# **ARTICLE MAKALE**

# Güvenlik Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Geliştirilmiş Boşluklu Beton\*

Ayda Şafak Ağar Özbek <sup>(1,2)</sup> Jaap Weerheijm <sup>(2,3)</sup> Klaas van Breugel <sup>(2)</sup>

### Özet

Boşluklu beton, süreksiz granülometriye sahip agregaların ince bir çimento hamuru tabakası ile birleştirilmesiyle oluş-

turulmuş çimento bazlı bir malzemedir. Önemli yapıların veya patlayıcı depolarının koruyucu dış duvarlarının inşasında kullanılmak üzere, dinamik yük (patlama yükü) altında küçük boyutta parçalara ayrılan cimento bazlı bir malzemenin tasarımı ve geliştirilmesi konusunda bir araştırma projesi sürdürülmüştür. Bu araştırmanın ortaya çıkmasındaki başlıca neden, bir patlamanın gerçekleşmesi durumunda, zarar gören beton yapılardan kopan büyük boyuttaki parçaların çevre için ölüm tehdidi oluşturabilmesidir. Bu nedenle, yüksek oranda bosluk iceren, coklu catlak olusturma ve dolayısıyla da yüksek enerji yutma özelliğine sahip boşluklu betonlar araştırılmıştır. Araştırma kapsamında, farklı ölçeklerde statik deneyler ve dinamik performansın belirlenmesi için çeşitli dinamik deney yöntemleri kullanılmıştır.

# GIRİŞ

Patlama, genel anlamda yüksek genlikte ve ani bir enerji salınımı olarak tanımlanabilir [1]. Bir patlamanın, beton yapının

### Enhanced Strength Porous Concrete for Safety Applications

Porous concrete is a cementitious material composed of gap graded aggregates, covered with a thin layer of cement paste, assembled by the cement paste layers partially being in contact. A research project was undertaken aiming to design a special type of concrete that fractures into small fragments under impact loading, to be used in safety applications such as protective walls

for important structures or storages for explosives. The motive behind this research was the fact that in case of an explosion or impact, the large concrete debris that are formed can be fatal for the exposed environment

the exposed environment.

icinde veya yakınında gerceklesmesi durumunda, patlayıcının kendisinin neden olduğu zararın yanında etrafa saçılan beton fragmanlar da ciddi tehditler oluşturmaktadır. Servis ömürleri boyunca bu tip ani ve yüksek büyüklükte vüklemeler ile karsılasma ihtimali daha yüksek olan önemli binaların veya patlayıcı depolarının koruyucu dış duvarları benzeri yapılar, böyle bir patlamanın etkilerini en aza indirgemek açısından özellikle önem taşımaktadır. Bu amaca ulaşmak için statik dayanımı arttırılmış ancak bunun yanında patlamada küçük boyutta parçalara ayrılabilen çimento bazlı bir malzemenin tasarımı ve analizi konusunda bir araştırma projesi gerçekleştirilmiştir.

Yükleme hızı duyarlılıkları nedeniyle çimento bazlı malzemelerin dinamik yükleme altındaki davranışı, statik yükleme altındaki davranıştan önemli ölçüde farklıdır. Özellikle son yıllarda, yüksek dinamik yük-

ler altında beton yapıların davranışını anlamak amacıyla gerçekleştirilmiş çok sayıda kapsamlı araştırma bulunmaktadır [2-3]. Bu çalışmaların çoğu patlama yüklerine direnç gösteren malzemelerin tasarımına odaklanırken, bu projenin amacı dinamik yükleme altında çok sayıda çatlak oluşturarak kırılan, küçük fragmanlara ayrılan ancak bunun yanında normal servis ömrü boyunca yeterli

Deneysel sonuçlar, farklı parametrelerin etkilerini daha iyi inceleyebilmek için gerçekleştirilen nümerik analizler ile desteklenmiştir. Statik dayanımı arttırılmış, dinamik yük altında küçük boyutta parçalara ayrılan boşluklu betonlar geliştirilerek deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Keywords: Porous concrete, impact, fragmentation, dynamic, multi-scale analyses.

<sup>\*</sup> Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen 17. ERMCO Kongresi'nde sunulmuştur.

<sup>🗥</sup> İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, sagar@itu.edu.tr

<sup>(2)</sup> İnşaat Mühendisliği ve Yer Bilimleri Fakültesi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda, J.Weerheijm@tudelft.nl

<sup>&</sup>lt;sup>(3)</sup> TNO Defense, Safety and Security, Rijswijk, Hollanda, K.vanBreugel@tudelft.nl

## **MAKALE ARTICLE**

dayanım gösteren bir malzemenin tasarımı olarak hedeflenmiştir. Bu amaca ulaşabilmek için çeşitli çimento bazlı malzemeler üzerinde planlı bir duyarlılık analizi yürütülmüştür. Farklı tipte çimento

Therefore, porous concrete incorporating a high amount of air voids, which facilitate the formation of multiple cracking and the subsequent energy dissipation and multiple fragmentation under impact loading, was selected to be investigated. In the scope of the research, static experiments at different scales were performed while different dynamic testing techniques were used to assess the impact performance. The experimental results were also supported by numerical analyses to be able to better elaborate on the effects of various parameters. Porous concretes that fractured into small fragments under impact loading, while having sufficient static strengths were obtained and investigated both experimentally and numerically.

bazlı malzemeler üzerinde yapılan analizler sonunda boşluklu betonlara odaklanılmış, dayanımı arttırılmış boşluklu betonlar geliştirilmiştir. Boşluklu beton, su geçirgenliği, gürültü ve ısı yalıtımı özellikleri nedeniyle cesitli uygulamalarda kullanılan ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiş bir yapı malzemesidir [4,5]. Ancak, yüksek oranda mezoölçekte boşluk içermesi sonucunda zayıf mekanik özellikleri bulunması nedeniyle dinamik performansı genellikle inceleme konusu olmamıştır. Mezo-boyuta hava boşluklarının bir sonucu olarak normal betona göre daha düşük bir statik dayanıma sahip olmakla beraber, yine boşluklu yapısı ve agrega dağılımı sayesinde ortaya çıkan çoklu çatlak oluşturma özelliği, boşluklu betonu bu araştırmanın amaçlarına uygun kılmıştır. Çoklu çatlak oluşumu aynı

zamanda daha fazla enerji yutma kapasitesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle, malzemenin geliştirilmesi çalışmaları kapsamında araştırmanın odak noktası, boşlukları korurken statik dayanım özelliklerini geliştirmek olmuştur.

ano i. Seçininiş bazı boşluklu belon karışınlarının içeriği									
Karışım Kodu	PRC1	PRC2	PRC3	PRC4	PRC5	PRC6	PRC7		
Bazalt kırmataş (2-4 mm) (gr)	-	2000	1000	-	-	2000	1000		
Bazalt kırmataş (4-8 mm) (gr)	2000	-	1000	-	2000	-	1000		
Dere çakılı (4-8 mm) (gr)	-	-	-	2000	-	-	-		
Çimento (gr)	351	351	351	351	298	298	298		
Silis dumanı (gr)		-	-	-	53	53	53		
Su (gr)	105	105	105	105	105	105	105		
Akışkanlaştırıcı (gr)	0.97	0.97	0.97	0.97	1.30	1.30	1.30		
Priz geciktirici katkı (gr)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20		

Tablo 1: Seçilmiş bazı boşluklu beton karışımlarının içeriği

# 2. Boşluklu betonların statik ve dinamik özellikleri

### 2.1. Malzemeler

Proje kapsamında, karışım özelliklerinin geliştirilmesi amacıvla cok savıda farklı bosluklu beton üretilmis ve test edilmiştir. Bazı seçilmiş karışımların içerikleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla, boşluklu beton özelliklerini etkileyen çok sayıda faktör ve bu faktörlerin aralarındaki etkilesimleri incelemek icin duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Çeşitli faktörlerin etkinliğini daha iyi belirleyebilmek için farklı ölçeklerde deneyler gerçekleştirilmiş; deney sonuçları malzeme özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Araştırma kapsamında, mezo-ölçekte çekme deneyleri (çimento hamuru fazı ve agrega-çimento hamuru arafazının incelenmesi için), makro-ölçekte basınç ve çekme deneyleri (boşluklu beton yapısının incelenmesi için) gerçekleştirilmiştir. Mekanik deneylerde kırılan numuneler, çatlak dağılımını görselleştirmek ve kırılma davranışlarını daha iyi anlayabilmek için bilgisayarlı tomografi (BT) ile analiz edilmiştir. Mezo-ölçekli boşlukların yapısı da ayrıca BT taraması ve imaj analizi ile incelenmiştir. Mezo-ölçekte arafaz deneyleri sırasında test edilen numunelerin kırılma yüzeyleri, arafaz dayanımı ve oluşan kırılma yüzeylerinin arasında bir bağıntı kurabilmek amacıyla çevresel elektron mikroskobu (ESEM) altında gözlemlenmiştir. Makro ölcekte test edilen numuneler de malzeme özelliklerini daha iyi karakterize edebilmek ve mekanik deney sonuçlarını desteklemek amacıyla çevresel elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

## **ARTICLE MAKALE**

#### 2.2. Makro-ölçekte tek eksenli basınç ve çekme deneyleri

Makro ölçekte deformasyon kontrollü, tek eksenli basınç ve çekme deneyleri, sırasıyla 1 ve 0.1 µm/sec, yükleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kontrol sinyali olarak kullanılan deformasyon ölçümü, tüm numune yüksekliği boyunca ölçüm yapan dört LVDT'den elde edilen ortalama değer kullanılarak yapılmıştır. Basınç ve çekme deneylerinde, sırasıyla 83 mm çap x 160 mm yüksekliğe, 83 mm çap x 80 mm yüksekliğe sahip silindir numuneler kullanılmıştır. Boşluklu beton, mezoboyutta boşluklar içeren doğası nedeniyle çok sayıda çentik de içerir. Bu nedenle çekme numunelerine çentik yapılmamıştır. Ani geri dönme (snap-back) davranışını önlemek için numune yüksekliği 80 mm tutulmuştur. Seçilen bazı boşluklu beton numunelerin makro ölçekteki basınç ve çekme deney sonuçları Tablo 2'de sunulmaktadır.

# 2.3. Mezo-ölçekte tek eksenli çekme ve basınç deneyleri ve mikroskobik gözlemler

Malzemenin uygun şekilde tasarımı, betonu oluşturan fazların (agrega, arafaz ve çimento hamuru) farklı ölçeklerdeki özelliklerinin bilinmesini gerektirir. Arafaz, üç faz arasında mekanik özellikleri hakkında en az bilgiye sahip olunan faz olma özelliğini korumaktadır. Çimento hamurunun mezo-ölçekli deneyi, uygulanması daha kolay bir deney iken, mezo-boyutlu arafaz deneyleri çeşitli zorluklar içermektedir. Mezo-ölçekte deneylerde, numunelerinin boyutlarını belirlerken referans olarak, boşluklu betonlarda kullanılan 4-8 mm agrega boyutu alınmıştır. 8 mm x 8 mm kare kesite sahip agregalar kullanılarak üretilen numuneler aynı zamanda, boyutlarının benzerliği nedeniyle makro boyuttaki boşluklu betonlarla mümkün olduğunca benzer rötre koşullarına sahip olabilmiştir. Numune üretilirken agreganın doğal yüzeyinin korunması da daha gerçeğe yakın bir arafaz yapısına sahip numuneler üretilmesine katkı sağlamıştır. Yer değiştirme kontrollü mezo-ölçekte deneyler Şekil 1 'de gösterilen agrega, cimento hamuru ve arasında oluşan arafazdan oluşan, kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kompozit numunelerin tamamında, kırılma agreganın hemen yanında, yani arafazda meydana gelmiştir. Bu nedenle, ölçülen tepe yükü arafazın çekme dayanımını belirlemek üzere kullanılabilmiştir. Çimento hamuru-bazalt agrega kompozit numunelerin testlerinde, ortalama 0.95 MPa arafaz çekme dayanımı bulunmuştur. % 15 silis dumanı içeren çimento hamuru ile üretilen bazalt örnekleri ise ortalama 1.3 MPa çekme dayanımı sağlamıştır. Sonuçlar genel olarak karşılaştırıldığında, silis dumanı içeren bazalt numunerinde, arafaz dayanımının açık bir şekilde arttığı görülmüştür. Bazı boşluklu betonlarda kullanılan dere çakılı, farklı mineralojik özelliklere sahip çeşitli agregalardan oluşmaktadır. Mezo-ölçekte gerçekleştirilen dere çakılı arafaz deneylerinde, farklı agrega çeşitleri arasında bazı agregaların çimento hamuru ile çok zayıf bağlar kurduğu tespit edilmiştir. Örneğin feldspat ve çört ile üretilen numuneler yaklaşık 0.5 MPa civarında çekme dayanımı göstermişlerdir. Bu tip zayıf bağ kuran çakıl agregası çeşitlerinin varlığı, makro-ölçekli deneyler sırasında daha düşük dayanım elde edilmiş olan dere çakıllı numunelerin davranışını açıklamada faydalı olmuştur. Bununla birlikte, mezo-ölçekli deneylerde özellikle çok yüksek bağlanma dayanımı değerleri (ortalama 1.7 MPa) elde edilen bir tip çakıl agregası, XRD kullanılarak incelenmiştir. XRD ve optik mikroskop incelemelerinde, söz konusu agreganın kalsit içerikleri bulunan bir tür kuvartsit olduğu tespit edilmiştir.





Şekil 1'de görüldüğü gibi mezo ölçekli deneylerden sonra kırılan yüzeyler çevresel elektron mikroskobu kullanılarak karakterize edilmeye; arafaz dayanımı ve kırık yüzeyler arasında bir bağıntı bulunmaya çalışılmıştır. Kantitatif bir karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber, numunelerde bulunan çimento hamurunun bağlayıcı olarak sadece çimento içermesi durumunda deney sonrasında agrega yüzeyinde çok az miktarda çimento bazlı malzeme bulunurken (en üstteki resim), çimento hamurunda silis dumanı bulunması durumunda ortaya çıkan kırılmış numunede agrega yüzeyinde çok daha fazla miktarda çimento bazlı faz bulunmaktadır (ortadaki resim). Alttaki resimde ise çok düşük bağlanma dayanımı değerleri gösteren feldspat agregası ve sade çimento hamuru içeren numunenin kırılan yüzeyi gösterilmektedir. Bu numunelerde agrega yüzeyinde neredeyse hiçbir kalıntı olmadığı gözlemlenmiştir. Genellikle arafazın bağlanma dayanımı arttıkça kırılma ile ortaya çıkan agrega yüzeylerinde çimento bazlı kalıntı miktarının arttığı söylenebilir.

Yer değiştirme kontrollü mezo ölçekli, tek eksenli çimento hamuru çekme deneyleri, makro-boyutlu örneklerde bulunan çimento hamuru ile aynı özelliklere sahip olan çimento hamuru numuneler üzerinde de uygulanmıştır. Silis dumanı içermeyen ve % 15 silis

# **MAKALE ARTICLE**

dumanı içeren çimento hamuru numuneler için sırasıyla ortalama 3.12 MPa ve 2.59 MPa çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler beklenenden düşüktür. Bu durumun nedeninin numunelerin çok küçük olması nedeniyle kuruma rötresinin bu numuneler üzerinde çok etkili olması olduğu düşünülmüştür. Ancak bu durum agrega taneleri çok ince çimento hamuru köprüleri tarafından birleştirilen boşluklu beton numuneler için de geçerlidir.

### 2.4. Serbest düşmeli dinamik basınç deneyi

Serbest düşmeli dinamik basınç deneyi, çeşitli ölçümler alabilmek için enstrümanlar yerleştirilmiş özel bir tip serbest düşme düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, beton numune, yere sabitlenmiş çelik taban yapısı üzerine yerleştirilmiş; çelik ağırlık 1.2 m yükseklikten yaklaşık olarak 4.0-4.7 m/sn hıza ulaşacak şekilde serbest düşmeye bırakılmıştır.



Deneyler için iki ölçüm tekniği Lazer Doppler hız ölçme metodu (LDV) ve hızlı kamera kullanılarak) geliştirilmiştir. Ayrıca gerilme ölçerlerle ölçümler alınmıştır. Gerilme ölçerler, elde edilmek istenen gerilme değerlerini direkt olarak temin ederken, LDV ve hızlı kamera kullanılan yöntemlerde öncelikle beton numune ve serbest düşen çelik ağırlık arasında oluşan sınırın hızı (parçacık hızı) tespit edilmiştir. Bir örneği Şekil 2'de görülen parçacık hızı verileri daha sonra empedans uyumsuzluğu yönteminin özel yankı (reverberans) uygulamasını kullanarak analiz edilmiştir [6]. Analiz sonucunda, beton numunelerin dinamik basınç gerilmesi elde edilmiştir. Deneylerde test edilen tüm betonlar kırıldığı için hesaplanan dinamik gerilmeler, numunelerin dinamik basınç dayanımını göstermektedir. Bu tekniğin önemli bir özelliği dinamik basınç dayanımının sadece çelik serbest düşme ağırlığının dinamik empedans özellikleri kullanılarak hesaplanabilmesi ve hesaplarda numunenin özelliklerinin kullanılmamasıdır. Özellikleri deney öncesinde bilinen metal ağırlığın çeşitli malzeme parametreleri hesaplarda kullanılırken, test edilen malzeme tamamen bilinmeyen bir malzeme olabilir. Seçilen bazı boşluklu betonların dinamik dayanım sonuçları Tablo 2'de sunulmustur.

 Şekil 2: Dinamik basınç dayanımı hesaplamalarında kullanılan çarpma yüzeyi hız-zaman grafiği örneği

### 2.5. Deney sonuçları

Tablo 2: Seçilen bazı boşluklu betonların statik ve dinamik deney sonuçları

Karışım kodu	Basınç dayanımı (MPa)	Mezo-boyutta boşluklar (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Young Modulü (MPa)	Kırılma enerjisi (N/m)	Dinamik Basınç Dayanımı (MPa)
PRC1	34.8	21.8	1.91	23413	105.1	66.5
PRC2	41.9	20.3	2.73	26644	110.0	76.8
PRC3	50.5	18.8	2.95	32177	110.3	86.0
PRC4	29.6	17.9	1.98	24841	101.2	56.2
PRC5	31.6	22.0	1.85	23361	120.3	53.1
PRC6	44.8	20.1	2.80	26487	107.0	79.7
PRC7	48.8	18.6	2.67	29605	96.7	84.4

Test sonuçlarına göre, iki ayrı standart boyut aralığında agrega (% 50 2-4 mm -% 50 4-8 mm) içeren boşluklu betonlar, tek standart boyut aralığında agrega (2-4 veya 4-8 mm) içeren boşluklu betonlarla karşılaştırıldığında daha yüksek statik ve dinamik dayanım sonuçları vermişlerdir. Tüm karışımlar arasında, iki ayrı standart boyut aralığında agrega içeren PRC3 and PRC7 karışımları en yüksek statik ve dinamik dayanımları göstermişlerdir. Tüm karışımların bilgisayarlı tomografi (BT) ve imaj analizi ile elde edilen boşluk oranları karşılaştırıldığında, (PRC3 için 18.8% ve PRC7 için 18.6%), agrega boyutu dağılımı ve ona bağlı olarak gelişen boşluk oranının dayanımdaki artışı etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu görülmüştür.

## **ARTICLE MAKALE**

Mezo-ölcekte gerceklestirilen arafaz deneyleri, cimento hamuru bileşimi ve agrega tipinin arafazın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili önemli bilgiler sağlamıştır. Sonuclara göre, silis dumanının arafaz özelliklerini iyileştirdiği açık bir şekilde görülmüştür. Ancak bu geliştirici etki, ince agrega içermemesi nedeniyle normal betona göre çok daha az miktarda arafaz içeren boşluklu betonlara uygulanan makro-boyuttaki deneylerde gözlemlenememiştir. Toplam arafaz miktarının az olması dışında, deneyler sırasında çatlamış boşluklu betonların bilgisayarlı tomografi (BT) ile incelenmesinde görülen çatlak dağılımı da sonuçları açıklamada kullanılabilir. Normal betondan farklı bir şekilde, çatlakların daha çok agrega ve boşluk yapısı tarafından yönlendirilmesi ve buna bağlı olarak betonda bulunan en zayıf faz olan arafazdan geçmek yerine sıklıkla diğer fazlardan geçmesi de sonuçlar üzerinde etkili olmuştur. Ayrıca, karışım içindeki agregaların ince olması durumunda, çatlaklar daha çok arafazdan gecerken agrega boyutu arttıkca catlaklar artan şekilde diğer fazlardan geçmektedir. Bu durum da silis dumanının, daha ince agregalara sahip boşluklu betonlarda çok az miktarda dayanım artışı sağlarken, iri agregalı boşluklu betonlarda hemen hemen hicbir etki göstermemesini de acıklayabilmektedir.

### 3. Boşluklu betonların dinamik özelliklerinin ve fragmantasyon davranışının nümerik olarak incelenmesi

Çalışmanın nümerik kısmının amacı, boşluklu betonun dinamik yük altındaki davranışının ve farklı kontrol parametrelerinin etkilerinin mezoskopik olarak analiz edilmesidir. Nümerik analizlerde, boşluklu betonun normal betondan başlıca farkları, rastgele şekilli mezo-boyutta hava boşluklarına sahip olması ve boşlukların etrafındaki serbest yüzeylerin yükleme altında yeni kontakt noktaları oluşturmalarıdır. Analizlerde, açık zaman entegrasyonunu (explicit time integration) esas alarak hesaplamalar yapılabilen bir sonlu eleman programı (ABAQUS/Explicit) kullanılmıştır. Betonun çimento bazlı fazlarının tanımlanmasında Beton Hasar Plastisite (Concrete Damaged Plasticity) Modeli kullanılmıştır [7,8]. Nümerik çalışmaya, boşluklu betonu dört fazlı (agrega, arafaz, çimento hamuru ve havadan oluşan) bir malzeme olarak gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için beton içinde bulunan agregaların dağılımının üç boyutlu olarak belirlenmesi ile başlanmıştır. Elde edilen verileri bir sonlu eleman ağına dönüştürmek için bir ağ geliştirme programı oluşturulmuştur. Analizlerde, aksisimetrik bir geometri kullanılmıştır. Boşluklu betonun davranışında kontakt özelliklerinin çok önemli bir yeri olduğu için, betonbeton kontaktlar: öz-kontakt (self-contact), çelik yük ile beton numune arasında oluşan kontakt ise: yüzey-yüzey arası (surfaceto-surface) kontakt olarak tanımlanmıştır. Analizlerde, dinamik yük altında oluşan çatlak dağılımı çekme ve basınç hasar parametreleri, (sırasıyla DamageT ve DamageC) ile gözlemlenmiştir.

Şekil 3'te örnek olarak gösterilen grafik, 4-8 mm bazalt agrega içeren bir boşluklu beton karışımının (Tablo 1'de PRC1) nümerik analiz ile elde edilmiş dinamik basınç-zaman eğrisini göstermektedir. Nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir. Örneğin PRC1 karışımına ait numunelerin deneylerinde 66.5 MPa dinamik basınç dayanımı (Tablo 2) elde edilmiştir. Tüm karışımların hasar parametresi kontürleri incelendiğinde, çoklu çatlak oluşumu ve dolayısıyla da çok sayıda küçük boyutta fragman ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Farklı karışımların fragmantasyon davranışlarındaki farklılıklar da nümerik olarak tespit edilebilmiştir.

Hasar gelişimi kontürlerini kullanarak, yüksek hasar parametresi değerlerine ulaşan (hasar parametreleri DamageT ve DamageC ≥ 0.9) elemanların kaldırılmasıyla, deneylerdeki gerçek çatlak dağılımları oldukça yakın bir şekilde tahmin edebilmiştir. Bu durum hızlı kamera videoları ve deneylerin ardından toplanan fragmanların boyutlarıyla karşılaştırmalar yapılarak tespit edilmiştir. Nümerik olarak elde edilen fragmanların boyutlarının tahmin edilmesi de projenin önemli amaclarından biri olmuş ve bu karşılaştırmayı mümkün kılmıştır. Fragman boyutu analizinde, her bir iki boyutlu fragmanın alanı MATLAB kullanılarak bu amaç icin oluşturulan kısa bir program ile tek tek hesaplanarak çeşitli boyut gruplarına ayrılmıştır. Bu çalışmanın bir örneği Şekil 4'te verilmektedir. Deneylerde elde edilen fragmanlar da standart eleklerden elenerek boyutlarına göre gruplara ayrılmış; eleklerden geçebilecek çaplara sahip dairelerin alanları esas alınarak nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonunda deneysel ve nümerik sonuçların yakınlığı tespit edilmiştir.



**Şekil 3:** Nümerik analiz ile elde edilmiş dinamik basınç-zaman eğrisi (PRC1), kullanılan sonlu eleman ağı ve seçilen iki zaman değeri için hasar parametresi kontürleri (DamageT + DamageC)



Şekil 4: Fragman boyutu analizi (PRC1)

### **MAKALE ARTICLE**

### 4. Sonuçlar

Bu çalışmanın başlıca sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

-Beton karışım içeriği ve betonu yerleştirme ve sıkıştırma yönteminde yapılan bazı geliştirmelerle güvenlik uygulamalarında kullanılmak üzere arttırılmış dayanıma sahip (30-50 MPa statik and 55-85 MPa dinamik basınç dayanımına sahip) boşluklu betonlar elde edilmiştir.

-Agrega özellikleri, araştırılan parametreler arasında boşluklu betonun dayanım özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahip faktörler olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeni, kaba agreganın, boşluklu betonun iskelet yapısının oluşmasında çok etkili olması şeklinde açıklanabilir.

-Boşluklu betonlar üzerinde farklı ölçeklerde incelemeler (makro ve mezo ölçekte deneyler, mikroskopik analizler) uygulayarak değişik faktörlerin boşluklu betonun özelliklerine etkileri araştırılmış, araştırma sonuçları malzemenin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

-Serbest düşme deneylerinde test edilen boşluklu beton numunelerin dinamik basınç dayanımının belirlenebilmesi için iki ölçüm metodu (lazer Doppler hız ölçümü ve hızlı kamera teknikleri kullanılarak) geliştirilmiştir. Ölçüm metotları farklı tipte boşluklu betonların dinamik basınç dayanımlarını belirlemede başarılı olmuştur.

-Çalışmanın nümerik kısmında, boşluklu betonların dinamik davranışı açık zaman entegrasyonu yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan sonlu eleman yöntemi ile dinamik dayanım, çatlak dağılımı ve fragmantasyon davranışı gerçek deney sonuçlarına yakın bir şekilde tahmin edilebilmiştir.

# TEŞEKKÜR

Bu çalışma Delft Teknoloji Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiş, Hollanda Savunma Akademisi tarafından desteklenmiştir.

### Kaynaklar

[1] Nolan, D. P., Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles, Elsevier. (2010)

[2] Comité Euro-International du Béton, 'Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading', CEB Bulletin 187 (1988).

[3] Weerheijm, J., Vegt, I. and van Breugel, K., 'Research developments and experimental data on dynamic concrete behaviour', C.U. Grosse (ed.), Advances in construction materials; Berlin: Springer, (2007) 765-773

[4] Yang J and Jiang G., 'Experimental study on properties of pervious concrete', Cement and Concrete Research, 33 (3) (2003) 381-386.

[5] Ghafoori N, Dutta S. 'Building and nonpavement applications of no-fines concrete', Journal of Materials in Civil Engineering, 7 (4) (1995) 286-289.

[6] Agar Ozbek, A.S., Weerheijm; J., Schlangen, E; and van Breugel, K.'Drop weight impact strength measurement method for porous concrete using laser Doppler velocimetry', Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (2012) 1328-1336.

[7] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Onate, E., 'A plastic-damage model for concrete', International Journal of Solids and Structures, 25 (3) (1989) 299-326.

[8] Jankowiak, T. and Lodygowski, T., 'Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model', Foundations of Civil and Environmental Engineering, 6 (2005) 53-69.