

Tasnif Edilmiş İnşaat Yıkıntı Atıklarından Elde Edilen Harman Tuğlası, Delikli Tuğla ve Çatı Kiremitinden Oluşan İkili Karışımların Geopolimer Hamur Üretiminde Değerlendirilmesi

Raci BAYER¹, Hüseyin ULUGÖL^{*2}, İlhami DEMİR³, Gürkan YILDIRIM³,
Mustafa ŞAHMARAN²

¹Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara

²Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

³Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale

Geliş tarihi: 24.10.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

Öz

Çimento endüstrisinin yüksek CO₂ salımı, enerji ve doğal kaynak tüketimi gibi sebeplerden dolayı araştırmacılar alternatif bağlayıcı malzeme arayışına girmişlerdir. Alkali-aktif malzemeler ve geopolimer bu alternatif bağlayıcı malzemeler içerisinde son zamanlarda oldukça popülerdir. Söz konusu çalışma kapsamında tasnif edilmiş inşaat yıkıntı atıkları (İYA) 10 ve 15 M NaOH çözeltileri ile aktive edilerek geopolimer hamurlar üretilmiştir. Aktive edilen inşaat yıkıntı atıkları çatı kiremiti, delikli ve harman tuğlanın ayrı ayrı %75 ya da %25 oranlarında kullanıldığı ikili karışımlardır. İkili karışımlarla elde edilecek iyi sonuçlar hem üçlü karışımların kullanımını cesaretlendirecek hem de yıkıntı atıklarının, içerisindeki malzeme oranlarına göre optimum aktivatör ve kür koşullarıyla, tasnif edilmesine gerek kalmadan karışık şekilde kullanımının önünü açacaktır. Hamurların 24, 48 ve 72 saat süreyle 95, 105, 115 ve 125 °C sıcaklıklarda kür edildiği bu çalışmada, en yüksek basınç dayanım değeri 83,1 MPa değeriyle 72 saat 115 °C'de kür edilen %75 delikli tuğla ve %25 harman tuğlasından oluşan numuneden elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali-aktif malzemeler, Geopolimer, İnşaat yıkıntı atıkları, Yüksek sıcaklık kürü, NaOH

Assessment of Clay Brick, Hollow Brick and Roof Tile Provided from Assorted Construction and Demolition Waste in Geopolymerization

Abstract

Researchers are in search of a new binding material because of the high CO₂ emissions and consuming natural resources of cement industry. Alkali-activated materials and geopolymer are very popular recently. In this study, assorted construction and demolition wastes (CDW) were activated with 10 and 15 M NaOH solutions. CDW were used as binary combinations of roof tile, hollow brick and clay brick with percentages of 25% and 75% separately. Thus, both triple mix designs would be possible and not assorted CDW will be able to used through their own optimum activator and curing conditions. Specimens were

* Sorumlu yazar (Corresponding author): Hüseyin ULUGÖL, hu.ulugol@gmail.com

cured at 95, 105, 115, 125 °C for 24, 48, 72 h and maximum compressive strength result was obtained by alkali-activation of 75% hollow brick and 25% clay brick mix cured at 115 °C for 72 h.

Keywords: Alkali-activated materials, Geopolymer, Construction and demolition waste, High temperature curing, NaOH

1. GİRİŞ

Çimento endüstrisi önemli sera gazlarından birisi olan karbondioksitin atmosfere salımında tüm dünyada %5'lik, enerji tüketiminde ise %2'lik bir paya sahiptir [1]. Ayrıca çimento endüstrisinin başlıca hammaddesi olan kalker ve kilin birer doğal kaynak oldukları göz önüne alınınca çimento endüstrisinin yalnızca karbon salımına sebep olmakla kalmayıp aynı zamanda doğal kaynakları da tükettiği görülmektedir. Giderek artan beton kullanım oranına paralel olarak çimentoya olan talebin de artışı çimento üretiminin bu zararlı etkilerini daha da öne çıkarmaktadır. Öyle ki tüm dünyada beton üretimi son 60 yılda 12 kat artmıştır ve günümüzde kişi başı yılda ortalama olarak 1 ton beton üretimi gerçekleşmektedir [2].

Çimento endüstrisinde klinker üretiminin enerji tüketiminden ve karbondioksit salımından dolayı, aynı zamanda alternatif hammaddelerin de değerlendirilmesi düşüncesiyle zaman içerisinde katkılı çimentoların kullanım oranı artmıştır. Katkılı çimentolar bünyelerinde daha az klinker ihtiva ettiği için klinker talebini doğrudan azaltan bir yöntemdir [3]. Ayrıca beton üretimi sırasında mineral katkıları çimentoyla ikame ederek de portland çimentosuna dolayısıyla klinkere olan talebi azaltmak mümkündür. Dutta ve Maity [4] [5] yapmış oldukları çalışmada kalker taşıma çimento içerisinde klinkerle ikame ederek kullanmışlar, bu malzemenin belli oranlara kadar kullanılabilmesini ve çimento üretimi sırasında karbondioksit salımının azaltılabileceğini ve enerji ihtiyacının azalacağını göstermişlerdir. Klinker kullanımını azaltmak ve doğal kaynakları korumak için bir diğer yöntem ise ayrıştırılmış inşaat yıkıntı atıklarının çimento üretiminde tamamlayıcı malzeme olarak ya da doğal kaynakları korumak adına çimento klinkeri hammaddesi olarak kullanılmasıdır. Yapılan bir çalışmada atık betondan ayrıştırılmış çimento hamurunun ince

fraksiyonları yüksek CaO içeriği sayesinde klinker hammaddesi olarak kullanılırken [6], bu gibi yöntemlerde betonu hamur ve agrega olarak ayırmak çaba gerektirmektedir. Başka bir çalışmada seramik atığının beton içerisinde %20'ye kadar çimento ile ikame edilebileceği gösterilmiştir [7]. Bununla birlikte katkılı çimento kullanımı klinkere olan talebi tamamen ortadan kaldırmamakta ancak kullanım miktarını azaltmaktadır.

Bu durum araştırmacıları çimentoya alternatif olabilecek bağlayıcı malzemeler geliştirmeye yönlendirmektedir. Bu alternatif malzemelerden birisi de son zamanlarda popüleritesi oldukça artmış olan geopolimer bağlayıcılarıdır. Geopolimer toz haldeki hammaddenin alkali-hidroksit, alkali-silikat ya da her ikisinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan kimyasal aktivatör ile aktivasyonu sonucunda oluşan, katı ve kararlı alüminosilikat malzeme olarak tanımlanmaktadır [8]. Geopolimer bağlayıcılar alkali-aktif malzemelerin düşük CaO içerikli bir alt sınıfıdır. Yüksek CaO içeriğine sahip alkali-aktif sistemlerde reaksiyon ürünü çimentonun hidrasyon ürününe benzeyen, çimento notasyonunda gösterimi C-A-S-H ile verilen kalsiyum alüminosilikat hidrat şeklinde oluşmaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan geopolimerlerin CaO içeriği düşük olduğu için reaksiyon ürünleri N-A-S-H ile verilen, yüksek CaO içeren sistemlerdeki kalsiyum oksidin alkali oksit ile yer değiştirdiği ve alkali alüminosilikat hidrat şeklinde ifade edilen bileşiktir. Burada N alkali oksidi ifade etmektedir.

Geopolimer ilk kez 1970'li yıllarda ateşe dayanıklı malzeme arayışıyla ortaya çıkmıştır [8]. Uçucu külün alkalilerle aktive edilmesiyle elde edilen geopolimer malzemenin güvenilir kararlı bir bağlayıcı olabileceği fark edildikten sonra [9] farklı aktivatörlerle farklı sıcaklıklarda aktive edildiği [10] çalışmalar da yapılmıştır. Sonrasında

ise kaolin ve metakaolin gibi yüksek reaktiviteye sahip malzemelerle birlikte kullanılan uçucu kül [11, 12] geopolimer üretimi konusunda rüştünü ispatlamıştır.

Uçucu küle birlikte alkali aktivasyonu için bir diğer popüler hammadde yüksek fırın cürufudur. Yüksek CaO içeriğiyle alkali-aktive yüksek fırın cürufu geopolimer sınıfında olmamakla birlikte literatürde pek çok alkali-aktive edilmiş cürufu bağlayıcılar geopolimer ismiyle anılmaktadır. Yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktive edildiği bir çalışmada kalsiyum içeren alüminosilikatların diğer alkalileri içerenlere göre daha az kararlı olduğu görülmüştür [13]. Bununla birlikte kalsiyumlu sistemlerde geçirgenliğin az olduğu ve bunun sonucunda dayanıklılığının yüksek olduğu da söylenmektedir [14]. Yüksek miktarda kalsiyum içeren sistemlerin geçirgenliğinin az oluşu bu sistemlerde oluşan C-S-H benzeri amorf koloidal mikro boşluklu yapıdan kaynaklanmaktadır [15]. Yüksek kalsiyumlu alkali-aktive edilmiş bağlayıcıların hidrasyon ürünü çimentonun hidrasyon ürünü olan tobermorite benzediği söylenmekle birlikte, yine de bu sistemlerdeki kalsiyum içeriği çimentolu sistemlerdeki kadar yüksek değildir [16]. Alkali-aktivasyonu için uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi çimento endüstrisinde mineral katkı olarak kullanılan malzemelerin yanı sıra kimyasal bileşimleri bu mineral katkılara benzeyen, benzer kristal yapıdaki, belirli reaktiviteye sahip malzemelerin kullanımı da mümkündür. Kentsel dönüşüm gibi uygulamalardan elde edilen inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) geopolimerizasyon için kullanılabilmesi yapılan bazı çalışmalarda görülmüştür. Özellikle geopolimerizasyonun önemli motivasyon kaynaklarından birisi olan sürdürülebilirlik ve çevresel fayda göz önüne alınca İYA kullanımı daha da önem kazanmaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde yıllık yaklaşık 450 milyon ton atık ortaya çıkmakta bu atığın 180 milyon tonu İYA olmaktadır. Massachusetts Halk Sağlığı Birimine göre Amerika'da ise evsel olmayan katı atıkların %95'i İYA'dır. İYA için atık depolama alanlarına ihtiyaç

bulunmaktadır bununla birlikte bazı uygulamalarda atıkların kaçak şekilde döküldüğü de bilinmektedir ve her iki durum hem çevresel zarara hem de ekonomik kayba yol açmaktadır. Bu durum göz önüne alınca İYA'ların alkali-aktivasyonunda değerlendirilmesi araştırmacılara motivasyon sağlamaktadır. İYA'nın alkali-aktivasyonu için kullanımında ilk önceleri hali hazırda kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi malzemelerle ikame şeklinde gerçekleştirilmiştir. Cristelo ve arkadaşları [17] sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren alkali-aktive uçucu külün içerisine ayrıştırılmamış durumdaki İYA'yı belirli sınırlar dahilinde ekleyerek İYA içerisindeki betonun CaO içermesi sayesinde N-A-S-H yanı sıra C-A-S-H reaksiyon ürünü elde edebileceğini göstermiştir. Başka bir çalışmada tuğla atığı, beton atığı ve cam atığı ayrı ayrı NaOH ile aktive edilerek 25 ve 70 °C'de kür edilmiş ve 10 MPa üzerinde dayanım sonuçları elde edilmiş ayrıca kür sıcaklığındaki artışın özellikle kristal yapıya sahip hammaddelerden üretilen geopolimerlerin mekanik özelliklerini arttırdığı görülmüştür [18].

Atık malzemelerin geopolimerizasyonunda tuğla atıkları oldukça popülerken [19-22] cam atığının [23, 24] ve beton atığının da [25, 26] tek başlarına kullanılarak mekanik özelliklerinin ve dayanıklılık performansının değerlendirildiği çalışmalar mevcuttur. Ancak İYA'ların tek başlarına kullanılabilmesi için ya yıkımı yapan yüklenici firma tarafından yıkım süreci içerisinde ya da geopolimerin üretim aşamasında ayrıştırılması gerekmektedir ve bu durum süreci zorlaştırmaktadır. Ancak İYA'ların belirli oranlarla yer aldığı ikili hatta üçlü birleşimleriyle alkali-aktivasyonun gerçekleştirilmesi ve farklı malzeme oranlarına göre optimum aktivatör tipinin ve kür koşullarının tespit edilmesi, zaman içerisinde İYA'ların alkali-aktivasyonunda ayrıştırılmadan kullanılabilmesinin de önünü açacaktır. Bu çalışma kapsamında harman tuğlası, delikli tuğla ve çatı kiremitinin ayrı ayrı %25 ve %75 oranlarında yer aldığı ikili karışımlar NaOH ile aktive edilerek hem çeşitli tuğla türlerinin birlikte kullanılabilirliği hem de ikili karışımlar için optimum aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve süresi tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Malzemeler

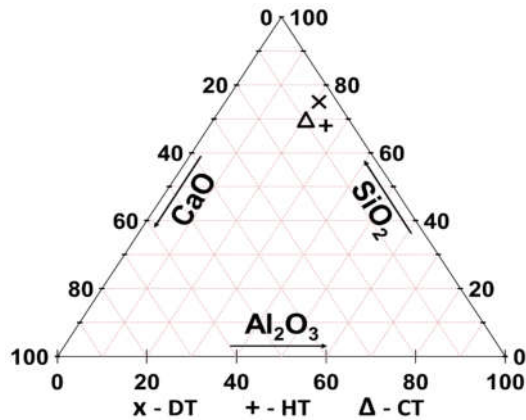
Çalışma kapsamında Ankara’da bir yıkım bölgesinden tasnif edilmiş harman tuğlası (HT), delikli tuğla (DT) ve çatı kiremiti (CK) temin edilmiş ve laboratuvar tipi kırıcıyla kırılmıştır. Sonrasında çeşitli sürelerde öğütme işlemi

yapılarak tuğla ve kiremit atıklarının (TKA) laboratuvar tipi bilyalı öğütücüye göre optimum öğütme süresi 2 saat olarak tespit edilip, bu sürelerde tüm malzemeler için öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin kimyasal içerikleri ve CaO-SiO₂-Al₂O₃ üçlü diyagramındaki konumları sırasıyla Çizelge 1 ve Şekil 1’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 1. TKA kimyasal bileşimleri (%)

İYA Türü	KK*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
DT	1,99	61,61	17,27	6,70	3,31	2,66	0,38	1,61	2,80
HT	2,18	53,39	20,50	7,77	4,75	3,70	1,16	1,53	3,42
CK	2,11	54,02	15,98	8,93	7,42	4,84	0,68	1,41	2,30

*KK : Kızdırma Kaybı

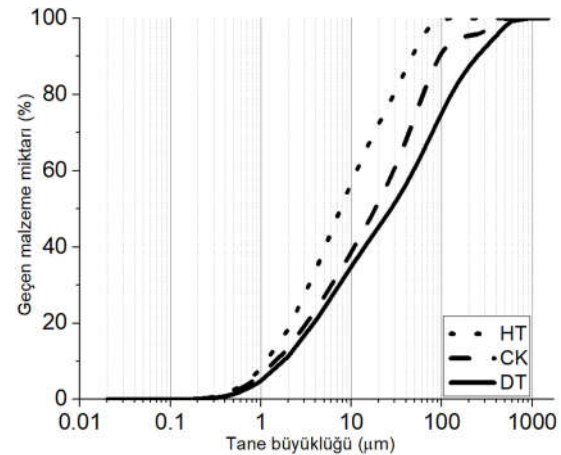


Şekil 1. Malzemelerin üçlü diyagramdaki yerleri

Her üç atık da yeterli miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğine sahiptir ve bu değerler çok iyi bir geopolimerizasyon hammaddesi olduğu bilinen uçucu küle oldukça benzerdir [27, 28]. Öğütülen malzemelerin tane dağılımları ise Şekil 2’de görülmektedir. Eşit sürede öğütülen malzemeler içerisinde HT, daha yumuşak oluşu dolayısıyla diğerlerinden biraz daha fazla incelmıştır. HT’nin yaklaşık tamamı, CK’nin %95’i, DT’nin ise %80’i 100 µm altındadır.

Kimyasal aktivatör olarak 10 ve 15 M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Ayrıca TKA’nın geopolimerik reaktivitesini görmek amacıyla her

üç malzemeden 20’şer gr numune 10 M NaOH çözeltilisi içerisinde çözünmesi için 24 saat bekletildikten sonra 24 saatin sonunda çözelti ile çökelti ayrıştırılıp çözelti seyreltilmiş ve bu çözelti üzerinde ICP-OES analizi yapılmıştır. Buna göre HT, CK ve DT için Al iyonu değerleri sırasıyla 1363, 230 ve 293 mg/L, Si iyonu değerleri ise 424, 647 ve 576 mg/L olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2. Malzemelerin tane dağılımları

2.2. Deneysel Çalışma

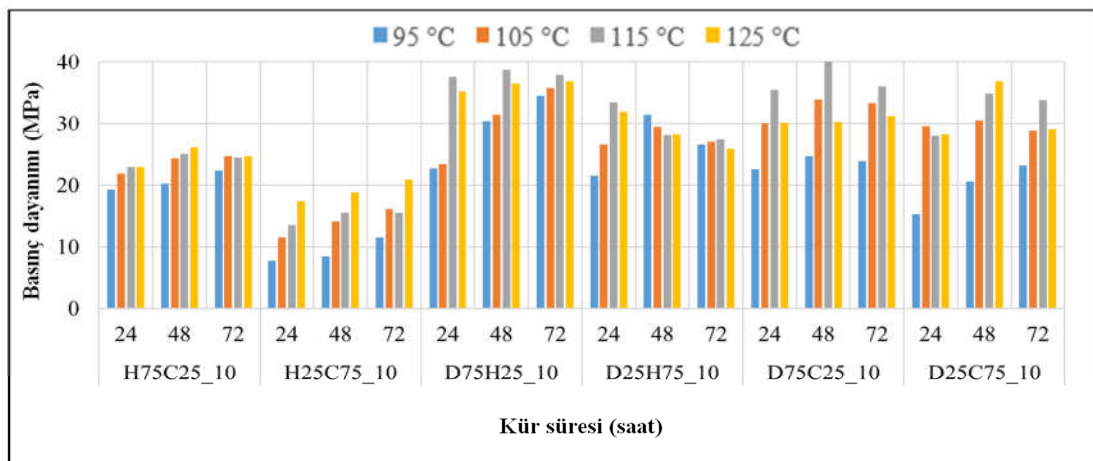
Yapılan ön çalışmalarda, NaOH suda çözülmeden kiremit ve tuğlalardan oluşan toz karışıma ilave edilerek üretim gerçekleştirildiği zaman, su ile toz haldeki NaOH arasında gerçekleşen reaksiyonlar

sonucu ortaya çıkan yüksek ısı alkali-aktivasyonunu çok hızlandırarak hamurun kalıba yerleştirilirken bile sertleşmesine sebep olduğu görülmüştür. Dolayısıyla NaOH 10 M ve 15 M olacak şekilde önceden çözülmüş ve 24 saat soğutulduktan sonra karışıma eklenmiştir. Hamurlar su/bağlayıcı oranı 0.35 olacak şekilde hazırlandıktan sonra 5 cm. küp kalıplara döküm yapılmıştır. Bir gün sonra kalıptan çıkan numuneler 24, 48 ve 72 saat 95, 105, 115 ve 125 °C sıcaklıklarda kür edilmiştir. Kürün hemen ardından numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Hamurların isimlendirilmesi yapılırken atık malzemelerin isimlerinin ilk harfinden sonra karışım içindeki yüzde oranı verilmiş, en son olarak da NaOH molaritesi belirtilmiştir. Örneğin H75C25_10 numune ismi %75 HT ve %25 CK karışımını göstermekte olup bu karışım 10 M NaOH ile aktive edilmiştir.

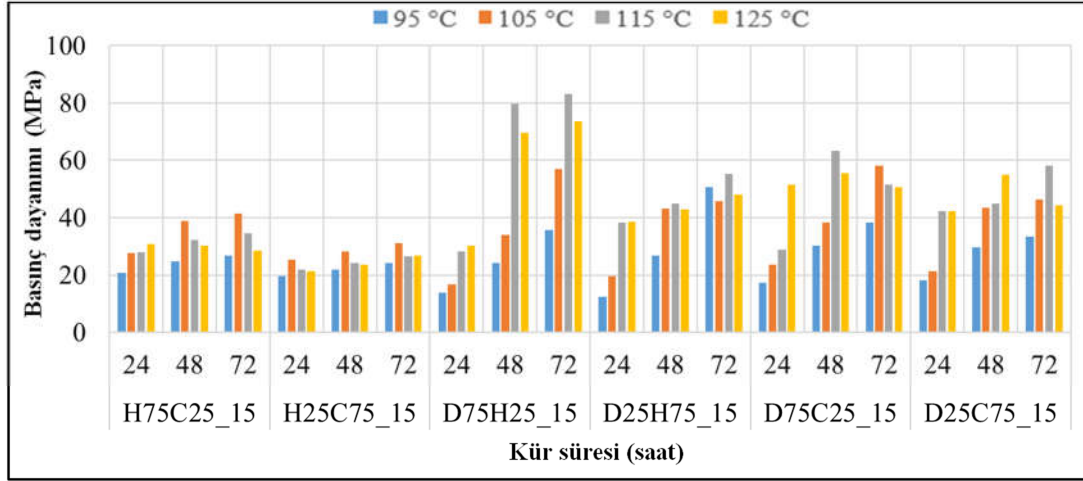
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3 ve Şekil 4'te sırasıyla 10 ve 15 M NaOH ile aktive edilen hamurların basınç dayanımı sonuçları görülmektedir. 10 M NaOH ile aktive edilen numuneler incelendiği zaman %75 HT ve %25 CK içeren numuneler ne sıcaklık ve kür süresi olursa olsun minimum 19,3 maksimum 26,1 MPa basınç dayanımı değerleri vermiştir. Oranların %25 HT ve %75 CK olması durumunda ise minimum dayanım sonucu 95 °C sıcaklıkta

24 saat kür uygulanan numunede görülmüş olup, 7,8 MPa olan bu değer sıcaklığın ve kür süresinin artmasıyla beraber çok azar azar artarak maksimum 20,9 MPa değerine 125 °C sıcaklıkta 72 saat kür ile ulaşabilmiştir. Bu durumun başlıca sebeplerinden birisi harman tuğlasının çatı kiremitinden çok daha yüksek Al çözünürlüğüne sahip olmasıdır. Al miktarı ve Al iyonlarının serbest hale geçiş hızları geopolimer dayanımı, priz süreleri, asit dayanıklılığı gibi pek çok parametreyi doğrudan etkilemektedir [29]. Si çözünürlüğü açısından çatı kiremiti daha etkili olsa da harman tuğlasının daha reaktif davrandığı görülmüştür. 10 M NaOH ile aktive edilen DT ve HT içeren numunelerde D75H25_10 numuneleri özellikle 115 ve 125 °C'de D25H75 numunelerine göre biraz daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir. En belirgin farklar 115 °C için elde edilmiş olup bu sıcaklıkta D75H25_10 numuneleri 24, 48 ve 72 saatte sırasıyla 37,6, 38,8 ve 37,9 MPa değerleri verirken D25H75_10 ise sırasıyla 33,5, 28,1 ve 27,4 MPa dayanım değerleri vermiştir. D75C25_10 ve D25C75_10 numunelerine baktığımız zaman da dayanım değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Sırasıyla her iki numune için maksimum dayanım değerleri 115 ve 125 °C sıcaklıklarda ve 48 saat kürde elde edilmiştir ve bu değerler sırasıyla 40,1 ve 36,9 MPa olarak görülmektedir.



Şekil 3. 10 M NaOH ile aktive edilen hamurların basınç dayanımları



Şekil 4. 15 M NaOH ile aktive edilen hamurların basınç dayanımları

15 M NaOH ile aktive edilen hamurlara bakıldığı zaman harman tuğlasının çatı kiremitinden daha reaktif olduğu 10 M NaOH ile aktive edilen numunelerde olduğu gibi burada da görülmektedir. H75C25_15 ve H25C75_15 numuneleri için maksimum dayanım değerleri 105 °C sıcaklıkta ve 72 saatte elde edilmiş olup sırasıyla 41,5 ve 31,0 MPa'dır. D75H25_15 ve D25H75_15 numuneleri 72 saat 115 °C sıcaklıkta kür sonucunda sırasıyla 83,1 ve 55,3 MPa dayanım değerleri vermiştir. İki numune arasındaki büyük fark 10 M aktivatör kullanılan numunelerde de görüleceği üzere delikli tuğlanın harman tuğlasından daha reaktif oluşundan kaynaklanmaktadır. D75C25_15 ve D25C75_15 numunelerinde ise aynı koşullar altında elde edilen maksimum basınç dayanımı değerleri değişebilse de çoğunlukla delikli tuğlanın %75 oranında kullanıldığı numuneler daha yüksek değerler vermektedir. Maksimum basınç dayanımı değerleri D75C25_15 için 115 °C'de 48 saat kür ile elde edilen 63,3 MPa iken D25C75_15 numunesi aynı sıcaklık altında ve 72 saat kür ile 58,2 MPa basınç dayanımı değeri vermiştir.

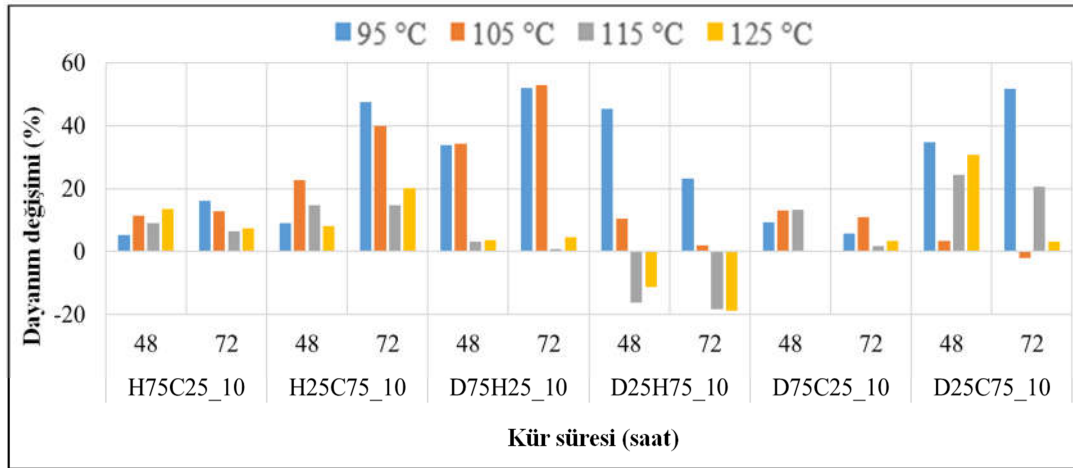
3.1. Kür Süresinin Etkisi

Şekil 5'te görüleceği üzere kür süresinin artışı 10 M NaOH konsantrasyonu için HT ve CK içeren H75C25_10 ve H25C75_10 numunelerinin basınç dayanımlarını çok fazla arttırmamıştır.

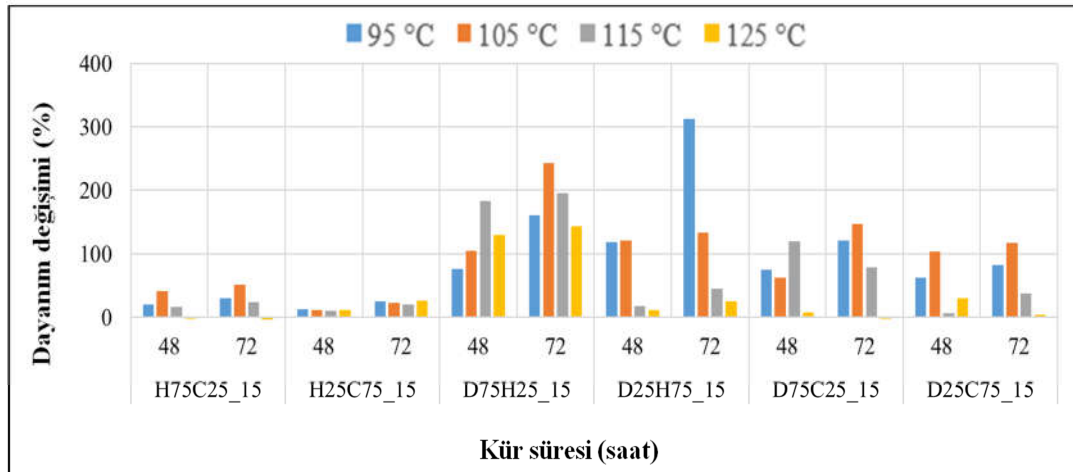
H25C75_10 numunesinin 95 ve 105 °C sıcaklıklarda 72 saatte %40 ve %50 civarlarında dayanım artışı var gözükse de bu artışlar 24 saatteki dayanım değerlerinin çok düşük olmasındandır. Ancak 15 M NaOH konsantrasyonu olması durumunda H75C25_15 numunesi 105 °C kür sıcaklığı altında 24 saatte 27,5 MPa dayanım kazanmışken aynı sıcaklık altında 72 saat sonunda dayanım değeri Şekil 5'te görüleceği üzere yaklaşık %50 artarak 41,5 MPa'a çıkmıştır. Bu durum yüksek molarite sayesinde daha fazla Al ve Si iyonu ortaya çıkmasından ve fazla sayıdaki bu iyonların yoğunlaşma ve çökeltme reaksiyonlarının gelişimi için daha uzun süre küre ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. 15 M NaOH durumunda ise HT ve CK içeren numunelerin artan kür süresine bağlı olarak, en fazla dayanım artışı 105 °C'de görülmek üzere 95 ve 115 °C sıcaklıklarda da dayanımları artmaya devam etmiştir. D75H25_10 karışımlarında ise hem 95 hem de 105 °C sıcaklıklarda 48 ve 72 saat kür için sırasıyla %30 ve %50'nin üzerinde dayanım artışları görülmüştür. 115 ve 125 °C sıcaklıklarda ise 48 ve 72 saatteki dayanım artışlarının çok az olduğu görülmekte hatta küçük düşüşler göze çarpmaktadır. Ancak bu durum değerlendirilirken 24 saat için 105 ve 115 °C'deki dayanım değerlerinin 95 ve 105 °C sıcaklıktaki numunelerden çok daha büyük olduğu göz önüne alınmalıdır. Bununla birlikte DT miktarının %25'e

düşüp HT'nin %75'e çıktığı durumda 115 ve 125 °C sıcaklık ile kür edilen numunelerin 24 saatte verdiği sırasıyla 33,5 ve 31,9 MPa dayanım değerleri 48 saat kürde 28,1 ve 28,3 MPa değerine, 72 saatte ise 27,4 ve 25,9 MPa değerine düşmüştür. Bu durum harman tuğlanın daha önce bahsedildiği gibi delikli tuğlaya göre daha az

reaktif olmasından kaynaklanmaktadır. 10 M NaOH ile belirli bir miktar çözünme sağlanabildiği için ortamdaki Al ve Si iyonları miktarıyla 115 ve 125 °C'de 24 saat kür edilen numuneler optimum olgunluk değerine ulaşmış ve sonrasında yüksek sıcaklıkta devam eden kür geopolimer yapısının bozulmasına sebep olmuştur [30].



Şekil 5. 10 M NaOH içeren hamurların 24 saatten sonra 48 ve 72 saatteki dayanım değişimleri



Şekil 6. 15 M NaOH içeren hamurların 24 saatten sonra 48 ve 72 saatteki dayanım değişimleri

15 M NaOH kullanılan DT-HT karışımlarında ise Şekil 6'da görüleceği üzere kür süresinin artmasına paralel olarak dayanım değerleri artmış, yüksek reaktiviteye sahip DT'nin %75 oranında

kullanıldığı numunelerde 115 ve 125 °C sıcaklıklar için 48 ve 72 saat kür edilen numunelerde bu çalışmadaki en yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca 95 °C sıcaklık altında 24 saatte

12,3 MPa dayanım değeri veren D25H75_15 numunesi 72 saatte 50,7 MPa değerine çıkarak, yeterli alkali ortam ve kür süresi sağlandığında göreceli olarak düşük reaktiviteye sahip numunelerin de yüksek miktarda dayanım artışı gösterebileceğini ortaya koymaktadır. DT ve CK içeren numunelere bakıldığı zaman artan kür süresi hem 10 M hem de 15 M NaOH ile aktive edilen numunelerin pek çoğunun dayanım değerlerini arttırmıştır. Bununla birlikte özellikle DT'nin daha fazla yer aldığı numunelerin yüksek sıcaklıklarda belirgin bir maksimum dayanım değeri olduğu ve bu değerden sonra dayanım artışının olmadığı görülmektedir. Örneğin D75C25_15 numuneleri 115 ve 125 °C sıcaklıklarda 48 saatte sırasıyla 63,3 ve 55,5 MPa değerler vermiş 72 saatte ise bu değerler düşüşe geçmiştir.

3.2. Molaritenin Etkisi

Çizelge 2'de görüleceği üzere NaOH konsantrasyonunu 15 M değerine çıkarmak HT ve CK içeren numunelerin tamamında basınç dayanımı değerini arttırmıştır. Ancak bu durum daha az reaktif olan çatı kiremitinin %75 oranında bulunduğu numunelerde 24 saat 125 °C'de kür edilen numune haricinde daha fazla gerçekleşmiştir. Bu durum ICP-OES sonuçlarına göre daha az reaktif olan çatı kiremitinin 15 M NaOH çözeltisinde daha fazla çözünmesiyle gerçekleşmiştir. Daha önce belirtildiği üzere bu çalışmada kullanılan HT, ÇK ve DT 10 M NaOH çözeltisinde çözülerek ICP-OES ile analiz edilmiştir. Ancak malzemelerin 15 M NaOH

çözeltisinde ne kadar çözünecekleri analiz edilmemiştir. Molaritenin artışıyla %25 HT ve %75 CK içeren numunelerin dayanımlarındaki bu hızlı artış harman tuğlasının daha yüksek molarite değerlerinde daha fazla iyon serbest bırakabildiği, çatı kiremitinin ise serbest bıraktığı iyon miktarının harman tuğlasının kadar artmadığı şeklinde yorumlanmaktadır. Buradan her bir geopolimer hammaddesi için optimum NaOH konsantrasyonu değerinin farklı olduğu görülmektedir.

DT-HT ve DT-CK karışımlarına bakılınca ise özellikle DT'nin %75 olarak yer aldığı karışımlarda düşük sıcaklıkta 24 saat kür edilen numunelerin NaOH molaritelerinin artırılması dayanım değerlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu durum molaritenin yükselmesi ile birlikte ortamda miktarı artan serbest iyonların düşük sıcaklık ve sürede yeterince yoğunlaşamayıp reaksiyon ürünü oluşturamayışına atfedilmiştir. Ayrıca yeterince reaksiyon ürünü oluşmadığı için N-A-S-H olarak bağlanmayan serbest sodyum içeriğinin ortamdaki CO₂ ile reaksiyona girerek karbonatlaşma reaksiyonu göstermesi ve bunun sonucunda polimerizasyonun kesintiye uğraması ile ilişkilendirilmektedir [31, 32]. Ancak sıcaklığın 115 °C'ye çıkmasıyla delikli tuğladan çözülen Si ve Al iyonları daha fazla Na iyonu ile birleşerek N-A-S-H oluşumu gerçekleşmektedir. Burada görüleceği üzere delikli tuğlanın yüksek reaktivitesini ortaya koyabilmesi için molariteye paralel olarak kür sıcaklığının ve süresinin de artırılması gerekmektedir.

Çizelge 2. 10 M NaOH yerine 15 M NaOH kullanılıncaya numunelerde görülen basınç dayanım artışı (%)

Numune	H75C25			H25C75			D75H25			D25H75			D75C25			D25C75		
	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72
Kür Süresi (saat)	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72
95 °C	6,7	22,2	20,1	150,0	157,6	111,3	-39,6	-20,4	3,5	-43,1	-14,6	90,6	-23,5	22,3	59,8	19,0	43,2	43,5
105 °C	25,6	59,0	68,0	119,1	100,0	92,5	-29,1	8,0	59,2	-26,3	47,3	68,6	-21,3	13,0	74,8	-27,8	42,3	60,2
115 °C	20,9	28,7	40,8	63,0	56,8	71,0	-25,3	105,2	119,3	14,0	60,1	101,8	-18,6	57,9	42,8	50,7	29,3	72,2
125 °C	33,5	15,7	15,4	21,8	26,1	28,2	-13,9	90,7	100,3	20,7	51,6	85,7	70,2	83,2	61,9	50,0	48,8	51,9

4. SONUÇLAR

Yürütülen bu çalışma sonucunda harman tuğlası, delikli tuğla ve çatı kiremitinin NaOH ile aktive edilerek yüksek dayanımlı (>50 MPa) bağlayıcılar üretilebileceği görülmüştür. 10 M NaOH ile 115 °C'de 48 saat kür edilen D75C25_10 numunesi 50 MPa civarında değer vermiştir. NaOH molaritesinin 15 M olması durumunda 115 ve 125 °C'de 48 ve 72 saat kür edilen D75H25_15 numuneleri 50 MPa değerinin çok üstünde basınç dayanımı sonuçları vermiştir. Bununla birlikte malzemelerin karışım oranlarının değişimine bağlı olarak optimum aktivatör molaritesi, kür sıcaklığı ve süresi, kiremit ve tuğla atıklarının içerdiği reaktif SiO₂ ve Al₂O₃ miktarlarına ve oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca hammaddelerin SiO₂ ve Al₂O₃ içeriklerinden bağımsız olarak sahip oldukları Si ve Al iyonu salma kapasiteleri, geopolimerizasyon reaksiyonlarının ilk aşaması olan çözünmeyi ve dolayısıyla reaksiyonun geri kalan kısımlarını doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin Al ve Si salma kapasitelerine göre bir malzeme karışım dizayn metodu oluşturulabilir ancak aktivatör tipi ve molaritesi de dikkate alınmalıdır.

Yüksek reaktiviteye sahip olan hammaddelerin çözünmesi ve geopolimerizasyonu nispeten hızlı gerçekleşirken, düşük reaktiviteye sahip olan hammaddelerin daha yüksek molaritede aktivatör ve uzun süreli kür ile nihai performansları arttırılabilmektedir. Özellikle reaktif Si eksikliği çeken harman tuğlasının kullanıldığı durumlarda aktivatör olarak sodyum hidroksitle beraber sodyum silikat kullanılması da düşünülebilir.

Bu çalışmada ikili karışım oranları için elde edilen optimum aktivatör, kür sıcaklığı ve süresi değerleri ışığında üçlü karışımların üretilmesi de düşünülebilir. Böylece farklı malzeme oranlarına sahip üçlü karışımların optimum aktivatör molaritesi, kür sıcaklığı ve süresi değerleri belirlenip, inşaat yıkıntısından alınan atık tuğla ve kiremitlerin karışım içindeki oranları belirlendikten sonra ayrıştırılmalarına gerek kalmadan kullanılabilmelerinin önü açılacaktır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 218M102 ve 119M630 ve 117M447 numaralı projeler ile desteklenmiş olup yazarlar desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

1. Worrell, E., Price, L., Martin, N., 2001. Carbon Dioxide Emissions From The Global Cement Industry. *Annu. Rev. Energy Environ.*, 26, 303–29.
2. Pavlu, T., 2018. The Utilization of Recycled Materials for Concrete and Cement Production -A Review. 1st FIB Conference on Sustainable Concrete - Materials and Structures. Malta.
3. Machado, I.L., Moya, H.I., Sanchez, S.B., Martinera, F., 2017. Improvement of the Environmental Energy Sustainability in the Production of Cement Portland with Addition of Thermally Activated Clays. 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Havana.
4. Dutta, B., Maity, S., 2015. CO₂ Abatement During Production of Low Carbon Content Cement. 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Zurich.
5. Dutta, B., Maity, S., 2015. Role of Blended Cement in Reducing Energy Consumption. 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Zurich.
6. Gartner, E., Hirao, H., 2015. A Review of Alternative Approaches to the Reduction of CO₂ Emissions Associated with the Manufacture of the Binder Phase in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 126-142.
7. Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2010. Reusing Ceramic Wastes in Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832-838.
8. Provis, J.L., van Deventer, J.S., 2009. *Geopolymers Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.
9. Wastiels, J., Wu, X., Faignet, S., Patfoort, G., 1993. Mineral Polymer Based on Fly. *Proceedings of the 9th International Conference on Solid Waste Management*. Philadelphia,.

10. Swanepoel, J.C., Strydom, C.A., 2002. Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material. 5th International Symposium on Environmental Geochemistry, Cape Town.
11. van Jaarsveld, J.G., van Deventer, J.S., Lukey, G.C., 2002. The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash- and kaolinite-based Geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.
12. Perera, D.S., Vance, E.R., Cassidy, D.J., Blackford, M.G., Hanna, J.V., Trautman, R.L. 2005. The Effect of Heat on Geopolymers Made Using Fly Ash and Metakaolinite. 106th Annual Meeting of the American-Ceramic-Society, Indianapolis, 165, 87-94.
13. Glukhovskiy, V., 1967. Hydration and Structurization of Slag-Alkali Binder. *Soil Silicate Articles and Constructions*. Kiev.
14. Provis, J.L., Myers, R. J., White, C. E., Rose, V., & van Deventer, J. S. (2012). X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*, 42, 855-864.
15. Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D., 2006. Hydration and Microstructure. *Alkali-Activated Cements and Concretes* (s. 98). içinde New York: Taylor & Francis Group.
16. Provis, J.L., Bernal, S.A., 2014. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 44(299-327), 299-327.
17. Cristelo, N., Fernandez-Himenez, A., Vieira, C., Miranda, T., Palomo, A., 2018. Stabilisation of Construction and Demolition Waste with a High Fines Content Using Alkali Activated Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 170, 26-39.
18. Robayo-Salazar, R.A., Rivera, J.F., de Gutierrez, R.M., 2017. Alkali-activated Building Materials Made with Recycled Construction and Demolition Wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130-138.
19. Robayo, R.A., Mulford, A., Munera, J., de Gutierrez, R.M., 2016. Alternative Cements Based on Alkali-activated Red Clay Brick Waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163-169.
20. Robayo-Salazar, R.A., Mejia-Arcila, J.M., de Gutierrez, R.M., 2017. Eco-efficient Alkali-Activated Cement Based on Red Clay Brick Wastes. *Journal of Cleaner Production*, 166, 242-252.
21. Reig, L., Tashima, M.M., Borrachero, M.V., Monzo, J., Cheeseman, C.R., Paya, J., 2013. Properties and Microstructure of Alkali-Activated Red Clay Brick Waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
22. Singh, S., Basavanagowda, S.N., Aswath, M.U., Ranganath, R.V., 2016. Durability of Bricks Coated with Red Mud Based Geopolymer Paste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
23. Vafaei, M., Allahverdi, A., 2017. High Strength Geopolymer Binder Based on Waste-glass Powder. *Advanced Powder Technology*, 28, 215-222.
24. Hajimohammadi, A., Ngo, T., Kashani, A., 2018. Sustainable One-part Geopolymer Foams with Glass Fines Versus Sand as. *Construction and Building Materials*, 171, 223-231.
25. Vasquez, A., Cardenas, V., Robayo, R.A., de Gutierrez, R.M., 2016. Geopolymer Based on Concrete Demolition Waste. *Advanced Powder Technology*, 27, 1173-1179.
26. Abdel-Gawwad, H.A., Heikal, E., El-Didamony, H., Hashim, F.S., Mohammed, A.H., 2018. Recycling of Concrete Waste to Produce Ready-mix Alkali Activated Cement. *Ceramics International*, 44, 7300-7304.
27. Deb, P.S., Nath, P., Sarker, P.K., 2014. The Effects of Ground Granulated Blast-furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on the Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Materials and Design*, 62, 32-39.
28. Hojati, M., Radlinska, A., 2017. Shrinkage and Strength Development of Alkali-activated Fly ash-slag Binary Cements. *Construction and Building Materials*, 150, 808-816.
29. Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S., 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917-2933.
30. Ken, P.W., Ramli, M., Ban, C.C., 2015. An Overview on the Influence of Various Factors on the Properties of Geopolymer Concrete

Derived from Industrial By-products.
Construction and Building Materials, 77,
370-395.

31. Barbosa, V.F., Mackenzie, K.J., Thaumaturgo, C., 1999. Synthesis and Characterisation of Sodium Polysialate Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica. Geopolymer International Conference. Fransa.
32. Abdullah, M.A., Kamarudin, H., Mohammed, H., Khairul Nizar, I., Rafiza, A.R., Zarina, Y., 2011. The Relationship of NaOH Molarity, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ Ratio, Fly Ash/Alkaline Activator Ratio, and Curing Temperature to the Strength of Fly Ash-Based Geopolymer. Trans Tech Publications, 328-330, 1475-1482.

