

## DAİRESEL AGREGALI MODEL BOŞLUKLU BETONLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

*Ayda Şafak AĞAR ÖZBEK* \*  
*Jaap WEERHEIJM* \*\*  
*Klaas van BREUGEL* \*\*\*

Alınma: 10.11.2017; düzeltme: 05.12.2017; kabul: 31.12.2017

**Öz:** Boşluklu beton, agregata tanelerinin birbirine ince bir çimento hamuru tabakası ile bağlanması sonucu oluşan, yüksek oranda mezo-boyutta boşluk içeren özel bir tip betondur. Güvenlik uygulamalarında kullanılmak üzere dayanımı artırılmış boşluklu betonlar geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bir projede, boşluklu betonların dinamik davranışları sonlu eleman yöntemiyle analiz edilmiştir. Analizlerde, ABAQUS/Explicit programında tanımlı bulunan açık doğrudan entegrasyon metodu kullanılarak dairesel agregalı boşluklu betonlar incelenmiştir. Boşluklu betonlar ve bir yalın betonda eş basınç eğrilerinin gelişiminden yola çıkarak dalga ilerlemesi hızı tahmin edilmiştir. Hesaplanan değerlerin literatürdeki değerlere ve deneysel ultrases dalgası hızı sonuçlarına çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında iki farklı boyutta agregata içeren boşluklu betonun dayanımlarının birbirine neredeyse eşit olduğu tespit edilmiştir. Boşluklu betonlarda oluşan hasar dağılımı ve gerilme yığılmaları incelendiğinde, deneylerde de tespit edildiği gibi dinamik yükleme altında çoklu çatlaklar ve yaklaşık olarak agregata boyutunda fragmanlar oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle, fragman boyutunun agregata boyutu tarafından belirlendiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluklu beton, Açık sonlu eleman analizi, Dinamik analiz, Serbest düşme deneyi

### Finite Element Analysis of the Dynamic Behavior of Model Porous Concretes with Circular Aggregates

**Abstract:** Porous concrete is a special type of concrete that includes a high amount of meso-size air pores and is formed by the aggregate particles assembled by a thin layer of cement paste. In the scope of a research project, having an objective of designing enhanced strength porous concretes to be used in safety applications, dynamic properties of porous concretes were analyzed with finite element method. In the analyses, porous concretes with circular aggregates were analyzed by using the explicit direct integration technique implemented in ABAQUS/Explicit. Based on the analysis results, stress wave propagation speeds of porous concretes and a plain concrete were estimated based on stress contours. The numerically estimated values were found to be very close to the reference values in literature and the experimental results. On the other hand, the impact strengths obtained for two model porous concretes having different aggregate sizes were found to be nearly equal. When the computed damage distributions and stress concentrations were examined, it was seen that under dynamic loading, the fragments formed were approximately at the size of aggregates. Therefore, it is concluded that the fragment size in porous concretes is mainly determined by the size of the aggregates incorporated in the mixture.

**Keywords:** Porous concrete, Explicit finite element analysis, Dynamic analysis, Drop weight impact test

\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Sarıyer, 34469, İstanbul

\*\* Delft Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ve Yer Bilimleri Fakültesi, 2628 CN, Delft, Hollanda  
TNO, Defense, Security and Safety, 2280 AA, Rijswijk, Hollanda

\*\*\* Delft Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ve Yer Bilimleri Fakültesi, 2628 CN, Delft, Hollanda  
İletişim Yazarı: Ayda Şafak Ağar Özbek (sagar@itu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Patlama, genel anlamda yüksek genlikte ve ani bir enerji boşalımı şeklinde tanımlanabilir (Nolan, 2010). Servis ömürleri boyunca patlama tipi yüklemelere maruz kalma olasılıkları daha yüksek olan (patlayıcı depoları, önemli yapıların koruyucu dış duvarları gibi) yapılarda kullanılmak amacıyla, dinamik yükler altında çevre için tehdit oluşturmayacak ufak boyutta fragmanlara ayrılan özel bir tip betonun geliştirilmesi ve modellenmesini amaçlayan bir araştırma projesi kapsamında çeşitli çimento bazlı malzemeler incelendi. Delft Teknik Üniversitesi ve Hollanda Savunma Akademisi ortak projesi olan araştırmada, statik dayanımı artırılmış ancak boşluklu yapısını koruyan çeşitli boşluklu betonlar geliştirildi ve dinamik davranışları modellendi. Bu çalışmada, proje dahilinde gerçekleştirilen model betonların dinamik davranışının nümerik olarak incelenmesi ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Boşluklu beton, agrega tanelerinin birbirine ince bir çimento hamuru tabakası ile bağlanması sonucu oluşan, yüksek oranda mezo-boyutta boşluk içeren özel bir tip betondur. Mezo-boyutta boşlukları nedeniyle pek çok farklı uygulama alanında kullanılan boşluklu betonun mekanik özellikleri normal betondan oldukça farklıdır (Yang ve Jiang, 2003; Chindaprasirt ve ark., 2008; Ghafoori ve Dutta, 1995; Marolf ve ark., 2004). Boşluklu betonda, yüksek boşluk oranı sağlamak için karışım içeriğini ve üretim tekniğini normal betondan farklı tutmak gerekmektedir. Örneğin süreksiz hatta tek boyutta agrega dağılımı seçmek, çimento hamuru miktarını azaltmak boşluklu beton oluşturmada en sıklıkla kullanılan beton tasarım yaklaşımlarıdır (Ghafoori ve Dutta, 1995). Yüksek oranda boşluk oranının sağladığı geçirimsizlik, ısı yalıtımı ve gürültü emme özellikleri literatürde sıklıkla incelenirken, yine boşluklu yapısının mekanik özelliklerini zayıflatması nedeniyle boşluklu betonun statik ve dinamik dayanım özellikleri çok fazla araştırma konusu olmamaktadır.

Bu çalışmada, boşluklu betonun dinamik yükleme (serbest düşmeli dinamik basınç deneyi) altındaki davranışını modellemek amaçlanmıştır. Analizlerde elde edilen eş basınç eğrilerinin zamanla gelişimi, ultrases dalgası deneyi sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde, açık zaman entegrasyon yöntemi (explicit time integration) kullanılmıştır. Açık hesap metodu, daha yaygın bir şekilde kullanılan kapalı sonlu eleman hesap yöntemlerine bir alternatif olarak son yıllarda dinamik analizlerde tercih edilmeye başlanmıştır. Yöntemin, özellikle doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılmasının daha verimli olduğu bilinmektedir. Artırımlı olan fakat iteratif olmayan bir hesaplama şeklidir (Wu ve Gu, 2012). Kapalı çözümlerde iterasyon nedeniyle her bir zaman adımında çok sayıda hesaplama yapılırken açık çözümde, uygulanması daha az zaman alan hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Ancak bunun yanında, yine iterasyon olmadığı için gerçek hesaptan uzaklaşma ve stabilite problemleri yaşamamak için zaman adımları, kapalı yöntemlere göre çok daha fazla sayıda ve kısadır. Bu nedenle de bu hesaplama metodu statik hesaplamalar için uygun olmamakta, kısa sürede gerçekleşen dalga yayılımı, çarpma gibi hesaplamalarda verimli olabilmektedir (Wu ve Gu, 2012; Noh ve Bathe, 2013; Tarque, 2011).

Bu çalışmada açık entegrasyon yönteminin seçilmesinin nedeni, hesaplanan sistemin doğrusal olmayan davranışı ve yükleme zamanının kısıtlıdır. Açık çözümleme yöntemleri arasında en yaygın şekilde kullanılanı merkezi fark (central difference) yöntemidir. Yöntemde, yer değiştirme ve hız, söz konusu zaman adımının başında bilinen değerler kullanılarak hesaplanmaktadır. Hesaplama, iterasyon gerektirmemektedir. Örneğin  $(t+\Delta t)$  zamanında hesaplanan yer değiştirmeler, bir önceki zaman  $(t)$  için hesaplanmış matrisler ve  $(t-\Delta t)$  ve  $(t)$  zamanları için hesaplanmış yer değiştirmeler kullanılarak hesaplanmaktadır (Chopra, 2000; Huebner ve ark., 2001). Bunun yanında hesaplamanın kontrolü, toplam enerji denkleminin ve bileşenlerinin eşitlenmesi ve kontrolü ile mümkün olmaktadır. Her hesap adımında matrisler yenilenirken, hesap adımları arasında matrislerde çok büyük değişiklikler olmaması için zaman adımlarının çok küçük tutulması gerekmektedir (Simulia, 2013; Chen ve ark. 2012; Sun ve ark., 2000; Siad ve ark., 2008) Açık hesaplama metodu ayrıca, geometrisinde süreksizlik bulunan

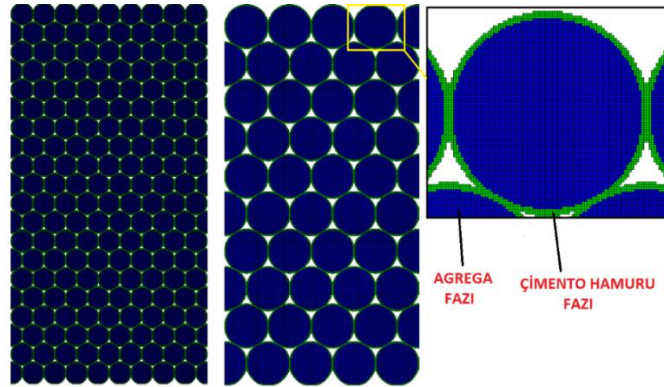
problemlerde ve iki malzeme arası temas problemlerinde tercih edilmektedir (Susila ve Hryciw, 2003). Boşluklu beton analizi de temas tanımlamanın önemli olduğu bir analiz tipidir.

## 2. DAİRESEL AGREGALI BOŞLUKLU BETONLARIN SONLU ELEMAN ANALİZİ

Çalışma kapsamında, boşluklu betonlarda dinamik yükleme altında oluşan gerilme yığılımları, dinamik basınç dayanımı ve hasar dağılımı gibi bilgiler elde edebilmek için model boşluklu betonlar oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen nümerik analizlerde, çapı dört ve sekiz mm olan daireler kullanılarak tanımlanan model boşluklu betonlar incelenmiştir. Model boşluklu betonlar üç fazdan (agrega, çimento hamuru ve hava) oluşacak şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan iki farklı model boşluklu betonun özellikleri Tablo 1’de verilmektedir.

<b>Tablo 1. Dairesel agregalı model boşluklu beton analizleri</b>		
<b>Malzeme fazları: agregalar + çimento hamuru+hava</b>		
Analiz	Agrega çapı (mm)	Çimento hamuru kalınlığı (mm)
AGG4	4,0-(2*0,1)=3,8	0,1
AGG8	8,0-(2*0,1)=7,8	0,1

Gerçekleştirilen sayısal analizlerde, genel amaçlı bir sonlu eleman programı olan ABAQUS/Explicit (dinamik açık analiz modülü) kullanılmıştır. Analizlerde aksisimetrik geometri seçilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman ağı aksisimetrik olarak 360 derece döndürülerek üç boyutlu ağ elde edilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman ağına, boşluklu beton, agregaya ve etrafındaki çimento hamuru tabakasıyla beraber toplam 4 mm ve 8 mm çaptaki dairelerin hegzagonal sık diziliş ile yerleştirilmesinden oluşturulmuştur (Şekil 1). Tablo 1’de de belirtildiği gibi agregaların etrafında 0,1 mm kalınlığında çimento hamuru tanımlanmıştır. Agregaya boyutunun artmasıyla ortalama boşluk boyutunun arttığı bilinirken, tek boyutta agregaya içeren karışımlarda, agregaya boyutunun değiştirilmesiyle toplam boşluk oranında değişiklik olmaması beklenir (Marolf ve ark.,2004). Boşluk boyutu, agregaya boyutu küçültüldükçe (4 mm agregalı betonda) azalmıştır. Betonlardaki toplam boşluk oranı (b) hesaplandığında; b=0,1093 (8 mm çaplı 45 agregaya, numune boyutları 70,5 mm x 36,0 mm) ve b=0,1029 (4 mm çaplı 180 agregaya, numune boyutları 69,8 mm x 36,0 mm) bulunmaktadır.



**Şekil 1:**

*4 mm ve 8 mm dairesel agregalardan oluşturulan model boşluklu betonların sonlu eleman ağları (agrega+çimento hamuru fazları)*

Malzeme fazlarından agregaya fazı lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Tanımlamada kullanılan elastik sabitler, deneysel numunelerde de kullanılan bazalt agregalar esas alınarak seçilmiştir (E=50 GPa,  $\nu=0,3$ ) (Zhang, 2017; Schön, 2015). Çimento hamuru fazının tanımlanmasında ise Beton Plastisite-Hasar (Concrete Damaged Plasticity) malzeme modeli kullanılmıştır. Beton Plastisite-Hasar modeli, plastisite temelli bir hasar modelidir ve özellikle

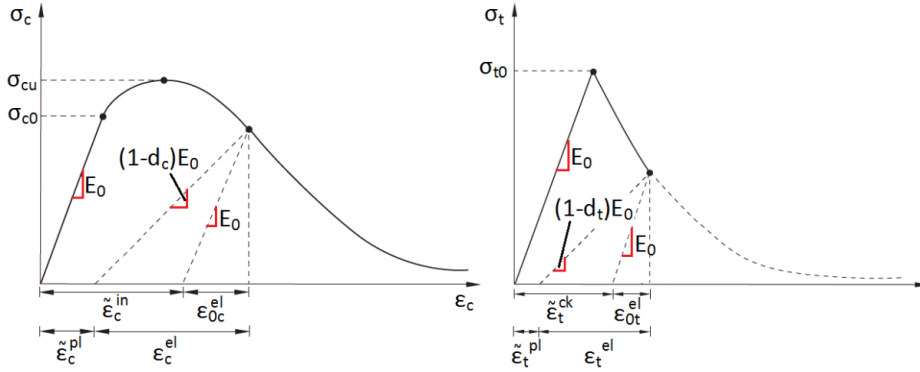
çimento bazlı malzemelerin tanımında kullanılmaktadır. Model, Lubliner ve diğerleri tarafından Drucker-Prager modeli baz alınarak oluşturulmuş, Lee ve Fenves tarafından da geliştirilmiştir (Lubliner ve ark.,1989; Lee ve Fenves, 1998; Hillerborg ve ark., 1976). Modelde şekil değiştirme hızı hassasiyeti mevcuttur, bu nedenle dinamik hesaplarda da tercih edilmektedir. Model, iki ana mekanizma (çekme çatlaması, basınç ezilmesi) üzerine kurulmuştur. Bu sayede, çimento bazlı malzemelerin çekme ve basınç altındaki davranışları, elastik rijitliğin degradasyonu şeklinde ayrı ayrı tanımlanabilmektedir (Simulia, 2013; Jankowiak ve Lodygowski, 2005). Oluşan hasar ise elemanın rijitliğindeki azalma olarak tanımlanmaktadır ve izotropik kabul edilmektedir. Skalere bir parametre olan hasar: 0 tamamen hasarsız, 1 tamamen hasarlı aralığında tanımlanmaktadır. Modelde çekme ve basınç için de iki farklı hasar değişkeni bulunmaktadır.

Analiz sırasında program, inelastik şekil değiştirme değerlerini plastik şekil değiştirme değerlerine çevirmektedir. Şekil 2’de gösterilen bu dönüştürme aşağıdaki eşitlikler (1)’de basınç durumu için ifade edilmektedir. Şekilde ve denklemler (1)’de “pl” ve “in”, plastik ve inelastik değişkenleri tanımlamada kullanılmakta,  $d_c$  basınç için hasar değişkenini göstermektedir (Simulia, 2013; Jankowiak ve Lodygowski, 2005). Denklemlerde basınç durumunda c, çekme durumunda T alt indisleri kullanılmaktadır (çekme için hasar değişkeni  $d_T$  ile gösterilmektedir.)

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (\text{çekme için})$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}$$



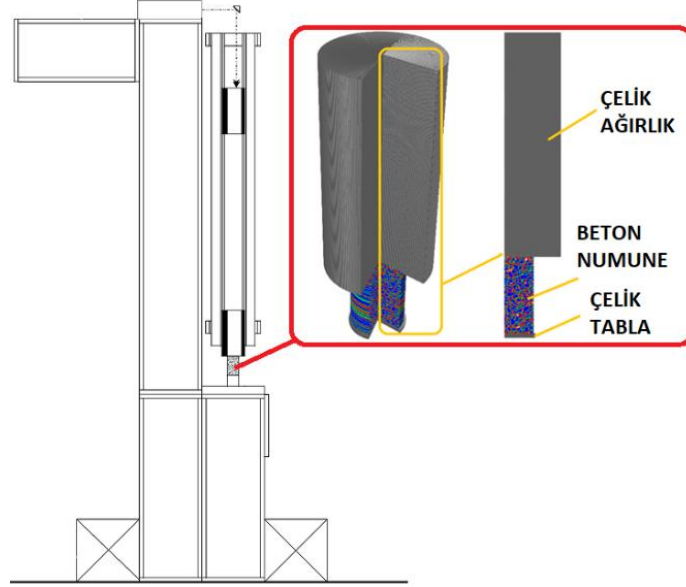
**Şekil 2:**

*Beton Plastisite-Hasar malzeme modelinde basınç ve çekme davranışı tanımı (Simulia, 2013)*

Analizde, çimento hamuru fazının tanımlanmasında deneysel gerilme-şekil değiştirme grafikleri kullanılmıştır. Ancak bu grafiklerin programa girdi verisi olarak kullanılması için ham veri grafiğinin kontrol edilerek ani iniş çıkışların kaldırılması gerekmektedir. Hesaplama sırasında deneysel verideki ani inişler, lokal olarak negatif inelastik şekil değiştirme değerleri vererek programda hatalara sebep olabilmektedir. Bu nedenle deneysel veriler, Jankowiak and Lodygowski'nin modelleme literatüründe çok yaygın bir şekilde referans alınan çalışması esas alınarak kontrol edilmiş ve ani iniş çıkışlar kaldırılmıştır (Simulia, 2013; Jankowiak ve Lodygowski, 2005).

Analizlerde, serbest düşme deneyine tabi tutulan model beton numuneler simüle edilmiştir. Kullanılan sonlu eleman ağı, Şekil 3’te de belirtilen ağ bileşenlerinden oluşmaktadır: 30 mm eninde, 75 mm yüksekliğinde beton numune ağı (aksisimetrik analizde 60 mm çapında, 75 mm

yüksekliğinde silindirik numuneyi temsil etmektedir), numenin altında bulunan çelik tabla ve 55 mm genişliğinde, 220 mm yüksekliğinde çelik düşey ağırlık ağı (110 mm çapında, 220 mm yüksekliğinde çelik düşey düşme ağırlığı). Numunenin altında bulunan çelik tabla ankastre biçimde sabitlenirken; çelik ağırlık sadece düşey deplasmana müsaade edecek şekilde yatay deplasmanlar ve tüm dönmeler kısıtlanacak şekilde tanımlanmıştır.



**Şekil 3:**

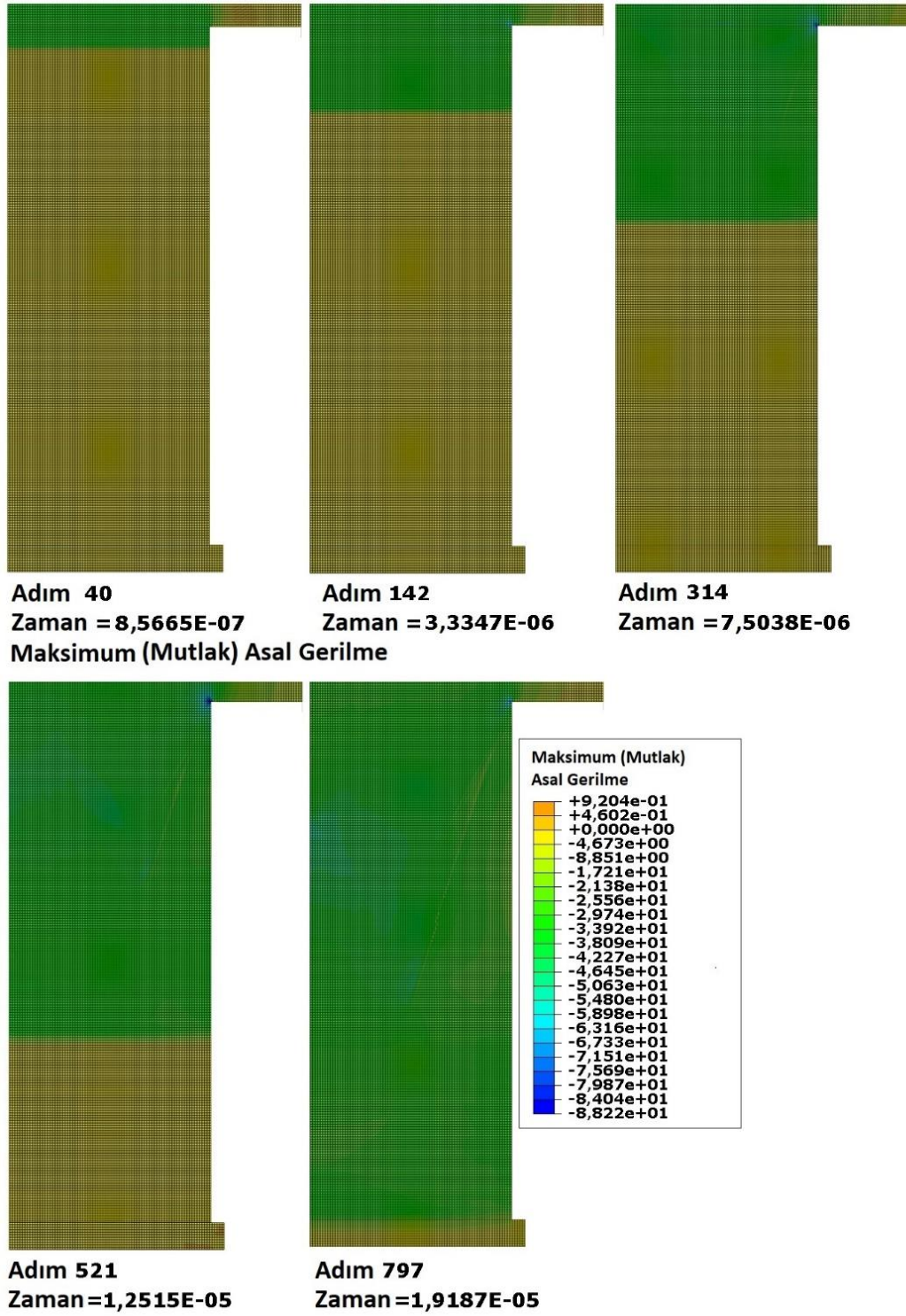
*Serbest düşme deney düzeneği ve analizlerde kullanılan sonlu eleman ağı örneği*

Düzenekte altta bulunan çelik tabla ve beton numune arasında ve ayrıca üstteki çelik ağırlık ve beton numunenin üst yüzeyi arasında, sürtünme katsayısının 0,3 olarak alındığı yüzey-yüzey arası (surface-to-surface) temas tanımlanmıştır. Benzer şekilde betonun boşluklarında sürtünme katsayısı 0,5 olacak şekilde, yükleme ile oluşabilecek öz-temas (self-contact) belirtilmiştir. Söz konusu sürtünme katsayıları literatürden ve standartlardan alınmıştır (Gorst ve ark., 2003; DIN, 1982; BS, 1997). Analizlerde yükleme, çelik serbest düşme ağırlığına verilen 4,5 m/s lik bir ilk hız ile oluşturulmuştur. Hız seçiminde, projenin deneysel kısımlarında gerçekleştirilmiş olan serbest düşme deneylerinde Doppler lazer aleti tarafından ölçülen serbest düşme çarpma hızı temel alınmıştır.

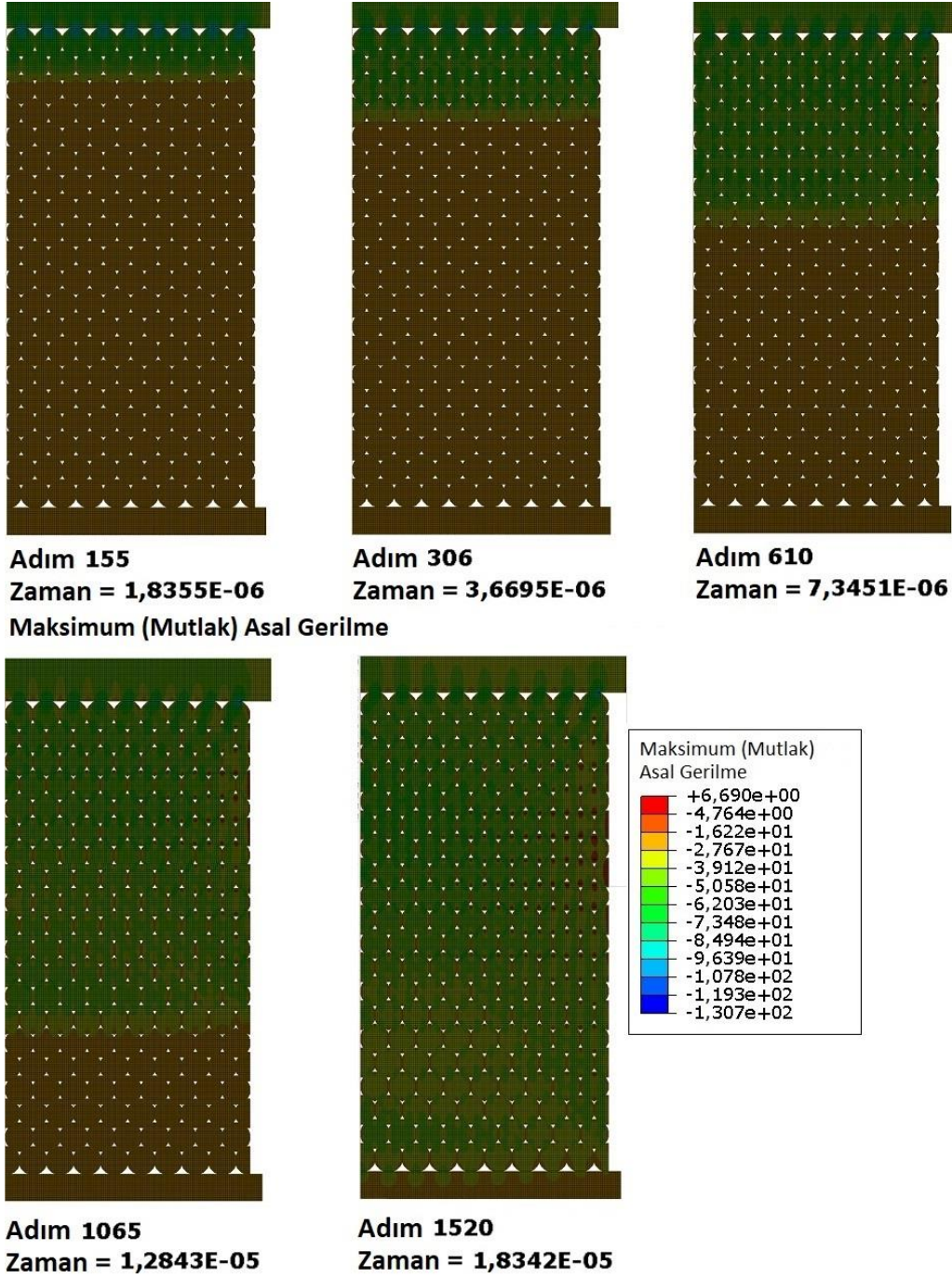
### 3. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

#### 3.1. Basınç Gerilmesi Dalgası Hızı

Gerçekleştirilen açık sonlu eleman analizlerinde öncelikle, çarpma anından başlayarak gerilmenin zaman içinde numunede ilerlemesi incelenmiştir. Önce ortalama dayanım özelliklerine sahip bir normal betonda, ardından da boşluklu betonda eş basınç eğrilerinin gelişiminden yola çıkarak dalga ilerlemesi hızı hesaplanmıştır. Şekil 4 , Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla maksimum mutlak asal gerilme değerleri sunulmuştur. Çalışmada, gerilme dağılımı, maksimum mutlak asal gerilme (işaretten bağımsız olarak o düğüm noktasına ait asal gerilmelerin sayısal olarak en büyük değere sahip olanı) ile ifade edilmiştir. Bu şekilde, numune içinde oluşan gerilme yığılımları daha açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Şekiller 4-7'de bulunan renk skalalarında belirtilen maksimum mutlak asal gerilme değerlerinde, eksi işaret basıncı, artı işaret ise çekmeyi göstermektedir. Hesaplamalarda, basınç gerilmesinin numune içinde ilerlemesi sırasında geçen zaman belirlenmiştir. Geçen zaman kullanılarak dalga hızı yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen dalga hızları, literatürdeki dalga hızı değerleri ve proje kapsamında üretilen betonlara uygulanan ultrases dalgası hızı deneylemlerinden elde edilen değerlerle de karşılaştırılmıştır.



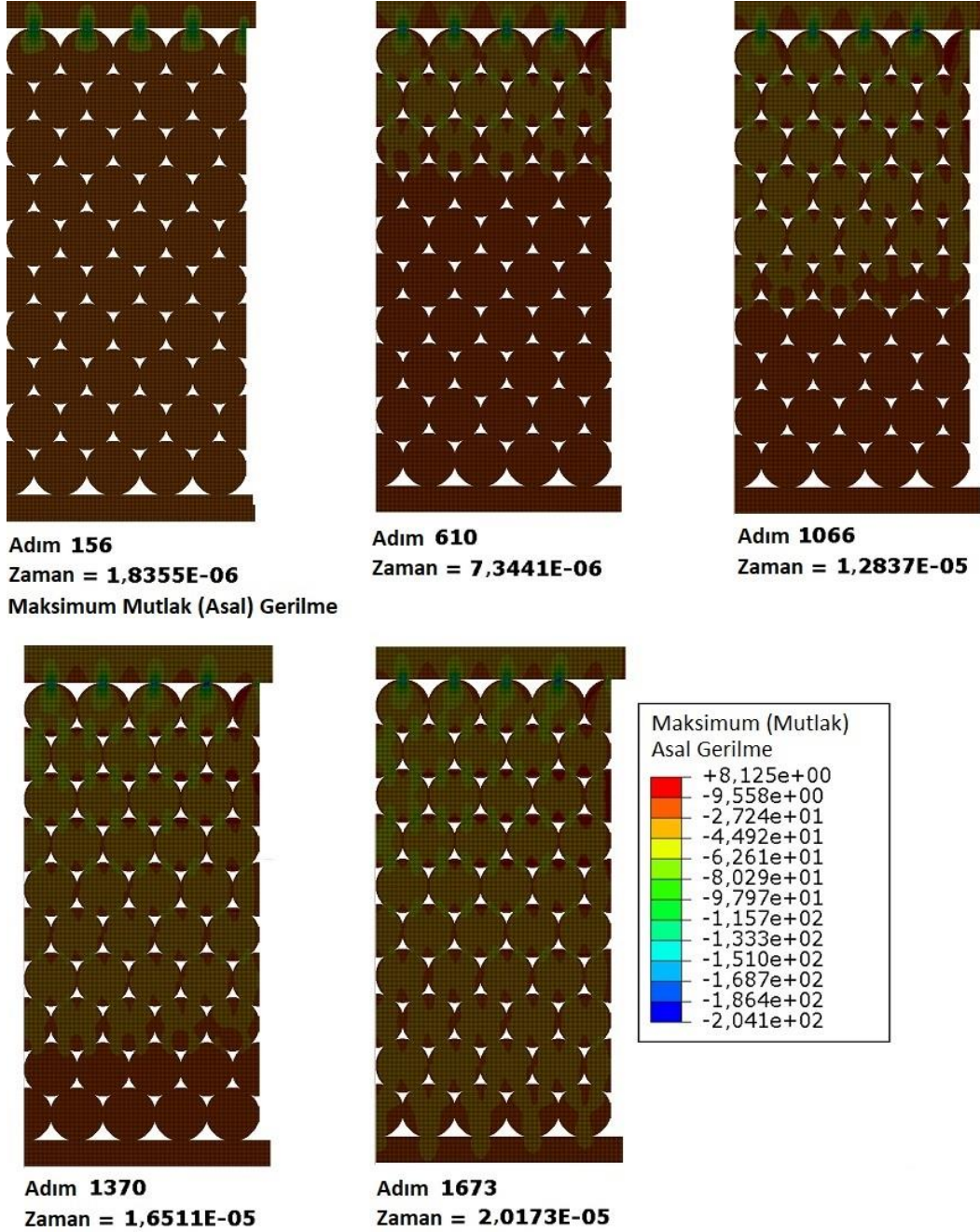
Şekil 4:  
Maksimum mutlak asal gerilme -zaman gelişimi (normal beton)



**Şekil 5:**  
*Maksimum mutlak asal gerilme -zaman gelişimi (4 mm boşluklu beton)*

Analizlerde kullanılan ve deneysel numuneler esas alınarak oluşturulan numunelerin yüksekliği 75 mm'dir. Örneğin normal beton için (Şekil 4), basınç dalgasının numunenin tamamında ilerlemesinin  $1,9 \cdot 10^{-5}$  s'lik bir zamanda gerçekleştiği, maksimum mutlak asal gerilme gelişiminde görülmektedir. Bu durumda dalga hızı,  $(75/1,9 \cdot 10^{-5}) = 3950$  m/s şeklinde hesaplanmaktadır. Literatürde, boşluklu betonun ses dalgası iletim hızı hakkında yayın bulunmazken, normal betonda ses dalgası hızının yaklaşık olarak 3100-3700 m/s arasında olduğu belirtilmektedir (Grondzik ve ark., 2010; Dann ve Dann, 2012). Nümerik sonuçlardan elde edilen dalga hızı, bu değerlere oldukça yakındır. Aynı hesaplama, boşluklu betonlar için de

uygulandığında, 4 mm çaplı agregalı boşluklu betonlarda: basınç gerilmesi ilerleme süresi  $1,83 \cdot 10^{-5}$  s, numune yüksekliği 69,8 mm, dalga hızı 3814 m/s şeklinde hesaplanmıştır (Şekil 5). 8 mm çaplı agregalı betonlarda ise: basınç gerilmesi ilerleme süresi  $2,01 \cdot 10^{-5}$  s, numune yüksekliği 70,5 mm, dalga hızı 3507 m/s şeklinde hesaplanmıştır (Şekil 6). Toplam boşluk oranı aynı olmakla beraber, 4 mm çaplı agregalardan oluşan boşluklu betonda hızın daha yüksek olması, bu betonda bulunan boşlukların 8 mm agregalı betona göre daha küçük boyutta olması, dolayısıyla da gerilmenin iletilmesinde izlenen yolun daha kısa olması ile açıklanabilir.



**Şekil 6:**  
Maksimum mutlak asal gerilme -zaman gelişimi (8 mm boşluklu beton)



Proje kapsamında deneysel olarak üretilen çeşitli boşluklu betonlara ve bir orta-düşük statik dayanıma sahip (ortalama statik basınç dayanımı  $\cong 26,4$  MPa) normal betona ultrases dalgası hızı tayini deneyi uygulanmıştır. Normal betona da deney uygulamanın amacı boşluklu betonlarla normal beton arasında bir karşılaştırma yapabilmektir. Ölçümlerde Pundit Plus beton ultrases test aleti kullanılmıştır. Yaygın bir şekilde kullanılan ultrases dalgası hızı deneylerinde, nümerik çalışmaya benzer bir şekilde, ultrases dalgasının numune boyunca ilerlemesi için gerekli zaman ölçülmektedir. Söz konusu beton karışımlarının özellikleri ve numune yüksekliğinin geçen zamana bölünmesi ile elde edilen ultrases dalgası hızları Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmaktadır.

**Tablo 2. Normal ve boşluklu betonların karışım özellikleri**

<b>Karışım kodu</b>	<b>PRC1</b>	<b>PRC2</b>
Bazalt kırma taş (4-8 mm) (g)	2000	2000
Çimento (CEM I 52.5) (g)	351	298
Mikrosilika (g)	-	53
Su (g)	105	105
Süperakışkanlaştırıcı (g)	0,97	1,30
Priz geciktirici katkı (g)	1,20	1,20
<b>Karışım kodu</b>	<b>NC1</b>	
Çimento (CEM I 42.5) (g)	1033	
0.125-0.250 mm dere kumu (g)	440	
0.250-0.500 mm dere kumu (g)	813	
0.500-1 mm dere kumu (g)	940	
1-2 mm dere kumu (g)	940	
2-4 mm dere kumu (g)	1253	
4-8 mm dere çakılı (g)	1880	
Su (g)	583	
Süperakışkanlaştırıcı (g)	19	

**Tablo 3. Boşluklu betonlar ve normal betonda deneysel ultrases dalgası hızları**

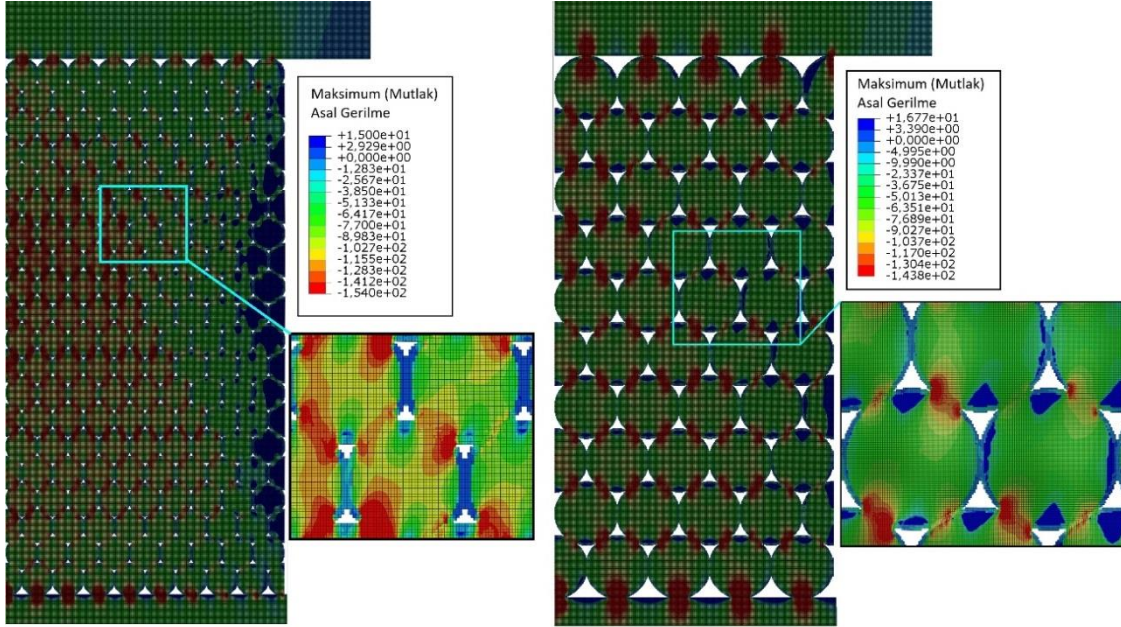
<b>Karışım Kodu</b>	<b>Yükseklik (mm)</b>	<b>Geçiş Süresi (<math>\mu</math>s)</b>	<b>Ultrases Dalgası Hızı (m/s)</b>	<b>Ultrases Dalgası Hızı Ortalaması (m/s)</b>	<b>(Statik) Basınç Dayanımı (MPa)</b>
PRC1_1	80,5	19,2	4192,7	4159,4	34,8
PRC1_2	80,4	19,5	4123,1		
PRC1_3	80,4	19,6	4102,0		
PRC1_4	80,6	19,1	4219,9		
PRC2_1	82,2	18,8	4372,3	4245,3	31,6
PRC2_2	80,0	19,9	4020,1		
PRC2_3	81,8	18,8	4260,6		
PRC2_4	80,1	18,9	4328,0		
NC1_1	75,5	19,1	3963,3	3937,5	26,4
NC1_2	75,2	19,2	3906,5		
NC1_3	75,8	19,2	3937,7		
NC1_4	75,5	19,1	3942,6		

Sonuçlara bakıldığında boşluklu betonların normal betona kıyasla daha yüksek ultrases dalgası hızı değerleri vermeleri beklenmedik bir sonuç gibi görünse dahi söz konusu boşluklu betonların, sıkıştırılmış ve dayanımı artırılmış boşluklu betonlar olmaları, statik basınç dayanımlarının 30-35 MPa arasında olması (test edilen normal betonun dayanımı 26,4 MPa) nedeniyle bu durum beklenebilir olmaktadır. Bir diğer sebep olarak da boşluklu betonda çok yüksek miktarda bulunan bazalt agregalarda ultrases dalgası hızının, bazaltın çeşidine göre

farklılık göstermekle beraber 5000-7000 m/s civarında olması gösterilebilir (Zhao, 2009). Mikrosilika içeren boşluklu betonun (PRC2) bir miktar daha yüksek hız değeri sağlamanın nedeni ise mikrosilikanın çimento hamurunun ve arafazın boşlukluluğunu azaltıcı etkisi olmaktadır. Nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Analizde elde edilen gerilme dağılımı zamanlamasının gerçeğe yakın olması, kullanılan modelin kontrolü açısından da önemli olmaktadır.

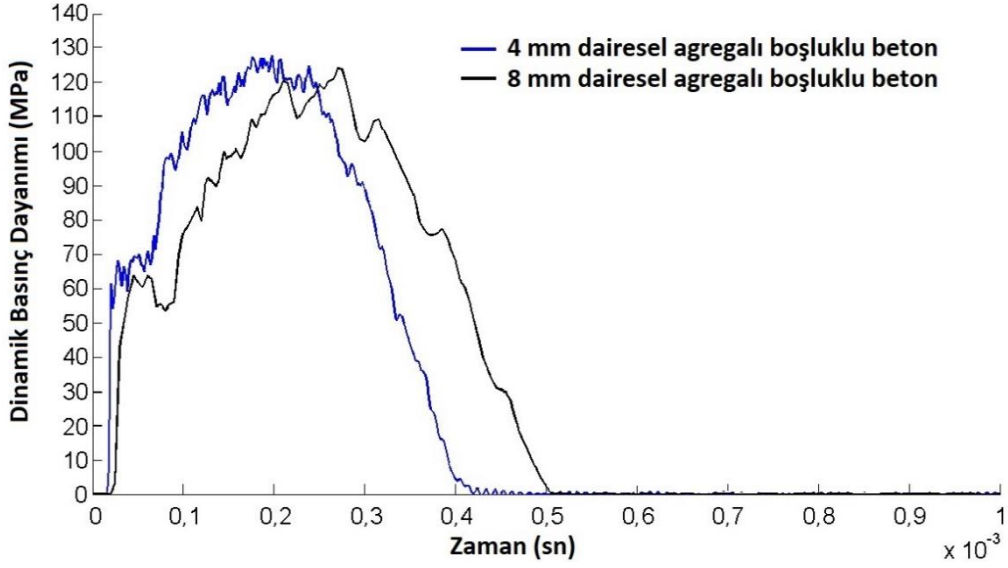
### 3.2 Dinamik Basınç Dayanımı ve Hasar Dağılımı

Yükleme durumunun sürmesi ve tamamlanması ile birlikte gerilme yığılmaları daha da belirginleşmiş, numunedeki hasar dağılımı da açık bir şekilde gözlemlenebilir hale gelmiştir. Dairesel agregalar içeren boşluklu betonlarda gelişen gerilme dağılımları incelendiğinde, boşlukların alt ve üst kutuplarında oluşan çekme gerilmesi konsatrasyonları gözlemlenmektedir. Agregaların birbirleriyle bağlantı halinde oldukları yan sınırlarında da çekme gerilmeleri (Şekil 7) görülmektedir. Taneciklerin diyagonal sınırlarındaki temas bölgelerinde de basınç gerilmesi yığılmaları göze çarpmaktadır.



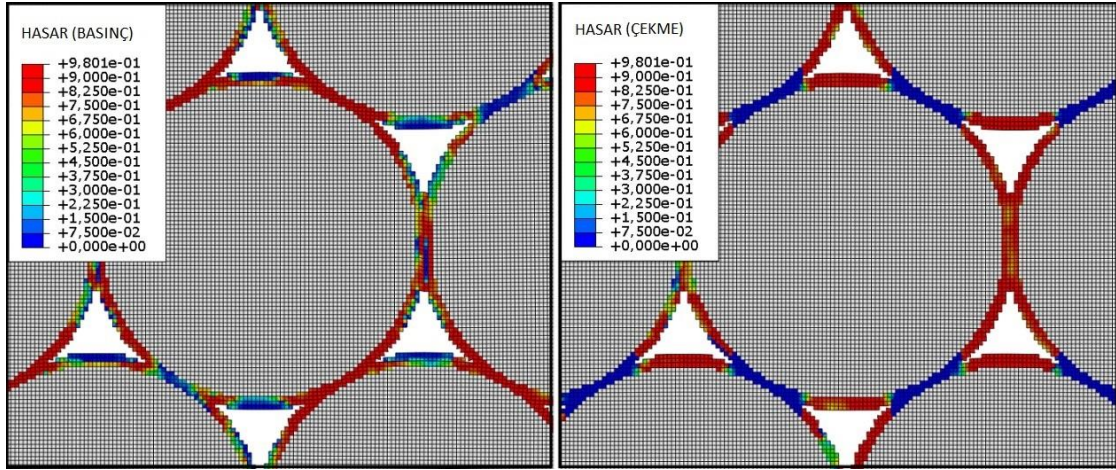
Şekil 7:

Dairesel agregalı boşluklu betonda dinamik basınç yüklemesi altında oluşan maksimum mutlak asal gerilme dağılımı (4mm ve 8 mm taneler)



Şekil 8:

Model boşluklu betonların dinamik basınç gerilmesi zaman grafiği (tane boyutu 4 mm ve 8 mm)



Şekil 9:

8 mm agregalı model boşluklu betonlarda hasar dağılımı (a) DamageC (basınç), (b) DamageT (çekme)

Nümerik sonuçlara göre, Şekil 8'de de görüldüğü gibi 4 ve 8 mm çaplı taneler içeren model betonların dinamik basınç dayanımlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Literatürde, boşluklu betonların içeriğinde bulunan agreganın boyutunun artmasının, basınç dayanımını arttırdığı (Chindaprasirt ve ark.,2009) veya azalttığı (Deo ve Neithalath, 2010) yönünde farklı sonuçlar sunan çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Boşluklu betonlarda agregalar, ince bir çimento hamuru tabakasıyla kaplı taneler halinde bulunmaktadır ve söz konusu taneleri, çimento hamuru tabakasının temas halinde bulunduğu bölgeler bir arada tutmaktadır. Bu nedenle de temas noktalarının sayısının artmasının malzemenin dayanımını artırması beklenebilir. Agreganın boyutunun azaltılması, temas noktası sayısını arttıracığından dayanımı artırıcı yönde bir özellik olarak kabul edilebilir. Bunun yanında, analizlerde tanımlanan toplam tane boyutları 4 ve 8 mm olduğundan (agrega + 0,1 mm kalınlığında çimento hamuru), aslında agreganın çapları 3,8 mm ve 7,8 mm şeklinde tanımlanmıştır. Çimento hamuru kalınlığı (0,1 mm) sabit tutulduğu için,

agrega boyutu arttırıldığında, çimento hamuru/agrega oranı azalmaktadır. Agregada fazı, çimento hamuru fazına göre daha yüksek dayanıma sahip olduğundan, fazlar arasındaki oranlardaki bu farklılık da sonuçları etkilemektedir. Analizlerde tanımlandığı şekliyle agregada boyutunun artışı, dayanımı arttırmaktadır. Birbirine zıt yönlerde etki eden faktörlerin aynı anda etkimesi nedeniyle, agregada boyutunun dayanım üzerindeki etkisinin yönü çok belirgin olamamaktadır ve analiz edilen her bir numunenin özelliklerine bağlıdır. Literatürde agregada boyutunun etkisi ile ilgili farklı sonuçlar elde eden yayınların bulunmasının sebebi de bu şekilde açıklanabilir

Hasar, 0-1 arasında pozitif bir değer alabilen bir değişken olduğundan, Şekil 9'da, 0-1 arasında değişen (basınç ve çekme) hasar değişkeni değerlerinin numune içinde dağılımı gözlemlenebilmektedir. Basınç ve çekme için ayrı ayrı hesaplanan hasar değişkenleri 8 mm taneli model için incelendiğinde, gerilme dağılımlarına çok benzer bir şekilde çekme hasarının agreganın alt ve üst kutuplarında ve tanelerin yanıl sınırlarında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 9). Basınç hasarının ise agregaların diyagonal temas noktalarında oluştuğu göze çarpmaktadır. Aynı hasar dağılımı 4 mm taneli boşluklu betonlarda da gözlemlenmiştir. Boşluklu betonların hasar gelişimi ve gerilme konsantrasyonu bölgeleri gözlemlendiğinde kırılmanın, hasar ve gerilme yığılmasının yoğunlaştığı bölgelerde gerçekleşeceği de varsayılarak, numunelerde fragmanlara ayrılma davranışı tahmin edilebilir. Her iki boşluklu betonda da, dinamik yük altında oluşan fragmanların boyutunun yaklaşık olarak agregada boyutu civarında olacağı ve bu durumda fragman boyutunun karışımdaki agregada boyutuna bağlı olduğu söylenebilir. Bu sonuç, proje kapsamında gerçekleştirilen serbest düşme deney sonuçlarıyla örtüşmektedir. Deneylerde, agregaların arasında bulunan ince çimento hamuru köprülerinin kırılmasıyla parçalara ayrılma gözlemlenmiş, agregada boyutunun azaltılması ile fragman boyutunun azaldığı belirlenmiştir (Ağar Özbek ve ark., 2013).

#### 4. SONUÇLAR

Model betonların açık sonlu eleman yöntemi ile incelenmesinden elde edilen bulguların sunulduğu bu çalışmanın başlıca sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir: Açık zaman entegrasyonu hesapları, dinamik yükleme süresinin çok kısa olduğu ve karmaşık temas şartlarının yer aldığı boşluklu betonun serbest düşme deneyinin analizinde verimli olarak gerçekleştirilmiştir.

İki farklı boyutta agregada içeren model boşluklu beton ve tek faz şeklinde tanımlanmış bir yalın betonda eş basınç eğrilerinin gelişiminden yola çıkarak dalga ilerlemesi hızı hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin literatürdeki değerlere ve deneysel ultrases dalgası hızı sonuçlarına çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Boşluklu betonların dinamik basınç gerilmesi ve hasar dağılımı karşılaştırılmış, iki farklı boyutta agregada içeren boşluklu betonun dayanımlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, birbirine zıt yönlerde etki eden bazı faktörlerin aynı anda etkimesi nedeniyle, agregada boyutunun dayanım üzerindeki etkisinin yönünün çok belirgin olamaması ve analiz edilen numunenin özelliklerine bağlı olması ile açıklanabilir.

Boşluklu betonlarda oluşan hasar dağılımı ve gerilme yığılmaları incelendiğinde, deneylerde de tespit edildiği gibi dinamik yükleme altında çoklu çatlaklar ve yaklaşık olarak agregada boyutunda fragmanlar oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle fragman boyutu, karışımda bulunan agregada boyutu tarafından belirlenmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu araştırma projesi, Delft Teknoloji Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiş, Hollanda Savunma Akademisi ve TNO tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

1. Ağar Özbek, A.S., Weerheijm, J., Schlangen, E., Breugel, van K. (2013), Dynamic behavior of porous concretes under drop weight impact testing, *Cement and Concrete Composites*, 39: 1-11, doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.03.012.

2. British Standards Institution (1997), Falsework performance requirements and general design, Draft prEN 12812, London, U.K.
3. Chen, Z., Shin, M., Adrawes, B. (2012), Numerical Simulation of Prestressed Concrete Crosstie and Fastening System, PCI Convention.
4. Chindapasirt P., Hatanaka S., Chareerat T., Mishima N., Yuasa Y. (2008), Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Construction and Building Materials*, 22(5): 894-901, doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007.
5. Chindapasirt, P., Hatanaka, S., Mishima, N., Yuasa, Y., Chareerat, T. (2009), Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete, *International Journal of Minerals, Metallurgy , Materials*, 16(6): 714-719, doi:10.1016/S1674-4799(10)60018-0.
6. Chopra, A.K. (2000), Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
7. Dann, J.H., Dann J.J. (2012), CK-12 Basic Physics, CK-12 Foundation.
8. Deo, O. , Neithalath, N. (2010), Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, *Materials Science and Engineering: A*, 528(1): 402-412, doi:10.1016/j.msea.2010.09.024.
9. Deutsches Institut für Normung (1982), Falsework calculation, design and construction DIN 4421:1982, Beuth Veriag GmbH, Berlin, Germany.
10. Elmer,W. VII, Taciroglu, E., McMichael, L. (2012), Dynamic Strength Increase of Plain Concrete From High Strain Rate Plasticity with Shear Dilation, *International Journal of Impact Engineering*, 45: 1–15, doi:10.1016/j.ijimpeng.2012.01.003.
11. Farooq, U., Gregory, K. (2010), Explicit Dynamic Simulation of Drop-Weight Low Velocity Impact on Carbon Fibrous Composite Panels, *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(3): 50-61, doi:10.1.1.608.6986.
12. Ghafoori N, Dutta S. (1995), Building and nonpavement applications of no-fines concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(4): 286-9, doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(286).
13. Ghafoori N., Dutta S. (1995), Development of no-fines concrete pavement applications, *Journal of Transport Engineering*; 121: 283-8, doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:3(283).
14. Gorst, N.J.S., Williamson, S.J., Pallett, P.F. and Clark, L.A (2003), Friction in temporary works, Research Report, University of Birmingham, U.K.
15. Grondzik, W.T, Kwok, A.G., Stein, B., Reynolds, J.S. (2010), Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, Wiley.
16. Hillerborg, A., Modeer M., Petersson P. E. (1976), Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6: 773–782, doi:10.1016/0008-8846(76)90007-7.
17. Huang, C.C., Wu, T.Y. (2009), A Study on Dynamic Impact of Vertical Concrete Cask Tip-over Using Explicit Finite Element Analysis Procedures, *Annals of Nuclear Energy*, 36(2): 213–221, doi:10.1016/j.anucene.2008.11.014.
18. Huebner, K.H., Dewhirst, D.L., Smith, D.H. and Byrom T.G. (2001), The Finite Element Method for Engineers, Wiley.

19. Jankowiak, T., Lodygowski T. (2005), Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model, *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 6: 53-69.
20. Lee, J., Fenves G.L. (1998), A Plastic Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 124: 892–900, doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
21. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E. (1989), A Plastic-Damage Model for Concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 25(3): 229-326, doi:10.1016/0020-7683(89)90050-4.
22. Marolf A, Neithalath N, Sell E, Wegner K, Weiss J, Olek J. (2004), Influence of aggregate size and gradation on the acoustic absorption of enhanced porosity concrete, *ACI Materials Journal*, 101(1): 82-91, doi:10.14359/12991.
23. Noh, G., Bathe K.J. (2013), An Explicit Time Integration Scheme for the Analysis of Wave Propagations, *Computers and Structures*, 129: 178–193, doi:10.1016/j.compstruc.2013.06.007.
24. Nolan, D. P. (2010), Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles, Elsevier, UK.
25. Schön, J.H. (2015), Physical Properties of Rocks : Fundamentals and Principles of Petrophysics, Elsevier.
26. Siad, L., Ouali, M.O. , Benabbes, A. (2008), Comparison of Explicit and Implicit Finite Element Simulations of Void Growth and Coalescence in Porous Ductile Materials, *Materials and Design*, 29(2): 319–329, doi:10.1016/j.matdes.2007.02.003.
27. Simulia\_1 (2013), ABAQUS Analysis User's Manual 6.13.
28. Sun J.S., Lee, K.H., Lee, P.H. (2000), Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Dynamic Problems, *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1-2): 110-118, doi:10.1016/S0924-0136(00)00580-X.
29. Susila, E., Hryciw, R.D. (2003), Large Displacement FEM Modelling of the Cone Penetration Test (CPT) in Normally Consolidated Sand, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(7): 585–602, doi: 10.1002/nag.287.
30. Tarque, N.S. (2011), Numerical modelling of the seismic behavior of adobe buildings, PhD Thesis, University of Pavia, Italy.
31. Wu, S.R., Gu, L. (2012), Introduction to the Explicit Finite Element Method for Nonlinear Transient Dynamics, Wiley.
32. Yang J, Jiang G. (2003), Experimental study on properties of pervious concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(3): 381-6, doi:10.1016/S0008-8846(02)00966-3.
33. Zhang, L. (2017), Engineering Properties of Rocks (Second Edition), Butterworth-Heinemann, ISBN: 978-0-12-802833-9
34. Zhao J. (2009) Rock Mechanics for Civil Engineers Lecture Notes, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland.