmiştir (14.63 kJ/m³). En düşük tokluk değeri ise LPCK serisi NaOH kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (B-LPCK-NB-1-N-28) gözlenmiştir (2.23 kJ/m³).

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin tokluk değerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından tüm serilerde daha düşük sonuçlar vermiştir.

ASR etkisi tokluk kapasitesi değerlerinde ciddi oranda düşüşler yaratmıştır. Puzolan ilaveli olan karışımlardan YFC serilerinde tokluk değerleri hava küründe

yüksek sonuçlara ulaşırken NaOH kürü altındaki ASR etkisine maruz kalan YFC serilerinde önemli ölçüde azalmalar görülmüştür.



Şekil 4.11 Bazalt 1. Set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri

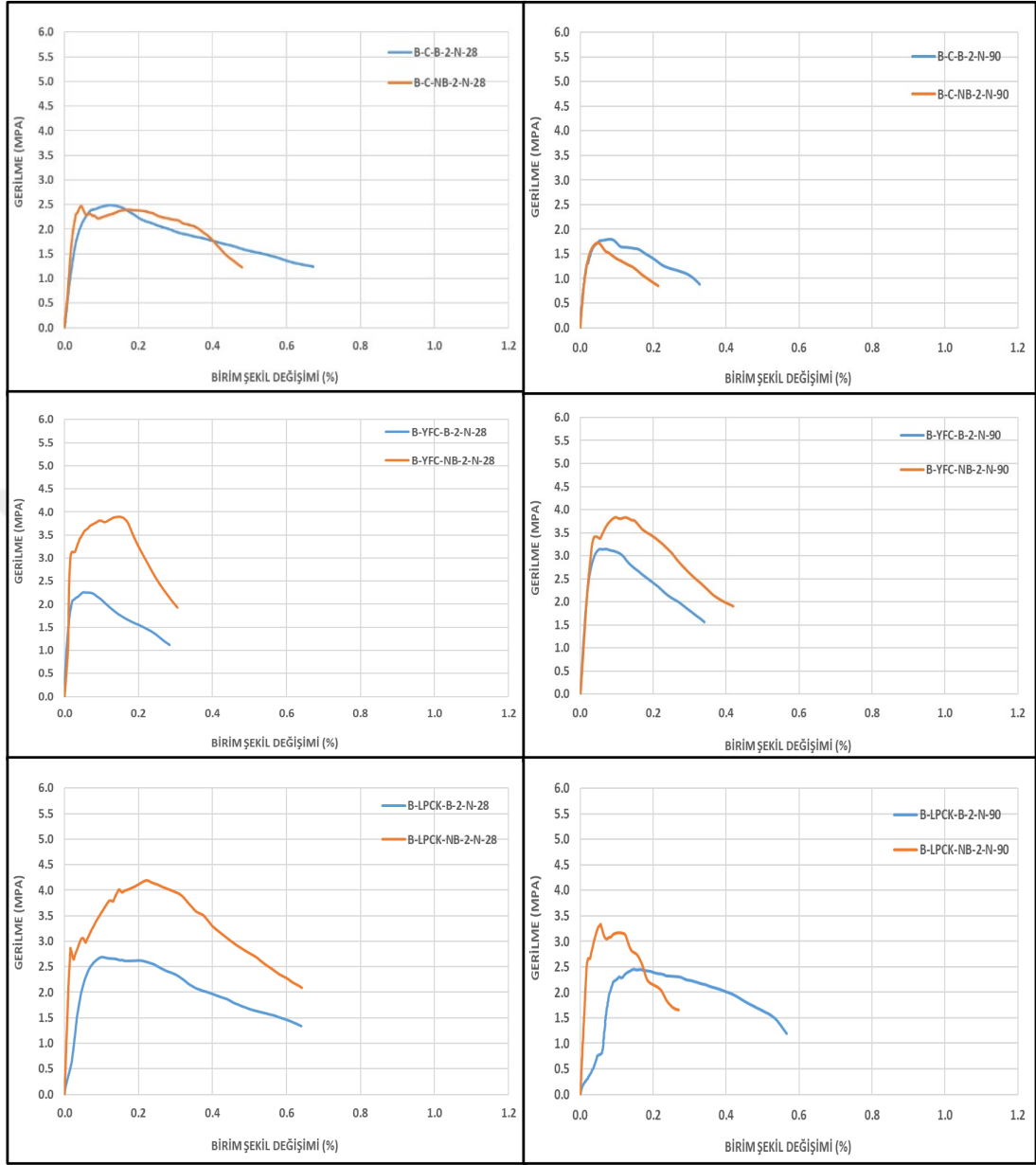
Şekil 4.11’de Bazalt agregası ile hazırlanan 1.set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında ve boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, BŞD değerinin de en yüksek olduğu, hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (B-C-NB-1-H-90) gözlenmiştir (14.58 kJ/m³). En düşük tokluk değeri ise C serisi NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-C-B-1-N-90) gözlenmiştir (0.56 kJ/m³).

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin tokluk değerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından tüm serilerde daha düşük sonuçlar vermiştir.

Tüm serilerde yaş açısından değerlendirme yapıldığında ASR etkisi nedeniyle boncuk olan/olmayan NaOH kürü altındaki 90 günlük serilerde 28 günlük serilere göre oldukça düşük tokluk değerleri ortaya çıkmıştır.

4.2.2 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Deney çalışmasının bu aşamasında Bazalt agregaları ile üç farklı karışım olarak hazırlanan Bazalt 2. set kompozitlerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan, farklı kür koşulları altında bulunan numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda alınan veriler doğrultusunda Şekil 4.12’de 28 günlük ve 90 günlük **gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri** oluşturulmuştur. Bu grafiklerin değerlendirilmesi sonucu kompozitlerin ÇD, BŞD yüzdeleri, İÇD ve tokluk değerleri belirlenmiştir.



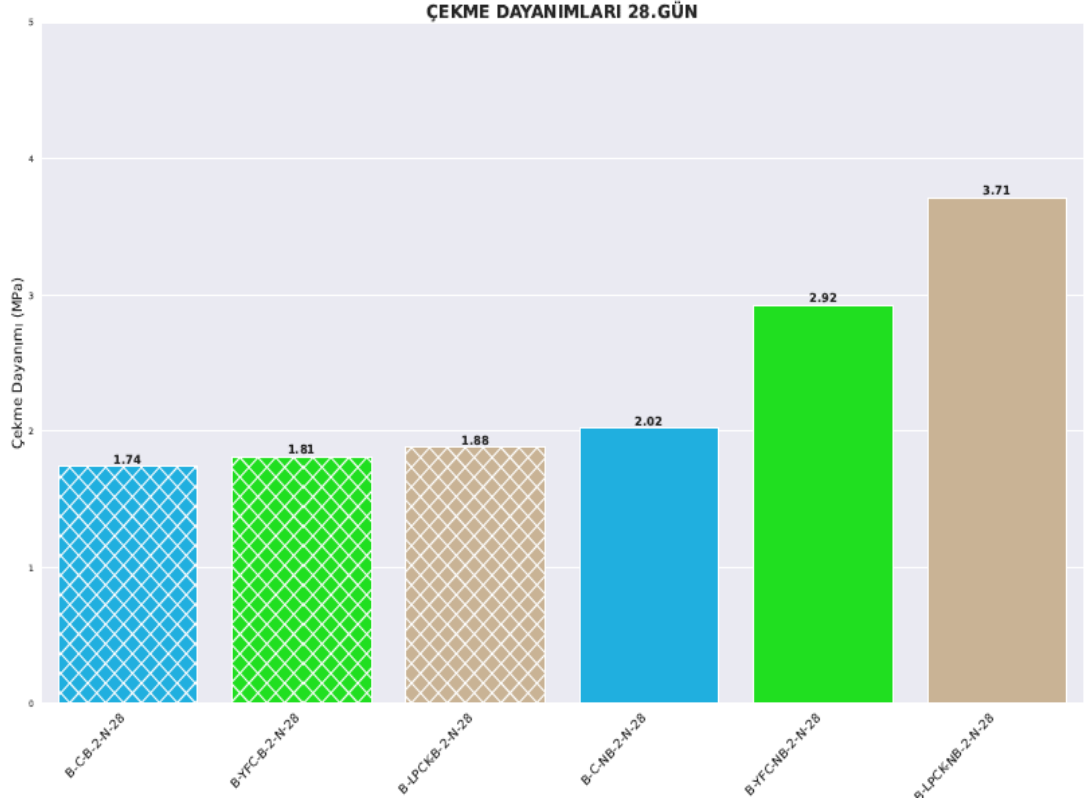
(a)

(b)

Şekil 4.12 Bazalt 2. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri a) 28 gün b) 90 gün

4.2.2.1 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

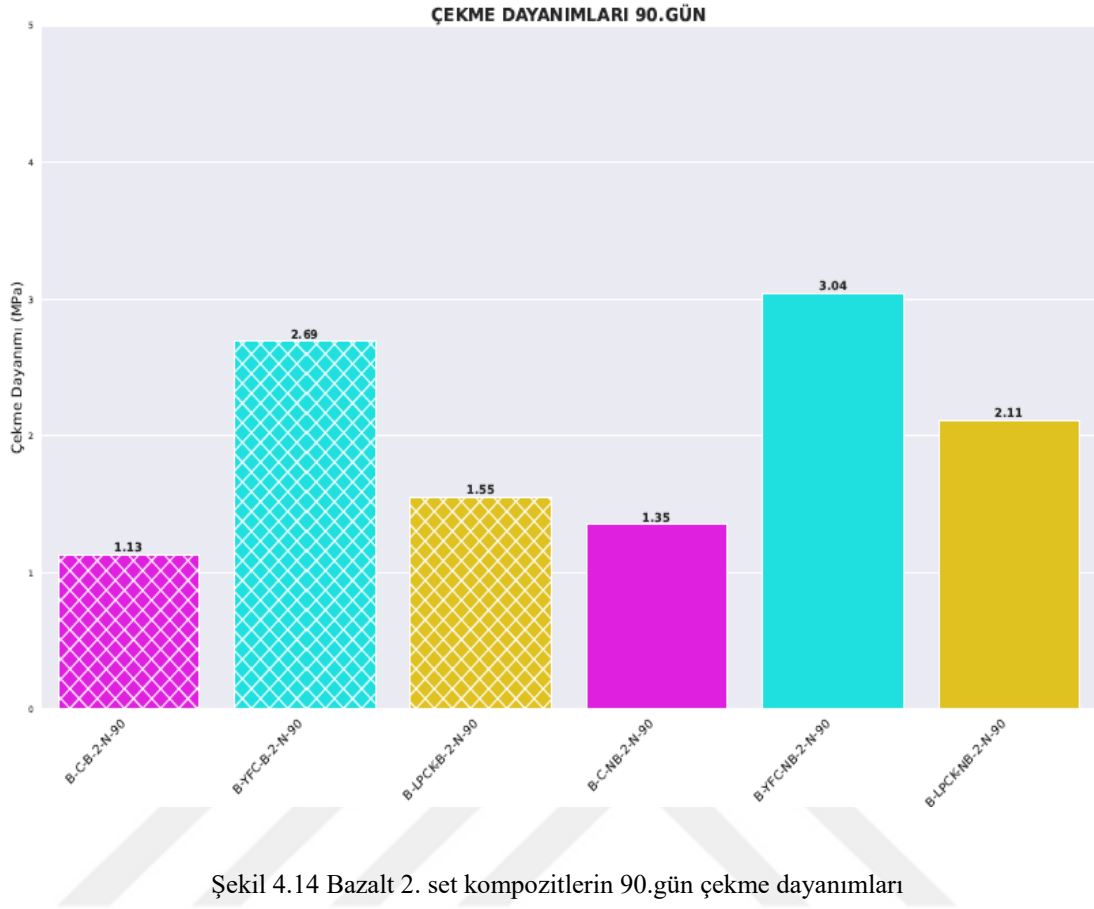
Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında çekme dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları

Şekil 4.13'te Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Seriler arasında değerlendirme yapıldığında YFC ve LPCK seriler C serilerine göre boşluk modifikasyonu olan/olmayan tüm koşullara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. En yüksek çekme dayanımını veren seri boşluk modifikasyonu olmayan LPCK serilerinde görülmüştür (3.71 MPa).

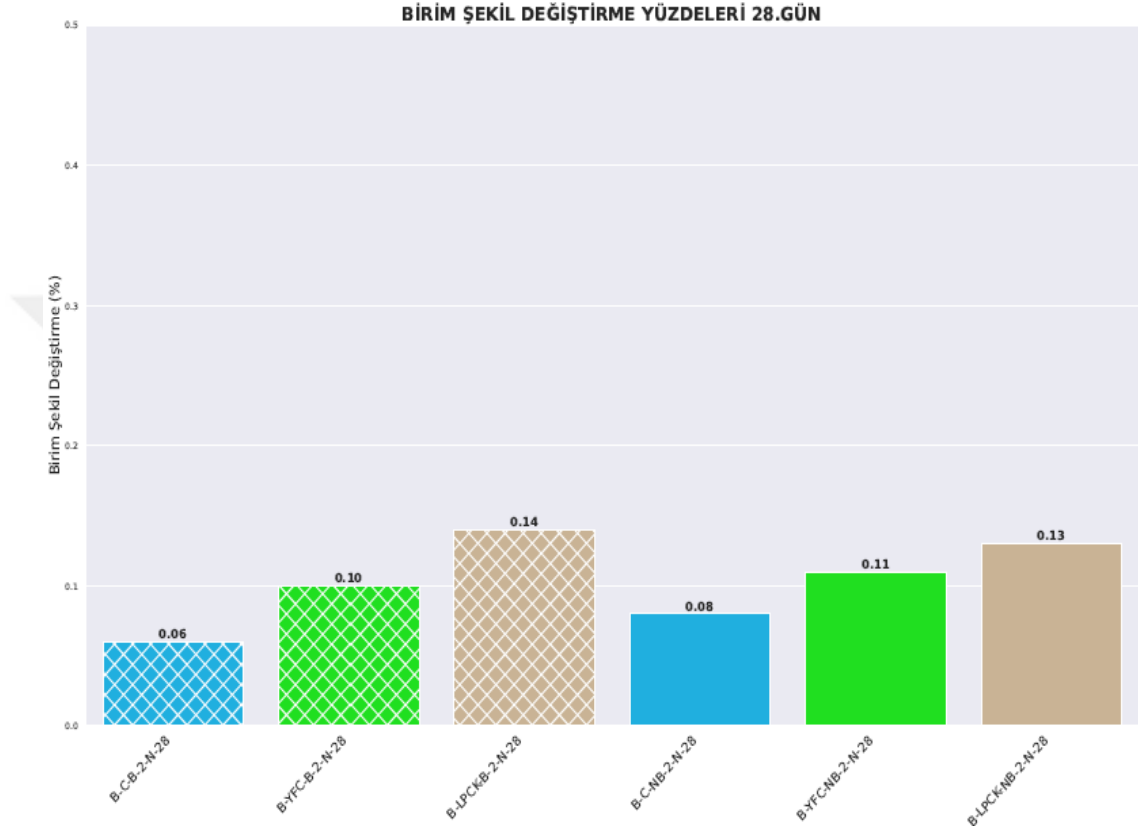
ASR etkisi altında bulunan karışımlarda boncuk nedeniyle geçirimsizliğin artması ve matris fazında boşluk miktarının artması sonucu çekme dayanımlarında azalmalar görülmektedir.



Şekil 4.14’te Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. En yüksek ÇD değerine YFC serisinin boşluk modifikasyonu olmayan numunelerinde (B-YFC-NB-2-N-90) gözlemlenmiştir (3.04 MPa). Seride hem kusur etkisi olmaması hem de 90 günlük yaş süresinin YFC’nin daha çok reaksiyona girip boşlukları azaltmasında etkili olduğundan dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Geçirimsizliğin artması sayesinde ÇD değerlerinde artışlar görülmüştür. En düşük ÇD ise boşluk modifikasyonu olan C serisinde (B-C-B-2-N-90) gözlemlenmiştir (1.13 MPa). Çimento dozajının yüksek olması nedeniyle alkalilerin girdiği reaksiyonlar ve kusur etkisi bu sonucun ortaya çıkmasında en önemli etkenler olduğu düşünülmektedir.

4.2.2.2 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değişirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi

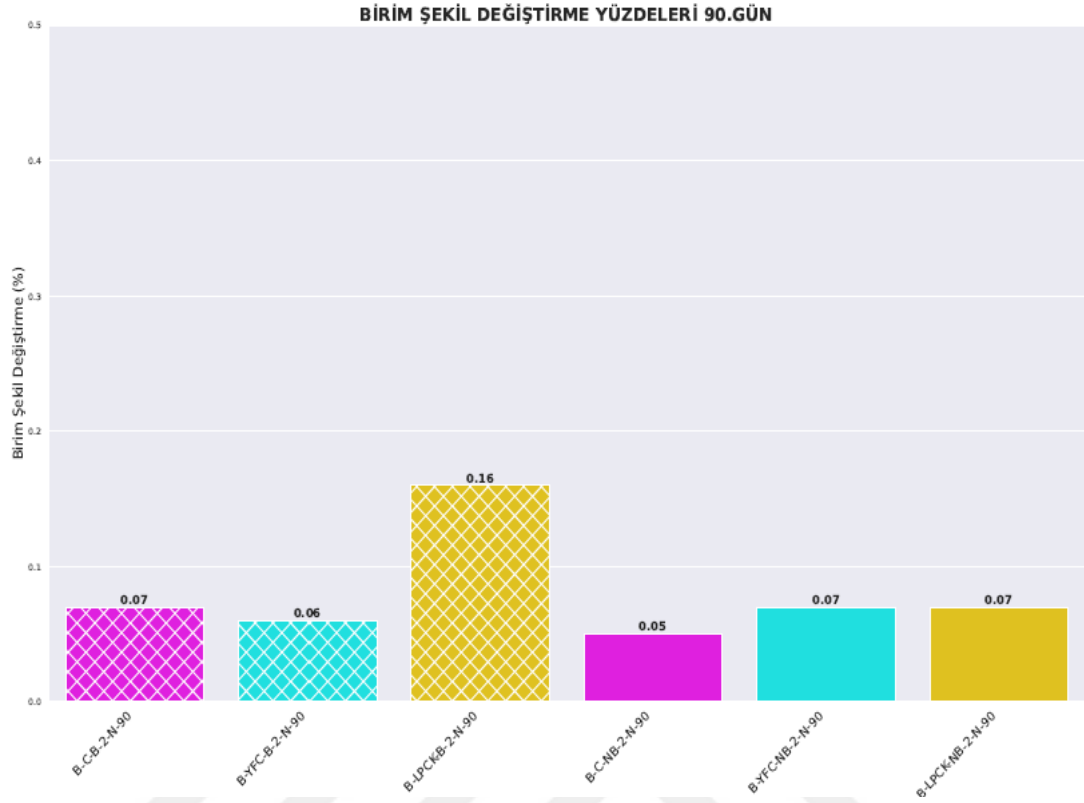
Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında BŞD yüzdeleri açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değişirme yüzdeleri

Şekil 4.15'te Bazalt agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün BŞD yüzdeleri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD (%) LPCK serisinin boncuksuz numunelerinde (B-LPCK-B-2-N-28) olduğu görülmüştür (%0.14).

Boşluk modifikasyonu etkisi incelendiğinde kusur olup olmaması belirgin bir etki yaratmamıştır.



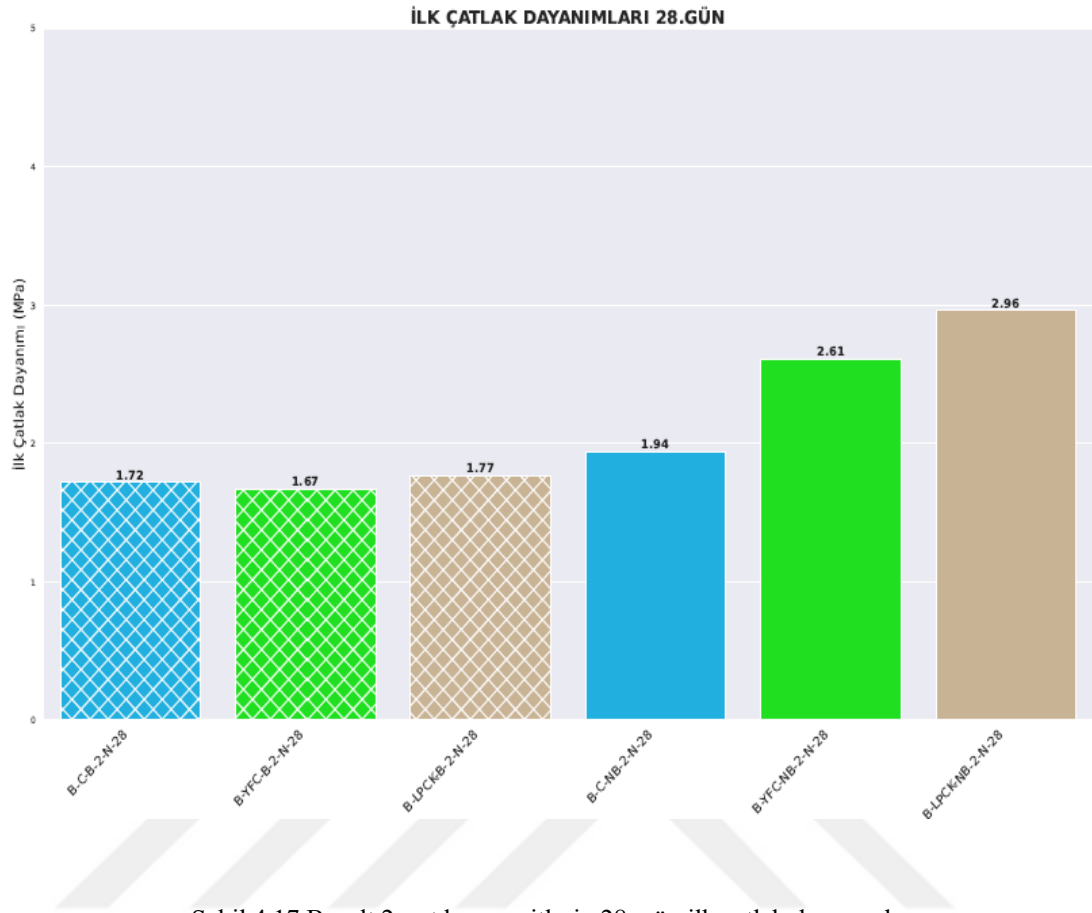
Şekil 4.16 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün yüzdeleri

Şekil 4.16’de Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün BŞD yüzdeleri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD (%) LPCK serisinin boncuksuz numunelerinde (B-LPCK-B-2-N-90) olduğu görülmüştür (%0.16).

Boşluk modifikasyonu açısından değerlendirme yapıldığında C ve YFC serisinde herhangi bir değişiklik gözlenmezken LPCK serisinin boncuk olan numunesi boncuk olmayan numunesine göre BŞD yüzdesi açısından %100 lük bir artış performansı göstermiştir.

4.2.2.3 Bazalt 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

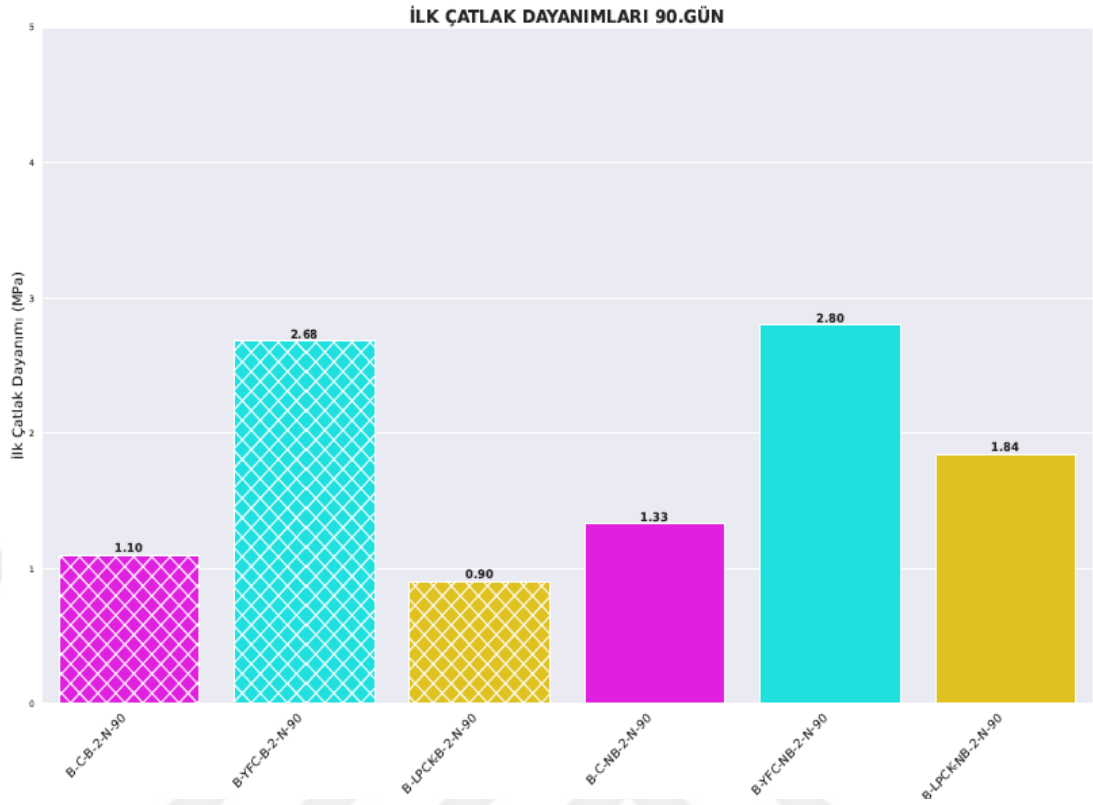
Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında ilk çatlak dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.17 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.17’de Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün ilk çatlak dayanımları (İÇD) karşılaştırılmıştır. Boşluk modifikasyonu etkisi C serilerinde düşük miktarlarda düşüş göstermiştir. YFC ve LPCK serilerinde ise ortalama %40 oranlarında bir düşüş göstermiştir. Tüm serilerde boşluk modifikasyonu olumsuz bir etki yaratmıştır. En yüksek İÇD değerine LPCK serisi boncuksuz numunelerinde ulaşılmıştır (2.96 MPa).

Tüm serilerde İÇD grafiğinin ÇD grafiği ile benzer bir yapıda olduğu gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde ÇD değerlerinin %80’i İÇD değerlerine denk gelmiştir. Boşluk modifikasyonu olan numunelerde ise bu değer yaklaşık %90 değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları

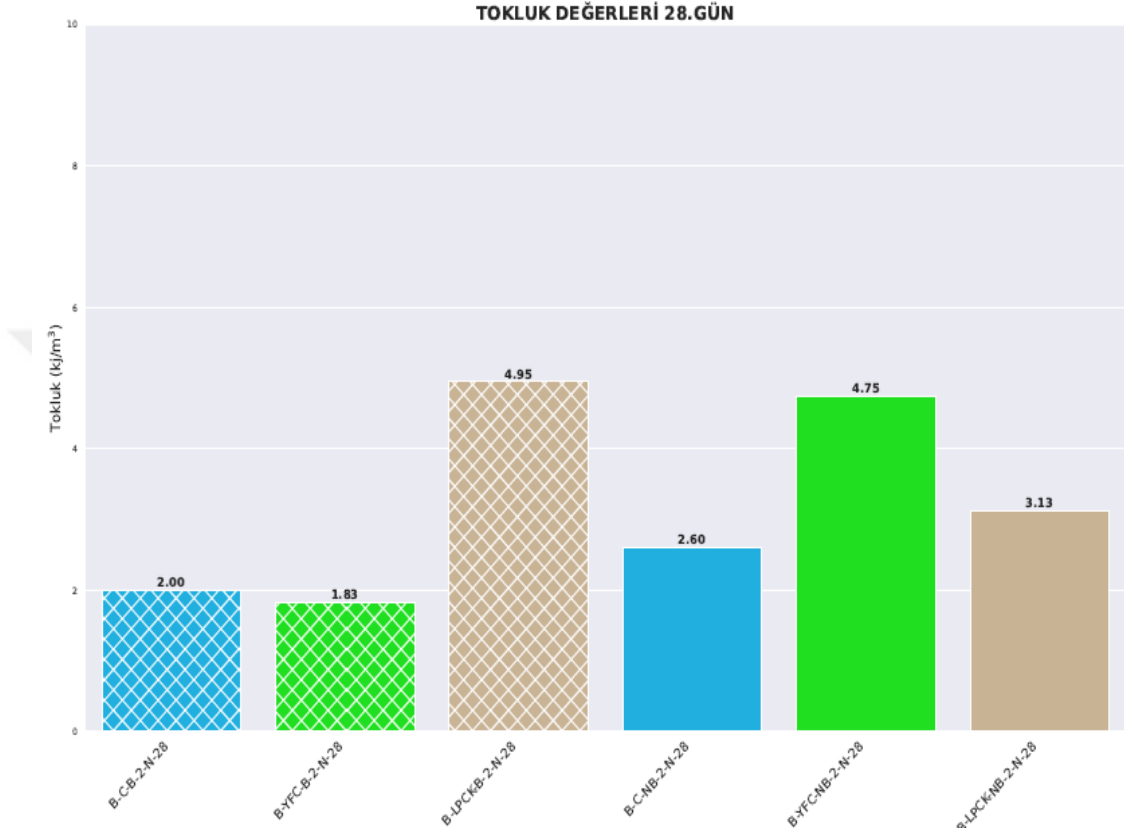
Şekil 4.18’de Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün ilk çatlak dayanımları (İÇD) karşılaştırılmıştır. En yüksek İÇD değerine YFC serisi boncuksuz numunelerinde ulaşılmıştır (2.80 MPa).

Tüm serilerde İÇD grafiğinin ÇD grafiği ile benzer bir yapıda olduğu ortaya gözlenmiştir. Tüm serilerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan numunelerinde ÇD değerlerinin yaklaşık %90’ı İÇD değerlerinde gözlenmiştir.

NaOH kürüne maruz 2. set numunelerinde ASR etkisi sonucu boncuk ilavesi olan kompozitlerde geçirimsizliği artırması nedeniyle boncuksuz numunelere göre daha düşük değerlerde sonuçlar vermektedir.

4.2.2.4 Bazalt 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında tokluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır.

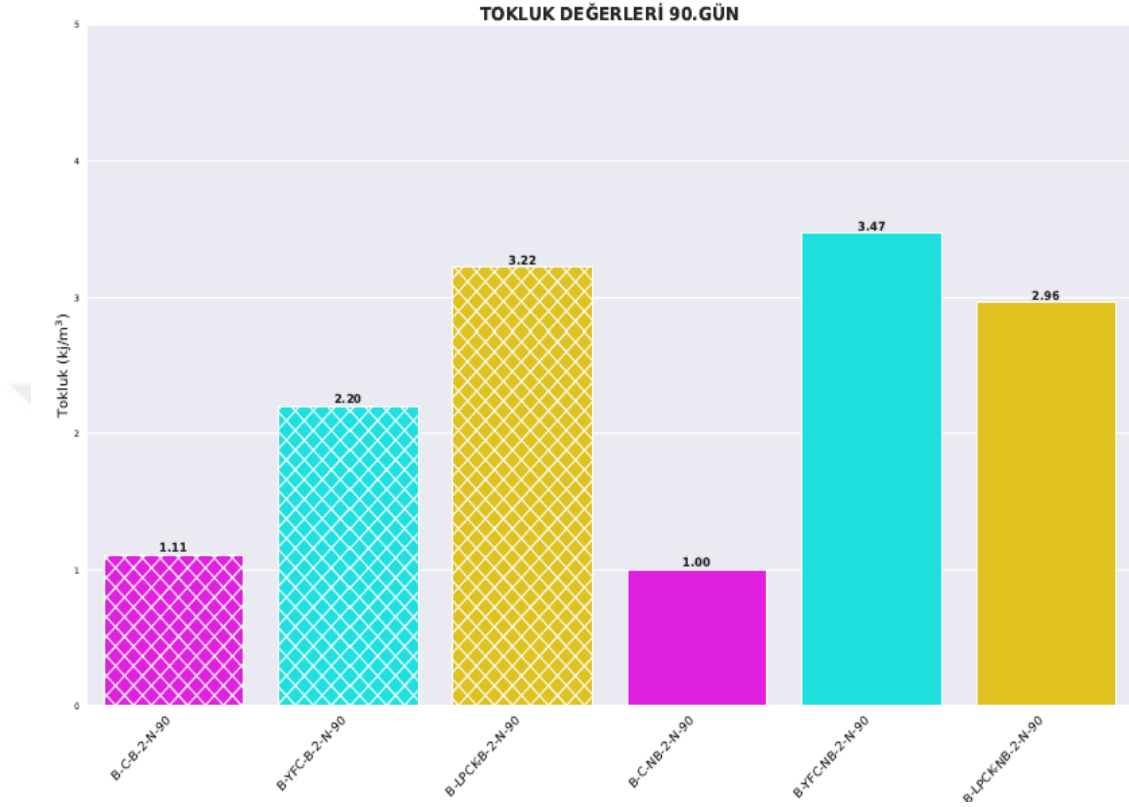


Şekil 4.19 Bazalt 2. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri

Şekil 4.19’da Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan 28.gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, BŞD yüzdesinin de en yüksek olduğu, LPCK serisi boncuklu numunelerde (B-LPCK-B-1-H-28) gözlenmiştir (4.95 kJ/m³). En düşük tokluk değeri ise YFC serisi boncuklu numunelerde (B-YFC-B-1-N-28) gözlenmiştir (1.83 kJ/m³).

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin C ve YFC serisinde tokluk değerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Sadece LPCK serisinde boşluk modifikasyonu olan numuneler olmayan numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir.

Kontrol ve YFC serilerinde boncuk ilavesi ASR etkisini arttırarak tokluk değerlerinde düşüşler gösterirken, LPCK serisinde ASR etkisine karşı direnç gösterildiği gözlemlenmiştir.



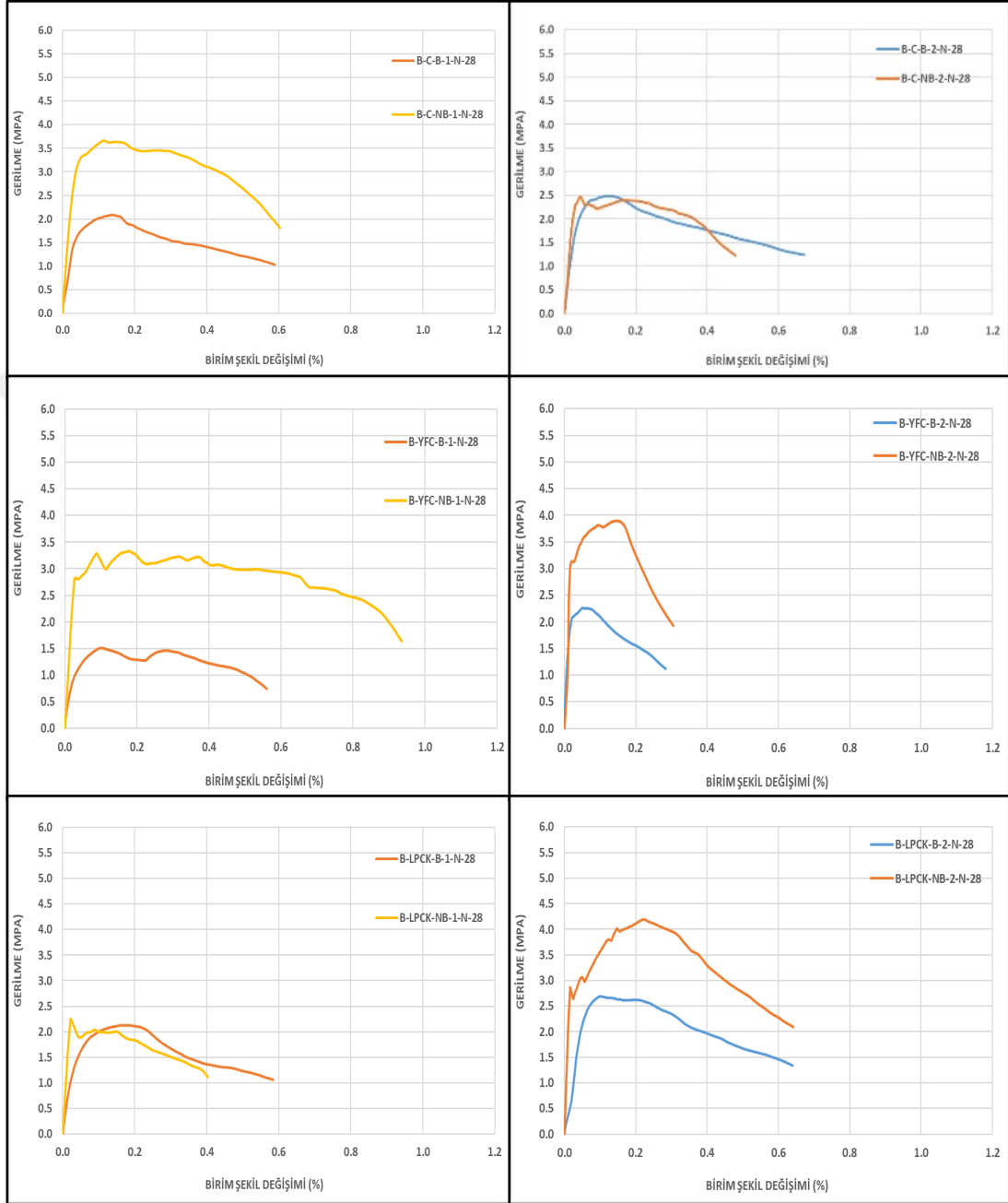
Şekil 4.20 Bazalt 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri

Şekil 4.20’de Bazalt agregası ile hazırlanan 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.Gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, YFC serisi boncuksuz numunelerde (B-YFC-NB-1-H-90) gözlenmiştir (3.47 kJ/m³). En düşük tokluk değeri ise C serisi boncuksuz numunelerde (B-C-NB-1-N-90) gözlenmiştir (1.00 kJ/m³).

4.2.3 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi

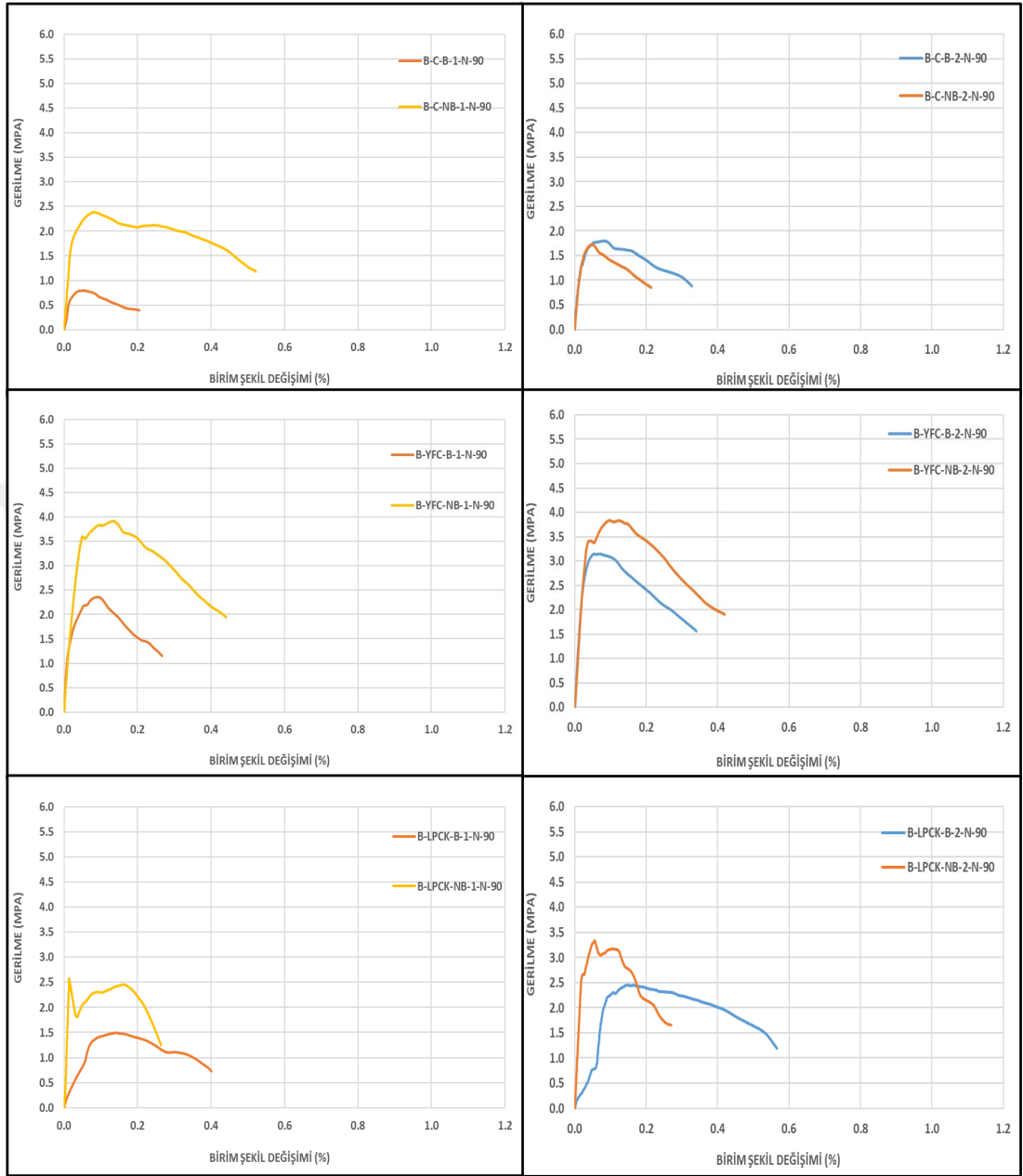
Deney çalışmasının bu aşamasında Bazalt agregaları ile üç farklı karışım olarak hazırlanan Bazalt 1.set ve 2.set kompozitlerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan, farklı kür koşulları altında bulunan numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda alınan veriler doğrultusunda Şekil 4.21’de 28 günlük, Şekil 4.22’de ise 90 günlük gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Bu

grafiklerin değerlendirilmesi sonucu kompozitlerin çekme dayanımları, BŞD yüzdeleri, İÇD ve tokluk değerleri belirlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.21 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri
a) 1. set b) 2. set



(a)

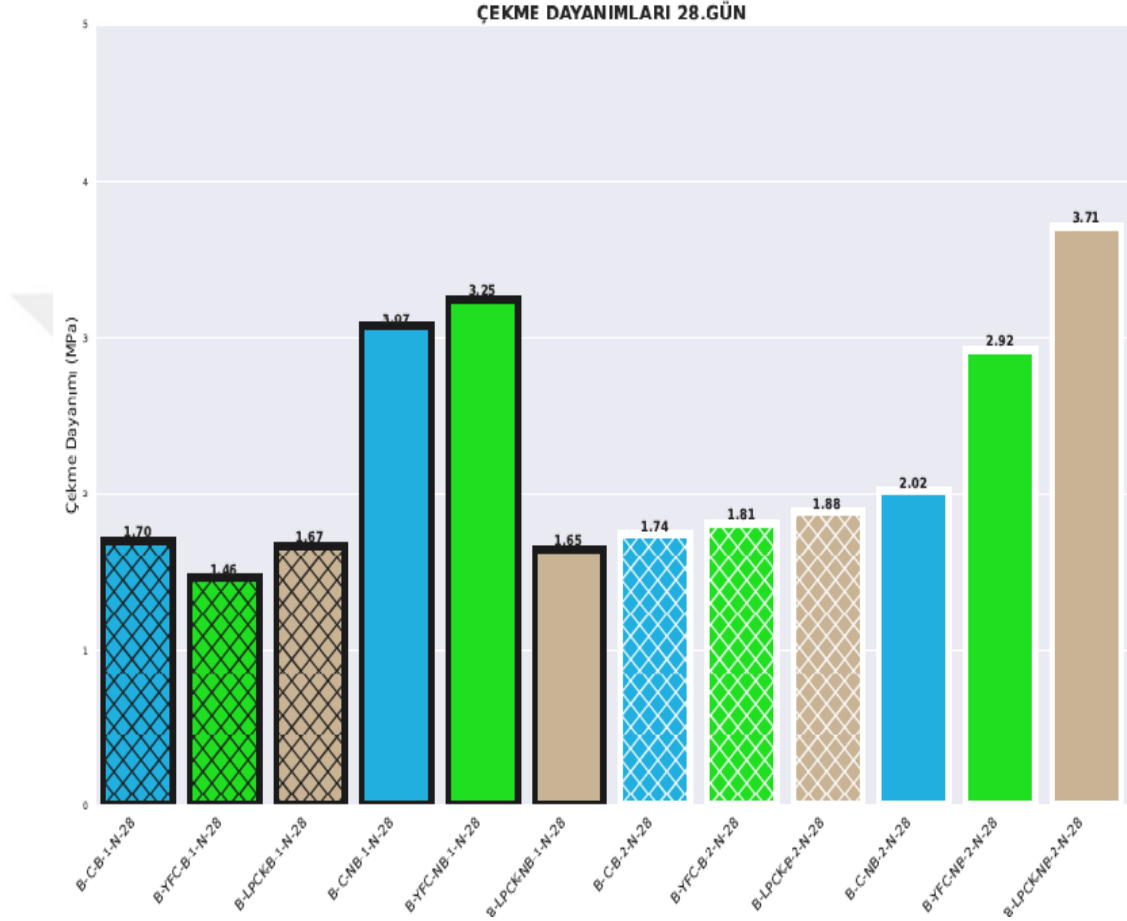
(b)

Şekil 4.22 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

a) 1. set b) 2. set

4.2.3.1 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında çekme dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.

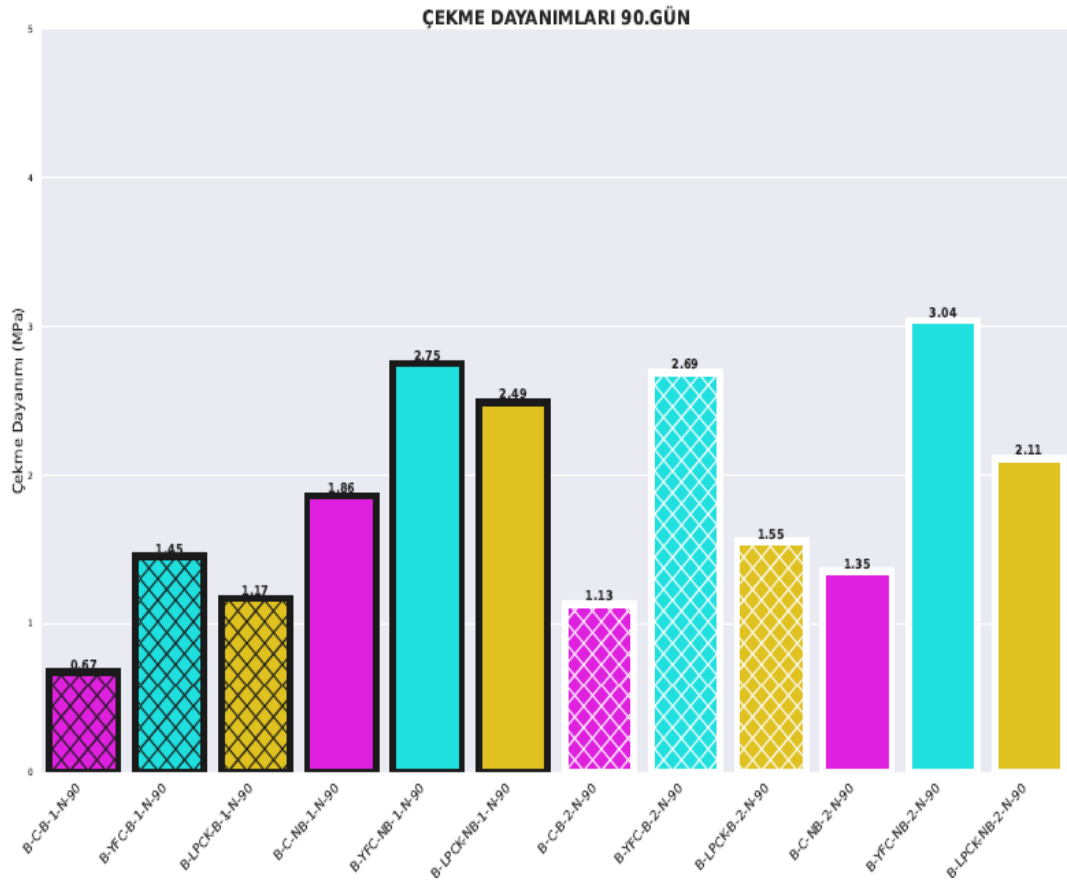


Şekil 4.23 Bazalt 1.set ve 2.set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları

Şekil 4.23'te Bazalt agregası ile hazırlanan 1.set ve 2.set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Bazalt serilerinin 28 günlük 1.set ve 2.set karşılaştırmalarında boşluk modifikasyonu olan numunelerinde benzer bir performans gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu etkisi iki set grubunda da kusur etkisi olmayan serilere göre daha düşük sonuçlar vermiştir. En yüksek değer 2.set boşluk modifikasyonu olmayan LPCK serisinde (B-LPCK-NB-2-N-28) gözlemlenmiştir (3.71 MPa). 1.set

numunelerin boşluk modifikasyonu olmayan C ve YFC serilerinde de ortalamanın üzerinde değerlere ulaşılmıştır.

ASR etkisine karşı boncuk ilavesi olmayan 1. Set kompozitlerin kontrol ve YFC serilerinin daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 1. set numunelerin kür koşullarında ilk 28 gün hava küründe kaldıktan sonra NaOH kürüne alınması sonucu ilk 28 günde hidrasyonların devam ederek matris içerisindeki boşlukları doldurması, geçirimsizliği azaltması ve bu nedenle daha iyi sonuçlar verdiği düşünülmektedir.



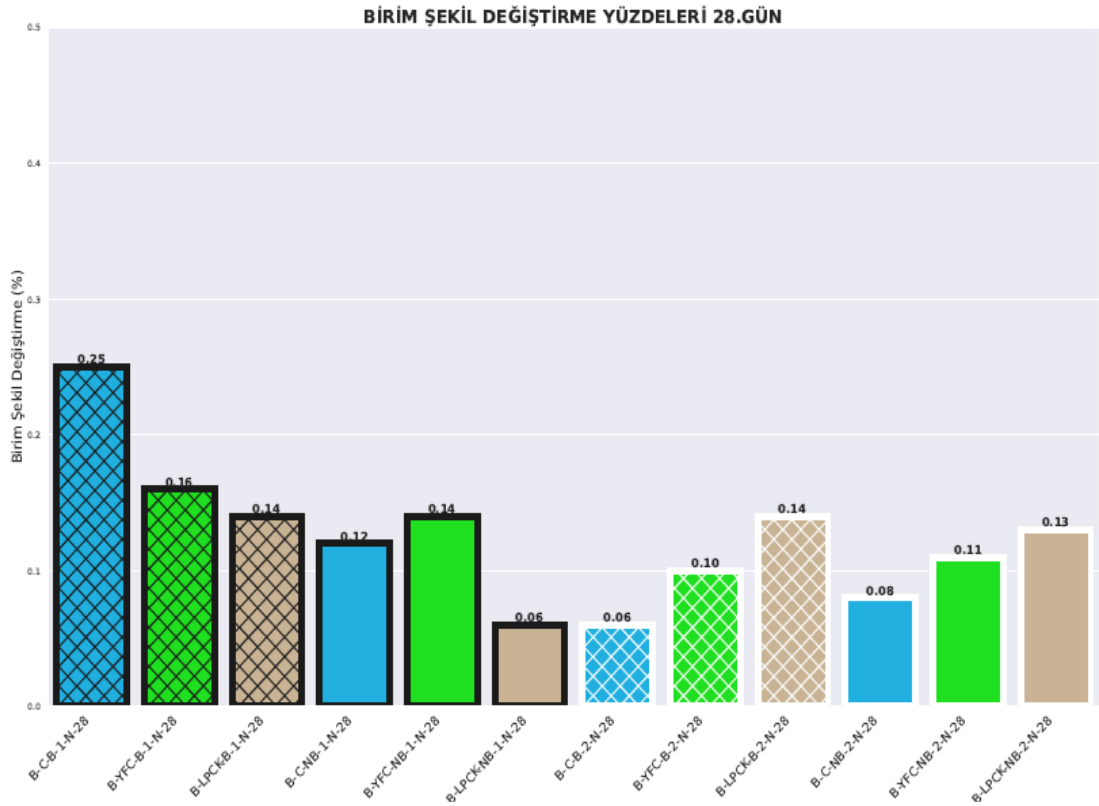
Şekil 4.24 Bazalt 1.set ve 2. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları

Şekil 4.24'te Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90.gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. En yüksek değer boşluk modifikasyonu olmayan YFC serisinde (B-YFC-NB-2-N-90) gözlenmiştir (3.04 MPa). Her iki set için boşluk modifikasyonu açısından bakıldığında 1.set numunelerinde ÇD değerlerinde olumsuz etki yaratırken,

2. set numunelerinde ise her seri için ayrı ayrı baktığımız zaman çekme dayanımlarında yaklaşık %10-15 aralığında bir fark yaratmıştır. Ayrıca 2. set numunelerinde kusur etkisi olan YFC serisinde (B-YFC-B-2-N-90) ÇD değeri 2.69 MPa ile en yüksek değere oldukça yakın bir sonuç vermiştir

4.2.3.2 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi

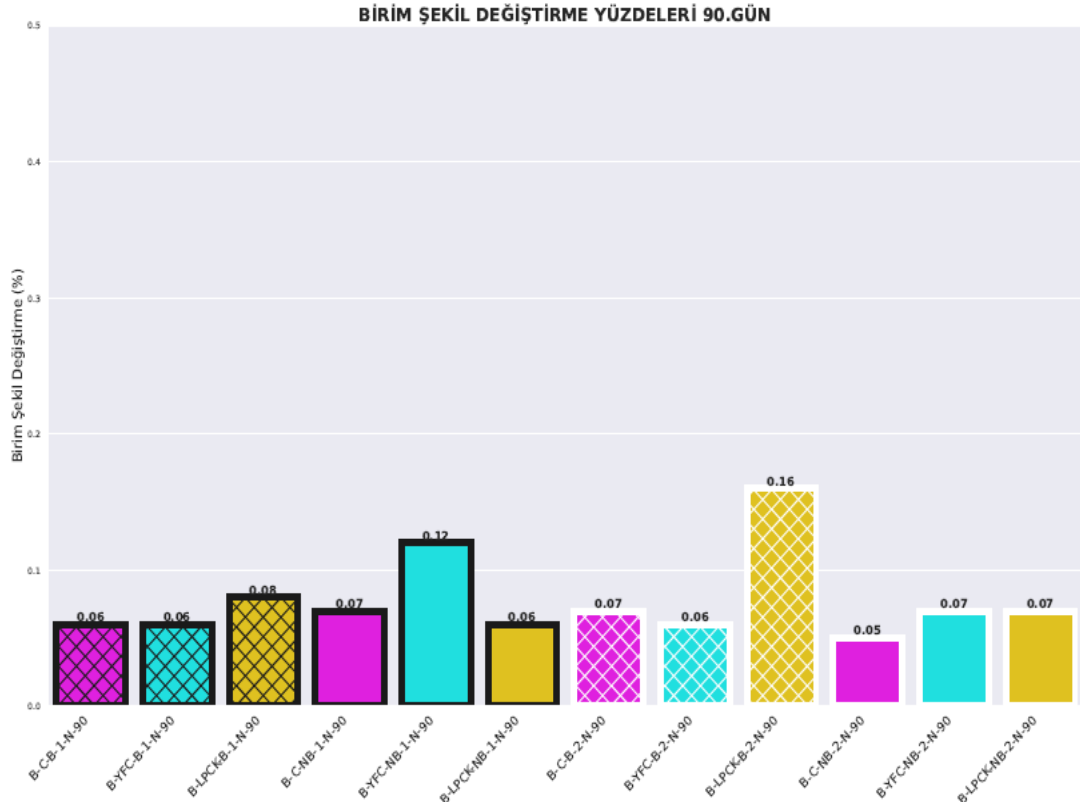
Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında BŞD yüzdeleri açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.25 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.25'te Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün BŞD yüzdeleri karşılaştırılmıştır. Tüm serileri hem boşluk modifikasyonu hem de kür koşulu altında değerlendirdiğimizde 1.set numunelerin 2.set numunelere göre BŞD açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir. En yüksek BŞD (%) 1.set kompozitin C serisindeki boncuklu numunelerinde gözlemlenmiştir (%0.25).

BŞD yüzdesi ASR etkisiyle daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ayrıca karışımlarda boncuk ilavesi olması ASR etkisinden kaynaklanan genişlemeyi arttırdığı için boncuklu numunelerde daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



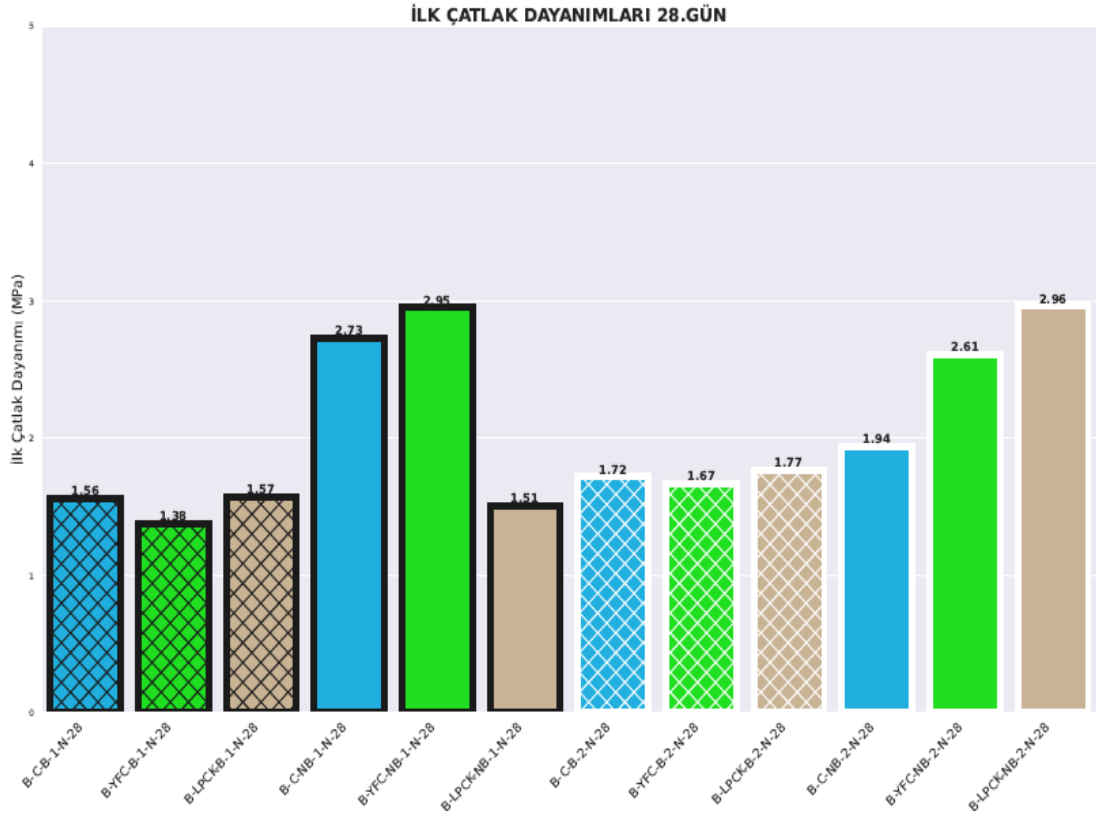
Şekil 4.26 Bazalt 1.set ve 2.set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.26’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün BŞD yüzdeleri karşılaştırılmıştır. Tüm serileri hem boşluk modifikasyonu hem de kür koşulu altında değerlendirdiğimizde 1. set numuneler ve 2. set numuneler benzer özellikler göstermiştir. En yüksek BŞD (%) 2. set kompozitin LPCK serisindeki boncuklu numunelerinde gözlemlenmiştir (%0.16).

Grafikte dikkat çeken en belirgin değişim LPCK serisinin boncuklu numunelerinde yaşanmıştır. LPCK serisinin boncuklu numunelerinde 2. set değeri 1. set değerine göre %100 oranında bir artış yaşanmıştır.

4.2.3.3 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

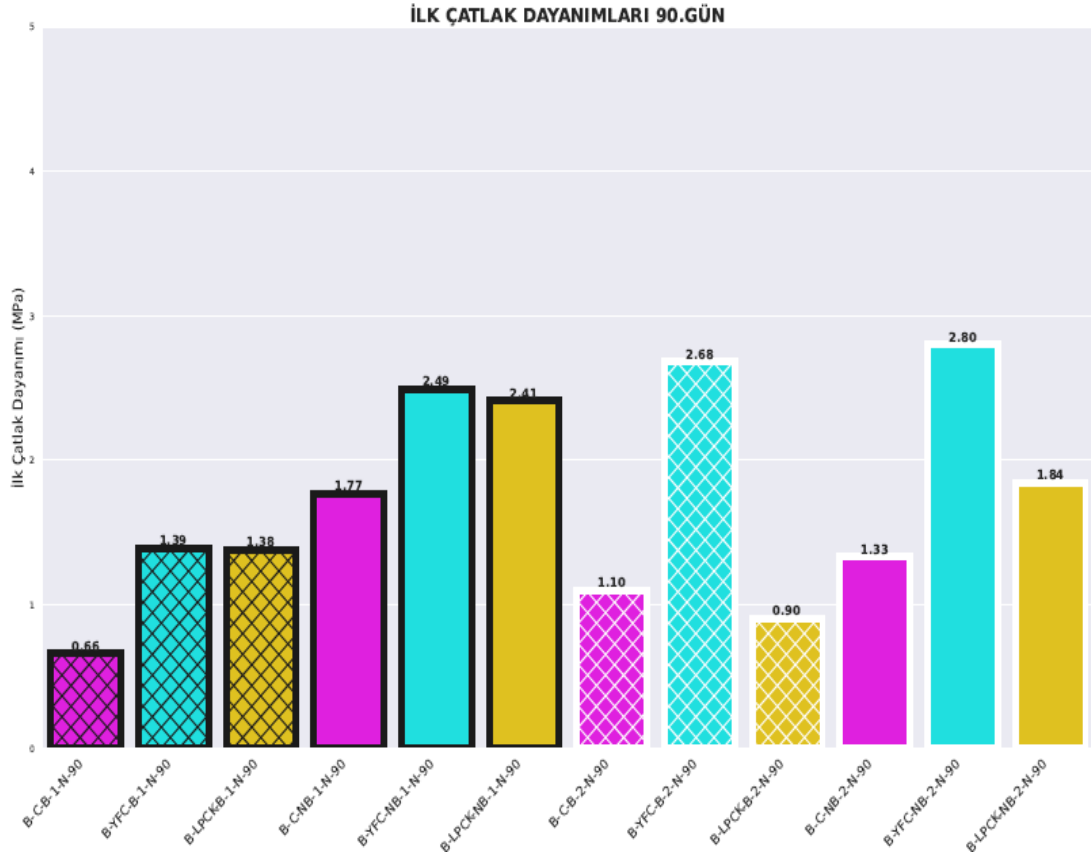
Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında ilk çatlak dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.27 Bazalt 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.27’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün ilk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. Her iki set için boşluk modifikasyonu daha düşük değerler vermiştir. Boncuklu numunelerde benzer özellikler yaşanırken boncuksuz numunelerde 1. set C ve YFC serilerinde 2. set kompozitlere göre daha yüksek değerler görülürken, LPCK serilerinde ise 2. set kompozitlerinde yaklaşık %100 oranında daha yüksek değerler gözlenmiştir.

Tüm serilerde inceleme yapıldığında İÇD değerleri ÇD değerleri ile benzer grafik histogramlarını vermiştir. ÇD değerlerinin yaklaşık %90'ı İÇD değerlerini göstermiştir.



Şekil 4.28 Bazalt 1.set ve 2.set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları

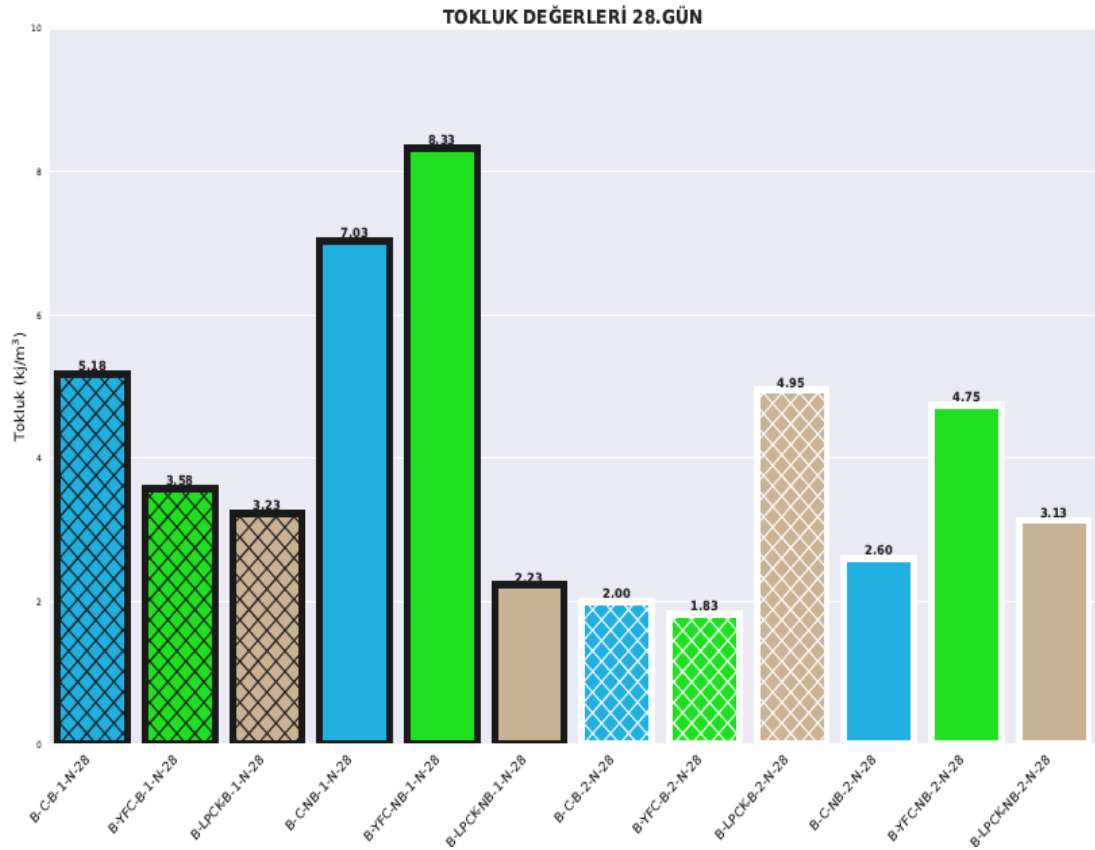
Şekil 4.28’de Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün ilk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. YFC serisi numunelerinde iyi sonuçlara ulaşılmıştır. 1. set numunelerde boşluk modifikasyonu etkisi ilk çatlak dayanımlarında yaklaşık %50 azalma göstermiştir. 2. set numunelerde ise tüm serilerde boncuksuz numuneler daha iyi sonuçlar vermiştir.

1. set ve 2. set numuneleri karşılaştırıldığında boşluk modifikasyonu olan numunelerde 2. set C serisi ve YFC serisinde 1. set C serisi ve YFC serisine göre artış göstermiştir. LPCK serisinde ise azalma gözlenmiştir.

1. set ve 2. set numuneleri karşılaştırıldığında boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde 2. set C serisi ve LPCK serisinde 1. set C serisi ve LPCK serisine göre azalma göstermiştir. YFC serisinde ise artış gözlenmiştir.

4.2.3.4 Bazalt 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi

Bazalt agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında tokluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır.



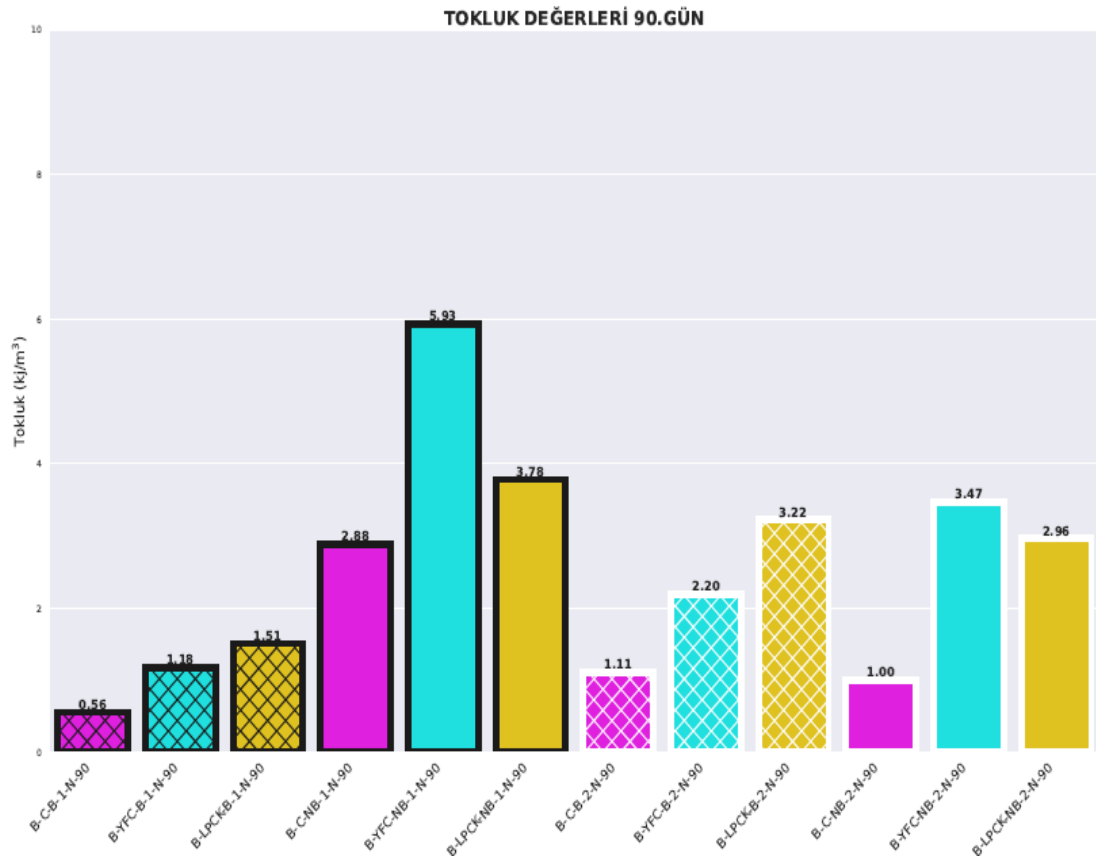
Şekil 4.29 Bazalt 1.set ve 2.set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri

Şekil 4.29’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün günlük tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. 1. set kompozitlerde 2. set kompozitlere göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. En yüksek tokluk değerine 1. Set YFC serisi boncuksuz numunelerinde (B-YFC-NB-1-N-28) görülmüştür (8.33 kJ/m³).

1. set ve 2. set numuneleri karşılaştırıldığında boşluk modifikasyonu olan numunelerde 2. set C serisi ve YFC serisinde 1. set C serisi ve YFC serisine göre azalma göstermiştir. LPCK serisinde ise artış gözlenmiştir.

1. set ve 2. set numuneleri karşılaştırıldığında boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde 2. set C serisi ve YFC serisinde 1. set C serisi ve YFC serisine göre azalma göstermiştir. LPCK serisinde ise artış gözlenmiştir.

2. set numunelerin 1. Set numunelere göre 28 gün daha fazla NaOH küründe kalması nedeniyle ASR etkisinden dolayı tokluk değerlerinde daha fazla düşüşler yaşamaktadır.



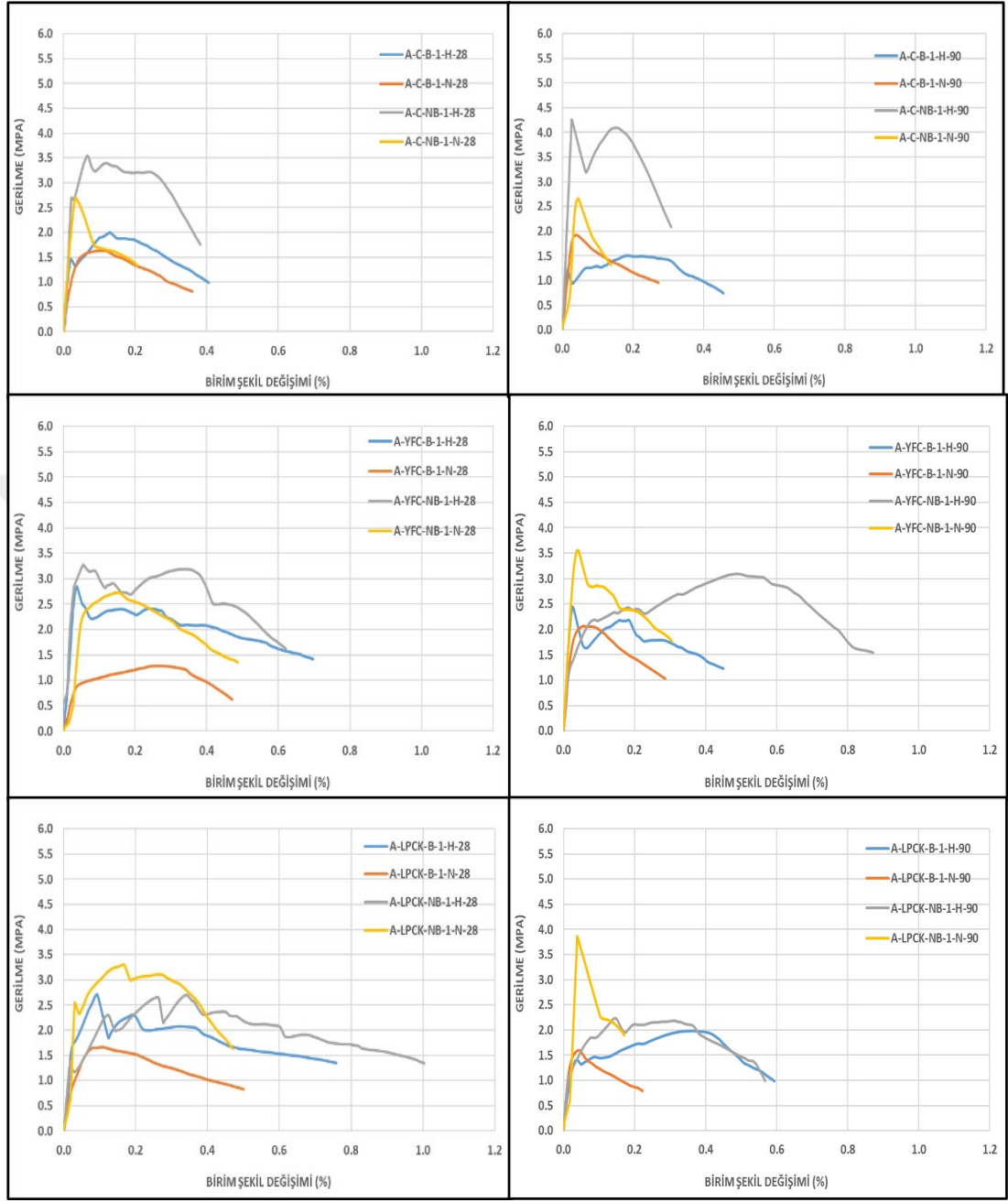
Şekil 4.30 Bazalt 1.set ve 2.set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri

Şekil 4.30’da Bazalt agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90 günlük tokluk değerleri

karşılaştırılmıştır. 2. set kompozitlerde 1. set kompozitlere göre boncuklu numunelerde daha yüksek değerler elde edilirken, boncuksuz numunelerde ise 1. set kompozitlerde 2. set kompozitlere göre daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. En yüksek tokluk değerine 1. Set YFC serisi boncuksuz numunelerinde (B-YFC-NB-1-N-90) görülmüştür (5.93 kJ/m³).

4.2.4 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Deney çalışmasının bu aşamasında Ahmetli agregaları ile üç farklı karışım olarak hazırlanan Ahmetli 1. set kompozitlerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan, farklı kür koşulları altında bulunan numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda alınan veriler doğrultusunda Şekil 4.31’de 28 günlük ve 90 günlük **gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri** oluşturulmuştur. Bu grafiklerin değerlendirilmesi sonucu kompozitlerin çekme dayanımları, BŞD yüzdeleri, İÇD ve tokluk değerleri belirlenmiştir.



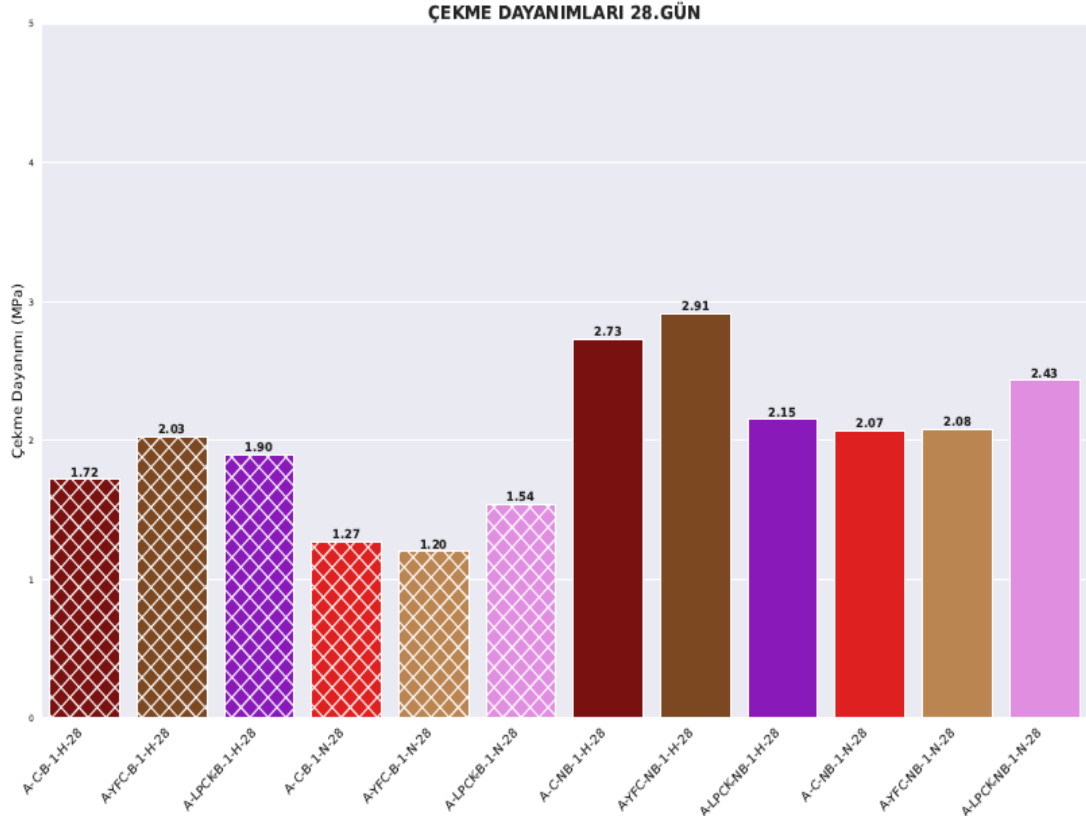
(a)

(b)

Şekil 4.31 Ahmetli 1.set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri a) 28 gün b) 90 gün

4.2.4.1 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında çekme dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



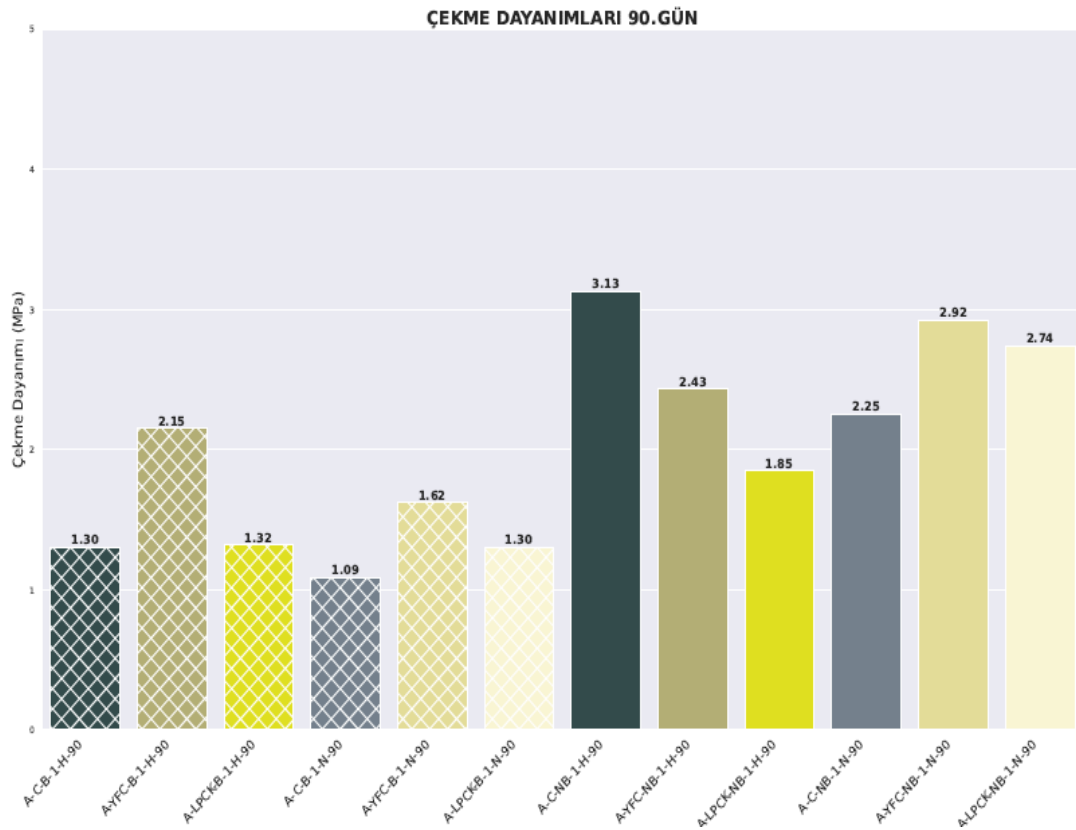
Şekil 4.32 Ahmetli 1.set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları

Şekil 4.32’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün çekme dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek ÇD değeri hava kürü etkisi altındaki YFC serisi boncuksuz numunelerde (A-YFC-NB-1-H-28) gözlenmiştir (2.91 MPa). Boşluk modifikasyonu tüm serilerde her iki kür etkisi altında daha düşük sonuçlar vermiştir.

Kür etkisi açısından değerlendirme yapıldığında NaOH küründe kalan numunelerde alkali etkisi çekme dayanımlarındaki değerleri düşürmüştür. En düşük dayanım ise YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (B-YFC-B-1-N-28) gözlenmiştir (1.20 MPa). NaOH kürü ve kusur etkisinin bu sonucun ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir.

NaOH küründe kalan tüm numuneler ASR etkisi nedeniyle hava küründe kalan tüm numunelere göre çekme dayanımlarında %30 oranında bir düşüş yaşamıştır.

Hava kürü değerinin NaOH kürü değerinden düşük çıktığı tek numune boşluk modifikasyonu olmayan LPCK serisinde (A-LPCK-NB-1-N-28) gözlemlenmiştir (2.15 MPa>1.90 MPa).



Şekil 4.33 Ahmetli 1.set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları

Şekil 4.33'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün çekme dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek ÇD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-H-90) gözlenmiştir (3.13 MPa). Bu sonucun diğer serilere göre çimento oranındaki yüksek dozaj, kusur etkisi olmaması ve 90 günlük yaş kürü süresinin etkili olduğu düşünülmektedir. En düşük dayanım ise C serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (A-C-B-1-N-90) gözlenmiştir (1.09 MPa). NaOH kürü ve kusur etkisinin bu sonucun ortaya çıkmasına

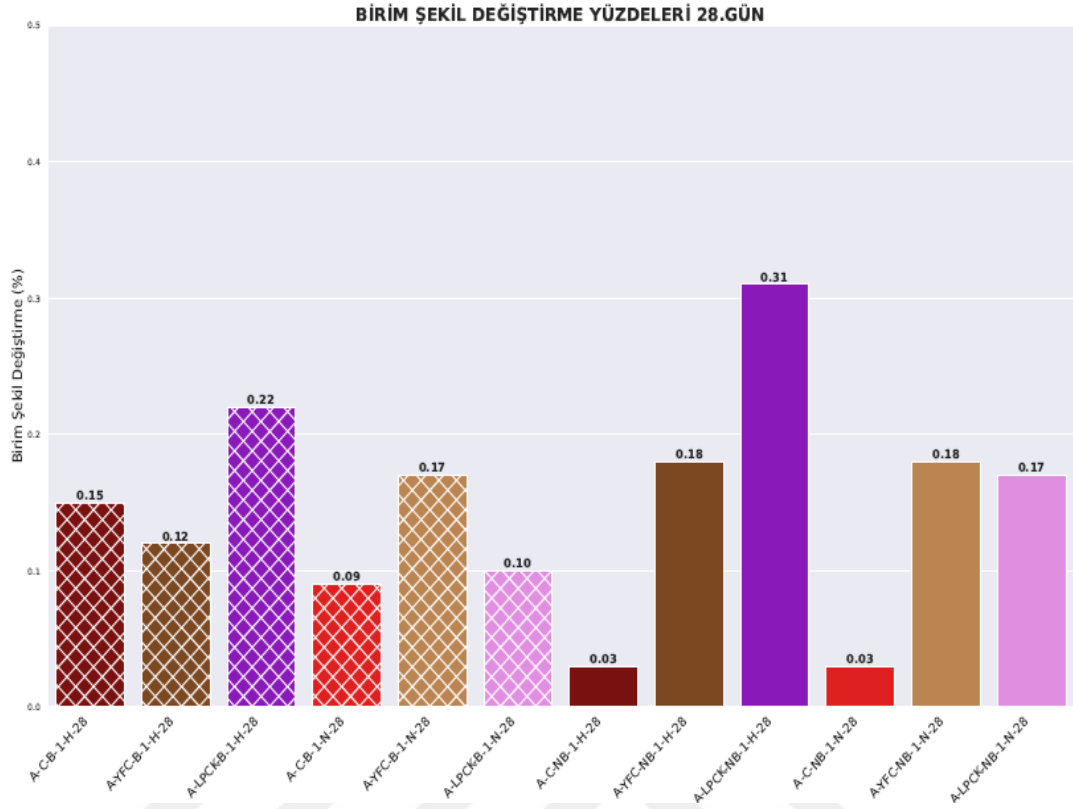
neden olduğu düşünölmektedir. Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin ÇD değęerlerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir.

Hava kürü ve NaOH kürü etkileri açısından değęerlendirme yapıldığında, boşluk modifikasyonu olan serilerde hava küründe kalan seriler NaOH küründe kalan serilere göre ÇD değęerlerinde daha yüksek sonuçlar vermiştir. Boşluk modifikasyonu olmayan YFC ve LPCK serilerinde ise NaOH küründe kalan numuneler hava küründe kalan numunelere göre YFC serilerinde çekme dayanımlarında yaklaşık %25, LPCK serilerinde ise yaklaşık %50'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan dolayı puzolanların yaş kürü uzadıkça NaOH kürü etkisi altında kalsa dahi reaksiyona girerek dayanımları arttırdığı söylenebilir.

ASR etkisi açısından değęerlendirildiğinde boncuk olan numunelerde geçirimsizliğin de artması nedeniyle tüm karışımlarda azalma gözlenirken boncuksuz numunelerde ise kontrol serisinde ASR etkili olurken puzolan katkılı serilerde (YFC ve LPCK) ASR etkisinin azaldığı gözlenmiştir.

4.2.4.2 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi

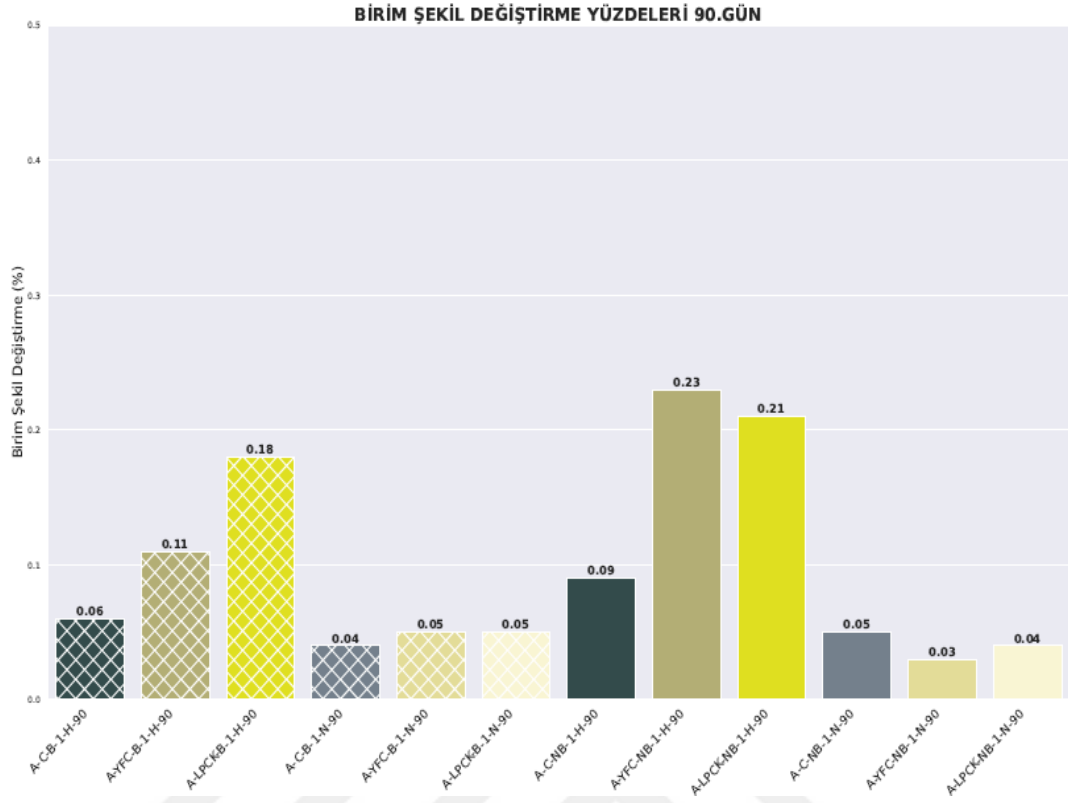
Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında BŞD yüzdeleri açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.34 Ahmetli 1.set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.34'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün BŞD değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD (%) hava kürü etkisi altındaki LPCK serisi boncuksuz numunelerde (A-LPCK-NB-1-H-28) gözlenmiştir (%31). En düşük BŞD (%) ise C serisi hava kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-N-28) ve C serisi NaOH kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-N-28) gözlenmiştir (%0.03).

Kür etkisi incelendiğinde NaOH kürü değerlerinde hava kürüne değerlerine göre C serisi ve LPCK serisinde azalma gözlenirken, YFC serilerinde boncuklu numunelerde %50 artış, boncuksuz numunelerde ise aynı değerde kaldığı gözlenmiştir.



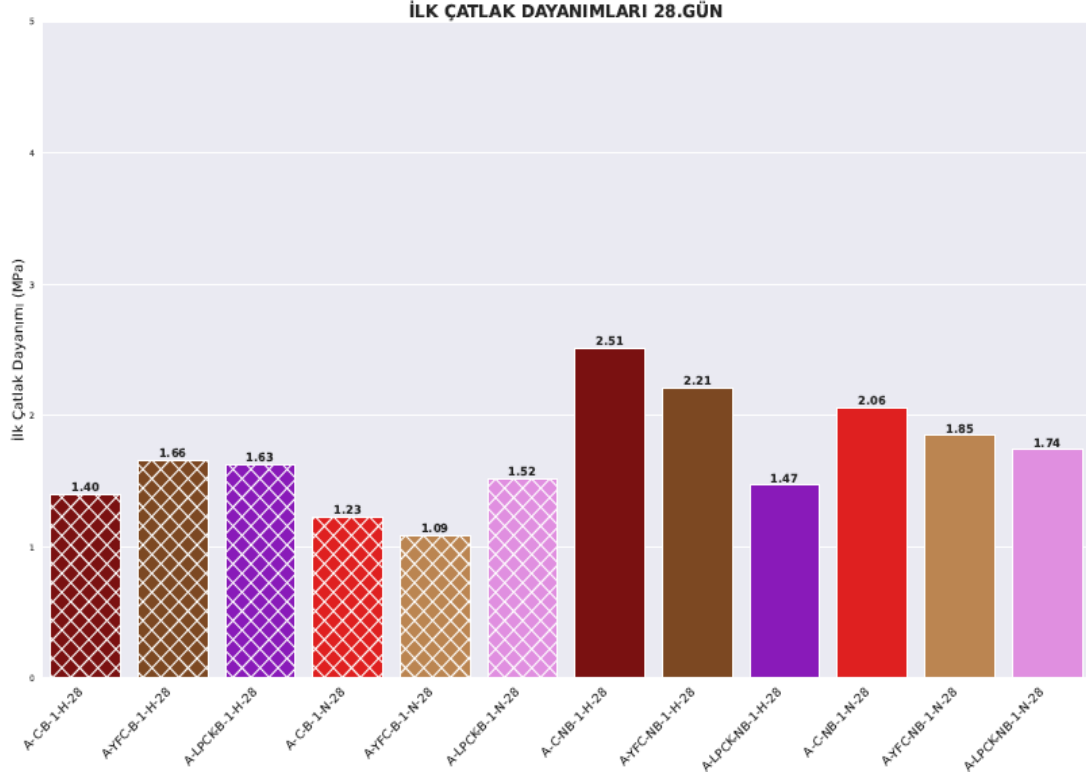
Şekil 4.35 Ahmetli 1.set kompozitlerin 90. gün birim şekil değıştirme yüzdeleri

Şekil 4.35'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün BŞD değeri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD (%) hava kürü etkisi altındaki YFC serisi boncuksuz numunelerde (A-YFC-NB-1-H-90) gözlenmiştir (%23). En düşük BŞD (%) ise YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (A-YFC-NB-1-N-90) gözlenmiştir (0.03).

Kür etkisi açısından BŞD yüzdelерinde değeriendirme yapıldığında boşluk modifikasyonu olan numunelerde hava kürü etkisi NaOH kürü etkisine göre C serisinde %30, YFC serisinde %50, LPCK serisinde ise %70 artış göstermiştir. Boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde ise BŞD değerilerinde hava kürü etkisi NaOH kürüne etkisine göre C serisinde %100, YFC ve LPCK serisinde oldukça ciddi oranlarda artış göstermiştir.

4.2.4.3 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında ilk çatlak dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



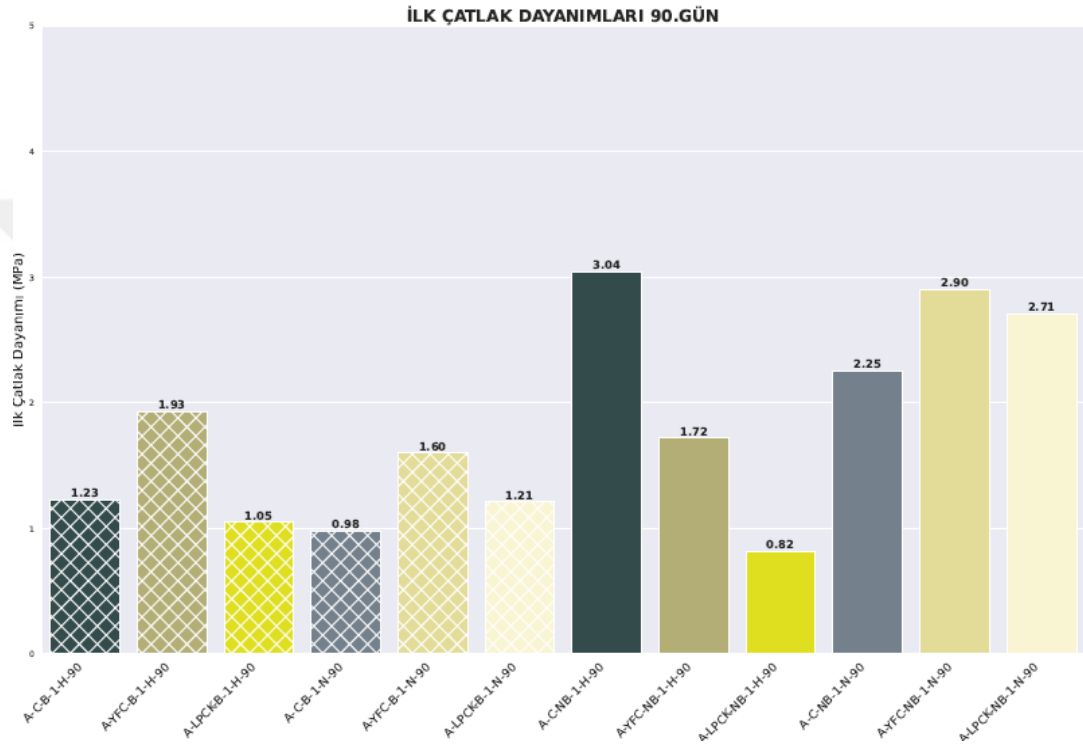
Şekil 4.36 Ahmetli 1. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.36’da Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün ilk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. En yüksek İÇD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-H-28) gözlenmiştir (2.51 MPa). Bu sonucun diğer serilere göre çimento oranındaki yüksek dozaj ve kusur etkisi olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük dayanım ise YFC serisinde NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (A-YFC-B-1-N-28) gözlenmiştir (1.09 MPa). NaOH kürü ve kusur etkisinin bu sonucun ortaya çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin İÇD değerlerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından C serisi ve YFC serilerinde çekme dayanımlarında yaklaşık %30

bir değer kaybı yaratmıştır. LPCK serilerinde ise boşluk modifikasyonu her iki kür etkisi altında dahi çekme dayanımlarında belirgin bir değişiklik göstermemiştir.

Tüm serilerin ÇD değerleri ile İÇD değerlerini incelediğimizde grafik değerleri benzer özellikler gösterirken İÇD değerleri ÇD değerlerinin ortalama %80'ine denk geldiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.37 Ahmetli 1.set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.37’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün İlk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. En yüksek İÇD değeri hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-H-90) gözlenmiştir (3.04 MPa). En düşük dayanım ise LPCK serisi hava kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (A-LPCK-NB-1-H-90) gözlenmiştir (0.82 MPa).

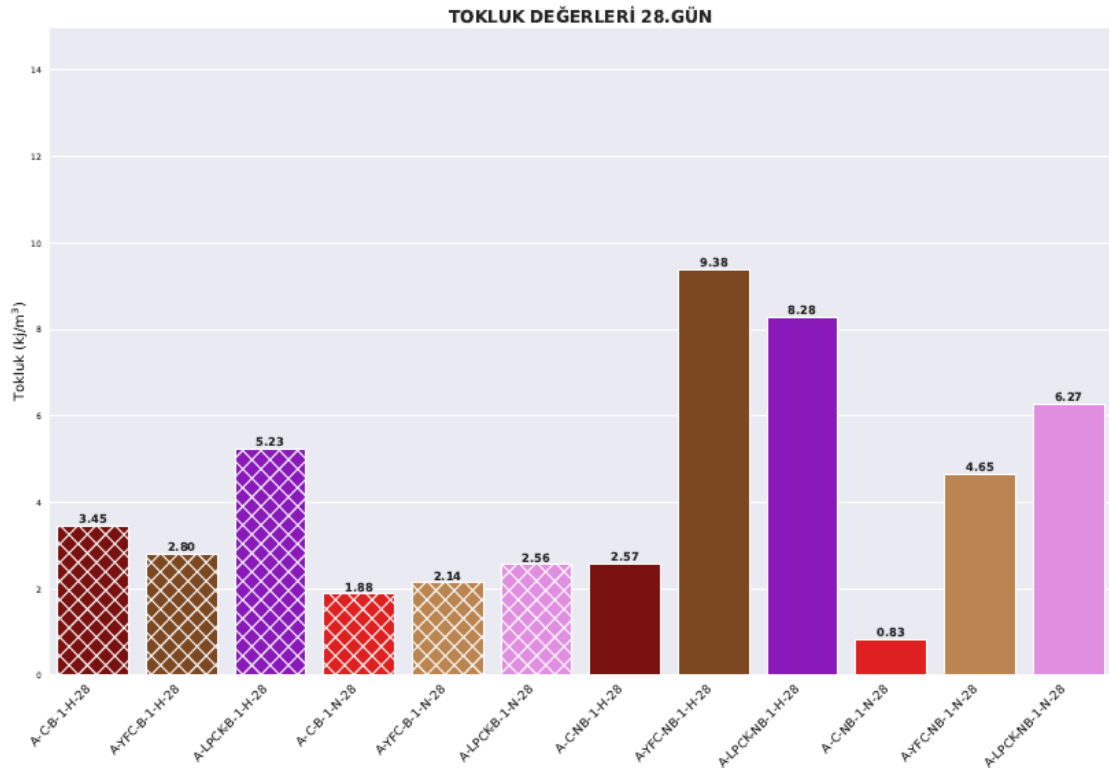
Tüm serilerde boşluk modifikasyonu açısından değerlendirme yapıldığında kusur etkisinin olumsuz etkisi olduğu görülmektedir. Hava kürü etkisi altındaki numunelerde

boşluk modifikasyonu C serisinde %60 bir düşüş gösterirken YFC ve LPCK serilerinde benzer değerlerde sonuçlar vermiştir.

Tüm serilerin ÇD değerleri ile İÇD değerlerini incelediğimizde grafik değerleri benzer özellikler gösterirken İÇD değerleri ÇD değerlerinin yaklaşık %90'ına denk geldiği sonuçları vermiştir.

4.2.4.4 Ahmetli 1. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler hava kürü ile NaOH kürü etkisi altında tokluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır.

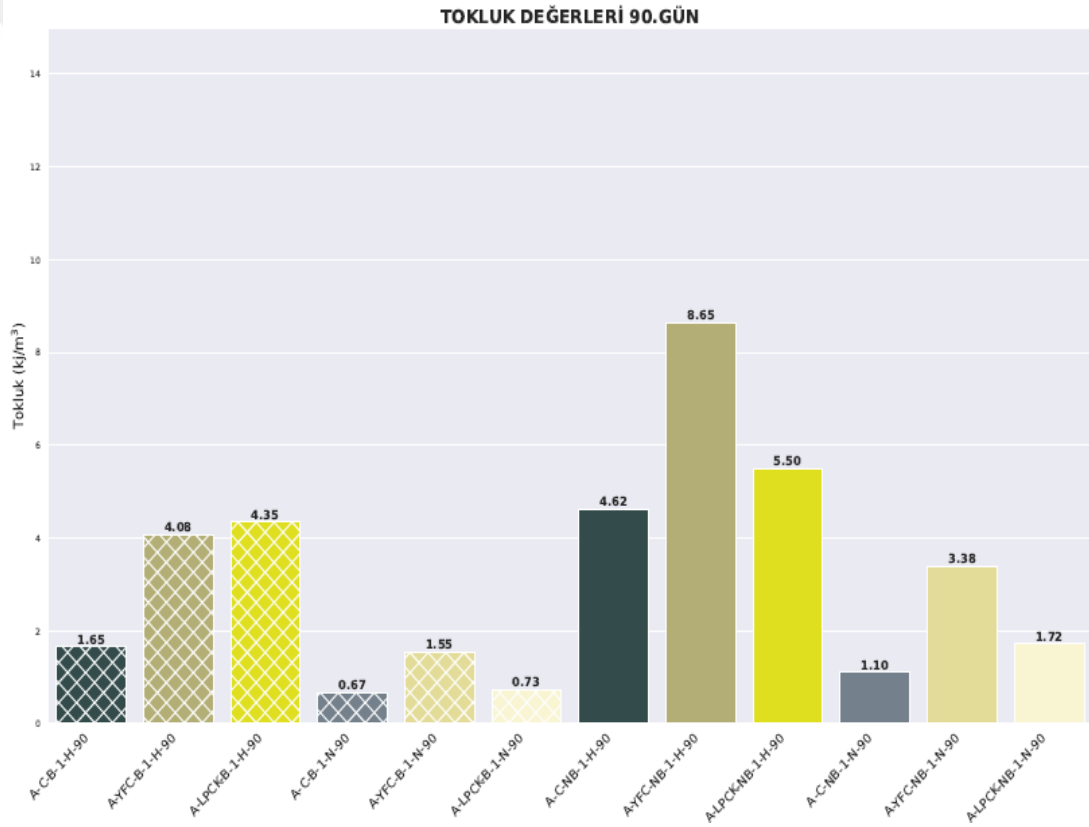


Şekil 4.38 Ahmetli 1.set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri

Şekil 4.38’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, hava kürü etkisi altındaki YFC serisi

boncuksuz numunelerde (A-YFC-NB-1-H-28) gözlenmiştir (9.38 kJ/m^3). En düşük tokluk değeri ise C serisi NaOH kürü etkisi altındaki boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-N-28) gözlenmiştir (0.83 kJ/m^3). Puzolan ikameli YFC ve LPCK serilerinin yalnız çimento ile hazırlanan C serilerine göre daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin tokluk değerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından tüm serilerde daha düşük sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.39 Ahmetli 1.set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri

Şekil 4.39’da Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set kompozitlerin hava kürü-NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, BŞD değerinin de en yüksek olduğu, hava kürü etkisi altındaki C serisi boncuksuz numunelerde (A-YFC-NB-1-H-90)

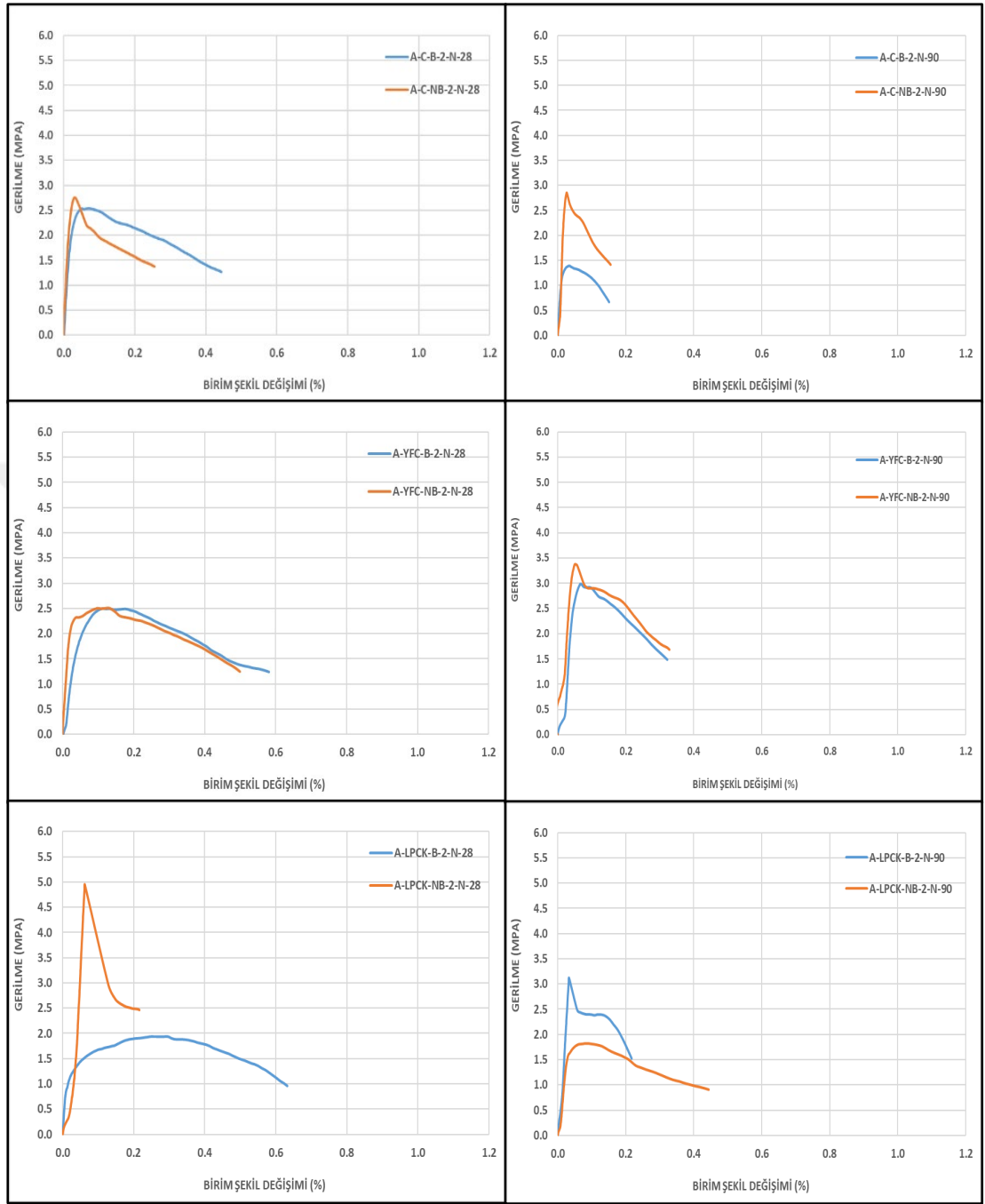
gözlenmiştir (8.65 kJ/m³). En düşük tokluk değeri ise C serisi NaOH kürü etkisi altındaki boncuklu numunelerde (A-C-B-1-N-90) gözlenmiştir (0.67 kJ/m³).

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin tokluk değerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu hem hava kürü hem de NaOH kürü açısından tüm serilerde daha düşük sonuçlar vermiştir.

Hava kürü altındaki numunelerin NaOH kürü altındaki numunelere göre boşluk modifikasyonu olan/olmayan tüm seriler için ASR etkisi nedeniyle ciddi oranda daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

4.2.5 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Deney çalışmasının bu aşamasında Ahmetli agregaları ile üç farklı karışım olarak hazırlanan Ahmetli 2. set kompozitlerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan, farklı kür koşulları altında bulunan numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda alınan veriler doğrultusunda Şekil 4.39'da 28 günlük ve 90 günlük **gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri** oluşturulmuştur. Bu grafiklerin değerlendirilmesi sonucu kompozitlerin çekme dayanımları, BŞD yüzdeleri, İÇD ve tokluk değerleri belirlenmiştir.



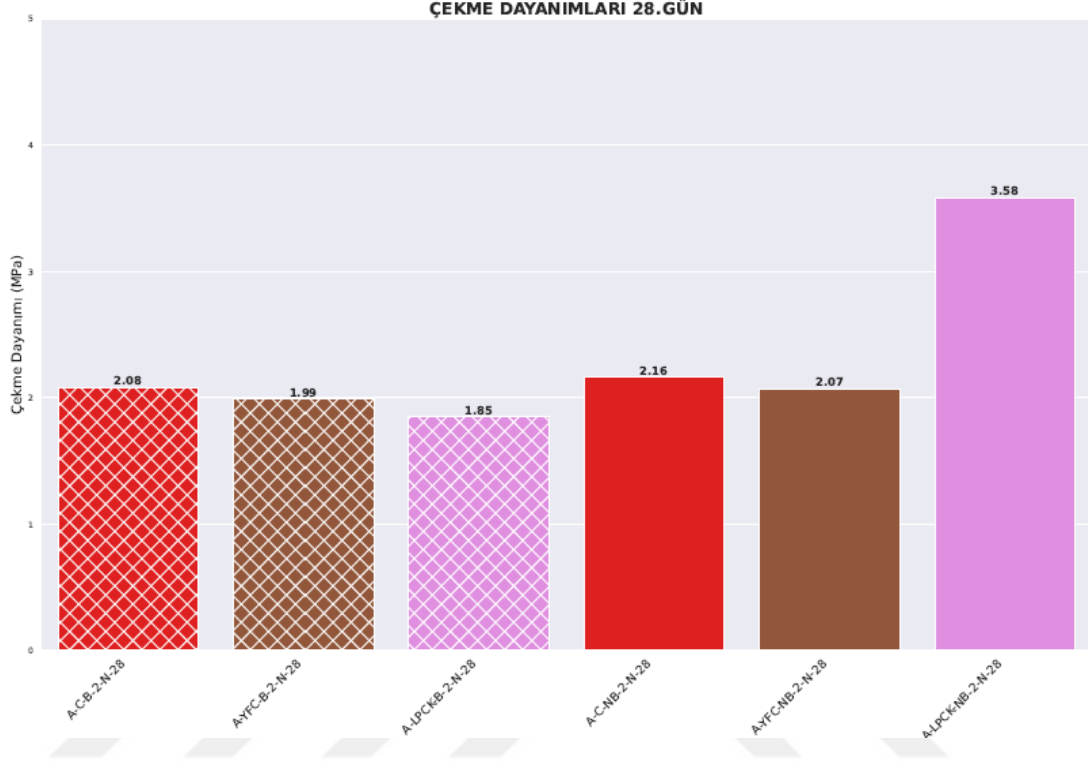
(a)

(b)

Şekil 4.40 Ahmetli 2. set kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri a) 28 gün b) 90 gün

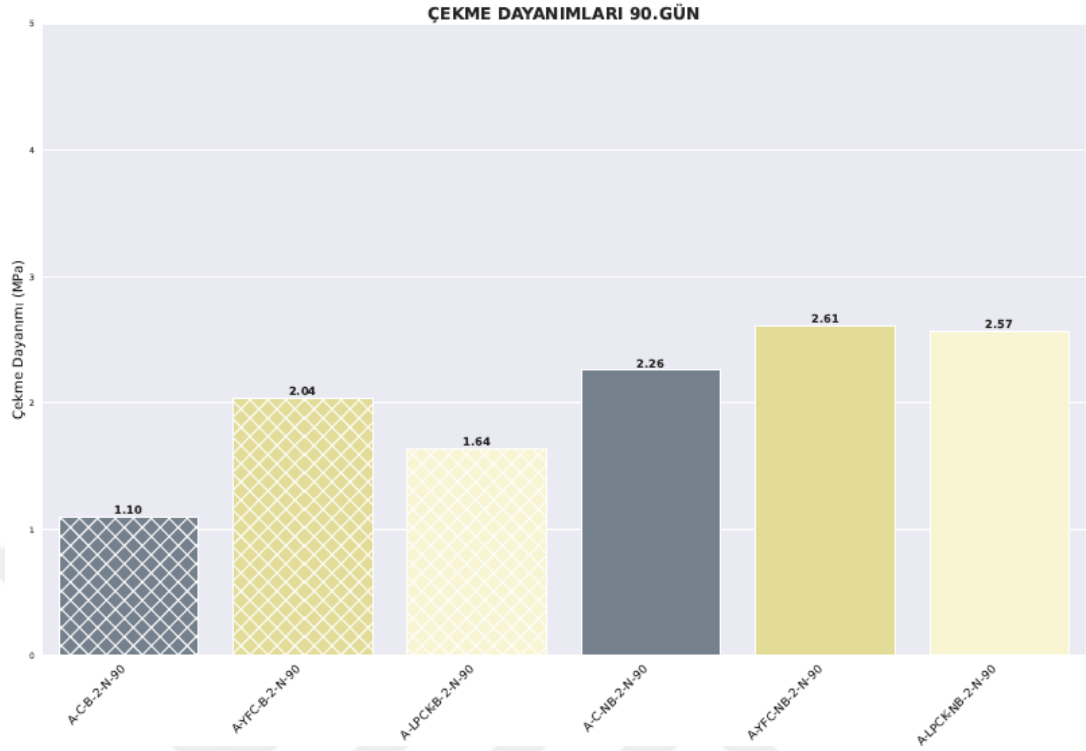
4.2.5.1 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında çekme dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.41 Ahmetli 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları

Şekil 4.41’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Boşluk modifikasyonu NaOH kürü etkisi altında C serisi ve YFC serisinde benzer özellikler gösterirken LPCK serisinde ise boşluk modifikasyonu olan seri boşluk modifikasyonu olmayan seriye göre oldukça düşük değerde sonuç göstermiştir. En yüksek çekme dayanımını veren seri boşluk modifikasyonu olmayan LPCK serilerinde (A-LPCK-NB-2-N-28) görülmüştür (3.58 MPa).



Şekil 4.42 Ahmetli 2.set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları

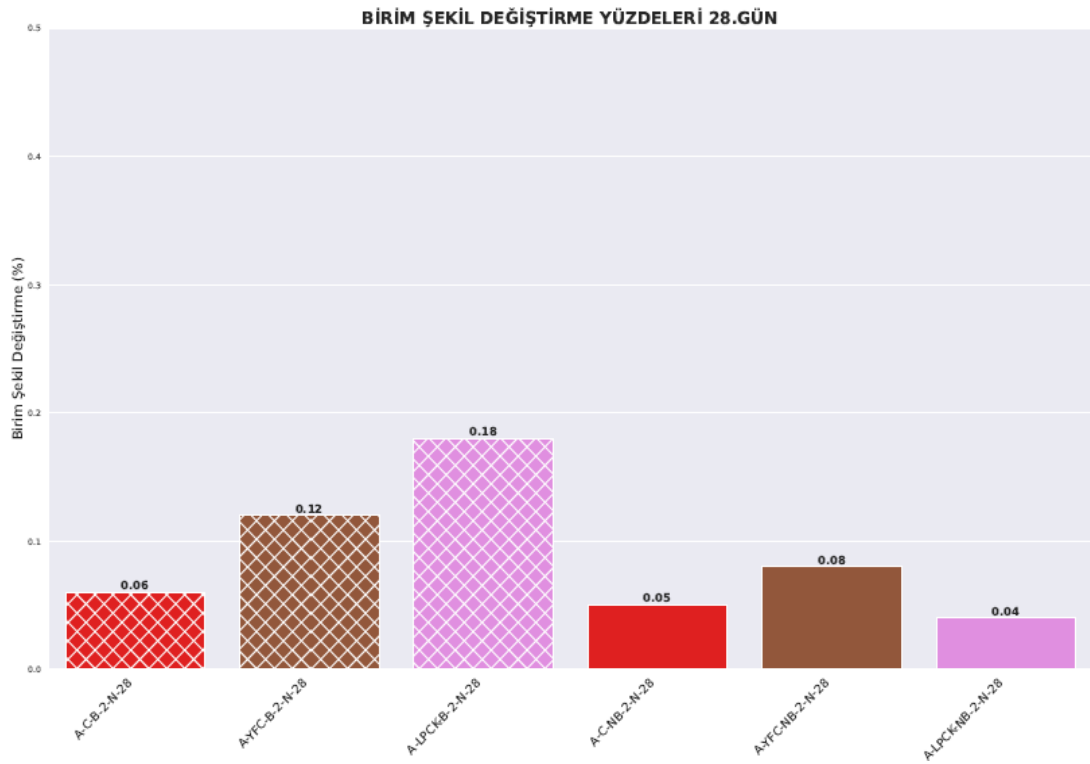
Şekil 4.42’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. En yüksek ÇD değerine YFC serisinin boşluk modifikasyonu olmayan numunelerinde (A-YFC-NB-2-N-90) gözlemlenmiştir (2.61 MPa). Seride hem kusur etkisi olmaması hem de 90 günlük yaş süresinin YFC’nin daha çok reaksiyona girip boşlukları azaltmasında etkili olduğundan dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Geçirimsizliğin artması sayesinde ÇD değerlerinde artışlar görülmüştür.

En düşük ÇD ise boşluk modifikasyonu olan C serisinde (A-C-B-2-N-90) gözlemlenmiştir (1.10 MPa). Çimento dozajının yüksek olması nedeniyle alkalilerin girdiği reaksiyonlar ve kusur etkisi bu sonucun ortaya çıkmasında en önemli etkenler olduğu düşünülmektedir.

ASR etkisi çekme dayanımlarında boncuk ilavesine göre farklılıklar yaratmaktadır. Boncuk ilavesi nedeniyle karışımlarda oluşan geçirimsizlik ASR etkisinin artmasına ve ÇD değerlerinin azalmasına neden olmaktadır.

4.2.5.2 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değiştirme Yüzdelерinin Değerlendirilmesi

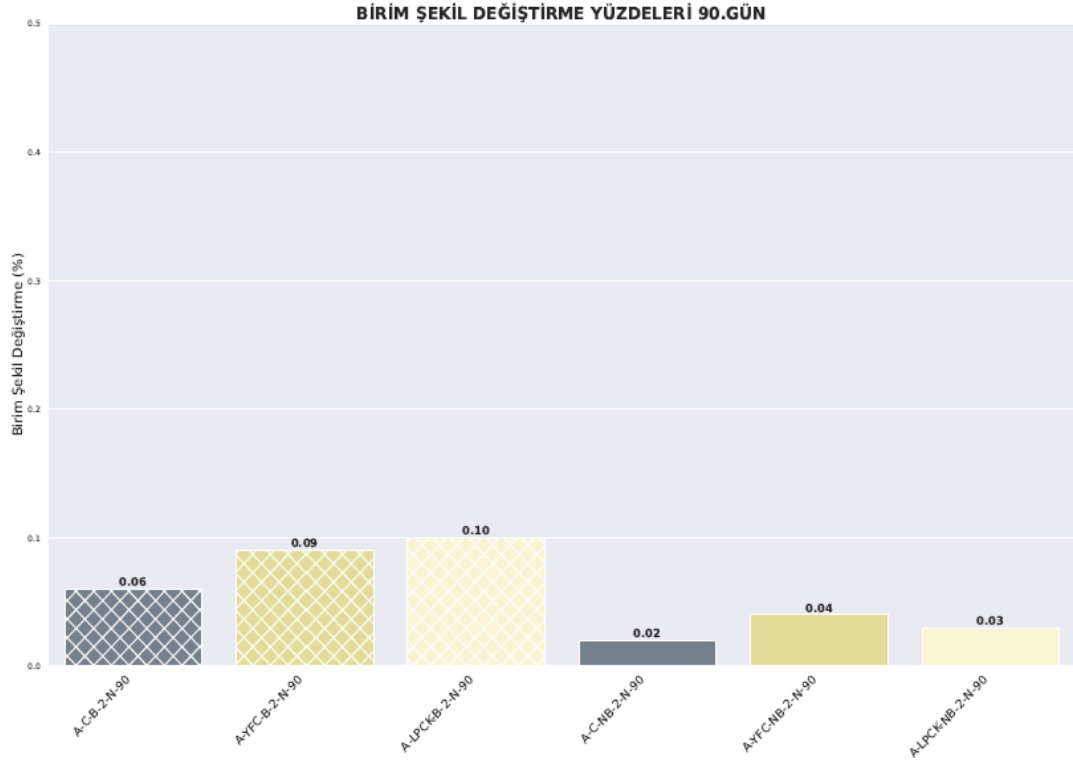
Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında BŞD yüzdeleri açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.43 Ahmetli 2.set kompozitlerin 28. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.43'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün BŞD değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD (%) LPCK serisi boncuksuz numunelerinde (A-LPCK-B-2-N-28) görülmüştür (%0.18).

Boşluk modifikasyonu etkisi tüm serilerde BŞD açısından daha yüksek değerleri vermiştir. Özellikle puzolan ikameli YFC serisinde %50, LPCR serisinde ise oldukça yüksek sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonunun BŞD değerini geliştirmesi açısından olumlu etki yarattığı söylenebilmektedir.



Şekil 4.44 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.44'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün BŞD değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek BŞD (%) LPCR serisinin boncuksuz numunelerinde (A-LPCR-B-2-N-90) görülmüştür (%10).

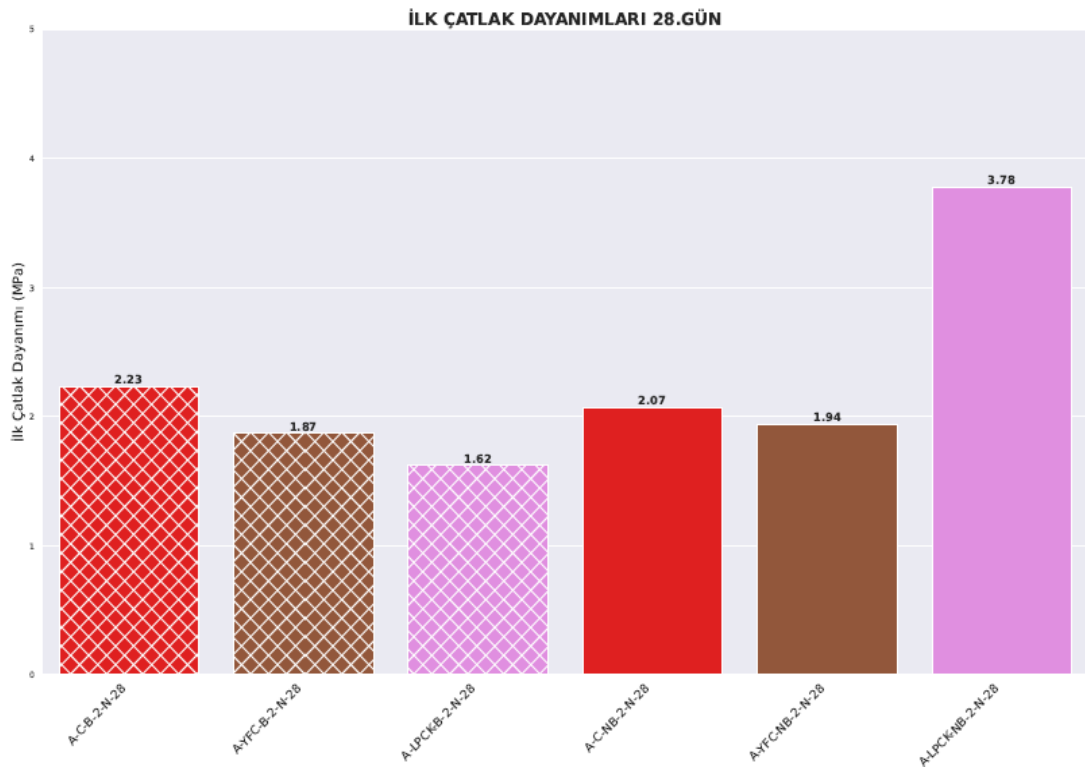
Boşluk modifikasyonu açısından değerlendirme yapıldığında tüm serilerde olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Kusur etkisinin BŞD değerlerini geliştirdiği söylenebilir.

Yaş kürü açısından değerlendirme yaptığımız zaman 28 günlük BŞD değerlerinin 90 günlük BŞD değerlerine göre boncuklu numunelerde ortalama %40, boncuksuz serilerde ise ortalama %60 oranında yüksek sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

BŞD değerleri ASR etkisinden dolayı boncuklu numunelerde daha yüksek sonuçlar vermektedir. NaOH kürü etkisi altında kalan boncuklu numuneler genişmeye daha meyilli olduklarından dolayı BŞD değerleri boncuksuz numunelere göre artış göstermektedir.

4.2.5.3 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında ilk çatlak dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.

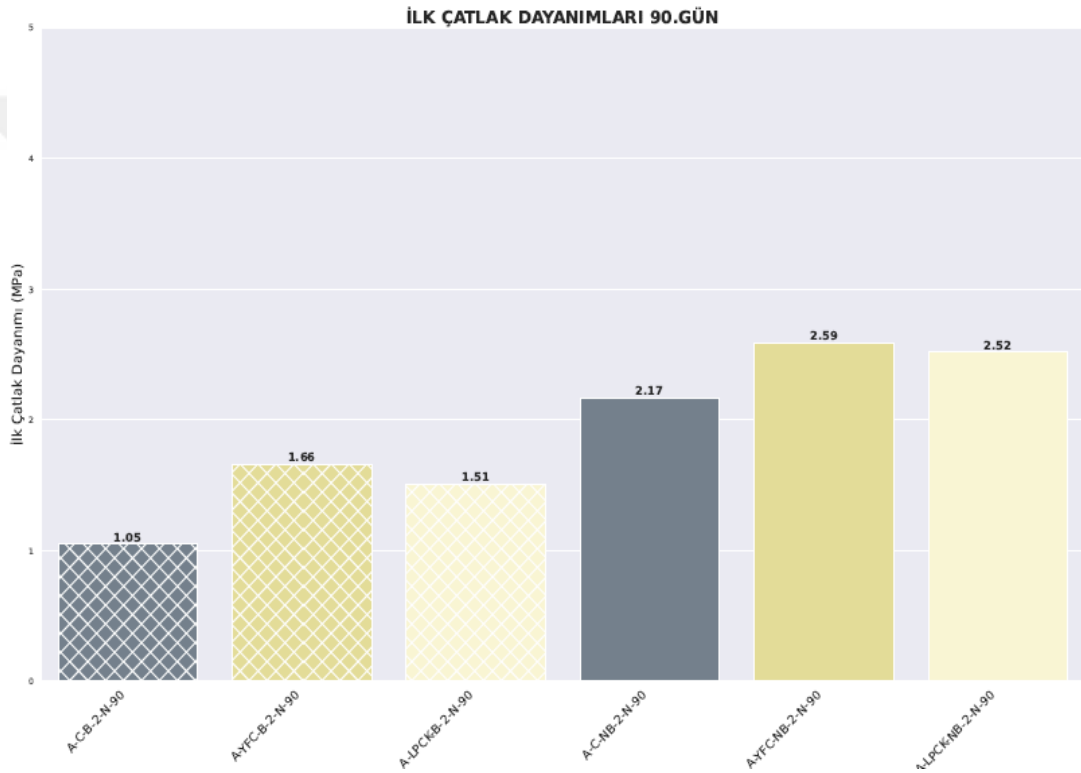


Şekil 4.45 Ahmetli 2.set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.45'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün ilk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. İÇD değerleri, boşluk modifikasyonu olan C ve YFC serilerinde

boşluk modifikasyonu olmayan C ve YFC serilerine göre düşük oranda artış göstermiştir. LPCK serilerinde ise %60 oranlarında bir azalma göstermiştir. En yüksek İÇD değerine LPCK serisinin boncuksuz numunelerinde (A-LPCK-NB-2-N-28) ulaşılmıştır (3.78 MPa).

Tüm serilerde İÇD grafiğinin ÇD grafiği ile benzer bir yapıda olduğu ortaya gözlenmiştir. Tüm serilerin numunelerinde ÇD değerlerinin %90'ı İÇD değerlerine denk geldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.46 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları

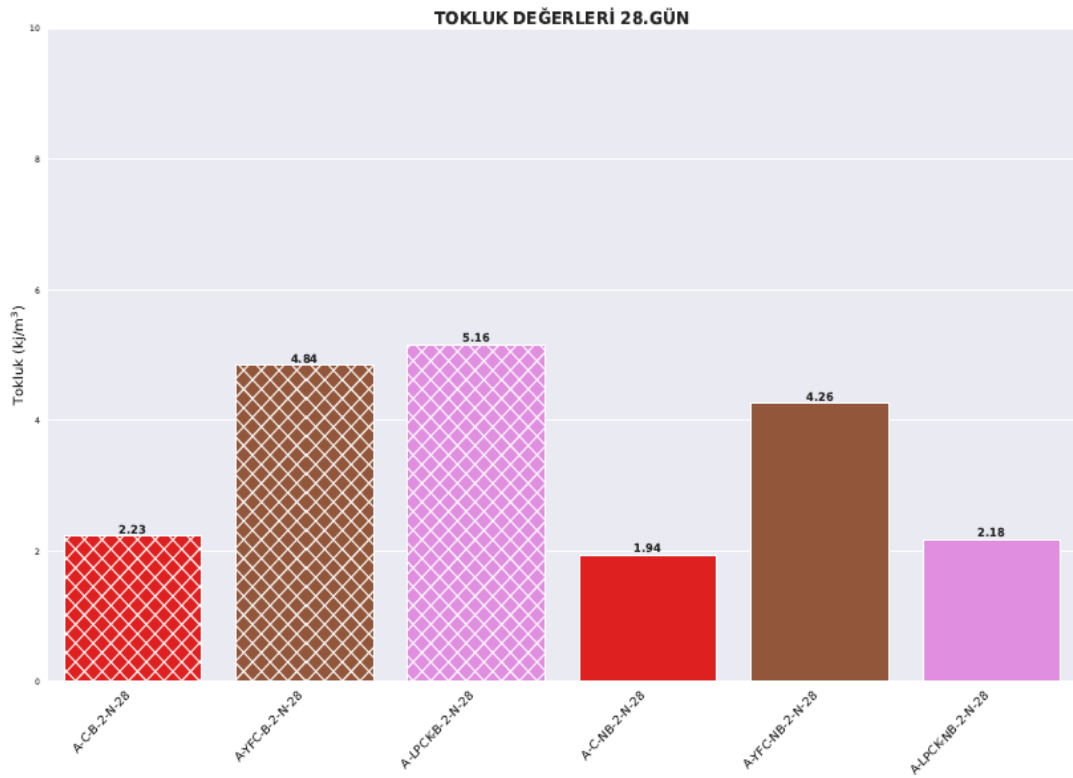
Şekil 4.46'da Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün ilk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. Tüm serilerde boşluk modifikasyonunun belirgin bir fark yarattığı gözlenmemiştir. Boşluk modifikasyonu ilk çatlak dayanımlarında ortalama %50 azalma göstermiştir. En yüksek İÇD değerine YFC serisi boncuksuz numunelerinde (A-YFC-NB-2-N-90) ulaşılmıştır (2.59 MPa).

Boşluk modifikasyonu açısından değerlendirme yapıldığında kusur etkisi olan numunelerin C serilerinde %50, YFC serileri ve LPCK serilerinde %40 azalma görülmektedir.

Tüm serilerde İÇD grafiğinin ÇD grafiği ile benzer bir yapıda olduğu ortaya gözlenmiştir. Tüm serilerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan numunelerinde ÇD değerlerinin yaklaşık %95'ı İÇD değerlerinde gözlenmiştir.

4.2.5.4 Ahmetli 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında tokluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır.

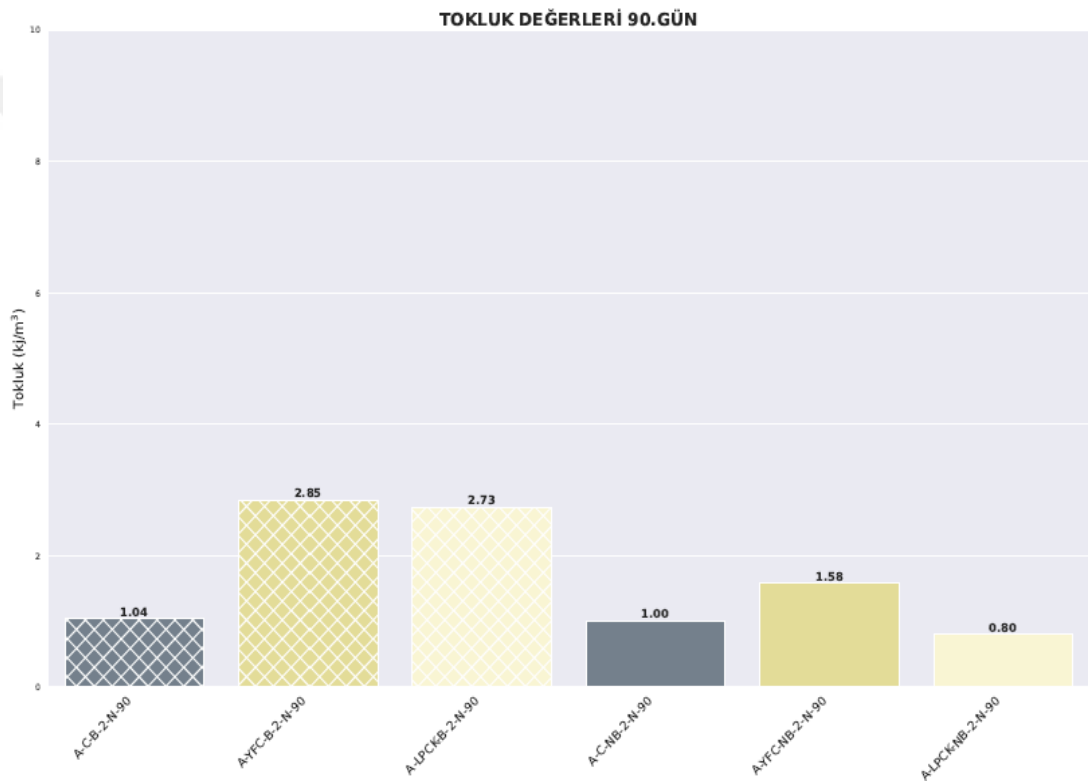


Şekil 4.47 Ahmetli 2.set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri

Şekil 4.47’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, BŞD değerinin de en yüksek olduğu,

LPCK serisi boncuklu numunelerde (A-LPCK-B-1-N-28) gözlenmiştir (5.16 kJ/m^3). En düşük tokluk değeri ise C serisi boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-N-28) gözlenmiştir (1.94 kJ/m^3).

Tüm serilerde inceleme yapıldığında kusur etkisinin C serisi ve YFC serisinde tokluk değerinde yaklaşık %10'luk bir azalma ile benzer sonuçlar ortaya çıkardığı gözlenmiştir. LPCK serisinde ise boşluk modifikasyonu olan numuneler olmayan numunelere göre yaklaşık %60 oranında yüksek değer vermiştir.



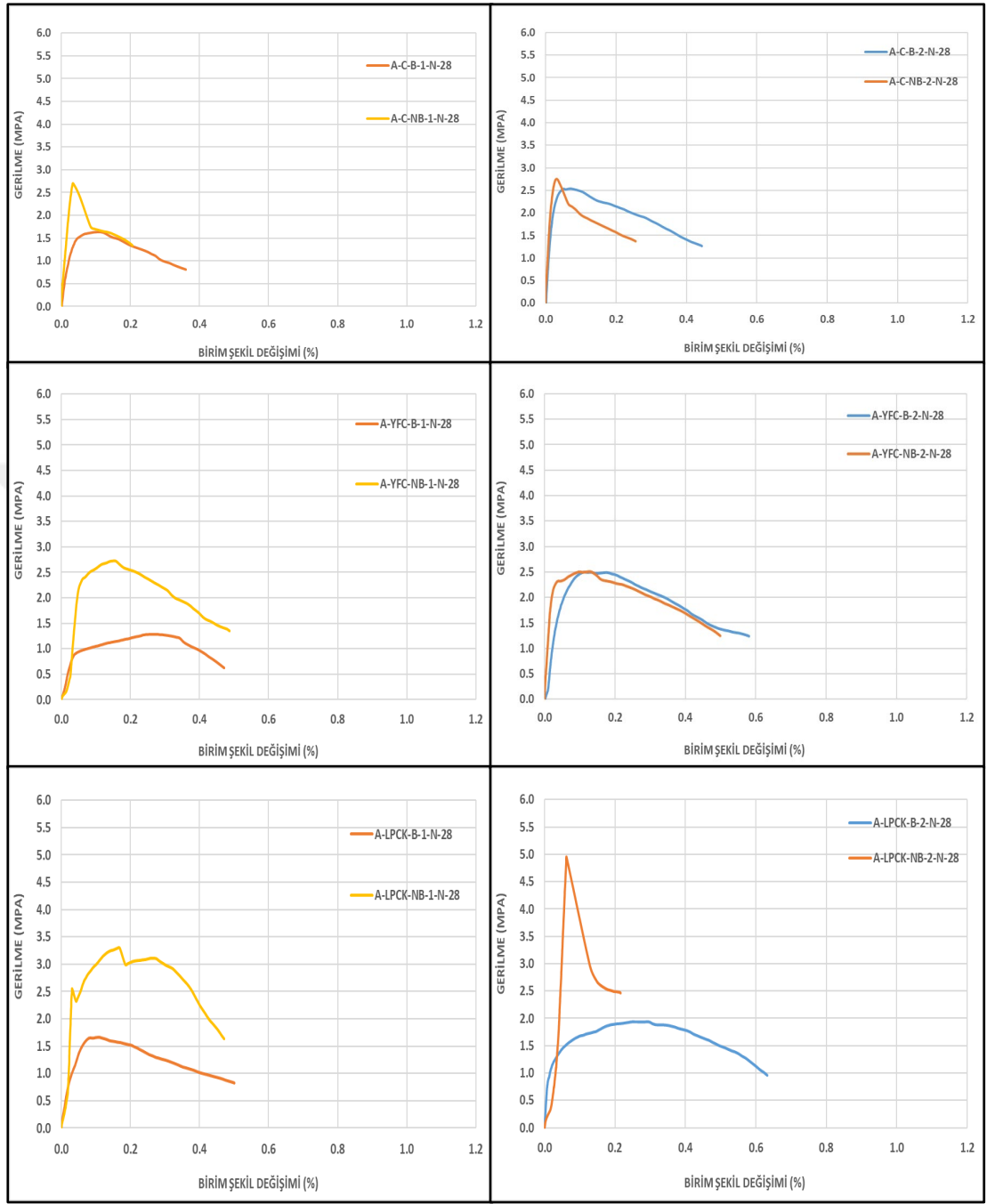
Şekil 4.48 Ahmetli 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri

Şekil 4.48’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek tokluk değeri, YFC serisi boncuksuz numunelerde (A-YFC-B-1-N-90) gözlenmiştir (2.85 kJ/m^3). En düşük tokluk değeri ise C serisi boncuksuz numunelerde (A-C-NB-1-N-90) gözlenmiştir (1.00 kJ/m^3).

BŞD değerleri ile aynı özellikte sonuçlar veren tokluk değerleri de boncuk etkisi nedeniyle daha yüksek sonuçlar vermiştir. ASR nedeniyle oluşan genleşmeler BŞD yüzdesini arttırdığı için boncuklu numunelerin tokluk değerlerinde de boncuksuz numunelere göre daha yüksek sonuçlar gözlemlenmiştir.

4.2.6 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Değerlendirilmesi

Deney çalışmasının bu aşamasında Ahmetli agregaları ile üç farklı karışım olarak hazırlanan Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin boşluk modifikasyonu olan/olmayan, farklı kür koşulları altında bulunan numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda alınan veriler doğrultusunda Şekil 4.48’de 28 günlük ve Şekil 4.49’da 90 günlük gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerin değerlendirilmesi sonucu kompozitlerin çekme dayanımları, BŞD yüzdeleri, İÇD ve tokluk değerleri belirlenmiştir.

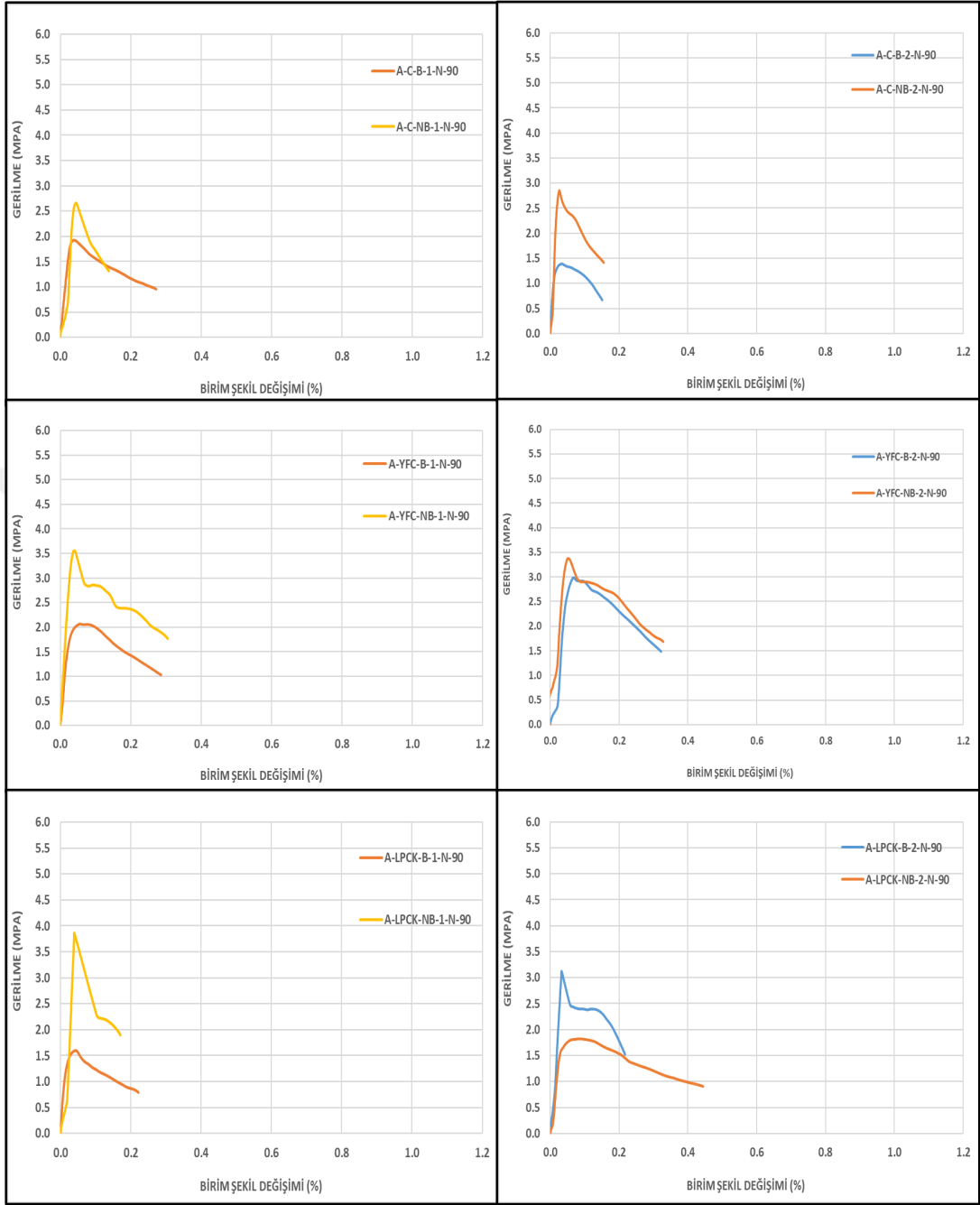


(a)

(b)

Şekil 4.49 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

a) 1. set b) 2. set



(a)

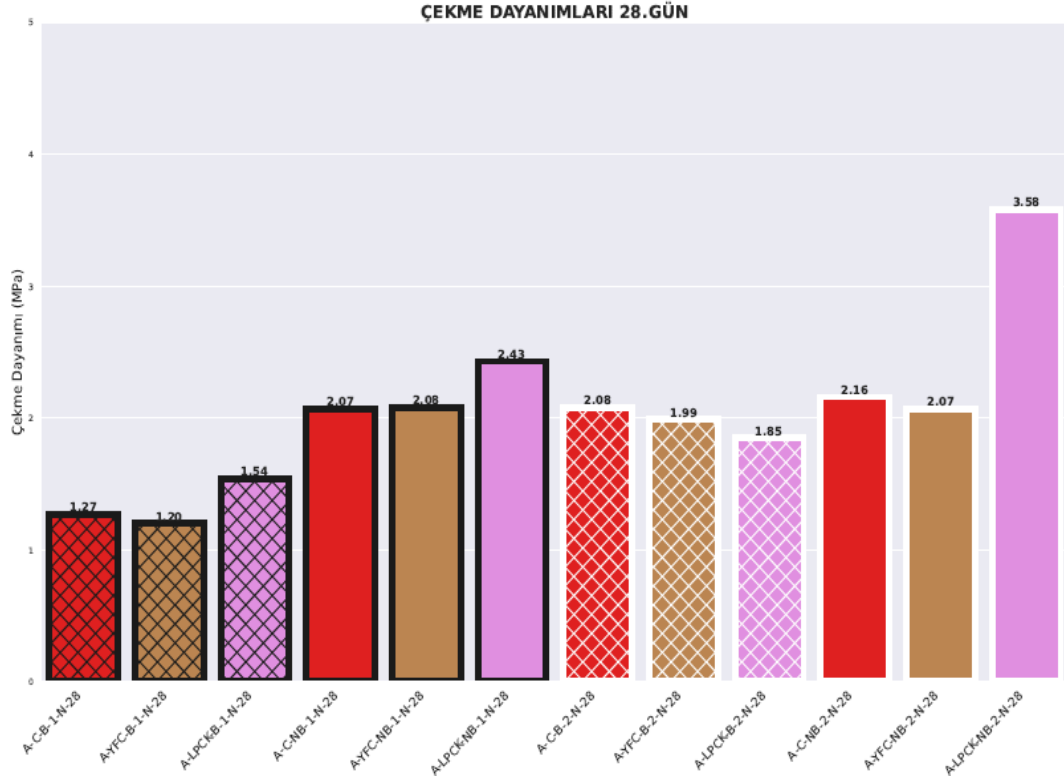
(b)

Şekil 4.50 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

a) 1. set b) 2. set

4.2.6.1 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında çekme dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



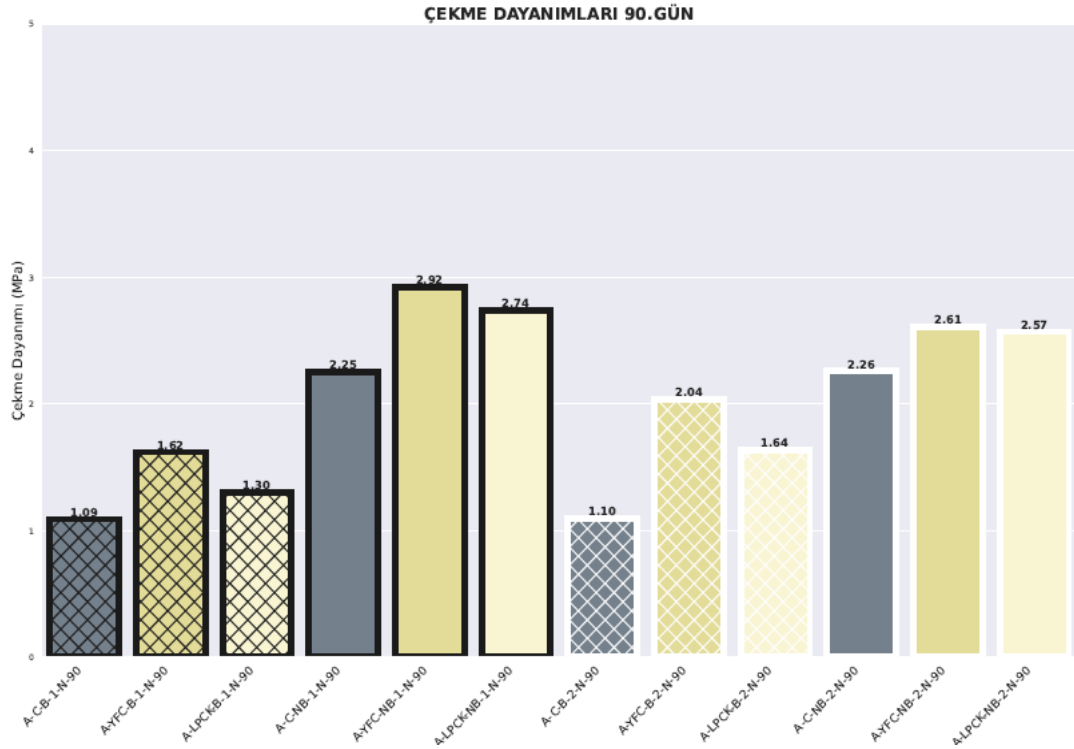
Şekil 4.51 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün çekme dayanımları

Şekil 4.51’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28.gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Ahmetli serilerinin 28 günlük 1. set ve 2. set karşılaştırmalarında boşluk modifikasyonu etkisini incelediğimizde her iki set için de boşluk modifikasyonunun daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Boşluk modifikasyonu olan C serisi ve YFC serilerinde 2. set numuneler ve 1. set numuneler benzer bir davranış gösterirken, LPCK serisinde ise ortalama %30 oranında bir artış olduğu gözlenmiştir.

Boşluk modifikasyonu olmayan C serisi ve YFC serilerinde 2. set numuneler 1. set numunelere göre ortalama %50, LPCK serisinde ise ortalama %50 oranında bir artış olduğu gözlenmiştir.

En yüksek değer 2. set boşluk modifikasyonu olmayan LPCK serisinde (B-LPCK-NB-2-N-28) gözlemlenmiştir (3.58 MPa).



Şekil 4.52 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün çekme dayanımları

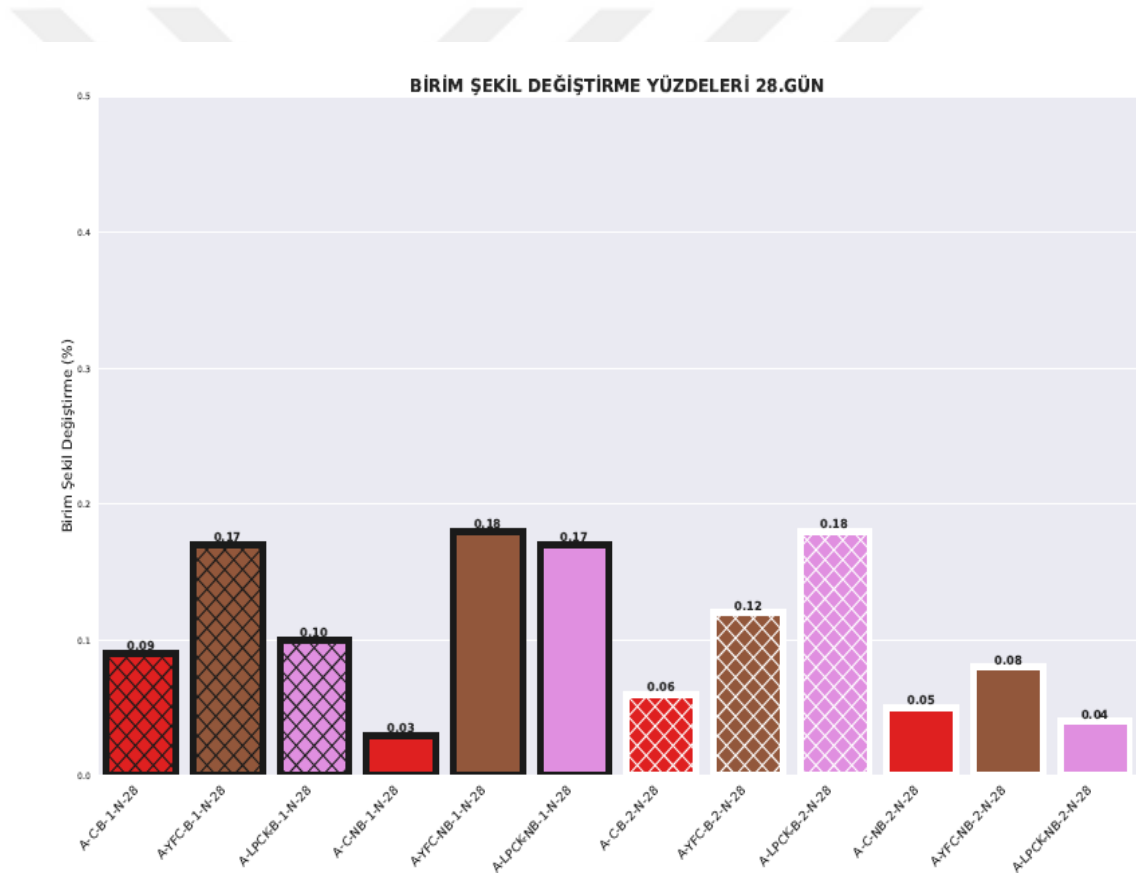
Şekil 4.52’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. 1. set ve 2. set numunelerin 90 günlük çekme dayanım sonuçları incelendiğinde çekme dayanımları açısından benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Her iki set için boşluk modifikasyonu açısından bakıldığında 1. set ve 2. set numunelerinde ÇD değerlerinde olumsuz etki yaratmıştır. Boşluk modifikasyonu 1.set numunelerin tüm serilerinde %50, 2. set numunelerde ise C serisinde %50, YFC serisinde %20, LPCK serisinde ise %60 azalma yaratmıştır.

Boşluk modifikasyonu olan/olmayan tüm serilerde 2. set numuneler ve 1. set numuneler benzer bir davranış göstermiştir.

En yüksek değer boşluk modifikasyonu olmayan YFC serisinde (B-YFC-NB-2-N-90) gözlenmiştir (2.92 MPa).

4.2.6.2 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Birim Şekil Değişirme Yüzdelерinin Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında BŞD yüzdeleri açısından karşılaştırılmıştır.

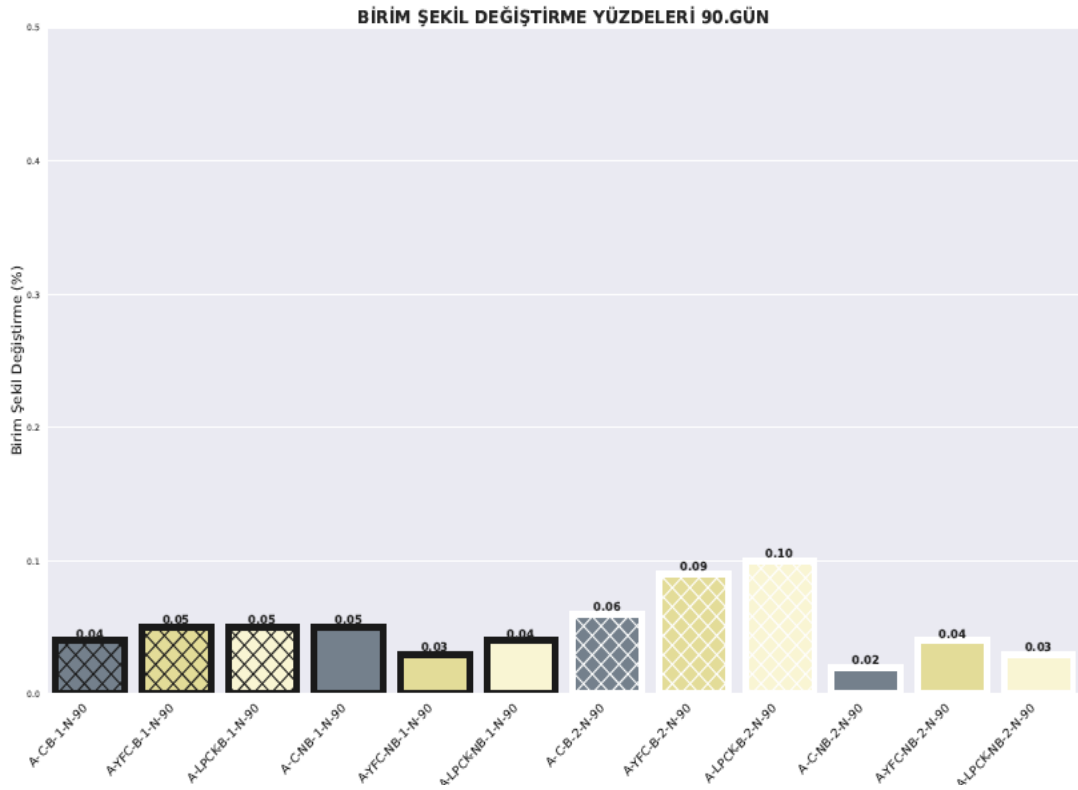


Şekil 4.53 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün birim şekil değişirme yüzdeleri

Şekil 4.53'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün günlük BŞD değerleri karşılaştırılmıştır. Tüm serileri hem boşluk modifikasyonu hem de kür koşulu altında

değerlendirdiğimizde 1.set numunelerin 2.set numunelere göre BŞD açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

En yüksek BŞD (%) 1.set kompozitin YFC serisindeki boncuksuz numunelerinde (A-YFC-NB-2-N-28) ve 2.set kompozitin LPCK serisindeki boncuklu numunelerinde (LPCK-N-2-N-28) gözlemlenmiştir (%0.18).



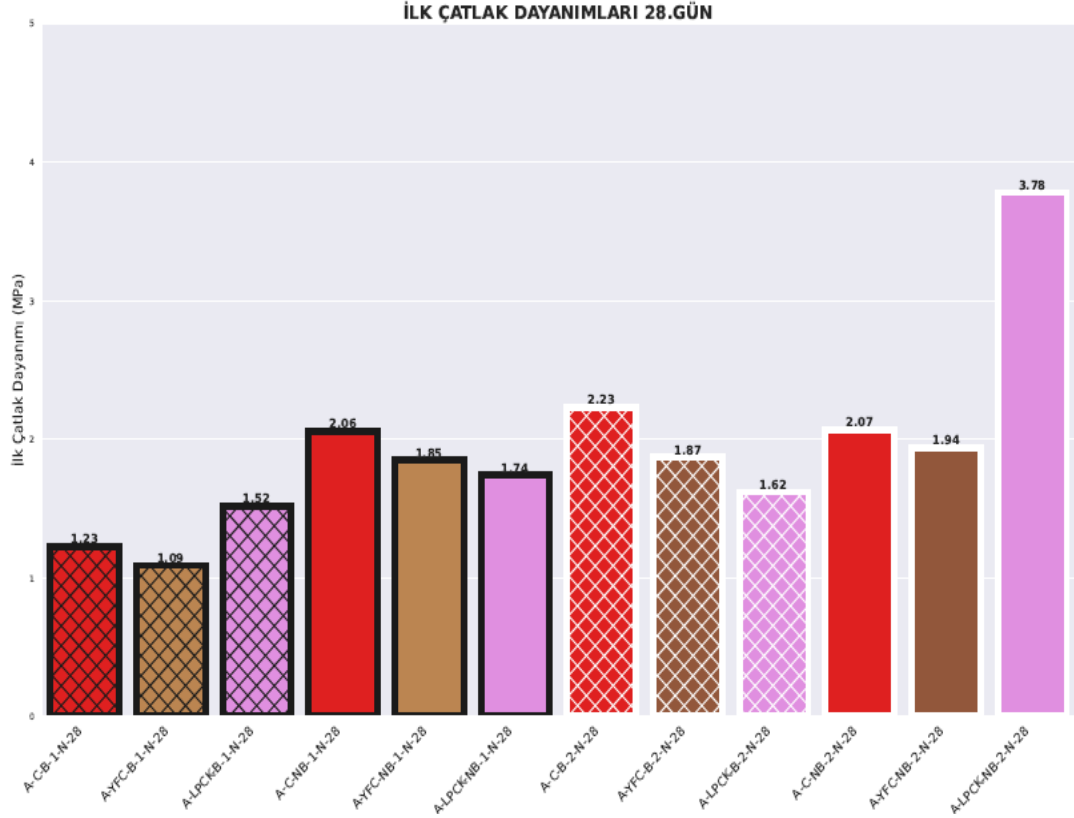
Şekil 4.54 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün birim şekil değiştirme yüzdeleri

Şekil 4.54'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün günlük BŞD değerleri karşılaştırılmıştır. Tüm serileri hem boşluk modifikasyonu hem de kür koşulu altında değerlendirdiğimizde 2. set boncuklu numunelerin daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

En yüksek BŞD (%) 2. set kompozitin LPCK serisindeki boncuklu numunelerinde (A-LPCK-B-2-N-90) gözlemlenmiştir (%0.10).

4.2.6.3 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında ilk çatlak dayanımları açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.55 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün ilk çatlak dayanımları

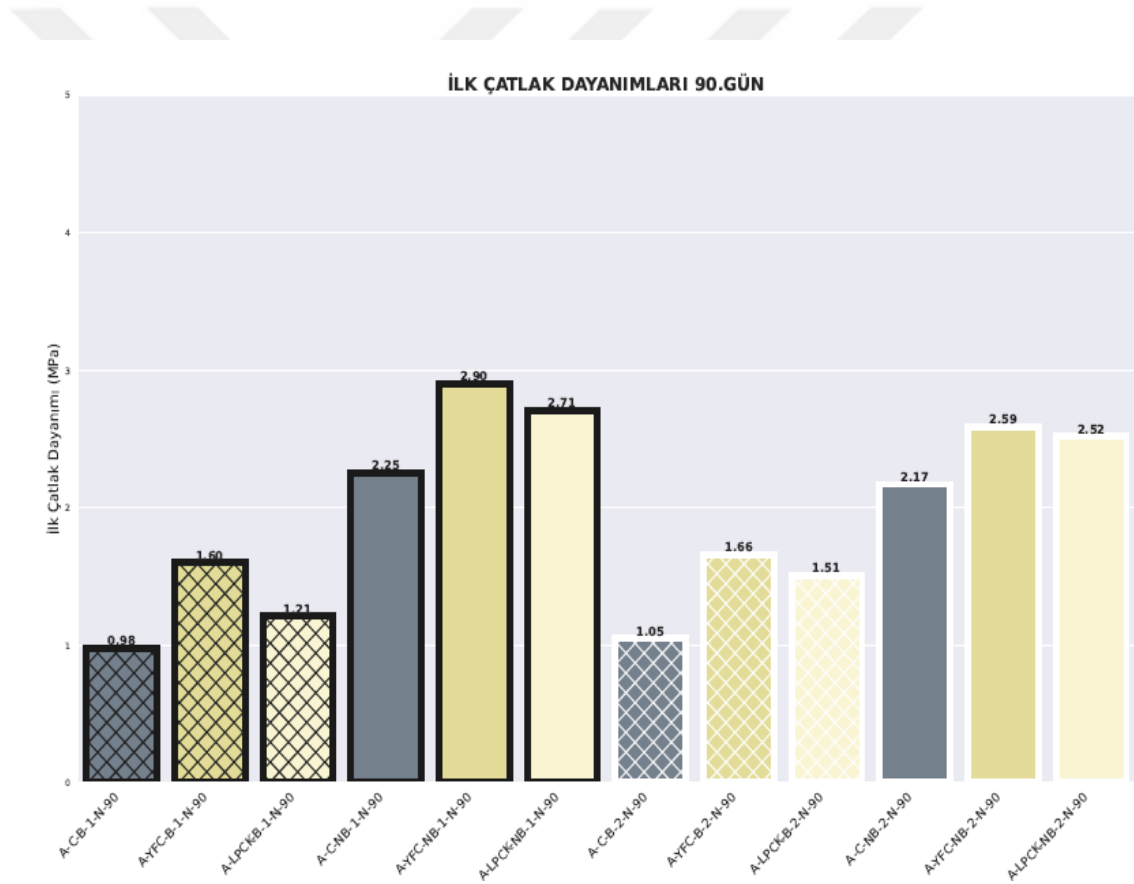
Şekil 4.55'te Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün günlük ilk çatlak dayanımları karşılaştırılmıştır. Boşluk modifikasyonu her iki set için daha düşük sonuçlar vermiştir.

Boşluk modifikasyonu olmayan 2. set numuneleri, boşluk modifikasyonu olan 1. set numunelerine göre C serisi ve YFC serilerinde benzer sonuçlar verirken, LPCK serisinde ise yaklaşık %100 oranında daha yüksek sonuç vermiştir.

Boşluk modifikasyonu olan 2. set numuneleri, boşluk modifikasyonu olmayan 1. set numunelerine göre C serisi ve YFC serilerinde ortalama %40, LPCK serisinde ise benzer sonuçlar vermiştir.

Tüm serilerde inceleme yapıldığında İÇD değerleri ÇD değerleri ile benzer grafik histogramlarını vermiştir. ÇD değerlerinin yaklaşık %90'ı İÇD değerlerini göstermiştir.

En yüksek değeri LPCK serisi 2. set boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde (A-LPCK-NB-2-N-28) görülmüştür (3.78 MPa).



Şekil 4.56 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün ilk çatlak dayanımları

Şekil 4.56'da Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün günlük ilk çatlak

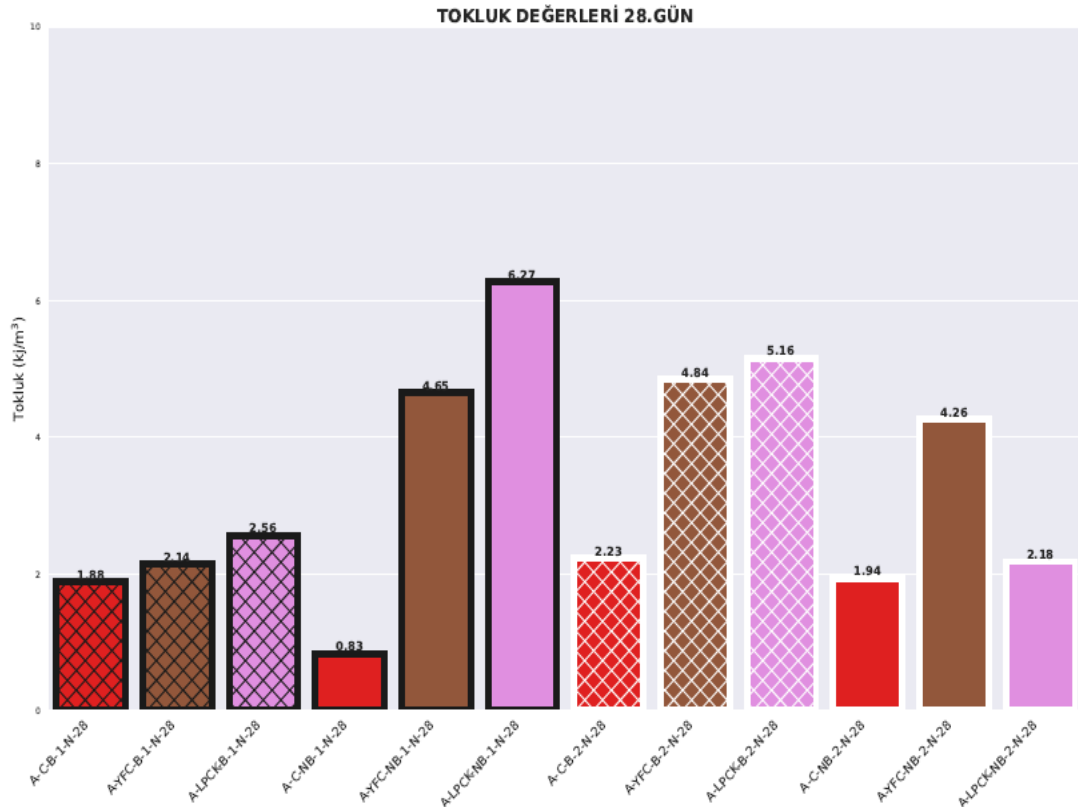
dayanımları karşılaştırılmıştır. Boşluk modifikasyonu her iki set için daha düşük sonuçlar vermiştir.

Boşluk modifikasyonu olan/olmayan 1. set ve 2. set kompozitlerin İÇD değerleri benzer sonuçları vermiştir. Boşluk modifikasyonu açısından tüm serilerde ortalama %45 oranında bir azalma gerçekleşmiştir.

En yüksek İÇD değerini YFC serisi 1. set boşluk modifikasyonu olmayan numunelerde (A-YFC-NB-1-N-90) görülmüştür (2.90 MPa).

4.2.6.4 Ahmetli 1. Set ve 2. Set Kompozitlerin Çekme Tepe Noktası Değerlerinin Değerlendirilmesi

Ahmetli agregası ile hazırlanan kompozitler NaOH kürü etkisi altında tokluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır.



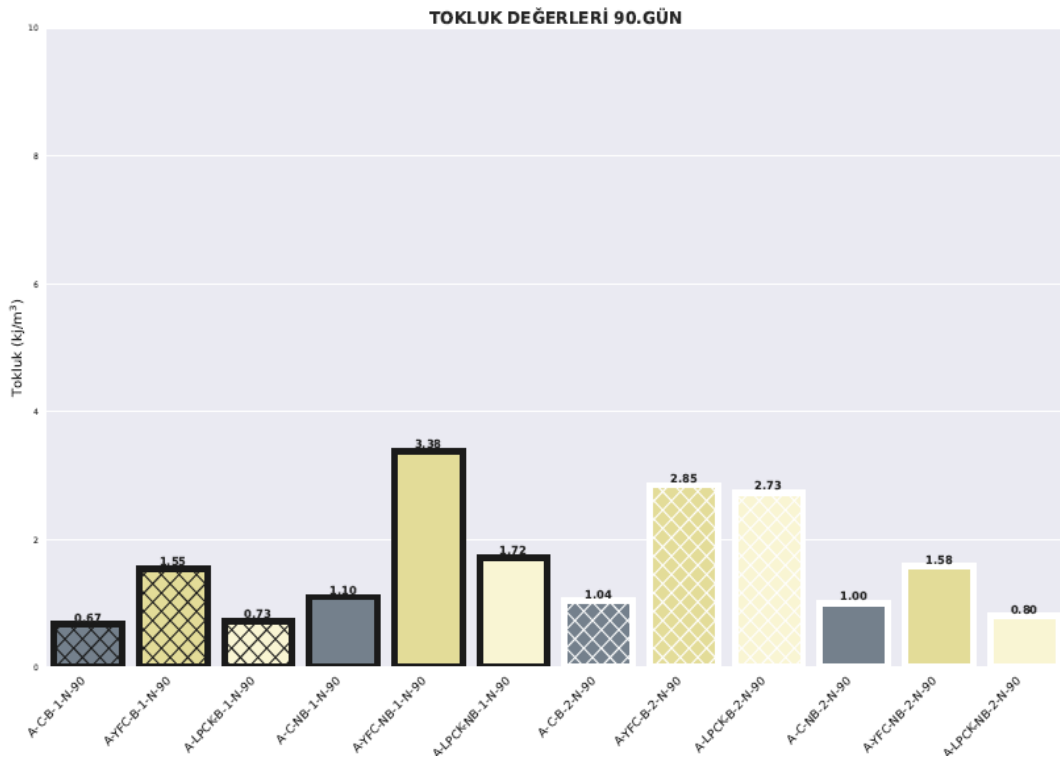
Şekil 4.57 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 28. gün tokluk değerleri

Şekil 4.57’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 28. gün günlük tokluk değerleri karşılaştırılmıştır.

Boşluk modifikasyonu olan 1. set kompozitlerde boşluk modifikasyonu olan 2. set kompozitlere göre C serisinde %10, YFC ve LPCK serisinde ise %50 oranında bir azalma görülmüştür.

Boşluk modifikasyonu olmayan 1. set kompozitlerde boşluk modifikasyonu olmayan 2. set kompozitlere göre C serisinde %50 oranında azalma, LPCK serisinde ise %70 oranında bir artış görülürken YFC serisinde benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır.

En yüksek tokluk değerine 1. set LPCK serisi boncuksuz numunelerinde (A-LPCK-NB-1-N-28) görülmüştür (6.27 kJ/m^3).



Şekil 4.58 Ahmetli 1. set ve 2. set kompozitlerin 90. gün tokluk değerleri

Şekil 4.58’de Ahmetli agregası ile hazırlanan 1. set ve 2. set kompozitlerin NaOH kürü altında boşluk modifikasyonu olan/olmayan olarak 90. gün günlük tokluk değerleri karşılaştırılmıştır.

Boşluk modifikasyonu olan 1. set kompozitlerde boşluk modifikasyonu olan 2. set kompozitlere göre C serisinde %30, YFC ve LPCK serisinde ise yaklaşık %50 oranında bir azalma görülmüştür.

Boşluk modifikasyonu olmayan 1. set kompozitlerde boşluk modifikasyonu olmayan 2. set kompozitlere göre YFC serisinde yaklaşık %50, LPCK serisinde ise %70 oranında bir azalma görülürken C serisinde benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır.

En yüksek tokluk değerine 1. set YFC serisi boncuksuz numunelerinde (A-YFC-NB-1-N-90) görülmüştür (3.38 kJ/m^3).

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Hazırlanan kompozitlerin alkali silika reaksiyonu kaynaklı genleşme kapasiteleri değerlendirildiğinde;

1. Bazalt agregasında kontrol serisi lifsiz numuneler, tüm seriler içerisinde en fazla genleşmeyi gösteren seri olmuştur (%1.082). Bunun nedeninin, serinin lifsiz ve puzolanik katkı (YFC veya LPCK) içermemesi olduğu düşünülmektedir. Lif etkisinin değerlendirilmesi açısından lifli kompozitlerde lifsiz kompozitlere göre daha az genleşme gözlemlenmiştir. Lifli kompozitlerin genleşme yüzdesinin lifsiz kompozitlerin genleşme yüzdesine göre yaklaşık %15 daha fazla olduğu bulunmuştur. Alkali-silika etkisine karşı liflerin genleşmeyi azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir. Boşluk modifikasyonu, lifli ve lifsiz kompozitlerde ayrı ayrı değerlendirildiğinde boşluk modifikasyonu olan numunelerin daha fazla genleştiği görülmüştür. Boşluk modifikasyon malzemesi olan boncukların sıcaklık etkisinden dolayı numune içerisinde ekstra genleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

2. Ahmetli kumu serileri genleşme kapasitesi değerlerinde kontrol serisi lifsiz numuneler, tüm seriler içerisinde en fazla genleşmeyi gösteren seri olmuştur (%1.022). Bunun nedeninin, serinin lifsiz ve puzolanik malzeme (YFC veya LPCK) içermemesi olduğu düşünülmektedir. Lif etkisinin değerlendirilmesi açısından lifli kompozitlerde lifsiz kompozitlere göre daha az genleşme gözlemlenmiştir. Ahmetli agregasında da lifli kompozitler lifsiz kompozitlere göre daha az genleşme göstermiştir. Alkali-silika etkisine karşı liflerin genleşmeyi azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. Boşluk modifikasyonu açısından incelediğimizde lifli numunelerde C serilerinde herhangi bir etki gözlenmemiştir. Lifsiz numunelerde ise C serilerinde boşluk modifikasyonu genleşmede yaklaşık %25 artış göstermiştir. YFC serisi ve LPCK serisi numunelerinde ise boşluk modifikasyonu genleşme açısından etkileyici bir fark göstermemiştir.

Tek eksenli çekme deneyleri sonucunda çekme dayanımları, birim şekil değiştirme yüzdeleri, ilk çatlak dayanımları ve tokluk kapasiteleri değerlendirildiğinde;

1. Çekme deneyleri sonucunda tüm numuneler arasında en yüksek değer B-C-NB-1-H-90 numunesinde gözlenmiştir (3,83 MPa). Boşluk modifikasyonu, B-C-B-1-H-90 numunesinin dayanımlarında yaklaşık %45'lik bir azalma göstermiştir (2,10 MPa). Boşluk modifikasyonunun numune içerisinde yaratmış olduğu kusurların bu sonuca etkili olduğu düşünülmektedir. Serinin NaOH kürü altında kalan numunelerinde ise (B-C-NB-1-N-90) ASR etkisinden dolayı yaklaşık %50 azalma olmuştur. Aynı serinin 28 günlük (B-C-NB-1-H-28) sonuçlarına bakıldığında 3,61 MPa değerine ulaştığı gözlenmiştir. Puzolan katkılı serilerde YFC serisi önemli ölçüde bir fark yaratmayarak 3,72 MPa çekme dayanımına ulaşmıştır. LPCK serisi ise %50 düşüş yaşayarak 1,84 MPa İÇD değerinde kalmıştır. Ahmetli kumu numunelerinde ise en yüksek çekme dayanımına A-C-NB-1-H-90 numunesinde ulaşılmıştır (3,13 MPa).

2. Birim şekil değiştirme yüzdesinde en yüksek sonuca B-YFC-NB-1-H-28 serisinde ulaşılmıştır (%0,33). ASR etkisi açısından değerlendirme yapıldığında aynı serinin NaOH kürü altındaki numunesinde %0,14 değeri ölçülmüştür. ASR etkisi nedeniyle yaklaşık %50 azalma gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonunun birim şekil değiştirme sonucuna etkisi ise %30 oranında azalma olduğu gözlenmiştir. B-YFC-B-1-H-28 serisinde BŞD %0,21 olarak ölçülmüştür. Ahmetli kumu numunelerinde ise en yüksek birim şekil değiştirme yüzdesine A-LPCK-NB-1-H-28 numunesinde ulaşılmıştır (%0,31).

3. İlk çatlak dayanımlarında en düşük değer B-C-B-1-N-90 numunelerinde gözlemlenmiştir (0,66 MPa). Numune içerisinde oluşturulan boşluk modifikasyonu nedeniyle İÇD değerinin azaldığı düşünülmektedir. Aynı serinin boşluk modifikasyonu olmayan numunelerinde ise İÇD 1,77 MPa olarak ölçülmüştür. Boşluk modifikasyonunun İÇD değerlerinde yaklaşık %50 azalma yarattığı sonucuna ulaşılmıştır.

4. Tokluk değeri en yüksek numune B-YFC-NB-1-H-28 olarak ölçülmüştür (14,63 kJ/m^3). BŞD yüzdesi en yüksek sonucu (%0,33) veren bu seride en yüksek tokluk değerine ulaşılması beklenen bir durumdur. Seri içerisinde puzolan katkı bulunması ve ASR etkisine maruz kalmadığı için numuneler arasında en yüksek tokluk kapasitesine ulaşan numune olduğu düşünülmektedir. Aynı serinin NaOH kürü altındaki numunesinde tokluk değeri 8,33 kJ/m^3 olarak ölçülmüştür. ASR etkisi nedeniyle yaklaşık %40 azalma gözlenmiştir. Boşluk modifikasyonu B-YFC-B-1-H-28 numunesinde tokluk değerinde yaklaşık %35 azalma yaratarak 9,10 kJ/m^3 olarak ölçülmüştür. Boşluk modifikasyonu serisinde ise ASR etkisi açısından değerlendirme yapıldığında B-YFC-B-1-N-28 numunesi tokluk değeri 3,58 kJ/m^3 olarak ölçülmüştür ve ASR etkisi yaklaşık %60 azalma göstermiştir. Boşluk modifikasyonunun, ASR nedeniyle oluşan genleşmeye katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Numune yaşı açısından değerlendirme yapıldığında hava küründeki YFC serisinde 28 günlük numunelerin tokluk değeri (14,63 kJ/m^3) 90 günlük numunelerin tokluk değerine (12,29 kJ/m^3) göre yaklaşık %15 daha yüksek sonuç vermiştir. Tüm serilerde tokluk değeri açısından bir değerlendirme yapılması istendiğinde YFC serisi en yüksek değeri ardından KONTROL serisi ve en düşük olarak da LPCK serisinin geldiği belirlenmiştir.

Tez kapsamında tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin minimum mekanik koşullarına ulaşamadığı için numuneler lifli kompozitler olarak değerlendirme yapılmıştır. Bu sonuçlara göre lifli kompozitlerin ASR etkisine karşı direnci düşük seviyede olarak belirlenmiştir. Matris kombinasyonu değişikliği ile matris-lif aderansı potansiyeli artırılarak deneysel çalışmalar yapılarak ilerlenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ali, F., Nadjai, A., Silcock, G. ve Abu-Tair, A. (2004). Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns. *Fire Safety Journal*, 39(6), 433-445.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2004.02.004>
- Andiç, Ö. (2002). *Alkali-silis reaksiyonunun mineral ve kimyasal katkılar yardımı ile kontrol altına alınması* [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi.
- Andiç-Çakır, Ö. (2007). *Alkali-agrega reaktivitesinin tespitinde kullanılan deney metodlarının incelenmesi* [Doktora Tezi]. Ege Üniversitesi.
- Aydın, E. G. (2012). *Çeşitli mineral katkıların betonda alkali silika reaksiyonuna etkisi* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bakhytzhan, A. (2019). *Agrega özelliklerinin betonda alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2002). *Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Bektaş, F. (2002). *Preventive measures against alkali-silika reaction* [Yüksek Lisans Tezi]. Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
- Bektaş, F. ve Turanlı, L. (2002). Liflerin alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu çatlama üzerindeki etkileri. *Çimento ve Beton Dünyası*, 7(37), 56-61.
<https://search.trdizin.gov.tr/yayin/detay/31815/>
- Bentur, A. ve Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Yayınları
- Çelik, Ö., Yurter, G., Kan, S. ve Yeprem, H. A. (2004). Farklı Puzolanik Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 5(2), 147-154.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/doujournal/issue/66651/1042846>

- Diamond, S. (1980). *Mechanisms of alkali-silica reaction* [Bildiri Özeti]. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japonya.
<https://icaarconcrete.org/wp-content/uploads/2021/10/8ICAAR-DiamondS-1.pdf>
- Dinçdemir, İ. (2015). *Alkali-silika reaksiyonunun iyileştirilmesinde mineral ve kimyasal katkıların kullanımı* [Doktora Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Duyal, C. (2020). *Polimer-modifiye çimento esaslı hibrit lifli hafif kompozit geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Erdoğan, T. Y. (2007). *Beton*. O.D.T.Ü. Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, Genişletilmiş 2. Baskı.
- Erol, Ü. (2017). *Özellikleri nano boyutta modifiye edilmiş yüksek hacimde uçucu kül içeren tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit malzeme*. Literatür Yayıncılık.
- Farny, J. A. ve Kosmatka, S. H. (1997). *Diagnosis and control of alkali aggregate reactions in concrete*. Portland Cement Association.
- Felekoğlu, B. (2009). *Yüksek performanslı mikro beton tasarımı* [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Felekoglu, B., Tosun-Felekoglu, K., Ranade, R., Zhang, Q. ve Li, V. C. (2014). Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC. *Composites Part B: Engineering*, 60, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.12.076>
- Fischer, G. ve Li, V. C. (2002a). Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC). *Structural Journal*, 99(1), 104-111.
- Fischer, G., ve Li, V. C. (2002b). Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions. *Structural Journal*, 99(6), 781-790.

- French, W. J. (1980). Reactions between aggregates and cement paste-an interpretation of the pessimum. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 13(4), 231-247.
- Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanese, C. ve Zerbino, R. (2019). Alkali-silica reaction in plain and fibre concretes in field conditions. *Materials and Structures*, 52(2), 1-15. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-019-1332-2>
- Gödek, E. (2016). *Pratikte kullanılabilir polimerik lif katkı ve çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Hernández-Cruz, D., Hargis, C. W., Dominowski, J., Radler, M. J. ve Monteiro, P. J. (2016). Fiber reinforced mortar affected by alkali-silica reaction: A study by synchrotron microtomography. *Cement and Concrete Composites*, 68, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.003>
- Hobbs, D. W. (1988). *Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Thomas Telford.
- Ichikawa, Y. ve England, G. L. (2004). Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures. *Nuclear Engineering and Design*, 228(1-3), 245-259. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.06.011>
- Kojima, S., Sakata, N., Kanda, T. ve Hiraishi, T. (2004). Application of direct sprayed ECC for retrofitting dam structure surface-application for Mitaka-Dam. *Concrete Journal*, 42(5), 135-139.
- Kunieda, M. ve Rokugo, K. (2006). Recent progress on HPFRCC in Japan required performance and applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 19-33. <https://doi.org/10.3151/jact.4.19>
- Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering-The design of cementitious composites for civil engineering applications. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48.
- Li, V. C. (1997). Engineered Cementitious Composites-Tailored Composites through Micromechanical Modeling to appear. N. Banthia, A. Bentur ve A. Mufti (Ed.) *Fiber Reinforced Concrete. Present and the Future* içinde (1-38). Canadian

Society of Civil Engineers.

https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/84667/csce_tailoredecc_98.pdf?sequence=1.

Li, V. C., Fukuyama, H. ve Mikame, A. (1998). Development of ductile engineered cementitious composite elements for seismic structural applications [Bildiri Özeti]. *Proceedings structural engineering world congress (SEWC)*, San Francisco, Amerika.

Li, V. C. ve Kanda, T. (1998). Innovations forum: engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290899-1561%281998%2910%3A2%2866%29>

Li, V. C., Wang, S. ve Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 98(6), 483-492.
https://www.researchgate.net/publication/280229569_Tensile_strain-hardening_behavior_of_PVA-ECC

Li, V. C. (2003). On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications. *Journal of advanced concrete technology*, 1(3), 215-230.
https://www.researchgate.net/publication/237783722_On_Engineered_Cementitious_Composites_ECC_A_Review_of_the_Material_and_Its_Applications

Lim, I., Chern, J. C., Liu, T., & Chan, Y. W. (2012). Effect of ground granulated blast furnace slag on mechanical behavior of PVA-ECC. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), 11.
<https://jmstt.ntou.edu.tw/journal/vol20/iss3/11>.

Naaman, A. E. (2001). Reinforced concrete. K. H. J. Buschow, W. C. Robert, C. F. Merton, I. Bernhard, J. K. Edward, M. Subhash, V. Patrick (Ed.), *Encyclopedia of materials: science and technology* içinde (8095–109). Oxford: Elsevier.

- Noushini A., Vessalas K., Ghosni N., Samali B. (2013). *Effect of polyvinyl alcohol fibre and fly ash on flexural tensile properties of concrete* [Bildiri Özeti]. 22nd Australasian conference on the mechanics of structures and materials, ACMSM 2012. Sidney, Avustralya.
- Pedneault, A. (1996). *Development of testing and analytical procedures for the evaluation of the residual potential of reaction, expansion and deterioration of concrete affected by ASR*, M.Sc. Memoir, Laval University. Canada.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/03047/02.cfm>
- Pehlivan, S. (2019). *Mineral katkıların alkali-silika reaksiyonuna etkisinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Avrasya Üniversitesi.
- Poole, A. B. (1992). Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. R. N. Swamy (Ed.), *The Alkali-Silica Reaction in Concrete* içinde (30-53), Nostrand Reinhold, New York. <https://doi.org/10.4324/9780203036631>
- Ramlochan, T., Thomas, M. ve Gruber, K.A. (2000) The Effect of Metakaolin on Alkali silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, (30), 339-344.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00261-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00261-6)
- Ramyar, K. (2013). Betonda Alkali-Silis Reaksiyonu: Bir Derleme. *Türkiye Hazır Beton Birliği*, 70-82. https://www.thbb.org/media/2050/makale2_120.pdf
- Rokugo, K., Kunieda, M. ve Lim, S. C. (2005). Patching repair with ECC on cracked concrete surface. *Proceedings of ConMat*, 5, 22-24.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.146.2838&rep=rep1&type=pdf>
- Subaşı, S., Çullu, M., ve Bolat, H. (2010). Beton Kanseri-Alkali Silika reaksiyonu. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 1(A), 526-540.
<https://www.firatakademi.com/articleDetails.asp?lang=2&article=NWSA-3033-1707>

- Stark, D. (1994). Alkali-Silica Reactions in Concrete. P. Klieger ve J. Lamond (Ed.), *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials* içinde (365-371). ASTM special technical publication.
https://www.researchgate.net/publication/288135809_Alkali_silica_reactions_in_concrete
- Swamy, R. N. (1990). The Alkali-Silica reaction in concrete. *Thomson Litho Ltd.*, Scotland, UK.
- Şahmaran, M., Li, V.C. (2008) Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 72-81.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.004>
- Şahmaran, M., ve Li, V. C. (2009). Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC. *Materials And Structures*, 42(5), 593-603.
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-008-9406-6>
- Şahmaran, M. ve Li, V. C. (2010). Engineered cementitious composites: Can composites be accepted as crack-free concrete? *Transportation Research Record*, 2164(1), 1-8. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/2164-01>
- Tosun-Felekoğlu, K., Gödek, E., Keskinates, M. ve Felekoğlu, B. (2017). Utilization and selection of proper fly ash in cost effective green HTPP-ECC design. *Journal of Cleaner Production*, 149, 557-568.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.117>
- Varol, O. O., Ayhan, M., ve Oyan, V. (2018). Van İli Kuzeyinde Yer Alan Ortaç Volkanik Agregalarda ASR Etkilerinin İncelenmesi. Dicle Üniversitesi *Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(2), 817-827.
<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/532427>
- Wang, S. ve Li, V. C. (23-26 Mayıs 2005). *Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances* [Bildiri Özeti]. Proceedings of International RILEM workshop on HPFRCC in structural applications. Honolulu, Hawaii.

https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/84790/PVAECC_WangAndLi2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Yasin, E. (25 Ağustos 2022). *Beton ve çimento*. www.betonvecimento.com

Yıldırım, K. (2013). *Betonda alkali silika reaksiyonunun azaltılmasında mineral katkı kombinasyonlarının optimizasyonu* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.

