
Araştırma Makalesi / Research Article

Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Taban Külü İnce Agregaları ile Üretilmiş Betonun Gerilme Şekil Değiştirme Davranışının İncelenmesi

Memduh KARALAR*, Selin KONAK

*Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak
(ORCID: 0000-0002-4595-8971) (ORCID: 0000-0002)-6505-1082*

Öz

Kömürle çalışan termik santrallerde, yanma sırasında, yanma kazanının altında mikron (μm) boyutundaki taban külü adında atık/yan ürün meydana gelmektedir. Taban külleri de genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek harç ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Tüm bu atıklar/yan ürünler, doğaya bırakıldıkları takdirde çevreye zarar veren ve depolanmaları ve/veya bertaraf edilmeleri ise ekonomik açıdan kayıplara sebep olan malzemelerdir. Bu tür atıkların başka bir sektörde, farklı bir ürün üretiminde değerlendirilmeleri hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük avantajlar kazandıracaktır. Bu çalışmada, granüle yüksek fırın cürufu ve taban külünün, klasik beton üretiminde ince agrega olarak kullanılan kumun yerine belirli oranlarda ikame edilerek, bu atıkların betonun mekanik özellikleri üzerinde ki etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Özellikle, betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı, Elastisite Modülü, tokluğu ve son olarak basınç mukavemeti değişimi üzerinde durulmuştur. Çalışmada dört aşamalı deneysel bir program izlenmiştir. İlk aşamada, kullanılacak tüm malzemelerin karakterizasyonunu içeren bir dizi deney yapılmıştır. İkinci aşamada, doğal ince agrega kullanılarak hazırlanacak referans betonun, karışım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise, taban külü ve yüksek fırın cürufu, ayrı ayrı, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ince agrega yerine kullanılarak, beton numuneleri hazırlanmıştır. Dördüncü ve son aşamada ise, hazırlanan numunelerin 7 ve 28 günlük standart su kürü uygulamasından sonra, mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak, granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü gibi endüstriyel atık/yan ürünlerin, beton tasarımı içinde ince agrega olarak kullanımının, betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Granüle Yüksek Fırın Cürufu, Taban Külü, Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı.

Examination of Stress-Strain Behavior of Concrete Product by Fine Aggregates with Granulated Blast Furnace Slag and Bottom Ash

Abstract

In coal-fired thermal power plants, the waste/by product deposited under the combustion boiler in the size of micron (μm) occurred during combustion and it is called as "bottom ash". The bottom ash that generally shows a puzzolanic feature due to its composition containing silica and alumina is also used as an additive material in mortar or concrete. These two types of industrial wastes/by products damage the natural environment and lead to economic losses because of their storage and/or disposal. Use of these wastes in different products and industries can likely contribute to the production of sustainable materials and provide important benefits environmentally and economically. In this study, it is aimed to investigate the effects of the blast furnace slag and the bottom ash on mechanical properties of concrete, substituting these wastes in specific proportions instead of sand used as the fine aggregate in the conventional concrete production. This study has particularly focused on the stress-strain behavior, modulus of elasticity, toughness and compressive strength of finally the change in concrete. In this study, a four-stage experimental program has been followed. In the first stage, a number of experiments that consist of the characterization of all materials to be used have been applied. In the second stage, the composition design of the standard concrete has been prepared using the standard fine aggregate (river sand). In the third stage, the blast furnace slag and the bottom ash have separately been replaced with the fine aggregate in concrete at the percentages of 25, 50, 75, and 100. In the fourth stage, finally, mechanical properties of specimens have been determined after

*Sorumlu yazar: memduhkaralar@beun.edu.tr
Geliş Tarihi: 26.12.2018, Kabul Tarihi: 08.03.2019

7 and 28 days standard water cure. Consequently, the effect of the use of some industrial wastes/by-products (i.e., granulated blast furnace slag and bottom ash) in concrete as the fine aggregate on mechanical properties of concrete have been investigated.

Keywords: Granulated Blast Furnace Slag, Bottom Ash, Stress-Strain Behavior.

1. Giriş

Beton, çimento, doğal veya yapay iri agrega, su ve gerektiğinde kimyasal veya mineral katkının karıştırılması ile yapılan ve çimentonun hidratasyonu ile dayanım kazanan malzemedir [1]. Burada çimento, kum ve iri agrega tanelerini birbirine bağlar. Kum ise iri agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompozitesini artırır. Çakıl veya kırmataş taneleri betonda iskelet görevi yaparak dış kuvvetlere karşı koyarlar. Beton, çağdaş toplumların kullandıkları yapı malzemelerinin en önemlilerinden bir tanesidir. Günümüzde, dünyada her yıl yaklaşık 5,5 milyar ton beton üretildiği bilinmektedir. Bu miktar dünya nüfusuna bölündüğünde kişi başına yaklaşık 1000 kg beton üretildiği ortaya çıkar. Ancak, beton bu kadar yaygın kullanılan bir malzeme olmasına karşın, çoğunlukla düşük nitelik düzeylerinde üretilir [2]. Taze haldeyken plastik bir kıvama sahip olması, betona istenen herhangi bir şeklin verilmesini sağlar. Uygun bir şekilde tasarlanmış, üretilmiş, yerleştirilmiş, sıkıştırılmış ve bakımı yapılmışsa uzun yıllar her hangi bir bakım, onarım gerektirmeden hizmetini sürdürür [2]. Türkiye’de hidroelektrik ve termik santraller kurulmasının sebebi enerji açığının önlenmesidir. Hidroelektrik santraller ve düşük kaliteli linyit kömürü yakan termik santrallerde enerji üretimi sırasında büyük miktarda yan ürün olarak bilinen ‘‘Uçucu Kül’’ ve ‘‘Taban Külü’’ oluşmaktadır. Bu sebeple enerji ihtiyacı artışına paralel olarak çözülmesi zorunlu teknik, ekonomik ve çevresel sorunlar da giderek artmaktadır. Termik santrallerde oluşan atık malzemenin %15’ini taban külleri oluşturmaktadır. Taban küllerinin beton üretiminde agrega yerine kullanılması çimento maliyetinde azalma sağlaması bakımından yararlar sağlamaktadır. Termik santral atığı olan taban küllerinin çimento ve beton üretiminde kullanılması hususundaki çalışmalar Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufuna göre çok azdır [3]. Termik santrallerde açığa çıkan taban külü ve yüksek fırın cürufunun depolama, nakliyat ve çevre kirliliği gibi önemli sorunlarını önlemek için çimento üretiminde teknik yönden kullanılabilirliği, beton üretiminde ise ince ve kaba agrega yerine kullanımı değerlendirilmelidir. Literatürde bu konu üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır. Maier ve Durham’ın yaptığı araştırmada geri dönüştürülmüş beton agregasının, ezilmiş cam atığının ve granüle yüksek fırın cürufunun hem taze hem de sertleşmiş betondaki etkileri gözlemlenmiştir. Hazırlanan numunelerde granüle yüksek fırın cürufu çimento yerine, atık cam ise kaba ve ince agrega yerine kullanılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufunun %50 ikame oranında kullanıldığında zararlı sonuçların azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca geri dönüşümlü malzemeyle yapılan çimento karışımının işlem görmemiş malzemeyle yapılan çimento karışımıyla karşılaştırıldığında %50’ye kadar dayanım ve dayanıklılık kazandığı sonucuna varılmıştır [4]. Singh ve Siddique’nin araştırmasında betonun kuruma rötresi, klorür iyon geçirgenliği, dış kaynaklı sülfat ve sülfirik asit saldırısına karşı dayanımı gibi dayanıklılık özellikleri ve basınç dayanımları laboratuvar ortamında testlere tabi tutulmuştur. Gözlemlere göre taban külüyle yapılan betonun geleneksel betona göre sülfirik asit saldırısına karşı çok az bir üstünlük sergilediği tespit edilmiştir. Taban küllü betonun sülfat saldırısına karşı davranışı neredeyse kontrol betonuyla birebir olduğu gözlenmiştir. Taban küllü betonun klorür iyonu geçirgenliğine karşı da daha iyi mukavemet gösterdiği tespit edilmiştir [5]. Yüksel ve ark., hem taban külünün ve granüle yüksek fırın cürufunun ayrı ayrı hem de ikisinin birlikte ince agrega olarak kullanılmasının betondaki dayanıklılığa nasıl tepki verdiğini araştırmıştır. Betonun durabilite özelliklerini tespit etmek amacıyla dayanım testleri yapılmış ve referans betonu ile karşılaştırılmış. Çalışmada granüle yüksek fırın cürufu, taban küllü ve hem granüle yüksek fırın cürufu hem de taban küllü ve %10, %20, %30, %40 ve %50 ikame oranları içeren ince agregalı beton örnekleri üretilmiş. Elde edilen verilere dayanarak granüle yüksek fırın cürufu ve taban külünün ince agrega olarak kullanılması betonun bazı dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği söylenebilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen neticelere dayanarak granüle yüksek fırın cürufu ve taban külünün ince agrega yerine ikamesi sonucunda dayanımı yüksek beton elde etmenin mümkün olduğu söylenebilmektedir [6]. Topçu ve Bilir’in bu çalışmasında öğütülmemiş taban külünün ince agrega yerine ikame edilip, harç örnekleri üzerindeki büzülme çatlama etkisi incelenmiştir. Taban külü, ağırlıkça 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 oranlarında ince agrega yerine kullanılmış ve taban külünün büzülme çatlama

üzerindeki etkisini tespit etmek için dönme testine tabi tutulmuştur. Sonuçta %100 oranındaki değişimde taban külünün rötreyi gözenekli yapısı nedeniyle azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca taban külü değişim oranının artmasıyla doğru orantılı olan gözeneklilik yapısının artışı da dayanım ve Elastisite Modülünde de azalmaya sebep olmuştur [7]. Singh ve Siddique çalışmasında taban külünün betonda kullanımını inceleyen makalelere genel bir bilgi değerlendirmesi yapmıştır. Ayrıca taban külünün taze betonun işlenebilirliğine, priz süresine, terlemesine, büzülmesine ve sertleşmiş betonun mukavemet özelliklerine etkisinin nasıl olduğundan bahsetmiştir. Bu zamana kadar yapılan araştırmalar sonucunda taban külünün ince agregaya yerine kullanılabilir bir malzeme olduğu görülmektedir [8]. Kim ve ark., bu araştırma da günümüzde artan teknolojiyle birlikte daha fazla yaygınlaşan termik santrallerden elde edilen atıkların özellikle taban külünün ince agregaya olarak kullanımının, normal ve yüksek dayanımlı harcın akışını, su emmesini, mekanik özelliklerini ve harcın performansını nasıl etkilediğini gözlemek amaçlı deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre ince taban külü harcın referans harcına göre daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu ayrıca daha yavaş su emdiği tespit edilmiştir [9]. Yüksel ve Bilir bu çalışmaların da taban külünün ve yüksek fırın cürufunun ince agregaya yerine kullanılmasıyla briket, taban kaplama tuğlası ve bordür örnekleri üretilerek, durabilitelerini ve mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla testlere tabi tutmuşlardır. Yapılan deneylerin sonucunda basınç dayanımının az da olsa düştüğü, aşınmaya ve donma-çözünmeye karşı dirençlerinin iyileştiği tespitine varılmıştır. Diğer bir sonuçta taban külünün ve yüksek fırın cürufunun ince agregaya ikameli olarak kullanılmasının donatısız beton üretiminde dayanıklılığı arttırdığıdır [10]. Zhang ve ark. çeşitli agregaya malzeme özelliklerinin, harç ve kuruma büzülmesi özelliğine ve on dört çeşit ince agregaya malzemesine (standart kum, doğal kum, deniz kumu, çeşitli cüruf tipi kumlar) ve üç çeşit kaba agregaya (andezit çakıl, sert kumtaşı çakıl ve kireçtaşı çakıl) malzemesine sahip beton örneklerinin harç ve beton numuneleri üzerindeki etkisini açıklığa kavuşturmak için deneysel bir çalışma sunmaktadır. Test sonuçları, ince ve kaba agregaya malzemelerinin özelliklerinin sırasıyla harç ve betonun kuruma büzülme özelliğinin kontrol etmede önemli bir rol oynadığını ortaya çıkarmıştır. Kireçtaşı kumu ve yüksek fırın cürufu kumu, standart kum içeren harca kıyasla, harç örneklerinin kuruma büzülmesini sırasıyla %22 ve %30 oranında durdurabildiği gözlemlenmiştir. Beton numunelerin kuruma rötresi, agregaya rötre gerilimi artışı, spesifik yüzey alanı ve 6–30 nm çapındaki agregaların gözenek hacmi ile orantılı olarak arttığı, bu sonuca göre agregaya özelliklerinin kuruma rötresi gelişimi üzerinde önemli etken olduğu tespit edilmiştir. Sunulan deneysel sonuçlar neticesinde, beton karışım büzülmesinin uygun agregaya özellikleriyle kontrol edilebileceği ve toplam su içeriği miktarının azaltılabileceği göz önünde bulundurularak, beton karışım tasarımı uygulamaları için iyi bir perspektif sağlamak adına yararlı bilgiler olduğu sonucuna varılmıştır [1]. Valcuende ve ark., yaptıkları bu deneysel çalışmanın amacı, ince agreganın bir kısmının, kum olarak kumlanmış yüksek fırın cürufu ile yer değiştirdiği kendiliğinden yerleşen betonlarda (KYB) yaşla birlikte büzülme (rötre) evrimini incelemektir. Çalışma yedi tip KYB, 0.55 s/ç (SU/ÇİMENTO) oranı ve farklı cüruf içeriği ile yapılmıştır. Sonuçlar, kumların kumlanmış yüksek fırın cürufu ile değiştirilmesinin, daha yüksek gözenek hacmine sahip ancak daha ince gözenekli yapıya sahip (daha küçük medyan gözenek ve eşik çapları) karışımlara yol açtığını göstermektedir. Erken yaşlarda cüruf KYB'leri referans betonunki ile benzer basınç dayanımına sahiptir, ancak uzun vadede cüruf reaktivitesinin bir sonucu olarak mukavemetleri artmaktadır. Cüruf içeriği ne kadar yüksekse, hem daha yüksek otojen hem de kuruma büzülmesi ve sonuç olarak da toplam büzülme olduğunu gözlemlenmiştir. Referans beton ile kıyaslandığında, toplam büzülme artışının %4 ve %44 mertebesinde olduğu ve kumun sırasıyla %10 ve %60'ının cürufu ile yer değiştirdiği bulunmuştur [12]. Maier ve Durham'ın yaptığı bu araştırmanın temeli, geri dönüştürülmüş malzemelerin, değişen miktarlarda, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini araştırmaktır. Bu çalışmada kullanılan geri dönüştürülmüş malzemeler, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), geri dönüştürülmüş beton agregaya ve ezilmiş atık camdan oluşmaktadır. ÖGYFC veya cüruf çimentosu, çimento için bir yedek olarak kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş beton agregaya ve atık cam, sırasıyla kaba ve ince agregaları değiştirmek için kullanılmıştır. Tasarlanan beton karışımları geri dönüştürülmüş malzemelerle %25'lik bir değişimden %100'üne kadar değişmiştir. Ayrıca, karşılaştırma amacıyla çimento ve işlenmemiş agregalar kullanan standart bir beton karışımı tasarlanmıştır. Çökme, hava içeriği, birim ağırlık, basınç dayanımı, mukavemet kazanımı, donma-çözülme dayanıklılığı, geçirgenlik ve alkali-silika reaktivitesi (ASR) potansiyeli dahil olmak üzere taze ve sertleştirilmiş beton özellikleri incelenmiştir. %100 geri dönüştürülmüş malzeme betonu çok düşük geçirgenliğe ve %6,5 hava içeriğine sahip 4200 psi (29.0 MPa) basınç dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. %50 ve %75 geri dönüştürülmüş malzemelerden

oluşan beton karışımları, sırasıyla yaklaşık 7000 psi (48 MPa) ve 6350 psi (43.8 MPa) basınç dayanımı sağlamıştır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin beton karışımlarında kullanılmasının faydalı ve olumsuz etkileri araştırılmış ve bunlar arasında agrega olarak atık camın kullanılmasının potansiyel alkali-silika reaktivitesi (ASR) bulunmakta olduğudur. Cüruf çimentosu, %50'lik değişim seviyelerinde kullanıldığında, bu endişeleri ortadan kaldırdığı bulunmuştur. Geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, işlem görmemiş malzemeden yapılan normal bir betona kıyasla %50'ye varan mukavemet ve dayanıklılık açısından yararlı olduğu tespit edilmiştir [13]. Bu çalışmalardan görüldüğü üzere bu konu ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Fakat bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı, beton karışımının içerisine birçok uçucu kül oranları eklenerek beton teknolojisine katkıları değerlendirilmiştir.

2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü atık/yan ürünlerinin, beton tasarımı içinde ince agrega yerine belirli oranlarda (%25-50-75-100) ikame edilmesi ile hazırlanan iki farklı sınıftaki beton karışımlarının (C20/25, C30/37), bazı mekanik özelliklerini tespit etmektir. Bu amaç doğrultusunda, hazırlanan beton karışımları için, gerilme-şekil değiştirme davranışı, Elastisite Modülü, tokluk ve son olarak basınç mukavemeti işleminin betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı ve basınç mukavemeti değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elastisite modülü ve tokluk gibi bazı özelliklerin statik olarak elde edilmesi, malzemenin mekanik karakterinin tespitinde, ampirik formüller ile elde edilen sonuçların deneysel verilerle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Böylece granüle yüksek fırın cürufu ve taban külünün ince agrega olarak tasarlandığı betonların, standart beton tasarımı ile karşılaştırılması yapılmış ve bu atıkların agrega olarak kullanılabilirlikleri araştırılmış olacaktır. Proje kapsamında, granüle yüksek fırın cürufu ve taban külünün, beton içinde ince agrega olarak kullanımının, üretilmiş kontrol numunesi betonları ile kıyaslandığında, betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu agregalarla üretilen betonların gerilme-şekil değiştirme davranışı ile ilgili verilerin elde edilmesi de amaçlanmıştır. Betonun Elastisite Modülü, tokluk ve poisson oranı gibi mekanik bazı özellikleri çeşitli yöntemler ile bulunabilir. Bu değerlerin tespitinde kullanılan yöntemlere göre, Elastisite Modülü, tokluk ve poisson oranı değerleri, “elastik ve plastik” olmak üzere iki kısımda incelenir. Elastisite modülü, tokluk ve poisson oranı hazırlanan beton numunesi deney presinde basınç gerilmeleri altında, bu gerilmelere karşılık gelen deformasyon değerleri tespit edilerek kırılmasıyla bulunmuşsa (gerilme-şekil değiştirme diyagramı oluşturulmuşsa), veya bazı kuruluşların (Amerikan Beton Enstitüsü, Avrupa Beton Komitesi ve Türk Standartları Enstitüsü gibi) betonun basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi gösteren değişik formüller ile tespit edilmiş ise, bu tür elastisite modülü ve poisson oranına “statik elastisite modülü ve poisson oranı” denilmektedir. Bunun yanı sıra, Elastisite Modülü ve poisson oranı, Sonometre veya Ultrasonik test cihazı gibi ses dalgaları kullanarak tahribatsız yöntemler aracılığıyla da elde edilebilir. Bu yöntemler ile elde edildiklerinde ise “dinamik Elastisite Modülü ve poisson oranı” olarak isimlendirilirler [14]. Bu çalışma dâhilinde, çok büyük miktarlarda ortaya çıkan ve birçok çevresel ve ekonomik zarara sebep olan iki büyük endüstriyel yan ürün/atığın (granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü), tasarımı içinde ince agrega yerine ikamesi ile edilen betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, gerilme-şekil değiştirme davranışı, Elastisite Modülü, tokluk, ve son olarak basınç mukavemeti işleminin betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı ve basınç mukavemeti değişimi üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Elde edilmiş değerler, üretilmiş kontrol numunesi betonu ile kıyaslanmıştır.

3. Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

3.1. Çimento

Yapılan çalışmada CEM I 42,5 R, Portland çimentosu kullanılmış olup, Pelenkoğlu A.Ş.’den elde edilmiştir. Tasarımda kullanılan çimentonun özellikleri: CEM I 42,5 R, Portland Çimentosu klinkeri, alçı taşı ve en çok %5’e kadar minör ilave bileşen maddenin birlikte öğütülmesi sonucu TS EN 197-1 / Mart: 2002 “Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri” standardına uygun imal edilen, 2 günlük basınç mukavemeti en az 20 ve 28 günlük basınç mukavemeti en az 42,5 MPa, en fazla 62,5 MPa olan çimentodur [15]. Çimentonun sınıfı, ağırlığı, üretim standardı

gibi bazı bilgiler çimento paketi üzerinde belirtilir (Şekil 1). Çimento içerisinde bulunan kimyasal bileşenler ise Tablo 1’de gösterilmiştir. Çimentonun özgül ağırlığı 3.13 g/cm^3 ’tür. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla 43.6 MPa ve 55.1 MPa’dır. Bunlara ek olarak çimentonun priz başlama ve bitiş süreleri sırasıyla 179 ve 236 dakikadır.



Şekil 1. CEM I 42,5 R, Portland çimentosu.

Tablo 1. Çimento içerisinde bulunan kimyasal bileşenler.	
Çimentonun kimyasal bileşenleri	Yüzde Oranı (%)
SiO ₂	19.08
Al ₂ O ₃	5.19
Fe ₂ O ₃	2.60
CaO	62.49
MgO	2.79
SO ₃	3.20
Kızdırma Kaybı	2.63
Cl ⁻	0.012
Na ₂ O	1.09
Tayin edilemeyen	0.918

3.2. Agregalar

Betonun ana iskeletini oluşturan agregalar, istenilen betonun tasarlanmasında en önemli faktördür. Yaptığımız beton tasarımlarında kullanılan agregalar, Zonguldak Eren Enerji A.Ş taş ocağından temin edilmiştir. Ocakta makinalar ile farklı büyüklüklere ayrılan agregalar, 0/5, 5/15, 15/25 mm boyutunda boyutlandırılmıştır. Şekil 2’de farklı boyutlardaki agrega numuneleri görülmektedir. Deneylerde kullanılan agregaların en büyük tane boyutu 25 mm’dir. Ayrıca referans betonda kullanılan agrega cinsi kırma taş kalkerdir.



(a) (b) (c)
Şekil 2. (a) 0/5 mm (b) 5/15 mm (c) 15/25 mm boyutlarındaki agregalar.

3.3. Taban külü

Tasarlanan beton karışımlarında %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ince agrega olarak ikame ettirilen taban külü Eren Enerji A.Ş taş ocağından temin edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Eren Enerji A.Ş taş ocağından temin edilen taban külü numunesi.

Ülkemizde kömürle çalışan termik santrallerde yanma sırasında yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül (UK) ve 4 milyon ton taban külü diğer adıyla yatak altı külü (TK) açığa çıkmaktadır [17]. Bu kadar yüksek miktarda açığa çıkan atık ürünler termik santral yakınlarında bulunan kül dağları veya barajlarında depolanmaktadır. Zonguldak Eren Enerji A.Ş taş ocağının taban küllerini biriktirdiği kül barajı Şekil 4’de sunulmaktadır.



Şekil 4. Zonguldak Eren Enerji A.Ş taş ocağı kül barajı.

3.4. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Granüle yüksek fırın cürufu demir çelik fabrikalarının çelik üretimi esnasında çeliğin erimesiyle oluşan yan üründür. Bu çalışma da ince agrega yerine belli oranlarda (%25, %50, %75 ve %100) ikame ettirilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu (Şekil 5) Bolu Çimento A.Ş 'den temin edilmiştir.



Şekil 5. Bolu Çimento A.Ş' den temin edilen GYFC numune örneği.

3.5. Kimyasal Katkı

Beton katkı maddeleri betonun bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla karma işlemi sırasında veya hemen önce karışıma katılan maddelerdir. Yapılan çalışmalarda su azaltıcı katkı maddesi olarak, Draco marka, LEVELCON KYB 105, hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır (Şekil 6). Akışkanlaştırıcı, Zonguldak'ta bulunan Pelenkoğlu A.Ş'den temin edilmiştir. Tablo 2'de katkının +20 °C sıcaklıkta ve %50 bağıl nem ortamındaki teknik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 2. Su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanılan hiper akışkanlaştırıcının analizi.

Ürün Adı, Tanımı ve Tipi	LEVELCON KYB 105
Görünüm	Ayrışma Yok
Renk	Kahverengi
Bağıl Yoğunluk (g/cm ³)	1.062
Katı Madde Miktarı (%)	17.31
pH değeri	5.47
Klorür İçeriği Katkı Kütlesi Oranınca	< 0.1
Alkali Miktarı (Na ₂ O) %	< 5
Raf Ömrü ve Depolama Koşulları	1 yıl
Kimyasal Katkı Kullanım Aralığı (%)	0.6 – 2.0

**Şekil 6.** Su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanılan hiper akışkanlaştırıcı.

4. Yöntem

Bu çalışmada izlenen deneysel program ve yöntem bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Kullanılacak tüm malzemelerin karakterizasyonunu içeren bir takım deneyler yapılmıştır ve tüm malzemelerin (çimento, agrega, taban külü ve yüksek fırın cürufu) karakterizasyonunu içeren deneyler yapılmıştır. Bu deneyler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Çimentonun özgül yüzey ve ağırlığının tayini
2. Doğal agregaların özgül ağırlık, su emme ve nem içeriği tayini
3. Yüksek fırın cürufunun özgül ağırlık, su emme ve nem içeriği tayini
4. Taban külünün özgül ağırlık, su emme ve nem içeriği tayini
5. Doğal agrega, granüle yüksek fırın cürufu ve taban külünün maksimum dane çapı büyüklüklerinin belirlenmesi (Elek analizi yöntemi kullanılarak)
6. Yüksek fırın cürufunun ve taban külünün x-ışını flüoresans analizi (XRF) ve mikroyapı analizi (SEM)

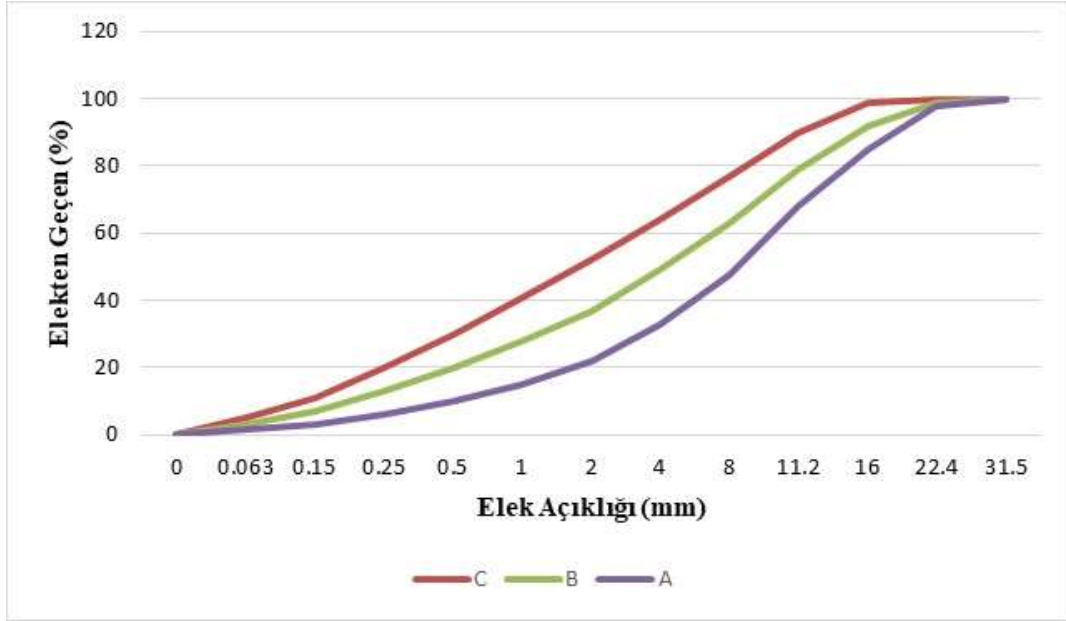
Ayrıca, tasarlanan referans betonların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu referans betonları üzerinde aşağıda maddeler halinde sıralanmış deneyler gerçekleştirilmiştir.

1. C20/25 sınıflı referans betonun 7 ve 28 günlük dayanım testi
2. C30/37 sınıflı referans betonun 7 ve 28 günlük dayanım testi

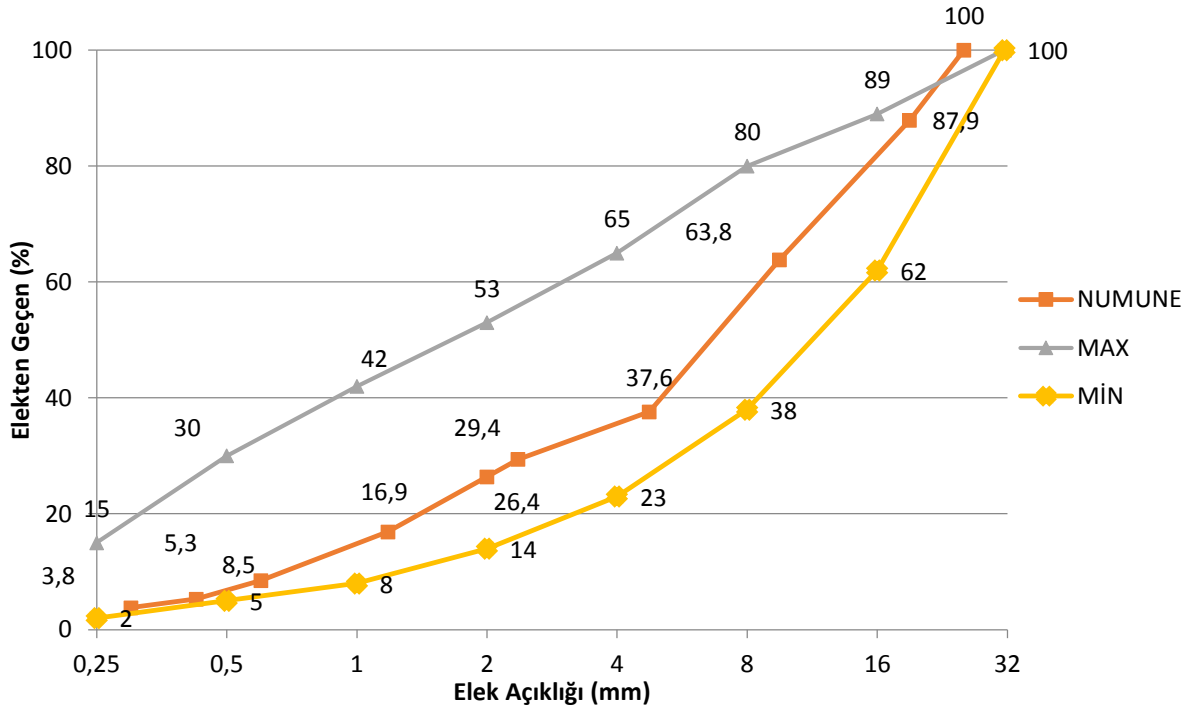
5. Bulgular ve Tartışma

Deneysel sonuçlar bu bölümde detaylı olarak sunulmuştur. C20/25 ve C30/37 betonlarının mekanik özellikleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır ve bu betonların mekanik davranışına 5 farklı katkı

değerlerinin etkisi grafiksel olarak incelenmiştir. Ayrıca bu 5 farklı katkı değeri dikkate alınarak beton basınç deneyleri yapılmıştır. Katkılı olarak hazırlanan betonlar ilk olarak SLUMP deneyine tabi tutulmuşlardır. TS 802’de en büyük agrega tane boyutu 8, 16, 31,5 ve 63 mm için ayrı ayrı olmak üzere A (geçen min./alt sınır eğrisi), B ve C (geçen max./üst sınır eğrisi) diye üç sınır eğrisi tanımlanmaktadır. Şekil 7’de, TS 802’ye göre en büyük tane büyüklüğü için belirlenen granülometri eğrisi gösterilmektedir. Ayrıca, Tablo 3’de doğal agreganın elek analizi sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 8’de ise doğal agreganın granülometri eğrisi detaylı olarak sunulmuştur. Tablo 4’de ve Şekil 9’de ise ince agreganın (Taban Külü) elek analizi ve gradasyon eğrisi bulunmaktadır.



Şekil 7. Agrega en büyük tane büyüklüğü için belirlenen granülometri eğrisi.



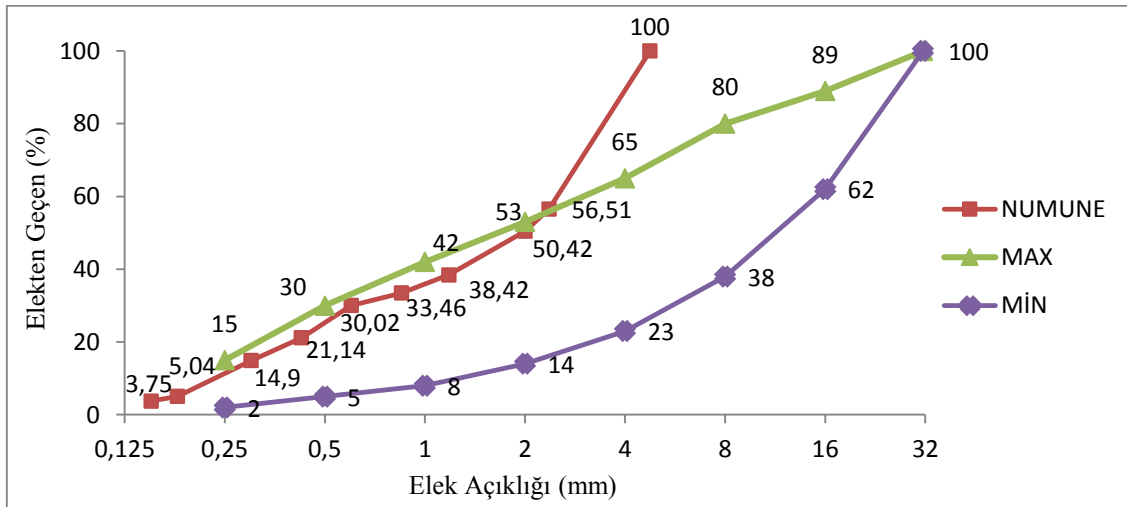
Şekil 8. Doğal agregaların granülometri eğrisi.

Tablo 3. Doğal agregaların elek analizi sonuçları.

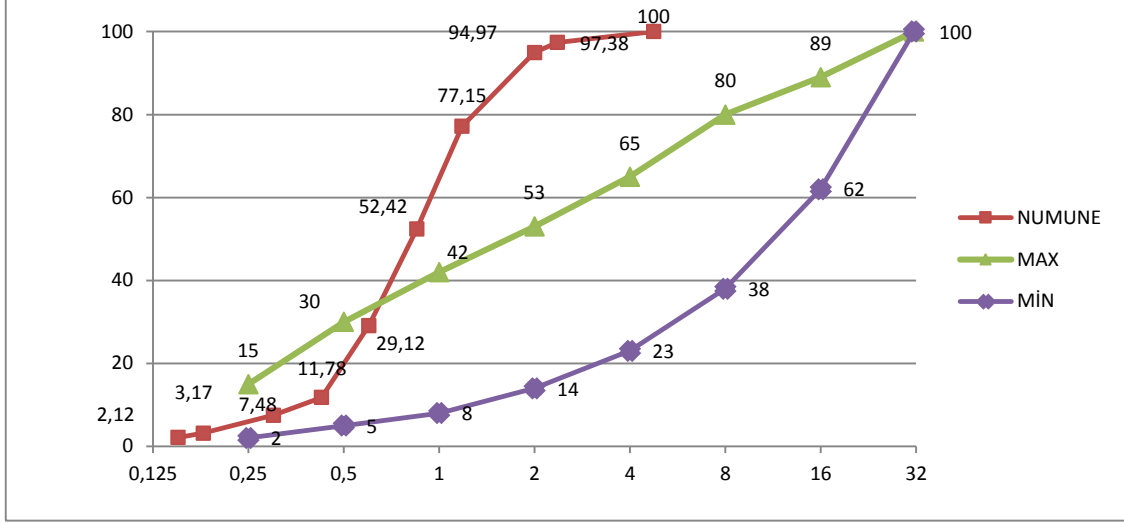
Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Darası (gr)	Dara+elek üstünde kalan malzeme (gr)	Elek üstünde kalan malzeme (gr)	Yığılımlı malzeme miktarı (kg)	Kalan (%)	Geçen (%)
25,4	469,4	469,4	0	0	0	100
19	508,2	962,1	453,9	453,9	12,1	87,9
9,5	487,6	1393,7	906,1	1360	36,2	63,8
4,75	394	1378,2	984,2	2344,2	62,4	37,6
2,36	417,6	726,6	309	2653,2	70,6	29,4
2	461,8	576,9	115,1	2768,3	73,6	26,4
1,18	404,1	762	357,9	3126,2	83,1	16,9
0,6	367,8	682,9	315,1	3441,3	91,5	8,5
0,425	405,3	524,4	119,1	3560,4	94,7	5,3
0,3	388,4	446,2	57,8	3618,2	96,2	3,8
Tepsi	333,8	477,5	143,7	3761,9	100	0

Tablo 4. Taban külünün elek analizi sonuçları.

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Darası (gr)	Dara+elek üstünde kalan malzeme (gr)	Elek üstünde kalan malzeme (gr)	Yığılımlı malzeme miktarı (kg)	Kalan (%)	Geçen (%)
4,75	394,3	394,3	0	0	0	100
2,36	417,8	1067,5	649,7	649,7	43,49	56,51
2	462,1	553,1	91	740,7	49,58	50,42
1,18	404,5	583,7	179,2	919,9	61,58	38,42
0,85	411,9	486,1	74,2	994,1	66,54	33,46
0,6	368,2	419,6	51,4	1045,5	69,98	30,02
0,425	405,7	538,3	132,6	1178,1	78,86	21,14
0,3	388,7	481,9	93,2	1271,3	85,1	14,9
0,18	326,2	473,5	147,3	1418,6	94,96	5,04
0,15	383,3	402,6	19,3	1437,9	96,25	3,75
Tepsi	333,6	389,6	56	1493,9	100	0

**Şekil 9.** Taban külünün granülometri eğrisi.

Şekil 10 ve Tablo 5’de ince agreganın (Granüle yüksek fırın cürufu) gradasyon eğrisi ve elek analizi ve detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca deneylerin sonucunda elde birim ağırlıklar, betonların çökme değerleri ve basınç dayanımları Tablo 6’da detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 7’de her bir beton için karışım oranları sunulmuştur.



Şekil 10. Yüksek fırın cürufunun granülometri eğrisi.

Tablo 5. Yüksek fırın cürufunun elek analizi sonuçları.

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Darası (gr)	Dara+elek üstünde kalan malzeme (gr)	Elek üstünde kalan malzeme (gr)	Yığılımlı malzeme miktarı (kg)	Kalan (%)	Geçen (%)
4,75	394,3	394,3	0	0	0	100
2,36	417,8	456,7	38,9	38,9	2,62	97,38
2	462,1	498,1	36	74,9	5,03	94,97
1,18	404,5	669,6	265,1	340	22,85	77,15
0,85	411,9	779,9	368	708	47,58	52,42
0,6	368,2	714,9	346,7	1054,7	70,88	29,12
0,425	405,7	663,8	258,1	1312,8	88,22	11,78
0,3	388,7	452,7	64	1376,8	92,52	7,48
0,18	326,2	390,3	64,1	1440,9	96,83	3,17
0,15	383,3	399	15,7	1456,6	97,88	2,12
Tepsi	333,6	365,1	31,5	1488,1	100	0

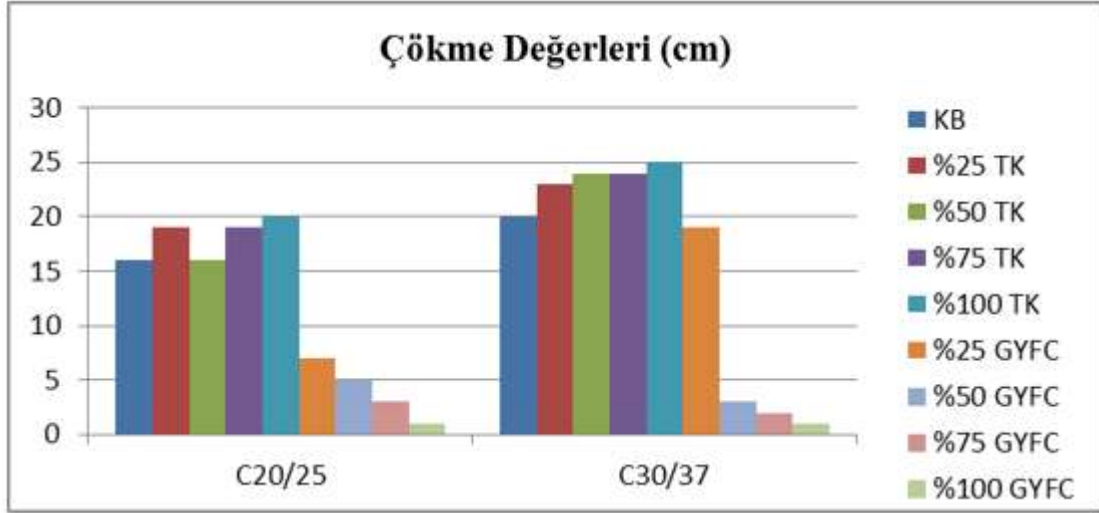
Tablo 6. Taze betonların çökme, birim ağırlık değerleri ve basınç dayanımları.

Beton No	Beton Kodu	Çökme (mm)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	7 Günlük Dayanım Sonuçları (MPa)	28 Günlük Dayanım Sonuçları (MPa)
1	C20/25 Kontrol	160	2410	30,636	35,502
2	C20/25 %25 GYFC	70	2390	24,689	30,436
3	C20/25 %50 GYFC	50	2420	21,751	28,951
4	C20/25 %75 GYFC	30	2290	8,809	11,653
5	C20/25 %100 GYFC	10	2300	5,644	6,889
6	C30/37 Kontrol	200	2490	39,244	47,107
7	C30/37 %25 GYFC	190	2420	33,591	42,644
8	C30/37 %50 GYFC	30	2310	23,449	25,280
9	C30/37 %75 GYFC	20	2300	17,596	21,191
10	C30/37 %100 GYFC	10	2200	17,271	16,956
11	C20/25 %25 TK	190	2300	18,004	22,631
12	C20/25 %50 TK	160	2230	10,698	13,071
13	C20/25 %75 TK	190	2055	8,938	10,831
14	C20/25 %100 TK	200	2001	6,853	10,298
15	C30/37 %25 TK	230	2375	24,938	31,667
16	C30/37 %50 TK	240	2771	12,884	16,320
17	C30/37 %75 TK	240	2230	11,467	15,111
18	C30/37 %100 TK	250	2050	8,618	10,640

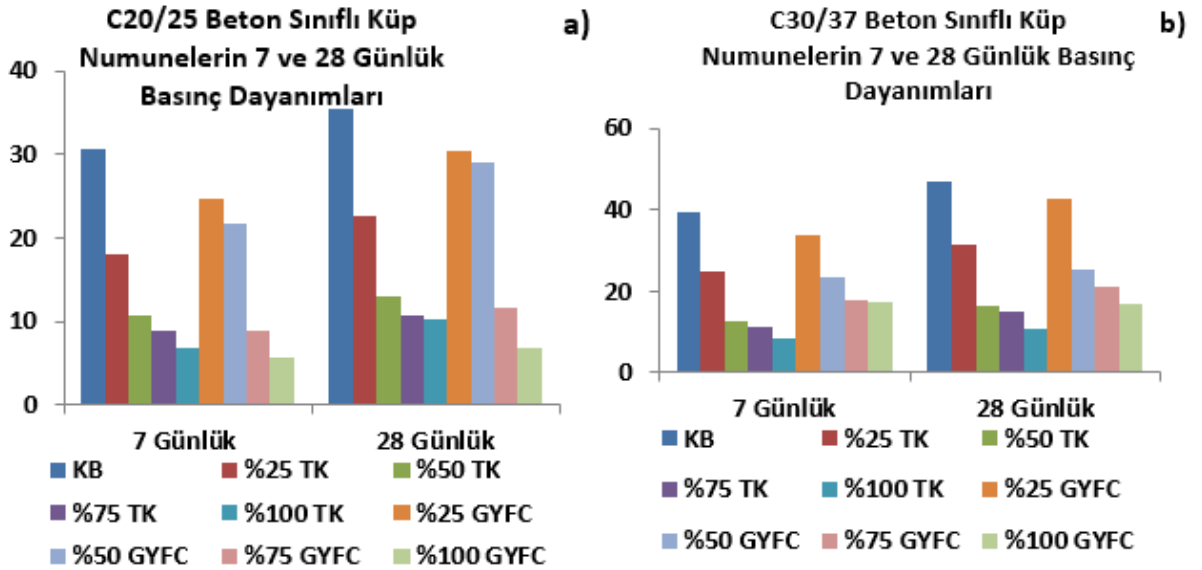
Tablo 7. Her seri için beton karışımlarına dahil olan malzeme miktarları (kg/m³)

Beton Adı	Çimento	Su	S/Ç	Katkı miktarı (kg)	0-5 Kırma kum	5-12 Kırma taş	12-22 Kırma taş	Taban Külü	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
C20/25 KB	250	157	0,63	4,25	1042	362	604	-	-
C20/25 %25 TK	250	157	0,63	4,25	781,5	362	604	169,76	-
C20/25 %50 TK	250	157	0,63	4,25	521	362	604	339,53	-
C20/25 %75 TK	250	157	0,63	4,25	260,5	362	604	509,3	-
C20/25 %100 TK	250	157	0,63	4,25	-	362	604	679,06	-
C20/25 %25 GYFC	250	157	0,63	4,25	781,5	362	604	-	264,40
C20/25 %50 GYFC	250	157	0,63	4,25	521	362	604	-	528,81
C20/25 %75 GYFC	250	157	0,63	4,25	260,5	362	604	-	793,21
C20/25 %100 GYFC	250	157	0,63	4,25	-	362	604	-	1057,61
C30/37 KB	300	156	0,52	5,10	962	355	651	-	-
C30/37 %25 TK	300	156	0,52	5,10	721,5	355	651	156,73	-
C30/37 %50 TK	300	156	0,52	5,10	481	355	651	313,46	-
C30/37 %75 TK	300	156	0,52	5,10	240,5	355	651	470,19	-
C30/37 %100 TK	300	156	0,52	5,10	-	355	651	626,92	-
C30/37 %25 GYFC	300	156	0,52	5,10	721,5	355	651	-	244,10
C30/37 %50 GYFC	300	156	0,52	5,10	481	355	651	-	488,21
C30/37 %75 GYFC	300	156	0,52	5,10	240,5	355	651	-	732,31
C30/37 %100 GYFC	300	156	0,52	5,10	-	355	651	-	976,41

TS EN 206: 2013+A1 no'lu Türk standartına göre C20/25 Taban Külü (TK) ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GYFC) ikameli taze betonların çökme sınıfları (kıvam sınıfları) S1, S2 ve S4; C30/37 TK ve GYFC ikameli taze betonların çökme sınıfları S1, S4 ve S5 olduğu sonucuna varılmıştır. Referans betonların ise S4 kıvam sınıfında olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 11'de üretilen her beton numune serilerinin çökme değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

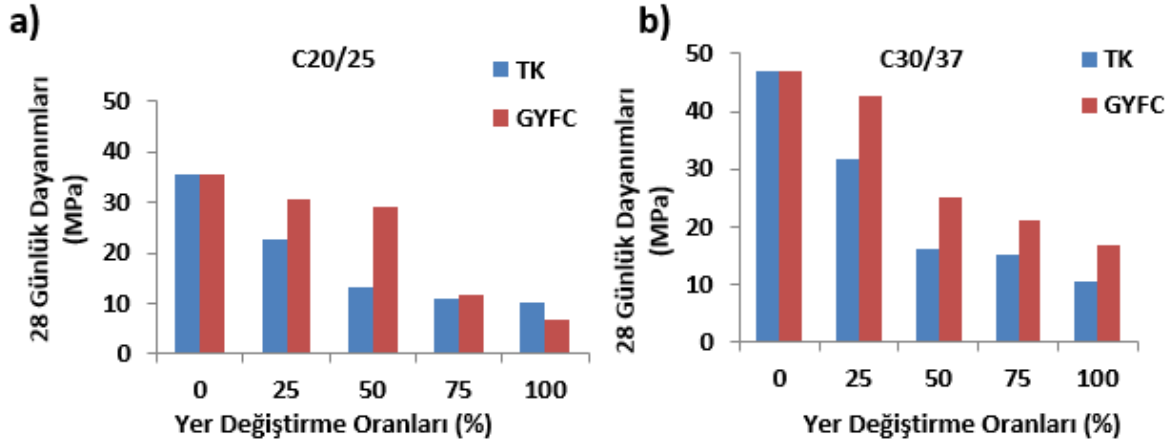


Şekil 11. C20/25, C30/37 beton sınıfı TK ve GYFC ikameli taze betonların çökme değerleri (mm).



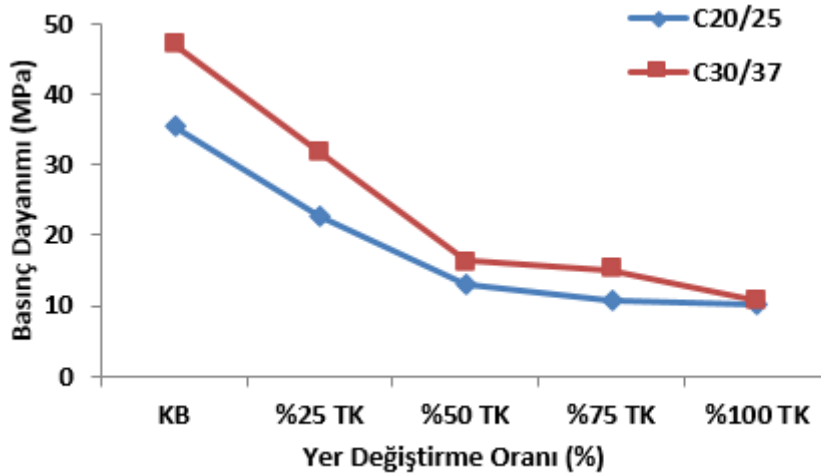
Şekil 12. a) C20/25 beton sınıfı numunelerin dayanım sonuçları (MPa), b) C30/37 beton sınıfı numunelerin dayanım sonuçları (MPa).

C20/25 ve C30/37 beton sınıfı küp numuneleri için yapılan basınç deneyi sonuçları Şekil 12'de görülmektedir. Basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-3 standardına göre yapılmıştır. Basınç dayanımları kontrol betonuyla karşılaştırıldığında taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun ince agrega olarak miktarının artması betonun basınç dayanımını düşürmektedir. Basınç dayanımındaki düşüş beton dayanım kazandıkça azalmaktadır. Özkan, Yüksel, Muratoğlu [19]'e göre taban külünün ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun ince agrega yerine kullanılması sonucunda betonun basınç dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu ikameli betonların basınç mukavemeti değerlerinin standart beton numunelerine oranla C20/25 beton sınıfı için %14,27, %18,45, %67,18 ve %80,60, C30/37 beton sınıfı için %9,47, %46,33, %55,02 ve %64,00 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Hacimce ikame oranları arttıkça basınç dayanımında azalmanın sebebi GYFC'nun gözenekli yapısından dolayı betona boşluklu yapı kazandırmasıdır.



Şekil 13. a) C20/25 betonu için 28 günlük basınç dayanım sonuçları, b) C30/37 betonu için 28 günlük basınç dayanım sonuçları.

Referans, C20/25 ve C30/37 beton numunelerinin 28 günlük dayanım sonuçları Şekil 13’de verilmiştir. Taban küllü ikameli betonların basınç mukavemeti değerlerinin standart beton numunelerine oranla C20/25 beton sınıfı için %36,25 , %63,18, %69,49 ve %71,00, C30/37 beton sınıfı için %32,78, %65,36, %67,92 ve %77,41 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Beton basınç mukavemeti için gerçekleşen düşüşün; standart agregaya göre çok daha düşük dayanıma sahip olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Taban küllü betonların %50 ikame oranından sonraki yer değiştirme oranlarında betonun basınç mukavemeti üzerinde büyük bir düşüş olduğu Şekil 14’de gözlemlenmiştir.



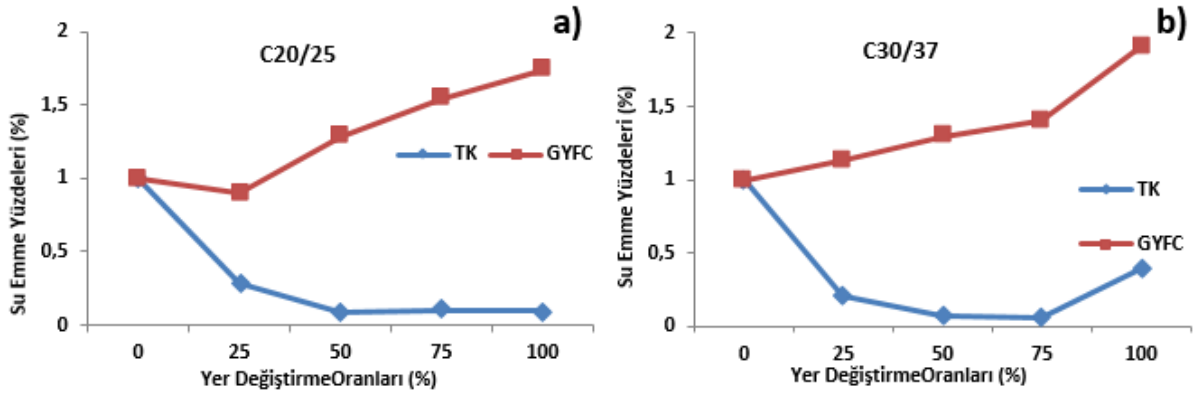
Şekil 14. Kontrol betonları ve taban küllü ikameli numunelerin 28 günlük basınç dayanımları.

Tablo 8’e göre 28 günlük beton numunelerinin birim ağırlıkları ve su emme oranları verilmiştir. TK ve GYFC’nun betonda ince agrega olarak kullanımı birim ağırlığı azalmaktadır. TK ve GYFC’nun özgül ağırlıklarının referans betonunda kullanılan ince agreganın özgül ağırlığından daha az olması sebebiyle, üretilen numunelerin birim ağırlığında azalma meydana gelmiştir. Yüksel vd. tarafından yapılan çalışmada; GYFC’nun gözenekli bir yapısı olduğundan iki tür (0-7, 0-3 mm) ince agrega kullanılmıştır. Üretilen betonun su emme oranı ve birim ağırlığı kontrol betonuna kıyasla daha düşük olduğu, dayanıklılık açısından da uygun sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca dayanım kaybı az olan bir beton türüdür [17].

Tablo 8. Tasarlanan beton numunelerin 28 günlük birim ağırlıkları (kg/m^3) ve su emme oranları (%).

Yer Değişirme Oranı (%)	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Su Emme Oranı (%)
C20/25 KB	2410	0,996
C20/25 25 TK	2300	0,289
C20/25 50 TK	2230	0,086
C20/25 75 TK	2055	0,101
C20/25 100 TK	2001	0,096
C20/25 25 GYFC	2390	0,903
C20/25 50 GYFC	2420	1,286
C20/25 75 GYFC	2290	1,546
C20/25 100 GYFC	2300	1,739
C30/37 KB	2490	0,990
C30/37 25 TK	2375	0,200
C30/37 50 TK	2771	0,065
C30/37 75 TK	2230	0,053
C30/37 100 TK	2050	0,384
C30/37 25 GYFC	2420	1,128
C30/37 50 GYFC	2310	1,294
C30/37 75 GYFC	2300	1,404
C30/37 100 GYFC	2200	1,909

Su emme oranında ise TK'nün ince agrega yerine ikame ettirilmesiyle elde edilen beton numunelerinde azalma, GYFC'nun ikame ettirilmesiyle elde edilen beton numunelerinde artış Şekil 15'den gözlenmiştir. Su emme deneyleri TS EN 1097-6 standardına göre yapılmıştır.

**Şekil 15.** Beton serilerinin su emme yüzdeleri; a) C20/25 betonu için, b) C30/37 betonu için

Tek eksenli basınç deneyi esnasında beton numunelerdeki şekil değiştirmeleri ölçebilmek için kullanılan ekstansometre yardımı ile artan yük altında numunede oluşan deformasyonlar 0,001 mm hassasiyetinde ölçülmüştür. Deney aşamasında deformasyonlara karşılık gelen yük değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler ile gerilme-şekil değiştirme diyagramları çizilmiştir. Çizilen gerilme-şekil değiştirme diyagramlarının altında kalan alandan numunelerin tokluğu elde edilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi ile beton numunelerinin sekant ve teğet Elastisite Modülleri hesaplanmıştır. Tablo 9'da karışım betonlarının Elastisite Modülleri, toklukları ve maksimum yükteki enerjileri verilmiştir. C30/C37 %75 TK ve %100 TK numunelerde deneyler gerçekleştirilememiştir. Bunun sebebi ise ekstansometrenin güvenli kısımda kalıp 15 MPa dayanıma sahip numuneleri 5 kere kırdığından daha fazla kırım gerçekleşmemiştir ve cihazın kendini otomatik olarak kapatmasıdır.

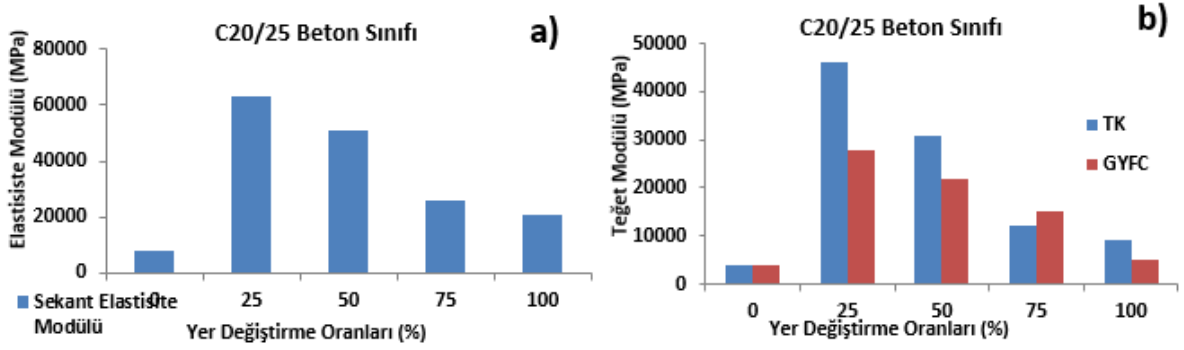
Tablo 9. Karışım betonlarının sekant modülleri, teğet modülleri, toklukları, maksimum yükteki enerjileri ve TS 500 bağıntısıyla hesaplanan Elastisite Modülü.

Yer Değiştirme Oranları (%)	Sekant Modülü (MPa)	Teğet Modülü (MPa)	Tokluk (J)	Max. Yükteki Enerji (J)	TS 500 Bağıntısıyla Hesaplanan Elastisite Modülü (MPa)
C20/25 KB	7873,50801	3904,77955	270,53450	74,50784	31320
C20/25 %25 TK	62954,76142	45944,57977	309,11213	97,99414	27828
C20/25 %50 TK	50813,29	30692,78	300,384	71,38600	24509
C20/25 %75 TK	25767,02931	12203,35927	149,52411	34,84000	23566
C20/25 %100 TK	20691,19855	9232,39479	11,82414	11,82632	23328
C20/25 %25 GYFC	46566,28635	27796,48964	171,49632	47,86286	30036
C20/25 %50 GYFC	39683,29940	21706,29569	141,82912	21,72240	29640
C20/25 %75 GYFC	32076,77378	15117,51239	130,71949	31,76264	23923
C20/25 %100 GYFC	31581,85022	5126,01276	8,98858	7,50992	21629
C30/37 KB	5177,22339	3604,13367	374,64495	163,77165	33951
C30/37 %25 TK	54214,77014	28288,17568	170,73540	39,21298	30358
C30/37 %50 TK	6655,19318	2309,68189	196,73735	77,50000	25743
C30/37 %75 TK	-	-	-	-	25299
C30/37 %100 TK	-	-	-	-	23481
C30/37 %25 GYFC	6734,81090	3212,70480	354,69993	135,42140	32982
C30/37 %50 GYFC	14853,08351	4503,35671	162,25941	37,31084	28615
C30/37 %75 GYFC	-231388,375	-3237,76352	0,00634	0,02117	27381
C30/37 %100 GYFC	39516,19992	5021,72787	15,83025	3,68798	25969

TS 500'de [20] verilen Elastisite Modülü değerleri, Formül 1'den hesaplanmıştır ve Tablo 9'da gösterilmiştir. Formülde bulunan f_{ckj} ifadesi, 28 günlük silindir numunelerin basınç dayanımını temsil etmektedir.

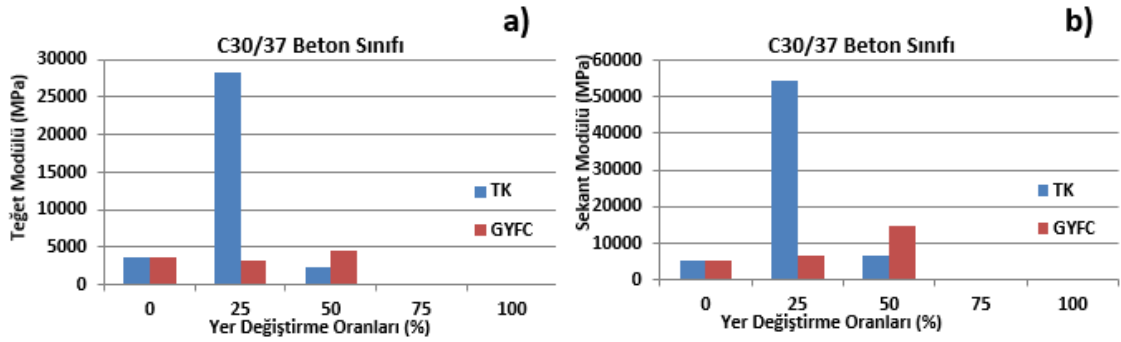
$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

TS 500'e [20] göre, silindir basınç dayanımı küp basınç dayanımının 0,8 katı alınabilir. İkame oranı %25 ve %50 oranlarında GYFC ikameli numunenin gözenekli yapısından dolayı Elastisite Modülünde TK ikameli numuneye göre düşüş gözlenmektedir. Kontrol betonu C20/25 ile TK ikameli numuneler kıyaslandığında kontrol betonunun Elastisite Modülünün, TK ikameli numunelerden daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. C20/25 TK ikameli betonlar gözenekli bir yapıya sahip olduğundan ikame oranı arttıkça elastiklik modülünde düşüş gözlenmiştir. Topçu ve Bilir [19] bu çalışmada taban külünü ince agrega olarak ağırlıkça 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 oranlarında kullanmıştır. Taban külü değişim oranının artmasıyla gözeneklilik yapısının arttığı gözlenmiştir. Bu sebeple dayanım ve Elastisite Modülünde azalma olmuştur. Bu çalışma literatürle paralellik göstermektedir.



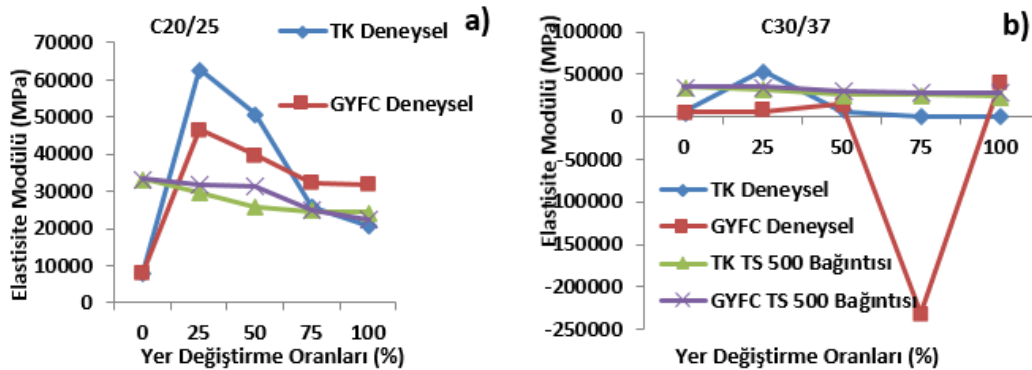
Şekil 16. a) C20/25 beton sınıfı TK ikameli numunelerin Elastisite Modülü, b) C20/25 beton sınıfı TK ve GYFC ikameli serilerin teğet modülü.

Şekil 16'ya göre C20/25 beton sınıfı TK ve GYFC ikameli numunelerin teğet modülleri kıyaslandığında azalma olduğu gözlenmiştir. C30/37 beton sınıfı %25 ve %50 yer değiştirme oranlarına sahip TK'lu numunelerin teğet ve sekant modüllerinde azalma, GYFC'lu numunelerde ise artma gözlenmiştir. %75 ve %100 oranlarında düşük dayanıma sahip olmasından ekstansometreye ve basınç deneyinin yapıldığı cihaza zarar vermesinden ötürü tespit edilememiştir (Şekil 17). %75 ve %100 GYFC'lu numunelerin sekant modülü, teğet modülü, tokluk ve maksimum yükteki enerji değerlerindeki sapmalar bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



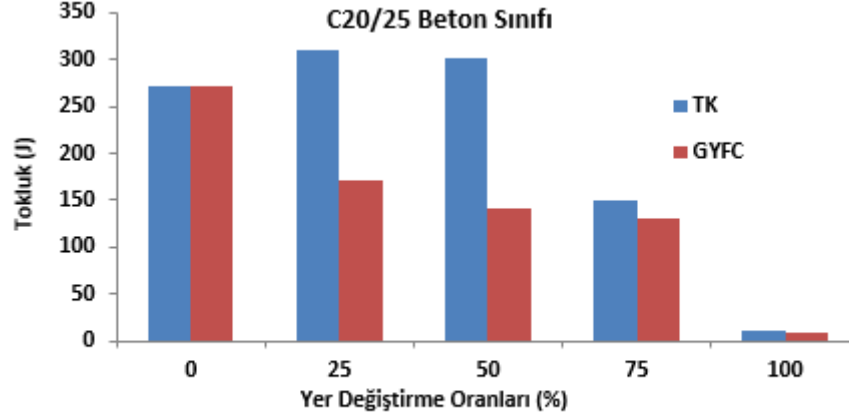
Şekil 17. a) C30/37 beton sınıfı numunelerin teğet modülü değerleri, b) C30/37 beton sınıfı numunelerin sekant modülü değerleri.

Şekil 18'de formül yardımıyla hesaplanan Elastisite Modülü değeriyle deneysel çalışmalarla bulunan Elastisite Modülü değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 17'den de görüleceği gibi TS 500'deki bağıntının yardımıyla bulunan eğrinin eğimi deneysel Elastisite Modülü ile bulunan eğrinin eğiminden daha küçüktür. TS 500 bağıntısıyla bulunan Elastisite Modülü değerleri deneysel Elastisite Modülü değerlerinden daha küçük değerler olduğu gözlenmiştir.



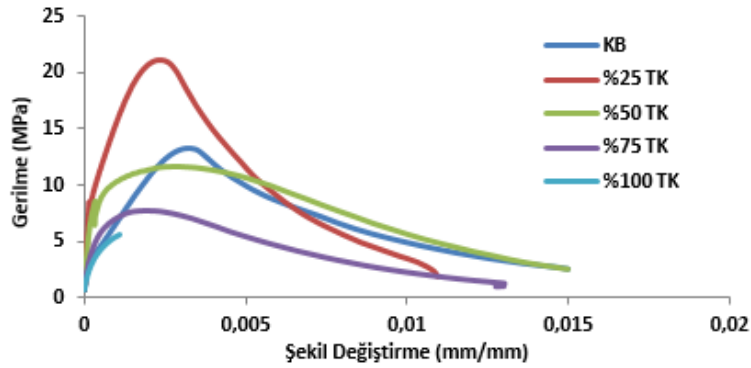
Şekil 18. a) C20/25 beton serilerinin Elastisite Modülleri, b) C30/37 beton serilerinin Elastisite Modülleri.

C20/25 beton sınıfı TK ve GYFC ikameli numunelerin yer değiştirme oranları arttıkça tokluklarında azalma olduğu tespitine varılmıştır. %100 yer değiştirme oranlarında büyük düşüş gözlenmiştir. TK ve GYFC ikameli numuneler kıyaslandığında GYFC ikameli numunelerin tokluğunun daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 19). Literatürlerde de benzer sonuçlara ulaşıldığı belirtilmektedir.

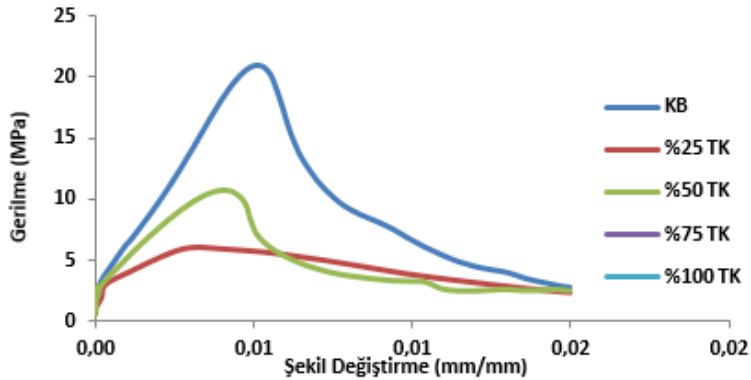


Şekil 19. C20/25 beton sınıfı numunelerin tokluk değerleri.

Şekil 19'da C20/25 beton sınıfı TK serilerinin gerilme şekil değiştirme diyagramı mevcuttur. Şekil 20'ye göre grafiğin altında kalan tokluğu ifade etmektedir. TK serilerinin referans betonuna göre tokluğu azaldığı ancak referans betonuna kıyasla %25 TK numunesinin fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum numunenin üretim hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir. C30/37 beton sınıfı TK (Şekil 21) ve GYFC ikameli serilerde herhangi bir terslik rastlanmadığı tokluklarında azalış olduğu gözlenmiştir.

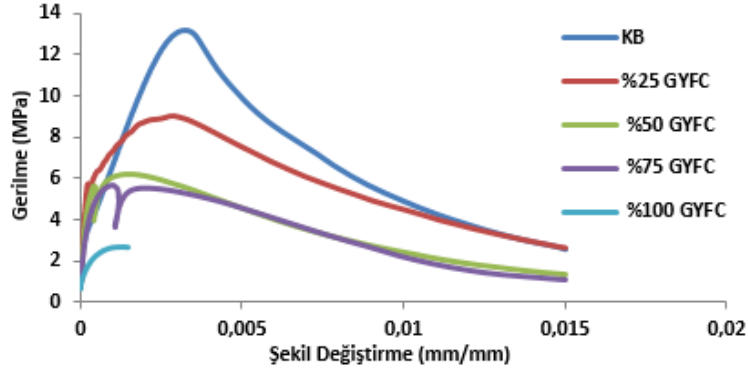


Şekil 20. Referans betonu ve TK ikameli C20/25 beton sınıfı serilerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

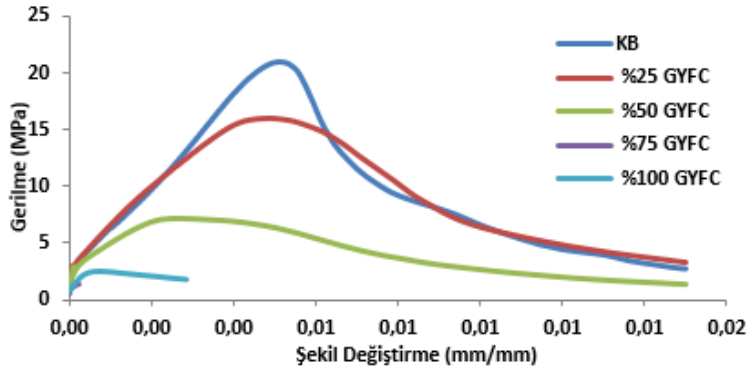


Şekil 21. Referans betonu ve TK ikameli C30/37 beton sınıfı serilerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

Referans betonu GYFC ikameli numunelerle kıyaslandığında gerilme şekil değiştirme diyagramının altında kalan alanının azaldığı yani tokluğun azaldığı tespitine varılmıştır (Şekil 22 ve Şekil 23).

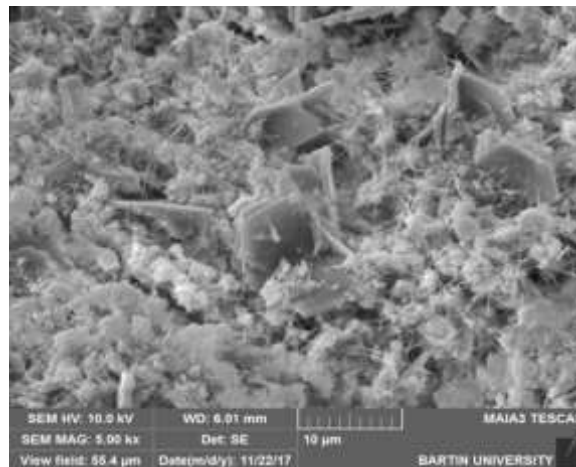


Şekil 22. Referans betonu ve GYFC ikameli C20/25 beton sınıfı serilerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.



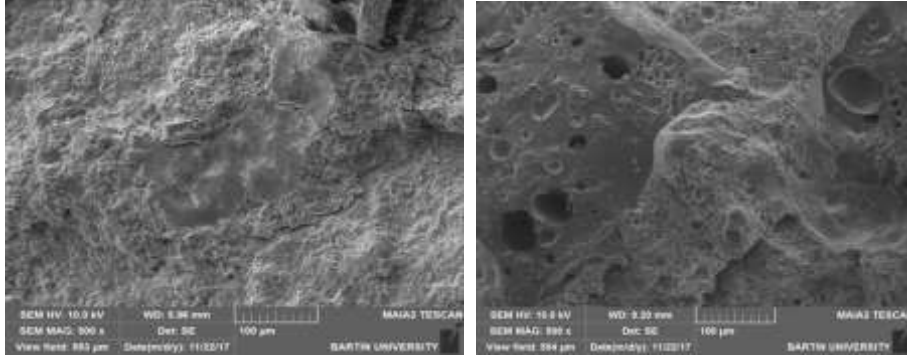
Şekil 23. Referans betonu ve GYFC ikameli C30/37 beton sınıfı serilerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

Gerilme şekil değiştirme eğrilerine göre maksimum gerilmeye kadar olan kısımları doğrusal olarak artmış, tepe noktasından sonraki kısımları, numunede oluşan çatlamalara bağlı olarak düzensiz bir seyir izlemiştir. C30/37 %50 GYFC ikameli beton numunesinde plaka halinde $Ca(OH)_2$ kristalleri ve etrenjit yapıları Şekil 24'de görülmektedir. İnce malzemede GYFC'nun yapıda ilave CSH yapılarının oluşumuna ortam sağladığı düşünülmektedir.



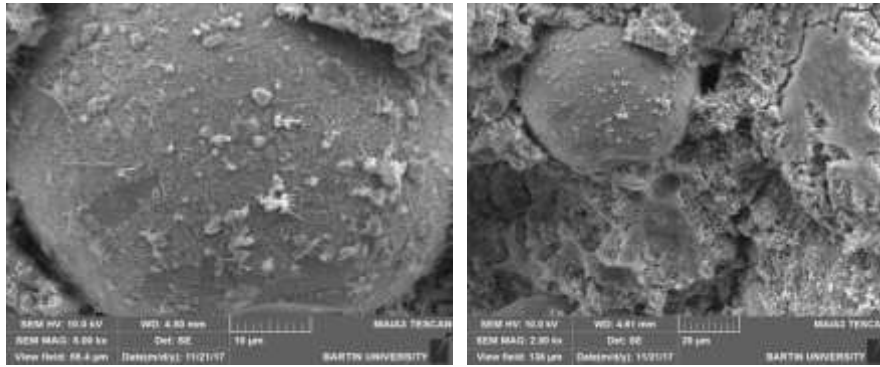
Şekil 24. C30/37 %50 GYFC ikameli beton numunesinin SEM görüntüsü.

C30/37 %50 TK ikameli beton numunesi C30/37 %50 GYFC beton numunesi ile kıyaslandığında (Şekil 25) gözenekliliğin arttığı görülmektedir.



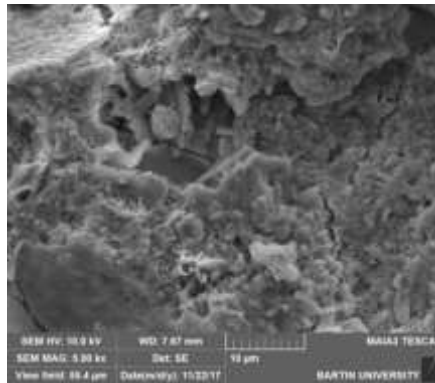
Şekil 25. Sağdaki resim C30/37 %50 TK ikameli, soldaki resim C30/37 %50 GYFC ikameli numunenin SEM görüntüsü.

Taban külü numunelerin gözenekli yapısı kompozitin porozitesini arttırmaktadır. C30/37 %50 TK ikameli beton numunesinde etrenjit oluşumu daha belirgin görülmektedir. C30/37 %100 GYFC beton numunesinin çimento fazı ile agrega fazı arasındaki kenetlenme bölgesinde C-S-H ve etrenjit yapılarının Şekil 26'da yoğunlaştığı görülmektedir.



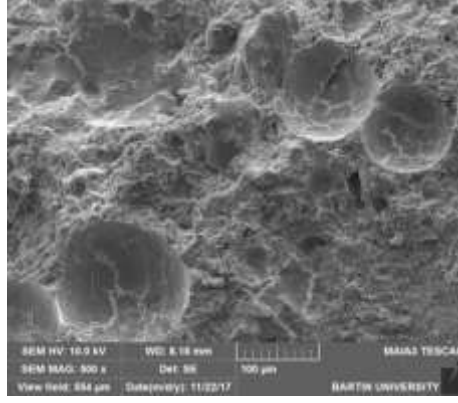
Şekil 26. C30/37 %100 GYFC ikameli beton numunesindeki C-S-H ve etrenjit yapıların SEM görüntüsü.

C30/37 %100 TK beton numunesinde gözenekliliğin arttığı görülmektedir. C30/37 %100 TK ile C30/37 %50 TK numuneleri kıyaslandığında gözenek boyutunun %50 TK numunesine göre daha büyük olduğu gözlenmiştir. Şekil 27'de C30/37 %100 TK'de belirgin etrenjit yapıları gözlenmektedir.



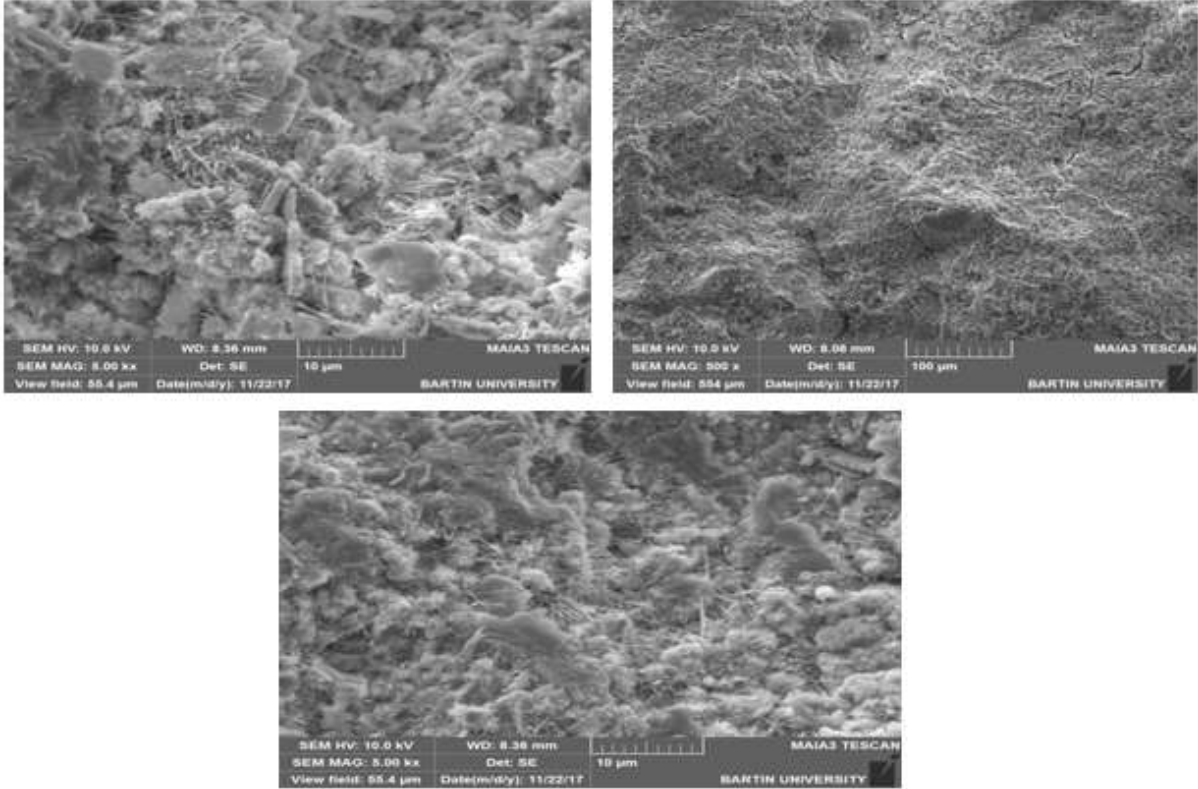
Şekil 27. C30/37 %100 TK ikameli beton numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 28'e göre C30/37 %100 TK'de gözeneklerden ilerleyen çatlak oluşumları görülmektedir.



Şekil 28. C30/37 %100 TK'de gözeneklerden ilerleyen çatlak oluşumlarının SEM görüntüsü.

C30/37 kontrol betonunun C30/37 %50 GYFC numunesine benzer bir içyapının olduğu görülmektedir. Kontrol betonlarında C-S-H yapısının içine yerleşmiş olan portlandit plakaları ve iğneli etrenjit oluşumları görülmektedir (Şekil 29).



Şekil 29. Kontrol betonlarında C-S-H yapısının içine yerleşmiş olan portlandit plakaları ve iğneli etrenjit oluşumların görüntüsü.

Kontrol betonları TK ikameli beton numuneleri ile kıyaslandığında TK katkılı numunelerdeki gözenekliliğin olmadığı tespit edilmiştir. Bir atık malzemenin ekonomik olarak değerlendirilmesine olanak verdikleri için ince agrega yerine taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanılabilir olması uygun görülmektedir. Endüstriyel yan ürün olan taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun santrallerde depolanması hem ekonomik hem de çevresel etkilerden dolayı büyük sorunlar oluşturduğundan agrega olarak kullanılması uygun görülmektedir. Taban küllerinin ve granüle yüksek fırın cürufunun betonda ince agrega yerine kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Yüksel, Özkan ve Bilir [17]'a göre de GYFC'nun betonda öğütülmeden ince agrega yerine kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak endüstriyel yan ürünlerinin ince agrega yerine kullanılmasının beton üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı irdelenmesi için ileride yapılacak olan araştırmalarda aşağıda belirtilen önerilerin dikkate alınması faydalı olacaktır.

- Kullanılan endüstriyel yan ürünlerin ince agrega olarak, beton eleman özelliklerine etkisi daha geniş kapsamlı ve yer değiştirme oranları daha düşük oranlarda seçilmiş şekilde araştırılmalıdır.
- Beton üretiminde ince agrega olarak kum yerine maliyeti daha uygun olan taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanımının tercih edilmesi ve bunun üzerine yönelik çalışmaların artırılması gerektiği düşünülmektedir.
- Bu çalışmada gözlenen basınç mukavemeti düşüşlerinin ortadan kalkması için daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.

Kaynaklar

- [1] TS-EN 206:2013+A1. 2017. Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü Teknik Kurulu, Ankara.
- [2] Öztok E. 2008. Hazır Beton Tesisinde En Uygun Nitelik Denetim Düzeyinin Mevsimsel Değişiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 132 s.
- [3] Landva A., Knowles D.,G. 1994. Construction Material, Geotechnics of Waste Fills, Theory and Practice, ASTM STP 1070, Philadelphia, 371 s.
- [4] Patrick M.L., Stephan D.A. 2012. Beneficial Use of Recycled Materials in Concrete Mixtures, Construction and Building Materials, 29: 428-437.
- [5] Malkit S., Rafat S. 2014. Compressive Strength, Drying Shrinkage and chemical Resistance of Concrete Incorporating Coal Bottom Ash as Partial or Total Replacement of Sand, Construction and Building Materials, 68: 39-48.
- [6] Yüksel İ., Bilir T., Özkan Ö. 2007. Durability of Concrete Incorporating Non-Ground Blast Furnace Slag and Bottom Ash as Fine Aggregate, Building and Environment, 42: 2651-2659.
- [7] Topçu İ.B., Bilir T. 2010. Effect of Bottom Ash as Fine Aggregate on Shrinkage Cracking of Mortars, ACI Materials Journal, January-February, 107-M08: 48-56.
- [8] Malkit S., Rafat S. 2013. Effect of Coal Bottom Ash as Partial Replacement of Sand on Properties of Concrete, Resources, Conservation and Recycling, 72: 20-32.
- [9] Kim H. K., Jeon J. H., Lee H. K. 2012. Flow, Water Absorption, and Mechanical Characteristics of Normaland High-Strength Mortar Incorporating Fine Bottom Ash Aggregates, Construction and Building Materials, 26: 249-256.
- [10] Yüksel İ., Bilir T. 2007. Usage of Industrial By-Products to Produce Plain Concrete Elements, Construction and Building Materials, 21: 686-694.
- [11] Wenyan Z., Mohamed Z., Yukio H. 2013. Influence of Aggregate Materials Characteristics on the Drying Shrinkage Properties of Mortar and Concrete, Construction and Building Materials, 49: 500-510.
- [12] Valcuende M., Benito F., Parra C., Miñano I. 2015. Shrinkage of Self-Compacting Concrete Made With Blast Furnace Slag as Fine Aggregate, Construction and Building Materials, 76: 1-9
- [13] Patrick M.L., Stephan D.A. 2012. Beneficial use of Recycled Materials in Concrete Mixtures, Construction and Building Materials, 29: 428-437.
- [14] Erdoğan T.Y. 2013. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş, 4. Baskı,

- Ankara, 757 s
- [15] URL-1 < http://www.bartincimento.com.tr/cem_i_425_r-11-2>, (Erişim tarihi: 09.09.2016).
- [16] Aruntaş H. 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1): 193-201.
- [17] Yüksel İ., Özkan Ö., Bilir T. 2003. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonda İnce Agregada Olarak Kullanımı, 5. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 471-481.
- [18] Özkan Ö., Yüksel İ., Muratoğlu Ö. 2007. Strength Properties of Concrete Incorporating Coal Bottom Ash and Granulated Blast Furnace Slag, Waste Management, 27: 161-167.
- [19] Topçu İ.B., Bilir T. 2010. Effect of Bottom Ash as Fine Aggregate on Shrinkage Cracking of Mortars, ACI Materials Journal, January-February, 107-M08: 48-56.
- [20] TS 500. 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.