

Anhidrit III Katkısının Çimento Esaslı Harcın Performansına Etkisi

Lütfullah GÜNDÜZ¹ ORCID 0000-0003-2487-467X

Şevket Onur KALKAN^{*1} ORCID 0000-0003-0250-8134

¹İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, İzmir

Geliş tarihi: 26.04.2022

Kabul tarihi: 27.12.2022

Atıf şekli/ How to cite: GÜNDÜZ, L., KALKAN, Ş.O., (2022). Anhidrit III Katkısının Çimento Esaslı Harcın Performansına Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(4), 959-972.

Öz

Yapı alçılarının (kalsiyum sülfat hemihidrat) hızlı sertleşme, düşük maliyet, çevre dostu olma gibi birçok avantajı olmasına rağmen, düşük basınç dayanımı, suya karşı direncinin ve dayanıklılığının nispeten düşük olması sebebi kullanım alanları sınırlanabilmektedir. Bu çalışmada, hemihidrat alçıya oranla fiziksel ve mekanik özellikleri nispeten daha iyi olan anhidrit III üretilmiştir. Çalışma kapsamında, anhidrit III çimento ile birlikte kullanılarak üretilen kompozitlerin verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Anhidrit III harç bileşimlerinde 0-90 µm, 0-125 µm ve 0-250 µm olmak üzere 3 ayrı boyutta değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, 17 ayrı seri harç üretilmiş, bu serilerde anhidrit III ağırlıkça %1,6'dan %64,8'e kadar kırma kum ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, test örneklerinde Anhidrit III miktarı arttıkça genel bir eğilim olarak birim hacim kütle değeri azalmıştır. Anhidrit III harçlarda kullanıldığı tane boyutuna da bağlı olmak üzere ortalama %29,4-39,5 aralığında kum ile yer değiştirme oranına kadar harcın basınç dayanımını artırmıştır. Bu oranlardan daha yüksek kullanım oranlarında ise basınç dayanımı azalmaya başlamıştır. 0-90 µm, 0-125 µm ve 0-250 µm Anhidrit III tane boyutu değişimine karşın harcın mukavemet değerlerinde yaklaşık $CaSO_4/(SiO_2+CaO) \approx 0,68, 0,68$ ve $1,05$ oran değerine kadar dayanım artışları, bu oran üzerinde değerlerde ise dayanım düşüşü olduğu gözlemlenmiştir. Harç tasarımlarında artan Anhidrit III oranı, sertleşmiş harcın matris yapısında gözenek oluşturmuştur. Matris yapıda gözeneklilik olgusu arttıkça ultrasonik dalga hızı değeri de düşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Anhidrit III, Çimentolu harç, Tane Boyutu, Dayanım, Ultrasonik dalga hızı

The Effect of Anhydrite III Additive on the Performance of Cement Based Mortar

Abstract

Although building gypsums (calcium sulfate hemihydrate) are fast hardening, cheap and environmentally friendly materials, their usage areas are limited due to low compressive strength, poor water resistance and low durability properties of them. In this study, anhydrite III, which has relatively better physical and mechanical properties compared to hemihydrate gypsum, was produced. Within the scope of the study, it is aimed to increase the efficiency of the composites produced by using anhydrite III and cement together.

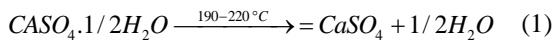
*Sorumlu yazar (Corresponding author): Şevket Onur KALKAN, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

Anhydrite III has been evaluated in three different particle sizes as 0-90 µm, 0-125 µm and 0-250 µm in mortar compositions. In this study, 17 different series of mortars were produced, and in these series, anhydrite 3 was used by replacing with crushed sand from 1.6 % to 64.8 % by weight. According to the results, as the amount of Anhydrite III increased, the unit volume mass value decreased. Depending on the grain size of Anhydrite III, it increased the compressive strength of the mortar up to the replacement levels of 29.4-39.5%. At higher usage rates, the compressive strength started to decrease. With the 0-90 µm, 0-125 µm and 0-250 µm Anhydrite III grain size changes, the strength values of the mortar increase up to approximately $CaSO_4/(SiO_2+CaO) \approx 0.68$, 0.68 and 1.05 ratio values, and the strength decrease at values above this ratio formation has been observed. As the porosity phenomenon in the matrix structure increased, the ultrasonic pulse velocity value also decreased.

Keywords: Anhydrite III, Cementitious mortar, Grain size, Strength, Ultrasonic pulse velocity

1. GİRİŞ

Doğal alçı taşı $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ kimyasal formülüne sahip kalsiyum sülfat dehidrattan oluşan yumuşak bir sülfat mineralidir [1-3]. Doğal alçı taşı saf olduğu durumda bileşiminde ağırlıkça yaklaşık %20,93 oranında kristal su ve %79,07 oranında $CaSO_4$ bulunur. Alçı taşının doğal nemi, 45 °C'lik bir sıcaklıkta ısıtılmayla bünyesinden atılabilir. Ancak bu sıcaklıkta kristal suyun bünyeden atılımı gerçekleşmez. Bunun için saf alçının bünyesindeki iki molekül suyun genellikle bir ısıtma işlemi bünyeden uzaklaştırılması sağlanır. Kristal suyun bünyeden uzaklaştırılmasına “*dehidrasyon*” denilmektedir [1,3-5]. Alçı taşı 190-220 °C aralığında ısıtıldığında ise özgül ağırlığı 2,3'den 2,95 gr/cm^3 'e yükselerek genellikle bünyesindeki kristal suyunun tamamını kaybeder ve ağırlığı %20,93 oranında azalır. Bu olgu Eşitlik 1'de belirtilen kimyasal reaksiyonla gerçekleşir [1,4].



Bu reaksiyon sonucu kristal suyunun tamamının ayrıştırılmasıyla oluşan kalsiyum sülfat, yapısal özelliğine göre bazen $CaSO_4 \cdot \epsilon H_2O$ formunda veya $CaSO_4$ III formunda olabilir. Bu ürüne genellikle *susuz alçı*, *çözünür heksagonal anhidrit* veya *Anhidrit III* gibi isimlerle adlandırılabilir [4]. Alçı taşının ısıtma işlemi sonucu bu yeni ürünü suya karşı daha duyarlı formda olup, bu bağlamda gerekli önlemler alınarak uygulandığında yüksek mukavemet oluşturan alçı harcı uygulamalarında veya alçı ürünlerin geliştirilmesinde kullanılabilir. Ayrıca ince boyutlarda

öğütülerek sınıflandırılmış mikronize boyutlardaki Anhidrit III, çimento esaslı beton veya harç tasarımlarında katkı malzemesi olarak belirli kullanım oranlarına kadar uygulandığı örnekler görülebilmektedir [6].

Çimento esaslı harç ürünlerinde çimentonun hidrasyonu sırasında etrenjit oluşum miktarında artışa neden olan çeşitli katkı maddelerinin kullanımına yönelik son yıllarda farklı uygulama ve teknolojilerin geliştirilebildiği görülmektedir. Bunların çoğunlukla kalsiyum alüminatlar olduğu görülmektedir. Çimento hidrasyonunda alüminat iyonlarının yanı sıra sülfat iyonları da etrenjit oluşumunu sağlayan gerekli bileşenlerdendir. Bu amaçla en sık kullanılan katkı maddesi ise anhidrit olarak görülebilmektedir [7].

Etrenjit, normalde Portland çimentosunun hidrasyonu sonucu betonun matris yapısında bulunan kalsiyum sülfat alüminatın ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) mineral adıdır [8]. Alçı taşı gibi kalsiyum sülfat kaynakları, erken hidrasyon reaksiyonlarını düzenleyerek flaş sertleşmeyi önlemek, harcın mukavemet gelişimini iyileştirmek ve kuruma büzülmesini azaltmak amacıyla Portland çimentosuna ilave edilir. Sülfat ve alüminat varlığı ayrıca karışımdaki çimento hariç diğer bileşen malzemelerde de bulunabilir. Karışımdaki bu sülfat ve alüminat varlığı, diğer sülfat bileşikleriyle birlikte suyla karıştırıldıktan sonraki ilk birkaç saatlik zaman dilimi içerisinde çimentodaki kalsiyum alüminat ile etrenjit minerallerini oluşturmak üzere reaksiyona girer [8]. Harçtaki bağlayıcı malzemelerde bulunan sülfatın çoğu normalde erken yaşlarda etrenjit

oluşturmak için tüketilir. Bu bağlamda taze ve plastik betonda etrenjit oluşumu, sertleşmeyi kontrol eden mekanizma olarak görülebilmektedir. Etrenjit, çimento esaslı harçlarda erken mukavemet oluşumu açısından Portland çimentosu hamurdaki önemli mineral bileşenlerdendir [8]. Oluşan etrenjitin kalıcı bir form kazanması durumunda harcın mukavemet değerini de arttırdığı çoğu beton ve harç araştırmalarında tecrübe edinilmiştir [9-13].

Bu makalede Aksaray bölgesinde rezervleri bulunan alçıtaşı ocaklarından piyasa koşullarında doğal kayaç olarak tedarik edilen alçıtaşının 200 °C'lik bir ısıtma işlemiyle dehidratasyonu ve kalsinasyonu sonucu oluşturulmuş Anhidrit III ürününün üç farklı tane boyutunda katkı materyali olarak kullanıldığı çimento esaslı bir dizi harç tasarımlarının deneysel analizlerine ait bulgular özetle tartışılmıştır. Anhidrit III malzemenin çimento esaslı harç kombinasyonunda diğer agrega bileşeni kırmataş kumuyla yer değiştirmeli olarak kullanımında, harcın fiziksel ve mekanik bazı özelliklerine olan etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulardan çimento bağlayıcı sistemli bir harç tasarımında, optimum Anhidrit III kullanım oranının belirlenmesi ve ayrıca Anhidrit malzemenin değişken tane boyutunun harç performansına olan etkisi özetle tartışılmıştır. Konu üzerine daha detay araştırma yapacak araştırmacılara teknik bir görüş ve yaklaşımlar sunulması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Test Örneklerinde Kullanılan Malzemeler

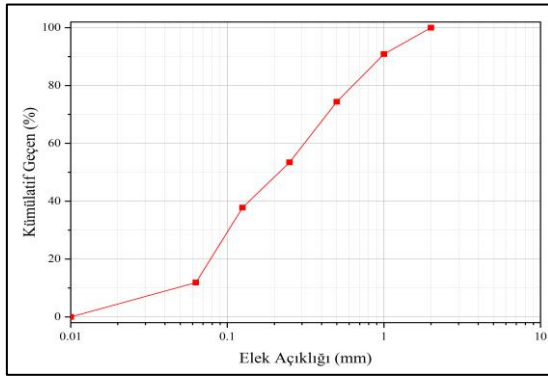
Anhidrit III katkılı çimento esaslı harç (AKH) örneklerinin hazırlanması amacıyla başlıca dört farklı malzeme tüm karışım kombinasyonlarında kullanılmıştır: Portland çimentosu (PÇ), Anhidrit III (AIII), kireçtaşından elde edilen kırmataş kumu (KK) ve harmanlanmış polimer katkı (PO) materyali. Bu malzemelerden çimento ana bağlayıcı materyal olarak kullanılmış olup, Anhidrit III ve kırmataş kumu ise agrega materyali olarak değerlendirilmiştir. Harmanlanmış polimer katkı ise harç kıvamını ayarlayıcı, akışkanlaştırıcı

ve kohezyon artırıcı katkı materyalleri olarak kullanılmıştır.

Aksaray bölgesinde rezervleri bulunan alçıtaşı ocaklarından piyasa koşullarında doğal kayaç olarak tedarik edilen alçıtaşı, laboratuvar ortamında birincil bir kırıcıda kırılıp, 1 mm kare göz açıklıklı bir elekten elenmiştir. Alçıtaşı, 0-1 mm boyutunda sınıflandırılarak, 200 °C sıcaklıktaki bir fırın ortamında 15 dakika süreyle dehidratasyon ve kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Anhidrit III olarak kabul edilen malzemelerin suya karşı son derece duyarlı oldukları ve ısıtma işlemi sonrası havanın içerisindeki nemle reaksiyona girerek özelliğini kaybetmesi çoğu çalışmada genel olarak tecrübe edilmiş bir durumdur. Bu bağlamda, uygulanan ısıtma işlemi sonucu fırın çıkışındaki malzeme bekletmeksizin laboratuvar ortamında nem sızdırmaz bir desikatör içerisine alınarak havadan nem alması engellenerek ortalama 48 saat süreyle soğumaya ve dinlenmeye bırakılmıştır. Sonrasında yapılan kontrollerde ısıtma işlemi sürecinde kaybettiği nem tekrar geri kazanmadığı belirlenmiştir. Isıtma işlemi öncesi ve sonrasında alçıtaşı örneğinin ağırlıkları ölçülmüştür. 200 °C dehidratasyon ve kalsinasyon işlemiyle alçıtaşı örneğinin ortalama %20,60 oranında ağırlığının azaldığı ve bununla birlikte ortalama %98,3 oranında kristal suyunu kaybettiği tespit edilmiştir. Bulunan bu değerler literatürde özellikle anhidrit alçı oluşumu için öngörülen ağırlık azalması oranına (%20,90) ve kristal suyu kaybı oranına (%100) yakınsak değerdedir [1,4,14]. Doğal haliyle alçı taşı ocağından temin edilen örneklerin tamamıyla saf bir doğal alçı taşı karakteristiği sergilemesinin söz konusu olmayacağı dikkate alındığında 200 °C'de ısıtma işlemi tabi tutulmuş örneklerin kristal suyunu tümüyle kaybettiği kabul edilmiş olup, dehidratasyon ve kalsinasyon sonucu elde edilen bu ürün çalışma kapsamında Anhidrit III olarak değerlendirilmiştir. Sonrasında 1 mm boyut altındaki Anhidrit III malzeme öğütülerek maksimum tane boyutu 90 µm, 125 µm ve 250 µm olacak şekilde 3 ayrı boyutta (0-90 µm, 0-125 µm ve 0-250 µm) sınıflandırılmıştır. 0-90 µm, 0-125 µm ve 0-250 µm Anhidrit III malzemelerin ortalama birim hacim kütleleri sırasıyla 2574, 2541 ve 2522 kg/m³'tür. Bu üç ayrı boyuttaki örnekler,

ayrı ayrı tüm harç tasarımlarında Anhidrit III olarak karışımlara ilave edilmiştir.

AKH test örneklerinin karışımlarında maksimum tane boyutu 2 mm olan ve kireçtaşından elde edilen kırmataş kumu agrega olarak kullanılmıştır. Kırmataş kumunun kuru birim hacim kütlesi ortalama 2610 kg/m³ olup, doygun birim hacim kütlesi ise 2684 kg/m³'tür. Su emme değeri ortalama %3,2 olup, tane şekli ise çoğunlukla yuvarlak taneler şeklindedir. Çalışma kapsamında kullanılan kumun elek analizi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kum elek analizi

Çimento ve alçı esaslı malzemelerde karışım suyunu azaltan ve yüksek akışkanlık özelliği kazandıran, düşük sıcaklıklarda da kullanıma uygun, toz formda melamin esaslı bir süper akışkanlaştırıcı, harç kıvamının dengelenmesi amacıyla karışımlara ilave edilmiştir. Klor iyonu içermeyen toz süper akışkanlaştırıcı katkının pH değeri (%30'luk çözeltide) ortalama 8,5-9,5, özgül ağırlığı ortalama 0,55 g/cm³ olup, ASTM C 494 standardına uygun "Type G" türü bir katkı malzemesidir [15]. AKH test örneklerinin hazırlanmasında CEM I 42,5R Portland Çimento (özgül ağırlık değeri 3,15 g/cm³) kullanılmış olup, harç karışımlarının elde edilmesinde karma suyu olarak normal şebeke suyu kullanılmıştır. Bununla birlikte, Anhidrit III katkılı harç karışımlarında harcın rötre oluşumunu minimize edici, harca mukavemet ve bağ kuvvetini artırmak amacıyla ticari piyasa koşullarından temin edilmiş toz formda 2 farklı kimyasal polimer katkı, melamin esaslı süper akışkanlaştırıcı ile birlikte

harmanlanarak tek bir karışım olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan karışımlarda kullanılan çimento, kum, anhidrit ve harmanlanmış polimer katkının oksit bileşenleri XRF yöntemi ile tespit edilmiş olup, Anhidrit III malzemenin CaSO₄ oranı da belirlenerek ortalama değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimento, kum anhidrit ve harmanlanmış polimer katkının bazı kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %)

Bileşen	Çimento	Kum	Anhidrit	Polimer Katkı
SiO ₂	19,12	0,22	0,36	0,07
Al ₂ O ₃	4,75	0,15	-	-
Fe ₂ O ₃	3,53	0,01	-	-
CaO	64,7	55,17	0,55	14,9
Na ₂ O	0,21	0,01	-	8,99
K ₂ O	0,88	0,01	-	5,78
MgO	0,94	0,52	-	0,13
K.K.	5,21	43,61	0,01	68,71
CaSO ₄	-	-	98,9	-

2.2. Karışım Tasarımı ve Örnek Hazırlama

Çimento esaslı harç tasarımlarında Anhidrit III katkı kullanımının harcın performansına etkisinin analizi amacıyla 17 ayrı karışım tasarımı yapılmış olup, karışım oranları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Harç karışım kombinasyonları (ağırlıkça %)

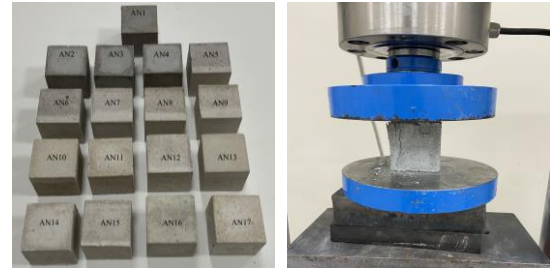
Karışım	PÇ	AIII	KK	PO
AN1	16,3	1,6	78,9	3,2
AN2	16,3	3,4	77,1	3,2
AN3	16,3	6,8	73,7	3,2
AN4	16,3	11,2	69,3	3,2
AN5	16,3	14,7	65,8	3,2
AN6	16,3	20,3	60,2	3,2
AN7	16,3	25,8	54,7	3,2
AN8	16,3	29,4	51,1	3,2
AN9	16,3	33,6	46,9	3,2
AN10	16,3	39,5	41,0	3,2
AN11	16,3	44,6	35,9	3,2
AN12	16,3	48,3	32,2	3,2
AN13	16,3	51,2	29,3	3,2
AN14	16,3	54,7	25,8	3,2
AN15	16,3	58,5	22,0	3,2
AN16	16,3	61,3	19,2	3,2
AN17	16,3	64,8	15,7	3,2

Anhidrit III katkısının çimento esaslı harç tasarımlarında agrega olarak kullanımındaki etkinliği ve performansını analiz etmek amacıyla Anhidrit III ile kırmataş kumu ağırlıkça oranlarda yer değiştirmeli olarak kullanılmıştır. Tasarlanan ilk harç karışımında Anhidrit III miktarı ağırlıkça %1,6 oranı ile karışımlardaki en düşük miktar olarak (AN1) irdelenmiş olup, sonraki 16 karışımda Anhidrit III %64,8 oranına (AN17) kadar artırılarak kullanılmıştır. Tüm karışımlarda çimento miktarı ağırlıkça %16,3 sabit oranda kullanılmıştır. Benzer şekilde harmanlanmış polimer katkı materyali de (%0,4'ü akışkanlaştırıcı, %1,2'si rötre oluşumunu minimize edici, %1,6'sı mukavemet ve bağ kuvvetini artırıcı polimer katkı olmak üzere) ağırlıkça %3,2 sabit oranda kullanılmıştır.

Karışımlarda kullanılan Anhidrit III malzeme, karışımların yapılacağı zamana kadar nemden korunaklı muhafazalı bir kap içerisinde kuru durumda tutulmuştur. Genel bir eğilim olarak kuru formda Anhidrit III malzeme su ile karıştırılınca hızlı şekilde priz alıp topaklanma yapma olasılığı oldukça yüksektir. Harçtaki bu topaklar arası bağ oldukça zayıf olduğu için numunenin basınç dayanımını düşürücü olumsuz bir etki sergileyecektir. Bu bakımdan, kuru durumdaki Anhidrit III malzemenin taze harç karışımı sırasında olası bu dezavantaj oluşturabilecek özelliğini giderici bir ortamın ve/veya karışımın tasarlanması kaçınılmaz olmaktadır. Bu bağlamda, karışıma ilave edilen polimer katkıların harcın teknik performansına olumlu etkilerinin yanı sıra Anhidrit III malzemenin olası hızlı priz almasını da engelleyerek topaklanmaları önleyici bir etki sergilemesi önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan gerek akışkanlaştırıcı katkının ve gerekse diğer polimer katkıların aynı zamanda bu işlev için de son derece önemli katkı sağladığı, prizi geciktirerek ve topaklanma oluşmaksızın işlenebilir düzeyde Anhidrit III katkılı yaş harç formlarının elde edilebildiği görülmüştür. Analizler için tasarlanmış karışım oranlarındaki çimento dahil tüm toz formdaki malzemeler öncelikle kuru formda bir kap içerisinde harmanlanarak homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Daha sonra bu

harmanlanmış tüm toz karışımlara sabit su/çimento oranı (W/C) 0,70 olacak şekilde karma suyu ilave edilmiştir.

Hazırlanan harç karışımları belirlenen su/çimento oranındaki karma suyu ile ortalama 600 dev/dk'lık bir karıştırıcıyla öncelikle 5 dakika boyunca topaklanma olmaksızın homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Elde edilen taze harç yaklaşık 2 dakika dinlendirildikten sonra önceden yağlanarak hazırlanmış 50x50x50 mm³'lük küp kalıplara vibrasyon yapılarak yerleştirilmiştir. Dökümü yapılan test örneklerinin yüzeyleri ilk 24 saat boyunca su, güneş, rüzgâr ve dondan korunmuştur. Ayrıca özel maddeler ile hızlı buharlaştırma gibi benzeri herhangi bir uygulama yapılmamıştır. Küp numuneler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 0-90 µm anhidrit III katkılı numune örnekleri

Test örnekleri dökümden 1 gün sonra kalıplardan çıkartılmış ve termostatlı bir kür havuzunda test tarihine kadar 20 ± 2 °C sıcaklıktaki su içerisinde kür işlemi uygulanmıştır. Teste tabi tutulacak tüm örnekler, kür havuzundan çıkartılarak kuru bir bez havlu ile yüzeyleri kurularak, yüzey kuru doygun halde birim hacim kütle, dayanım ve ultrasonik dalga hızı testlerine tabi tutulmuştur. Farklı tane boyutlu Anhidrit III katkılı olarak hazırlanan karışımlardaki her bir seride 12'şer adet test numunesi dökümü yapılmış olup, tüm çalışmada toplam 612 adet numune kullanılmıştır. Döküm işleminden itibaren 28 gün kür sonrasında basınç dayanım testleri için her bir seride 10'ar adet örneğin öncelikle birim hacim kütlesi ve ultrasonik dalga hızı ölçümleri ultrasonik dalga hızı test cihazı (Matest C369N) yardımıyla, 55 kHz probalar ile, ASTM C 597 [16] ve TS EN 12504-4 [17] standartlarına göre yapılmıştır. Bu

örnekler sonrasında 20 ton basma kapasiteli otomatik servo kontrollü bir çimento basma-çekme-eğilme test cihazında kırma işlemi 50x50x50 mm³'lük küp numuneler üzerinde ASTM C109 [18] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel analizlerde elde edilen tüm bulguların veri kümeleri oluşturularak, her bir test türü ve veri kümesine ait standart sapmaları belirlenmiş, bu veri kümesine ait aritmetik ortama değeri standart sapma değeriyle düzelterek ortalama test bulgusu olarak bu çalışmada değerlendirilmiştir. Ayrıca her bir karışıma ait 2'şer adet örnek ise yapısal ve gözlemsel incelemeler için değerlendirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Birim Hacim Kütle

Farklı tane boyutlarındaki Anhidrit III ile hazırlanan sertleşmiş AKH test örneklerinin 28 gün kür sonrası kuru yüzey doygun birim hacim kütle değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

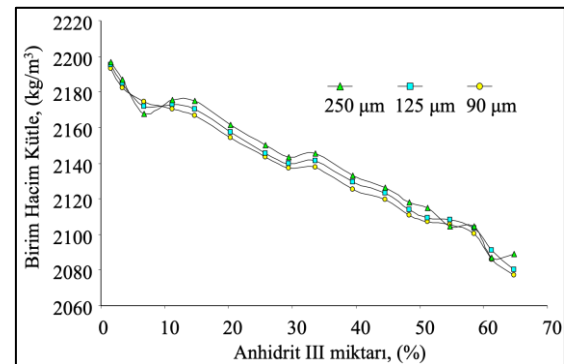
Çizelge 3. Sertleşmiş harç birim hacim kütle analizi (kg/m³)

Karışım	Anhidrit III katkı boyutu		
	90 µm	125 µm	250 µm
AN1	2193	2195	2197
AN2	2182	2185	2187
AN3	2175	2172	2168
AN4	2170	2173	2176
AN5	2167	2170	2175
AN6	2154	2157	2162
AN7	2144	2145	2150
AN8	2137	2140	2144
AN9	2138	2141	2145
AN10	2125	2130	2133
AN11	2120	2123	2126
AN12	2111	2114	2118
AN13	2107	2109	2115
AN14	2106	2108	2105
AN15	2100	2103	2105
AN16	2086	2091	2087
AN17	2077	2080	2089

AKH test örneklerinde Anhidrit III miktarı arttıkça genel bir eğilim olarak birim hacim kütle değeri azalmıştır. Anhidrit III maksimum tane boyutu 90 µm katkılı AKH örneklerinin birim hacim kütle değeri 2193 kg/m³'ten artan Anhidrit III miktarına göre 2077 kg/m³ değerine kadar düşmüştür. En

düşük Anhidrit III miktarının yer aldığı karışım ile en yüksek Anhidrit III miktarının yer aldığı örnekler arasında ortalama %5,3'lük azalma kaydedilmiştir. Anhidrit III boyutu 90 µm'dan 125 µm'e çıktığında ise bu değişim %5,2'lik oranla 2195 kg/m³'den 2080 kg/m³'e azalmıştır. Benzer şekilde maksimum Anhidrit III boyutu 250 µm olan örneklerde ise bu değişim %4,9'lük oranla 2197 kg/m³'ten 2089 kg/m³'e azalmıştır. Khatib ve arkadaşları [19] çalışmalarında alçı ve çimentonun birlikte kullanılması ile matris yapıda daha çok gözenek oluşarak harcın birim hacim kütle değerinin azaldığını tespit etmişlerdir.

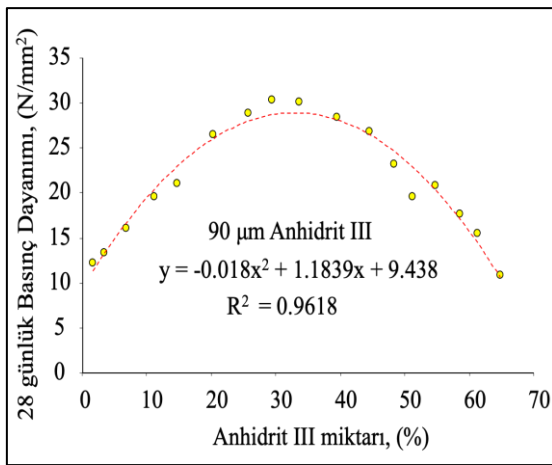
Analizlerde elde edilen bulgular, Anhidrit III tane boyutu büyüdükçe, eşdeğer karışım oranlarında sertleşmiş harç örneklerinde birim hacim kütle değerlerinin genel bir eğilim olarak ortalama %0,15-%0,45 aralığında artış göstermiştir. Bu da maksimum Anhidrit III tane boyutu irileştikçe, boyut dağılımı içerisinde yer alan ince madde oranının kısmen daha yüksek oluşundan kaynaklandığı düşünülmüştür. Anhidrit III boyut farklılığına göre AKH test örneklerinin birim hacim kütle değişimi grafiksel olarak Şekil 3'te gösterilmiştir. Grafiksel gösterimde özellikle Anhidrit III katkı oranının %6,8, %54,7 ve %61,3 olduğu karışım örneklerinde agreganın tane şekli, agrega miktarı ve taze harcın kalıba yerleşebilirliğinden kaynaklandığı düşünülen birim hacim kütle değerlerinde küçük bir dalgalanmanın olduğu gözlenmiştir. Ancak, bu durumun birim hacim kütle değeri değişimindeki eğilimi etkileyecek bir düzeyde olmadığı görülmüştür.



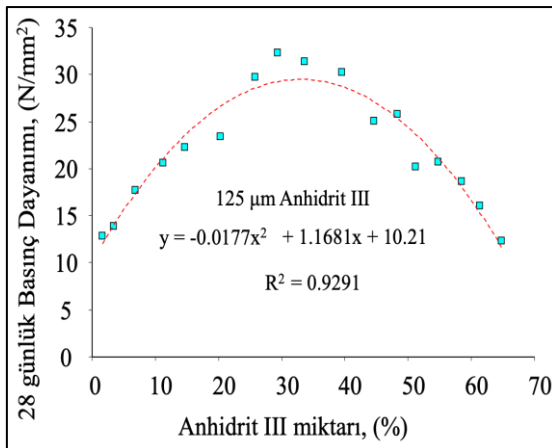
Şekil 3. Anhidrit III miktarı – sertleşmiş harcın birim hacim kütle ilişkisi

3.2. Anhidrit III Tane Boyutunun Sertleşmiş Harcın Basınç Dayanımına Etkisi

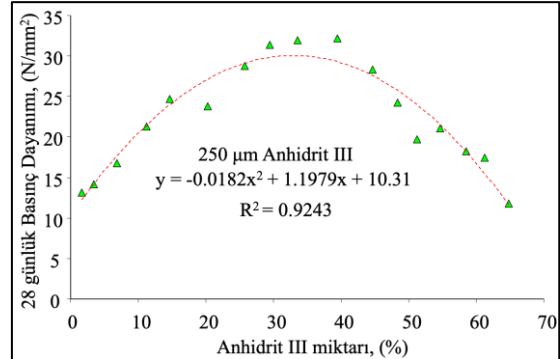
Üç farklı tane boyut dağılımına sahip Anhidrit III katkıları olarak hazırlanan sertleşmiş harç örneklerinin 28 gün kür sonrası doygun durumda basınç dayanım değerleri analiz edilmiş olup, bulgular her bir boyut aralığı için grafiksel olarak Şekil 4 – Şekil 6’de verilmiştir.



Şekil 4. Anhidrit III miktarı – sertleşmiş harcın basınç dayanımı ilişkisi (0-90 µm Anhidrit III katkı)



Şekil 5. Anhidrit III miktarı – sertleşmiş harcın basınç dayanımı ilişkisi (0-125 µm Anhidrit III katkı)



Şekil 6. Anhidrit III miktarı – sertleşmiş harcın basınç dayanımı ilişkisi (0-250 µm Anhidrit III katkı)

AKH test örneklerinde katkı maddesi olarak kullanılan Anhidrit III miktarının sertleşmiş harcın basınç dayanımına belirli bir kullanım oranına kadar pozitif artan bir dayanım özelliği sağladığı, ancak belirli bir kullanım oranından sonra daha fazla miktarda Anhidrit III katkısı kullanımının ise dayanıma negatif azaltıcı bir etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu olgu Anhidrit III malzemenin her 3 farklı tane boyutu için de yakınsak karakteristik sergilemiştir. Elde edilen dayanım bulguları, Anhidrit III miktarı kullanımlarına göre grafiksel olarak analiz edildiğinde (Şekil 4-Şekil 6’da görüldüğü üzere), polinomial birer ilişki oluşmaktadır. Bu ilişkinin regresyonel anlamlılık düzeyinin de oldukça yüksek kabul edilebilecek bir düzeyde olduğu (R^2 değerleri $>0,92$) görülmüştür. Güneşli ve arkadaşları [6] çalışmalarında çimento ve kırmataş agrega kullanarak hazırladıkları beton örneklerinde doğal anhidriti beton bileşeni olarak değerlendirmiş ve beton test örneklerinin basınç dayanım değerlerinde de benzer sonuçları elde etmişlerdir. Güneşli ve arkadaşları [6] yapmış oldukları çalışmada, beton tasarımlarında agrega ile yer değiştirmeli olarak ağırlıkça %3,82-%65,60 oranlarında değişen doğal anhidrit malzemeyi yer değiştirerek hazırlamış oldukları 14 farklı karışımda, anhidrit miktarının ortalama %33,7 oranına kadar, betonun basınç dayanımını artırıcı bir etki sağladığı, bu kullanım oranından sonra ise dayanımı düşürücü bir etki sağladığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, belli bir anhidrit III kullanım oranından sonra azalan basınç dayanımı ilgili kullanım oranından sonra matris yapıda meydana

gelen boşlukların hacminin de artması ile de ilişkilendirilebilir [19]. Ayrıca, araştırmacılar çimento ile alçının birlikte kullanımında puzolanik malzemelerin karışımlara ilave edilmesini basınç dayanım kaybının önlenmesi açısından tavsiye etmektedir [20].

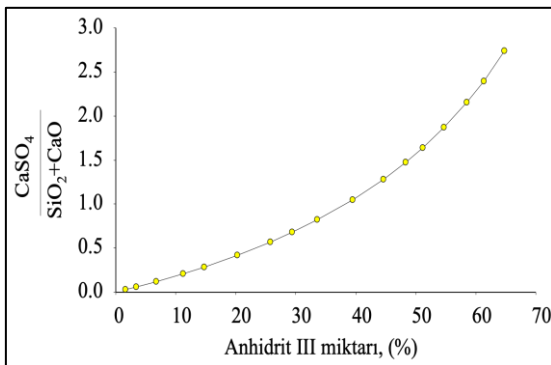
Anhidrit III malzemenin çimento harcında katkı maddesi olarak kullanım etkinliği üzerine yapılan bu çalışmada, 0-90 µm boyutlu Anhidrit III katkılı harç örneklerinde ağırlıkça %29,4 Anhidrit III katkı oranına kadar dayanım değerlerinin 12,2 N/mm²'den 30,3 N/mm²'ye kadar yükseldiği, bu kullanım oranından daha fazla oranda kullanıldığında ise dayanım değerlerinin düşerek 10,9 N/mm² değerine kadar dayanım kaybettiği belirlenmiştir. Diğer bir deyişle ağırlıkça %29,4 oranına kadar kırmataş kumu ile yer değiştirmeli şekilde kullanılan 0-90 µm Anhidrit III katkısı, 28 gün kür sonrasında sertleşmiş harcın dayanımını 2,48 kat artırmıştır. Benzer davranış, 125 µm'lik Anhidrit III için de görülmüştür. Ağırlıkça %29,4 oranına kadar kırmataş kumu ile yer değiştirmeli şekilde kullanılan 0-125 µm Anhidrit III katkısı, basınç dayanımını 2,52 kat artırarak 12,8 N/mm²'den 32,3 N/mm²'ye yükselmiştir. Ancak, Anhidrit III boyutu 250 µm'ye geçtiğinde ise katkı kullanımındaki ağırlıkça bu etkinlik oranı %29,4'den %39,5'e çıkmıştır. Bu kullanım oranında 0-250 µm Anhidrit III katkısı, basınç dayanımını 2,46 kat artırarak 13,1 N/mm²'den 32,2 N/mm²'ye yükselmiştir. Grafikselsel yaklaşım daha detaylı irdelendiğinde, 90 µm ve 125 µm Anhidrit III'ün ağırlıkça %25,8-%33,6 kullanımı ile harçların basınç dayanımlarının birbirlerine yakın değerler aldığı gözlenmiştir. Bu nedenle, 90 µm ve 125 µm boyutlu Anhidrit III kullanımları için bu oranlar harçta maksimum mukavemet elde etmek amacıyla kullanım etkinliği aralığı olabileceği düşünülmüştür. Anhidrit boyutu 250 µm'ye büyüdüğünde ise bu etkinlik aralığının ortalama ağırlıkça %29,5-%40 olabileceği öngörülebilmektedir. Diğer taraftan, Anhidrit III tane boyutu arttıkça eşdeğer katkı kullanım oranlarında sertleşmiş harcın dayanımlarını %1,6 ile %4,3 oranlarında artırdığı belirlenmiştir.

Sertleşmiş harcın basınç dayanımında Anhidrit III katkı kullanımında elde edilen bu etkinlik, normal

koşullarda Anhidrit III malzemenin tek başına kullanımı durumunda bağlayıcı özelliği bulunmasına bağlanabilir. Anhidrit III'ün salt malzeme olarak basınç dayanımı genellikle karışımda agrega olarak kullanılan kırmataş kumunun dayanımından daha düşüktür. Ancak, karışımda Anhidrit III kullanımı arttıkça kırmataş kum agrega oranı azalmakta olup, yukarıda belirlenen oranlara kadar, Anhidrit III ile kırmataş kum arasında oluşan pozitif ilişki, Anhidrit III'ün çimento gibi davranarak bağlayıcı özellik sergilemesi ve ilaveten karışımda çimento varlığı ile birlikte dayanım değerleri iyileşmiştir. Bununla birlikte, bu dayanım değeri artışında mineral katkı malzemelerinin göstermiş olduğu "filler" özelliğinin agregadan daha düşük dayanım gösteren anhidrit III malzemesinin, betonun belli bir noktaya kadar dayanımının artmasında önemli bir rol oynamış olabileceği de düşünülmektedir. Ayrıca, çalışma kapsamındaki tüm karışımlarda sabit oranda kullanılan polimer katkı malzemesinin, test örneklerinin dayanım artışının görüldüğü Anhidrit III kullanım oranına kadar daha etkin bir dayanım iyileştirici etki göstermiş olabileceği ihtimali de düşünülmektedir. Ancak, Anhidrit III'ün tane boyutuna bağlı olarak karışımlarda ağırlıkça %29,4 ve %39,5 oranlarını geçmesi, Anhidrit III'ün bir bağlayıcı nitelik sağlamasından öte, çoğunlukla agreganın yerini alarak agrega gibi davranarak harcın dayanımını düşürmüştür. Anhidrit III'ün tekil malzeme olarak dayanımı, kırmataş agreganın dayanımından daha düşüktür. Anhidrit III bu oranların üzerinde kullanıldığında, harç tasarımında anhidrit III miktarı artışı, her ne kadar bağlayıcı bir malzeme oranı artışı olarak görülse de karışımda dayanımı Anhidrit III'e göre daha yüksek olan agrega miktarının azalması sebebiyle nihai olarak sertleşmiş harcın mukavemeti etkin bir şekilde düşmüştür.

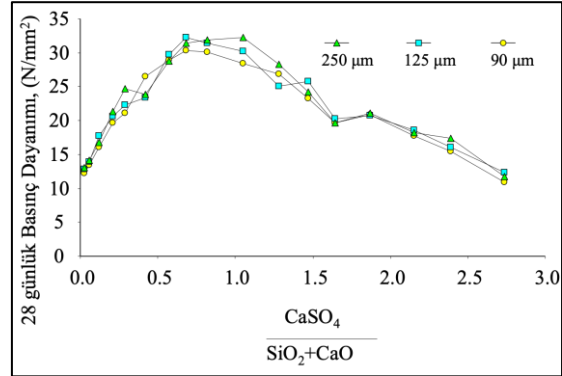
Anhidrit III katkı kullanımının sertleşmiş harcın dayanımı üzerindeki pozitif veya negatif etkinlik davranışı, bu çalışmada bir diğer yaklaşımla harç tasarımında kullanılan tüm malzemelerin oluşturduğu kimyasal majör bileşenleriyle ilişkilendirilerek de özet bir irdelene yapılmıştır. Karışıma giren her bir malzemenin (bağlayıcı çimento da dahil) öncelikle kimyasal majör bileşenleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha sonra

AN1 – AN17 karışımlarının her biri için karışımda yer alan malzeme kullanım oranlarına göre nihai karışımın CaSO_4 , SiO_2 ve CaO miktarları ağırlıkça “%” değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu % değerler, her bir karışım kombinasyonunun kimyasal içeriğinin yakınsak değerinin temsil edilmesi açısından sayısal bir parametre olarak düşünülmüştür. Anhidrit malzeme CaSO_4 bileşenli bir malzeme olması ve diğer çimento-kırmataş kumu bileşimi de çoğunlukla SiO_2 ve CaO bileşenleri ile temsil edilebilirliği düşünülerek, her bir karışım tasarımının kullanılan malzeme türü ve miktarlarına göre ayrı ayrı “ $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO})$ ” oranları görgül birer parametre olarak belirlenmiştir. Örneğin AN1 karışımı için karışımda yer alan malzeme kullanım oranları ve kimyasal majör bileşenlerinin % değerlerine göre yapılan incelemede karışımdaki SiO_2 oranı %3,298, CaSO_4 oranı % 1,582 ve CaO oranı ise %54,561 olarak elde edilmiştir. Bu değerlendirmeye göre AN1 karışımının “ $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO}) = 0,027$ ” olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde bir diğer karışım AN17 için ise karışımdaki SiO_2 oranı %3,387, CaSO_4 oranı % 64,087 ve CaO oranı ise %20,041 olarak elde edilmiştir. Bu değerlendirmeye göre de AN17 karışımının “ $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO}) = 2,736$ ” olarak elde edilmiştir. Bu oransal değerlendirme diğer tüm karışımlar için de ayrı ayrı yapılmış olup, AN1–AN17 arası karışımlarında yaklaşık 0,03 değerinden 2,74 değerine kadar değişmektedir (Şekil 7). Karışımda Anhidrit III oranı arttıkça $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO})$ oran değeri de lineer bir eğilimle artış göstermiştir.



Şekil 7. Anhidrit III miktarı-harç tasarımının $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO})$ oranı ilişkisi

Çalışmada bu oran değişimine karşın, her bir Anhidrit III katkı kullanımındaki sertleşmiş harcın basınç dayanımları bağlamında ilişkilendirildiğinde Şekil 8’de verilen değerlendirme elde edilmiştir.



Şekil 8. $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO})$ oranı - sertleşmiş harcın basınç dayanımı ilişkisi

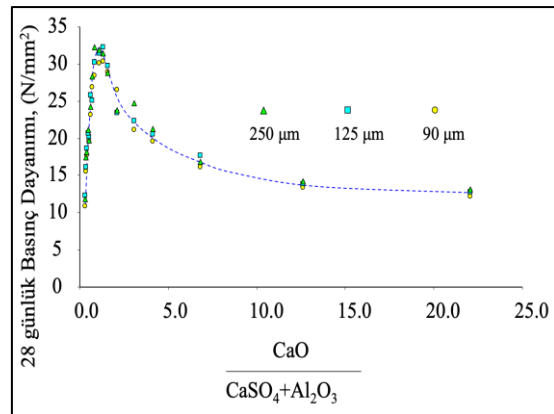
Bu irdelemeden de görüldüğü gibi, 90 µm–125 µm Anhidrit III tane boyutu değişimine karşın harcın mukavemet değerlerinde yaklaşık $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO}) \approx 0,68$ oran değerine kadar yakınsak dayanım artışları, bu oran üzerinde değerlerde ise dayanım düşüşü olduğu görülmektedir. Benzer davranış, 250 µm Anhidrit III tane boyutu için harcın mukavemet değerleri yaklaşık $\text{CaSO}_4/(\text{SiO}_2+\text{CaO}) \approx 1,05$ oran değerine kadar değişim göstermiştir. Buradan da görüldüğü üzere, maksimum mukavemet elde etmek için daha ince tane boyutlu Anhidrit III malzeme kullanımında karışımdaki toplam CaSO_4 varlığı daha düşük oranda etkinlik gösterdiği, ancak tane boyutu büyüdükçe bu oranın daha yüksek değerlerde etkin olabildiği gözlenmiştir.

Çimentoadaki C_2S ve C_3S ana bileşenlerinin hidrasyonu, çimento hamuruna bağlayıcılık sağlayan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin yanı sıra, kalsiyum hidroksit (CH) oluşmasına yol açmaktadır. C_4AF ve özellikle C_3A ile çimento içerisinde yer alan alçının ve suyun arasındaki reaksiyonlar ise, etrenjit ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), ve kalsiyum-alumino-monosülfohidrat ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$) gibi ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çimento ve su arasındaki reaksiyonlar sonucunda, çimento

hamurunun yapısında yer alan başlıca hidrasyon ürünleri, C-S-H, CH, ve kalsiyum alüminosülfhidratlardır. Hem C_4ASH_{12} , hem de $C_6AS_3H_{32}$, çimento hamurunun genişlemesine yol açmaktadır [21]. Özellikle, etrenjit bünyesinde 32 molekül su bulduran ve oluşumu çimento hamurunda çok büyük genişmelerin meydana gelmesine yol açan bir beton bileşeni olarak değerlendirilmektedir [22].

Bilindiği gibi, çimentolu matris yapılarında etrenjit oluşum oranı sülfat miktarına göre değişiklik gösterebilir. Etrenjit stabilitesi kinetik ve termodinamik parametrelere bağlıdır. Bu parametreler; sıcaklık, nem ve karbonatlaşma direnci olarak tanımlanmaktadır [23]. Hidratların oluşma aşamasında, düşük geçirgenliğe sahip matrisler, geçirgen matrislerden daha farklı bir yol izlemektedir. Plastik bir yapıyı oluşturabilmek adına minimum su miktarı ile oluşturulan şaplar ve tamir harçları için etrenjit oluşumu yüksek önem taşımaktadır [23]. Etrenjit açısından zengin kompozisyonlar genellikle boyutsal kararlılığa sahip olurlar. Fakat çok yüksek miktarda etrenjit olması demek her durumda fiziksel stabilite sağlanacak anlamına gelmemektedir [23]. Bununla birlikte sülfatlı suların çimento hamuru içerisine sızmasıyla yarı kararlı C_4ASH_{12} 'nin etrenjite dönüşmesiyle meydana gelen ve çok büyük genişmeler sonucunda betonda çatlamlara yol açan olaya "sülfat hücumu" denilmektedir [22]. Bu bağlamda, etrenjit oluşumu betonun durabilitesi açısından olumsuz sonuçlar oluşturabilecek durumları gündeme getirebilmektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında, diğer bir yaklaşımda ise Anhidrit III miktarlarına bağlı olarak, hidrasyon sürecinde etrenjit oluşumuna etken olabilecek kimyasal majör bileşenlerin miktarının test örneklerinin basınç dayanımına ne ölçüde olumlu ve/veya olumsuz etkileri olduğu irdelenmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşımın temsil edilebilmesi açısından harç tasarımında malzeme türlerinin oluşturduğu majör bileşenlere göre hidrasyon sonrası etrenjit oluşumunda etken olan CaO, $CaSO_4$ ve Al_2O_3 bileşenlerine bağlı olarak " $CaO/(CaSO_4+Al_2O_3)$ " oransal bir yaklaşımın değişimi özetle irdelenmiştir. Yapılan irdelenmede

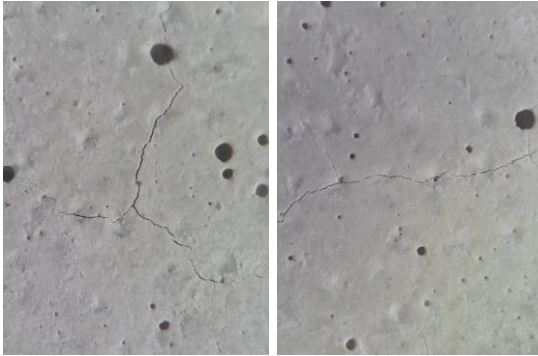
örneğin AN1 karışımı için CaO oranı %54,561, $CaSO_4$ oranı % 1,582 ve Al_2O_3 oranı ise %0,893 olarak elde edilmiştir. Bu değerlendirmeye göre AN1 karışımının " $CaO/(CaSO_4+Al_2O_3)= 22,045$ " olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde bir diğer karışım AN17 için ise CaO oranı %20,041, $CaSO_4$ oranı %64,087 ve Al_2O_3 oranı ise %0,798 olarak elde edilmiştir. Bu değerlendirmeye göre de AN17 karışımının " $CaO/(CaSO_4+Al_2O_3)= 0,309$ " olarak elde edilmiştir. Bu oransal değerlendirme diğer tüm karışımlar için de ayrı ayrı yapılmış olup AN1 – AN17 arası karışımlarında artan Anhidrit III miktarına bağlı olarak 22,045 değerinden 0,309 değerine kadar azalarak değişmiştir. Karışımda Anhidrit III oranı arttıkça $CaO/(CaSO_4+Al_2O_3)$ oran değeri de üstel fonksiyonel bir eğilimle azalma göstermiştir. Bu irdelenmeye göre $CaO/(CaSO_4+Al_2O_3)$ değişimi her bir Anhidrit III katkı kullanımındaki sertleşmiş harcın basınç dayanımları bağlamında ilişkilendirildiğinde Şekil 9'de verilen değerlendirme elde edilmiştir.



Şekil 9. $CaO/(CaSO_4+Al_2O_3)$ oranı - sertleşmiş harcın basınç dayanımı ilişkisi

Bununla birlikte, hidrasyon sonrası anhidrit III katkı oranı arttıkça etrenjit oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, belirli bir oran sonrası Anhidrit III katkı kullanımı sonucu oluşan etrenjit miktarı sebebiyle matris yapıda oluşan genişleme ve buna bağlı gelişen kılcal çatlaklar nedeniyle test örneklerinin basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür (Şekil 10). Diğer bir deyişle, yüksek oranda etrenjit oluşumlarının harç örneklerinin

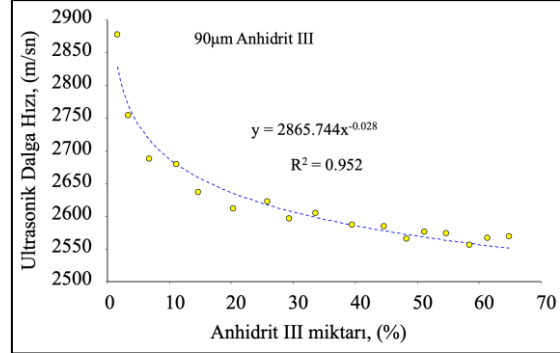
durabilitesini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu değerlendirme farklı tane boyutlu Anhidrit III katkı kullanımı ve karışımdaki bileşenlerin $\text{CaO}/(\text{CaSO}_4+\text{Al}_2\text{O}_3)$ oranı bağlamında optimize edilmeye çalışılmıştır. 90 μm –125 μm Anhidrit III tane boyutu değişimine karşın harcın mukavemet değerlerinde yaklaşık $\text{CaO}/(\text{CaSO}_4+\text{Al}_2\text{O}_3) \approx 1.32$ oran değerine kadar yakınsak dayanım artışları, bu oran üzerinde değerlerde ise dayanım düşüşü olduğu görülmektedir. Benzer davranış, 250 μm Anhidrit III tane boyutu için harcın mukavemet değerleri yaklaşık $\text{CaO}/(\text{CaSO}_4+\text{Al}_2\text{O}_3) \approx 0.85$ oran değerine kadar artan eğilimle değişim göstermiştir. Bu bağlamda, 90-250 μm Anhidrit III katkı miktarlarına bağlı olarak belirlenen 1,32 ve 0,85 orandan daha düşük değerlerde harcın hızlı sertleşme, yüksek erken dayanım ve sonrasında yavaş dayanım geliştirme özellikleri sergilediği gözlenmiş olup, dayanım değerinin lineer bir eğilimle düştüğü görülmüştür.



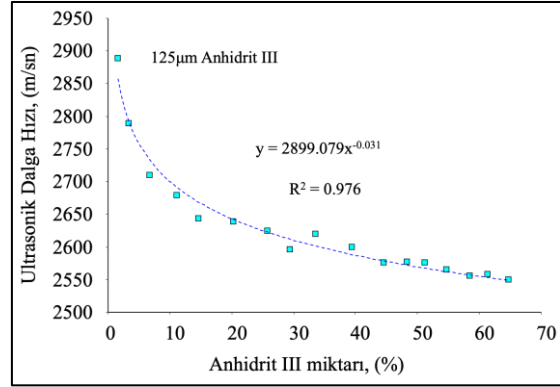
Şekil 10. Yüksek Anhidrit III kullanılan numuneler üzerinde meydana gelen çatlaklar

3.3. Anhidrit III Tane Boyutunun Sertleşmiş Harcın Ultrasonik Dalga Hızı Değerlerine Etkisi

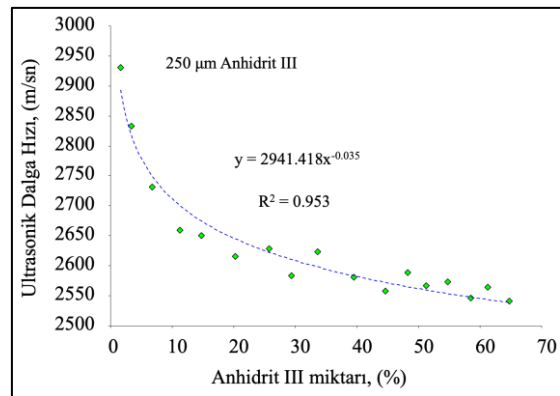
90 μm – 250 μm tane boyutlu Anhidrit III katkılı sertleşmiş harç örneklerinin 28 gün kür sonrası doygun durumda ultrasonik dalga hızı değerleri analiz edilmiş olup, bulgular her bir boyut aralığı için grafiksel olarak Şekil 11–Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 11. Anhidrit III miktarı–ultrasonik dalga hızı ilişkisi (0-90 μm Anhidrit III katkılı)

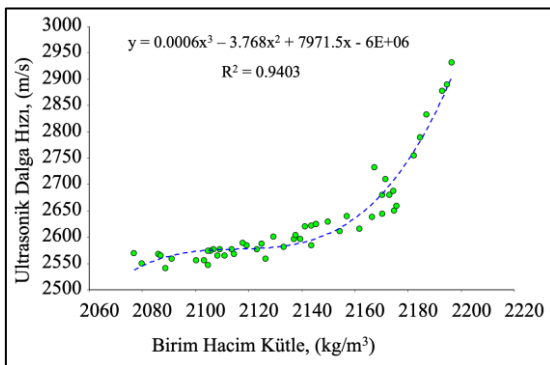


Şekil 12. Anhidrit III miktarı – ultrasonik dalga hızı ilişkisi (0-125 μm Anhidrit III katkılı)



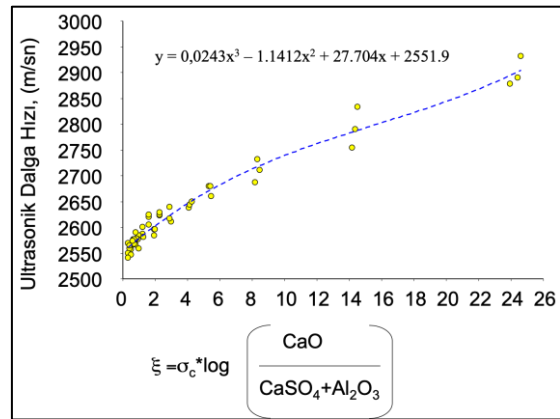
Şekil 13. Anhidrit III miktarı – ultrasonik dalga hızı ilişkisi (0-250 μm Anhidrit III katkılı)

AKH test örneklerinde karışımlarda katkı maddesi olarak kullanılan Anhidrit III miktarının sertleşmiş harcın ultrasonik dalga hızı değerleri artan Anhidrit III miktarına bağlı olarak düşmüştür. 0-90 µm boyutlu Anhidrit III katkılı harç örneklerinde ultrasonik dalga hızı değeri 2877 m/s'den 2569 m/s'ye düşmüştür. Diğer taraftan, 0-125 ve 0-250 µm boyutlu Anhidrit III katkılı harç örneklerinde ise ultrasonik dalga hızı değerleri sırasıyla 2889 m/s'den 2550 m/s'ye ve 2931 m/s'den 2541 m/s'ye düşmüştür. Ultrasonik dalga hızı, harcın matris yapısından geçişinde boşlukların bulunması durumunda daha düşük hız değerlerinde geçiş özelliği sağladığı bilinmektedir [24]. Bu bağlamda irdelendiğinde, harç tasarımlarında artan Anhidrit III oranı, sertleşmiş harcın matris yapısını kısmen daha gözenekli bir form kazanmasına da neden olduğunu temsil etmektedir. Matris yapıda gözeneklilik olgusu arttıkça ultrasonik dalga hızı değeri de düşmektedir. Ayrıca, Anhidrit III tane boyutu büyüdükçe matris yapının gözenekliliğinin arttığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak da birim hacim kütle değeri azalmaktadır. Çalışma kapsamında üretilen bütün örneklerin sertleşmiş harç birim hacim kütle değerlerine karşılık ultrasonik dalga hızı değişimleri Şekil 14'te gösterilmiştir. En düşük ve en yüksek miktarlarda Anhidrit III katkı kullanımları arasında ultrasonik dalga hızı değişimleri 0-90 mm, 0-125 mm ve 0-250 mm tane boyutları için sırasıyla %10,71, %11,73 ve %13,31 oranında azalmıştır.



Şekil 14. Birim hacim kütle–ultrasonik dalga hızı ilişkisi

Çalışma kapsamında sertleşmiş harcın matris yapısının fiziksel ve kimyasal parametrelere bağlı durumunu görgül bir yaklaşımla analiz edebilmek amacıyla, AKH örneklerinin ultrasonik dalga hızı, dayanım değeri ve hidrasyon sonrası etrenjit oluşumunun sağlanabilmesi için gerekli olan CaO, CaSO₄ ve Al₂O₃ majör bileşenlerine bağlı olarak oransal bir yaklaşım “ξ” rumuzuyla tasarlanmıştır. Optimum bir değerlendirmeye ξ = σ_c * log[CaO/(CaSO₄+Al₂O₃)] formunda oransal bir yaklaşım olarak ele alınmıştır. Burada σ_c, sertleşmiş harcın 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerini temsil etmektedir. Tüm AKH karışımları için elde edilen ξ değerine karşın ultrasonik dalga hızı değerleri grafiksel bir analizle Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. ξ - ultrasonik dalga hızı ilişkisi

Bu yaklaşımdan görüldüğü üzere ξ değeri arttıkça, ultrasonik dalga hızı değeri de artmaktadır. Elde edilen bulgular daha detay irdelendiğinde bu yaklaşım bağlamında, artan Anhidrit III miktarına göre hidrasyon sonrasında etrenjit oluşumlarının kalıcı bir form oluşturduğunda matris yapının daha gözenekli bir karakteristik özellik kazandığı, buna bağlı olarak da dayanım değerinde azalma ve ayrıca ξ değeri de azalarak ultrasonik dalga hızı değeri düşmektedir. Yüksek mukavemetli Anhidrit katkılı bir harç elde etmek için -90 µm ve -125 µm boyutlu Anhidrit III kullanımında ξ değerinin ortalama ξ >2 olması gerektiği ve -250 µm boyutlu Anhidrit III kullanımında ise ξ değerinin ortalama ξ >1,3 olması gerektiği belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 0-90 µm, 0-125 µm ve 0/250 µm olmak üzere üç farklı boyutta kullanılan anhidrit III'ün çimento harçlarında fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre;

1. Test örneklerinde Anhidrit III miktarı arttıkça genel bir eğilim olarak birim hacim kütle değeri azalmıştır.
2. AKH test örneklerinde katkı maddesi olarak kullanılan Anhidrit III miktarının sertleşmiş harcın basınç dayanımına belirli bir kullanım oranına kadar pozitif, ancak belirli bir kullanım oranından sonra dayanıma negatif bir etki gösterdiği belirlenmiştir. -90 µm boyutlu Anhidrit III katkılı harç örneklerinde ağırlıkça %29,4 Anhidrit III katkı oranına kadar dayanım değerlerinin 12,2 N/mm²'den 30,3 N/mm²'ye kadar yükseldiği, bu kullanım oranından daha fazla oranda kullanıldığında ise dayanım değerlerinin düşerek 10,9 N/mm² değerine kadar dayanım kaybettiği belirlenmiştir. Ağırlıkça %29,4 oranına kadar kırmataş kumu ile yer değiştirmeli şekilde kullanılan 0-125 µm Anhidrit III katkısı, basınç dayanımını 2,52 kat artırarak 12,8 N/mm²'den 32,3 N/mm²'ye yükselmiştir. Anhidrit III boyutu 250 µm'ye değiştiğinde ise katkı kullanımındaki ağırlıkça bu etkinlik oranı %29,4'den %39,5'e çıkmıştır. Bu kullanım oranında 0-250 µm Anhidrit III katkısı, basınç dayanımını 2,46 kat artırarak 13,1 N/mm²'den 32,2 N/mm²'ye yükselmiştir.
3. Ayrıca anhidrit III kullanımına bağlı harç içerisinde bulunan kimyasal majör bileşenlerle harcın basınç dayanımı da ilişkilendirilmiştir. Bu irdelemenin sonuçlarına göre, 90 µm – 125 µm Anhidrit III tane boyutu değişimine karşın harcın mukavemet değerlerinde yaklaşık CaSO₄/(SiO₂+CaO) ≈ 0,68 oran değerine kadar yakınsak dayanım artışları, bu oran üzerinde değerlerde ise dayanım düşüşü olduğu görülmektedir. Benzer davranış, 250 µm Anhidrit III tane boyutu için harcın mukavemet değerleri yaklaşık CaSO₄/(SiO₂+CaO) ≈ 1,05 oran değerine kadar değişim göstermiştir.

90 µm ve 125 µm Anhidrit III tane boyutu değişimine karşın harcın mukavemet değerlerinde yaklaşık CaO/(CaSO₄+Al₂O₃) ≈ 1,32 oran değerine kadar dayanım artışları, bu oran üzerinde değerlerde ise dayanım düşüşü olduğu görülmektedir. Benzer davranış, 250 µm Anhidrit III tane boyutu için harcın mukavemet değerleri yaklaşık CaO/(CaSO₄+Al₂O₃) ≈ 0,85 oran değerine kadar artan eğilimle değişim göstermiştir.

4. 0-90 µm boyutlu Anhidrit III katkılı harç örneklerinde ultrasonik dalga hızı değeri 2877 m/s'den 2569 m/s'ye düşmüştür. Diğer taraftan, 0-125 ve 0-250 µm boyutlu Anhidrit III katkılı harç örneklerinde ise ultrasonik dalga hızı değerleri sırasıyla 2889 m/s'den 2550 m/s'ye ve 2931 m/s'den 2541 m/s'ye düşmüştür. Harç tasarımlarında artan Anhidrit III oranı, sertleşmiş harcın matris yapısını kısmen daha gözenekli bir form kazanmasına da neden olduğunu temsil etmektedir.
5. Bu çalışma ile çimento harçları için ultrasonik dalga hızı, dayanım değeri ve hidrasyon sonrası etrenjit oluşumunun sağlanabilmesi için gerekli olan CaO, CaSO₄ ve Al₂O₃ majör bileşenlerine bağlı oransal bir yaklaşım önerilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. İstanbulluoğlu, Y.S., 1997. Alçıtaşı ve Anhidrit Üzerine Bir Çalışma. Madencilik Dergisi, Cilt 36(2-3), 13-23.
2. Fisher, K., Rikhert, K., Burianov, A., Strokova, V., 2016. Recrystallization of Gypsum Particles. International Journal of Environmental & Science Education, 11(18), 12361-12366.
3. Serrano, S., Barreneche, C., Navarro, A., Hauria, L., Fernandez, A., 2015. Study of Fresh and Hardening Process Properties of Gypsum with Three Different PCM Inclusion Methods. Materials, 8(10), 6589–6596.
4. Gürdal, E., 2010. Bir Yapı Malzemesi Olarak Alçı. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (4), 37-43.
5. Thoeny, Z.A.R., 2020. The Effect of Particle Size Distribution on Some Properties of

- Gypsum. Key Engineering Materials, 857, 145-152.
6. Güneyli, H., Yapıcı, N., Karahan, S., 2016. Doğal Anhidritin Beton Bileşeni Olarak Kullanımı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(2), 7-15.
 7. Małolepszy, J., Kotwica, L., Konik, Z., Żak, R., 2014. Rapid-Hardening Cements with Addition of Anhydrite-Lime Sinters. Cement Wapno Beton, 81, 40-45.
 8. Portland Cement Association, Ettringite Formation and the Performance of Concrete, https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is417-ettringite-formation-and-the-performance-of-concrete.pdf?sfvrsn=412%26sfvrsn=412, Erişim Tarihi: 24.04.2022.
 9. Salih, M., Hussein, A., 2018. Enhancing the Compressive Strength Property of Gypsum used in Walls Plastering by Adding Lime. Journal of University of Babylon for Engineering Sciences, 26(3), 58-66.
 10. Li, C., Li, J., Telesca, A., Marchon, D., Xu, K., Marroccoli, M., Jiang, Z., Monteiro, P.J.M., 2021. Effect of Polycarboxylate Etheron The Expansion of Ye'elimite Hydration In The Presence of Anhydrite. Cement and Concrete Research, 140, 106321.
 11. Jansen, D., Wolf, J.J., Fobbe, N., 2020. The Hydration of Nearly Pure Ye'elimite with a Sulfate Carrier in a Stoichiometric Ettringite Binder System. Implications for the Hydration Process Based on in-situ XRD, H-TD-NMR, Pore Solution Analysis, and Thermodynamic Modeling. Cem. Concr. Res, 127, 105923.
 12. Jansen, D., Spies, A., Neubauer, J., Ectors, D., Goetz-Neunhoffer, F., 2017. Studies on the Early Hydration of Two 793 Modifications of Ye'elimite with Gypsum. Cem. Concr. Res, 91, 106-116.
 13. García-Maté, M., Londono-Zuluaga, D., De la Torre, A.G., Losilla, E.R., Cabeza, A., Aranda, M.A.G., Santacruz, I., 2016. Tailored Setting Times with High Compressive Strengths in Bassanite Calcium Sulfoaluminate Eco-Cements. Cem. Concr. Compos, 72, 39-47.
 14. Brouwers, Q., Yu, H., Korte, A., 2009. Gypsum hydration: A Theoretical and Experimental Study. Energy, 1, 0E-5.
 15. ASTM C494/C494M-13, 2013. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
 16. ASTM C597-16, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
 17. TS EN 12504-4, 2021. Yapılarda Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini.
 18. ASTM C109/C109M-20, 2020. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
 19. Khatib, J.M., Wright, L., Mangat, P.S., 2013. Effect of Fly Ash-Gypsum Blend on Porosity and Pore Size Distribution of Cement Pastes. Adv. Appl. Ceram., 112(4), 197-201.
 20. Hansen, S., Sadeghian, P., 2020. Recycled Gypsum Powder from Waste Drywalls Combined with Fly Ash for Partial Cement Replacement in Concrete. Journal of Cleaner Production, 274, 122785.
 21. Yıldız, M., Elvan, Ü., 2010. Konya İli. Organize Sanayi Bölgesinde Sülfatlı Su İçeren Zeminlerde Oluşturulan Betonarme Kazıklarda Beton Taşıma Gücüne Sülfatın Etkisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 25(2), 1-12.
 22. Erdoğan T.Y., 2015, Beton, ODTÜ Yayıncılık, ODTÜ Geliştirme Vakfı, Ankara, ISBN No: 9789757064671
 23. Çimsa, 2017. Etrenjit Oluşum Koşullarının Üçlü Sistem Performansına Etkisi, <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDECEE521E470BA4ADA95A091840/70D57CEA99DE4A3793A5876391F709A3.pdf>. Erişim Tarihi: 22.04.2022.
 24. Yavaş, A., Kalkan, Ş.O., Güler, S., Şahin, G.N., Gündüz, L., 2022. A Novel Gypsum-Based Lightweight Composite: A Combined Investigation of Technical and Self-Cleaning Properties. Journal of the Australian Ceramic Society, 1-18.