



YAPI MALZEMELERİ

Hafif Betonda Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanımı ile Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Meta-Analiz Yöntemiyle İncelenmesi <i>İlbüke Uslu, Can Baran Aktaş, İsmail Özgür Yaman</i>	695
Bor Madeni Atıklarından Alkali Füzyon Yöntemi ile Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi <i>Cavit Çağatay Kızıltepe, İsa Yüksel, Serdar Aydın, Ayşenur Sığındere</i>	707
Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi <i>Yasin Engin</i>	717
Alkanolamin Türlerinin Portland Uçucu Küllü Çimentoların Priz Süresi ve Dayanım Gelişimine Etkileri <i>Berna Orhon Kolukısa, Bimen Kadiroğlu, Mert Yücel Yardımcı</i>	731
Yüksek Dayanımlı Betonun Balistik Performansının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi <i>Ahmet Reha Günay, Sami Karadeniz</i>	743
Sürdürülebilir Binalarda Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Miselyum Tuğlası <i>Mehmet Özmen, Barış Yiğit Canpolat, Hakan Karatay, Banu Yeşim Büyükkakıncı</i>	767
Sentetik Fiber Donatılı Betonların Tasarımı ve Uygulaması Hakkında Teknik Rehber <i>Tunahan Beşer, Burak Erdal, Faraz Malik, Serhat Sarıkaya</i>	781

Hafif Betonda Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanımı ile Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Meta-Analiz Yöntemiyle İncelenmesi

İlbüke USLU¹, Can Baran AKTAŞ², İsmail Özgür YAMAN³

ÖZET

Beton yoğunluğunun azaltılması, yapının toplam ağırlığının çoğunlukla betondan oluşması nedeniyle yapıların tasarım sürecine ve özellikle de deprem performansına olumlu katkı sağlar. Beton yoğunluğunu azaltmanın etkili yöntemlerinden biri beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturan agregaların hafifletilmesi yani betonda hafif agregaların kullanılmasıdır. Genleştirilmiş kil agregası (GKA), diğer hafif agregalar ile karşılaştırıldığında basınç dayanımı yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Pürüzlü yüzeyinden dolayı matris içerisinde kalsit kristalleri ve C-S-H jeli olan hidrasyon ürünlerinin oluşumunu teşvik eder. Mevcut çalışma, meta-analiz yoluyla hafif GKA'lı betonun mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Meta-analiz kapsamında literatürden 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, betonun mekanik özellikleri ile GKA kullanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, su/bağlayıcı oranı, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir. Analizlerin sonucunda su, çimento ve normal ağırlıklı agreganın 28 günlük basınç dayanımına olan etkisinin uçucu kül, silis dumanı ve GKA miktarından daha çok olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında, regresyon analizine dayalı olarak, 28 günlük basınç dayanımının değerlendirilen değişkenlerle olan ilişkisi bir denklem olarak sunulmuştur. Mevcut araştırmanın sonuçları, meta-analizin bütünsel etkisi nedeniyle birbirinden bağımsız yürütülen tek bir çalışmanın sonuçlarına göre daha güçlü ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Genleştirilmiş Kil Agregası; Meta-Analiz; Hafif Beton.

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ilbuke.uslu@metu.edu.tr

2 TED Üniversitesi, Ankara - can.aktas@tedu.edu.tr

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ioyaman@metu.edu.tr

ABSTRACT

The Relation Between Use of Lightweight Expanded Clay Aggregate in Concrete and Compressive Strength: A Meta-Analysis

Concrete production constitutes a significant part of the construction industry, and reducing its density creates advantages as the total load of the structure is mostly comprised of concrete. One of the most common methods to reduce the density is the incorporation of lightweight aggregate. The study aims to assess the mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate concrete (LECA) through meta-analysis. It has essential characteristics, which are having the highest compressive strength, providing heat and sound isolation, among the other lightweight building materials. In the matrix, LECA promotes the formation of hydration products, which are calcite crystals and C-S-H gel, due to its rough surface. Thus, it is used as a construction material with traditional cementitious materials. This paper will present the earlier studies that explained LECA concrete properties, considering different types and compositions. More than 150 data points were analyzed through literature to conduct a meta-analysis in the scope of the study. The fundamental results of this study demonstrated the relationship between the mechanical properties of concrete with the integration of LECA. Detailed statistical analysis of the correlation between different parameters were shown, such as the amount of LECA, w/c ratio, amount and type of binder, water/cementitious material ratio, compressive strength at 28th day, and density. This research will be more robust compared to the results of a single study due to the combined effect of meta-analysis.

Keywords: *Lightweight Expanded Clay Aggregate; Meta-Analysis; Lightweight Concrete.*

GİRİŞ

Hafif beton ilk kez 2000 yıldan uzun bir süre önce kullanılmaya başlanmıştır. Antik çağda Babil şehri, Sümer Uygarlığı döneminde hafif volkanik malzemeler kullanılarak inşa edilmiştir [1]. 20. yüzyılda hafif agregalar yeniden yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Betonun ve yapının toplam ağırlığını azaltmak için alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Uygulama alanları yapılarla sınırlı kalmamış ve örneğin 1918 yılında gemi ve mavnalı yapılarında etkin bir şekilde hafif beton kullanılmıştır. 1950'lerde ise hafif beton kullanılarak birçok yapı tasarlanmıştır [1]. Hafif beton yapısının en etkili yöntemlerinden biri betonda hafif agreganın kullanılmasıdır.

Türkiye, birçok aktif fay hattı üzerinde yer almakta olup, konumundan dolayı depremsellik açısından kritik bir bölgede yer almaktadır. Deprem esnasında yapılara etkiyen yük, yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Yapının ağırlığının azaltılması deprem sırasında oluşabilecek hasarı azaltır. Ayrıca, ağırlığın azaltılması temel yüklerini azaltabilir, bu da daha küçük temeller, daha az kazık ve çelik donatı gibi destek elemanlarının en kesitlerinin azalması anlamına gelir. Bu sayede kirişler, kolonlar, kirişler vb. gibi tüm destek elemanlarının boyutları küçültülebilir. Büyük açıklıklı köprülerde hafif beton kullanımının ekonomik olarak avantajları bulunmaktadır. Daha az destek elemanı kullanarak köprünün açıklıkları arttırılabilir. Yük başına daha fazla eleman taşınabileceğinden nakliye maliyeti düşürülebilir. Bu ürünler daha az kamyon taşımacılığı ve kum, çakıl vb. gibi doğal malzemelerin sınırlı kaynaklarına yönelik endüstriyel talepleri azaltmaktadır. ABD ön yapımlı beton fabrikasında kamyon taşımacılığı maliyetleri ile ilgili iki farklı çalışma yürütülmüştür. Bu araştırma sonuçlarına göre, nakliyeden kaynaklanan maliyet tasarrufu, hafif agreganın maliyetinden yedi kat daha fazladır [2]. Ayrıca, hafif agregalarla inşa edilen yapılar daha hafif olduğundan daha az iskele kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu da yapının yapım maliyetini düşürür. Gözenekli yapıları nedeniyle ısı ve ses yalıtımı sağladığı için enerji verimliliği açısından da bu agregaları kullanmak birçok avantaj sağlamaktadır.

Basit bir modelde, kumlu hafif beton kullanımı %15-17 ısıtma enerjisi tasarrufu ve %10 soğutma enerjisi tasarrufu tahminiyle sonuçlanırken, betonda kullanılan agregaların tamamının hafif

olması durumunda ise yaklaşık %35-40 ısıtma enerjisi tasarrufu ve %30 soğutma enerjisi tasarrufu tahmini ile sonuçlanmaktadır [3].

Hafif agregalar içerisinde basınç dayanımı en yüksek olanlardan biri genişletilmiş kil agregasıdır. Üretilmiş ve yapay olan bu agrega 1100-1300 °C dereceleri arasında ısıtıldığında orijinal halinin 5-6 katı hacim artışına uğrayarak dış yüzeyinde sinterleşmiş gaz kabarcıklarıyla dolu bir kütle haline gelmektedir [4]. Genleştirilmiş Kil Agregası (GKA) yirmiden fazla ülkede üretilmektedir. GKA'nın kimyasal bileşimi esas olarak SiO₂'den oluşmakta olup, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO ve Na₂O ve K₂O gibi bazı alkalileri de içermektedir [5]. Kaynağa ve üretim yöntemine bağlı olarak, hafif agregalar, partikül şekli ve dokusunda önemli farklılıklar gösterir. Şekilleri kübik, yuvarlak, köşeli veya düzensiz olabilirken, yapısı ince veya büyük gözenekli, pürüzsüz ya da düzensiz olabilmektedir. GKA'nın iç hücreli yapısı ve sahip olduğu binlerce hava dolu boşluk sebebiyle ısı ve ses yalıtım gibi avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlara ek olarak hafiflik, yangına dayanıklılık gibi temel avantajları ile birlikte yapıların Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) performansının artmasına katkı sağlamaktadır. (LEED); enerji tasarrufu, su verimliliği, CO₂ emisyonlarının azaltılması, iyileştirilmiş iç mekan çevre kalitesi ve kaynakların yönetimi ve bunların etkilerine karşı hassasiyet gibi performansları iyileştirmeyi amaçlayan stratejiler kullanılarak oluşturulmuştur [6]. GKA diğer hafif agregalar arasında geniş kullanım alanına sahiptir. Örnek olarak hafif beton yapıların büyük çoğunluğunda, yollar ve demiryollarında, drenaj ve yalıtım malzemelerinde, istinat duvarlarında ise hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. GKA'nın bu avantajları birçok inşaat mühendisliği alanında doğal agregalarla birlikte kullanılabilirliğini göstermektedir.

Bu çalışmada meta-analiz kapsamında literatürden 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve analiz edilmiştir [7-23].

Çalışmanın sonuçları, betonun mekanik özellikleri ile GKA kullanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir.

Analizlerin sonucunda çeşitli değişkenlerin betonun 28 günlük dayanımına olan etkisi araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Regresyon analizine dayalı olarak, 28 günlük basınç dayanımının değerlendirilen değişkenlerle olan ilişkisi bir denklem olarak sunulmuştur.

AMAÇ

Meta-analiz, istatistiksel yöntemler kullanarak birden fazla bilimsel çalışma sonuçlarını sistematik olarak sentezlemek veya birleştirmek için kullanılan bir araştırma yöntemidir. Meta-analiz birden fazla çalışmanın sonuçlarını birleştirerek istatistiksel gücü arttırmaktadır. Bu çalışmada ise meta-analiz kapsamında 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada GKA kullanımı ile yapısal betonun mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek amaçlanmıştır. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

İstatistiksel Kavramlar

Bu çalışmada istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Değişkenler arasındaki korelasyona bakılmıştır. Korelasyon, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçer. Korelasyon katsayısı (r) bir değişkenin varyasyonunun hangi ölçüde diğer değişken tarafından belirlendiğini gösterir.

Determinasyon/belirtme katsayısı (R^2) korelasyon katsayısının (r) karesidir. Değişkenlerdeki değişimin yüzde kaçının birbiri ile açıklandığının ölçüsüdür. Başka bir deyişle, değişkenlerin birbiri üzerindeki varyans miktarıdır. Kalan miktar ise başka değişkenlere bağlıdır.

Determinasyon katsayısı (R^2) iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin ne kadar güçlü olduğunu ölçmektedir. Bu değer 0 ile 1 arasındadır. Bu değer in güvenilirliği veri sayısı ile doğru orantılıdır.

Sonuçların yorumlanmasında ise Regresyon ve ANOVA (Varyans Analizi) kullanılmıştır. Regresyon, aynı korelasyon analizindeki gibi bir bağımlı değişken ile bir ya da birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu çalışmada olduğu gibi birden fazla bağımsız değişken ve bir bağımlı değişkenin arasındaki doğrusal ilişki ise çoklu regresyon analizi ile ölçülebilir. Bu çalışmada bağımlı değişken betonun 28 günlük basınç dayanımı, bağımsız değişkenler ise GKA, çimento, silis dumanı, uçucu kül, agrega ve sudur. Agrega miktarında normal ağırlıkta olan toplam ince ve kalın agregaların tamamı göz önünde bulundurulmuştur.

ANOVA ise “varyans analizi” demektir, yukarda bahsedilen bağımsız değişkenlerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığının istatistiksel olarak anlaşılmasını sağlar. Ayrıca bağımsız değişkenlerin ortalamalarına ilişkin hipotezlerin test edilmesinde yararlanılan bir yöntemdir. Regresyon çalışmasındaki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini belirlemek için ANOVA testi kullanılır. ANOVA analizi ile her bir bağımsız değişkenin ortalamasının diğerlerinden ne kadar farklı olduğu gösterilmektedir. Bu da hangi bağımsız değişkenin, bağımlı değişken ile arasında bir bağlantı olduğunu anlamaya yardımcı olur. Birkaç popülasyonun ortalamalarının hepsinin eşit olduğu sıfır hipotezini test etmek için tek faktörlü veya tek yönlü ANOVA kullanılır. Sıfır hipotezinde değişkenler arasında bir ilişki olmadığı veya anlamlı bir fark olmadığı kabul edilir.

Ortalamalar arasındaki herhangi bir farklılığın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek ve sıfır hipotezini test etmek için varyans analizinin temelini oluşturan p-değerini bu analizinden elde edilen anlamlılık değeriyle karşılaştırmak gerekmektedir. Genellikle anlamlılık değeri 0,05 olarak kabul edilmektedir. Anlamlılık düzeyi, %5'lik bir riskle ortalamalar arasında bir fark olmayacağı anlamına gelir.

Sonuçların güvenilir olup olmadığını (istatistiksel olarak manidar) kontrol etmek için p değerini kontrol etmek gerekmektedir. Bu değer 0,05'ten küçükse, sonuçlar istatistiksel olarak manidardır.

Regresyon ve ANOVA analizleri Excel ve Minitab uygulaması kullanılarak oluşturulmuştur.

Parametre Optimizasyonu

Parametre optimizasyonu, kontrol edilebilen bağımsız değişkenler için en uygun ayarları belirlemek için kullanılır. Tanımlanan spesifik bir hedefe ulaşmak için her bir bağımsız değişken için optimal değer aranır. Duyarlılık analizinden önce genellikle parametre optimizasyonu yapılır.

Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, girdi değişkenleri olarak bilinen bağımsız değişkenlerdeki değişikliklere bağlı olarak hedef değişkenin (bağımlı değişken) nasıl etkilendiğini belirleyen bir analizdir. Belirli koşullar altında bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır, bu analizle birlikte hangi bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin fazla olduğu anlaşılabilir. Bu analizi yapabilmek için öncelikli olarak varyans analizindeki sıfır hipotezini reddetmek gerekmektedir.

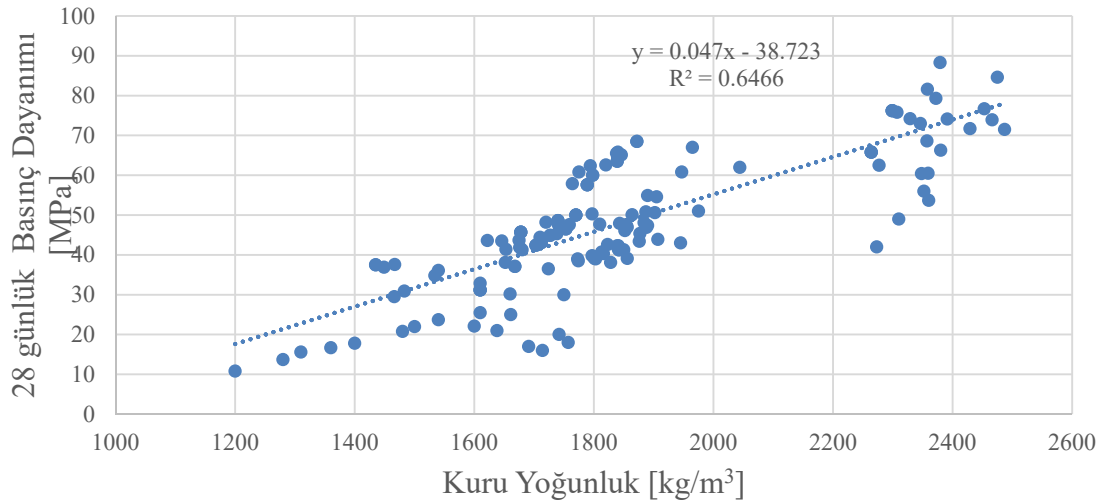
Duyarlılık analizi, bir modelin parametreleri ve çıktısı arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Örneğin, düşük duyarlılık indeksine sahip bir parametrenin değerleri modelin sonucunu fazla etkilemeden ayarlanabilir. Öte yandan, parametre yüksek hassasiyet indekse sahipse; bu parametredeki herhangi bir değişiklik, modelin sonucunu dramatik bir şekilde değiştirecektir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Korelasyonlar ve Determinasyon Katsayısı

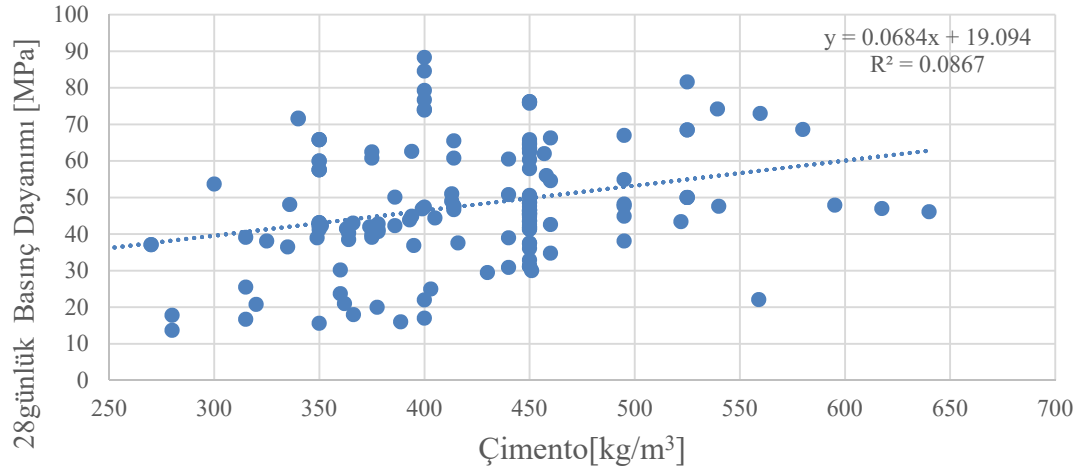
Çalışma kapsamında betonun yaygın olarak ölçülen değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısı incelenmiştir.

R^2 değeri neden sonuç ilişkisi kurulmaksızın iki değişkenin birbirini üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere 28 günlük basınç dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki korelasyonun kuvvetini belirten R^2 değeri %65’tir. Basınç dayanımındaki değişimin %65’i kuru yoğunluk ile açıklanabilirken %35’i açıklanamaz. Şekil 1’deki iki ayrı kümelenmenin sebebi verilerin hem içeriğinde LECA bulunan hafif beton hem de içeriğinde normal ağırlıklı agrega bulunan normal beton olarak ikiye ayrılmasıdır. İlk kümelenme 1200-2000 kg/m^3 yoğunluğa sahip olan hafif beton verilerine aitken ikinci kümelenme 2250-2300 kg/m^3 aralığında ilk kümelenmeye göre çok daha az miktarda LECA içeren betona aittir. İkinci kümelenmenin son bölgesindeki 2400 kg/m^3 ve üstü yoğunluğa sahip olan normal betona ait verileri göstermektedir.



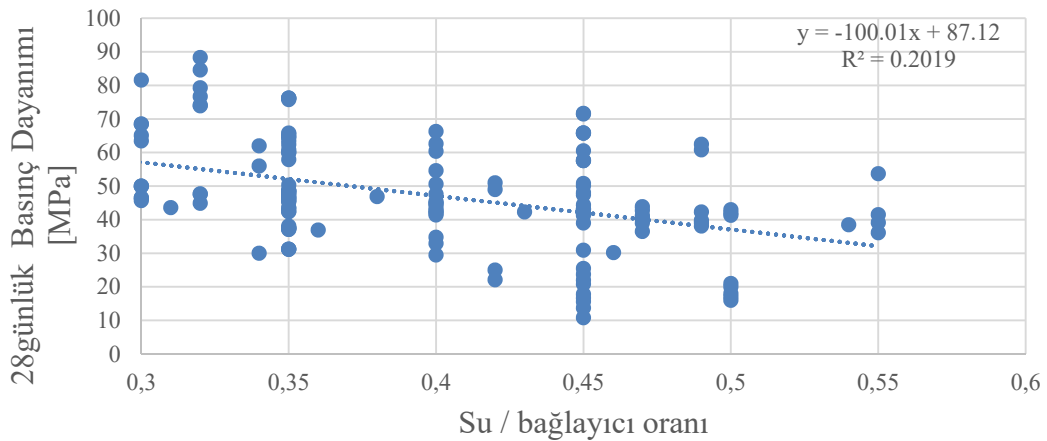
Şekil 1 - Kuru Yoğunluk ve 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

İncelenen bir diğer korelasyon basınç dayanımı ve çimento miktarı arasındaki ilişkidir. Şekil 2’de çimento miktarı ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısı R^2 değeri %9’dur. Basınç dayanımındaki varyasyonun %9’i çimento miktarı ile açıklanabilirken %91’i açıklanamaz. Bu derece düşük katsayının anlamı bu iki değişken arasında neredeyse hiç korelasyon olmadığıdır. Her ne kadar bu iki değişken arasındaki korelasyonun daha yüksek olması beklense de veriler içerisinde normal ve hafif agregaların birlikte bulunması nedeniyle bu durum ortaya çıkmaktadır. Sadece çimento ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki korelasyona değil su/bağlayıcı oranı ve mineral katkı malzemeleri ile basınç dayanımı arasındaki korelasyonlara da bakmak daha doğru sonuçlar verebilir.



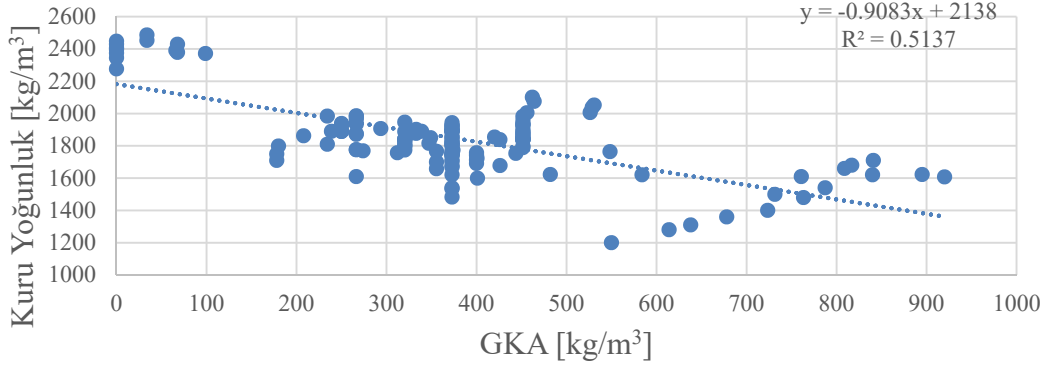
Şekil 2 - Çimento ve 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 3'te su/bağlayıcı oranı ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısı R^2 değeri %20'dir. Basınç dayanımındaki varyasyonun %21'i su/bağlayıcı oranı ile açıklanabilirken %79'u açıklanamaz. Burada, sadece çimento ve basınç dayanımı arasındaki korelasyondan daha güçlü bir korelasyon değeri elde edilmiştir. Ancak hala düşük bir değer elde edilmesinin sebebi basınç dayanımındaki varyasyonun birden fazla değişkene bağlı olmasıdır. Bu değişkenler, su miktarı, normal agregası miktarı, hafif agregası miktarıdır. Bu sebeple bireysel olarak su/çimento veya su/bağlayıcı oranıyla basınç dayanımı arasında yeterince güçlü bir korelasyon sayısı elde edilememiştir.



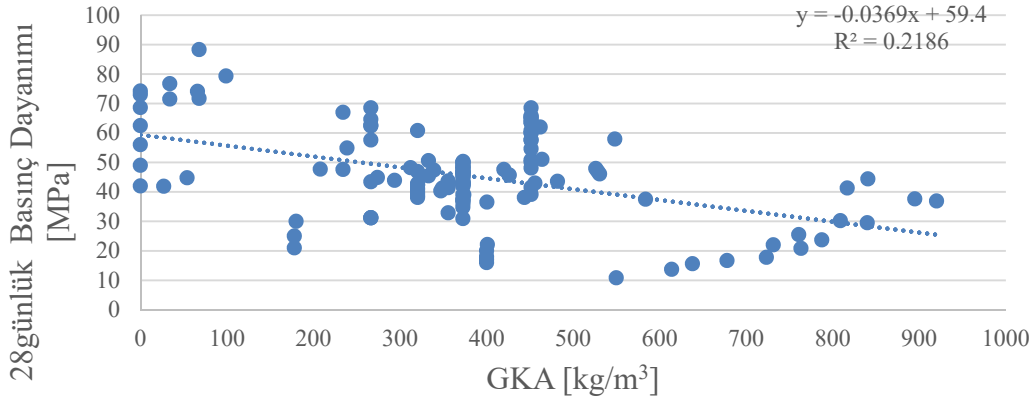
Şekil 3 - Su/bağlayıcı Oranı ve 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 4'te GKA ve kuru yoğunluk arasındaki determinasyon katsayısı R^2 değeri %51'dir. Kuru yoğunluktaki varyasyonun %51'i GKA miktarı ile açıklanabilirken %49'u açıklanamaz



Şekil 4 - Kuru Yoğunluk ve GKA Miktarı Arasındaki İlişki

Şekil 5'te GKA miktarı ve basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısı R^2 değeri %22'dir. Buna göre basınç dayanımındaki varyasyonun %22'si GKA miktarı ile açıklanabilirken %78'i açıklanamaz. Bunun anlamı, bireysel olarak GKA miktarı ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki olmadığıdır. Buradaki ilk kümelenme içeriğinde GKA bulunmayan beton numunelerin verilerine aittir, diğer kümelenmelerinin sebebi ise kullanılan farklı GKA miktarlarıdır.



Şekil 5 - 28 Günlük Basınç Dayanımı ve GKA Miktarı Arasındaki İlişki

Meta-Analiz Sonuçları

Tablo 1'deki regresyon analizinin sonuçları bütün bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken 28 günlük basınç dayanımını tahmin etmede ne kadar iyi/kötü olduğunu göstermektedir. Tablo 2' de ise bu bağımsız değişkenleri ayrı ayrı incelemeyi sağlar. Regresyon ve varyans analizi bütün değişkenlerdeki anlamlılığı araştırmada kullanılır.

Tablo 1'den elde edilen R^2 değeri 0,62, düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,60'tır. Çoklu regresyon analizlerinde düzeltilmiş değer dikkate alınmaktadır.

Bunun anlamı ise 28 günlük basınç dayanımındaki varyasyonun %60'ı yukarıda bahsedilen bütün bağımsız değişkenler tarafından belirlenmiştir. Betonun malzeme kaynaklı kendine özgü değişken ve tahmin etmesi zor yapısı, literatürde tespit edilen etki ve ilişkilerde dahi çok yüksek R^2 değeri elde edilememesi ve 6 farklı bağımsız değişken olduğu göz önüne alınırsa, bu değer kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2'deki regresyon analizinden elde edilen katsayılar ve kesme değerine bağlı olarak bir denklem oluşturulmuştur. Buna göre oluşturulan denklem (1) aşağıda sunulmuştur. Bu denkleme çimento, silis dumanı, uçucu kül, GKA, toplam normal agregası, ve su miktarı kg/m^3 cinsinden girilerek betonun 28 günlük basınç dayanımı MPa cinsinden tahmin edilebilir. Denklem, literatürdeki 150'den fazla veri noktası kullanılarak elde edildiğinden dolayı tek bir veri setine dayanan bireysel sonuçlara göre çok daha üstündür ve kullanıcıya büyük oranda kolaylık sağlar.

$$F_{c28} = 28,15 + 0,046 * \text{Çimento} + 0,086 * \text{Silis Dumanı} + 0,026 * \text{Uçucu Kül} + 0,009 * \text{GKA} + 0,026 * \text{Toplam Agregası} - 0,164 * \text{Su} \quad (1)$$

Tablo 1 - Regresyon ve Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları-1

Regresyon Analizi	R	0,79
	R^2	0,62
	Düzeltilmiş R^2	0,60
Varyans Analizi	P değeri	3,91E-28

Tablo 2 - Regresyon ve Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları-2

Regresyon Analizi Sonuçları	Katsayılar	t-istatistik	P-değeri
Kesme Noktası	28,150	2,522	0,013
Çimento (kg/m^3)	0,046	3,350	0,001
Silis Dumanı (kg/m^3)	0,086	1,781	0,077
Uçucu Kül (kg/m^3)	0,026	1,658	0,099
GKA (kg/m^3)	0,009	1,253	0,212
Toplam Agregası (Normal) (kg/m^3)	0,026	6,721	3,78E-10
Su (kg/m^3)	-0,164	-4,480	1,49E-05

Bağımsız değişkenlerin t- istatistik değerleri incelendiği zaman en yüksek değerlerin çimento, toplam normal agregası ve su'ya ait olduğu anlaşılmaktadır. Bunun anlamı bu üç verinin regresyon analizinde daha güvenilir ve anlamlı olduğudur çünkü t-istatistik değeri ne kadar büyükse, katsayının o kadar güvenilir olduğunu gösterecektir.

P değeri regresyon modelinin ne kadar anlamlı, kabul edilebilir olduğunu gösterir. Genel modelin p değeri, $3,91 \times 10^{-28}$ dir. Bu değer alpha (0,05) değerinden oldukça küçük olduğu için 0 hipotezi kolaylıkla reddedilmiştir. Bunun ardından, bütün bağımsız değişkenlerin p değerlerinin 0 hipotezini reddetmek için yeterli olup olmadığı incelenmelidir. Bu modele göre, bağımsız değişkenler içerisinde silis dumanı, uçucu kül ve GKA'nın p değeri 0,05'ten büyüktür bunun

anlamı sıfır hipotezini reddedemediğimizdir. Yani bu bağımsız değişkenler manidar değildir. Buna karşılık olarak, çimento, toplam agrega ve suyun p değeri ise 0,05'ten küçüktür bunun anlamı ise 0 hipotezinin reddedilebileceğidir. Bütün olarak incelediğimizde, silis dumanı, uçucu kül ve GKA'nın 28 günlük basınç dayanımının tahmin edilmesinde anlamlı değildir. Ancak, çimento, toplam normal agrega ve su miktarı basınç dayanımının tahmin edilmesinde anlamlı bir değerdir.

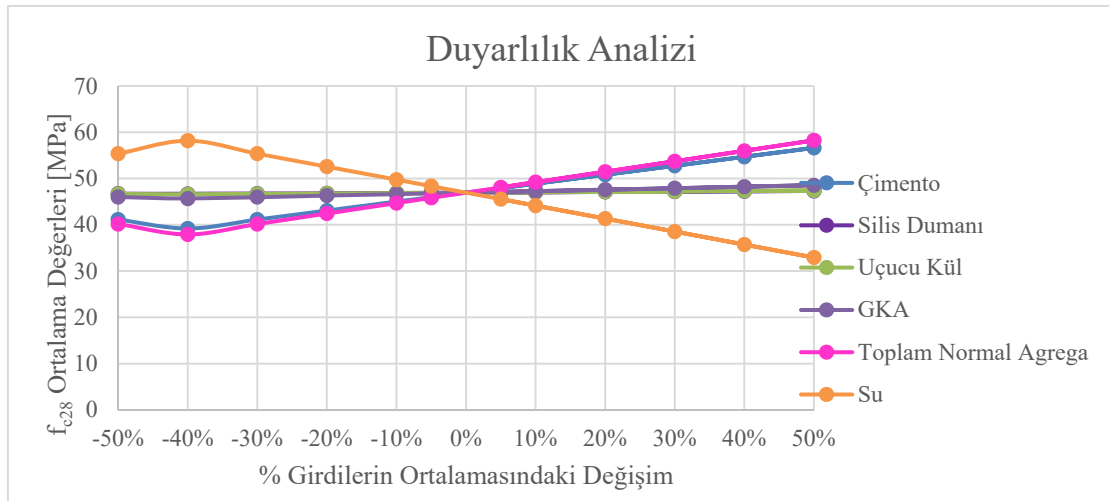
Parametre Optimizasyonu

Parametre optimizasyonu için MiniTab uygulaması kullanılmıştır. Yapılan örnekteki optimizasyon hedefi, bağımlı değişken olan $f_{c,28}$ değerini 30 MPa olarak ayarlamaktır. Bu programda bütün bağımsız değişkenler için en düşük ve en yüksek miktarlar mevcut 150'den fazla veri noktasına göre belirlenir, ancak gerçekçi tasarım değerleri elde etmek için en düşük toplam normal agrega miktarı 500 kg/m^3 ile sınırlandırılmıştır. Tablo 3'te sunulan değerler $f_{c,28}$ değerini 30 MPa elde etmek için toplam normal agrega miktarının sınırlandırıldığı bir örnektir. Parametre optimizasyonu sayesinde farklı değerleri sınırlandırarak farklı basınç dayanımları da elde edilebilir.

Tablo 3 - Parametre Optimizasyonundan Elde Edilen Veriler

Bağımsız Değişkenler	Miktar(kg/m^3)
Çimento	302
Silis Dumanı	9.7
Uçucu Kül	33.9
GKA	658.7
Toplam Normal Agrega	600.8
Su	219.1
TOPLAM YOĞUNLUK	1824.2

Duyarlılık Analizi



Şekil 6 - Duyarlılık Analizi

Şekil 6'da girdilerin (bağımsız değişkenlerin) ortalama değerleri, eksi ve artı %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 olarak değiştirilmiştir. Ayrıca bu grafikte değişen bağımsız değişkenlerle belirlenen $f_{c,28}$ 'e karşılık gelen ortalama değer de gösterilmiştir.

$f_{c,28}$ 'in ortalama değerini daha yüksek ölçüde azaltmak/arttırmak için girdinin (bağımsız değişkenin) grafikte eğime sahip olması gerekmektedir.

Bu değişkenler su, toplam normal agrega ve çimentodur. Düz hatta sahip (0'a yakın eğimi olan) girdiler, $f_{c,28}$ 'in ortalaması üzerinde çok az etkisi olan veya hiç etkisi olmayan değişkenleri gösterir. Bu girdiler ise uçucu kül, silis dumanı ve GKA'dır.

SONUÇLAR

Çalışmada meta-analiz kapsamında literatürden 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, betonun basınç dayanımı ile GKA kullanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, su/bağlayıcı oranı, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir. Bu analizlere göre p-değeri (3.91×10^{-28}) alpha değerinden oldukça küçük olduğu için sıfır hipotezi reddedilmiştir ve 6 farklı bağımsız değişkenin ortalamalarının birbirinden farklı olduğu kanısına varılmıştır. Bunun anlamı varyansların homojen olmadığıdır ve varyans analizinin temelini oluşturur. Hangi değişkenler arasında fark olduğunu bildirmemektedir.

GKA ve betonun kuru yoğunluğu arasındaki determinasyon katsayısı R^2 değeri 0.51'dir. Bu değer iki değişken arasında güçlü bir korelasyon olmadığını göstermektedir. 28 günlük basınç dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki R^2 değeri %65'tir. GKA ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki R^2 değeri %22'dir. Çimento miktarı ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki R^2 değeri ise %9'dur. Bu değer diğerlerine göre çok küçüktür bunun anlamı ise en zayıf korelasyonun bu iki değişken arasında olduğudur. Bunun regresyon analizinden elde edilen denklemlerle herhangi bir ilgisi yoktur. Bu iki farklı değişken arasındaki neden sonuç ilişkisini değil sadece bireysel olarak iki farklı değişken arasındaki ilişkinin güçlülüğünü göstermektedir. Neden-sonuç ilişkisi kurabilmek için grafikleri, varyans analizini ve korelasyon katsayısını iyi analiz etmek gerekmektedir.

Çalışma kapsamında, regresyon analizine dayalı olarak, 28 günlük basınç dayanımının değerlendirilen değişkenlerle olan ilişkisi bir denklem olarak sunulmuştur. Değişkenlerin değerleri denkleme girilerek betonun beklenen ortalama 28 günlük basınç dayanımı tespit edilebilir. Regresyon analizindeki detayları incelemeler ve duyarlılık analizi sonucunda su, çimento ve normal ağırlıklı agreganın 28 günlük basınç dayanımına olan etkisinin uçucu kül, silis dumanı ve GKA miktarından daha çok olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun anlamı, uçucu kül, silis dumanı ve GKA betonun mekanik performansını olumsuz etkilemeden kullanılabilir. Mevcut araştırmanın sonuçları, meta-analiz ile çok sayıda verinin anlamlı bir biçimde birleştirilmesiyle birlikte bütünleşik bir etki yaratmaktadır. Bu sebeple birbirinden bağımsız yürütülen tek bir çalışmanın sonuçlarına göre daha güçlü ve güvenilirdir.

Betonda GKA kullanımının maliyet ve performans açısından avantajları olmasına rağmen inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu çalışmanın sonucunda ise GKA miktarının betonun en önemli özelliklerinden biri olan 28 günlük basınç dayanımına etkisi su, çimento ve normal ağırlıklı agregadan oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımı üzerinde diğer değişkenler kadar etkili bir parametre olmadığına gösterilmesi betonda GKA kullanımının yaygınlaştırılması için önemlidir.

Kaynaklar

1. Chandra, S., Berntson, L., Lightweight aggregate concrete : science, technology, and application, 2002, 450 sayfa.
2. ACI Committee 213, Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, 2003.
3. Cavalline, T. L., Gallegos, J., Castrodale, R. W., Freeman, C., Liner, J., & Wall, J., “Influence of Lightweight Aggregate Concrete Materials on Building Energy Performance,” Buildings, Vol.3(11), 2021 pp 94.
4. Alexander, M. G., Engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composites, Cachan Rilem Publ., 1999
5. Haselbach, L., Engineering Guide to LEED - New Construction: Sustainable Construction for Engineers, New York, 460 sayfa
6. ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98), 2004.
7. Ozguven, A., and Gunduz, L., “Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate,” Cement and Concrete Composites, Vol. 34(6), 2012, pp 781–787.
8. Bogas, J. A., Gomes, A., and Pereira, M., “Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate,” Construction and Building Materials, Vol. 35, 2012, pp 1013–1022.
9. Bogas, J. A., and Nogueira, R. “Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions,” KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 18(6), 2014, pp1780–1791.
10. Bogas, J. A., and Gomes, A. “Non-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete,” Cement and Concrete Composites, Vol. 60, 2015, pp 111–122.
11. Dilli, M. E., Atahan, H. N., and Şengül, C., “A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates,” Construction and Building Materials, Vol. 101, 2015, pp 260–267.
12. G S, R., and Sivaraja, M., “Experimental Investigation on Self-Compacting Self-Curing Concrete Incorporated with the Light Weight Aggregates,” Brazilian Archives of Biology and Technology, Vol. 59(spe2), 2016
13. Józwiak-Niedźwiedzka, D., “Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate,” Cement and Concrete Composites, Vol. 27(6), 2005, pp 709–715.
14. Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A., and Dumontet, H., “Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ),” Cement and Concrete Research, Vol. 40(11), 2021, pp 1590–1600.
15. Karamloo, M., Mazloom, M., and Payganeh, G., “Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete,” Construction and Building Materials, Vol. 123, 2016, pp 508–515.
16. Lotfy, A., Hossain, K. M. A., and Lachemi, M., “Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates,” Construction and Building Materials, Vol. 106, 2016, pp 43–54.

17. Mahdy, M., “Structural Lightweight Concrete Using Cured LECA,” *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Vol. 5(9), 2016, pp 25-31.
18. Malešev, M., Radonjanin, V., Lukić, I., and Bulatović, V., “The Effect of Aggregate, Type and Quantity of Cement on Modulus of Elasticity of Lightweight Aggregate Concrete,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39(2), 2013, pp 705–711.
19. Mohammadi, Y., Mousavi, S., Rostami, F., and Danesh, A., “The effect of silica fume on the properties of self-compacted lightweight concrete,” *Current World Environment*, Vol. 10(Special-Issue1), 2015, pp 381–388.
20. R, A. K., and P, P., “Mechanical Properties of Structural Light Weight Concrete by Blending Cinder & LECA,” *IARJSET*, Vol. 2(10), 2015, pp 64–67.
21. Sajedi, F., and Shafigh, P., “High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 37(7), 2012, pp 1885–1893.
22. Yoon, J., Kim, J., Hwang, Y., and Shin, D., “Lightweight Concrete Produced Using a Two-Stage Casting Process,” *Materials*, Vol. 8(4), 2015, pp 1384–1397.
23. Youm, K.-S., Moon, J., Cho, J.-Y., and Kim, J. J., “Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume,” *Construction and Building Materials*, Vol. 114, 2016, pp 517–527.

Bor Madeni Atıklarından Alkali Füzyon Yöntemi ile Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi

Cavit Çağatay KIZILTEPE¹, İsa YÜKSEL², Serdar AYDIN³, Ayşenur SİĞİNDERE⁴

ÖZET

Bor madeninin farklı madencilik yöntemleri ile zenginleştirilmesi esnasında içerisinde bir miktar bor bulunan (%15-20) atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bor zenginleştirme prosesi esnasında açığa çıkan atık malzeme tümüyle herhangi bir sektörde değerlendirilememektedir. Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Kırka atıkları ile farklı oranlarda sodyum hidroksit (%2, %4, %6, %8 ve %10) içeren tek bileşenli geopolimer bağlayıcılar; 600 °C sıcaklıkta, farklı sürelerde (1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat) kül fırını içerisinde kalsine edilerek hazırlanmıştır. Kalsinasyon işleminin sona ermesinin ardından, numunelere havada ani soğutma yöntemi uygulanmıştır. Harç karışımlarının dökümünün ardından karışımlar 16 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş ve ardından 100 °C'de 24 saat boyunca etüv içerisinde kür edilmiştir. Kür işleminin sone ermesiyle numunelerin, basınç dayanımları belirlenmiş ve seçilen karışımlar üzerinde iç yapı analizleri (SEM/EDS) yapılmıştır. Hazırlanan harç numunelerinden 10-25 MPa aralığında basınç dayanımları elde edilmiştir. SEM analizi sonucunda %8 ve %10 Na₂O içeren karışımların, %2 Na₂O içeren karışıma göre matris fazının daha yoğun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor atığı, kalsinasyon, tek bileşenli geopolimer bağlayıcı.

ABSTRACT

Development of One-Part Geopolymer Binder from Boron Mine Tailings with Alkali Fusion Method

Mine tailings with a fair amount of boron (15-20%) are discarded during the enrichment of boron mine via different mining methods. Mine tailings discarded during the enrichment process of boron don't utilize totally. The production of one-part geopolmer binder of the utilization of mine tailings discarded in Kırka Boron Facility as a raw material via alkali fusion is investigated

1 Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa - cavit.kiziltepe@btu.edu.tr

2 Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa - isa.yuksel@btu.edu.tr

3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - serdar.aydin@deu.edu.tr

4 Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa - aysenur.sigindere@btu.edu.tr

within the scope of in this study. One-part geopolymer binders were prepared at 600 °C and different duration times (1, 2, 3, 4, 5, and 6 hours) by calcining within the muffle furnace with Kırka boron mine tailings having different sodium hydroxide ratios (2%, 4%, 6%, 8%, 10%). Calcined mine tailings were cooled in air via shock cooling method. After preparing mortar mixtures, they were waited along 16 h in room temperature and cured in an oven at 100 °C by 24 h. The compressive strength values of specimens were obtained after curing process and microstructure analyses (SEM/EDS) were performed on selected mixtures. The compressive strenght values in the rage of 10-25 MPa were obtained from prepared mortar specimens. The matrix phases of mixtures with 8% and 10% Na₂O are denser than the mixture containing 2% Na₂O according to SEM.

Keywords: *Boron tailing, calcination, one-part geopolymer binder.*

GİRİŞ

Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %74'ü ile ülkemiz, dünyada en fazla rezerve sahip ülkedir. 2015 yılı verilerine göre, dünya bor pazarındaki talebin yaklaşık %50'si ülkemiz tarafından karşılanmıştır [1]. Ülkemizde bor rezervleri; Kütahya-Emet, Bigadiç-Balıkesir, Kestelek-Bursa ve Kırka-Eskişehir bölgelerinde yer almaktadır. Doğada yaklaşık 230 adet bor minerali bulunmaktadır. Bu mineraller içerisinde en önemlileri (ülkemizde bulunması ve ticari değerinin olması bakımından); tinkal, kolemanit ve üleksit mineralleridir. Emet'te kolemanit ve üleksit, Kırka'da tinkal, Bigadiç'te kolemanit ve üleksit, Kestelek'te ise kolemanit yatakları mevcuttur.

Bor, temizlik sanayi, inşaat sektörü, seramik sanayi, nükleer sanayi vb. birçok farklı endüstriyel sektörde yaygın bir şekilde kullanılan çok önemli bir madendir. Bor madeninin farklı madencilik yöntemleri ile zenginleştirilmesi esnasında içerisinde bir miktar bor bulunan (%15-20) atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bor zenginleştirme prosesi esnasında açığa çıkan atık malzemeler işletmeler tarafından atık barajlarında depolanmakta ve herhangi bir sektörde değerlendirilememektedir. Ayrıca bu malzemelerin atmosfere açık ortamlarda depolanması çevre kirliliğine neden olmaktadır. Atıkların içerisinde bulunan bor bileşiklerinin yağmur suları tarafından çözünmesi hava, su ve toprak kirliliğine yol açmakta olup, bu durum canlılar açısından risk oluşturmaktadır.

Doğal çevre ve insan sağlığı açısından en büyük risklerden bir diğeri ise maden atıklarının depolandığı atık barajlarının herhangi bir sebepten dolayı yıkılması ve baraj içerisinde bulunan atıkların serbest kalarak doğaya karışmasıdır. Son 10 yılda Brezilya ve Rusya'da bulunan demir cevheri ve altın madeni atıklarının depolandığı atık barajlarının yıkılması sonucunda çok ciddi çevre sorunlarıyla karşılaşmıştır [2-4]. Ayrıca Rico vd. [5], yapmış oldukları çalışmada 1965-2000 yılları arasında kayıtlara geçen 29 adet yıkılmış atık barajının olduğunu belirtmiştir.

Ülkemizde beton, harç, blok elemanlar vb. yapı malzemelerinin üretiminde bağlayıcı madde olarak Portland çimentosu yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat Portland çimentosu üretiminde kullanılan hammaddelerin (kil-kireçtaşı) temini doğal çevrenin tahribatına neden olmaktadır. Ayrıca Portland çimentosu üretimi aşamasında atmosfere salınan gazlar (CO₂, SO₂, NO_x vb.) doğal çevreye oldukça zarar vermektedir. Çimento içerisindeki karma oksitlerin yaklaşık 1300 °C-1400 °C seviyelerinde oluşmasından dolayı enerji sarfiyatı oldukça yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı üretimi son yıllarda önemli araştırma konularından biri olmuştur. Bu araştırmalardan en ilgi çekenini ise alkalilerle aktive edilerek üretilen geleneksel (iki bileşenli: alkali aktivatör-alüminosilikat toz malzeme) geopolimer bağlayıcılarıdır. Fakat iki bileşenli sistemler içerisinde kullanılan alkali aktivatörlerin viskoz ve korozif yapıda olması nedeni ile uygulama anında insan vücuduna temas etmesi durumunda insan sağlığına olumsuz etkisi olmaktadır. Ayrıca, iki bileşenli geopolimer bağlayıcıların yerinde döküm işlemlerinde uygulanabilirliği pratik olmamaktadır. Son yıllarda

yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment) çalışmaları, sadece tek bileşenli geopolimer bağlayıcıların çevresel açıdan Portland çimentosuna kıyasla önemli ölçüde faydaları olduğunu göstermiştir [6]. Bu nedenlerden dolayı, son yıllarda, araştırmacılar Portland çimentosu gibi pratik bir şekilde kullanılabilir tek bileşenli (sadece su ilavesiyle) geopolimer bağlayıcıların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Son yıllarda alkali füzyon yöntemi kullanılarak üretilen tek bileşenli geopolimer bağlayıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Ye vd. [7], kırmızı çamur ile pellet sodyum hidroksiti belirli oranlarda (kırmızı çamurun %10 ve %15'i kadar Na_2O olacak şekilde) karıştırarak elde ettiği kuru karışımı, 800 °C'de 1 saat boyunca kalsine etmiştir. Alkali füzyon yöntemi ile elde edilen kırmızı çamur esaslı geopolimer bağlayıcılar belirli oranlarda (%5, 10, 15, 20, 25 ve 30) silis dumanı ile yer değiştirerek 0,65 su/bağlayıcı oranında geopolimer hamur karışımları hazırlanmıştır. Silis dumanı oranının artması ve su/bağlayıcı oranının azalmasıyla hamur karışımlarının basınç dayanımlarının önemli oranda arttığı rapor edilmiştir.

Abdel-Gawwad ve Khalil [8], %60 klinker üretimi esnasında toz toplama ünitelerinde toplanan atık toz malzeme (cement kiln dust) ve %40 feldispattan oluşan kuru karışımı alkali füzyon yöntemiyle kalsine ederek tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretimi gerçekleştirmiştir. Çalışmada kalsinasyon sıcaklıklarının (1200 °C ve 1300 °C), kalsinasyon süresinin (2 saat ve 3 saat) ve sodyum karbonat içeriğinin (%10 ve %20) üretilen geopolimer bağlayıcı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu tip geopolimer bağlayıcı ile hazırlanan geopolimer hamurların 28 günlük basınç dayanımları yaklaşık 52 MPa bulunmuştur.

Peng vd. [9], bentoniti alkalilerle (sodyum karbonat ve sodyum hidroksit) birlikte farklı sıcaklıklarda (700 °C, 850°C ve 1000 °C) 3 saat boyunca kalsine ederek geopolimer klinker üretimi gerçekleştirmiştir. Sırasıyla 1000 °C ve 850 °C sıcaklıklarda kalsine edilen bentonit+sodyum hidroksit (%25) ile bentonit+sodyum karbonat (%33) karışımlarından elde edilen geopolimer klinker ile üretilen hamur karışımlarının 210 gün sonundaki basınç dayanımları sırasıyla yaklaşık 45 MPa ve 55 MPa olarak rapor edilmiştir.

Ke vd. [10], kırmızı çamuru belirli oranlarda sodyum hidroksit ile karıştırarak elde edilen kuru karışımın 800 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca kalsine edilmesi ile üretilen geopolimer bağlayıcının içyapı özelliklerini ve bu bağlayıcı ile hazırlanan hamur karışımlarının basınç dayanımı değerlerini incelemiştir. Kırmızı çamur ağırlığının %5, %10 ve %15'i kadar Na_2O oranına denk gelen sodyum hidroksit ile homojen bir karışım oluşturacak şekilde karıştırılmıştır. Yüzde 5 sodyum hidroksit içeren kırmızı çamur esaslı geopolimer bağlayıcı ile üretilen hamur karışımı ilk 7 günde sertleşmemiş ve 14 günden sonra dayanım kazanmaya başladığı rapor edilmiştir. Yüzde 10 ve 15 oranlarında sodyum hidroksit içeren geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlar ise kısa sürede dayanım kazanmışlar ve maksimum basınç dayanımı değerleri 7. günde sırasıyla 10 MPa ve 8 MPa olarak rapor edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır.

AMAC

Bu çalışmanın amacı, büyük oranda ülkemize has atık olma özelliğini taşıyan bor madeni atıklarının, bütünüyle değerlendirilebilmesi açısından tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde hammadde olarak kullanımının mümkün olup olmadığını araştırmaktır. Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Ham ve kalsine edilen atıkların kimyasal bileşimi XRF (X-Işınları Floresans Spektrometresi) analizi ile belirlenmiş olup, Tablo 1’de gösterilmiştir. Kalsine Kırka atığına ait XRF sonucu, alkali füzyon yöntemi kullanılmadan yalnızca ham maddenin 1 saat boyunca kalsine edilmesi ile üretilen numuneye aittir. Bu kalsinasyon, ham madde içinde yer alan oksit miktarlarının nasıl değiştiğini görmek amacıyla yapılan bir çeşit ön deneydir.

Tablo 1 - Ham ve Kalsine kırka atığının (600 °C -1 saat) kimyasal kompozisyonu

Atık Türü	Bileşenler, Ağırlıkça (%)										
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	K.Kayı
Kırka (Ham)	19,20	16,12	1,47	6,40	18,60	0,68	0,31	4,81	0,24	-	32,17
Kırka (Kalsine)	25,21	22,03	1,59	7,34	24,55	0,93	0,40	5,55	0,38	-	12,03

Kırka tıncal zenginleştirme tesislerinden açığa çıkan ve atık barajlarında depolanmış bor madeni atıkları alkali füzyon yöntemi ile kalsine edilmeden önce, etüv içerisinde 100 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından ve kalsinasyon prosesi öncesinde numuneler 2 dakika boyunca 400 rpm hızında bilyalı değirmende öğütülmüştür. Kalsinasyon öncesinde öğütme işleminin amacı, numunelerin tane boyutları arasındaki farkları minimize etmek ve tane boyutu açısından homojen hale getirmektir. Öğütülen numuneler kalsinasyon prosesi öncesinde 75 µm elekten öğütülmüştür. Elek altında kalan malzeme kalsinasyon prosesinde kullanılmıştır. Aktivatör olarak Merck firması üretimi olan ve %97 saflığa sahip, granül formda sodyum hidroksit kullanılmıştır. Aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit, kalsinasyondan bir gün önce belirli oranlarda su ile karıştırılmıştır. Sodyum hidroksit ve sudan oluşan çözelti soğuması için 1 gün bekletilmiştir. Öğütme işleminin ardından elde edilen bor madeni atıkları, farklı Na₂O oranlarına sahip (%2, %4, %6, %8 ve %10) sodyum hidroksit çözeltisi ile karıştırılarak hamur karışımı elde edilmiştir. Hamur karışımlarının çözelti/katı oranları (içerdikleri Na₂O oranlarına bağlı olarak) 0,40-0,50 aralığındadır. Elde edilen hamur karışımları, bilye formuna getirildikten sonra 600 °C sıcaklıkta, farklı sürelerde (1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat) kül fırını içerisinde kalsine edilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığı atığın TG/DT analizi sonucunda belirlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda atık içerisinde yeni kristal fazların oluştuğu görülmüştür. Kalsinasyon işleminin sona ermesinin ardından, numunelere havada ani soğutma yöntemi uygulanmıştır. Numuneler soğuduktan sonra tekrar bilyalı değirmende 3 dakika boyunca 400 rpm hızda öğütülmüştür.

Harç karışımları laboratuvar tipi mikser kullanılarak üretilmiştir. Tüm harç karışımlarında agrega/bağlayıcı oranı 2.5’dir. Homojen bir karışımın elde edilebilmesi için bağlayıcı malzemeler ve standart silis kumu karışımı 1 dakika düşük devirde karıştırılmıştır. Yaklaşık 3 dakikalık karıştırma işleminin ardından (2 dakika yavaş devir ve 1 dakika hızlı devir) taze haldeki harç karışımları 50x50x50 mm’lik küp kalıplara iki tabaka halinde yerleştirilmiş, her tabaka 1 dakika sarsma tablasında sıkıştırılmıştır. Hazırlanan %4, %6, %8 ve %10 Na₂O içeren harç karışımların su/bağlayıcı oranı 0,52 iken %2 Na₂O içeren karışımın 0,52 su/bağlayıcı oranında kalıplara yerleştirilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle %2 Na₂O içeren harç karışımının su/bağlayıcı oranı 0,57 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan harç karışımlarının atmosfere açık yüzeyleri alüminyum folyo ile sarılarak 16 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş, ardından 100 °C’de

24 saat boyunca etüv içerisinde kür edilmiştir. Kür işleminin sona ermesiyle numunelerin, basınç dayanımları belirlenmiş ve seçilen karışımlar üzerinde SEM/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizleri yapılmıştır.

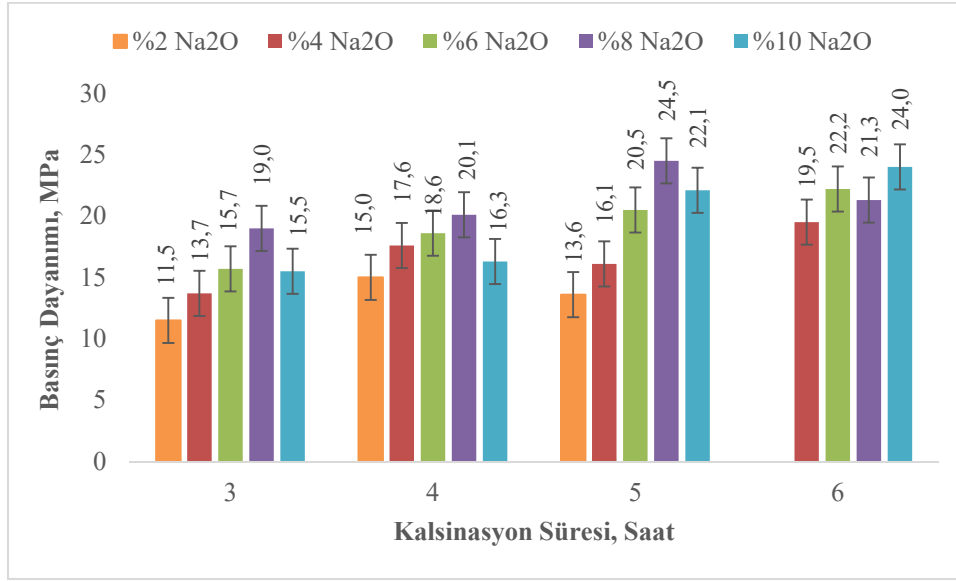
DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar sonucunda %10 Na₂O içeren karışımlardan; 1 ve 2 saatlik kalsinasyon süreleri sonucunda yeterli basınç dayanımı elde edilememiştir. Bu sebeple 1 ve 2 saatlik kalsinasyon süreleri çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Bu aşamada üretilen geopolimer bağlayıcılar ve bu bağlayıcılar ile üretilen harç karışımlarının özellikleri ve sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2 - Farklı Na₂O oranının ve kalsinasyon sürelerinin geopolimer bağlayıcı özellikleri ve hazırlanan harç karışımlarının sonuçları

Karışım Adı	Su/bağlayıcı	Kalsinasyon Süresi (Saat)	Basınç Dayanımı (MPa)
SH10-0,52-3	0,52	3	15,5
SH8-0,52-3	0,52	3	19,0
SH6-0,52-3	0,52	3	15,7
SH4-0,52-3	0,52	3	13,7
SH2-0,57-3	0,57	3	11,5
SH10-0,52-4	0,52	4	16,3
SH8-0,52-4	0,52	4	20,1
SH6-0,52-4	0,52	4	18,6
SH4-0,52-4	0,52	4	17,6
SH2-0,57-64	0,57	4	15,0
SH10-0,52-5	0,52	5	22,1
SH8-0,52-5	0,52	5	24,5
SH6-0,52-5	0,52	5	20,5
SH4-0,52-5	0,52	5	16,1
SH2-0,57-5	0,57	5	13,6
SH10-0,52-6	0,52	6	24,0
SH8-0,52-6	0,52	6	21,3
SH6-0,52-6	0,52	6	22,2
SH4-0,52-6	0,52	6	19,5

Şekil 1'de kalsinasyon süresine ve farklı Na₂O oranlarına göre geopolimer harç numunelerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri yer almaktadır.



Şekil 1 - Basınç dayanımı değerleri

Üç saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, Na_2O oranının %8'e kadar artması ile basınç dayanımlarında artış eğiliminin olduğu görülmektedir. Na_2O oranının %2'den %4'e çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %19'luk artış meydana gelirken, %6 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında %36; %8 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %65 artış gözlemlenmiştir. Na_2O oranının %10'a çıkması ile basınç dayanımında %18'lik düşüş (%8 Na_2O oranına göre) gözlemlenerek 15,5 MPa bulunmuştur.

Dört saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, genel eğilim 3 saat kalsine edilmiş geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımıyla benzerdir. Na_2O oranının %2'den %4'e çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %17'lik artış meydana gelirken, %6 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında %24; %8 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %34 artış gözlemlenmiştir. Bu serilerde Na_2O oranının artmasıyla, basınç dayanımlarındaki artış yüzdeleri, 3 saat süre ile kalsine edilmiş bağlayıcılarla üretilen harç karışımlarınıninkine göre azalmıştır. Na_2O oranının %10'a çıkması ile basınç dayanımında %19'luk düşüş gözlemlenerek (%8 Na_2O oranına göre) 16,3 MPa bulunmuştur.

Beş saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, genel eğilim 3 ve 4 saat kalsine edilmiş geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımıyla birbirine benzerdir. Na_2O oranının %2'den %4'e çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %18'lik artış meydana gelirken, %6 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında %50; %8 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %80 artış gözlemlenmiştir. Na_2O oranının %10'a çıkması ile basınç dayanımında %10'luk düşüş gözlemlenerek (%8 Na_2O oranına göre) 22,1 MPa bulunmuştur.

Altı saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, diğer serilerden farklı olarak, Na_2O oranının %8'e kadar artması ile basınç dayanımlarında belirgin artışlar olmamıştır. Na_2O oranının %4'ten %6'ya çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %13'lik artış meydana gelirken, %8 Na_2O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %9 artış gözlemlenmiştir. Bu seride, diğer serilerin aksine Na_2O oranının %10'a çıkması ile en yüksek basınç dayanımı (24,0 MPa) elde edilmiştir.

%4 Na₂O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımı değeri 13,7 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise 19,5 MPa ile 6 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin, 3 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımına göre yaklaşık %28 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %17 ve %42'dir.

%6 Na₂O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında lineere yakın bir artış gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımı değeri 15,7 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise 22,2 MPa ile 6 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımında yaklaşık %18 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %30 ve %41'dir.

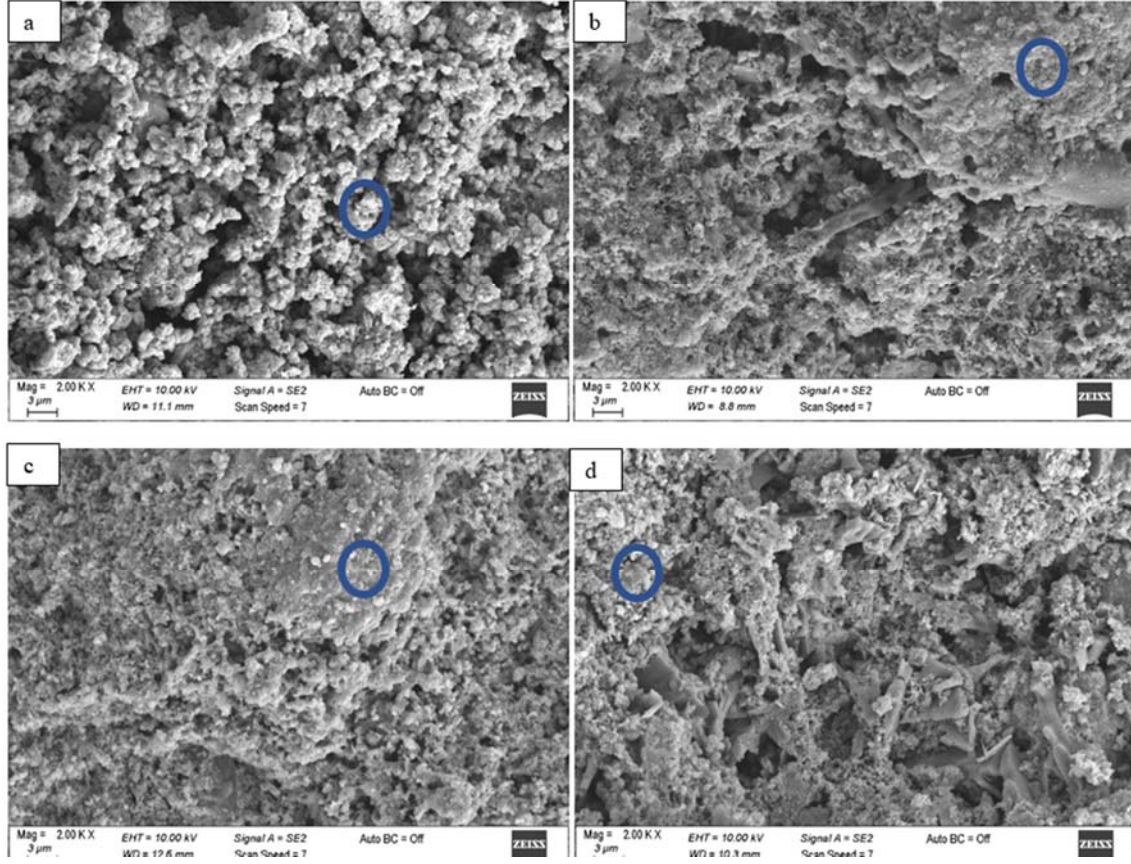
%8 Na₂O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin 5 saate kadar artması ile basınç dayanımlarında artış gözlemlenirken, 6 saat kalsinasyon süresinde basınç dayanımı bir miktar azalmıştır. En düşük basınç dayanımı değeri 19,0 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise diğer serilerden farklı olarak 24,5 MPa ile 5 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımında yaklaşık %6 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %28 ve %12'dir.

%10 Na₂O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında artış olmuştur. En düşük basınç dayanımı değeri 15,5 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise 24,0 MPa ile 6 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımında yaklaşık %5 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %42 ve %54'tür.

SEM Analizi Sonuçları

Bir önceki bölümde elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, 4 farklı karışım seçilerek SEM/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizi yapılmıştır. Kalsinasyon süresinin ve farklı Na₂O oranlarının numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için; SH8-0,52-3, SH10-0,52-5, SH8-0,52-5 ve SH2-0,57-5 karışımları seçilmiştir. Karışımların SEM görüntüleri Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, kalsinasyon süresinin 5 saat olduğu numunelerde (a, b ve c) Na₂O oranı arttıkça matris fazı daha yoğun bir yapıdan oluşmaktadır. %2 Na₂O oranına sahip numunelerde iç yapı daha boşluklu iken, %8 ve %10 Na₂O içeren numunelerde yer alan boşluklar, geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda oluşan ürünler ile dolarak, daha yoğun matris fazı oluşmuştur. SH2-0,57-5 (a) karışımında yuvarlak içine alınan noktada yapılan EDS analizi sonucunda, yaklaşık %60 düzeyinde Ca atomlarının varlığı tespit edilmiştir. Si, Al, Na ve Mg atomlarının atomik oranları ise %5'in altındadır. Bu sonuç iç yapıda bulunan Ca atomlarının geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumu için reaksiyona girmediğini göstermektedir. Geopolimerizasyon ürünlerinin oluşmaması ve buna bağlı olarak boşluklu bir yapının oluşmasından dolayı en düşük basınç dayanımı (13,6 MPa) SH2-0,57-5 karışımından elde edilmiştir. SH8-0,52-5 (b) ve SH10-0,52-5 (c) karışımlarında yuvarlak içine alınan noktalarda yapılan EDS analizi sonuçları benzerlik göstermektedir. Bu bölgelerde %18-19 seviyelerinde Ca atomu ve %13-14 seviyelerinde ise Si atomu bulunmaktadır. Ayrıca Na atomu %1-4 seviyelerinde iken Mg atomu da %12-17 seviyelerinde bulunmuştur. Bu bölgede Ca/Si oranı 1,35-1,38 aralığında bulunmuştur. Elde edilen

sonuçlar ışığında geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda bu bölgede Ca bakımından zengin, ayrıca yapısında Na ve Mg olan C-(Na-Mg)S-H yapısı oluşmuştur. SH8-0,52-3 (d) karışımının matris fazı, SH8-0,52-5 (b) ve SH10-0,52-5 (c) karışımlarınıninkine benzerlik göstermektedir. Yuvarlak içine alınan noktada yapılan EDS analizi sonucunda, Ca ve Si atomları ayrı ayrı yaklaşık %6 seviyesindedir. Ayrıca yaklaşık %4 Mg atomu ve %47 Na atomu bulunmaktadır. Ca/Si oranı yaklaşık 1'dir.



Şekil 2 - a: SH2-0,57-5, b: SH8-0,52-5, c: SH10-0,52-5, d: SH8-0,52-3 karışımlarının SEM (SE) görüntüleri

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir.
- Basınç dayanımları üzerinde; kalsinasyon süresinin etkisi, Na₂O oranının etkisine göre daha belirgindir.
- Karışımların Na₂O oranlarına bakılmaksızın, 600 °C kalsinasyon sıcaklığında optimum kalsinasyon süresi 5 saattir (%4 Na₂O içeren karışım hariç).
- En yüksek basınç dayanımı, SH8-0,52-5 karışımından 24,5 MPa olarak elde edilmiştir.

- Elde edilen basınç dayanımı değerleri Kırka bor atığının, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir.
- Karışımların matris fazının SEM görüntüleri, basınç dayanımı değerleri ile uyumlu olup, yapılan EDS analizi ile geopolimerizasyon reaksiyonları Ca bakımından zengin, ayrıca yapısında Na ve Mg olan C-(Na-Mg)S-H yapısı oluşmuştur.

Teşekkür

219M426 numaralı ve “Bor Madeni Atıklarından Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi” başlıklı TÜBİTAK projesinden üretilmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca malzemeleri temin eden Eti Maden Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’ne de teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

1. Bor Sektör Raporu . 2011. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. Türkiye: Bor Sektör Raporu.
2. Quadra, G. R., Roland, F., Barros, N., Malm, O., Lino, A. S., Azevedo, G. M., Mendonça, R. F. “Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil”, Chemosphere, January 2019, 215, pp 753-7.
3. Almeida, C. A., de Oliveira, A. F., Pacheco, A. A., Lopes, R. P., Neves, A. A., de Queiroz, M. E. L. R. “Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin-Brazil”, Chemosphere, October 2018, 209, 411-420.
4. Glotov, V. E., Chlachula, J., Glotova, L. P., Little, E. “Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East”, Engineering Geology, November 2018, 245, 236-247.
5. Rico, M., Benito, G., Diez-Herrero, A.. “Floods from tailings dam failures”, Journal of Hazardous Materials, June 2008, 154(1-3), 79-87.
6. Ouellet-Plamondon, C., and G. Habert. “Life cycle analysis (LCA) of alkali-activated cements and concretes.” In Handbook of alkaliactivated cements, mortars and concretes, 2014, 663–686. Cambridge: WoodHead.
7. Ye, N., Yang, J., Liang, S., Hu, Y., Hu, J., Xiao, B., Huang, Q. “Synthesis and strength optimization of one-part geopolymers based on red mud”, Construction and Building Materials, 2016, 111, 317-25.
8. Abdel-Gawwad, H. A., Khalil, K. A. “Application of thermal treatment on cement kiln dust and feldspar to create one-part geopolymer cement”, Construction and Building Materials, 2018, 187, 231-7.
9. Peng, M. X., Wang, Z. H., Shen, S. H., Xiao, Q. G., Li, L. J., Tang, Y. C., Hu, L. L. “Alkali fusion of bentonite to synthesize one-part geopolymeric cements cured at elevated temperature by comparison with two-part ones”, Construction and Building Materials, 2017a, 130, 103-112.
10. Ke, X., Bernal, S. A., Ye, N., Provis, J. L., Yang, J. “One-Part Geopolymers Based on Thermally Treated Red Mud/NaOH Blends”, Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(1), 5-11.

Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi

Yasin ENGİN¹

ÖZET

Beton, dünyada sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci malzemedir ve ayrıca açık ara dünyanın en çok kullanılan yapı malzemesidir. Küresel olarak yılda yaklaşık 4 milyar ton çimento ve tahminen 10 milyar m³ beton tüketilmektedir İnşaat sektörünün en önemli girdilerinden biri olan hazır beton, sürdürülebilir üretim açısından birçok potansiyele sahiptir. Bildiri kapsamında sürdürülebilir hazır beton üretimi; daha az çimento kullanımı, yakın tedarik kaynaklarının tercih edilmesi, reçete optimizasyonu ve dijitalleşme, 28 gün yerine daha ileri yaş dayanımlarına bakılması, karbon ayak izi düşük çimento ve bağlayıcıların kullanımı, projelerde daha yüksek dayanımlı beton tercih edilmesi, çevresel etki sınıfları, yapısal tasarım optimizasyonu ve geri kazanılmış agrega kullanımı başlıkları altında değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir beton, karbon ayak izi, geri dönüşüm.

ABSTRACT

Sustainable Ready Mixed Concrete Production

Concrete is the second most widely used material in the world after water and is also by far the most used building material in the world. Globally, approximately 4 billion tons of cement and an estimated 10 billion m³ of concrete are consumed annually. Ready mixed concrete, which is one of the most important inputs of the construction industry, has many potentials in terms of sustainable production. In this study, sustainable ready mixed concrete production is discussed in terms of using less cement, choosing close supply sources, recipe optimization and digitalization, looking at higher age strengths instead of 28 days, using cement and binders with low carbon footprint, preferring higher strength concrete in projects, environmental impact classes, structural design optimization and evaluated under the headings of recycled aggregate use.

Keywords: Sustainable concrete, carbon footprint, recycling.

¹ İstanbul - yasin.engin@gmail.com

GİRİŞ

İnsan kaynaklı faaliyetlerin çevreye etkisi küresel ölçekte ilk kez 1972 yılında Stockholm’de gerçekleştirilen BM İnsan Çevresi Konferansı’nda işlenmiştir. Sürdürülebilir kalkınma kavramı ise ilk kez, 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu’nca hazırlanan Brundtland Raporu’nda geçmiştir. Sürdürülebilir kalkınma için evrensel olarak kabul edilmiş bir tanım yoktur. Brundtland Raporu’nda “sürdürülebilir kalkınma”, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılayabilen kalkınma olarak tanımlanmıştır [1].

1997 yılında küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası ilk çerçeve olan Kyoto Protokolü, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi içinde imzalanmıştır. Kyoto Protokolü ile hedeflenen başarıya ulaşılamaması, 1950’lerden 2010’lara kadar atmosferdeki karbon miktarının sürekli artış göstermesi ve bunun sonucunda küresel sıcaklık artışının kritik düzeye ulaşması daha etkili ve yaygın politikaların oluşturulması ihtiyacını doğurmuştur. Bunun üzerine 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris’te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı’nda kabul edilmiştir. 2021 yılı sonunda Türkiye tarafından da imzalanan Paris Anlaşması, çimento ve dolayısıyla hazır beton sektörü başta olmak üzere birçok sanayi sektörünün iklim değişikliği ile mücadele kapsamında dönüşümünü tetikleyen ve hızlandıran bir milat olmuştur. Her ne kadar 2005 yılında Avrupa Birliği’nde Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) uygulanmaya başlanmış olsa da küresel ölçekte farkındalık ve duyarlılık 2015 sonrasında oluşmaya başlamıştır. Bunun en iyi örneği ABD, İngiltere, Almanya vb. birçok ülkedeki çimento ve hazır beton sektörlerinin iklim değişikliği ile mücadele kapsamındaki yol haritalarını ilk kez 2021 yılında duyurmuş olmalarıdır.

AMAÇ

Bu çalışmada hazır beton sektöründe sürdürülebilirliğin önemi, düşük karbon hedefi, alınan ve alınacak aksiyonlar, bu kapsamda oluşan riskler ve fırsatlar hem literatür hem de pratik uygulamalar ile desteklenerek geniş bir açıdan işlenmektedir. Dünyadan ve Türkiye’den çeşitli veriler ve bu verilere dayanarak yapılan tahminler ile de bir durum analizi yapılmaktadır.

BETONUN ÖNEMİ

Beton, dünyada sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci malzemedir ve ayrıca açık ara dünyanın en çok kullanılan yapı malzemesidir [2]. Küresel olarak yılda yaklaşık 4 milyar ton çimento tüketilmektedir [3] ve bu çimentonun %80’i ile beton üretildiği varsayılırsa karşımıza 10 milyar m³ gibi devasa bir beton üretim miktarı çıkmaktadır. Bu neredeyse dünyadaki her insan başına yıllık 1,3 m³ beton üretimi demektir. Türkiye’de ise 2021 yılında 105 milyon m³ hazır beton üretimi gerçekleşmiştir [4].

Birleşmiş Milletler, küresel olarak önümüzdeki 40 yıl içinde 230 milyar m²’lik yeni bir alan inşa edileceğini, dünya binalarındaki mevcut taban alanının iki katına çıkacağını tahmin etmektedir. Bunun büyük çoğunluğu Afrika ve Asya’da olacaktır, ancak 2060 yılına kadar 25 milyar m² yeni inşaat alanı eklenecek olan Avrupa’da da hala önemli bir büyüme beklenmektedir [5]. Pratik bir alternatifi olmayan beton, yeni bina ve altyapı talebini karşılamada önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

Üstün fiziksel ve mekanik özellikleri, kolay üretilmesi, sürdürülebilir olması ve diğer alternatif malzemelere göre daha ekonomik olması betonu kelimenin tam anlamıyla modern yapılı çevrenin temel unsuru haline getirmektedir. Bir yapı malzemesi olarak betonun değeri yadsınamaz; ancak iklim değişikliği ile mücadele, betonun ve beton bileşenlerinin sorgulanabilir olmasına da neden

olmaktadır. İnşaatın temel unsurlarından biri olan beton, gelecek yıllarda yapı çevremizde daha fazla iklim direnci elde etmek için vazgeçilmez olacak olan dayanımı, çok yönlülüğü ve dayanıklılığı gibi birçok özelliği nedeniyle de değerlidir. Ayrıca beton, kimyasal karbonatlaşma süreci boyunca ortamdaki karbonu ömrü boyunca tutma konusunda benzersiz bir kapasiteye sahiptir. Bu açıdan betona “karbon yutağı (carbon sink)” bir malzeme tanımı da yapılabilmektedir [6]. 1930 ile 2019 arasında, tahmini olarak 21 milyar ton ortam karbondioksiti (CO_2) karbonatlaşma yoluyla beton ve diğer çimentolu ürünler tarafından tutulmuştur [7]. Bununla birlikte, betonun karbon ayak izi, karbonatlaşma ile tutabileceği CO_2 'nin oldukça üzerindedir. Bunun nedeni, betona benzersiz yapısal özelliklerini veren bileşen olan Portland çimentosu üretim sürecinin yüksek derecede emisyon yoğun olmasıdır. Çimento, çoğu uygulamada tipik olarak hacimce betonun %15'inden fazlasını oluşturmazken, malzemenin karbon emisyonunun neredeyse %90'ını oluşturmaktadır. Küresel olarak, Portland çimento endüstrisi, toplam antropojenik CO_2 emisyonlarının %8'inden sorumludur [8] ve bu nedenle beton bir ülke olsaydı, Çin ve ABD'den sonra dünyanın en büyük üçüncü yayıcısı olurdu [9].

Son yıllarda giderek artan düşük karbonlu üretim ve teknoloji yelpazesi, bugün hem yapısal performansı iyileştirmek hem de beton emisyonlarını azaltmak için mevcut süreçlere dahil edilmektedir. Bunlardan bazıları son derece yenilikçidir. Diğerleri ise düşük teknolojili ve pratikte zaten iyi kurulmuş, ancak çok daha kapsamlı bir şekilde konuşlandırılabilir niteliktedir.

Betondaki emisyon azaltımları yalnızca tek bir değişiklikle değil, malzemenin tüm yaşam döngüsü boyunca kümülatif olarak elde edilebilmektedir. Buna bileşen seçimi, imalat, nakliye, inşaat süreçleri, inşaat sonrası bakım, onarım, bertaraf ve yeniden kullanım dahildir.

Emisyon azaltımları, aynı beton karışımında veya nihai üründe bireysel azaltma faktörleri birleştirildiğinde en üst düzeye çıkmaktadır. Çoğu emisyon azaltımı, mevcut çimento ve beton üreticileri tarafından uygulanabilir niteliktedir. Betondaki karbon ayak izini azaltmak, birbirini takip eden ayrı endüstrilerin ve aktörlerin ortaya çıkmasından ziyade, büyük ölçüde yerleşik çimento ve beton üreticilerinin kararlarını ve eylemlerini içermektedir.

Beton gibi üretilen herhangi bir malzemenin kullanım ömrü boyunca birden fazla noktada karbon emisyonları üretilir. Bu emisyonlar iki kategoriye ayrılır [10]:

1. Gömülü karbon emisyonları; malzeme kullanılmadan önce ham madde çıkarımı, yukarı akış üretimi, nakliye ve imalat aşamaları sırasında meydana gelen emisyonlardır.
2. Operasyonel karbon emisyonları, imalat ve inşaat sonrasında malzemenin operasyonel ömrü boyunca meydana gelir.

Şekil 1'de hazır betonun beşikten kapıya kadarki süreçteki emisyon oranları görülmektedir. Hazır betonun gömülü karbon emisyonu toplam emisyonun %90'ından fazlasını kapsamaktadır. Üretim kaynaklı operasyonel emisyon oranı ise %5 seviyesindedir.



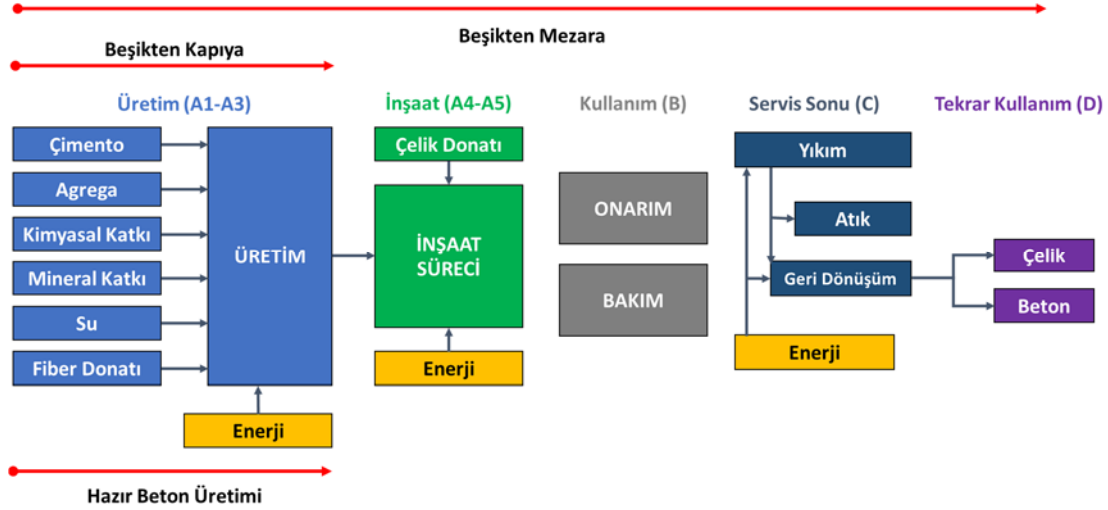
Şekil 1 - Hazır betonun beşikten kapıya emisyon aşamaları [11]

Betonun iklim üzerindeki etkisi, büyük ölçüde Portland çimentosu üretim süreciyle ilişkili gömülü karbon emisyonlarının bir işlevidir. Çimento ile ilgili gömülü karbon emisyonları “proses” ve “yanma” emisyonlarına ayrılmaktadır. Çimento üretimindeki emisyonların yaklaşık %60’ı, CO₂’nin kireçtaşı kalsinasyonunun kimyasal bir yan ürünü olarak salındığı süreç emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Kalan emisyonlar, fosil yakıtların (en yaygın olarak kömür) klinker üretimi için gerekli olan 1450°C sıcaklığa ulaşılması için yakılmasından kaynaklanmaktadır [12].

Bu bilgiler ışığında şu soru sorulabilir. Sadece 2050 yılına kadar karbon emisyonunu net sıfıra düşürme gerekliliği ile medeniyetin gelişme ihtiyacını nasıl birlikte sağlayabileceğiz? Bu, betonun karbon emisyonunu azaltmak hatta nötrlemek için beton bileşenlerine ve üretim/taşıma gibi operasyonlara odaklanmayı gerektiren yöntemler ile cevaplanabilecek bir sorudur.

HAZIR BETONUN YAŞAM DÖNGÜSÜ

Hazır betonun yaşam döngüsü aşamaları Şekil 2’de belirtilmiştir. Üretim aşamasında (A1-A3) beton bileşenlerinin çevresel etkileri (gömülü karbon ve su), bu bileşenlerin nakliyesi, üretim esnasında tüketilen enerji ve açığa çıkan emisyon, tüketilen su ve proses sonucu açığa çıkan atıklar dikkate alınır. İnşaat aşamasında (A4-A5) ise üretilen betonun inşaat sahasına nakliyesi, tüketilen enerji, sahadaki uygulamalar kaynaklı çevresel etkiler incelenir. Kullanım aşamasında (B) ise betonun servis ömrü boyunca ihtiyaç duyacağı onarım ve bakım kaynaklı tüketimlerin oluşturacağı çevresel etkilere ve bu süre içindeki karbonatlaşma potansiyeline bakılır. Beton yapının servis ömrü sonunda (C) yıkılması, atıkların nakliyesi, işlenmesi, depolanması ve tasfiye edilmesi gibi süreçlerden kaynaklanan çevresel etkiler ve en sonunda ise tekrar kullanım (D) aşaması incelenir [13].



Şekil 2 - Hazır beton yaşam döngüsü aşamaları [13]

Hazır betonun yaşam döngüsü analizi genellikle üretim (A1-A3) aşaması ya da A1-A5 aşaması kapsamında incelenir. Özellikle hazır beton üreticisinin yaşam döngüsü analizinde karşısına çıkan en önemli sorun kendi sorumluluğu dışındaki süreçlerin verilerine kolay bir şekilde ulaşamamasıdır. Örneğin, beton bileşenlerinden kaynaklanan karbon ve su ayak izinin hazır beton üreticisi tarafından hesaplanması tahminden öteye geçememektedir. Bu nedenle çimento, agrega ve kimyasal katkı üreticilerinin bu verileri sağlaması gerekmektedir. Bu konuda son yıllarda az sayıda da olsa hesaplama yapılabilen platformlar ve uygulamalar kullanılmaya başlanmıştır.

Türkiye Hazır Beton Sektöründe Karbon Ayak İzi

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Tablo 1’de görüleceği üzere beş farklı dayanım sınıfına ait ortalama beton reçeteleri tespit edilmiştir. Bu verilerin ağırlıklı ortalaması ile de tek bir beton reçetesi temin edilmiştir [13].

Tablo 1 - Türkiye’de üretilen hazır betonların dayanım sınıfı bazında ortalama karışım içerikleri [13]

Basınç Dayanım Sınıfı	Ortalama Beton Reçetesi					
	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	Ağırlıklı Ortalama
Ort. Çimento Miktarı (kg/m ³)	263,8	288,1	321,1	355,3	382,8	290,5
Ort. Uçucu Kül Miktarı (kg/m ³)	18,8	23,6	28,2	23,7	24,5	22,7
Ort. Cüruf Miktarı (kg/m ³)	11,2	14,7	16,8	19,6	27,6	14,6
Ort. İri Agrega Miktarı (kg/m ³)	871,0	877,3	883,6	898,0	912,6	878,0
Ort. İnce Agrega Miktarı (kg/m ³)	1019,6	1003,1	957,1	918,9	901,6	995,5
Ort. Su Miktarı (kg/m ³)	166,9	163,1	160,9	159,1	157,4	163,6
Ort. Kimyasal Katkı Miktarı (kg/m ³)	3,3	4,0	4,5	5,1	5,4	4,0
Ort. Birim Ağırlık (kg/m ³)	2354,6	2374,0	2372,2	2379,7	2411,9	2368,8

Tablo 2 - Dayanım sınıfları bazında 1 m³ hazır betonun karbon ayak izi

		Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ eq.)					
		C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	Ağırlıklı Ortalama
A1-A3	Ham maddeler	285,17	308,96	339,57	370,16	396,43	310,47
A4-A5	İnşaat Süreci	29,93	30,73	31,61	32,63	33,58	30,75
B1	Kullanım	-7,00	-7,64	-8,52	-6,48	-6,98	-7,69
C1-C4	Servis Ömrü Sonu	36,65	36,88	36,86	36,95	37,32	36,82

Tablo 3 - CSC referans ve hedef değerler

Dayanım Sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Karbon ayak izi düşürme seviyeleri [net kgCO _{2e} / m ³]						
Referans	213	237	261	286	312	325
Seviye 1 (≥%30)	149	166	183	200	218	228
Seviye 2 (≥%40)	128	142	157	172	187	195
Seviye 3 (≥%50)	107	119	131	143	156	163
Seviye 4 (≥%60)	85	95	104	114	125	130

THBB tarafından yapılan çalışma kapsamında Türkiye’de üretilen hazır betonun dayanım sınıfı bazında karbon ayak izi Tablo 2’de belirtilmektedir. Beşikten kapıya (A1-A3) süreç dikkate alındığında 1 m³ hazır betonun karbon ayak izi yaklaşık 310 kg’dır [13].

Tablo 3’te ise Beton Sürdürülebilirlik Konseyi’nin (CSC) sertifikalandırma sürecinde kullandığı farklı basınç dayanım sınıflarına ait karbon ayak izi seviyeleri görülmektedir [14].

C30/37 sınıfına ait referans karbon ayak izi 261 kg’dır. Oysa bu değer ülkemizde 309 kg’dır. Bu farkın ana nedeni Türkiye’de özellikle AB ülkelerine oranla daha az mineral katkı ve düşük klinkerli (katkılı) çimento kullanımıdır. Tablo 4’te Türkiye’de ve CEMBUREAU üyesi ülkelerdeki çimento cinsine göre kullanım oranları belirtilmiştir. CEM I alternatifi olan düşük karbonlu CEM II çimentoları karbon ayak izi açısından oldukça avantajlıdır. Bu açıdan Türk çimento sektöründe mevcut karbon ayak izini düşürmek için ciddi bir fırsat olduğu söylenebilir.

Tablo 4 - Türkiye ve CEMBUREAU üyesi ülkelerde çimento cinsine göre kullanım oranları [15, 16]

Çimento Cinsi	Türkiye	CEMBUREAU
CEM I	%59	%39
CEM II	%28	%46
CEM III	%1	%9
CEM IV	%9	%5
CEM V	%2	%1

SÜRDÜRÜLEBİLİR HAZIR BETON ÜRETİMİ

Çimento üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonu, betonun sürdürülebilirliği kapsamında üzerinde durulması gereken en önemli husustur. Eğer çimento üretiminde ağırlıklı olarak fosil yakıt kullanılmışsa ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmadıysa genel olarak 1 ton klinker üretimi sonucu yaklaşık 1 ton CO₂ emisyonu açığa çıkmaktadır.

Küresel karbon ayak izini düşürmek için çimento üreticileri kömür ve petrokok gibi fosil yakıtlar yerine kalorifik değeri yakın ya da denk alternatif yakıtlar ve atıklar kullanmakta, ayrıca klinker oranını azaltıp ikincil bağlayıcı malzemeler (mineral katkılar) kullanarak katkıli çimentolar üretmektedir, ancak çimento çok geniş bir alana yayılmış uygulamalara yönelik olan, farklı müşteri gruplarına arz edilen ve belirli standartları sağlamak zorunda olan bir üründür. Bu nedenle yapılacak iyileştirmeler de belirli limitler dâhilinde olabilmektedir. Son yıllarda gündemde olan; ancak henüz tam olarak genel bir uygulama aşamasına geçmeyen karbon yakalama, depolama ve kullanma teknolojisi bu sorunun çözülmesinde çok daha etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Yine de bunun için bir süre daha beklenmesi gerekecektir. Öte yandan beton, performans kriterleri önceden tasarlanmış nihai bir üründür ve uygulamalara bağlı olarak sürdürülebilirlik performansı iyileştirilebilmektedir.

Daha Az Çimento Kullanımı

Çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12’sini temsil eder; ancak betondaki gömülü karbonun %90’ını oluşturur [13]. Büyük resme baktığımızda ise çimento üretiminin küresel karbondioksit emisyonlarının %8’inden sorumlu olduğu görülmektedir [8]. Çimento üretiminde oluşan karbon emisyonu azaltıldıktan sonra, birim beton hacmi başına kullanılan çimento miktarı azaltılarak

ilave karbon indirgeme işlemi yapılabilir. Çimento miktarını azaltmak için en etkili yöntemlerden birisi çevresel etkisi daha düşük olan tamamlayıcı malzemeler diğer bir ifade ile mineral katkıları kullanmaktır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bu anlamda en çok bilinen malzemelerdir. Bu malzemeler kendilerini birçok yönden ispat etmiş ve standartlarda yer almıştır.

Mineral katkıların üretici ve tüketici tarafından tercih edilmelerini etkileyen üç ana husus bulunmaktadır:

1. Maliyete etkisi: Konu çevre de olsa sürdürülebilirliğin üç saçı ayağından birisi de ekonomidir. Hem üretici hem de tüketici mevcut bir ürünün maliyetinin artmasını tercih etmez. Mineral katkıları genel olarak çimentodan daha düşük fiyatlıdır. Eş miktarda çimento azaltılmasalar bile genel olarak birim maliyeti yükseltmezler. Nakliye önemli bir maliyet kaynağı oluşturduğu için üreticiler yakın kaynakları tercih ederler. Bu da bazen bu ürünlerin kullanımını olumsuz etkilemektedir.
2. Ürün performansına etkisi: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi standartlarda yer alan ve teknik performansları ispat edilmiş mineral katkıları bazı projelerde neredeyse zorunlu olarak kullanılmaktadır. Özellikle sadece çimento ile üretilen betonların karşılayamayacağı bazı dürabilite (dayanıklılık) koşullarını karşılamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bunun dışında betonda plastik rötrenin (yüzeysel çatlak oluşumu) azaltılması, taze beton sıcaklığının düşürülmesi, pompalanabilirliğinin artırılması ve dayanım gelişiminin normalleştirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.
3. Çevresel performans: Betondaki karbon ayak izini düşürmeleri ve atık miktarının azaltılması başlıca faydalarıdır. Özellikle yeşil bina projelerinde malzeme kategorisinde avantaj sunmaktadırlar.

Hem üretici hem de tüketici açısından faydası olan bu ürünlerin kullanımında bazı engeller de mevcuttur. Bunlar:

- Kaynaklar sınırlıdır.
- Kaynaklar üretim sahasına uzak olabilmektedir.
- Kullanım miktarları sınırlıdır.
- Bazı kaynaklar stabil ürün sağlayamamaktadır.
- Bazı malzemelere karşı ön yargılar mevcuttur.
- Uçucu kül temin edilen termik santrallerin sayısının giderek azalması beklenmektedir.
- Demir-çelik üretiminde ham madde olarak hurda kullanım oranı giderek artmaktadır.
- Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelere yurt dışından talepler artmaktadır.

Bu engelleri azaltmak ve önüne geçmek için yapılması gerekenler:

- Üreticiler nakliye açısından kendilerine avantaj sağlayacak mineral katkıları araştırmalıdır. Volkanik kül, volkanik cüruf, kalker tozu, kalsine edilmiş kil vb. alternatif malzemeler de göz önünde bulundurulmalıdır.
- Reçete optimizasyonu ile farklı beton sınıfları ve müşteri talepleri doğrultusunda çeşitli beton karışımları çalışılmalıdır.
- Müşterilere ve denetçilere mineral katkıların avantajları standartlar çerçevesinde ve akademik çalışmalarla anlatılmalıdır.
- Kaynakların stabil olması için üretici ile temasa geçip gerekli iyileştirmelerin yapılması ve herhangi bir değişiklik durumunda hızlı bir şekilde bilgi alınması sağlanmalıdır.

- Mineral katkıların çimento çeşitleri ve kimyasal katkıları ile uyumu araştırılmalı ve gerekli testler yapılmalıdır.
- Yüksek fırın cürufu gibi erken dayanımdan ziyade geç dayanıma etkisi olumlu olan mineral katkı kullanımı durumunda 28 günden ziyade 56 gün veya daha ileri yaş dayanımları dikkate alınmalıdır.

Çimento miktarını standartlar kapsamında kabul edilebilir seviyede azaltmak için alınabilecek diğer aksiyonlar ise:

- Standartlar açısından kullanılabilir nitelikte olsa dahi zayıf, kirli, yassı özelliklerde agrega kullanılmamalıdır.
- Metilen mavisi değeri yüksek olan (dayanımı olumsuz etkileyen kil vb. istenmeyen içerik) ince malzeme kullanımından olabildiğince sakınılmalıdır.
- Performans açısından daha yüksek nitelikte su azaltıcı katkıları tercih edilmelidir.
- Yüksek dayanım sınıflarında küp yerine silindir numune ile kalite kontrol süreçlerinin takip edilmesi sağlanmalıdır. (Bu konuda sadece üretici değil denetçi makamların da birlikte çalışması gerekmektedir.)
- Malzemelerin uyumluluğu araştırılmalıdır. Kimyasal katkı – çimento, çimento – mineral katkı uyumu bu anlamda öne çıkmaktadır.
- Beton bileşenlerinin olabildiğince stabil olması ve üretim süreçlerinin de uygun olması ile standart sapmanın düşük değerlerde kalması sağlanmalıdır.
- Agrega gradasyonu optimize edilmelidir. Pompalanabilirlik olumsuz etkilenmeyecek şekilde maksimum doluluk sağlanmalıdır.

Betonu akılcıca kullanmayı öğrendikten sonra, betondaki çimento miktarını da düşürmenin yolları keşfedilmelidir. Sıklıkla, gereksinimleri karşılamak için gerekenden daha fazla çimento kullanılabilmektedir. Bunun nedeni geleneksel bakış açısı, hızlı dayanım kazanma isteği ve karbona odaklı tasarım bilinçsizliğinden kaynaklanmaktadır. İngiltere’de 90 farklı beton karışımı ile yapılan bir çalışmada, aynı beton sınıfından kullanılan çimento miktarının 300 kg/m³ ile 525 kg/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir [17]. Daha fazla çimento kullanmanın çok farklı teknik nedenleri olabilir, ancak bu denli bir varyasyonu açıklamaya yetmeyecektir. Çimento dozajının performansı sağlamak nedeniyle artmasının başlıca nedenleri aşağı belirtilmiştir:

- Yanlış veya yetersiz beton tasarımı
- Kirli ince ya da iri agrega kullanımı
- Hatalı agrega gradasyonu
- Yanlış kimyasal katkı seçimi
- Karıştırma ekipmanlarından kaynaklı kusurlar
- Malzemelerin yoğunluklarının yanlış hesaplanması
- Betonun dayanım testindeki hatalar

Yakın Tedarik Kaynaklarının Tercih Edilmesi

Beton hem üretimi hem de ham maddelerin tedariki açısından yerel bir malzemedir. Yine de bu konuda yapılacak iyileşmelerin etkisi oldukça büyük olacaktır. Betonda ağırlıkça en fazla kullanılan malzeme agregadır. 1 m³ beton üretmek için yaklaşık 2 ton iri ve ince agrega kullanılır.

Agregadan sonra ise çimento gelmektedir. Bu nedenle başta agrega ve çimentonun, üretim tesisine olabildiğince yakın yerlerden tedarik edilmesi nakliye nedeniyle oluşacak karbon emisyonunu azaltacaktır. Ancak, bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Yakın bir kaynağa göre daha uzakta olan bir kaynaktan tedarik edilen agrega ya da çimentonun beton karışımında sağlayacağı avantaj daha yüksek olabilir. Bu yüzden konuya daha geniş bir çerçeveden bakmak faydalı olacaktır. Beton üretimiyle ilgili en büyük CO₂ emisyon kaynaklarından biri şantiyeye ulaşım ve betonu ihtiyaç duyulan yere pompalamak için gereken enerjidir. 2050 yılına kadar tüm taşımacılığın elektrik, hidrojen veya her ikisinin bir kombinasyonu ile sıfır emisyonlu araçlar tarafından gerçekleştirileceği varsayılmaktadır.

Reçete Optimizasyonu ve Dijitalleşme

Erken dayanım ihtiyacı için mineral katkı içeriği daha düşük olan karışımlar, erken dayanım ihtiyacı olmayan yapı elemanları için ise daha yüksek oranlarda mineral katkı kullanılabilir. Bunun için de yüksek erken mukavemete ihtiyaç duymayan bina bileşenleri tanımlanmalıdır.

Agregaların sürekli dağılımı ile beton formülasyonunun optimizasyonu, granüler iskeletin nihai gözenekliliğini azaltır. Agregaların dolduramadığı bu boşlukları çimento hamuru (pastası) doldurur. Bu nedenle, granüler kaplamanın optimize edilmesi, belirli bir basınç dayanımı [18] için gerekli olan çimento miktarını azaltır. Standartlar çok daha azına izin verse de hazır beton üretiminde ortalama 300 kg/m³ çimento kullanılmaktadır [19]. Bu çimentonun bir kısmını ince dolgu maddeleri ile ikame etmek ve işlenebilirlik nedeniyle benzer hacimde hamur fazı tutmak mümkündür.

Karışımı optimize etmede zorluk yaratan ikinci neden kaliteli agrega teminidir. Agregalar da yerel malzemelerdir. Bu nedenle, yerel taş ocağı iyi bir agrega çeşitliliği sağlayamazsa, optimize edilmiş bir granüler iskelet tasarlamak mümkün olmayabilir ve gerekli dayanım ve işlenebilirlik performansını elde etmek için daha fazla çimento gerekebilir. Agrega kalitesi ve gradasyonu çimento dozajının azaltılmasında oldukça etkili yöntemler olarak öne çıkmaktadır.

Dijitalleşme, betondan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bina bilgi modellemesi (BIM) sayesinde yapıların hem üretim hem işletme hem de kullanım sonrası aşamalarındaki çevresel performansları daha proje başlamadan hesaplanabilmekte ve yapıların yaşam döngüsü analizi dijital ortamda simüle edilebilmektedir. Dijitalleşme ayrıca betonun nakliye sırasında izlenmesine ve doğru şekilde dökülmesine yardımcı olmaktadır. Çimento ve betona ilişkin veriler, karbon ayak izinin belirlenmesini sağlamak ve ayrıca inşaatta kullanılan malzemelerin kaynağını göstermek ve binaların kullanım ömrü boyunca enerji performansını izlemek için müteahhit ve bina kullanıcılarının kullanımına sunulmaktadır. Dijitalleşme ayrıca beton performansının tahmin edilmesine, agrega performansının belirlenmesine ve katkı maddelerinin optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir [20].

28 Gün Yerine Daha İleri Yaş Dayanımlarına Bakılması

Hem ASTM hem de EN standartlarında 28 günlük dayanım zorunlu bir parametre değildir. Üretici, kullanıcı ve denetçi arasında önceden alınacak bir kararla 56 veya 90 günlük dayanımlar dikkate alınabilir. Yani 28 günde beton dayanımının standart limitini sağlamasından ziyade ileri yaşlarda sağlaması tercih edilebilir. Bu sayede özellikle sıcak havalarda daha yüksek miktarda mineral katkı kullanımının önü açılabilir.

Tasarım varsayımlarıyla ilgili bir diğer nokta, beton dayanımını değerlendirirken betonun yaşının önemidir. Beton dayanımı genellikle 28 günde test edilir. Bu, yalnızca Portland çimentosundan yapılmış betonun mukavemetinin genellikle nihai mukavemetine ulaştığı tipik zamandır. Betonda mineral katkıları kullanıldığında, mineral katkıların reaktifliği Portland çimentosu klinkerinden

daha yavaş olduğu için dayanım gelişimi de daha yavaştır. Özellikle, yüksek miktarda mineral katkı içeren beton daha uzun bir kürleme süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu sürenin sonunda sadece Portland çimentosundan yapılmış betona benzer bir dayanım performansına sahip olunmaktadır [21, 22]. Bu nedenle, beton dayanımının 28 günden sonra, örneğin 56 günde değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır.

Karbon Ayak İzi Düşük Çimento ve Bağlayıcıların Kullanımı

THBB tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Türkiye’de hazır beton üreticilerinin kullandığı çimento cinslerinin kullanım oranları tespit edilmiştir [13]. Hazır beton sektörü tarafından %67 oranında CEM I 42.5, %21,4 oranında CEM II/A 42.5, %6,5 oranında CEM II/B 42.5 ve %5,1 oranında diğer çimento cinsleri kullanılmaktadır.

Betonda hatta betonarmede en yüksek gömülü karbona sahip bileşen çimentodur. Bu nedenle hem üretici hem de tüketici daha düşük karbon ayak izi olan çimentoları tercih etmelidir. Ancak, buna karar vermek için farklı kaynaklara ait ürünlerin kıyaslanması gerekir. Bu konuda en güvenilir referans EPD (çevresel ürün beyanı) belgeleridir. Ülkemizde EPD belgeli çimento neredeyse yoktur. Birkaç firmanın dönemsel olarak aldığı belgeler mevcuttur. Ülkemizde EPD belgeli hazır beton bu bildirinin yazıldığı tarih itibarıyla yoktur. Sadece bazı firmaların kendi deklarasyonları mevcuttur.

Bunun dışında en etkili yöntem ise klinker oranı düşük çimento kullanımını tercih etmektir. Ülkemizde genel olarak en çok üretilen ve tüketilen çimento cinsi %55’lik oranla CEM I 42.5 R çimentosudur [15]. Oysa AB ülkelerinde en fazla CEM II/A tipi çimento tercih edilmektedir. Bu çimento ortalama %10 daha az klinker içermektedir [16].

Alternatif çimentolar bir anlamda çimento dünyasındaki paradigma değişikliğini temsil ederken, gelecekteki çimentonun nasıl olması gerektiğine dair çalışmaların bir sonucudur. Her ne kadar bazı alternatif çimentoların literatüre girişi 50-60 yıl öncesine dayansa da son yıllarda bu çimentolar (bağlayıcılar) özellikle karbon emisyonu açısından faydaları ile öne çıkmış ve daha fazla araştırmaya konu olmuştur. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

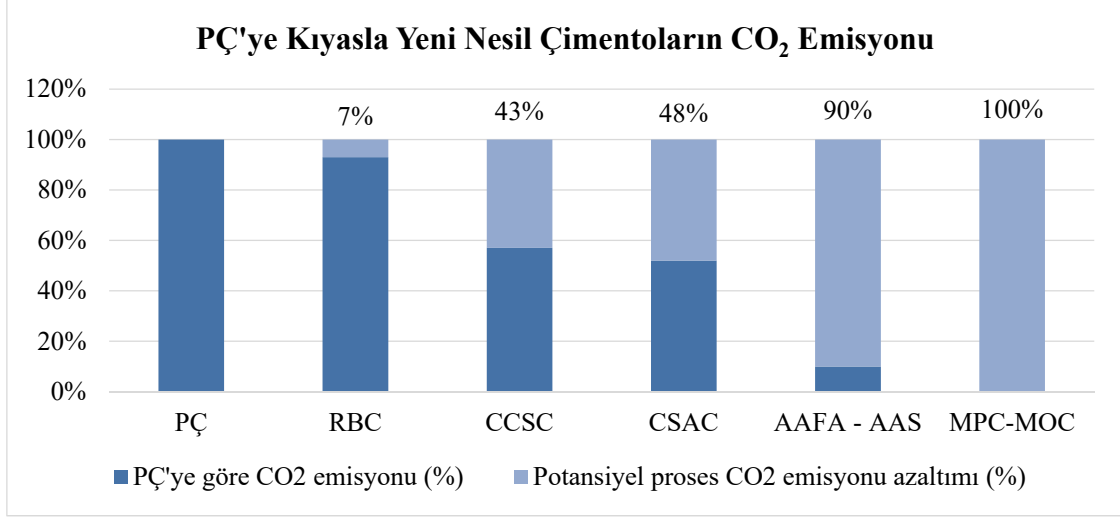
- AAFA: Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül / Alkali activated fly ash
- AAS: Alkali ile aktive edilmiş cüruf / Alkali activated slag
- CCSC: Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu / Carbonated calcium silicate cement
- CSAC: Kalsiyum sülfat alüminat çimentosu / Calcium sulfoaluminate cement
- MOC: Magnezyum oksiklorür çimentosu / Magnesium oxychloride cement
- MPC: Magnezyum fosfat çimentosu / Magnesium phosphate cement
- PÇ: Portland çimentosu
- RBC: Reaktif belit çimentosu / Reactive belite cement

Şekil 3’te Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla alternatif çimentoların karbon emisyonları görülmektedir.

Projelerde Daha Yüksek Dayanımlı Beton Tercih Edilmesi

Tablo 1’de belirtildiği gibi daha yüksek dayanım sınıfında beton elde etmek için genel olarak çimento, daha doğru bir tabir ile bağlayıcı malzeme miktarının artması gerekmektedir. Bu karbon açısından olumsuz gibi gözükse de gerçekte kesinliği yoktur. Beton dayanımının artması

sonucunda taşıyıcı elemanlarının ebadı ve çelik donatı miktarı azalabilmektedir. Bu nedenle toplam fayda hesaplamasında bu unsurlar da dikkate alınmalıdır.



Şekil 3 - Portland çimentosuna kıyasla alternatif çimentoların CO₂ emisyonu

Çevresel Etki Sınıfları

Genel olarak bir proje üzerinde çalışan mühendisler ve tasarımcılar genellikle tek bir çevresel etki sınıfı belirlemekte ve bu sınıf da en baskın etkiye ait olmaktadır. Ancak bir ev için dış beton ve iç beton aynı kısıtlamalara tabi değildir. Örnek olarak, bir ev XC1 C25/30 çevresel etki sınıfının yeterli olacağı iç mekân betonu ile XC4 C35/45'ten oluşabilen dış hava koşullarına maruz kalan beton arasında bir ayırmayla inşa edilirse önemli miktarda karbon tasarrufu yapılabilmektedir.

Yapısal Tasarım Optimizasyonu

Özellikle döşemeler yapıya en fazla yük getiren elemanlar olarak öne çıkmaktadır. Gerekli dayanım şartlarını sağlayan hafif beton kullanımı ile yapının maruz kaldığı yük hafifleyecek ve bu sayede daha az taşıyıcı elemana veya daha düşük kesitli elemanlara ihtiyaç duyulacaktır.

Yapısal optimizasyon, aynı yük taşıma kapasitesini daha az malzeme ile gerçekleştirme imkânı sağlar. Yüksek teknolojik hazırlık düzeyine sahip örnekler, öngörülen boşluklu döşemeler veya boşluklu döşemelerdir. Bu sistemlerin uygulanması, orijinal beton hacminin %35'ine kadar tasarruf edilmesini sağlayabilmektedir [23]. Yalnızca gerekli yükü taşımak için gerektiği kadar malzeme kullanan optimize edilmiş (organik) şekiller konusunda yeni gelişmeler beklenmektedir [23]. Paslanmayan donatı kullanımı, beton kaplamanın en aza indirilmesine izin verdiği için beton hacimlerini azaltabilen başka bir teknolojidir.

Betonarme bir yapının inşa edilme şekli, ortaya çıkan CO₂ emisyonları üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir. Kalıbın içine pompalanan beton genellikle daha yüksek bir bağlayıcı içeriğine ihtiyaç duyar ve bu nedenle pompalanmadan dökülen betona kıyasla daha yüksek bir CO₂ ayak izine neden olur [24].

Prefabrikasyon gibi daha sanayileşmiş bir süreç, fabrikada daha yüksek hassasiyet ve daha az atık yoluyla daha düşük malzeme talebine yol açabilir. Prensip olarak, modüler bir üretim, inşaatla daha yüksek bir verimlilik sağlar. Bununla birlikte, özellikle büyük boyutlu elemanlar için nakliye

mesafeleri kırsal alanlarda prekast betonu, ekonomik olarak zorlaştırabilir. Eklemeli (3 boyutlu) imalat ve yeni kalıp teknolojileri, malzeme açısından verimli şekiller sağlayabilir [25, 26].

Cambridge Üniversitesi tarafından hazırlanan bir raporda, yapısal elemanların tüm güvenlik faktörleri uygulandıktan sonra tipik olarak kapasitelerinin yalnızca %60-80'ini kullanmak üzere tasarlandığı vurgulanmıştır [27]. Malzemenin performansındaki belirsizlik, beton elemanları ile ilgili olarak bu aşırı tasarımın belki de temel bir nedenidir. Örneklem tutarlılığı, agrega performans varyasyonları, ortam sıcaklığı, operatör etkisi ve ek belirsizlikler göz önüne alındığında, tasarımcıların neden çok dikkatli davrandığı daha iyi anlaşılmaktadır. Bu nedenle; betonun davranışının gerçek zamanlı olarak daha iyi anlaşılması, kalite güvencesinin geliştirilmesine ve aşırı tasarımın en aza indirilmesine yardımcı olabilir.

Geometri kullanılarak, daha fazla betonun basınç bölgesinde kalması için kalıpları ayarlamak mümkündür. Karmaşık kalıplar gerektiren betonarme yapılar, işçilik maliyetleri ve operasyonel zorluklar nedeniyle tercih edilmemektedir. Ancak bu sorunlar, günümüzdeki bilgisayar programlarının gücü ve gelişmiş dijital üretim teknikleri ile çözülebilmektedir. ETH Zürih'teki araştırmacılar, gereksiz beton kullanımını önlemek için yenilikçi kalıp teknikleri kullanarak yalnızca basınç dayalı yapıların oluşturulması için hesaplama tasarımının nasıl uygulanacağı üzerinde çalışmaktadır. Bu, görsel olarak çarpıcı ve aynı zamanda malzeme açısından verimli yapılara neden olabilecektir [17].

Geri Kazanılmış Agreganın Kullanımı

Kentsel çevrede en yaygın malzemeler inşaat malzemeleridir. Ömrünü tamamlayan yapıların yıkılması ile açığa çıkan atıkların çoğu geri dönüştürülebilir, ancak bunların çoğu aşağı geri dönüştürülür (downcycle) yani malzeme değer kaybeder ve genelde ait oldukları sektör dışında kullanılır. Beton atıkları yol dolgularında kullanılabilir, ancak nadiren yeni binalar için bir ham madde olarak değerlendirilir. Aslında bu milyonlarca ton malzemeyi yeni inşaat projeleri için yeniden kullanmanın birçok avantajı vardır. Malzemeler zaten şehirlerde yer almaktadır. Bu nedenle uzun tedarik zincirlerine gerek kalmaz. Döngüsel ekonomi stratejisine sahip tüm şehirler için kent madenciliği, bu malzemelerden mümkün olduğu kadar uzun süre boyunca değer elde edebilir.

Geri kazanılmış agregaya içeren betonun özellikleri hem agreganın türünden hem de karışımdaki oranından güçlü bir şekilde etkilenir. Geri kazanılmış agreganın ikamesi, su emilimini artırarak betonun dayanıklılığını azaltabilir ve dolayısıyla işlenebilirliği korumak için süperakışkanlaştırıcıyı ve su dozajını artırabilir [28]. Sonuç olarak, geri kazanılmış agreganın kullanımı çimento talebini 20-40 kg/m³ artırabilmektedir [29]. Buna karşılık iyi kalitede geri dönüştürülmüş yerel agregalar, nakliye tasarrufları da dahil olmak üzere genel olarak karbon tasarrufu sağlayabilir. Ancak, kullanımlarını doğal agregalarla karşılaştırmak için ayrıntılı bir sürdürülebilirlik ve karbon değerlendirmesi yapılması gerekmektedir.

Beton atığı hem agregaya hem de çimento pastası içermektedir. Çimento pastasının geri kazanılması da son derece etkilidir. Bu ince malzeme, kalsiyum kaynağı olarak klinker üretimi için bir ham madde olarak etkin şekilde kullanılabilir. Bu sayede proses kaynaklı emisyonlar düşürülebilmektedir [30].

Ülkemizde mevcut durumda inşaat ve yıkıntı atıklarına yönelik seçici yıkım mevzuatı kapsamında bir koşul olarak belirtiliyor olsa da pratikte uygulanmamaktadır. İnşaat ve yıkıntı atıkları genel olarak atık sahalarında depolanmakta ve çok az sayıda geri kazanım tesisinde geri dönüşüme tabi tutulmaktadır. Buradan elde edilen geri kazanılmış agregalar ise alt temel dolgu olarak değerlendirilmektedir.

SONUÇ

Sürdürülebilirlik ve özellikle döngüsel ekonomi açısından hazır beton sektörü birçok potansiyele sahiptir. İklim değişikliği ile mücadelenin ülkelerin ve şirketlerin ajandalarında giderek en önemli madde olarak öne çıkması ve 1,5°C senaryosunun küresel bir hedef haline gelmesi bu potansiyeli daha da görünür hale getirmiştir. Hazır beton sektörünün daha sürdürülebilir bir iş modeline geçmesi sadece üreticilerin değil; politika yapımcıların, müşterilerin, şartname ve standart hazırlayıcıların, tedarikçilerin ve hatta tüm paydaşların birlikte hayata geçirebileceği kolektif bir süreçtir.

Kaynaklar

1. Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, 100 Maddede Sürdürülebilirlik Rehberi, Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, 2017.
2. Gagg, C. R., “Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis,” *Engineering Failure Analysis* 40 (May 2014): 114–40.
3. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>, Erisim tarihi (10.07.2022)
4. <https://www.thbb.org/sector/istatistikler/>, Erisim tarihi (10.07.2022)
5. https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf, Erisim tarihi (10.07.2022)
6. Larson, W., Came, F., “Concrete as a Carbon Sink. Rethinking Carbon Sequestration in the Built Environment,” Building Resilience Coalition, 2018.
7. Guo, R., Wang, J., Bing, L., Tong, D., Ciais, P., Davis, S. J., Andrew, R. M., Xi, F., and Liu, Z., “Global CO₂ Uptake By Cement From 1930 to 2019,” *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 1791–1805, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1791-2021>, 2021.
8. Lehne, J., and Preston, F., Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs, 2018.
9. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>, Erisim tarihi (10.07.2022)
10. <https://spot.ul.com/blog/embodyed-vs-operational-carbon/>, Erisim tarihi (10.07.2022)
11. Lewis, M., Huang, M., Waldman, B., Carlisle, S., and Simonen, K., Environmental Product Declaration Requirements in Procurement Policies, Carbon Leadership Forum, University of Washington. Seattle, WA. 2021.
12. International Energy Agency, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA, 2018.
13. Türkiye Hazır Beton Birliği, Hazır Beton Yaşam Döngüsü Rehberi, 2021.
14. Mission Impossible Partnership, Low-Carbon Concrete and Construction: A Review Of Green Public Procurement Programmes, 2022.
15. Türk Çimento, 2011-2020 İstatistik Kitabı, Türk Çimento Yayınları, 2021.
16. Türk Çimento, Katkılı Çimentolar EN 197-1 ve EN 197-5 Standartları ve Belgelendirmesi Semineri, <https://www.youtube.com/watch?v=ZPzCak1Nf0w>, Erisim tarihi (10.07.2022)
17. <https://industry europe.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>, Erisim tarihi (10.07.2022)

18. Müller, H.S, Haist, M., Vogel, M., “Assessment of The Sustainability Potential of Concrete and Concrete Structures Considering Their Environmental Impact, Performance and Lifetime,” *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 321–337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039.
19. Müller, C., “Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1,” *HBRC J.* 8 (2012) 1–7. doi:10.1016/j.hbrcj.2012.08.001.
20. Cembureau, Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.
21. Khokkar, M., Rozière, E., Turcry, Ph., Grondin, F., Loukili, A., “Mix Design of Concrete With High Content of Mineral Additions: Optimisation to Improve Early Age Strength,” *Cement and Concrete Composites*, 32(5), 2010.
22. Toutanjia, H., Delatte, N.; Aggoun, S., Duval, R.; Danson, A., “Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability of Short-Term Cured Concrete,” *Cement and Concrete Research*, 34, 2004.
23. VDZ, Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector, Verein Deutscher Zementwerke, 2021.
24. Abebe, J., Lohaus, L., “Effects of The Composition and Amount of Paste on The Pumpability and Pump-Stability of Flowable Concretes,” XXII Nordic Concrete Research Symposium, Reykjavik, Iceland, Jan 2014, Publication No. 50-2/2014.
25. Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M., “Additive Manufacturing Technology and Its Implementation in Construction as an Eco-Innovative Solution,” *Automation in Construction*, 93, 2018.
26. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., “Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges,” *Composites Part B: Engineering*, 143, 2018.
27. Minimising Energy in Construction (MEICON) Survey Report, University of Cambridge, 2018. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/287863>, Erişim tarihi (14.07.2022)
28. Robalo, K., Costa, H., Carmo, R., Júlio, E., “Experimental Development of Low Cement Content and Recycled Construction and Demolition Waste Aggregates Concrete,” *Construction and Building Materials*, Volume 273, 2021.
29. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, HJ., “Comparative LCA of Recycled and Conventional Concrete For Structural Applications,” *Int J Life Cycle Assess* 18, 909–918, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>
30. Pellegrino, C., Faleschini, F., “Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art. In: Sustainability Improvements in the Concrete Industry,” *Green Energy and Technology*. Springer, Cham, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2.

Alkanolamin Türlerinin Portland Uçucu Küllü Çimentoların Priz Süresi ve Dayanım Gelişimine Etkileri

Berna Orhon KOLUKISA¹, Bimen KADİROĞLU², Mert Yücel YARDIMCI³

ÖZET

Bu çalışmada Portland çimentosu üretiminde öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılan alkanolaminlerden trietanolamin (TEA), triisopropanolamin (TIPA) ve dietanolisopropanolamin (DEIPA) türlerinin Portland uçucu küllü çimentoların priz süresi ve basınç dayanımı gelişimine etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %65 Portland çimentosu klinkeri, %5 alçıtaşı ve %30 silissi uçucu kül kullanılarak üretilen bir Portland uçucu küllü çimentonun priz başlangıç ve bitiş süreleri ile 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları katkısız ve 250, 500 ve 1000 ppm TEA, TIPA ve DEIPA katkılı karışımlarda belirlenmiştir. Deney sonuçları %30 uçucu kül içeren Portland çimentolarının priz süreleri ve dayanım gelişimlerinin kullanılan alkanolamin türü ve dozajından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Alkanolaminlerin çalışmada kullanılan Portland uçucu küllü çimentonun 2 günlük dayanımlarını geliştirirken 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarında önemli bir gelişme sağlamadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Portland uçucu küllü çimento, alkanolamin, TEA, TIPA, DEIPA.

ABSTRACT

Effects of Alkanolamine Types on Setting Time and Strength Development of Portland – Fly Ash Cements

The effects of triethanolamine (TEA), triisopropanolamine (TIPA), and diethanolisopropanolamine (DEIPA), which are alkanolamine types used as grinding aids in cement production, on setting time and compressive strength development of Portland - fly ash cements were investigated in this study. Initial and final setting times and 2, 28, and 56-day compressive strengths of a Portland-fly ash cement, which is a blend of 65% Portland cement clinker, 30% siliceous fly ash, and 5% gypsum, were determined on the blank and 250, 500 and 1000 ppm TEA, TIPA and DEIPA added mixtures. The experiments showed that the setting times and compressive strength developments of Portland cements containing 30% fly ash were significantly influenced

1 Kentçim Çimento A.Ş., Manisa - berna.kolukisa@kentcim.com.tr

2 Lyksor Kimya A.Ş., İzmir - bimen.kadiroglu@lyksor.com

3 İstanbul Okan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - mert.yardimci@okan.edu.tr

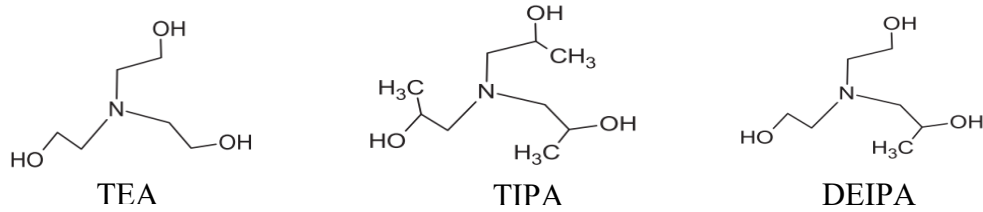
by the alkanolamine type and dosage. It was found that the alkanolamines enhanced the 2-day compressive strength of Portland – fly ash cement but did not improve the 28 and 56-day compressive strength.

Keywords: Portland-fly ash cement, alkanolamine, TEA, TIPA, DEIPA.

GİRİŞ

Portland çimentosu klinkerinin uçucu kül ile birlikte öğütülmesi veya Portland çimentosuna sonradan eklenerek homojen karıştırılması ile elde edilen katkılı çimentolar hem daha düşük maliyetli çimento üretimini sağlamakta hem de CO₂ emisyonunu düşürerek çevresel zararların azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Öte yandan, uçucu külün betonun kalıcılığını artırması diğer bir avantaj olarak Portland uçucu küllü çimentoların önemini arttıran diğer bir özelliktir. Ancak, Portland çimentosu-uçucu kül karışımlarının uçucu külün yavaş gelişen puzzolanik reaksiyonu nedeniyle erken dayanımının genellikle düşük olması bu karışımların erken dayanımının artırılması yönündeki araştırmalara ilgiyi arttırmıştır. Uçucu kül katkılı çimentoların erken dayanımının, uzun dönemli durabilite performansında azalma olmadan, katkısız çimentolar seviyesine getirilmesi, bu çimentoları daha ince üreterek kısmen başarılmakla birlikte (1), alkali sülfatlar ve alkanolaminler gibi kimyasallarla uçucu kül aktivitesinin artırılması yöntemleri de bulunmaktadır (2-4).

Alkanolaminler temel olarak çimento klinkeri öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılan kimyasal katkılardır (5,6). Alkanolamin bir terim olarak alkan (veya parafin) bir ana zincirde hidroksil ve amino fonksiyonel grupları içeren kimyasal bileşiklerin geniş bir ailesini kapsar. Öğütme kolaylaştırıcı kimyasal katkı olarak kullanılan tipik etanolaminler Şekil 1’de şematik olarak gösterilen kimyasal yapıdadırlar.



Şekil 1 - Değişik türde alkanolaminlerin şematik moleküler yapısı (5)

TEA kullanım dozajına göre priz hızlandırıcı ve priz geciktirici etkiler gösterebilen bir kimyasal katkıdır ve genellikle doğrudan kullanımdan daha çok, diğer bazı kimyasal katkıların üretiminde bir bileşen olarak kullanılır. TEA kimyasal katkı formülasyonlarında, özellikle düşük C₃A içerikli çimentolarda yüksek dozajda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı sonunda meydana gelebilecek priz süresi uzamalarının kontrolü için, priz hızlandırıcı bileşen olarak kullanılır. TEA’nin Portland çimentosu sistemlerinin priz süresi üzerine etkileri dozaja göre değişiklik göstermektedir. TEA’nin 200 ppm gibi düşük dozajlarda priz hızlandırdığı, 500 ppm gibi dozajlarda prizi yavaşlattığı ve 1000 ppm gibi dozajlarda ise prizi çok daha fazla hızlandırdığı belirtilmektedir (3). TEA’nin varlığında C₃A ile alçıtaşının arasındaki reaksiyonlar, etrenjit oluşumu ve bunu takiben etrenjitin monosülfata dönüşümü de hızlanır (7, 8, 19). TEA’nin C₃A ve C₃S’in çözünmesini erken yaşlarda hızlandırarak etrenjit, kalsiyum hidroksit (portlandit) ve C-S-H oluşumunu katkısız çimento hamuruna göre geliştirerek erken dayanımı geliştirdiği düşünülmektedir (8, 9). TEA’nin özellikle yüksek dozajlarda C₃S’in hidratasyonunu geciktirdiği ve kısmi hidratasyonuna neden olduğu belirtilmektedir (19). Erken dayanım TEA kullanımı ile gelişirken ileri yaş dayanımlarında beklenen gelişmenin olmaması TEA’dan kaynaklanan amin moleküllerinin C₃S yüzeyinde kalın bir tabaka oluşturarak çözünme ve difüzyonu önlemeleri (16)

ve oluşumu TEA tarafından hızlandırılan etrenjit ile TEA'nin komplekslerinin C_3A 'nin reaksiyonlarını önlemeleri (17) olarak gösterilmektedir. TEA'nin uçucu külden Al, Ca ve Fe çözünmesini arttırması nedeniyle uçucu kül-Portland çimentosu sistemlerinin erken dayanımını arttırdığı rapor edilmiştir (10). Ancak hidratasyonun ileriki aşamalarında TEA'nin portlandit yüzeylerine yapışarak birikmesi ve kısmen kalsiyum hidroksit tarafından emilmesi nedeniyle çözeltide konsantrasyonunun düşerek etkinliğinin azaldığı belirtilmektedir. TEA'nin çimento hidratasyonu üzerindeki etki mekanizması özet olarak (i) C_3A ile alçıtaşı arasındaki kimyasal reaksiyonları hızlandırmak, (ii) yüksek dozajlarda Aft'nin AFm'ye dönüşümünü hızlandırmak ve (iii) hegzagonal alüminat hidratların formasyonunu ve kübik forma dönüşümlerini hızlandırmak olarak kabul edilir. TEA'nin varlığında kalsiyum hidroksitin miktarının azaldığı ve TEA'daki oksijen ile çimentodan kaynaklanan Ca^{+2} iyonları arasındaki etkileşimden meydana gelen TEA- Ca^{+2} yapılarının oluşması nedeniyle portlanditin miktar ve morfolojisinde değişimler meydana geldiği belirtilmektedir (17).

TIPA'nin sadece alçıtaşı ve Portland çimentosu klinkerinden oluşan sistemlerde hem erken hem de ileri yaş dayanımlarını geliştirdiği rapor edilmiştir. TIPA'nin Fe^{+3} iyonu ile kompleks geliştirebildiği ve C_4AF 'nin hidratasyonunu alçıtaşı tamamen harcanmış olsa bile hızlandırdığı belirtilmektedir (11). TIPA'nin standart kür uygulanmış %30 uçucu küllü Portland çimentosu hamurlarının 7 ve 60 günlük basınç dayanımlarını belirgin derecede arttırdığı rapor edilmiştir. Bu artışların TIPA'nin uçucu külün çözünmesini hızlandırarak pozzolanik reaksiyonu geliştirip hamur sisteminin boşluk yapısını iyileştirmesi yoluyla olduğu belirtilmiştir. TIPA içeren karışımlarda civa porozimetresi ile belirlenen boşluk yapısına yönelik çalışmalar özellikle yüksek dozajda TIPA kullanımı ile sürüklenmiş hava miktarında artış olduğunu, bunun da basınç dayanımı kayıplarına neden olabileceği belirtilmektedir (11, 14).

DEIPA'nin Portland çimentosu sistemlerinde özellikle alüminat fazlarının hidratasyonunu geliştirdiği rapor edilmiştir (15). DEIPA'nin erken yaşta etrenjit formasyonunu hızlandırdığı, alüminyum ve demir fazlarının ikincil reaksiyonlarını geliştirdiği, etrenjitin monosülfata dönüşümünü hızlandırdığı ve mikro-kristal yapıya sahip kalsiyum hidroksit oluşumunu sağladığı; ileri yaşlarda ise C_3S 'in reaksiyonlarını geliştirip daha az boşluklu bir mikro yapı oluşumu sağlayarak ileri yaş dayanımlarında artışlara neden olduğunu rapor eden çalışmalar da bulunmaktadır (6). Öte yandan, DEIPA'nin çimento hidratasyonunu ilk 72 saatte hızlandırarak erken dayanımı arttırdığı, ancak daha boşluklu bir yapıya neden olarak ileri yaş dayanımlarında beklenen yüksek dayanımın elde edilemediğini rapor eden çalışmalar da vardır. Genel olarak alkanolaminlerin çimentolu sistemlerde alüminatlarla etkileşime girerek hidratasyon ürünlerinin oluşum mekanizmasını etkilediği ve bazı morfolojik değişimlere neden olduğu belirtilmektedir (15). DEIPA'nin kireçtaşı tozu ($CaCO_3$) içeren Portland çimentolarının priz sürelerini önemli derecede etkilemeden, 3 günlük dayanımları %28, 28 günlük dayanımları ise %20 oranında geliştirdiği (12) ancak DEIPA içeren karışımlarda çimento-süperakışkanlaştırıcı uyumunun azaldığı rapor edilmiştir (12, 13).

AMAC

Bu çalışmada aslında çimento öğütme kolaylaştırıcı kimyasal katkı olarak kullanılan TEA, TIPA ve DEIPA türü alkanolaminlerin %65 Portland çimentosu klinkeri, %5 alçıtaşı ve %30 silissi ucu kül karışımından oluşan Portland uçucu küllü çimentoların priz süreleri ve dayanım gelişimlerine etkilerinin karışım suyuna katılmaları halinde incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma TEA, TIPA ve DEIPA'nin öğütme kolaylaştırıcı olarak performanslarını ele almamaktadır.

DENEYSEL YÖNTEM

Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu küllü çimento, bir çimento fabrikasından elde edilmiş Portland çimentosu klinkerlerinin laboratuvar ölçeğindeki bilyalı değirmende %5 oranında alçıtaşı ile belirli bir inceliğe kadar birlikte öğütülmesi ve ardından öğütülmüş Yatağan Termik Santrali uçucu külünün ağırlıkça %30 oranında ikame edilmesi ile elde edilmiştir. Uçucu kül kullanılmadan önce bilyalı laboratuvar değirmeninde öğütülmüştür. Kullanılan klinker ve uçucu külün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1 - Uçucu küllü çimento üretiminde kullanılan bileşenlerin bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃ ^(a)	Na ₂ O	K ₂ O	Sertbest CaO	Kızdırma kaybı (%)	İncelik ^(b)	45 µm üzeri (%)	Özgül ağırlık
Klinker	21.26	5.96	2.48	66.21	1.21	0.39	0.4	1.01	0.77	0.64	3149	16.90	3.12
Portland Çimentosu	20.22	5.666	2.36	64.7	1.27	2.33	0.43	0.96	-	1.62	3650	6.5	3.11
Uçucu kül	50.72	18.12	7.43	12.88	2.97	3.82	1.32	2.14	5.5	0.57	-	40.82	-
Öğütülmüş Kül												8.5	
Uçucu küllü çimento	27.06	9.314	3.84	50.7	1.8	3.36	0.71	1.3	2.02	1.59	4150	7.2	2.97

(a): XRF yöntemi ile, (b): Blaine yöntemi ile (cm²/g)

Kullanılan klinkerlerin kimyasal analizine göre Bogue formülleri ile hesaplanan ana bileşenleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 - Kullanılan klinkerin ana bileşenleri

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
61.2	14.8	11.6	7.5

Çalışmada kullanılan alkanolaminlerin özellikleri Tablo 3’te görülmektedir.

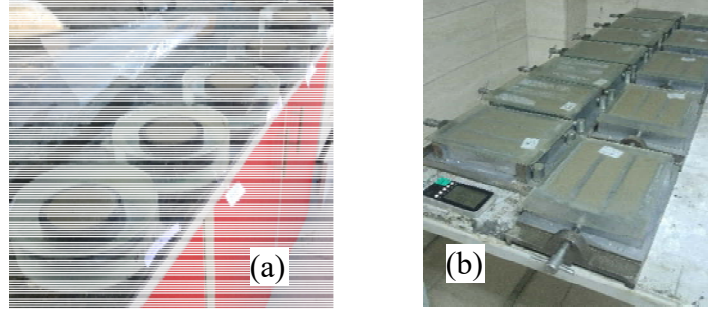
Çalışmada TEA, TIPA ve DEIPA türü alkanolaminler üretilen Portland – uçucu küllü çimentonun karışım suyuna çimento ağırlığına göre 250 ppm (0.025%), 500 ppm (0.05%) ve 1000 ppm (0.1%) konsantrasyonlarında katılarak kullanılmıştır. Dolayısıyla hiç kimyasal katkı içermeyen kontrol karışımı dahil toplam 10 adet çimento hamuru karışımı üretilmiştir.

Tablo 3 - Çalışmada kullanılan alkanolaminlerin bazı özellikleri.

	Kimyasal adı	Yoğunluk (g/cm ³)	Katı madde (%)	pH
TEA	Trietanolamin	1.12	85	10
TIPA	Triisopropanolamin	1.03	85	11
DEIPA	Dietanol-isopropanolamin	1.08	85	12

Karışımlar ve Uygulanan Testler

Çalışmada priz süresi ve dayanım gelişimi tayini için hamur örnekler üretilmiştir. Üretilen çimentoların alkanolamin varlığında normal kıvam için gerekli olan su miktarları TS EN 196-3'e göre (20) belirlenmiştir. Alkanolaminlerin çimento hamuru üretilirken hiç kullanılmaması ve en yüksek dozajda (1000 ppm) kullanılması hallerinde normal kıvam suyunun fazla değişmediği görülmüştür. Bu gözlem alkanolaminlerin çok düşük sterik etkileri nedeniyle hamur akıcılığında fazla bir değişiklik yapmadığı yönündeki literatüre paraleldir (3, 16). Dolayısıyla tüm çimento hamuru karışımlar belirlenen kıvam sularında (su/bağlayıcı oranı 0.30 civarında) bir Hobart mikser kullanılarak üretilmiştir. Karışım tamamlandıktan sonra karışımların priz sürelerinin belirlenmesi için Vicat halkalarına örnekler alınarak priz süresi su içerisinde belirlenmiştir (Şekil 2a).

**Şekil 2 - Priz süresi (a) ve dayanım tayini (b) için alınan örnekler**

Serilerin dayanım gelişimlerinin belirlenmesi için TS EN 196-1 (21) prosedürü takip edilerek 40 x 40 x 160 mm boyutlarında 6 adet prizmatik örnek alınmıştır. Bu örnekler, üstü cam plaka ile kapalı olarak (Şekil 2b) laboratuvar koşullarında 1 gün bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılarak dayanımlarının belirleneceği günlere kadar (2, 28 ve 56 gün) standart su kürü koşullarında bekletilmişlerdir. Prizmatik örneklerin basınç dayanımları 3 noktalı eğilme deneyi sonrası kalan parçalar üzerinde gerçekleştirilen eğilme sonrası basınç deneyi ile belirlenmiştir. Her bir yaş için 2 prizmatik örnek eğilme deneyinde kullanıldığından dolayı bu çalışmada rapor edilen basınç dayanımları her yaş için 4 örnek ortalamasıdır.

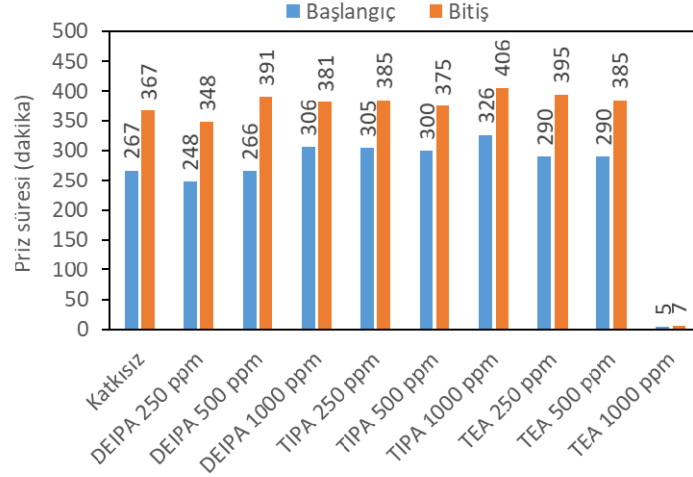
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Priz Süresi Sonuçları

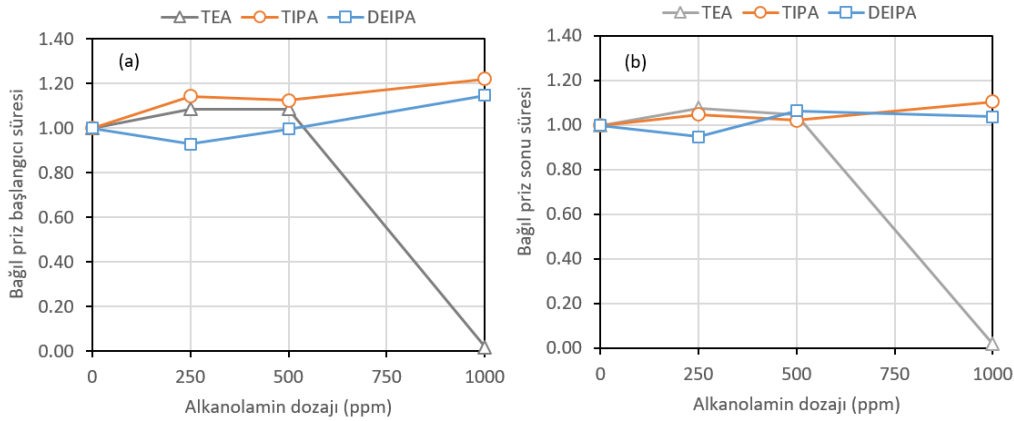
Hazırlanan çimento hamurlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 3'te görülmektedir.

Şekil 3'ten görüldüğü gibi, kimyasal özellikleri Tablo 1'de görülen Portland çimentosu klinkeri ve uçucu kül kullanılarak, %65 klinker, %30 silissi uçucu kül (Yatağan Termik santrali) ve %5 alçıtaşı karışımından oluşan Portland uçucu küllü çimentonun priz süreleri kullanılan alkanolamin

türü ve dozajından önemli derecede etkilenmektedir. Kullanılan çimentonun priz başlangıç ve sonu 267 ve 367 dakika olarak ölçülmüştür. Alkanolamin kullanımının üretilen uçucu küllü çimentoların priz sürelerinde meydana getirdiği değişimler, her bir seride alkanolaminsiz karışıma göre bağıl priz süresi olarak Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 3 - Alkanolamin türü ve dozajının %30 uçucu kül içeren çimentoların priz sürelerine etkileri.



Şekil 4 - Alkanolamin içeren karışımların katkısız karışıma göre bağıl priz başlangıcı (a) ve priz sonu (b) süreleri.

Şekil 3 ve Şekil 4'ten görüldüğü gibi, alkanolamin kullanımı Portland uçucu küllü çimentoların priz sürelerini alkanolaminsiz karışıma göre genellikle uzatmıştır. Kullanılan alkanolamin türü ve konsantrasyonunun önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. TEA kullanımı ile 500 ppm dozaja kadar priz sürelerinde %10 civarında uzama meydana gelmişken, 1000 ppm dozajda priz başlangıcı ve sonu 5 ve 7 dakika seviyelerine düşerek çok hızlı priz oluşmuştur (Ani priz belirtilerine benzer olan bu olgu, normal Portland çimentosu sistemlerinde yetersiz alçıtaşı kullanımı sonucu meydana gelen olaydan farklı olduğu için çok hızlı priz olarak anılmıştır). TIPA kullanımı priz başlangıç süresini artan dozajla birlikte giderek uzatmıştır. En düşük dozaj olan 250 ppm'de priz başlangıç süresindeki uzama %14, 1000 ppm konsantrasyonda meydana gelen

priz başlangıç süresi uzaması ise %22 seviyesindedir. Priz sonu süresinde uzama ise TIPA kullanımı ile 500 ppm dozaja kadar çok hafif olmuş (%5) ancak 1000 ppm’de priz sonu süresi katkısız kontrol karışımına göre %10 civarında uzamıştır. DEIPA’nin priz sürelerine etkisi 500 ppm’e kadar TEA ve TIPA’nin tersine olmuştur. DEIPA 250 ppm dozajda priz süresini hafifçe kısaltmış (priz başlangıcı %7, priz sonu %5), daha yüksek konsantrasyonlarda ise priz süresi uzamıştır. Bin ppm’lik en yüksek dozajda priz başlangıcı katkısız karışımına göre %15 uzamışken priz sonu süresinde çok önemli bir değişiklik olmamıştır. Şekil 3 ve 4’ten görüldüğü gibi alkanolaminlerin uçucu küllü çimentoların priz süresine etkileri kullanılan alkanolamin türü ve dozajına göre değişiklikler göstermektedir. TEA ve TIPA 500 ppm dozaja kadar priz sürelerini uzatırken DEIPA priz süresini 250 ppm’de kısaltmış, 500 ppm’de değişikliğe neden olmamıştır. Alkanolamin türleri arasındaki en büyük farklılık 1000 ppm dozajda gözlenmiştir. TIPA ve DEIPA bu dozajda priz başlangıç süresini %20’ye yakın seviyede uzatırken TEA’da ise çok hızlı priz gözlenmiştir. TEA’nin çok hızlı prize neden olması C_3A ’nin çok hızlı reaksiyonu ve hızlanan etrenjit formasyonuna bağlanmaktadır. Açıklanan mekanizmaya göre, TEA bir taraftan C_3S ’in reaksiyonunu geciktirici bir etki yaparken, diğer taraftan C_3A ’nin üzerine hızlıca yapışarak normalde C_3A ’nin çok hızlı reaksiyonunu yavaşlatmak üzere C_3A yüzeyinde oluşması beklenen sülfaloüminat tabakanın (alçıtaşından kaynaklanan) oluşumunu etkileyerek C_3A ’nin hızlı reaksiyonunun kontrolünü önlediği belirtilmektedir (7). TEA’nin yüksek dozajda kullanımı ile gözlenen hızlı priz olayı Yaphary vd. (17) tarafından ise başka bir mekanizma ile açıklanmıştır. Buna göre, TEA varlığında artan etrenjit oluşumu sonrasında meydana gelen TEA-etrenjit formasyonu C_3A ’nin etrafını hızlıca kaplayarak ileri hidrasyonunu önlemekte, bu durumda C_3S ’in çözünmesi hızlıca artarak çok hızlı bir C-S-H oluşumu nedeniyle hızlı prize neden olmaktadır.

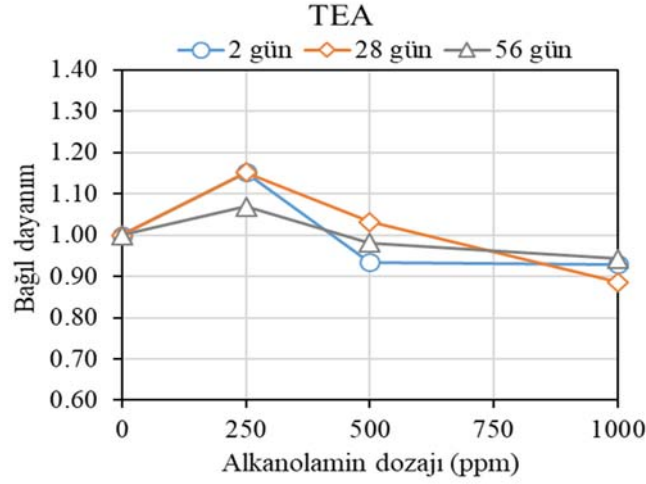
Basınç Dayanımı Sonuçları

TEA, TIPA ve DEIPA alkanolamin katkılarının %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentonun 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarına etkileri Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de katkısız karışımın ilgili günlerdeki basınç dayanımlarına göre bağıl basınç dayanımı olarak verilmiştir. Alkanolaminsiz çimento hamuru örneklerinin 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları Tablo 4’de standart sapma değerleri ile birlikte görülmektedir.

Tablo 4 - %65 klinker, %30 uçucu kül ve %5 alçıtaşı karışımından oluşan Portland uçucu küllü çimento hamuru karışımlarının 2, 28 ve 56 günlük ortalama basınç dayanımları (standart sapma değerleri parantez içerisinde gösterilmiştir).

Basınç dayanımları (MPa)	2 gün	28 gün	56 gün
%65 klinker + %30 uçucu kül + %5 alçıtaşı	39.9 (1.7)	87.2 (1.3)	93.0 (2.2)

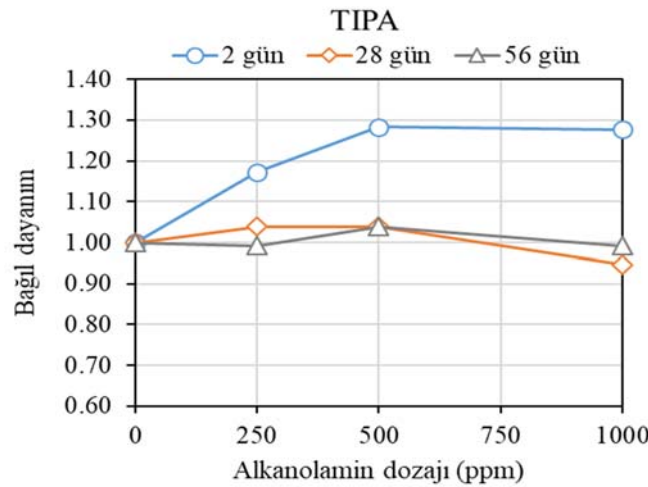
Şekil 5’ten görüldüğü gibi, 250 ppm’lik TEA dozajı uçucu küllü çimentonun 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarında artışlara neden olmuştur. En yüksek artış katkısız kontrol karışımına göre %15 ile 2 ve 28 günlük dayanımlarda elde edilmiştir. 56 günlük örneklerde kontrol karışımına göre basınç dayanımı artışı %7 olmuştur. TEA dozajının artırılması ile birlikte kontrole göre basınç dayanımı artışı kaybolmuş, hatta bazı günlerde kontrol karışımından daha düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Beş yüz ppm dozajda 2 günlük örneklerin basınç dayanımı kontrolden %7 daha azdır. Bin ppm dozajda ise (çok hızlı prize neden olan dozaj) 2, 28 ve 56 günde elde edilen basınç dayanımı değerleri kontrol karışımından yaklaşık %10 civarında daha düşüktür.



Şekil 5 - TEA dozajının %30 uçucu kül içeren hamurların basınç dayanımına etkisi.

Heinz vd. (10) TEA'nın uçucu külün çözünürlüğünü arttırarak uçucu külden Al, Ca ve Fe iyon salınımını arttırdığını belirlemiştir. Gartner ve Myers (3) TEA ve TIPA'nin çimentolu sistemlerde dayanım gelişimindeki etkilerini demir iyonu taşınımı ile açıklamıştır. Bu araştırmacılar TEA ilavesi ile daha fazla demirin çözündüğünü ve daha fazla mono veya tri-sülfat oluştuğunu rapor etmiştir. Dolayısıyla Portland çimentosunun kompozisyonuna bağlı olmak üzere, literatürde Portland çimentolu sistemlere TEA ilavesi ile dayanım artışlarının rapor edildiği görülmektedir (2). Öte yandan, TEA içeren serilerin ileri yaş gelişiminin erken yaşlardaki kadar olmadığı, hatta katkısız duruma göre daha az dayanım elde edildiği de görülmektedir. İleri yaşlardaki bağıl dayanımın düşük olması bazı araştırmacılar tarafından TEA'nin kalsiyum hidroksit tarafından emilmesine bağlı olarak konsantrasyonunun düşmesi (3) ve ilk başta hızlanan C_3A reaksiyonu nedeniyle meydana gelen etrenjit artışı ile oluşan TEA-etrenjit komplekslerinin C_3S 'in etrafını sararak difuzyonunu ve çözünmesini engellemesine bağlanmaktadır (17).

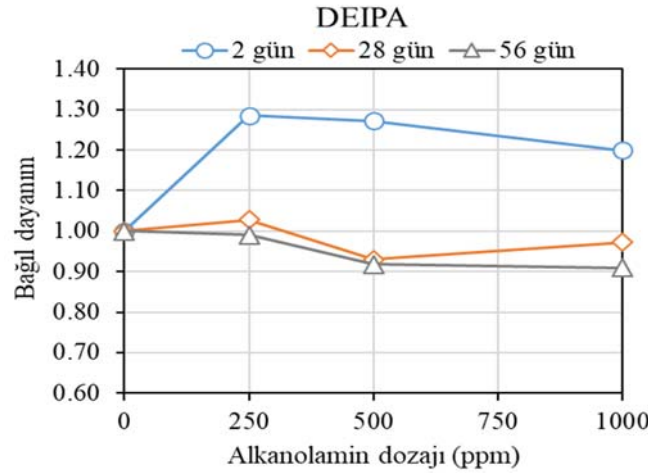
Şekil 6'da TIPA'nin %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimento hamurlarının 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları ilgili yaşlarda katkısız kontrol karışımına göre bağıl dayanım olarak görülmektedir.



Şekil 6 - TIPA dozajının %30 uçucu kül içeren hamurların basınç dayanımına etkisi.

Şekil 6’da görüldüğü gibi TIPA %30 uçucu kül içeren hamurların 2 günlük dayanımında çok çarpıcı bir artış sağlarken 28 ve 56 günlük dayanımlarda kontrole göre dayanım artışı önemli mertebede değildir. 250 ppm’lik TIPA katkısı uçucu küllü hamurların 2 günlük dayanımını katkısız karışıma göre %17, 500 ve 1000 ppm’lik dozajlarda ise %28 seviyesinde arttırmıştır. Yirmisekiz ve 56 günlük dayanımların kontrol karışımı seviyesinden $\pm$ %5 farklı olduğu görülmektedir. Literatürde TIPA’nın Portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinde, uçucu külün demir fazı başta olmak üzere, külün çözünürlüğünü arttırdığı, bunun çimentonun hidratasyonunu da arttırarak katkısız hale göre daha fazla kalsiyum hidroksit oluşturduğunu, bunun sonucu olarak güçlenen alkali ortamın da katkısıyla uçucu külün puzzolanik reaksiyonlarının artması neticesinde ileri yaş dayanımlarda katkısız duruma göre artış olduğu belirtilmiştir (3,11). Ancak sunulan çalışmada sadece 2 günlük dayanımlarda çok belirgin bir artış olmasına karşın 28 ve 56 günlük dayanımlarda katkısız kontrol karışımına göre çok belirgin bir artış kaydedilmemiştir. Dolayısıyla TIPA’nın sunulan çalışmadaki Portland çimentosu-uçucu kül sisteminde puzzolanik reaksiyonu etkilemeden klinkerin aluminat ve silikat fazlarına yaptığı etkilerle erken dayanımı arttırdığı düşünülmektedir.

DEIPA’nın %30 uçucu kül içeren hamurların 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarına etkisi ilgili yaşlarda kontrol karışımına göre bağlı dayanım olarak Şekil 7’de görülmektedir.



Şekil 7 - DEIPA dozajının %30 uçucu kül içeren hamurların basınç dayanımına etkisi.

Şekil 7’den görüldüğü gibi, 250 ppm’lik DEIPA katkısı, tıpkı TIPA’da olduğu gibi, %30 uçucu kül içeren çimentonun 2 günlük dayanımlarında önemli derecede artış sağlamıştır. Ancak dozaj arttıkça 2 günlük dayanımı geliştirme oranı hafif bir azalma eğilimi göstermiştir. İki yüz elli ppm dozajda katkısız kontrole göre 2 günlük dayanım artışı %29’dur. Beş yüz ve 1000 ppm dozajlarda ise katkısız kontrole göre sağlanan 2 günlük dayanım artışları sırasıyla %27 ve %20 olmuştur. Ancak karışımların 28 ve 56 günlük dayanımları ya katkısız karışım seviyesinde ya da ondan %10 kadar daha az olmuştur. Literatürde DEIPA’nın çimento hidratasyon sürecine çok olumlu katkıları belirtilmesine karşın (15, 18), bu olumlu katkıların ileri yaş dayanımlarına bazı hallerde yansımadağı görülmektedir. Benzer sonuçlar Riding vd. (15) tarafından da rapor edilmiştir. Yazarlar DEIPA’nın çimentonun hidratasyon derecesinde artış sağlamasına karşın, 7 ve 28 günlük dayanımlarda bir gelişme sağlamadığını belirtmiştir.

Alkanolamin kullanımı ile bir taraftan aluminat fazının hidratasyonu hızlanırken diğer taraftan C_3S ’in hidratasyonunun geciktirilmesi uçucu küllü sistemde ileri yaşlarda dayanım artışına neden olacak puzzolanik reaksiyonları olumsuz etkileyebilmektedir. C_3S hidratasyonunun kısmen önlenmesi kalsiyum hidroksit oluşumunu da azaltmakta, dolayısıyla uçucu kül ile puzzolanik

reaksiyonun da beklenen seviyede gerçekleşememesine neden olabilmektedir. Bu durum mineral katkılı çimentolarda alkanolamin kullanımı ile kontrole göre ileri yaşlarda dayanım gelişiminin erken yaşlardaki kadar sağlanamamasının nedeni olarak gösterilmektedir (18). Bu çalışma kapsamında incelenen alkanolaminlerin yüksek pH ortamında demir iyonlarını bağlama özelliklerinin yüksek olduğu literatürde belirtilmektedir. Bu durumda bazı araştırmacılar, alkanolamin kullanımı ile erken yaş dayanımlarında meydana gelen artışın C_3A 'nin reaksiyonlarının hızlanmasının yanı sıra, C_4AF 'nin hidratasyona katkısının artması ile olduğunu belirtmektedirler (3).

SONUÇ

Çalışmada kullanılan alkanolaminlerin (TEA, TIPA ve DEIPA) kimyasal yapı olarak birbirlerine çok benzer olmalarına karşın uçucu küllü Portland çimentolarının priz süreleri ve dayanım gelişimleri üzerindeki etkilerinin birbirlerinden bazı farklılıklar gösterebildiği gösterilmiştir. Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Alkanolamin kullanımı %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentoların priz sürelerini kullanılan alkanolamin türü ve kullanım dozajına bağlı olarak etkilemektedir.
- TEA 250 ve 500 ppm dozajlarda priz başlangıcı ve sonu sürelerini hafifçe uzatırken 1000 ppm dozajda çok hızlı prize neden olmuştur. TIPA ve DEIPA priz başlangıcı süresini artan dozajı ile birlikte giderek uzatmıştır. Priz başlangıç süresini en fazla uzatan alkanolaminin 1000 ppm dozajda %22 ile TIPA olduğu belirlenmiştir. Priz sonu sürelerine alkanolaminlerin etkisi priz başlangıç süresine göre daha azdır.
- Çalışmada kullanılan alkanolaminler %30 uçucu kül içeren çimentonun 2 günlük dayanımını, dozaja bağlı olarak, katkısız kontrol karışımına göre %15 ile %29 mertebelerinde arttırmıştır. TEA yalnızca 250 ppm dozajda 2 günlük dayanımı %15 arttırırken, TIPA ve DEIPA 1000 ppm dozaja kadar 2 günlük dayanımı %20'den fazla arttırmıştır.
- Alkanolamin kullanımı ile %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentoda 2 günlük dayanımda önemli artışlar sağlanırken 28 ve 56 günlük dayanımlarda ya kontrol karışımı seviyesinde ya da ondan, en fazla %10 kadar, daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.

Alkanolaminlerin yüksek oranda uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentoların priz süresi ve dayanım gelişimine önemli bir etkisi bulunduğu yalnızca bir Portland – uçucu küllü çimento örneğinde gösterilmiştir. Bu çalışmanın sınırlı sonuçları alkanolaminlerin daha ekonomik ve sürdürülebilir çimento üretimi için fırsat sunan bir katkı olduğunu göstermektedir. Öte yandan, en optimum faydanın sağlanabilmesi için alkanolaminlerin farklı klinker ve karışım özelliklerine sahip çimentoların hidratasyon sürecine etkilerinin daha ileri analizler ve iç yapı incelemeleri ile desteklenmiş daha kapsamlı deneysel programlarla araştırılması gelecek çalışmalar için önerilir.

Teşekkür

Yazarlar deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı Kentçim Çimento A.Ş. kalite kontrol laboratuvarı teknisyeni Sn. Süleyman Soylu'ya teşekkür ederler.

Kaynaklar

1. Bouzoubaa, N., Zhang, M.H. Bilodeau, A. Malhotra, V.M. Laboratory-produced high-volume fly ash blended cements: physical properties and compressive strength of mortars” Cement and Concrete Research. 28 (11), (1998) pp. 1555-1569.
2. Lee, C.Y., Lee, H.K. Lee. K.M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. Cement and Concrete Research, 33 (3) (2003), pp. 425-431.
3. Gartner, E. Myers, D. Influence of tertiary alkanolamines on Portland cement hydration. Journal of American Ceramic Society. 76 (1993), pp. 1521-1530.
4. Magistri, M., Presti, E. Influence of grinding aids. World Cem., 6 (2007), pp. 39-41.
5. Yang, S.G., vd. (2017). Impact of four kinds of alkanolamines on hydration of steel slag-blended cementitious materials. Construction and Building Materials, 131: p. 655-666.
6. Ma, S.H., Li, W., Zhang, S., Hu, Y., Shen, X. Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. Cement and Concrete Research, 2015. 67: p. 122-130.
7. Ramachandran, V.S., Action of triethanolamine on the hydration of tricalcium aluminate. Cement and Concrete Research, 1973. 3(1).
8. Ramachandran, V.S. Hydration of cement—role of triethanolamine, Cem. Concr. Res. 6 (1976) 623–632.
9. Heren, Z., Ölmez, H. The influence of ethanolamines on the surface properties of Portland cement pastes, Cement and Concrete Research. 27 (1997) 805–809.
10. Heinz, D., Göbel, M., Hilbig, H., Urbonas, L., Bujauskaite, G. Effect of TEA on fly ash solubility and early age strength of mortar. Cement and Concrete Research. 40 (2010) 392–397.
11. Ma, B., Zhang, T., Tan, H., Liu, X., Mei, J., Qi, H., Jiang, W., Zou, F. Effect of triisopropanolamine on compressive strength and hydration of cement-fly ash paste. Construction and Building Materials, 2018. 179: p. 89-99.
12. Lu, X., Wang, S., Li, C., Ye, Z., Cheng, X. Research on Properties and the Hydration of Portland Limestone Cement with Diethanol-Isopropanolamine. Ceramics-Silikaty, 2018. 62(3): p. 233-239.
13. Kobya, V., Kaya, Y., Aghabaglou, A.M. Effect of amine and glycol-based grinding aids utilization rate on grinding efficiency and rheological properties of cementitious systems. Journal of Building Engineering. 47 (2022) 103917.
14. Zou, F., Tan, H., He, X., vd. Effect of triisopropanolamine on compressive strength and hydration of steaming-cured cement-fly ash paste. Construction and Building Materials Volume 192, (2018), Pages 836-845.
15. Riding, K., Silva, D.A., Scrivener, K. Early age strength enhancement of blended cement systems by CaCl_2 and diethanol-isopropanolamine. Cement and Concrete Research. 40 (2010) 935-946.
16. Lu, Z.C., Kong, X.M., Jansen, D., Zhang, C.Y., Wang, J., Pang, X.F., Yin, J.H. Towards a further understanding of cement hydration in the presence of triethanolamine, Cement Concrete Research. 132 (2020).

17. Yaphary, Y.L., Yu, Z.C., Lam, R.H.W., Lau, D. Effect of triethanolamine on cement hydration toward initial setting time, Construct. Build. Mater. 141 (2017) 94–103.
18. He, Y., Liu, S. H., Zhang, X., Liu, W. B., Liao, G. Y., Xu, M. F. Influence of triethanolamine on mechanical strength and hydration performance of blended cement containing fly ash, limestone and slag. Journal of Building Engineering. 44 (2021) 102879.
19. Han, J., Wang, K. Shi, J., Wang, Y. Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. Construction and Building Materials 93 (2015) 457–462.
20. TS EN 196-3. Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. TS EN 196-1. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Yüksek Dayanımlı Betonun Balistik Performansının DeneySEL ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi*

Ahmet Reha GÜNAY¹, Sami KARADENİZ²

ÖZET

Dünya'daki savaşlarda, askeri unsurlar ve siviller zarar görmektedir. Ülkeler Savunma Sanayii'ndeki yatırımlarını artırmakta, yüksek hız ve tahribatlı mühimmat sistemleri geliştirmeyi sürdürmektedir. Günümüzde, tehditlerin gelişimine paralel olarak korumanın da etkin biçimde sağlanabilmesi önemlidir. Bu nedenle, mühimmat çarpması gibi yüksek hız ve enerjili seyreden dinamik etkiler altında, temel yapı malzemesi olarak Yüksek Dayanımlı Betonun dinamik davranışı deneySEL ve sayısal olarak incelenmiştir. Yazarların bir önceki çalışmalarında nümerik veri seti elde edilen 125 MPa dayanımlı Yüksek Dayanımlı Beton için Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli kullanılarak bir dizi sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu betonun deneySEL olarak davranışını incelemek üzere hedef üretilmiş ve balistik atış testleri gerçekleştirilmiştir. Balistik atış testleri sonucu elde edilen penetrasyon, krater derinliği, hasar yüzey alanı, delik çapı sonuçları ve hedef numune ile çarpan parça görselleri sayısal analizlerde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Dayanımlı Beton, Balistik, Sayısal ve DeneySEL

ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of Ballistic Performance of High Strength Concrete

Military elements and civilians are damaged in wars in the world. The countries increase their investments in the Defense Industry and to continue to develop of high speed and ammunition systems. Today, It is important to provide effective protection in parallel with the development of threats. For this reason, the dynamic behavior of ultra-high strength concrete as a basic building material under dynamic effects with high speed and energy such as ammunition impact was studied experimentally and numerically. A series of numerical analyzes were carried out using the Holmquist Johnson Cook (HJC) material model for high strength concrete with 125 MPa strength, from Which the numerical data set was obtained in the previous studies of the authors. In addition, target was produced and ballistic shooting tests were carried out to evaluate the

1 TÜBİTAK SAGE/Atılım Üniversitesi, Ankara - reha.gunay@tubitak.gov.tr

2 Başkent Üniversitesi, Ankara - skaradeniz@baskent.edu.tr

experimental behavior of this concrete. As a conclusion of the ballistic test, the crater, damage surface area, target specimen and piercing parts of view obtained with penetration, were compared with the results obtained by numerical analysis and verified.

Keywords: *High Strength Concrete, Ballistic, Numerical and Experimental*

1. GİRİŞ

Günümüzde Savunma Sanayii alanında mühimmat sistemleri geliştirme çalışmalarına yönelik Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmaktadır. Bu durumun en önemli nedeni ise ülkelerin ekonomi ve enerji gibi temel alanlarda varlık gösterebilmesine olanak sağlamak için savunma alanında öncü olma istekleridir. Bu sebeple, Dünya’da Endüstriyel ve Savunma Sanayii alanlarında araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Ülkemizde son yıllarda kazandığı ivme ile sivil, askeri sistemlerinin tasarımı ve üretimi konusunda bilgi, belge ve doküman üretme çalışmalarında hayli mesafe kat ederek ürünler geliştirmektedir. Birçok gelişmiş ülke, sanayilerindeki gelişime paralel olarak stratejik öneme sahip tesisler ve altyapılar kurmaktadır. Bu tesisler şüphesiz ki önemli amaçlara hizmet eden sistemleri bünyelerinde barındırmaktadır. Yatırımlar ise büyük ölçekli ve yüksek maliyetlere katlanılarak hayata geçirilmektedir. Enerji alanında nükleer santraller, barajlar, ulaşım alanında geniş açıklıklı köprüler, demiryolu sistemleri, tüneller ve savunma alanında harekât kontrol merkezleri, askeri karargâhlar, sığınak yapıları, yüksek maliyetli yatırımlara örneklerdir. Yapılar ise çeşitli doğa olayları ve dış tehditlerin etkisi altında yer almaktadır. Bu sebeple kritik öneme sahip tesisler korunmalıdır. Korumanın sağlanması ve tehditlerin bertaraf edilmesi için yapının kurulum aşamasında geleneksel yöntemlerin aksine günümüz teknolojisine uygun çözümlere odaklanmak gereklidir.

Birçok kritik tesisin yapımı için kullanılan temel yapı malzemesi betondur. Diğer yapı malzemelerine kıyasla beton sağladığı ekonomik avantajlar sebebiyle tercih edilmektedir. Geçmişten günümüze kullanılan beton, özellikle son yıllarda tasarım, üretim yöntemlerinin gelişimi ve son teknoloji ekipmanlar kullanımı ile birlikte yüksek nitelikli yapı malzemesi halini almıştır. Betonlar dayanım sınıflarına göre normal, yüksek ve çok yüksek dayanımlı olarak gruplandırılmaktadır. Dünya üzerinde bu konuda genel bir mutakabata varılmamış olmakla birlikte, basınç dayanımı 60 MPa kadar olan betonlar normal dayanımlı beton (NDB), 60-120 MPa arası yüksek dayanımlı beton (YDB) ve 120 MPa ile üzeri dayanımda yer alan betonlar Çok Yüksek Dayanımlı Beton (ÇYDB) olarak sınıflandırılmaktadır[1]. Bu sınıflarda üretilen betonların balistik performanslarının incelenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan bu çalışmalarda, M.H. Zhang vd. [2], 45-235 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı ve katkısız çok yüksek dayanımlı betonlar geliştirmiş ve 12,60 mm çap ve 23,93 mm boyda çelik parçayı 620-700 m/s hız aralığında hedefe çarptırarak penetrasyon derinliğini 15-71 mm aralığında ölçmüşlerdir. Fan Wan vd. [3], 57 MPa basınç dayanımında ve fiber katkısız geleneksel betondan 89-405 mm ebatlarında hegzagonal ve silindirik formda hedef yapısı olarak üretmiş, 7,5 mm çap 10,30 mm boyda çelik parçayı 820 m/s hızda hedefe çarptırarak, penetrasyon derinliğini 188-300 mm aralığında ölçümlemişlerdir. R.Yu vd. [4], 500x500x100 mm ebatlarında 125-142 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı hedefe 7,62 mm ölçüsündeki mermiyi 830 m/s hızla fırlatarak, penetrasyon derinliğini 57-70 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Dawson vd. [5], 28-34 MPa basınç dayanımına ve inşaat çeliğine (donatı) sahip betonarme betonu üretmiş ve 1370x1370x152 mm ölçüsünde hedef yapısına 6,25 mm çapında tungsten parçayı 2200 m/s hızla çarptırarak, penetrasyon derinliğini 60-70 mm aralığında ölçümlemişlerdir. H.Wu vd. [6], 67-142 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı ve katkısız çok yüksek dayanımlı betona, 750 mm çapında 3 mm kalınlıkta çelik kalıp içine aldıkları silindirik yapıdaki hedefe boy/çap oranı 0,14 olan ve 30 mm namlu içinden fırlatılabilen çelik parçayı fırlatmışlar ve 115-748 mm aralığında penetrasyon derinliğini ölçümlemişlerdir. Jason T. Gomez vd. [7], 38,15 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkısız 410x410x410 mm ölçüsünde küp beton hedefe Maraging çeliğinden üretilen

6,4 mm çap ve 64,34 boydaki parçayı 186-616 m/s hızlarda tekrarlı olarak fırlatarak penetrasyon derinliğini 24-135 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Joosef Leppanen [8], 25-30 MPa beton dayanımlı 750x375x500 mm hedef yapısına 4 mm çapında silindirik çelik parçayı 1850 m/s hızla hedefe çarptırarak ve penetrasyon derinliğini 55 mm olarak ölçümlemiştir. Zhong Cheng Mu vd. [9], 51 MPa basınç dayanımında inşaat çeliği (donatı) kullanarak 360x360x400 mm ebadında hedef betona 12,6 mm çap ve 34 mm boyda 38CrSi çelik (sivri uçlu) parçayı 500-1500 m/s hız aralığında çarptırarak ve penetrasyon derinliğini 75-162 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Petr Máca vd. [10], 132-151 MPa dayanıma sahip 300x400x50 mm ölçüde fiber katkılı çok yüksek dayanımlı betona 7,92 mm çap ve 26,7 mm boyda çelik parçayı 710-730 m/s hızlarda çarptırarak penetrasyon derinliğini 19-50 mm aralığında ölçümlemişlerdir. L. Guo vd. [11], 40-45 MPa fiber katkısız betona 1800 mm çap ve 10 mm kalınlıkta çelik ile çevrelenmiş silindir formda hedefe 60 mm çap ve 300 mm boyda 30CrMnSiNi2A alaşımlı çelik parçayı 843-1400 m/s hızlarda çarptırarak, penetrasyon derinliğini 1670-3200 mm aralığında ölçümlemişlerdir. H. Wu vd. [12], 107-137 MPa basınç dayanımına sahip 750 mm çapında, 3 mm kalınlıklı çelik ile çevrili beton hedefler üretmiş ve 25,3 mm çap ve 152 mm boyda SiMnCrNiMoV çelik parçayı 510-850 m/s hızlarda hedefe çarptırarak ve 37-346 mm aralığında penetrasyon derinliği ölçümlemişlerdir. Chuang Liu vd. [13], 45 MPa basınç dayanımında fiber katkısız geleneksel betondan 450 mm çap ve 700 mm boyda silindirik hedefe 9 mm çap ve 80 mm boyda çelik parçayı 500-1700 m/s hızlarda çarptırarak penetrasyon derinliğini 24-95 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Jian Liua vd. [14], 75-140 MPa basınç dayanımında 750 mm çap ve 700 mm boyda sahip silindirik hedef yapısına 25,3 mm çap ve 152 mm boyda çelik parçayı 554-808 m/s değişken hızlarda hedef yapısına çarptırarak ve penetrasyon derinliğini 129-414 mm aralığında ölçmüşlerdir.

Yapılan çalışmalarda farklı türde hedef yapıları ve delici parçalar kullanıldığı görülmektedir. Özellikle yüksek dayanım sınıflarında hedef üretim çalışmaları ve aynı zamanda tungsten delici kullanılarak balistik test çalışmalarının sınırlı sayıda araştırmaya konu olduğu değerlendirilmektedir.

2. AMAÇ

Beton üzerine gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları genellikle dayanım ve durabilite koşullarının iyileştirilmesine yöneliktir. Birçok araştırmacı çalışmalarında, betonun 10^{-5} - 10^{-6} s⁻¹ gerinim hız aralığındaki davranışlarını gözlemlemişlerdir. Yüksek gerinim hızlarında oluşan dinamik etkiler altındaki davranış üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Zira beton yaşam döngüsü boyunca sadece statik yükleme koşullarına maruz kalmaz. Aynı zamanda rüzgâr, deprem, fırtına ve sel vb. doğal afetlerle oluşan dinamik etkilere de karşı koymaktadır. İlâveten doğal afetler dışında insan faktörü ile oluşabilen dinamik etkiler de betonun hasarına yol açmaktadır. Bu duruma en iyi örnek ise mühimmat sistemlerinin sebep oluşturduğu parçacıklaşma ve darbe basıncı etkileridir. Dinamik etkilerin betonda neden olduğu hasarı belirlemek, önlem alabilmek için malzeme davranış biçimi ve özelliklerinin kavranması gereklidir. Olağan yükler dışında yapıların davranışının belirlenmesine yönelik araştırma çalışmalarında [15,16] malzeme ölçeğinde yüksek dayanımlı betonun dinamik davranışının belirlenmesi sonucu, yapı tasarımlarında hesap güvenilirliği artacaktır. Bu sebeple yüksek hız ve enerjili seyreden olayların oluşturduğu dinamik etkilerin, betonda yansımalarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, mevcut yapıların iyileştirilmesi ve yeni yapıların güvenli tesis edilmesine yönelik önemli katkılar sunacaktır. Bu motivasyonla çalışmada, 125 MPa basınç dayanımına sahip Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) üretilecek ve tungsten ağır alaşımı parça kullanılarak balistik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenecektir.

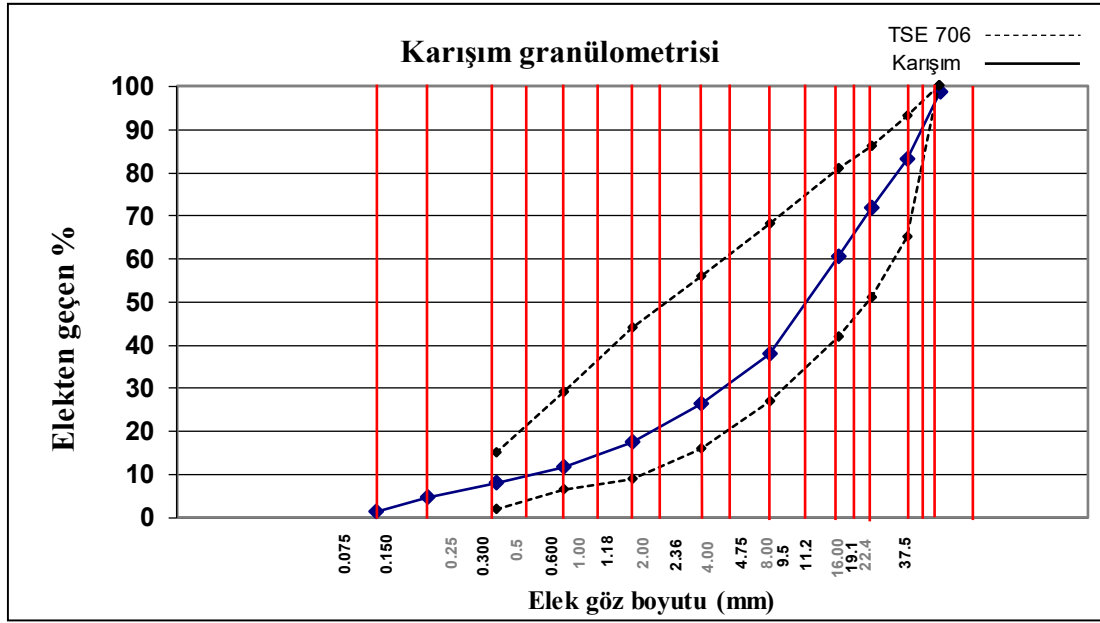
3. BALİSTİK TEST ÇALIŞMALARI

3.1. Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı ve Örneklerin Üretimi

Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) geliştirmek üzere karışım hesapları oluşturularak dökümler ve basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Üretimde çimento malzemesi olarak 3,14 gr/cm³ yoğunluklu CEM I 52.5 N kullanılmıştır. Çimento hamuru ile agregaya bağında oluşabilecek boşlukların kapatılması için 2,86 gr/cm³ özgül ağırlıkta öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Agregaların seçimi aşamasında su emme gereksiniminin çok düşük olmasına, bünyesinde kil, silt gibi malzemelerin bulunmamasına ve kirli olmamasına özen gösterilmiştir. Üretimde 0-5 mm kum, ince kireç taşı agregaya 5-12 mm, 12-19 mm ve 19-25 mm kaba kireç taşı agregaya kullanılmıştır. Kum ve agregaların özgül ağırlıkları sırasıyla 2,63 kg/dm³, 2,67 kg/dm³, 2,64 kg/dm³, 2,65 kg/dm³ ve su emme kapasiteleri sırasıyla %1,18, %0,65, %1,07, %0,88 ve karışımda kullanılan agregaların incelik modülü 4,60'dır. Numune üretiminde kullanılan agregaların elek analiz sonuçları Tablo 1'de ve Agregaya granülometrisi Şekil 1'de yer almaktadır. Ayrıca deneysel çalışmada betonun işlenebilirliğin artması ve dayanımında olumsuz etkilelerin önlenmesi için yüksek su indirgeyiciler (süper akışkanlaştırıcılar) kullanılmıştır. Üretimde polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Şekil 2-3'de kullanılan malzemelerin görselleri ve Tablo 2'de 1 m³ YDB'nin gerçek bileşimi yer almaktadır.

Tablo 1 - Kullanılan agregaların ve karışımın granülometri tablosu.

Elekten geçen %				
Elek göz boyutu,mm	0-5 mm (Kum)	5-12 mm (ince)	12-19 mm (Kaba)	19-25 mm (Kaba)
37,5 mm	100	100	100	100
22,4 mm	100	100	100	88,5
19 mm	100	100	83	42,86
16 mm	100	100	68	2,6
11,2 mm	100	97,5	2,5	0,7
9,5 mm	100	80,07	1,27	0,32
8 mm	100	64,7	0,2	0
4,75 mm	99,9	24,3	0,1	0
4 mm	95,6	1,8	0	0
2,36 mm	71,9	0,73	0	0
2 mm	66,7	0,5	0	0
1,18 mm	46,4	0,04	0	0
1 mm	44,4	0	0	0
0,600 mm	32,48	0	0	0
0,5 mm	29,5	0	0	0
0,300 mm	22,06	0	0	0
0,25 mm	20,2	0	0	0
0,150 mm	12,73	0	0	0
0,125 mm	11,9	0	0	0
0,075 mm	3	0	0	0
Karışım Oranları	39	33	16	12



Şekil 1 - Karışım granülometrisi.



Şekil 2 - (1) 0-5 mm Kum, (2) 5-12 mm İnce Agrega, (3) 12-19 mm Kaba Agrega ve (4) 19-25 mm Kaba Agrega Görseli.



Şekil 3 - (a) Curuf Görseli, (b) Süperakışkanlaştırıcı Görseli.

Beton karışım hesabı sonucu 125 MPa dayanıma sahip YDB'nin içeriğinde yer alan malzemeler ve 1 m³ hacim için kuru kütleli bilgileri ile oranları belirlenmiş ve Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 2 - 125 MPa basınç dayanımına sahip betonun 1 m³ gerçek bileşimi.

Malzemeler	Yoğunluk (kg/m ³)	Oran (%)
Çimento	450	
Cüruf	45	
Kum (0-5 mm)	775	
Kireç taşı (5-12 mm)	663	
Kireç Taşı (12-19 mm)	316	
Kireç taşı (19-25 mm)	238	
Su/Çimento		13
Süperakışkanlaştırıcı		2,5

Malzemelerin seçimi ve tasarım hesaplamalarının gerçekleştirilmesi sonucu yüksek dayanımlı beton üretim çalışmalarına başlangıç verilmiştir. İlk aşamada agregalar laboratuvar ortamında etüvde kuruma işlemine tabi tutulmuştur. Etüvden çıkarılan agregalar bir süre bekletilmiş, tasarım hesabına göre tartılmış ve betoniye yerleştirilmiştir. Agregaların yerleştirilmesi sonrasında tasarım hesap miktarlarına uygun olarak çimento ve cüruf eklenerek kuru karışımın hazırlanması için betoniye çalıştırılmıştır. Etüv ve betoniye görseli Şekil 4'te yer almaktadır.



(a)

(b)

Şekil 4 - (a) Etüv görüntüsü, (b) Betoniye görüntüsü.

Betoniye yaklaşık bir dakika çalıştırılması sonrası kuru karışımın oluşumu gözlemlenmiştir. Kuru karışıma kıvam verilmesi için süper akışkanlaştırıcı ve su tasarım hesabına uygun, çimentoda yaşanabilecek topaklaşmanın önlenmesi için kademeli olarak ilave edilmiştir. Kıvamın sağlanması için yaklaşık 3-4 dakika betoniyede karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Oluşumun

tamamlanması sonrası, yüksek dayanımlı betonun slump (kıvamı) değeri yaklaşık 0-1 arasında ölçümlenmiştir. YDB kısa sürede sertleşme eğiliminde davranış göstermiştir. Betoniyerde üretilen beton hızlı biçimde kürek yardımı ile 150X300 mm ebatlarında olan silindir numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Ancak ilk safhada numune kalıbının içinde betonun boşluksuz dağılım gösterebildiğini söylemek mümkün değildir. Düşük işlenebilirliğin negatif etkilerinin ortadan kaldırılmasına yönelik olarak, numune kalıpları titreşim tezgahının üzerine alınmış vibrasyonla üç aşamalı olarak ve ara katmanlarda sürekli tokmaktama çalışması gerçekleştirilerek yerleştirilmiştir. Silindir kalıplara yerleştirilen numuneler bir saat süre ile sertlik kazanması için üretim alanında bekletilmiştir. Göreceli olarak sertleşen beton, kalıpların içinde farklı bir bekleme alanına alınmış ve yaklaşık bir gün sonra tamamen sertleşen numuneler kalıptan çıkarılarak test gününe kadar bekletilmek üzere kür havuzun alanına aktarılmıştır. Numuneler 24 °C ve %97 nem oranına sahip ortamda kür işlemine tabii tutulmuştur.

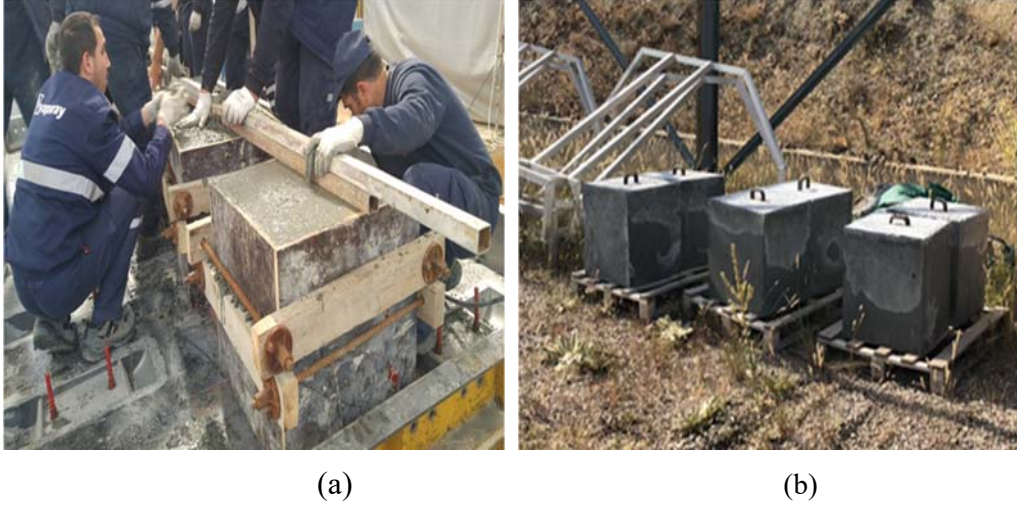
Kür süresinin tamamlanması sonrasında, 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki toplam 12 adet silindir beton numune, 1., 7., 28. ve 56. günde Universal beton presi kullanılarak 1×10^{-5} s⁻¹ gerinim hızında basınç dayanım testlerine tabii tutulmuşlardır.

YDB' nin nihai dayanıma kadar geçen süre zarfında gerçekleştirilen basınç dayanım testlerine ilişkin sonuç bilgileri Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3 - Yüksek Dayanımlı Beton basınç dayanım sonuçları.

Sıra No	Gün	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma (MPa)
1	1.	108	7,35
2	7.	115	7,84
3	28.	125	3,70
4	56.	135	3,22

Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen YDB 28. günde 125 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Mikrosilis malzemelerin dayanıma katkı sağlaması sonucu 56. günde 135 MPa dayanım değeri ölçümlenmiştir. YDB'nin işlenebilirliği düşük seviyededir ve hızlı sertleşme eğilimi göstermektedir. Negatif bu etki nedeniyle balistik test için kullanılacak YDB hedef betonu (büyük ebatla üretimde) kalıp içine yeterince yerleşmeyebilir ve segregasyonlar oluşabilir. Ayrıca balistik testlerde performans gösterebilmesi için hedef boyutların çarpan parçaya oranla doğru belirlenmesi (L/D oranı) hedefin çarpma etkisine maruz kalacağı yüzeyin uzunluğu ile parçanın çapı arasındaki ölçü ilişkisi önemli olup, L/D olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu sebeplerle, kullanılacak parçanın çapına oranla hedef yapısının yüzey uzunluğu 35 kat daha fazla olarak tasarlanmış ve hedef yapısı 500x500x500 mm ebatlarında üretilcektir. Hedef üretiminde, betoniyerde hazırlanan YDB'nin hızlı sertleşmesi sebebiyle, titreşim tezgâhı üzerinde hazır halde bulunan kalıplara hızlı bir biçimde yerleştirilmesi gerekmiştir. Yerleştirme işlemi üç aşamada, ara bölümlerin tokmaklanması ve titreşim tezgâhının döküm süresince sürekli halde çalıştırılmasıyla sağlanmıştır. Döküm sonrasında, YDB' nin tamamen sertleşmesi beklenmiş ve bir gün sonra kalıptan çıkartılmıştır. Hedef betonu vibrasyon ve yerleşme problemlerinin tespitine ilişkin, gözle muayene edilmiştir. Yapılan muayene sonucu üretim kaynaklı sorun bulunmadığı gözlemlenmiştir. Altı adet üretilen hedef betonları test gününe kadar kür işlemine tabii tutulmuştur. Hedef üretim aşamaları ve numunelerin nihai görselleri Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5 - (a) Hedef betonu üretim aşamaları, (b) Üretim sonrası görseli

3.2. Delici Parça Üretimi

Balistik testlerde hedefe çarptırılacak parçanın dağılmadan YDB' ye nüfuz etmesi ve mümkün olabilecek en büyük hasarı oluşturması, hedef yapısının davranışının belirlenmesi gerekli ise güçlendirilme tedbirlerinin alınması ve hedef optimizasyonunun sağlanması açısından önemlidir. Günümüzde yürütülen balistik test çalışmalarında savunma ve uzay sanayinde kullanımı son dönemlerde artan tungsten ağır alaşımı parça kullanılmaktadır [17]. Tungsten ağır alaşımı ürünler, ısıya dayanıklılığı, oda sıcaklığı ve artan sıcaklıklardaki yüksek dayanımı, yüksek termal iletkenlik özelliği nedeniyle ön plana çıkmaktadır [18]. Stratejik bir ürün olan tungsten kolay elde edilemez ve bağımsız üretim şartlarını gerektirmektedir. Tungsten ağır alaşımları temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Alaşımlardan ilki Ni-Fe, diğeri ise bağlayıcı fazın Ni-Cu içerdiği alaşımlardır [19]. İhtiyaç ve kullanım alanlarına göre tungsten ağır alaşımların içeriği belirlenmekte ve üretilmektedir. Çalışmalarda sıklıkla kullanılan alaşımlara ilişkin bilgiler ve sağladıkları avantaj-dezavantajlar Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4 - Tungsten ağır alaşımları değerlendirme tablosu [18].

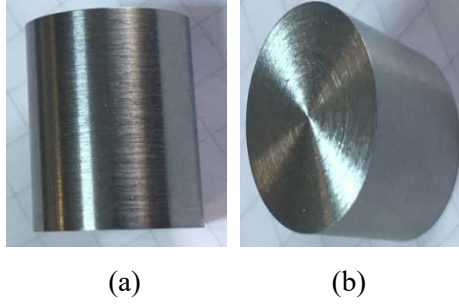
Alaşım İçeriği	Avantaj	Dezavantaj
W-Ni-Cu	Düşük fazlı sinterleme sıcaklığı, düşük manyetik geçirgenlik, yüksek ısı iletkenlik	Düşük Mekanik Özellikler
W-Ni-Fe	Düşük üretim maliyeti	Standart alaşım
W-Ni-Co	Yüksek mekanik özellikler	İntermetalik oluşumu
W-Ni-Fe-Co	W-Ni-Fe'den daha yüksek mekanik özellikler	Radyoaktif alanda kullanım problemi
W-Ni-Fe-Mo	Yüksek sertlik	Sinterleme hassasiyeti yüksek.

Balistik test çalışmasında W-Ni-Fe düşük üretim maliyetine sahip standart alaşım parça kullanılacaktır. Tungsten ağır alaşımı delici parçaya ait kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5 - Tungsten ağır alaşımı mekanik özellikleri tablosu.

Alaşım İçeriği	Yoğunluk(gr/cm ³)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik(HRC)
%92.5W.%5.6Ni.%2.4Fe	17,5-18,00	600	15-25	850-950	29-35

Delici parça toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir. Geometrisi silindirik ve küt burunlu olarak ifade edilebilir. Delicinin görseli Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 6 - Tungsten alaşımı parça (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey görüntüsü.

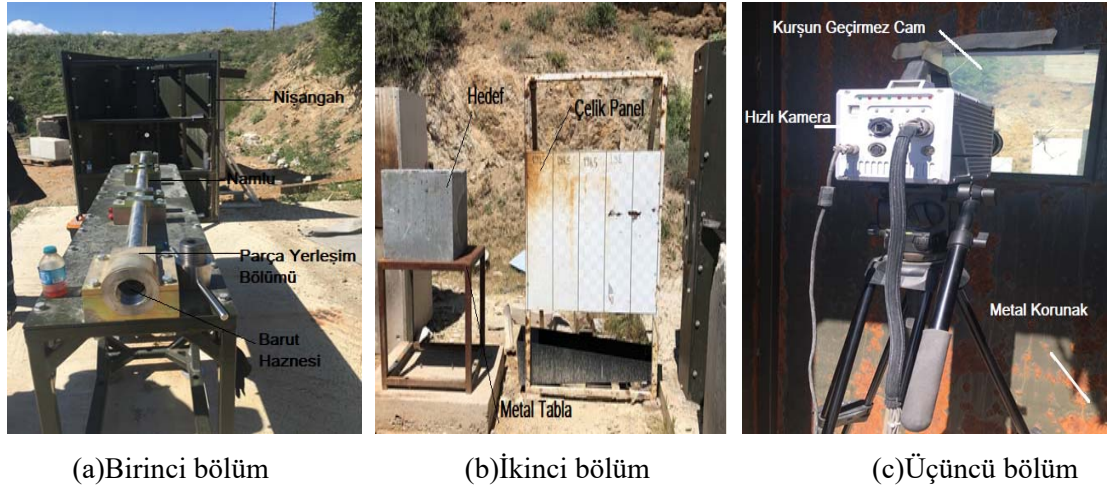
Balistik testlerde kullanılan tungsten ağır alaşımı delici parçaların geometri, ağırlık ve mekanik özellikleri ile ilgili bilgiler Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6 - Tungsten delici parçaların özellikleri.

Sıra No	Boy(mm)	Çap(mm)	Kütle (gr)	Sertlik (HRC)
1	20	14	56,64	32
2	20	14	53,83	32
3	20	14	56,33	32
4	20	14	56,49	30
5	20	14	54,08	35
6	20	14	54,08	35

3.3. Barut Silahı Test Düzenegi ve Özellikleri

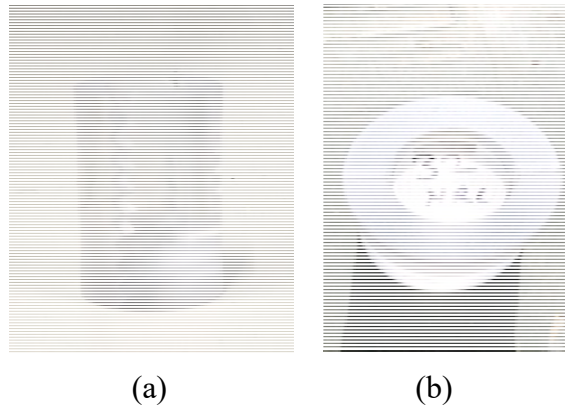
Barut silahı test düzenegi birinci bölüm barut silahı, ikinci bölümü hedef bölgesi ve üçüncü bölüm hızlı kamera ölçüm bölgesinden oluşmaktadır. Düzenek görselleri Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 7 - Barut Silahı Test Düzeneği

Hedef bölgesinde, hedef ile barut silahının yükseklik seviyesini ayarlamak için hedef yapısının yerleştirildiği metal tabla ve hız verisini ölçmek üzere ayarlanmış özel çelik panel bulunmaktadır. Çelik panel 1000 mm uzunluğunda, 200 mm aralıklarla markalanmış ve hızlı kameranın görüntü açısında yer almaktadır. Çelik panel parçanın hızının ölçümlenebilmesi için yol verisini sağlamak üzere düzenekte yer almaktadır. Barut silahı test düzeneğinin üçüncü ve son bölümü ise barut silahı ve hedef bölgesine dik konumlandırılan ve geniş açıyla görüntü alabilen hızlı kamera sistemidir.

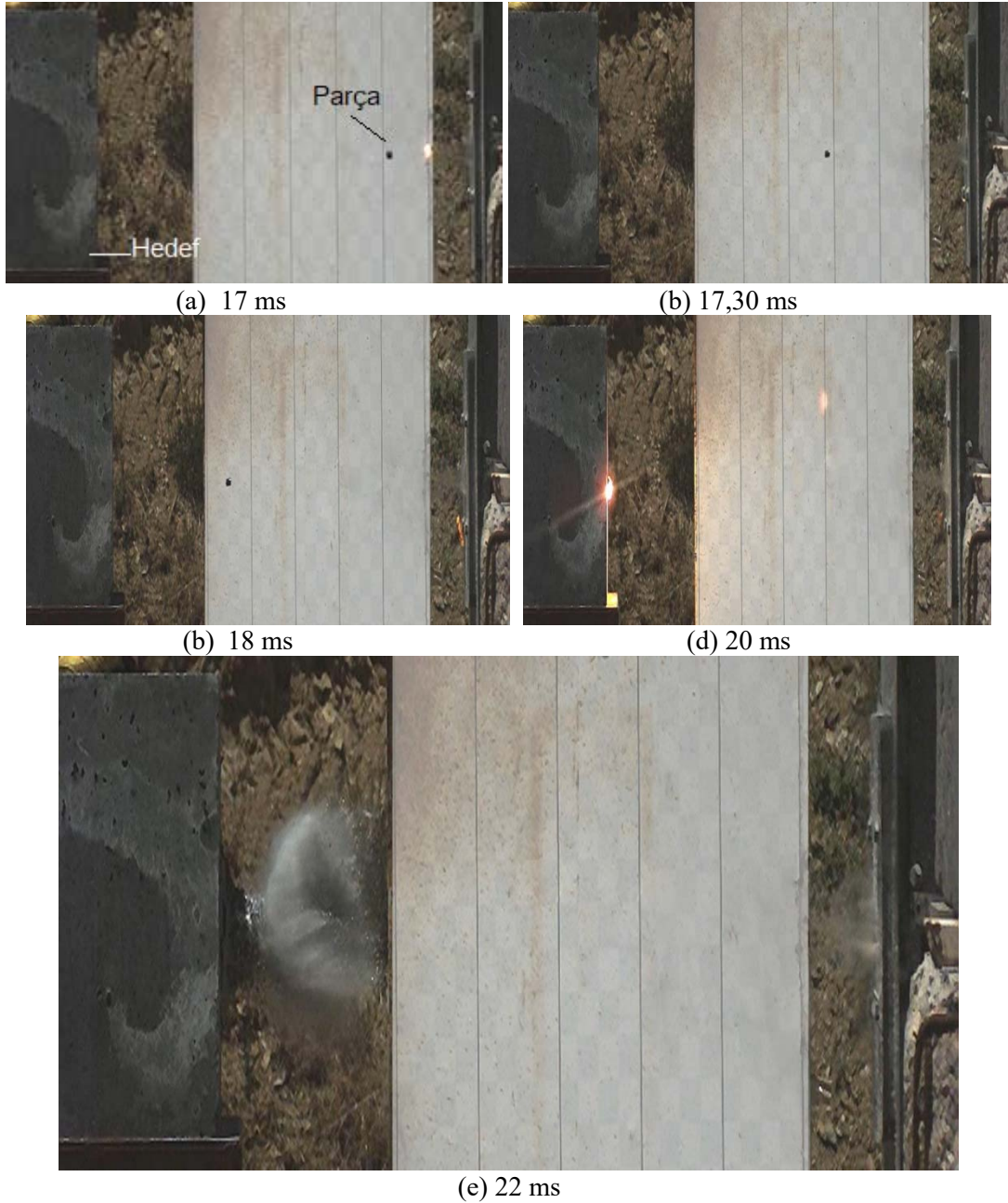
Barut silahı barutun yanması ile oluşan itki kuvvetinin parçanın namlu içinde hızlandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Test düzeneğindeki namlu çapı 25 mm ve parçanın çapı ise 14 mm'dir. Tungsten ağır alaşımı parçanın çapının namlu çapından daha düşük değere sahip olması ve namlu içinde sürtünmeye bağlı hasar oluşturmaya karşı testlerde sabo kullanılmıştır. Sabo dış çapı 25 mm, iç çapı 14,5 mm ve 25 mm boyundadır ve plastik malzemeden üretilmiştir. Sabo namludan çıktıktan sonra hedefe çarpmadan önce uçuş sırasında delici parçadan ayrılmakta ve genellikle nişangâh tarafından tutulmaktadır. Sabo ve atış öncesi parçanın sabo içinde görsel Şekil 8'de yer almaktadır.



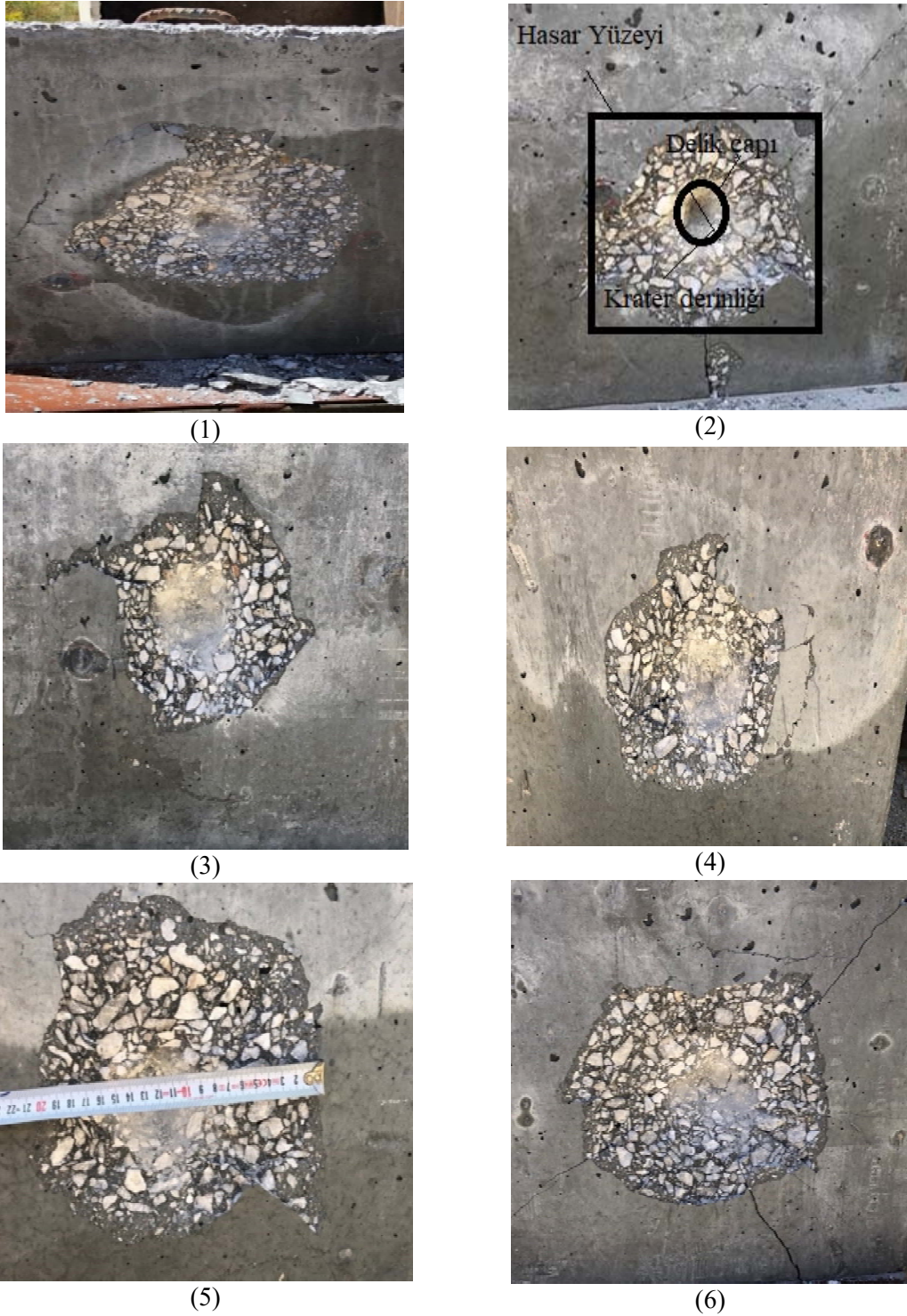
Şekil 8 - (a) Sabo görseli, (b) Atış öncesi parça görseli.

3.4. Balistik Test Aşamaları ve Sonuçları

Yüksek dayanımlı betondan (125 MPa basınç dayanımında donatı veya fiber katkısız) 500x500x500 mm ebatlarında üretilen küp hedefe, 14 mm çap ve 20 mm boyda silindir 6 adet tungsten ağır alaşımı delici parça çarptırılmıştır. Hız ölçümü hedef bölgesinde yer alan çelik panel (1000 mm uzunluklu ve 200 mm aralıkla markalanmış) ve hızlı kamera aracılığıyla sağlanmıştır. Hızlı kamera ms zamanda fotoğraf çekmektedir. Parçanın 200 mm aralıktaki uçuşu sırasında çekilen fotoğraf sayısına göre zaman bilgisi elde edilmiştir. $Yol = hız \times zaman$ bağıntısı dikkate alınarak, sırasıyla mesafe, hız ve zaman ilişkisine uygun biçimde hız verisi ölçümlenmiştir. Buna göre, beş test çalışmasında barut miktarı 20 gr olarak uygulanmış ve hız verisi 795-860 m/s aralığında ve altıncı (son) test çalışmasında barut miktarı 5 gr artırılarak 25 gr olarak kullanılmış ve hız verisi 934 m/s ölçümlenmiştir. Atışın zamana bağlı çekimi Şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9 - 5 nolu balistik testin zamana bağlı kaydedilen görüntüleri.



Şekil 10 - YDB hedef numunelerin test sonrası görüntüleri.

Barutun ateşlenmesi ile tahrik edilen tungsten ağır alaşımlı parça hızlı kameranın tetiklenmesi sonrasında namlunun uç kısmından barut silahını terk edip yaklaşık 17. ms’de görüntülenmiştir. Sabo delici parçadan namlu bitiş bölgesi ile nişangâh arasında ayrılmış ve nişangâh tarafından tutulmuştur. Parça 17-20 ms aralığında x yönünde (zemine paralel) ve açı değişimi olmaksızın serbest uçuşunu sürdürmüştür. Parça 20. ms’de hedefe ilk temasını gerçekleştirmiş ve hedefe

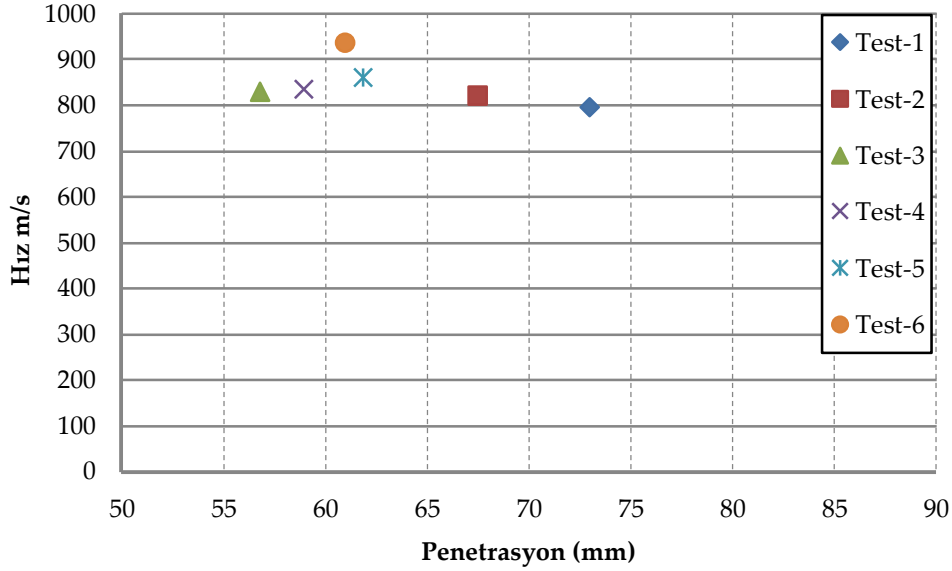
penetre olmaya başlamıştır. Bu aşamada çarpmadan kaynaklı olarak kıvılcım kümesi oluşmuştur. 20-22 ms aralığında delici parça hedef içindeki ilerlemesini sürdürmüş ve 22. ms'de hedeften beton parçaları koparak penetrasyon sonlanmıştır. Test sonrasında hasar yüzeyi, krater derinliği, penetrasyon derinliği ve delik çapı belirlenecektir. İfade edilenler sırasıyla, çarpan parçanın yüzeyde oluşturduğu deformasyon hasar yüzeyi alanı, x yönünde (zemine paralel) hedefe çarpan parçanın beton içinde z yönünde oluşturduğu deformasyon krater derinliği, x yönünde hedefte oluşan deformasyon penetrasyon derinliği ve çarpan parçanın hedefte oluşturduğu deliğin çapı ise delik çapı olarak tanımlanmaktadır. Hedeflerin balistik test sonrası oluşan hasar görüntüleri Şekil 10'da ve sonuç bilgileri Tablo 7'de yer almaktadır.

Tablo 7 - Balistik test sonuç tablosu.

Hedef no	Hız(m/s)	Penetrasyon(mm)	Hasar Yüzeyi(mm)	Delik Çapı(mm)	Krater (mm) derinliği
1	795	73,00	250X230	20,00	70,00
2	820	67,51	200X230	25,70	58,25
3	828	56,84	170X200	26,14	62,23
4	835	59,00	230X210	21,00	63,00
5	860	61,88	200X230	28,20	62,15
6	934	61,00	240X250	24,00	57,00

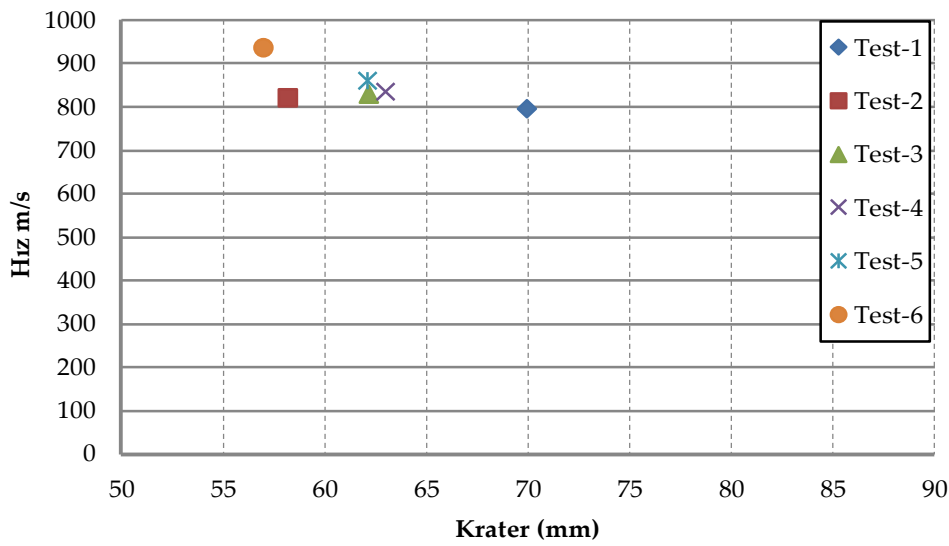
Şekil 10'da yer alan hedef hasar görüntüleri incelendiğinde, çarpma sırasında parçanın çarptığı bölgeye yakın olarak radyal gerilme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Radyal gerilme çatlakları parçanın ilk temas anında çarpma bölgesinde oluşan çatlaklardır. Bu tür çatlaklar genellikle gevrek hedef yapılarında görülmektedir. Çatlaklar süresiz ve derin değildir. YDB gevrek malzeme olması nedeniyle radyal gerilme çatlaklarına bağlı olarak çimento hamuru yüzeyden sıyrılmıştır. Agregalarda ise yüksek oranda tahribat oluşmadığı görülmektedir. Belirtilen bölge hasar yüzeyi olarak ifade edilebilir. Balistik test çalışmasında hasar yüzeyi tüm hedefler için 170X250 mm aralığında ölçümlenmiştir. 2 ve 6 nolu hedefte daha belirgin halde radyal gerilme çatlaklarına ilave olarak kesme çatlakları da oluşmuştur. Çarpma olayında yüzeyde oluşan ve ilerleyen basınç gerilme dalgaları, tersinir olarak çekme gerilme dalgası olarak yansımaktadır. Bu durumda, oluşan çekme gerilme değerinin betonun çekme gerilmesi sınırını aşması sonucu kesme çatlakları görülebilir. Kesme çatlakları sürekli ve hedefle yaklaşık 45° açı yapan ve derin olmayan biçimde oluşmuştur. Bütün hedeflerde üretim şartları aynı olmasına rağmen, 6 nolu hedefe daha yüksek hızda ve daha sert parçanın fırlatılması sonucu kesme çatlaklarının oluştuğu değerlendirilmektedir. Parçanın süneklik yapısı çarpma üzerinde etkinlik sağlayan bir diğer parametredir. 1-6 nolu hedeflere çarptırılan parçanın çapı 14 mm'dir. Hedeflerde ölçülen delik çapı 20-28 mm aralığındadır. Çarpan parça, çapının yaklaşık 2 katı ölçüsünde hedefte delik çapı hasarı oluşturmuştur. 1-6 nolu hedeflerde parçanın penetre ettiği bölgede yer alan çimento hamuru ve agregalardan kopmalar gerçekleşmiştir. Hedefin kesitinden ölçülebilen değer krater derinliği olarak ifade edilmektedir. Hedef yapılarında donatı (inşaat çeliği) veya fiber katkıları kullanılmamıştır. Bu tip katkıları, çarpma esnasında oluşan basınç dalgalarının çekme dalgası olarak yansması sonucu betonun zayıf olan çekme davranışının iyileştirilmesine yönelik görev almakta, betonun dağılmasını önlemekte ve hasar yüzeyinin azaltılmasında olumlu katkılar sunmaktadır. Balistik testlerde hedef yapılarında yüzeyel hasarlar meydana gelmiş ve penetrasyon ile krater derinliğinin 3 katı kadar hasar yüzeyi oluşumu gözlemlenmiştir.

Altıncı testte ulaşılan hız önceki testlere oranla daha yüksek 934 m/s olarak ölçümlenmiştir. Altıncı testte barut miktarının artırılmasının benzer ağırlıktaki parçanın hızlandırılmasına olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Hızın artırılmasının hedefe etkisi kinetik enerji değişimi ile ilişkilidir. Hızın artmasıyla oluşan fazla kinetik enerjinin hedef tarafından absorbe edilmesi sonucu genel olarak penetrasyon derinliğinin artırdığı ve değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Test sonuçlarına ait hız penetrasyon ilişkisi Şekil 11’de yer almaktadır.



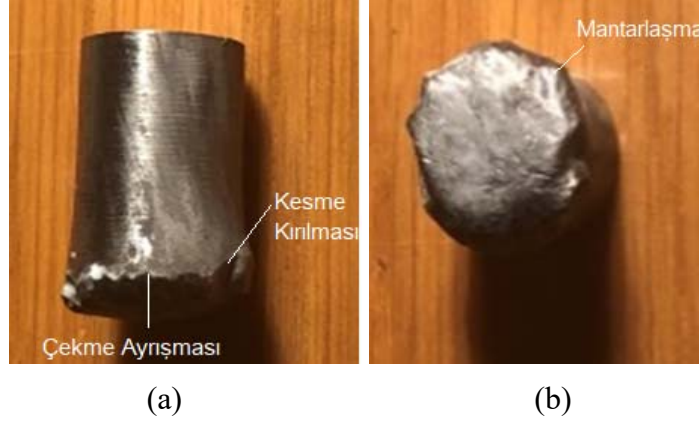
Şekil 11 - Hız-penetrasyon ilişkisi.

Penetrasyon derinliği ilişkisine benzer olarak hızın artması ile birlikte numune benzer numune koşullarında (ağırlık ve sertlik) hedef betonlarda krater derinliğinin arttığı gözlemlenmektedir. Parçanın sivri uçlu olmaması ve silindirik küt burunlu olması nedeniyle ölçülen penetrasyon derinliği ve krater derinliği ölçümleri benzer aralıkta sonuçlanmıştır. Hız-krater derinliği ilişkisi Şekil 12’de ifade edilmektedir.



Şekil 12 - Hız-krater derinliği ilişkisi.

Balistik test çalışmasında hedef gibi tungsten ağır alaşımı delici parçada da hasarlar oluşmuştur. Delici parçanın test sonrası görünümü Şekil 13'te yer almaktadır.



Şekil 13 - Tungsten parçanın test sonrası görüntüsü (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey.

Delici parçada, yüzey bölgesinde kesme kırılması, çekme kuvvetlerinin etkisiyle çekme ayrışması ve mantarlaşma oluşumu gözlemlenmiştir. Hedefin 500 mm kalınlıkta (ince olmaması) nedeniyle yapraklanma oluşmadığı görülmektedir.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

4.1. Holmquist Johnson Cook Malzeme Modeli

Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli genellikle beton malzemelerin çarpma, darbe basıncı ve patlamaya karşı davranışının belirlenmesinde kullanılmaktadır. HJC modeli elastik-viskoplastik model olarak Holmquist tarafından geliştirilmiştir [20]. HJC modeli yüksek gerinim, gerinim hızı ve yüksek basınç altında betonun davranışının tespiti için son günlerde sıklıkla tercih edilen malzeme modelidir. Bu malzeme modeli ticari sonlu elemanlar yazılımı olan Ls-Dyna programına 1997 yılında *Mat-Johnson-Holmquist-Concrete (111#) olarak eklenmiştir [21]. HJC model olarak dayanım, hasar ve Eos (Equation Of State) bölümlerinden oluşmaktadır. Alt başlıklarda malzeme modeli ve matematiksel açıklamalarına yönelik bilgilere yer verilmektedir.

4.1.1. Dayanım

HJC malzeme modelinin matematiksel formu aşağıdaki gibidir;

$$\sigma^* = [A[1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$

Denklemden gerilme ve basınç için gösterilenler $\sigma^* = \sigma/f_c$ ve $P^* = P/f_c$ sırasıyla normalize edilmiş gerilme ve basınç değerlerini, ara denklemde kullanılan f_c betonun karakteristik basınç dayanımını, σ eşdeğer gerilmeyi, P gerçek basıncı ifade etmektedir.

Denklemden diğer ifade edilenler, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}^*$ birimsiz nicelik olan normalize edilmiş gerinim hızını, $\dot{\epsilon}$ gerinim hızını, $\dot{\epsilon}_0$ referans gerinim hızını ifade etmekte ve hesaplamalarda genellikle 1 s^{-1} olarak değerlendirmeye alınmaktadır. $T^* = T/f_c$ normalize edilmiş çekme gerilmesi denklemini, T çekme gerilmesini, f_c betonun karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir. S_{max} maksimum gerilmedir.

Denklemden bulunan sabitler A, B, C ve N ise, sırasıyla dayanıma, basınca, gerinim hızına ve basınç sertleşmesine bağlı parametrelerdir.

4.1.2. Hasar

HJC modelinde çarpma sonrasında hasar durumu aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_{\mu_p}}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (2)$$

Burada $\Delta \varepsilon_p$ efektif plastik gerinim değişimi ve $\Delta \varepsilon_{\mu_p}$ sabit basınç altında plastik hacimsel gerinim değişimi, $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ ise kırılma gerçekleşene kadar sabit basınç altında toplam plastik gerinimi ifade etmektedir.

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq EFMIN \quad (3)$$

Bu ifadede EFMIN malzeme sabitidir.

4.1.3. Eos

HJC modelinde çarpma anında betona aktarılan basıncın, beton içindeki boşlukları kapatarak kompakt hale gelmesi durumu EOS (durum denklemi) ile sağlanmaktadır. EOS üç aşamada gerçekleşmektedir.

Birinci faz elastik durum olarak tanımlanmaktadır. Negatif basınç ile elastik limit noktası aralığında malzeme lineer elastik formdadır.

$$P = K\mu; P < P_{basl} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan ifade edilen, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ olarak hesaplanmakta olup, burada ρ_0 ilk yoğunluk, ρ ise o anki yoğunluk, K hacimsel modülüdür. $K = P_{basl}/\mu_{basl}$ olarak hesaplanmaktadır. P_{basl} elastik limit noktasında oluşan hacimsel gerinim μ_{basl} olarak ifade edilmektedir.

İkinci faz betonun içinde yer alan boşlukların tam olarak kapatılmasına kadar geçen geçiş aşamasıdır. Bu aşama μ_{kilit} ve P_{kilit} noktasına erişinceye kadar devam etmektedir.

İkinci faz aşağıda yer alan denklem ile ifade edilebilir;

$$P = P_{basl} + K_{kilit}(\mu - \mu_{basl}) \quad (5)$$

$K_{kilit} = (P_{kilit} - P_{basl})/(\mu_{pkilit} - \mu_{basl})$, μ_{pkilit} sıkışmış durum P_{kilit} anındaki hacimsel gerinimdir.

Son ve üçüncü aşama betonun içinde hiçbir boşluğun kalmadığı kompakt durum olarak açıklanabilir.

$$P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \quad (6)$$

Denklemden yer alan, $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{kilit})/(1 + \mu_{kilit})$ hacimsel gerinim dönüşümünü, $\mu_{kilit} = \frac{\rho_{kompakt}}{\rho_0} - 1$, $\rho_{kompakt}$ betonun içinde hiç boşluk kalmadığı kompakt haldeki yoğunluğu ve K_1, K_2, K_3 malzeme sabitlerini ifade etmektedir.

4.2. Sayısal Analiz Çalışmaları

Sayısal analiz çalışmalarında balistik testlerde yer alan koşulların modellenmesi ve balistik test sonuçlarına uygun verilerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Analizler Ls-Dyna yazılımı ve ANSYS program çözücülerinin kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Balistik testlerle aynı koşulların sağlanması açısından hedef yapısı *Mat-Johnson-Holmquist-Concrete (111#) malzeme modeli kullanılarak 500x500x500 mm ebatlarında modellenmiştir. Modelleme iki bölge halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci bölge, tungsten ağır alaşımı delici parçanın en yıkıcı etkiyi gösterdiği 100x100 mm'lik yüzey alanı ile 250 mm derinlikteki bölge SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) ağırsız yöntem kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntemde, öncelikle 0,1x0,1x0,1 mm ebatlarında küp elemanlar oluşturulmuş, küpün her bir köşesini işaretleyen noktalar atılmış, SPH dönüşümü ile elemanlar yok edilmiş ve belirli bir yarı çapta birbirleriyle etkileşim halinde noktalar modellenmiştir. Hedef betonunda SPH bölgesi dışında kalan ve delici parçanın etkisini daha az göstereceği öngörülen alan ikinci bölge olarak tasarlanmıştır. Bu bölge 10x10x10 mm'lik küp elemanlara bölünerek Lagrange-Lagrange çözüm yöntemine uygun modellenmiştir. Modellemede, son olarak SPH ve Lagrange kontakları gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz çalışmalarında, balistik testlerde kullanılan tungsten ağır alaşımı delici parça 20 mm boy ve 14 mm çapta silindirik geometrilidir, 2 mm aralıklarla heksahedron bölümlenerek modellenmiştir. Heksahedron bölümlenmenin düşük enerjili durumlarda bile yüksek deformasyonu benzetimlemeye olanak sağladığı ve doğru sonuçlar verdiği bilinmektedir[22]. Tungsten ağır alaşımı delici parça, *Math_Johnson_Cook (015) malzeme modeli ve Lagrange-Lagrange çözücüsü kullanılarak analiz edilmiştir. Beton içerisinde yapısal boşluklar bulunmaktadır. Çarpma anında, hedefte oluşan basıncın ve boşlukların tamamen doldurulduğu kompakt halin oluşumunun modellenmesi için durum denklemi kullanılmıştır. Analizde, HJC malzeme modeli ile uyumlu çalıştığı bilinen *EOS_GRUNEISEN durum denklemi tercih edilmiştir. Malzeme model parametreleri ve sayısal verileri Tablo 8-10'da yer almaktadır.

Tablo 8 - YDB' nin parametre tablosu.

ρ (kg/m ³)	G,GPa	A	B	C	N	f _c ,MPa	T,MPa	EPS ₀
2700	33,2	0,30	1,50	0,01	0,59	135	8,4	1,00
E _{fmin}	S _{fmax}	P _{bası} ,GPa	P _{kilit} ,GPa	D1	D2	K ₁ ,GPa	K ₂ ,GPa	K ₃ ,GPa
0,001	12,5	0,162	0,000095	0,003	1,000	16,2	-40	26

Tablo 9 - Tungsten ağır alaşımı parça parametre tablosu.

MID	RO	G	A	B	N	C	M
9	1,70E+04	1,60E+11	1,506E+09	1,77E+08	1,20E-01	1,60E-02	1,00E+00
TM	TR	EPSO	CP	SPALL	D2	D3	D4
1,72E+03	3,00E+02	1,00E+00	1,34E+02	2,00E+00	3,30E-01	-3,00E+00	4,20E-03
EFMIN							
1,00E-06							

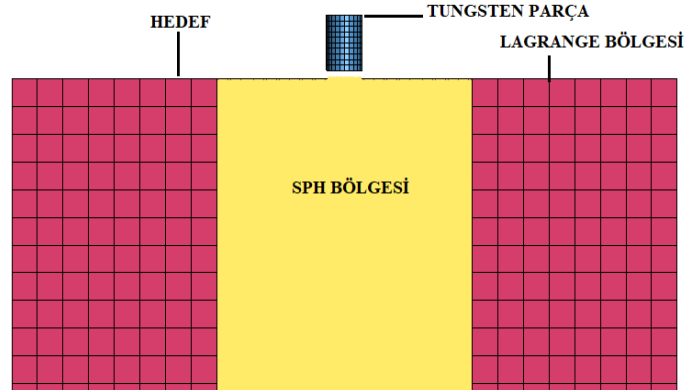
Tablo 10 - Durum denklemi parametre tablosu.

EOSID	C	S1	2	3	GAMAO	A	E0
9	1,70E+04	1,60E+11	1,506E+09	1,77E+08	1,20E-01	1,60E-02	1,00E+00

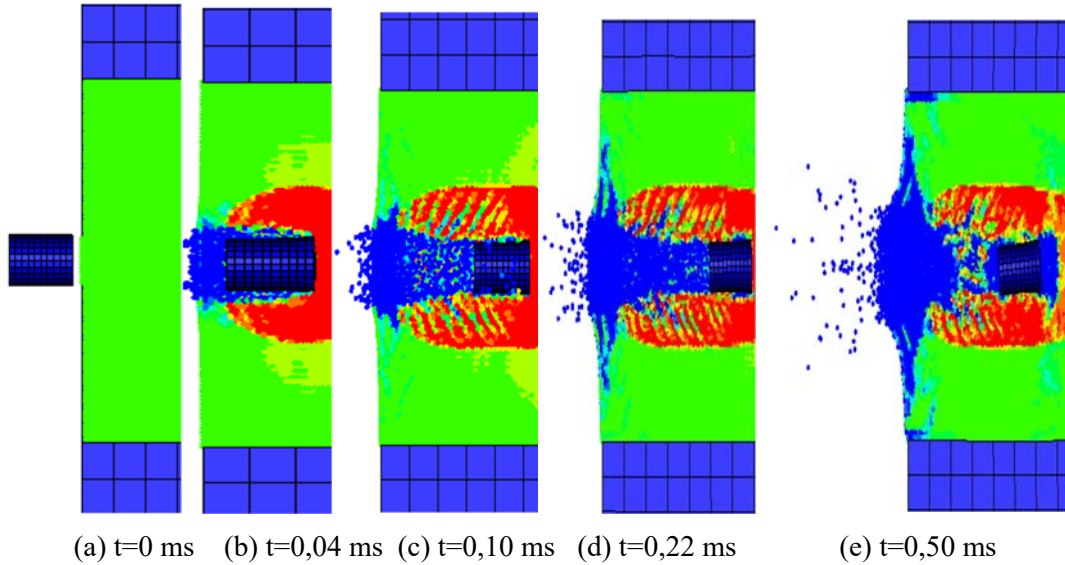
VO

0.0

Modelde hedef x, y yönlerinde rijit ve sabit olarak tasarlanmıştır. Delici parçanın hedefe çarpacağı yön z yönü olarak belirlenmiştir. Parça ve hedefin birlikte gösterildiği model görseli Şekil 14’de yer almaktadır.



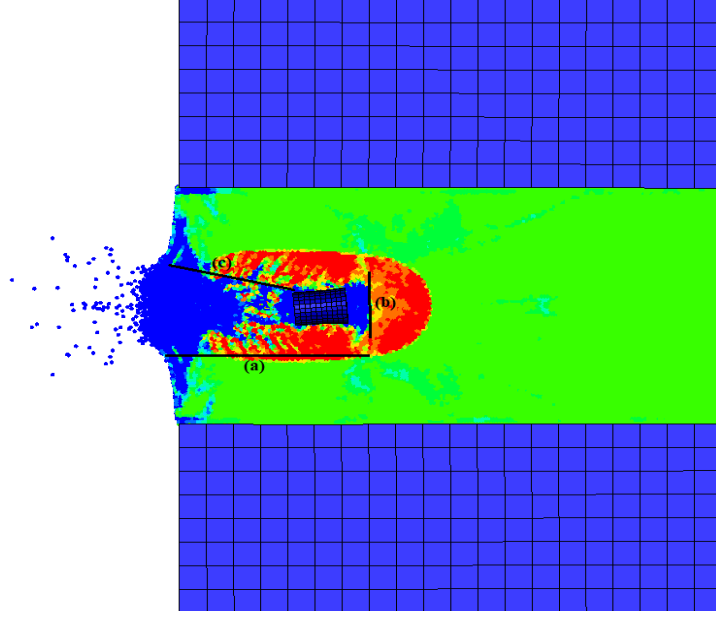
Şekil 14 - Modelin Görünüşü.



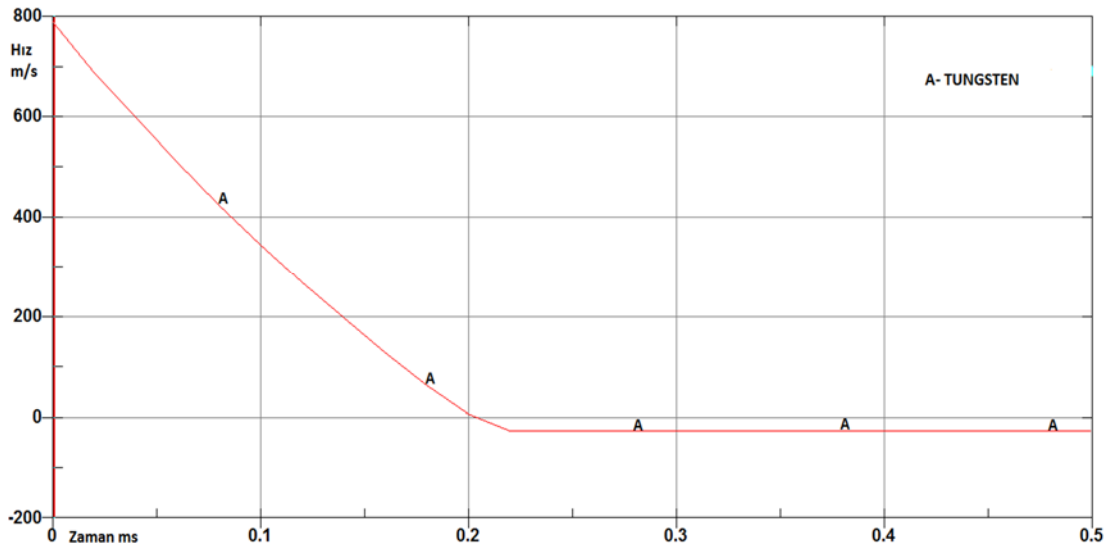
Şekil 15 - 790 m/s hızda ve zamana bağlı tungsten parçanın hedefe çarpma prosesinin nümerik görseli.

Sayısal analiz, $t=0$ ms ile $t=0,50$ ms zaman aralığında koşturulmuştur. Analizin zamana bağlı görünüm aşamaları Şekil 15’te yer almaktadır. 0-0,04 ms aralığında penetrasyon başlamış ve parçada herhangi bir deformasyon oluşumu gözlenmemiştir. 0,04-0,10 ms zaman aralığında penetrasyon derinliği, yoğunluk değişiminde artış ve hedeften parça kopması gerçekleşmiştir. Aynı zaman aralığında, delici parçanın ön bölümünde mantarlaşma oluşumunun başladığından söz edilebilir. 0,10-0,22 ms aralığında hedeften kopan parçalar ve kırılmalar hedef yüzeyinde genişlemiştir. 0,22. ms’de penetrasyon maksimum seviyeye erişmiştir. Hedef yüzeyindeki

çatlaklar ve kırıklar çarpışma bölgesinin tümüne yayılım göstermiş haldedir. Sayısal analizin sonlandığı 0,50 ms’de delici parçanın düşük seviyelerde hedefle açığı yaptığı, bir miktar geri tepmeye uğradığı ve şekil değiştirmesinin tamamlandığı görülmektedir. Bu anda, delici parça tarafından aktarılan kinetik enerjinin, hedef tarafından tamamen sönümlendiği ve analizin sonlandığı ifade edilebilir. Bu analizin, penetrasyon ve krater derinliği, delik çapının ölçüm bölgesi ve sonuçlarına ilişkin görsel Şekil 16’da ve tungsten ağır alaşımı parçanın hız-zaman ilişkisi Şekil 17’de yer almaktadır.



Şekil 16 - 790 m/s’de koşuturulan analizin (a) Penetrasyon derinliği 68,10 mm,(b) Delik çapı 27,20 mm,(c) Krater derinliği 73 mm görseli.



Şekil 17 - Tungsten hız-zaman ilişkisi.

Balistik test çalışmasında farklı hızlara erişim sağlandığı bilinmektedir. Modele entegre edilen parametre değerlerinin test sonuçlarına yakınsaması sonucu, farklı hızlardaki davranışın ve sonuç aralığının denetlenmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Modelleme sabit, başlangıç koşulu hız verisinin 820 m/s olarak değiştirilmesiyle analiz 2, hız verisinin 850 m/s olarak değiştirilmesiyle

analiz 3 ve son olarak balistik testlerde erişilen en yüksek hız olan 930 m/s hız ile analiz 4 koşturulmuştur. Hızların kademeli olarak artırılmasıyla koşturulan analizlerde, hedef ve delici parçanın davranışında yüksek dereceli değişim görülmemiştir. Genellikle hızın artırılmasıyla penetrasyon ve krater derinliğinin lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hızın artırılmasının delik çapı ölçümlerinde belirgin değişime yol açmadığından ifade edilebilir. Sayısal analizlere ait penetrasyon derinliği, delik çapı ve krater derinliği ölçüm sonuçları Tablo 11’de yer almaktadır.

Tablo 11 - Analiz sonuç tablosu.

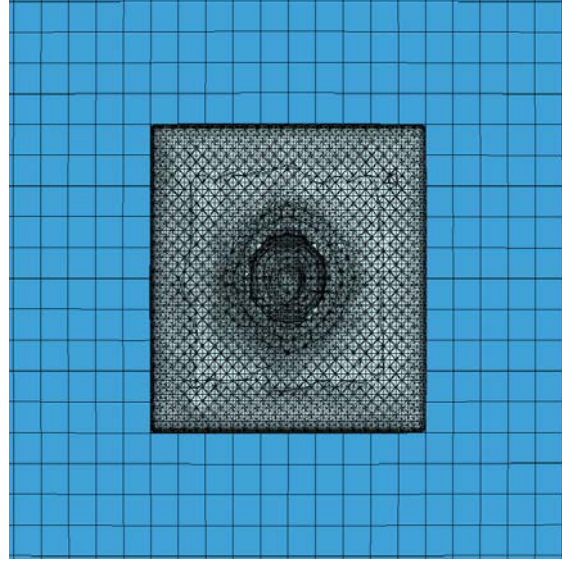
Analiz no	Hız(m/s)	Penetrasyon(mm)	Delik Çapı(mm)	Krater (mm) derinliği
1	790	68,10	23,01	73,00
2	820	71,65	24,50	75,51
3	850	72,50	25,08	75,58
4	930	72,80	26,80	75,70

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Balistik ve sayısal çalışmalarına ilişkin hedef yapısının kıyaslama görseli Şekil 18 ve tungsten ağır alaşımı delici parçanın değişimi Şekil 19’da yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 18 - (a) 4 nolu balistik test hasar görüntüsü, (b) 1 nolu sayısal analiz hasar görüntüsü.



Şekil 19 - YDB. (a) Orijinal delici , (b) Delici hasar görüntüsü,(c) Sayısal analiz hasar görüntüsü.

Balistik ve sayısal çalışmaların bütün halde sonuç değerlendirmeleri;

- Balistik testlerde hedefin üretim kaynaklı yoğunluk değişimleri, delici parçanın çarpma açısı değişimleri ve düşük düzeyde de olsa delici parçaların ağırlık ve sertlik değerlerinin farklı olması, sayısal çalışmalarda erişilen penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı ölçümlerine benzer aralıkta fakat farklı sonuçlanmasının üzerinde etki göstermiştir.
- Balistik test çalışmasında çarpan delici parçalar genel olarak hedeften sekerek ayrılmış ve delici parçada oluşan kinetik enerjinin tamamı hedefe aktarılamamış ve parça üzerinde kalarak delicinin deforme olması için harcanmıştır. Sayısal çalışmada ise delici parça bütünüyle hedef içinde kalmış ve tüm kinetik enerjisini hedefe aktarmıştır.
- Balistik test çalışmasında, hedef yapısından beton parçalarının kopmasıyla oluşan hasar yüzeyi, delik oluşumu ve krater yapısının olduğu görülmektedir. Sayısal çalışmada ise, SPH ile modellenen bölümlerde parça kopması, delik profili ve krater yapısı benzetimlenmesi sağlanabilmiştir. Ancak Lagrange-Lagrange çözücüsü ile bölümlenen bölgede, bölümlene aralığının geniş olması ve çarpma etkinlik alanının dışında kalması nedeniyle, balistik test görüntülerinde gözlemlenen yüzeysel çatlaklar sayısal çalışma ile benzetimlenememiştir.
- Sayısal çalışmalarda Lagrange-Lagrange çözücüsünde yüksek deformasyonlarda elamanın silinerek kaybolması ve ancak malzemenin hacminin sabit kalması zorunluluğu sebebiyle hasar bölgesi dışında kalan alanlarda oluşan yüzeysel çatlaklar ve kesme kırılmalarının görselleştirilememesine neden olduğu değerlendirilmektedir.
- Balistik test görüntülerinde genelde çimento hamuru yüzeyden sıyrılmış ve çimento hamurundan kütleli kayıplar meydana gelmiştir. Üretimde kullanılan kaba agregalar, beton dayanımını artırarak penetrasyon derinliği ve hasar yüzey alanın azaltılması yönünde önemli katkılar sunmaktadır. Sayısal analizlerde, agrega ebatlarına (ince, kaba vb.) yönelik gerçek durumu yansıtacak ölçüde agrega dağılımı modellenmesi sağlanamamıştır. Bu nedenle, malzeme modeli denkleminde çarpma ile oluşan basınç EOS (durum denklemi) ile betonun kompakt yapıya ulaştığı değerlendirilerek çözümleme sağlanmıştır.
- Delici parçanın ön yüzeyinde mantarlaşma ile genişleme olduğu ve bir miktar kırılmaya maruz kalarak kesit kaybına uğradığı görülmektedir. Sayısal analizde ise delici parçanın ön yüzeyinde mantarlaşma ile genişleme oluşumu benzetimi sağlanmıştır. Ancak delici parçanın modellenmesinde, Lagrange-Lagrange çözümü ve eleman boyutlarının büyük olması nedeniyle kırıklar görselleştirilmemiştir.

Sonuç olarak sayısal analizler, balistik test çalışmaları sonuçlarına hedef, çarpan parça hasar görüntüsü, penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı ölçüm değerleri kapsamında benzer aralıkta ve yakınsayan sonuçlar vermiştir. Gelecekte bu tip Yüksek Dayanımlı Betona donatı veya fiber katkıları ilave edilerek daha yüksek hızlarda atışlar deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilerek sonuçlar değerlendirilebilir ve endüstriyel uygulamalar desteklenebilir.

Semboller

σ^*	normalize edilmiş gerilme
σ	gerilme
f_c	betonun karakteristik basınç dayanımı
P^*	normalize edilmiş basınç
P	basınç
ε^*	normalize edilmiş gerinim hızı
$\dot{\varepsilon}_0$	referans gerinim hızı
T^*	normalize edilmiş çekme gerilmesi
T	betonun çekme gerilmesi
S_{max}	maksimum gerilme
ε_p^f	kırılma anına kadar plastik gerinim
μ_p^f	kırılma anına kadar hacimsel gerinim
$\Delta\varepsilon_p$	efektif plastik gerinim değişimi
$\Delta\varepsilon\mu_p$	plastik hacimsel gerinim değişimi
ρ_0	ilk yoğunluk
ρ	yoğunluk
K	bulk modülü
$P_{bası}$	elastik limitteki basınç
$\mu_{bası}$	elastik limitteki hacimsel gerinim
P_{kilit}	kompakt durumda basınç
μ_{kilit}	kompakt duruma kadar oluşan gerinim
μ_{kilit}	kompakt durumda gerinim
$\rho_{kompakt}$	kompakt durumda betonun yoğunluğu
$\bar{\mu}$	hacimsel gerinim dönüşümü
E_s	statik elastisite modülü
ν	poisson oranı
G	kayma modülü
ε	hata terimi

Kaynaklar

1. Ahmet Reha GÜNAY, “Çok Yüksek Dayanımlı Bir Betonun Yüksek Gerinim Hızlarındaki Davranışının Deneysel Ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi”, doktora tezi, Başkent Üniversitesi, 2021.
2. M.H. Zhang, V.P.W. Shimb, G. Lua, C.W. Chewa, “Resistance of high strength concrete to projectile impact”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.31, no.1, 2005, pp 825–841.
3. Fan Wan, Zhigang Jiang, Qinghua Tan, Yangyueye Cao, “ Response of steel tubeconfined concrete targets to projectile impact”,*International Journal of Impact Engineering*, vol. 94, no.1, 2016, pp 50-59.
4. R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, “ Energy absorption capacity of a sustainable ultra high performance fibre reinforced concrete in quasi-static mode and under high velocity projectile impact”, *Cement and Concrete Composites*, vol.68, no.1, 2016, pp.109-122.
5. A.Dawson, S. Bless, S. Levinson, B. Pedersen, S. Satapathy, “Hypervelocity penetration of concrete” *International Journal of Impact Engineering*, vol.35, no.1, 2008, pp. 1484–1489.
6. H. Wu, Q. Fang, X.W. Chen, Z.M. Gong, J.Z. Liu, “ Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320 m/s”, *Construction and Building Materials*, vol.74, no.1, 2015, pp.188–200.
7. Jason T. Gomez, Arun Shukla, “Multiple impact penetration of semi-infinite concrete”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.25, no.1, 2001, pp 965–979.
8. Joosef Leppanen,” Concrete Structures Subjected to Fragment Impacts”, doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2004.
9. ZhongCheng Mu, Wei Zhang, “An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.38, no.1, 2011, pp. 770-778.
10. Petr Máca, Radoslav Sovják, Petr Konvalinka,” Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.63,no.1, 2014, pp. 158-163.
11. L. Guo a, Y. Hea, X.F. Zhang, C.X. Pang, L. Qiao, Z.W. Guan, “Study mass loss at microscopic scale for a projectile penetration into concrete”,*International Journal of Impact Engineering*, vol.72,no.1, 2014, pp. 17-25.
12. H. Wu, Q. Fang, J. Gong, J.Z. Liu, J.H. Zhang , Z.M. Gong, “ Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC”,*International Journal of Impact Engineering*, vol.84, no.1, 2015, pp. 38-53.
13. Chuang Liu, Xianfeng Zhang , Haihua Chen, Jipeng Wang, Haiyang Wei, Wei Xiong, “Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.138, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103482>.
14. Jian Liua, Chengqing Wua, Yu Sua, Jun Lia, Ruizhe Shaob, Gang Chenc, Zhongxian Liub,“Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts” *Engineering Structures*, vol.173, no.1, 2018, pp. 166–179.
15. Lavan, O. , De Stefano, M. , “Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures” *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, Springer, 2013, [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9789400753761>.

16. Mario Lucio Puppia, Linda Giresinia, Fabio Doveria and Mauro Sassub, “ Structural irregularity: The analysis of two reinforced concrete (r.c.) buildings”, Engineering Solid Mechanics, vol.7, no.1, 2019, pp. 1-23.
17. “Tungsten heavy alloys”, Kennametal Densalloy, Engineering Guide, 2014.
18. Lin Huang “In Situ oxide dispersion strengthened tungsten alloys with high compressive strength high strain to failure” Acta Materialia, vol.122, no.1, 2017, pp.19.
19. Hakan HAFIZOĞLU, “Tungsten ağır alaşımlarının yüksek gerinme hızlarında deformasyonunun deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılması”, doktora tezi, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, 2019.
20. Holmquist TJ, Johnson GR, Cook WH, “A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures”, 14 th international symposium on ballistic, vol.1, no.1, 1993, pp. 591–600.
21. Malvar LJ, Crawford JE, Wesevich JW, “A plasticity concrete material model for DYNA3D”, International Journal of Impact Engineering, vol.19, no.1, 1997, pp. 847–873.
22. Sjaardama, G. ,Benzley, S. , Perry, E. , Merkley, K. , Clark, B. , “A Comparison of All Hexagonal and All Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elasto-plastic Analysis.” 4th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, vol.1, no.1, 1995, pp. 179-191.

Sürdürülebilir Binalarda Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Miselyum Tuğlası

Mehmet ÖZMEN¹, Barış Yiğit CANPOLAT², Hakan KARATAY³,
Banu Yeşim BÜYÜKAKINCI⁴

ÖZET

Türkiye’de ve dünyada sürdürülebilir kaynaklara olan yönelim her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de kendini göstermektedir. Gelişen ve yükselen sürdürülebilir yeşil yapı tasarımı için geliştirilmekte olan ve kullanılmaya başlayan çok çeşitli malzemelerden biri de bu çalışmanın öznesi olan “**Miselyum Tuğlası**”dır.

Miselyum, polimer bileşimli, lifli, çoğunlukla yer altında bulunan, tamamen doğal (mantar özlü), geri dönüşümü kolay, elverişli mekanik özelliklere sahip bir malzemedir. Geleneksel yapı malzemeleriyle rekabet edebilecek özellikleriyle dış cephe giydirme ve yer kaplama, tuğla, yalıtım malzemesi ve mobilya gibi alanlarda uygulanarak dünyada kendini kanıtlayan Miselyum, Türkiye’de de tanınmakta olmasına rağmen henüz kendine alan bulamamış ve örnek teşkil edebilecek çalışmalarda kullanılmamıştır. Statik açıdan yeterli yapı sabit yüklerini azaltabilecek hafif yapılı, yüksek ısı ve ses yalıtımlı, zararlı organizmalara karşı korumaya sahip bu çevreci malzeme Türkiye’de daha iyi tanınmalı, desteklenmeli ve çeşitli sektörlerde kullanılarak yaygınlaşmalıdır.

Bu çalışma sürdürülebilir yeşil yapılaşma eğilimine dikkatleri artırmaya katkıda bulunup Türkiye’deki inşaat sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalara, çalışanlara, yöneticilere kaynak oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir yapılar, Sürdürülebilir yapı malzemeleri, Miselyum, Bitkisel mantar.

ABSTRACT

Mycelium Brick Used As a Building Material in Sustainable Buildings

The trend toward sustainable resources is evident in Turkey and around the world in the construction sector, as well as in all other sectors. Mycelium Brick, one of the various materials

1 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - mehmetozmen1@stu.aydin.edu.tr

2 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - bariscanpolat@stu.aydin.edu.tr

3 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - hakankaratay@stu.aydin.edu.tr

4 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - yesimbuyukakinci@aydin.edu.tr

being produced and used for constructing and growing sustainable eco-friendly structure design, is the subject of this research.

Mycelium is a polymer-based, fiber-based substance that was largely found underground, fully natural (fungal essence), easy to recycle, and had good mechanical properties.

Mycelium, which has proven itself in the world by being applied in areas such as exterior cladding and floor covering, brick, insulation material and furniture with its features that can compete with traditional building materials, has not yet been used in studies that can set an example, although it is also known in Turkey. This eco-friendly material is statically adequate, lightweight, thermally soundproof, and resistant to dangerous organisms, all of which can lower building constant loads. It should be better understood, promoted, and spread among Turkey's diverse sectors.

By drawing attention to the trend of sustainable eco-friendly construction, this study will provide resources for enterprises, employees, and managers in the construction industry in Turkey.

Keywords: Sustainable buildings, Sustainable building materials, Mycelium, Vegetative fungi

1. GİRİŞ

Sanayileşmiş ülkelerde çıkarılan doğal kaynakların yaklaşık %40'ı kullanılarak inşa edilen binalar, çevre üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [1]. Ortaya çıkan atıkların %45 ila %65'i inşaatlar tarafından üretilmektedir [2]. Buna ek olarak sera gazlarının %30'undan yapı malzemeleri sorumlu olup, zararlı emisyonların %18'inin malzemelerin üretim aşamasında kullanılan enerji ve ulaşımdan kaynaklandığı tespit edilmiştir [3].

Binalar karbon emisyonlarının büyük bir kısmından sorumlu oldukları ve önemli miktarda kaynak kullandıkları için çevre üzerinde önemli ve sürekli bir etkiye sahiptir. Binalar dünyanın tatlı su kaynaklarının 1/6'sını, odun kullanımının 1/4'ünü, malzeme ve enerji akışının 2/5'ini kullanmaktadır. İnşaat sektörü temel yapı malzemelerinin üretimi, nakliyesi ve montajından önemli miktarda enerji tüketmektedir. Düşük somutlaştırılmış enerji malzemeleri enerji tasarrufu sağlar ve Sera gazları emisyonlarını sınırlandırarak çevre üzerindeki etkiyi de azaltmış olur [4].

Amaç; Varlıkların tükenmesi, erozyon, çevre kirliliği, dayanıklılık, yaşam beklentisi... gibi yapı malzemeleriyle tanımlanan karmaşıklıklar belirlenerek yapılar daha ekonomik bir şekilde inşa edilmelidir. Böylece sadece geliştirme ve olumsuz yönleri azaltılmakla kalmayıp bina ömrünü de uzatır. Benzer şekilde yeniden kullanım veya ham malzemenin geri kazanımı için de tasarlanmalıdır [5].

Bu olumsuzluklara tepki ve önlem olarak Türkiye'de ve dünyada sürdürülebilir yapılaşmaya yönelim başlamış ve ilgi her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de giderek artmakta, ivmelenmektedir. Sürdürülebilir inşaat 1993'te ilk defa uluslararası bina konseyi tarafından düzenlenen inşaat sektöründeki profesyonelleri ve araştırmacıların katılımıyla tanımlanmıştır. 1994'te ki 1. Uluslararası Sürdürülebilir İnşaat Konferansında ise inşaat sektörünün sürdürülebilirlik alanındaki sorumlulukları belirlenmiştir. Buna göre sürdürülebilir inşaat konusu "Çevreyi gözetken kurallar doğrultusunda kaynakları etkili kullanarak sağlıklı inşaat çevresi oluşturmak." diye ifade edilmiştir. Daha sonra sürdürülebilir inşaat kavramını "yeşil inşaat" almıştır. Bu yeni ifadeye göre tanımlamalar yapılmaya başlanmıştır. Yeşil inşaat bir projenin çevre üzerindeki etkilerini en aza indirecek yönde yapım kurallarına uygun olarak planlanması, yönetilmesi ve geri dönüştürülebilir olması biçiminde tanımlanmıştır [6]. Takip eden yıllarda da bu alanda çalışmalar artmış ve dünya çeyrek asrı aşan tecrübe, birikim elde etmiştir.

Enerji tasarrufu, emisyon kontrolü, malzemelerin üretimi ve uygulanması, yenilenebilir kaynakların kullanımı ve yapı malzemelerinin geri dönüştürülerek yeniden kullanılması ile ilgili

acil değişiklikler gereklidir. Artan çevresel kaygılar nedeniyle yeni çevre dostu yapı malzemeleri ve uygulamalarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda hava kirliliği, biyolojik çeşitliliğin ve doğal kaynakların tükenmesi, iklim değişikliği, atık oluşumu, su kaynaklarının kirlenmesi ve tükenmesi, kentsel çevrenin bozulması acil önlem alınması gereken küresel sorunlar haline gelmektedir. Karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonlarından kaynaklanan iklim değişikliği ve küresel ısınma, insan refahı için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu tehdidi kontrol altına almak için dünyanın 2050 yılına kadar emisyonları mevcut seviyelerin yaklaşık %50 altına düşürmesi gerekiyor [7].

Kapsam; Yakın gelecekte yenilenemeyen kaynakların tükenmesi nedeniyle, inşaatta düşük yerleşik enerjili ve tercihen yerel olarak mevcut olan yapı malzemelerine doğru bir kayma olacaktır. Ortak yapı malzemeleri (beton, çelik, ahşap ve plastik) ile karşılaştırıldığında, bu malzemeler düşük toksik, dayanıklılık, düşük sera gazı ve diğer kirlletici emisyon seviyelerini düşürmek, yüksek geri dönüşüm potansiyeli olan ve minimum işleme gereksinimleri gibi birçok faydalı özellikleri vardır. Birçoğu biyolojik olarak parçalanabilir ve tehlikeli yan ürünler üretmezler [7].

Günümüzde artık elde edilen birikimler sayesinde sürdürülebilir yapılaşma konusunda çok daha profesyonel adımlar atılmaktadır. Yeşil yapıları küresel ölçekte kabul gören kriterlere göre değerlendirerek puanlayan ve sertifikalandıran uluslararası kuruluşlar bulunmaktadır. Örneğin; BREEAM (İngiltere, 1990), CASBEE (Japonya, 2001), DGNB (Almanya, 2007), Green Globes (ABD, 2004), LBC (ABD, 2006), HQE (Fransa, 1995), Green Star (Avustralya, 2003) gibi gelişmiş ülkelerde ortaya çıkan ve sayıları artan girişimler, bu alana yoğunlaşan ilgiyi ve gerekliliği kanıtlamaktadır. Sürdürülebilir inşaatlarda çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan en iyi koşulları sağlayan, canlıların sağlığını tehdit etmeyen, tekrar kullanılabilen, doğaya kolayca dönebilen, üretimleri enerji etkin olarak gerçekleştirilebilen, ahşap, sıkıştırılmış toprak, saman esaslı bileşimler, demir-çelik sanayisi kaynaklı ferroç, bambu ve bu çalışmanın öznesi olan bitkisel(mantar) özlü Miselyum gibi çeşitli yenilikçi malzemeler kullanılmaktadır. Yapı malzemeleri seçimindeki genel konular: kaynak bulma, performans, bakım ve maliyettir [7]. Mantarlar, poliüretan ve polistiren gibi fosil bazlı ve sentetik malzemelerin yerini alma potansiyeline sahiptir. Bu malzemenin mimarlık ve inşaat alanında geliştirilmesi ve uygulanması şimdiye kadar pek araştırılmamış ve karakterize edilmemiştir [8].

Sürdürülebilir yapı malzemesi olarak farklı seçenekler de mevcuttur. Bunlardan bahsetmek gerekirse,

Ferroç, çoğunlukla geri dönüştürülmüş malzemelerden elde edilebilen demir açısından zengin bir malzemedir. Yapılan eğilme testleri ve çeşitli deneyler sonucunda Portland çimentosu ile üretilen betondan 5 kat daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bunların yanında esneklik özelliği ile de öne çıkmaktadır. Yüksek düzeyde basınca ve harekete dayanabilir. Beton tamamen katı olmasından dolayı ufak hareketler betonu zayıflatan çatlaklara neden olabilir. Ferroç ise esneklik özelliği sayesinde hareketlere dayanabilir. Bu nedenle deprem gibi sismik aktivitelerin olduğu bölgelerde kullanmak güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından daha uygundur.

Bambu, dev otların bir üyesi olan bu malzeme, Latin Amerika, Asya ve Afrika'nın tropikal bölgelerinde bol miktarda bulunur. Mükemmel mekanik özellikleri, hafifliği, esnekliği, yüksek büyüme hızı ve nispeten düşük maliyeti sayesinde, sürdürülebilir yapı malzemesi olarak birçok fırsata sahiptir. Bambu kullanımı özellikle laminant parke, panel, sunta ve ateş tahtası üretiminde hızla artmaktadır [7].

Sıkıştırılmış toprak, insanlığın binlerce yıllık uzun ömürlü bir yapı malzemesidir. Sıkıştırılmış topraktan yapılan modern binalar, bambu veya inşaat demiri ile daha güvenli hale getirilebiliyor.

Ahşap, kolay ulaşılabilir, tanınır, estetik ve mekanik özellikleri açısından üstün yeteneklere sahip olması bakımından en yaygın kullanılan sürdürülebilir alternatif malzemelerden biri olarak kabul ediliyor. Enerji tasarrufu sağlayarak düşük işlem gerektirir.

Miselyum, polimer bileşimli, lifli, çoğunlukla yer altında bulunan, tamamen doğal olup mantarların bitkisel ve kök kısmından üretilen, geri dönüştürülmesi kolay, elverişli mekanik özelliklere sahip bir malzemedir. Geleneksel yapı malzemeleriyle rekabet edebilecek özellikleriyle dış cephe giydirme ve yer kaplama, tuğla, yalıtım malzemesi ve mobilya gibi alanlarda uygulanarak dünyada kendini kanıtlayan ve ticari pazarda yer bulabilen Miselyum, Türkiye’de de tanınmakta olmasına rağmen henüz kendine alan bulamamış, örnek teşkil edebilecek çalışmalarda kullanılmamıştır.

Mantarlar hakkında temel bilgiler, Mantarlar alemi Basidiomycota filumunun üyelerinin yenilebilir veya zehirli mantarlardan insan ve bitki patojenlerine kadar bir dizi ekolojik strateji sergilediği çeşitli bir krallıktır. Geçmişte araştırma faaliyetlerinde bulunan araştırmacıların çoğu hem ekolojik bağlamda hem de örneğin ahşap binalarda bu tür mantarların zararlı etkilerini azaltmak için lignoselüloz bozunma mekanizmalarını aydınlatmaya odaklanmışlardır. Atık malzemelerini kolonize etmek için ahşap çürütme mantarlarının kullanımı sınırlı ilgi görmüştür [9].

Miselyum kompozitlerinin benzersiz olmalarının nedeni, çok özel koşullarda büyüyen canlı mantar kültürlerini gerektirmeleridir. Miselyumun gelişmek için bol miktarda besin kaynağına, havaya, karanlığa, sıcaklığa ve neme erişimi olan steril bir ortama ihtiyaçları vardır. Selülozik malzemelerle (gıda) birleştirildiğinde miselyumla stabilize edilmiş malzemeler kurutulduğunda poliüretan köpüğü andıran bir yoğunluğa ve dayanıklılığa sahip olan yoğun kompozit matrisleri oluşturma yeteneğine sahiptirler. Birkaç farklı lifli substrat (örneğin kenevir, mısır kabuğu veya ağaç talaşı) ve miselyum türü, değişen yapısal bütünlük, yoğunluk ve görsel kaliteye sahip miselyum biyo-kompozitlerini yapmak için birleştirilebilir [10].

Miselyum bazlı bileşimli (kompozit) malzemeler mekanik, hafiflik ve birçok çevre dostu özellikleri konusunda avantajlar gösterse de büyük ölçekli uygulamalar için bazı sınırlandırmaları ve zorlukları vardır [11]. Yine de gelişen teknoloji ve artan ilgi neticesinde yeni çalışmalar ve farklı malzemelerle birlikte Miselyumdan elde edilen yapı malzemelerinin çeşitleneceği, mekanik özelliklerinin daha elverişli hale geleceği, ticari anlamda daha ekonomik olacağı, kaydedilen ilerlemelerle birlikte Türkiye’de de inşaat sektöründe öncü yapı malzemelerinden biri olacağı düşünülmektedir.

Mekanik açıdan yeterlilik gösterebilen, yapı sabit yüklerini azaltabilecek hafif yapılı, yüksek ısı ve ses yalıtımlı, zararlı organizmalara karşı korumaya sahip bu çevreci malzeme, Türkiye’de daha iyi tanınmalı, desteklenmeli ve çeşitli sektörlerde kullanılarak yaygınlaştırılmalıdır.

Bu çalışma sürdürülebilir yeşil yapılaşma eğilimine dikkatleri artırmaya katkıda bulunup Türkiye’deki inşaat sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalara, çalışanlara ve yöneticilere kaynak oluşturacaktır.

2. YAPI MALZEMESİ OLARAK MİSELYUM

Miselyumun Yapısı: Miselyum, mantarların bir hif kütesinden oluşan vejetatif (bitkisel) kısmıdır. Hyphae, mantarlarda büyüme görevi yapan uzun dallanan filamentli yapıdır. Her hif büyüme sürecini bölünerek ilerleten ve ortalama çapı 4-6 mikrometre olan bir veya daha fazla hücreden oluşur. Miselyum, hiflerden salgılanan enzimlerle biyopolimerleri daha basit gövdelere ayırır ve daha sonra canlı organizmaların karbon bazlı besinleri sindirmek için hücresel ölçekte bir eylem olan aktif taşıma ile onları emer. Bu süreç hiflerin alt tabakadan havaya büyümesini sağlayarak “mantar derisi adı verilen alt tabakayı kaplayan kabarık veya kompakt bir tabaka”

oluşturur. Bu nedenle Miselyumdan oluşan mantar kolonileri toprak, talaş, kâğıt ve diğer karbon bazlı maddeler gibi organik substratların (enzimlerin tepkimelerinde işlenen maddelerin) içinde veya yüzeyinde bulunabilir. Miselyumun doğada birincil kullanımları olarak organik maddede karbon bulunması nedeniyle organik atıkları ayrıştırma yeteneği ile ilgilidir [12].

Miselyumun Çeşitleri: Miselyum bazlı malzemelerin iki ana grubu vardır: Saf miselyum ve miselyum bazlı biyo-kompozitlerdir. Saf miselyum substratın tamamen bozulmasının sonucudur. Ayrıca “mantar derisinin substrattan çıkarılması” ile de elde edilebilir. Miselyum bazlı biyokompozitler ise büyüme sürecinde miselyumun kış uykusuna yatması veya öldürülmesinin sonucudur. Substratın kolonizasyonu sırasında materyal kurutularak veya ısıtılarak mantar büyümesi durdurulabilir. Miselyumun kurutulması kış uykusuna neden olacağından bu da çevre koşulları izin verdiğinde mantarların büyümesini yeniden başlatmaya hazır olduğunu ve ısıtmanın mantar büyümesini kalıcı olarak durduracağı anlamına gelir. Bu işlemlerden herhangi birinin sonucu olarak miselyum bazlı bir biyo-kompozittir. Büyüme süreci sırasında kısmen mantarın biyokütlesi ile değiştirilen substratı çimentolamaktadır. Kompozitler yalıtım panelleri, ambalaj malzemeleri, tuğlalar veya yeni tasarım nesneleri üretmek için şekillendirilebilir. Hem saf hem de kompozit miselyumun özelliklerine mantar türlerine, substratlara, büyüme koşullarına, malzemenin işlenmesine ve katkı maddelerine bağlıdır [12].

Miselyumun Üretimi: Miselyum bazlı biyolojik yapılar üretmek için bir organik madde substratına ayrı bir mantar türü aşılanır. Bitkisel miselyum hiphalarını uçtan uzatmak ve yeni hifleri dallandırmak ve bol bir ağ oluşturup bunları birleştirmek için bozunma ürünlerini kullanarak organik substratı bozarak kolonize eder. Alt tabakanın içerisine giderek daha sıkı bir ağ olarak gelişen hiflere nüfuz eder. Zamanla substrat kısmen mantar biyokütlesi ile değiştirilir ve ortaya çıkan miselyum substratın kendisini güçlü bir şekilde çimentolayarak biyokompozit bir malzeme olarak sonuçlanır [13].

Büyüme Sürecinin İyileştirilmesi: Mantar türlerinin seçiminde samanın bozunma hızının da (ana biyokütle kalıntısı türü olarak) dikkate alınması gerekir. Saman veya diğer lignoselülozik substratın hızlı kolonizasyonuna sahip olmak istenir. Bununla birlikte substratın aşırı bozunması saman bloğunun zayıflamasına neden olabilir. İzolatlar, agar ve ayrıca odun üzerinde büyüme hızları bakımından farklılık gösterir. Ancak bu büyüme hızları, kuru ağırlık kaybının kapsamı ile mutlaka ilişkili değildir. Bunun nedeni bu mantarların kolonizasyon stratejilerinde farklılık göstermesidir [9].

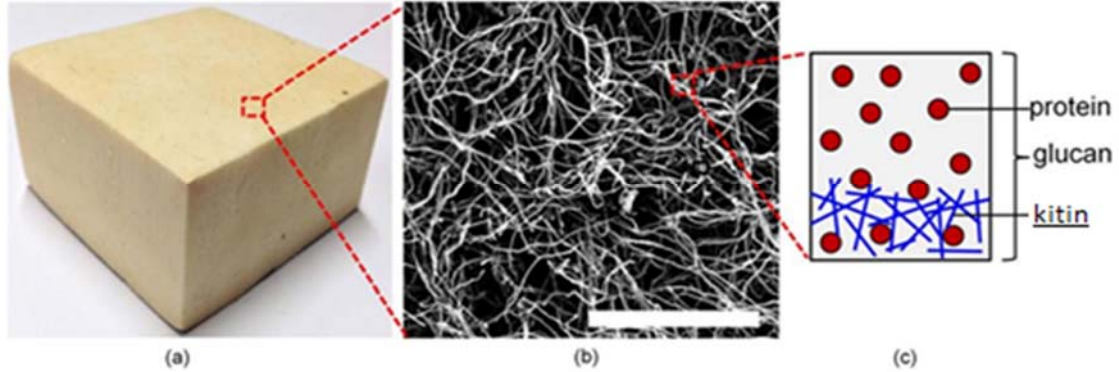
Miselyumun Genel Kullanım Alanları: Miselyum bazlı kompozitler akustik, yalıtım, yanmaz ve mekanik uygulamalarda köpük, ahşap ve plastiğin yerini alabilen malzemelerdir. Düşük iletkenlik indeksi, yüksek ses emilimi ve alev geciktirici indeksi göz önüne alındığında inşaatla kullanılan geleneksel malzemelerin yerini alabileceği gibi sürdürülebilir özellikleri de göz önüne alındığında aynı zamanda sürdürülebilir inşaatın geleceğinde önemli bir rol oynayabilir [13]. Verimli yalıtım performansı, yangına dayanıklılık ve hava temizleme gibi özelliklerle ilgili olarak binalarda yalıtım için kullanılan kimyasal petrol bazlı malzemelerin yerine miselyum bazlı malzemelerin kullanılması önerilmektedir [12].

2.1. Miselyumun Yapısal, Morfolojik ve Mekanik Özellikleri

Miselyum daha çok yer altında bulunan ve çok sayıda uzantılara sahip bir ağ sistemine benzemektedir. Polimerik ve hızlı büyüyen gittikçe daha da dallanan bitkisel liflerden oluşması en belirleyici özelliklerindendir (Şekil 1).

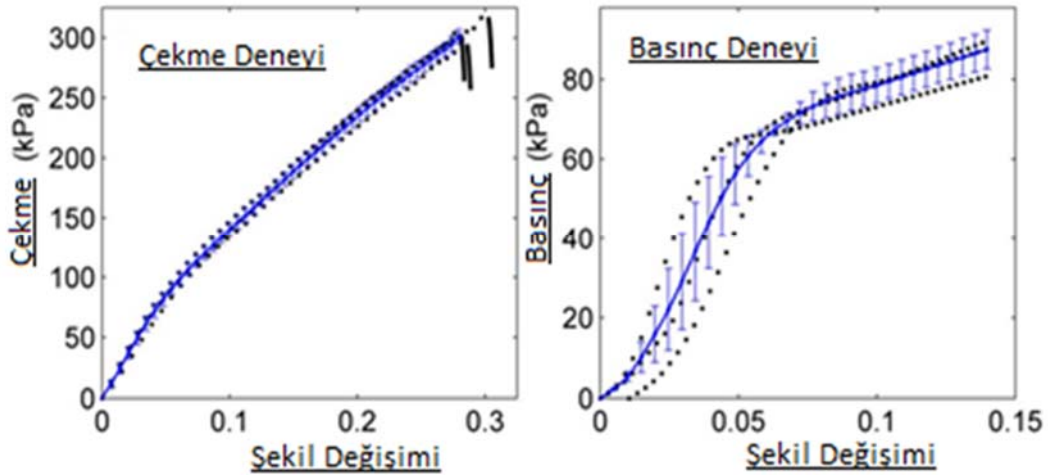
MR İslam, G. Tudryn, R. Bucinell, L. Schadler ve RC Picu [4] tarafından 20 Ekim 2017 tarihinde yayımlanan çalışmada Miselyumun 200mm x 6mm x 3.5mm boyutlarındaki numuneleri kullanılarak çekme, 20mm x 20mm x 16mm boyutlarındaki numuneleri kullanılarak basınç

dayanımı ve yapısal özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarından Miselyumun çekme ve basınç altındaki doğrusal olmayan davranış özelliklerini ortaya çıkarmıştır.



Şekil 1 - (a) makro ölçekli görünüm (5cm×5cm×5cm), **(b)** mikro yapının SEM görüntüsü -ölçek çubuğu 100 µm- ve **(c)** tek hif duvarının yapısını gösteren şema. [14]

Miselyum bileşenleri çekme yüklerine maruz bırakıldığında uygulanan yük arttıkça şekil değiştirme artmakta ve lifler arasında bağlarda kopmalar meydana gelmektedir (Şekil 2). Basınç yükleri altında ise yük arttıkça Miselyum bileşenlerinin lifleri arasında bağlarda sıkılaşma meydana gelerek direnci artmaktadır (Şekil 2). Basınç yüklerine karşı şekil deformasyonu çok az miktarda olup bariz şekil değişikliği meydana gelmemektedir.



Şekil 2 - Miselyum numunesinin tek eksenli çekme ve basınç gerilmeleri altındaki davranışı. [14]

(Noktalı çizgiler (siyah), eş yoğunluktaki(41kg/m³) üç numune üzerinde gerçekleştirilen testlerin aralığını temsil eder ve düz çizgiler (mavi) karşılık gelen ortalama yanıtları temsil eder (çubuklar ortalamaya göre standart sapmayı temsil eder.) [14]

Miselyum, ince lifli bir yapısı olan, yenilenebilirliği son derece hızlı şekilde olan ve doğal malzeme kaynağı olarak değerlendirilebilen, hafif, istenilen herhangi bir kalıpta yetişebilme, özellikle yanmaya karşı oldukça dirençli ve yalıtımı yüksek olan bazı özellikleri sayesinde de yalıtım sağlayabilen bir yapı malzemesidir.

2.2. Miselyumun Avantaj ve Dezavantajları;

Avantajları:

- Doğal olarak oluşurlar.
- Üretimleri için çok az harici enerji ile büyütülen ve kompostlaştırılan bir biyo-kompozit yapı malzemeleri sınıfındandır. Modern çağda binaların kısa ömürlerinin etkisini büyük ölçüde dengeleyebilir.
- Tamamen biyolojik olarak parçalanabildikleri için yıkımdan sonra atık üretmezler.
- Miselyum bazlı malzemeler, malzeme üretmek için diğer endüstrilerden gelen atıkları kullanarak yeşil üretimleri nedeniyle sürdürülebilir bir malzeme olarak avantajlıdır.
- Malzemenin diğer bazı avantajları ise hafifliği, yalıtım kapasitesi ve yangın geciktiriciliğidir.
- Betondan çok daha zayıf ve hafif olan monolitik miselyum beton teknikleri kullanılarak mümkün olan birçok avantajı ve yüzey kalitesini alır.
- Doğru form, dahili takviye sistemleri ve sağlam ancak nefes alabilen kalıp malzemelerinin bir kombinasyonu ve monolitik miselyum teknikleriyle büyüyen yapıların başarısı için çok önemlidir.
- Biyo-malzemelerden ve tarımsal atıklardan oluşan kompozitlerden üretilen yapıları hızla büyütme yeteneği döngüsel malzeme ekonomilerini teşvik ederek mevcut inşaat uygulamalarını büyük ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir.
- Binaların çok kısa beklenen ömürleri ile inşa edildiği ve bu da çöp sahasının bertaraf edilmesiyle sonuçlandığı bir zamanda miselyum binaların kalıcılığına, hangi malzemeleri kullandığımıza ve bunları kullanmayı bitirdikten sonra nereye gittiklerine dair geleneksel algılarımıza meydan okumaya yardımcı olabilir.
- Dönüştürme metodolojisi, malzeme özelliklerini, üretim tekniklerini ve form alternatiflerini aynı anda keşfeden özyinelemeli bir yöntem olarak açıklanmıştır.

Dezavantajları:

- Miselyum kompozit malzemelerinin en büyük dezavantajı geleneksel yapı malzemelerine kıyasla çok düşük dayanım kapasitesine sahip olmalarıdır.
- Bir üst yapının bir parçası olarak kullanılan miselyum malzemesinin en büyük zayıflığı dış elementler ve organizmalar karşısında kırılma olmasıdır.

2.3. Miselyumun Malzeme Olarak Kullanım Yerleri:

Mantarın kök kısmında oluşan Miselyum, doğadan bitkisel olarak beslenen, atık üretmeyen bir malzeme olarak endüstriyel malzemelerin yerine kullanılabilir. Mantardan vegan bir malzeme ile doğa dostu ayakkabı, çantalar, çeşitli yapı malzemeleri ve satın alan kişinin mantar köklerinden kendisinin yetiştirebileceği lamba (Şekil 3) vb. üretilerek insanlığın hizmetine sunulabilecektir.

19-27 Ekim 2019 tarihleri arasında Hollanda Tasarım Haftası'nda Carlo Ratti'nin tasarladığı Miselyum panellerden kaplanan The Growing Pavilion (büyüyen pavyon) tasarımı sergilemişler. The Growing Pavilion ilk bakışta dev bir pasta gibi görülmektedir. Miselyum panellerin üzerini de İnka halkı tarafından geliştirilen ve kullanılan organik bir dolgu macunu ile kaplamışlar (Şekil 4). [15]



Şekil 3 - Mantar köklerinden yetiştirilen lamba



Şekil 4 - Panellerin üzerinde yetişen mantarlar

3. MİSELYUM TUĞLASI:

Miselyum tuğlaları, doğranmış atık mısır sapları ve bu sapları birbirine kaynaştırmak için kullanılan mantar kökleri olan canlı Miselyumlar birleştirilerek yapılmaktadır.

Hy-Fi 2014 yılında New York'ta Moma PS1'da Genç Mimarlar Programı için The Living'in mimarı David Benjamin tarafından 43cm x 18 cm x 10 cm ebatlarında canlı Miselyumdan tasarlanmıştır.

Tablo 1 - HY-FI Miselyum tuğla özellikleri [16].

MİSELYUM TUĞLA	
Boyutları	43cm x 18cm x 10cm
Ağırlık	680,00 gr
Yoğunluk	0,11 gr/cm ³
Sıkıştırma Mukavemeti	6,897 Mpa (1000 psi)' ye kadar malzeme sertliğini kaybetmez,
Elastisite Modülü	1,379 Mpa (200 psi),
Gerilme Direnci	0,207 Mpa (30 psi),
Nem Emilimi	%3' ten azdır,
Termal İletkenlik	Betondan 2 ~ 8 kat daha azdır,
Termal Yayınlım	Betondan 10 ~ 40 kat daha azdır,

Karbon ayak izi olmayan ve çok düşük enerji gerektiren tuğlalar miselyum ve atık malzemelerle yapılmıştır. Hy-Fi'nin baca şeklindeki tasarımı (Şekil 5) iklim kontrolünün sağlanmasına yardımcı olur. Kuleyi aydınlatmak için kulenin tepesinde ışığı kulenin içine yansıtacak yansıtıcı tuğlalar kullanılmıştır [16].



Şekil 5 - Hy-Fi'nin baca şeklindeki tasarımı [16]

Yapının tamamında 10.000 adet Miselyum tuğla kullanılmıştır. Yapıda kullanılan Miselyum tuğlaların genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 de ki bu veriler doğrultusunda 0,11 g/cm³ değerinde düşük yoğunluğa sahip Miselyum tuğlalar, betondan 10 ~ 40 kat daha az termal yayılım ve betondan 2 ~ 8 kat daha az termal iletkenlikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Miselyum tuğlalar, hızlandırılmış yaşlandırma odasında UV ve ıslak-kuru yaşam döngülerine üç yıl boyunca maruz bırakılmış, bu süre sonunda malzemenin mekanik özelliklerinde değişim olmadığı tespit edilmiştir. Bu yapının sökülmesinden sonra tuğlalar toprak yüzeyine serilmiş iki ay sonunda doğada tamamen kayboldukları gözlenmiştir [16].

Tuğlaların dış yüzeyi kompozite benzemektedir. İç kısımları ise daha süngerimsi ve tuğlanın yapısı dış yüzeye doğru sertleşmektedir. Dış yüzeyi çok sert, çatlamaya ve çok yüksek miktarlarda baskılara dayanıklı olmaktadır. (Şekil 6-7).



Şekil 6 - ABD'li tasarımcı Phillip Ross tarafından Miselyum tuğlaların sağlamlığını göstermek için 1,80 x 1,80 metre ölçülerinde yapılan bir kemer [17]



Şekil 7 - Miselyum tuğlası esasında canlı organizmaları besleyen ve barındıran bir yapı malzemesidir [17].

3.1. Miselyum Tuğlaları ile Isı Yalıtımı

Miselyum tuğlaları termal iletkenliği ve termal yayınımlı gibi güçlü özellikleri ile binalarda su basman seviyesine kadar dış duvarların yalıtımı için sandviç tuğla duvar uygulama şekli olarak da inşa edilebilirler. Termal iletkenliği betondan 2 ~ 8 kat daha az, termal yayınımlı betondan 10 ~ 40 kat daha az (Tablo-2) olduğundan Miselyum tuğlaları ile yapılan yalıtım, geleneksel doğal yalıtım malzemelerine kıyasla ısı yalıtımında daha iyi bir performansa sahip olmaktadır. Miselyum malzemelerinin termal iletkenlikleri petrol kaynaklı yalıtımlardan daha yüksektir. Miselyum tuğlalarının mekanik mukavemeti, bina yalıtım malzemeleri için mevcut gereksinimlerin çok üzerindedir. Ortamın nem derecesi hassasiyeti uygun üretim prosedürleri kullanılarak sağlanırsa tuğlaların yoğunluğu potansiyel olarak daha da artırılmakta ve böylece taşıma kapasitesi ve termal özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır.



Şekil 8 - Sertleşmiş yüzeyli Miselyum tuğlaları.

3.2. Miselyumun Tuğlalarda Derz Kaynaştırması

Miselyum tuğlalar kurutularak, bileşenleri olan hifler ısı işlemi den sonra öldürülmekte ve böylece önemli biyolojik canlılık ortadan kaldırılmaktadır. Isıl işlem den sonra Miselyum tuğlalar içeriden dışarıya doğru sertleşerek dış yüzeyde en sert miselyum tabakası oluşturmaktadır (Şekil 8). Miselyum tuğlalarının birbiri üzerine oturacak yüzeylerinde ki sert dış miselyum tabakası

pürüzlendirilerek uygun oranda nemlendirilmektedir. Miselyum hiflerin yeniden kendilerini yenileme işlemini uyararak tuğlalar üst üste dizilmektedir (Şekil 9). Uygun nem oranı dengelenerek tuğla hifleri uç uzantılarıyla büyümeye devam etmekte ve tuğlalar arasındaki derz boşlukları kapanmaktadır. Aradaki boşlukları saran hifler büyümeye devam ederken, neme maruz kalan hiflerin etrafında yoğun bir ağ üretmektedirler. Önce Miselyum substrat (enzimlerin tepkimelerinde işlenen maddeler) üzerinde toplanır ve sonra iyi yalıtılmış kahverengi-grimsi bir yüzey elde etmek için yüzeysel farklılaşmaya uğramaktadır.



Şekil 9 - Miselyum tuğlaları arasındaki hifa köprü boşlukları

Tuğlalar arasındaki derz yaklaşık bir hafta sonra hif ağlarıyla kapanmakta ve kendilerini yenileme işlemi uyarılarını kaldırmak için tekrar ısıtılımlar ile kurutulmaktadır. Bu kurutma sonunda tuğlalar birbirine sıkıca tutturulmuş olarak kalmakta ve dış miselyum tabakası sertleşmektedir.[17] (Şekil 10)



Şekil 10 - Miselyum tuğlalarının yaklaşık bir hafta sonra birbirine bağlanması.

4. TARTIŞMA

Genç Mimarlar Programı için The Living'in mimarı David Benjamin tarafından yapılan deneyler sonucu miselyum tuğlasının dayanıklılığı üç yıl boyunca test edilmiştir. Üç yılın sonunda sökülen tuğlalar boş bir arazide toprak yüzeyine serilmiş yaklaşık iki ay sonra doğada tamamen kayboldukları gözlenmiştir [17]. Uzun yıllar kullanılmak üzere tasarlanan projelerde bu denemeden sonra miselyum tuğlasının uzun vadeli kullanımının imkânsız olduğu ortaya çıkmıştır. Miselyumun yaşam süresi, yapılacak her türlü biyolojik ve deneysel çalışmalarla giderilmesi gereken eksikliklerin başında gelmektedir.

Miselyum genelde canlı ve kurutulmuş olarak kullanılmaktadır. Besin ve su takviyesi yapıldığı sürece büyümeye devam eden miselyum zaman içinde şapka oluşturarak meyve verir [18]. Miselyumlar kurutulduğu zaman ölmüş gibi görünseler de yapısal bütünlüğünü belirli bir süre daha sürdürmeye devam etmektedirler. Bu özelliğinden dolayı Miselyumlar belirli bir sürede olsa kurutulduktan sonra da yaşamlarını sürdürdüğü anlaşılmaktadır.

Miselyum bileşenlerini oluşturan hifler doğada özüne dönerek çok kısa sürede kaybolabilmekte ve çevre kirliliğinin tam aksine kendiliğinden bulunan öncesinde doğada var oluşu şekliyle bileşiklere ayrılmaktadır. Yapının fiziksel özelliği açısından tasarım ömrünün sınırlı olması nedeni ile negatif bir etki oluşturmaktadır. Ancak yaygın bir şekilde kullanımı halinde ise atık tüketimi konusunda geniş bir yelpazede doğaya pozitif bir katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

Miselyum tuğlasının bu kısa ömürlü dezavantajı devamlılığını ortadan kaldırmaktadır. Devamlılığını sağlayabilmek, yani doğada kaybolmamasını sağlayabilmek için ısıtma işlemi yetmiyorsa hava ile temasını engelleyecek çeşitli kimyasal veya yapısal malzemelerle tuğla yüzeyinin kaplama işlemleri yapılabilir. Hava ile temasını engellenerek mantar yetiştirilmesi önlenmiş olur. Dolayısı ile hem rejenerasyonuna bağlı şekil değiştirmesi hem de doğada yok olması engellenebilir.

Miselyum tuğlasını oluşturan lif bileşenlerini daha da karakterize etmek için farklı iklimler altında Miselyum tuğlaların uzun süreli termal ve nem bariyeri özellikleri çevresel etkilere maruz bırakılarak malzeme performansının daha fazla değerlendirilmesi gerekmektedir. Malzeme performansının biyolojik canlılığı azaldıkça ömrü uzayacaktır.

5. SONUÇ

Poliüretan ve polistren gibi fosil bazlı ve sentetik malzemelere çevre dostu bir alternatif olarak biyo bazlı malzemelere önemli ölçüde bir dönüş başlamıştır. Mantar miselyum malzemesinin çeşitleri, kullanım alanları, üretim yöntemleri, besinlerle büyüebilmeleri hakkında genel bilgiler verilerek yapılan proje ve tasarımlar çalışmamızda incelenmiştir. Miselyum hifleri farklı şekillerde, farklı atık malzemelerle harmanlanarak kullanıldığı bu proje ve tasarımların yapısalılığı ile çeşitlilikleri araştırılmıştır.

Miselyum tuğlasının üretimi sırasında masraf gerektirecek ekstra bir enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu enerji tasarrufu özelliği ile malzemeyi süregelen yapı malzemelerine göre daha ekonomik ve yok denecek kadar düşük çevresel etkiye sahip bir malzeme haline getirmektedir. Miselyum doğada özüne dönerek hızla toprağa karışmasıyla yapı tasarımlarında yapısal atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğine bir çözüm olarak düşünülmüştür. Çevre dostu olarak teknik ihtiyaçlara göre tasarlanan miselyum tuğlalar bazen yapının tamamlayıcı bir parçası bazen de yapının ana malzemesi olarak kullanılmıştır.

Proje ve tasarımlar da malzemenin ısı iletimi, basınç ve çekmeye karşı dayanımı ve bu kuvvetler altındaki davranış testleri yapılmıştır. Miselyum tuğlaların bazı özelliklerinin betondan daha sağlam olduğu Tablo-1' de belirtilen araştırma sonuçlarına göre tespit edilmiştir. Elde edilen

deney sonuçlarına göre yapı malzemesi için istenilen dayanıklılık düzeyinde olması, Miselyumun alternatif bir yapı malzemesi olabileceğini kanıtlamaktadır.

Miselyum hifleri yapı malzemesi olarak kullanıldığında ömrünün kısa olması, kurutulsa bile yeniden uyanarak malzemeleri sindirebilme vb. gibi bazı dezavantajları olduğu tartışma konusu olsa da doğa dostu olması gerçekliği kanıtlanmıştır. Yapılacak çalışmalarla giderilmesi gereken bu ve benzeri dezavantajlar çözüm üretilerek avantajlara dönüştürülmezse, malzemenin seri üretime geçmesinde de en büyük engel olmaya devam edecektir.

Kaynaklar

1. Pulselli, R. M., Simoncini, E., Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2007). Energy analysis of building manufacturing, maintenance, and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and buildings* (doi.org), (doi.org) 39(5), 620-628.
2. Yudelso, J. (2008), *The Green Building Revolution*, Island Press, Ceo, U.S. Green Building Council, s.33.
3. Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2003), “Embodied energy of common and alternative building materials and technologies *Energy and buildings*, (doi.org)35(2), 129-137.
4. Mridu Pavan Chakrabarty and Nitin Lekhwani (2016), “Green Building Materials Market-Growth, Trend and Opportunity: South Asian Perspective”, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 7, No. 4, April 2016
5. Nitish Kumar Sharma (2020), “Sustainable Building Material for Green Building Construction, Conservation and Refurbishing”, *International Journal of Advance Science and Technology* Vol. 29, No. 10S, (2020), s.5343-5350
6. Sırkıntı, H., (2012), “Sürdürülebilirlik Kapsamında Yeşil Yapım Uygulamaları ve Leed Sertifika Sistemine Öneriler“, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, (izka.org.tr) s.107, İstanbul.
7. Paul Joseph and Svetlana Tretsiakova-McNally (2010), “Sustainable Non-Metallic Building Materials”, *Sustainability* 2010, 2, 400-427; doi:10.3390/su2020400
8. Jones M, Huynh T, Dekiwadia C, Daver F, John S. Mycelium Composites: A Review of Engineering (bioresourcesbioprocessing.springeropen.com) Karakteristikler ve Büyüme Kinetiği. *Biyonobilim Dergisi*. 2017; 11: 241–257, <https://doi.org/10/gdvp8s>
9. Yangang Xing, Matthew Brewer, Hoda El-Gharabawy, Gareth Griffith and Phil Jones (November 2017), “Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials”, (doi.org) *The Second International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science12132415(627081980) 022032 doi:10.1088/1755-1315/121/2/022032, (PDF) *Growing and Testing Mycelium Bricks as Building Insulation Materials* (doi.org) (researchgate.net), s.1-2.
10. Jonathan Dessi-Olive (2019), “Monolithic Mycelium: Growing Vault Structures”, *18th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies” Construction Materials & Technologies for Sustainability” (18th Nocmat 2019)*, 24th – 26th July 2019, Nairobi, Kenya, s.2
11. Yang, L., Park, D., and Qin, Z., (2021), “Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review”. *Frontiers in Materials*, (pubs.acs.org) Sayı: 8, s.14.
12. Ghazvinian A., (2019), “A Sustainable Alternative to Architectural Materials: Mycelium-based Bio-Composites”, s.160-161

13. Butu A., Rodino S., Miu B., Butu M. (2020), "Mycelium-Based Materials for the Ecodesign of Bioeconomy", Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures Vol. 15, No. 4, October-December 2020, s.1129-1140
14. Islam, M., Tudryn, G. J., Picu, R.C., Bucinell, R., ve Schadler, L. (2017), "Morphology and mechanics of fungal mycelium", Scientific Reports Dergisi, Sayı 7, s.1-12
15. Burgaz E., Bigumigu Yazarı, 07.11.2019 13:34 | Tasarım, <https://bigumigu.com/haber/the-growing-pavilion-hollanda-tasarim-haftasi-nda/>
16. Sertkaya Mimar S. N., Tokuç Doç. Dr. A., (June 2020), Geleneksel ve Çağdaş Mimari Yapılar Üzerine Akademik Çalışmalar, Yaşayan Yapılar: Miselyum ve Mimarlık, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye., (The Licence Number of Publicator: 2014/31220), www.iksadyayinevi.com, E mail: iksadyayinevi@gmail.com, ayca.tokuc@deu.edu.tr, s.10-11.
17. Erduran A., (26.01.2021 18:05), <https://www.kisakisa.com/haber/betondan-daha-dayanikli-mantar-tuglasi/2778>, Mok K., Cornell University, Mycotecture: Building With Mushrooms?, (October 11, 2018) <https://www.treehugger.com/mycotecture-mushroom-bricks-philip-ross-4857225>,

Sentetik Fiber Donatılı Betonların Tasarımı ve Uygulaması Hakkında Teknik Rehber

Tunahan BEŞER¹, Burak ERDAL², Faraz MALİK³, Serhat SARIKAYA⁴

ABSTRACT

Technical Guide for Synthetic Fiber Reinforced Concrete Design and Applications

Macro synthetic fiber reinforcements have been used in field (ground) concretes, concrete roads, sprayed concretes and some precast elements since the 1990s. It can be used completely instead of conventional reinforcement in continuous supported systems such as shotcrete and slab on ground applications. Macro synthetic fiber reinforcements increase crack resistance in concrete; provide durability; increase toughness and ductility.

Macro synthetic fiber reinforcements comply with Standard EN 14889-2 (Fibers - For Use in Concrete - Part 2: Polymer Fibers - Definitions, Properties and Compatibility).

Fiber types with an equivalent diameter >0.3 mm are called macro.

Micro synthetic fiber reinforcements have been widely used in field (ground) concrete, concrete roads, shotcrete and repair mortars since the 1970s. Micro synthetic fiber reinforcements significantly reduce capillary cracking that is caused by plastic shrinkage in concrete applications with large surface areas, such as field (floor) concretes, topping (screed) concretes.

Micro synthetic fibers improve the surface properties of fresh concrete and eliminates the situations called bleeding-vomiting in concrete. Micro synthetic fiber reinforced concrete provides passive fire resistance in case of fire and creates time advantage for evacuation of people in highway tunnels.

Micro synthetic fiber reinforcements comply with Standard EN 14889-2 (Fibers - For use in concrete - class 1: Polymer fibers - Descriptions, properties and compatibility). Fiber types with an equivalent diameter of ≤ 0.3 mm are called micro.

1 Kordsa Teknik Tekstil A.Ş - Tunahan.Beser@kordsa.com

2 Kordsa Teknik Tekstil A.Ş

3 Polyfibers

4 Kordsa Teknik Tekstil A.Ş - serhat.sarikaya@kordsa.com

1. NEDEN FİBERLİ BETON? (KARBON EMİSYONU) (ÇATLAK KONTROLÜ)

Makro sentetik fiber donatılar, betonda çatlak direncini arttırıp durabilite sağlar, tokluk ve sünekliği arttırır. Geleneksek çelik donatılar gibi eğilme kapasitesi sağlar. Betonun yük altında şekil değiştirme yeteneğini artırır.

Betonda makro sentetik fiberler kullanıldığında, süneklik, dayanıklılık ve tokluk sağlamaktadırlar. Fiber dozajı şu şekilde tasarlanabilir: projede istenilen seviyede çatlak kontrolü, çatlak sonrası çekme gerilmesi ve eğilme kapasitesi veya her iki durum dikkate alınarak hesaplanabilir. Fiber ile güçlendirilmiş betonun performansı, fiber tipine (malzeme, boyut, ve geometri), ayrıca bağ kuvvetine ve beton karışımına bağlıdır.

2. TASARIMIN DETAYLARI

a. Kılavuzlar

Fiber ile güçlendirilmiş bir yapının tasarlanmasına ait yararlanılması gereken kılavuzlar.

- TR-34 3rd Concrete industrial ground floors, A guide to design and construction
- TR-34 4th Concrete industrial ground floors, A guide to design and construction
- ACI 360 Guide to Design of Slabs-on-Ground
- ACI 544 Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete

3. TASARIM NASIL YAPILIR/DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

a. Fiberin betona olan katkısının değerlendirilmesi

Makro fiberlerin betona olan katkısının değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılan 2 adet test standardı mevcuttur.

ASTM C 1609

ASTM C1609 / C1609M - 19a Fiber Takviyeli Betonun Eğilme Performansı için Standart Test Yöntemi (Üçüncü Nokta Yükleme Kiriş Kullanarak)

Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)



ASTM C 1609 test düzeneği

Fiberli beton ile üretilen numuneler üzerinde ASTM C1609 Standardı'na göre eğilme deneyleri yapılmalıdır. Yapılan deneyde prizmalar yan çevrilerek kalıplara değen beton yüzeyleri iki çelik mesnet üzerine serbestçe yerleştirilir. Deney mesnet açıklığı 450 mm'dir. Prizmanın üst yüzeyinde, mesnet açıklığının 1/3'ü mesafesinde, birbirine eşit iki yük uygulanmıştır. Yükler kapalı çevrim test cihazı ile uygulanmış, numunenin orta noktasındaki sehimini LVDT (linear variable differential transformer) ile ölçülmelidir. Bütün deneyler, 28 gün yaşlandırılmış numuneler üzerinde ve en az 3 adet tavsiye edilen 6 adet numune üzerinde gerçekleştirilmelidir. Numune boyutları 15 cm x 15 cm x 50 cm'dir. Test sonucunda elde edilen R_{e3} (eş değer eğilme oranı) değeri, fiber ile güçlendirilmiş plağın pozitif moment hesabında dikkate alınacaktır. Tasarım yapılan ilgili raporda bu değer beyan edilmelidir.

(TS) EN 14651 + A1

Metal Lifli Beton – Deney Metodu – Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini (Orantı Sınırı (LOC), Artık

EN 14651 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)

Standardın adında metal lif yazmasına karşın, makro sentetik fiber ile güçlendirilmiş betonların fiber performansının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Fiber ile güçlendirilmiş prizmalar yan çevrilerek kalıplara değen beton yüzeyleri iki çelik mesnet üzerine serbestçe yerleştirilir. Deneyde mesnet açıklığı 500 mm olarak kullanılır. Prizmanın üst yüzeyinde, mesnet açıklığının 1/2 mesafesinde, yük uygulanmaktadır. Numunenin orta noktasındaki sehimini, bu noktaya yerleştirilen CMOD (çatlak ağız ölçer) ile ölçüldü. Söz konusu deney kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesinde gerçekleştirilmelidir. Bütün deneyler 28 günlük numuneler üzerinde ve her bir deney minimum 3'er adet tavsiye edilen 6 adet olarak gerçekleştirilmelidir. Numune boyutları 15 cm x 15 cm x 60 cm'dir. Test sonucunda elde edilen f_{t1} ve f_{t4} (residüel dayanım) değerleri, fiber ile güçlendirilmiş plağın pozitif moment hesabında dikkate alınacaktır. Tasarım yapılan ilgili raporda bu değerler beyan edilmelidir.



EN 14651 test düzeneği

b. Akma çizgileri teorisi

Akma çizgileri teorisi zeminde plastik mafsalların oluşumunu ve momentlerin yeniden dağılımını hesaba katar. Bu oluşan plastik mafsalllar pozitif eğilme mukavemetinde artış sağlarken elastik bölgenin yer değiştirmesine olanak sağlar. Plastik mafsal oluşumu, zeminin moment dayanımının ve taşıma gücü sınır durumunun tam olarak belirlenmesinde kullanılır (ACI 360R-10). Plastik mafsal oluşumu plağın artık (kalan) dayanımına bağlıdır ve bu artık değerler EN 14651

standardında f_{r1} ve f_{r4} (kalan dayanım), ASTM C 1609 standardında R_{e3} adı verilen değerlerinin kesit analizinde kullanılması ile belirlenmiştir. (ACI 544.4R-18, TR 34)

Moment Hesabı (ACI 544-4R-18)

Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarlanmış bir yapıda belirlenen kesme kuvveti ve Moment kapasitesi ACI 544.4R-18 rehberinde yer alan ilgili amprik formüller kullanılarak hesaplama yapılabilir. Hesaplama raporlarında malzeme güvenlik faktörleri, artık dayanım değerleri $f_{r1}, f_{r4}, f_{r150}, f_{e3}$ veya eşdeğer eğilme oranı R_{e3} değerleri yer almalıdır.

Yüklerin Tanımlanması ve Yükleme Durumlarının Değerlendirilmesi

Yüklerin doğru tanımlanması fiberli beton tasarımı için oldukça önemlidir.

Yayılı Yük, kN/m ²	
Yükün geniş alana yayılması	İstiflenmiş paletler ve ruoların birim alandaki yükleri
	Sabitlenmiş makine veya ekipmanların yükleri
	Hafif olarak tanımlanmış ticari yükler
Çizgisel Yükler, kN/m	
Yükün bir çizgi boyunca uzandığı yükler	Bölme duvarlar
	Sabit Raylı sistemler
Noktasal Yükler, kN	
Taban plakası belli olan yükler veya tekerlek yükleri	Sabit makinalardan gelen noktasal yükler
	Araç tekerlek yükleri
	Raf ayak yükleri
	İstifleyici vinç rayı montajları

c. Tasarım Örneği

Gerekli Bilgiler(Tasarım Girdileri)

- ✓ Zemin bilgisi, zemin yatak katsayısı
- ✓ Beton sınıfı
- ✓ Plak kalınlığı
- ✓ Yük çeşitleri
- ✓ Tekil yükler
- ✓ İkili yükler
- ✓ Dörtlü yükler
- ✓ Çizgisel yükler
- ✓ Yaylı yükler

Güvenlik Katsayıları

Malzeme Güvenlik Katsayıları

Beton (Fiberli / Fibersiz Beton); $\gamma_c = 1.50$

Sabit Yük ; $\gamma_G = 1.20$

Hareketli Yük; $\gamma_Q = 1.50$

Dinamik Yük ; $\gamma_D = 1.60$

Tasarım

Tekil Yük : 60 kN

Yük temas alanı : 500-250 mm,mm

Beton sınıfı; C25/30

Beton Kalınlığı; $h = 200$ mm

Rezidüel Dayanım 0.5 mm çatlak ağzı genişliği; $f_{R,1} = 1.700$ N/mm²

Rezidüel Dayanım 3.5 mm çatlak ağzı genişliği; $f_{R,4} = 1.900$ N/mm²

Eksenel çekme dayanımı CMOD 0.5; $\sigma_{r1} = 0.45 * f_{R,1} = 0.765$ N/mm²

Eksenel çekme dayanımı CMOD 3.5; $\sigma_{r4} = 0.37 * f_{R,4} = 0.703$ N/mm²

Etkili Derinlik; $d = 0.75 * h = 150$ mm

Malzeme Güvenlik Katsayıları

Beton (Fiberli / Fibersiz Beton); $\gamma_c = 1.50$

Sabit Yük ; $\gamma_G = 1.20$

Dinamik Yük ; $\gamma_D = 1.60$

Beton Özellikleri

Basınç Dayanımı (Silindir); $f_{ck} = 25$ N/mm²

Basınç Dayanımı (Küp); $f_{cu} = 30$ N/mm²

Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (Silindir) ; $f_{cm} = f_{ck} + 8$ N/mm² = 33 N/mm²

Betonun Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı; $f_{ctm} = 0.3$ N/mm² * $(f_{ck} / 1$ N/mm²)^{2/3} = 2.6 N/mm²

Yalın Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı; $f_{ctd,fl} = f_{ctm} * (1.6 - h / 1m) / \gamma_c = 2.4$ N/mm²

Betonun dizayn basınç dayanımı (Silindir); $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 16.7$ N/mm²

Betonun Elastisite Modülü; $E_{cm} = 22$ kN/mm * $[f_{cm} / 10$ N/mm²]^{0.3} = 31 kN/mm²

Poisson oranı; $\nu = 0.2$

Bağıl Rijitlik Yarıçapı; $l = [E_{cm} * h^3 / (12 * (1 - \nu^2) * k)]^{0.25} = 924$ mm

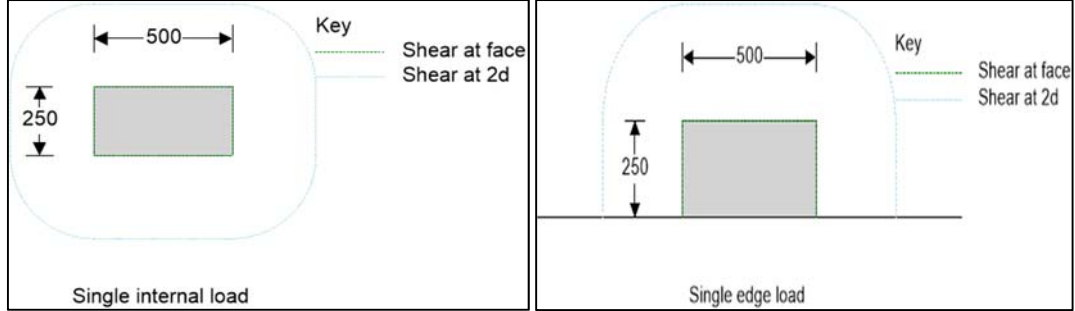
Sistem karakteristiği ; $\lambda = (3 * k / (E_{cm} * h^3))^{0.25} = 0.773$ m-1

Moment Kapasitesi

Plağın Negatif Moment Kapasitesi; $M_n = M_{un} = f_{ctd,fl} * (h^2 / 6) = 16.0$ kNm/m

Plağın Pozitif Moment Kapasitesi (**Makro Sentetik Lif lif katkısı**) ; $M_p = M_u = h^2 / \gamma_c^*$
($0.29 \cdot \sigma_{r4} + 0.16 \cdot \sigma_{r1}$) = 8.7 kNm/m

Tekil Yük Çözümü Yapılmıştır



Yükün merkez ve kenarda olması durumu

Tekerlek Yüğü = 60 kN

Malzeme Güvenlik Faktörü = 1,6

Temas Alanı A = 500 mm

Temas Alanı B = 250 mm

Temas Alanı yarıçapı a = 199,5 mm

a / l = 0,21

Plak Merkez Kapasite = 333,9 kN

Plak Kenar Kapasite = 194.2 kN

Merkez Yük Kontrolü $P_u > \gamma_{maf} \cdot P = 333,9 > 96,0$ --- OK

Kenar Yük Kontrolü $P_u > 0.8 \cdot \gamma_{maf} \cdot P = 194.2 > 96,0$ ---- OK

Yüklü Alan Yüzünde Zımbalama Kontrolü

$V_p = 0,54$ MPa

$V_p \leq V_{max} = 0,51 < 4.50 (V_{MAX})$ --- OK

Yüklü Alan Yüzündeki Kesme Kontrolü

Merkez 1012.5 kN > 96,0 kN --- OK

Kenar = 675.0 kN > 96.0 kN --- OK

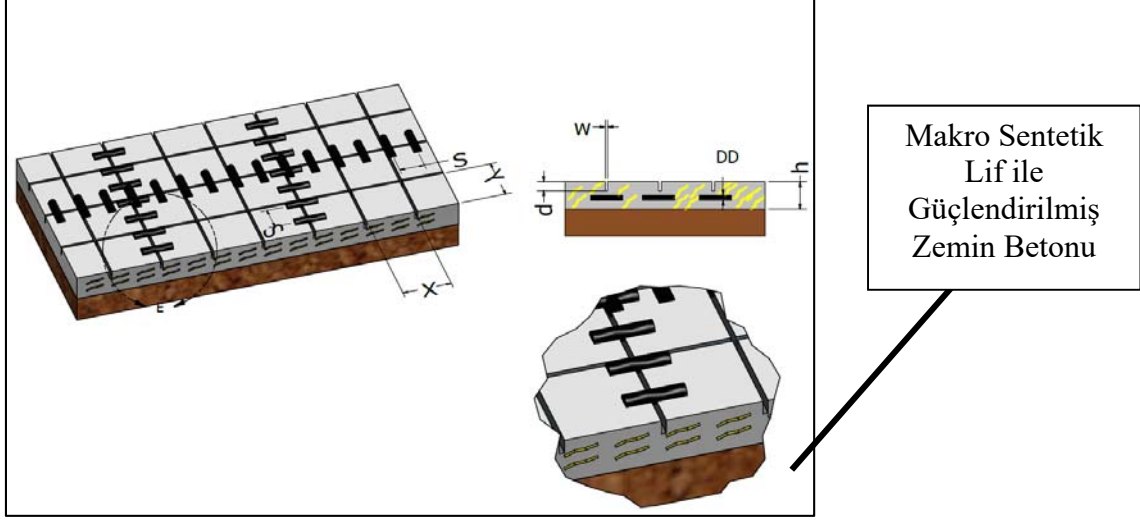
Kritik Çevrede Kesme Kontrolü

Merkez 251.3 kN > 96,0 kN --- OK

Kenar 144.2 kN > 96.0 kN --- OK

Projede Uygulanması Gereken Derz Kesimi ve Detayları

Derz, zemin betonlarında oluşturulan düzenli çatlaklardır. Burdaki amaç betonun istemsiz çatlaklarının önüne geçilmesidir. Zamanında uygun koşullarda oluşturulan derz kesimleri betonun durabilitiesi koruması açısından önem arz etmektedir.



Kesme derz kesimi ve detayları

Derz Kesim Boyutları: Beton Plak kalınlığının maksimum 30 katı, X-Y

Derz Kesim Genişliği : 3-4 mm, w

Derz Kesim Derinliği : Plak kalınlığının %25'i, d

Derz Kesim Zamanı : Beton döküldükten sonra genellikle 24 saat sonra yapılmalı (betonun kesim şeritleri hasar görmeyecek kadar kadar güçlü olmalıdır)

Dikiş Demir Uzunluk, Çapı ve Aralığı : 450 mm uzunluğunda, 25 mm çaplı, 300 mm aralık ile sıralanmış (ACI 302.1R), DD-S

Özet Rapor

Varsayımlar/Dizayn Kriterleri	
k, zemin yatak katsayısı, N/mm ³	0,03
Beton Basınç Dayanımı, f_{ck} , MPa	25
Pozitif Moment, M_p kNm/m	8,7
Negatif Moment, M_n kNm/m	16,0
Makro Sentetik Fiber Donatı ile Çözüm	
Plak Kalınlığı, mm	200
Dozaj, kg/m ³	3
Fiber Tipi	54 mm
f_{r1}	1.7 MPa
f_{r4}	1.9 MPa

4. KARBON EMİSYONU KARŞILAŞTIRMASI

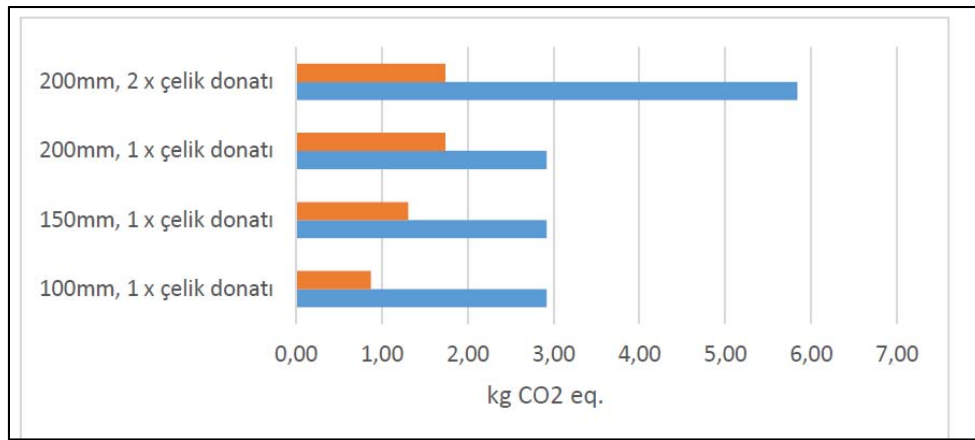
ISO 14040/44 standartları çerçevesinde yapılan ürün yaşam döngüsü değerlendirmesine göre

1 kg Makro Sentetik Fiber Donatı ürününün karbon ayak izi değeri 2,9 kg CO₂ eşdeğerindedir. (1)

1 m³ beton hazırlanması için kullanılan makro sentetik miktarı göz önüne alındığında aşağıdaki sonuca ulaşılır.

Makro sentetik fiber kullanım miktarı 3 kg/m³ beton - 1 m³ beton içinde makro sentetik fiber miktarına ait karbon ayak izi 8,7 kg CO₂.

Makro Sentetik Fiber Donatı ürünü betonun dayanım gücünü artırmaktadır. Muadili olan çelik donatı ürünlerine kıyasla makro sentetik fiber donatı kullanımı ile betonun donatı kaynaklı karbon ayak izi yaklaşık %40-70 oranında düşmektedir.(2)



Makro senetik fiber donatı	
Çelik donatı	

Geleneksel Çelik Donatı Opsiyonları	Çelik donatılı 1m ² beton plaka		Makro Sentetik fiber donatılı 1 m ² beton plaka		Fark	
	Donatı miktarı, kg	Karbon ayak izi, CO2 kg	Amount, kg	Total Emission, kg CO2 eq	kg CO2 eq	%
100mm,1 x çelik donatı	3,46	2,92	0,3	0,87	-2,05	-70%
150mm,1 x çelik donatı	3,46	2,92	0,45	1,31	-1,61	-55%
200mm,1 x çelik donatı	3,46	2,92	0,6	1,74	-1,18	-40%
200mm,2 x çelik donatı	6,92	5,84	0,6	1,74	-4,10	-70%

5. MAKRO SENTETİK LİF DONATILI ENDÜSTRİYEL ZEMİN BETONU TEKNİK UYGULAMA REHBERİ

a. Zeminin Hazırlanması

Fiberle güçlendirilmiş beton dökümünden önce saha, beton dökümüne uygun hale getirilmelidir. Eğer zemin betonu kontrollü dolgu üzerine uygulanacaksa, dolgunun istenen düzeyde performansı için mekanik sıkılaştırma ya da farklı zemin iyileştirme yöntemleri ile zeminin gerekli taşıma kapasitesine ulaşması sağlanır. Dolgunun beklenen kapasiteye ulaşıp ulaşmadığını test etmek için Plaka Yükleme Deneyi, CBR, Kum Konisi ve Proctor gibi zemin deneyleri yapılmalıdır. Elde edilen test sonuçlarının uygunluğu, alanında uzman kişiler tarafından kontrol edilir.

b. Saha Ön Hazırlık

Yeterli taşıma kapasitesine ulaşan zeminin, istenen hassasiyette tesviyesi yapılmalıdır ve ölçüm aletleri ile tüm sahada kot değerleri not edilmelidir. Uygulaması yapılacak zemin betonu kalınlığı, zemindeki en yüksek kot değeri bulunan bölgeye getirilmelidir. Saha herhangi bir atık malzeme olmayacak şekilde temizlenmeli ve zeminde sürtünmeyi azaltmak ve su kaybının önüne geçilebilmesi için zemin ile beton arasına çift kat (200 mikron ve üzeri) polietilen folyo serilmelidir. Zemin betonu ile yapının taşıyıcı elemanları ve perde/duvar gibi yapılar arasındaki bağlantı, elastomerik (xps, eps ve benzeri ayırıcı) malzemelerle ayrılmalıdır.

c. Anoların Hazırlanması ve Dikiş Donatılarının Yerleştirilmesi

Önceden hazırlanmış metal ya da ahşap ano kalıpları, projeye ve günlük beton döküm planına uygun biçimde boyutlandırılmış aralıklara göre yerleştirilmelidir. Soğuk derzler oluşacağı için anolar arasına dikiş donatıları (dowel) yerleştirilerek plaklar arası geçişlerde etkin yük aktarımı sağlanmalıdır. Dikiş donatı uzunluğu, çapı ve gömme boyu ilgili fiberli donatılı tasarım projesinde verilmelidir. Dikiş donatılarının bir tarafına kılıf yerleştirilerek yatayda meydana gelecek yer değiştirmeler serbest hale getirilmelidir.

d. Beton Reçetesinin Hazırlanması

Uygulaması yapılacak sentetik fiberli beton, bölgede bulunan doğal kaynaklar gözetilerek uzman kişiler tarafından dizayn edilmelidir. Uygun agregaların seçimi, agrega gradasyonu, su/çimento oranı, katkı kullanımı gibi konular bölge ve iklim şartları göz önünde bulundurularak projeye özel beton reçetesi hazırlanmalıdır. Çimento ile birlikte uçucu kül gibi puzolanik bağlayıcılar beton reçetesine eklenebilir. Özel durumlar olmadığı sürece su/çimento oranının 0,55 değerinin geçmemesi tavsiye edilir.

e. Slump Tayini

Slump değerleri, sentetik fiberli zemin betonu uygulaması başlamadan önce hazır beton firması ve beton uygulama firması ile birlikte yapılacak uygulama öncesi slump testi ile belirlenmelidir. Slump değerleri sahaya gelen ve döküme hazır olan sentetik fiberli betonda min. S3 sınıfında olmalıdır (Fiberli betonun çökme değeri 100-150 mm). Belirlenen beton mix dizaynı ve slump değerinin sürekliliği, uygulama süresince yetkililer tarafından düzenli olarak kontrol edilmelidir.

f. Fiber Donatıların Betonda Homojen Karışımının Sağlanması

Yapılan statik hesap sonucu bulunan uygun dozaja göre paketlenmiş sentetik fiberler, beton santralinde agrega bandına eklenerek betonda karışmasıyla veya sahada beton mikseri haznesine katılarak min. 7 dk. en yüksek devirde çevrim yapılarak karıştırılmasıyla sağlanır. Beton dökümü süresince fiberlerin uygun dozajda kullanımı ve karışım süresi takip edilmelidir.

g. Sentetik Fiberli Beton Dökümü

Sentetik fiberli beton, direkt olarak beton mikserinden ya da pompa ile dökülür. Laser screed makine ile ya da el mastarı ile mastarlanır. Döküm esnasında vibratör kullanmak betonun yerleşimini kolaylaştıracaktır. Döküm süresince betonun reçeteye uyumluluğu kontrol edilmeli, slump deneyleri ile kıvam kontrolü yapılmalıdır. Betonda segregasyon (ayrışma) oluşmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Beton temininin aksamaması, beton imalatında soğuk derz oluşmasına sebep olacağından, önceden belirlenmiş döküm programına göre imalat yapılmasına özen gösterilmelidir.

h. Lazerli Mastarlama Uygulaması

Sentetik fiber sayesinde lazerli sistemin hızlı ve hassas imalatından istifade edilebilir. Uygulama lazerli mastarlama makinası ile yapılıyor ise lazer alıcılara beton üst kot değerleri girilir. Dökülen sentetik fiber donatılı beton lazerli sistem yardımıyla istenilen kot hassasiyetinde vibrasyonla sıkıştırılarak mastarlanır. Akabinde yüzey perdah bitirme işlemleri yapılırken tam kot hassasiyetiyle mastarlanmış bu betonun, proje toleransları dahilinde $\pm$ kot hassasiyeti bozulmadan homojen şekilde oturması sağlanmalıdır. Özellikle endüstri 4.0'a uygun endüstriyel zemin betonu projelerinde bu konuya daha fazla dikkat edilmelidir.

i. Perdah ve Yüzey İşlemleri

Beton serim işleminin ardından sahadaki fiziksel koşulların (sıcaklık, nem, rüzgâr) durumuna göre dökümü takip eden birkaç saat içerisinde (bitmiş beton yüzeyinin parmak izi bırakacak kıvama gelmesinden sonra) tepsi perdah işlemleri yapılmalıdır. Fiberden arındırılmış yüzeyler elde etmek için, perdah makinesinin bıçakları bir süre için düz ayarlanması (örneğin; ilk iki geçiş) ve birbirine dik konumda olması tavsiye edilir. Devam eden geçişler standartlarda tarif edildiği gibi normal teknik ve zamanlamalarla verilir. Süpürgeli beton fırçası veya mala kullanımında, hareketin sadece tek yönde olmasına dikkat edilmelidir. Yüzey sertleştiricili uygulamalarda, yüzey sertleştiricinin beton üzerinde eşit dağılımına özen gösterilmelidir.

j. Kontrol Derz Kesimi

Kontrol derz kesimi beton çatlaklarını kontrol altına almak için yapılır. Derz kesimi, beton dökümünden itibaren mümkün olan en kısa süre içerisinde yapılmalıdır. Hava durumuna göre 24-48 saat aralığında tamamlanması tavsiye edilmektedir. Derzler genellikle aks aralıklarına denk getirilir ve ortada bulunan derzler aks aralıklarıyla eşit mesafelerde bulunur. Fiber içeren betonlar için, klasik ıslak bir testere ile yapılan kesim, beton derinliğinin 1/3-1/4'ü aralığında olmalıdır. Bölmelerin uzunluk/genişlik oranı 1:1,5'tan küçük olmalıdır ve merkeze olabilecek en yakın mesafede bulunmalıdır. Derz kesim alanlarının ortalama 4-6 m x 4-6 m olması tavsiye edilir.

k. İzolasyon Derz Kesimi

İzolasyon derzi, zemin ve bitişik yapı elemanlarının arasında dikey ve yatay hareketin serbestçe oluşmasının gerektiği yerlerde kullanılmalıdır. Saha zemini oturmalarının binaya zarar vermemesi için önemlidir. İzolasyon derzi, duvarla, kolonlarla, ekipman temelleriyle, temel destekleriyle, ya da kanalizasyon şebekesi, rögar, karter ve merdiven gibi sınırlı noktalarla birleşim yerlerinde kullanılmalıdır. Polietilen levha türevi malzeme min. 20 mm ve köşelerde min. 40 mm uygulanmalıdır.

l. Soğuk Derz

Günlük döküm sonrası veya arasında zaman farkı oluşan beton sahaların kesişim kenarlarında dikiş donatıları genellikle 19-30 mm çapında 40-45 cm uzunluğunda 30 cm aralıklarla yerleştirilir. Betonun yatay düzlemde serbest olarak hareket edebilmesi için dikiş donatılarının bir tarafına bir ucu kapalı plastik boru yerleştirilir. Ayrıca özel derz ürünleri de kullanılabilir.

m. Kür Yapılması

Betonda çimentonun suyla olan hidratasyon reaksiyonunun devam etmesi amacıyla bilinen kür teknikleri uygulanmalıdır. Beton, nemli tutulması durumunda çimento hidratasyon ile birlikte beton dayanım kazanmaya devam eder. Zemin betonları ıslatılarak, üzerine geçirimsiz folyo malzemeleri serilerek ya da kimyasal kür uygulaması ile kürlenebilir. Kür işlemi yapılmadığı takdirde betonda yüzey çatlaklarının oluşması ve dayanımının düşük olması gibi problemler ortaya çıkabilir. Endüstriyel zemin betonu 28 gün sonra tam mukavemetini kazandıktan sonra dizayn yüklerine karşı kullanıma hazır hale gelir.

n. Soğuk Havada Beton Dökümü

Beton dökümü sırasında; ortalama sıcaklığın art arda üç gün süre ile + 5°C'nin altına düşmesi TS1248 standardında soğuk hava olarak tanımlanmıştır. Soğuk hava koşullarında priz süresi uzar, hidratasyon yavaşlar, dayanım kazanma hızı azalır ve buna bağlı olarak da kalıp alma süresi de gecikir. Taze betonun içindeki suyun donması halinde hidratasyon da durur. Don etkisine uğrayan beton çözülünce hidratasyon yeniden başlayabilir, ancak çimento hamuru-agrega ve çimento hamuru-donatı ara yüzeylerinde aderans büyük ölçüde azalır. Bu durumda betonun kazanacağı nihai dayanımda azalma meydana gelir.

Soğuk havada zemin betonu dökümüne karşı alabilecek bazı önlemler aşağıdadır;

- Mümkünse don riski olan hava koşullarında beton dökümü yapılmamalıdır.
- Donma-çözünme etkilerine karşı mikro ve makro sentetik fiberli güçlendirilmiş beton tercih edilmelidir.
- Yüksek hidratasyon ısisına sahip çimento, daha yüksek çimento dozajı ve düşük su / çimento oranı seçilebilir.
- Priz hızlandırıcı ve hava sürükleyici gibi beton katkıları kullanılabilir.
- Betonun ilk sıcaklığının donma derecesine düşmemesi için agrega, çimento ve özellikle su ısıtılmalıdır.
- Zemin betonu dökümü öncesi kalıplar denetlemelidir, varsa buz parçaları temizlenmelidir.
- Çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan ısıнын beton dışına yayılması önlenmelidir. Bunun için beton yorgani ya da farklı yalıtım teknikleri uygulanabilir.
- Beton belirli bir dayanıma ulaşınca dek korunmalıdır. Bu süre; yapı elemanının özellikleri, maruz kalacağı şartlar ve beton özelliklerine göre değişir. Beton dayanım kazanma hızı azaldığından kalıp alma süresi uzatılmalıdır.

o. Sıcak Havada Beton Dökümü

Sıcak havada beton dökümü sırasında, çimentonun hidratasyon hızının artması ve taze beton karışımındaki suyun buharlaşma hızının artmasından dolayı gerekli önlemler alınmalıdır. TS1248 standardına göre; beton dökümü sırasında ortalama sıcaklığın art arda üç gün süre ile 30°C'nin üstünde bulunduğu süredeki hava durumu sıcak hava olarak tarif edilmektedir. Sıcak havaya bağlı olarak taze betonda; priz süresinin kısılması, çökme kayıp hızının artması, plastik rötreinin artma olasılığı gibi problemler ortaya çıkar. Sıcak havada betonun erken kürü daha büyük önem kazanır.

Sıcak havada zemin betonu dökümüne karşı alabilecek bazı önlemler aşağıdadır;

- Rötre ve plastik oturma çatlaklarını minimize etmek için mikro ve makro sentetik fiberli güçlendirilmiş beton tercih edilmelidir.
- Betonda karma suyu sıcaklığının düşük olmasına dikkat edilmelidir. Mümkünse beton karışımında agrega büyüklüğünde buz parçaları kullanılabilir.

- Hidratasyon ısısı düşük çimento kullanmak gerekir. Çimentonun fabrikadan sıcak gelmesi halinde, beton karışımına girmeden önce soğutulması gerekir.
- Sıcak ve kuru havalarda beton dökümü tercihen sabah erken saatler/akşam ya da gece vakitlerinde yapılmalıdır.
- Beton dökümünden önce beton kalıbı ve donatı ıslatılmalı, ıslatma suyu buharlaşır buharlaşmaz döküm yapılmalıdır.
- Betonda en büyük hacme sahip olan agregaların sıcaklığı denetim altına alınmalıdır. Gölge alanda stok edilmesi ve zaman zaman su püskürtülmesi agregaların serin kalmasını sağlar.
- Betonun yerleştirilmesi ve yüzey düzeltilmesi işlemleri için iyi bir planlama yapılması şarttır. Döküm yerine ulaşan beton bekletilmeden yerleştirilmeli ve vibrasyon kısa sürede tamamlanmalıdır.

Kaynaklar

1. TS EN 14889-2, Lifler - Betonda kullanım için - Bölüm 2: Polimer lifler - Tarifler, özellikler ve uygunluk
2. ASTM C 1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third- Point Loading)
3. TR 34 3rd and 4th edition, Technical Report No .34, A guide to Design and Construction
4. ACI 544.4R-18, Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete
5. ACI 360R-10, Guide to Design of Slabs-on Ground
6. TS EN 14651, Metal lifli beton - Deney yöntemi - Eğilmede çekme dayanımının tayini(Kalıcı orantısal sınır (LOP))
7. ASTM C 1116, Standard Specification for Fiber-reinforced Concrete
8. ACI 302.1R, Guide to Concrete Floor and Slab Construction
9. /ISO 14040-44/ ISO 14040:2006-10, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006) and Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)