

Yanal yüklere maruz kalan betonarme bacalarda boşluk köşe donatılarının farklı yerleşimlerinin sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of different opening corner rebar configurations in RC chimneys subjected to lateral loads

Sami And KILIÇ^{1*} 

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
skilic@boun.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 19.11.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 20.01.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.81488

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Betonarme bacaların duman gazı girişlerinin köşelerinde oluşabilecek çatlakları önlemek için, Amerikan ACI 307 tasarım yönetmeliği geleneksel çapraz donatı kullanımını şart koşmaktadır. Ülkemizde ulusal bir betonarme baca yönetmeliği henüz mevcut değildir ve baca inşaatında genellikle kayar kalıp sistemi kullanılmaktadır. Çapraz köşe donatıları yerleştirildiğinde, kayar kalıp sisteminin düşey destek elemanları ile kesilebilir ve bu sebeple baca inşaatında güçlükler meydana gelebilir. Bu çalışmada boşluk köşelerinde çapraz donatı kullanmak yerine, aynı uzunluk ve çapta düşey ve yatay köşe donatılarının kullanılması alternatifini irdelenmiştir. 115 m yüksekliğinde ve kesitinde 3.7 m genişliğinde, 5.2 m yüksekliğinde bir boşluğa sahip betonarme bir bacanın detaylı bir sonlu elemanlar modeli meydana getirilmiştir. Sayısal analizlerde beton ve donatı malzeme özellikleri doğrusal olmayan modeller kullanılarak temsil edilmiştir. Bacanın beton cidarı altı yüzlü hacimsel elemanlarla, donatılar ise iki düğüm noktalı çubuk elemanlar ile modellenmiştir. Bacanın tasarım rüzgâr yükleri yanal yük olarak kullanılarak, üç farklı yönde uygulanmıştır. Baca boşluğunun çekme, basınç ve kesme bölgelerinde yer alması durumları ayrı ayrı incelenmiştir. En yüksek çekme birim uzamaları ve çatlak oluşumları baca boşluğunun çekme bölgesinde yer aldığı durumda gözlemlenmiştir. Boşluğun çekme ve basınç bölgelerinde yer aldığı analizlerde köşe donatılarında akma sınırı aşılmıştır. Bütün analizlerde alternatif köşe donatı düzeneği, boşluk deformasyonları, çatlak oluşumları ve köşe donatı birim uzamaları açısından geleneksel çapraz donatı düzeneğine yakın sonuçlar vermiştir. Önerilen alternatif köşe donatı düzeneğinin kayar kalıp betonarme baca inşaatında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Betonarme baca, Boşluk köşe donatısı, Sonlu elemanlar metodu, Doğrusal olmayan analiz

Abstract

The American ACI 307 design code imposes the use of diagonal rebars at the corners of flue gas inlet regions of reinforced concrete chimneys for mitigating cracks. There is currently no Turkish reinforced concrete design code in effect and the most commonly used chimney construction method is the slip form system. The diagonal rebars impose a difficulty in the construction of the slip form system due to the fact that they cross the line of action of the vertical support elements. In this study, the use of vertical and horizontal corner rebars with similar length and diameter was proposed as an alternative to using diagonal rebars. A detailed finite element model was constructed for a reinforced concrete chimney with a height of 115 m and an opening with a width of 3.7 m and a height of 5.2 m. Nonlinear material models were used for the concrete and rebars. The concrete shell was modeled with hexahedral elements and the rebars were modeled with 2-node bar elements. The design wind loads of the chimney were applied as lateral loads in three different directions. Separate analyses were conducted such that the opening region was located in the tension, compression, and shear zones. The highest tension strains and crack formations were obtained for the case of the opening region in the tension zone. Yield strain limits of the corner rebars were exceeded for the cases of the opening region in the tension and compression zones. The alternative corner reinforcement configuration led to similar results in terms of the opening deformations, crack formations, and corner rebar strains when compared with the original diagonal rebars in all the analyses. It was concluded that the proposed alternative corner rebar configuration can be used in the slip form construction of reinforced concrete chimneys.

Keywords: RC chimneys, Opening corner rebars, Finite element method, Nonlinear analysis

1 Giriş

Endüstriyel bacalar sanayi tesislerinde üretim esnasında ortaya çıkan duman gazlarını dış atmosfere yaymak amacıyla kullanılırlar. Duman gazının ısıtıcı ünitelerden bacaya girişini sağlamak için, betonarme kesitte bir veya birden fazla boşluk olması gerekmektedir. Bu boşluklar genellikle bacanın temelinden yüksek bir irtifada konumlandırılır. Betonarme bacada yükseklik boyunca süreksizlik meydana getirmeleri sebebiyle, boşluklar zayıf bölgeleri oluşturmaktadır. Geleneksel tasarım çözümünde, servis yükleri altında boşluk köşelerinde çatlak oluşumlarını azaltmak için köşelere ilave donatılar yerleştirilir.

A.B.D. Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) betonarme bacalar için hazırladığı ACI 307-08 şartnamesinde boşluk köşelerinde çapraz donatı kullanılması şart koşulmaktadır [1]. Bu şartname

dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde betonarme bacalar için ulusal bir tasarım şartnamesi mevcut değildir ve birçok baca inşaatında ACI 307-08 şartnamesi kullanılmaktadır.

Bacalarda çapraz köşe donatısı kullanımı konusunda yapılan literatür taraması sonucunda elde edilen en eski makale 1918 yılına aittir. Mingle betonarme bacalarda boşluk olan kesitlerin zayıf bölgeler olduğunu ve kaybedilen beton alanını telafi etmek için boşlukların üst ve yan kenarlarında ilave donatıların kullanılması gerektiğini öne sürmüştür [2]. Aynı zamanda, köşelerde oluşabilecek çatlakları engellemek için düşey donatıların boşluğa doğru bükülmesini önermiştir. Boşluğun köşelerine doğru bükülmüş bu düşey donatıların boşluk köşeleri için çapraz donatı vazifesi gördükleri düşünülebilir.

Günümüzde kullanılan betonarme baca şartnamelerinde köşe donatıları üzerine farklı yaklaşımlar mevcuttur. Uluslararası

Endüstriyel Baca Komitesi'nin (CICIND) 2011 tarihinde yürürlüğe giren şartnamesinde, boşluk köşelerinde çapraz donatıların yerine ilave yatay ve düşey donatı kullanılması önerilmektedir [3]. Perde betonarme duvarlar ve döşemeler üzerine yapılmış çalışmalarda da, boşluk donatıları için benzer yaklaşımlara rastlanmaktadır [4],[5].

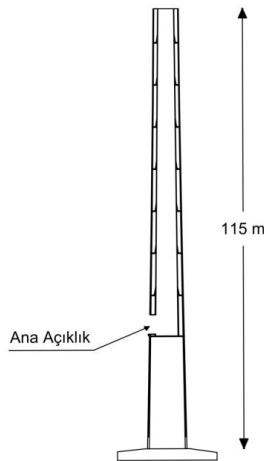
A.B.D.'de betonarme baca inşaatlarında genellikle tırmanır kalıp sistemleri kullanılmaktadır. Türkiye'de ve Avrupa ülkelerinde ise, betonarme baca inşaatında yaygın olarak kayar kalıp sistemler kullanılmaktadır. Kayar kalıp sisteminde kalıplar sürekli olarak hidrolik bir kriko vasıtası ile yükseltilir. Düşey, yatay ve çember donatılar kalıp çerçevelerinin tepesine kurulan kılavuzlar sayesinde sabit pozisyonda tutulur. Kalıp içerisine yaş beton döküldükten sonra, kesitteki betonun katılaşması takiben kalıp sistemi krikoların yardımı ile düşey yönde yükseltilir.

Kayar kalıp sistemlerde boşluk köşelerine çapraz donatı yerleştirmek bir sorun arz etmektedir. Bunun sebebi, sistem yükseltildiğinde kalıbın düşey destek elemanları ile çapraz köşe donatıların kesişmesidir. Bu durum kayar kalıp sisteminin hareketine engel teşkil edebilir. Kalıp sistemin yükselmesine engel olmadan düşey, yatay ve çember donatıları yerleştirmek mümkündür.

Çapraz köşe donatılarının kayar kalıp sistemlerine yerleştirilmesinde meydana gelen probleme çözüm sunmak amacıyla bu çalışmada alternatif bir tasarım yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımda, her çapraz köşe donatısı yerine eşit boyda ve çapta birer adet düşey ve yatay donatı boşluk köşelerine yerleştirilmiştir. Yüksekliği 115 m olan ve ACI 307-69 şartnamesine [6] göre tasarlanmış örnek bir bacanın yanal servis yükleri altında yapısal davranışı sayısal analiz yöntemiyle irdelenmiştir. Yanal yükler için bacanın tasarım hesaplarındaki rüzgâr basınçları kullanılmıştır. Geleneksel ve alternatif tasarımların sonuçları, boşluk etrafındaki çatlak oluşumları ve birim uzamalar dikkate alınarak birbirileriyle karşılaştırılmıştır.

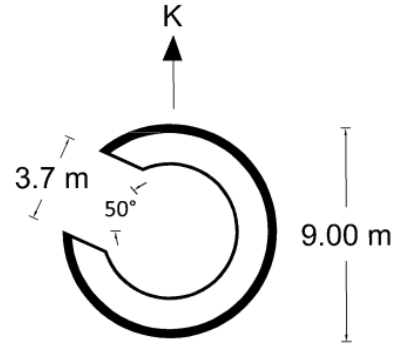
2 Betonarme bacanın geometrik özellikleri

Sayısal çalışmada 115 m yüksekliğinde ve tek boşluğa sahip bir betonarme baca incelenmiştir. Bacanın konik geometrisinin dış çapı temelde 10.3 m iken, tepe noktasında 6.6 m'ye daralmaktadır. Baca cidarının et kalınlığı temel seviyesinde 0.45 m iken, en üst seviyede incelerek 0.20 m'ye düşmektedir. Şekil 1 bacanın genel görünümünü vermektedir.



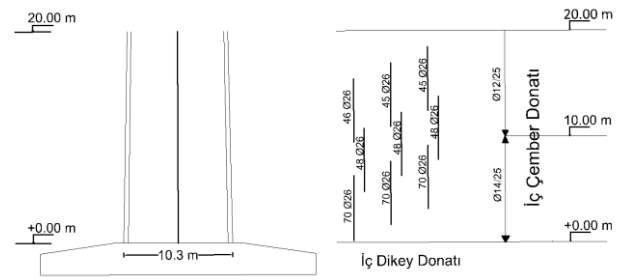
Şekil 1: Betonarme bacanın profil görünümü.

Genişliği 3.7 m ve yüksekliği 5.17 m olan boşluk temelden itibaren 30 m irtifada başlamaktadır. Boşluk ile betonarme kesitteki kayıp yaklaşık 50°'dir. Boşluğun orta yüksekliğindeki kesit detayı Şekil 2'de gösterilmektedir.



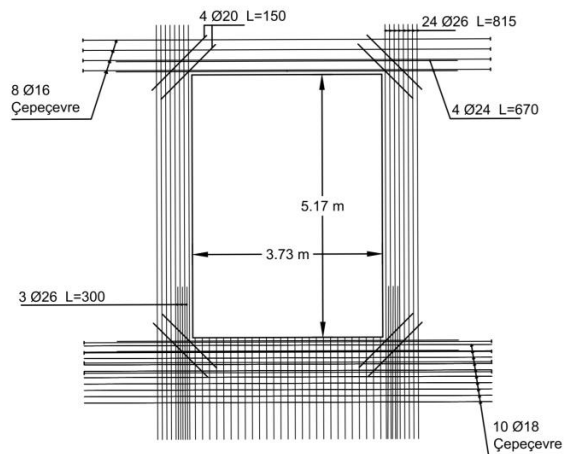
Şekil 2: Boşluğun orta yüksekliğindeki kesit detayı.

Bacanın yüksekliği boyunca iç ve dış yüzeylerdeki düşey donatılar şaşırtmalı yerleşimlere sahiptir. Çapları 10 ile 26 mm arasında değişen düşey donatıların uzunlukları da 4 ile 6 m arasındadır. Örnek olarak, Şekil 3 bacanın ilk 20 m'sinde kullanılan şaşırtmalı iç yüzey düşey ve çember donatı detaylarını vermektedir.



Şekil 3: Şaşırtmalı düzeneğe sahip iç yüz düşey donatı detayı.

Boşluk bölgesinde ACI 307-69 şartnamesi kapsamında ilave edilen düşey, yatay ve çapraz donatılar Şekil 4'te verilmektedir. Boşluğun her köşesinde, iç ve dış yüzeylerde ikişer adet 20 mm çapında ve 1500 mm uzunluğunda olan, toplam 4 adet çapraz donatı mevcuttur. Bu donatılar köşelerde oluşabilecek 45°'lik çatlaklara dik olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 4: Boşluk etrafındaki donatı detayı.

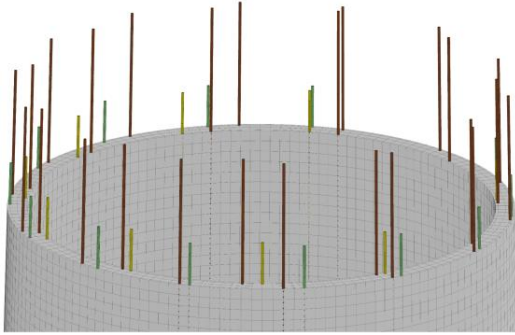
3 Kullanılan metot

Betonarme bacanın sayısal analizlerinde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Yanal servis yüklerinin etkilerini doğru bir şekilde temsil etmek için bacanın tamamı modellenmiştir. Buna ilaveten, bütün donatıları ayrıntılı olarak yerleştirebilmek için bacanın cidarı hacimsel elemanlarla modellenmiştir. Meydana getirilen yüksek çözünürlüklü model boşluk çevresinde meydana gelebilecek çatlak oluşumlarını detaylı olarak inceleme olanağını sağlamıştır.

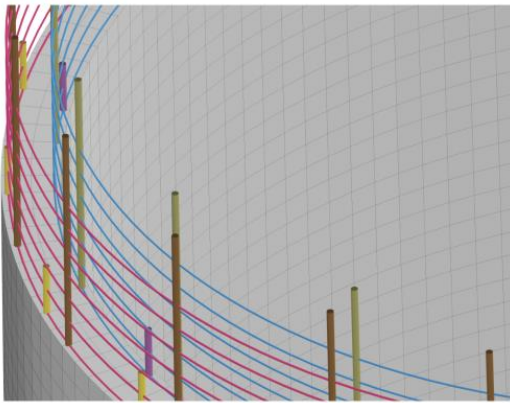
3.1 Sonlu elemanlar ağı

Bacanın beton cidarı altı yüzlü topolojiye sahip hacimsel sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Pas payını temsil etmek için beton cidarın iç ve dış yüzeylerinde birer katman altı yüzlü eleman kullanılmıştır. İç ve dış yüzeylerdeki düşey donatıları yerleştirebilmek için kesitin iç kısmında 2 katman altı yüzlü eleman meydana getirilmiştir. Bu sebeple cidar kalınlığı boyunca toplam 4 katman altı yüzlü eleman oluşturulmuştur. Donatıların modellenmesinde iki düğüm noktalı çubuk elemanları kullanılmıştır. Donatı çubuk elemanları beton altı yüzlü elemanlarının hacimleri içine aynı düğüm noktalarını paylaşacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca düşey donatılardaki şaşırtmalı yerleşim de sonlu elemanlar modelinde dikkate alınmıştır.

Şekil 5 sonlu elemanlar ağının içinde yer alan iç ve dış yüzeylerdeki düşey donatıları, şaşırtmalı yerleşimleri ve kesit detayını göstermektedir. Şekil 6'da beton cidarın sarmalanması için kullanılan iç ve dış çember donatılarının modellenmesi sunulmaktadır. Yapısal elemanların detaylı bir şekilde direkt olarak modellenmesi sonucunda meydana getirilen ağ toplam 570000 sonlu elemandan oluşmuştur.

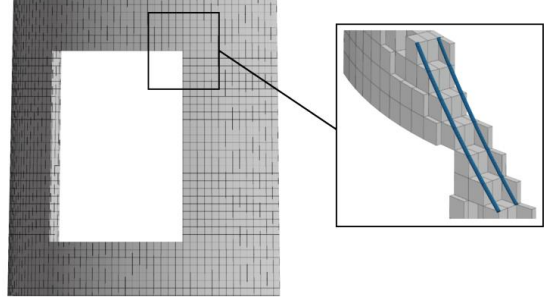


Şekil 5: Şaşırtmalı düzeneğe sahip iç ve dış yüzeylerdeki düşey donatıların modellenmesi.



Şekil 6: Kesitin iç ve dış yüzeylerinde düşey ve çember donatıların modellenmesi.

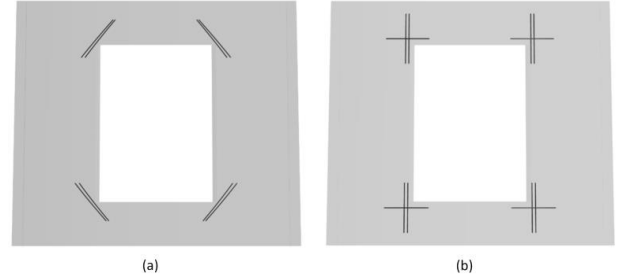
Çapraz boşluk köşe donatıları beton elemanlarla düğüm noktalarını paylaşacak şekilde modellenmiştir. Şekil 7 çapraz köşe donatılarının sonlu elemanlar ağındaki detayını göstermektedir. Çapraz donatılar yatay düzleme göre 45°'lik açıyla sonlu elemanlar ağının içine yerleştirilmiştir. Fakat bu donatılar çubuk şeklinde bir geometriyi takip etmekten ziyade, beton cidarının konik şekilli olması sebebiyle uzayda eğrisel bir geometri oluşturmuşlardır.



Şekil 7: Çapraz boşluk köşe donatılarının modellenmesi.

Şekil 8a'da gösterilen geleneksel tasarıma ait çapraz köşe donatılarına (ÇD) bir tasarım alternatifi olarak önerilen düşey ve yatay köşe donatıları (DYD) Şekil 8b'de gösterilmektedir. Alternatif tasarım yapılandırmasında her bir çapraz köşe donatısının yerine birer düşey ve yatay köşe donatısı kullanılmıştır.

Geleneksel tasarımda boşluğun her köşesinde toplam 4 adet 1.5 m uzunluğunda ve 20 mm çapında çapraz donatı mevcuttur. Alternatif tasarım yapılandırmasında çapraz köşe donatıları kaldırılmıştır. Bu donatıların yerine her köşede 4 adet düşey ve 4 adet yatay köşe donatısı kullanılmıştır. Böylece alternatif tasarımda her köşede 1.5 m uzunluğunda ve 20 mm çapında olmak üzere toplam 8 adet donatı yerleştirilmiştir.



Şekil 8: Sonlu elemanlar ağında. (a): ÇD çapraz köşe donatıları, (b): DYD düşey ve yatay köşe donatıları.

3.2 Kullanılan malzeme modelleri

Bacanın beton cidarını modellemek için LS-Dyna sonlu elemanlar programının [7] Winfrith beton malzeme modeli kullanılmıştır [8],[9]. Winfrith modelinde betonun üç eksenli gerilmeler altındaki davranışı dikkate alınmıştır. Beton dayanımı Ottosen tarafından geliştirilen 4 parametrelili kırılma yüzeyi ile ifade edilmektedir [10]-[12]. Denklem 1'de verilen Ottosen yüzeyi deneysel sonuçlara dayanan a , b , k_1 ve k_2 boyutsuz sabitlerini içermektedir. I_1 birinci gerilme invariantını, J_2 ise ikinci deviatorik gerilme invariantını ifade etmektedir. Betonun silindirik basınç dayanımı f'_c ile ifade edilmektedir.

$$a \frac{J_2}{(f'_c)^2} + \lambda(k_1, k_2) \frac{\sqrt{J_2}}{f'_c} + b \frac{I_1}{f'_c} = 1 \quad (1)$$

Betonda çatlak oluşumunu sayısal analizde meydana getirebilmek için yayılmış çatlak (smeared crack) modeli kullanılmıştır. Bu modelde, beton sonlu elemanlarında gerilmeler çekme dayanım değerine ulaştıktan sonra asal çekme gerilmelerine dik yönde çatlaklar oluşmaktadır. Winfrith beton modeli asal gerilmeleri kullanarak çatlakların yönünü altı yüzlü hacimsel sonlu elemanların içerisinde belirleyebilmektedir [9].

Bacanın beton malzemesi C25 sınıfına denk gelmektedir. Sayısal analizlerde a , b , k_1 ve k_2 malzeme sabitleri için sırasıyla 1.2758, 3.1962, 11.7368, 0.9801 değerleri kullanılmıştır. Sayısal analizde betonun çekme dayanımı serbest basınç mukavemetinin %10'u olarak varsayılmıştır. Elastisite modülü ve Poisson oranı için sırasıyla 30 GPa and 0.2 değerleri kullanılmıştır. Betonun özgül ağırlığı 2400 kg/m³ olarak kabul edilmiştir.

Sayısal analizde betonarme donatısı için çift doğrusal malzeme modeli kullanılmıştır [7]. Akma gerilmesi f_y ve nihai dayanım gerilmesi f_u için varsayılan değerler sırasıyla 420 ve 550 MPa'dır. Elastisite modülü, Poisson oranı ve çelik özkütlesi için sırasıyla 200 GPa, 0.3 ve 7800 kg/m³ değerleri kullanılmıştır.

3.3 Sayısal çözüm yöntemi

Yanal yüklerin statik uygulanması durumunda bacanın doğrusal olmayan davranışı irdelenmiştir. Fakat çatlak oluşumları ve doğrusal olmayan malzeme davranışı statik analizlerde iterasyonların ıraksamasına ve çözüm elde edilememesine sebep olmuştur. Bu problemi çözmek için dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır.

Newmark örtülü dinamik hesaplama yönteminde hareket denklemi $t + \Delta t$ zaman anında meydana getirilmektedir [13]. Bilinen yer değiştirme, hız ve ivme değerleri t anında mevcuttur fakat Δt zaman adımı sonrasındaki $t + \Delta t$ zaman anında bilinmemektedir. Bu sebepten dolayı doğrusal olmayan malzeme davranışını içeren analizlerde $t + \Delta t$ zaman anında elde edilecek olan sonucun yakınsaması için iterasyon yapılması gerekebilmektedir.

Dinamik analizlerde iterasyon gereksinimi olmadan çözüm elde etmek için merkezi farklar açık hesaplama yöntemi bir alternatif sunmaktadır [14],[15]. Denklem 2'de dinamik denge denklemi verilmektedir. Belli bir t zaman anında harici uygulanan yükler, dâhili sistem direnci, kütle matrisi ve ivme vektörü sırasıyla f_t^{har} , f_t^{dah} , M ve a_t ile ifade edilmektedir.

$$Ma_t = f_t^{har} - f_t^{dah} \quad (2)$$

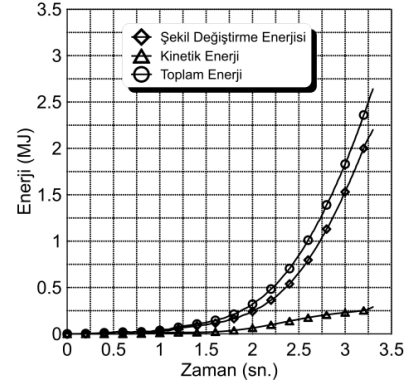
Merkezi farklar yönteminde iterasyon kullanılmamasının sebebi, Courant kistasının sağlanması için Δt zaman adımının çok küçük bir mertebede olma zorunluluğudur [14]. Doğrusal olmayan malzeme davranışını ve çatlak oluşumunu sonlu elemanlar ağının güncellenmesi ile her zaman anında yakın bir şekilde takip etmek mümkün olmaktadır. Bu sebeple mevcut çalışmada merkezi farklar açık hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

Doğrusal olmayan statik çözüme yakın bir sonuç elde etmek için dinamik etkileri en aza indirmek gerekmektedir. Bu yüzden yanal yüklerin bacanın birinci titreşim modunun periyodundan daha uzun bir sürede uygulanması zorunludur. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar ağındaki toplam, kinetik ve şekil değiştirme enerjileri karşılaştırılarak dinamik etkilerin ihmal edilebilir mertebede olduğunu doğrulamak mümkündür.

Kinetik enerjinin ihmal edilebilir bir seviyede olması, elde edilen dinamik çözümün doğrusal olmayan statik çözüme yakınsamasına imkân vermektedir. Bu yöntemin avantajı iterasyon zorunluluğunu ortadan kaldırmasıdır. Dezavantajı ise, küçük mertebede zaman adımlarının kullanılması sebebiyle sonlu elemanlar ağı yoğunluğunun artışına paralel olarak uzayan bilgisayar çözüm süreleridir.

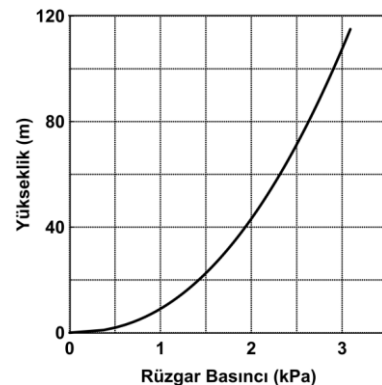
4 Yanal yükler altında sayısal analiz sonuçları

Baca davranışı yerçekimi ve yanal yükler altında incelenmiştir. Sayısal analiz ilk aşamasında 0.5 sn. süre içinde yerçekimi yükleri uygulanmıştır. Bunu takiben baca yanal yüklerle maruz bırakılmıştır. Şekil 9 bu çalışmada sunulan sayısal analizler esnasında enerjilerin zamana bağlı gelişimlerini göstermektedir. Zamana bağlı dinamik bir analiz yapıldığında, dinamik etkiler sebebiyle kinetik enerji oluşmaktadır. Burada önemli olan, statik bir analize yakın sonuçlar elde edebilmek için şekil değiştirme enerjisinin toplam enerjiye yakın olması hususudur. Dolayısıyla, kinetik enerjinin makul bir mertebede indirgenmesi gerekmektedir. Şekil 9 kinetik enerji mertebesinin şekil değiştirme enerjisine nazaran ihmal edilebilir bir seviyede olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 9: Sayısal analiz esnasında enerji gelişimi.

Şekil 10 tasarımda kullanılan rüzgâr basıncının yükseklik boyunca dağılımını vermektedir. İzmit Körfezi'nde ölçülmüş meteorolojik rüzgâr hızları dikkate alınmıştır. Rüzgâr yükleri ANSI şartnamesine [16] göre hesaplanmıştır. Rüzgâr yükü, rüzgâr basıncının oluştuğu yüzeylere uygulanmıştır.



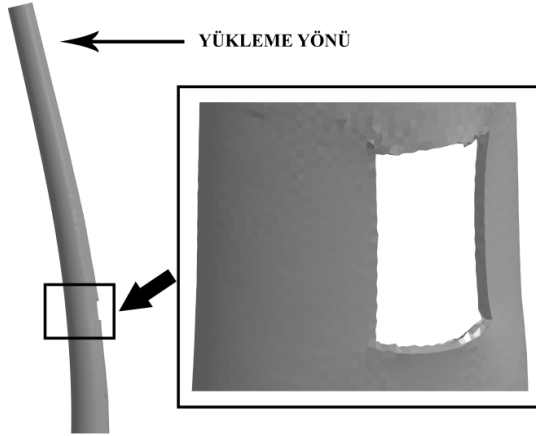
Şekil 10: Tasarım rüzgâr basıncının yükseklik boyunca dağılımı.

Rüzgâr yüklerinin farklı yönlerde etki edebileceği düşünülerek, bacanın boşluk kesiminin çekme, basınç ve kesme gerilmelerine maruz kaldığı 3 farklı yüklemeyi içeren sayısal analizler yapılmıştır. Her yüklemeye Şekil 10'da verilen tasarım

rüzgâr basınç dağılımı kullanılmıştır. Bu yüklemeler sonucunda boşluk bölgesinde oluşan çatlaklar iki farklı köşe donatı düzeneği için karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde ayrıca köşe donatılarındaki birim uzamalar ve boşluk bölgesinin şekil değiştirmeleri rapor edilmiştir.

4.1 Yanal yüklemeye için analiz sonuçları-boşluk çekme bölgesinde

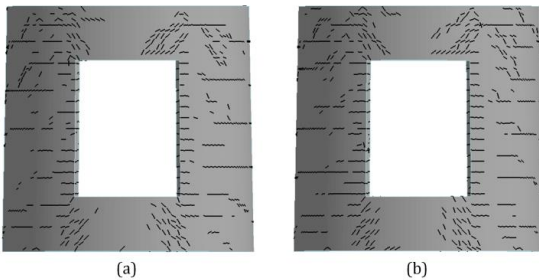
Tasarımda kullanılan rüzgâr basınçları Şekil 11'de gösterildiği üzere boşluk kesimini çekme bölgesinde bırakacak biçimde uygulanmıştır. Deformasyonları daha belirgin gösterebilmek için yer değiştirmeler 30 kat büyütülmüştür. Boşluğun kenar duvarları çekme birim uzamalarına maruz kalırken, alt ve üst eşiklerde basınç birim uzamaları gözlemlenmiştir.



Şekil 11: Çekme bölgesindeki boşluğun deformasyonu.

Şekil 12a ve 12b'de ÇD ve DYD köşe donatı yerleşimleri için boşluk çevresinde oluşan çatlaklar gösterilmektedir. Ana çatlaklar boşluğun kenar duvarlarında yatay yönde gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar çekme gerilmelerinin meydana geldiği düşey doğrultuya dik olarak oluşmuştur.

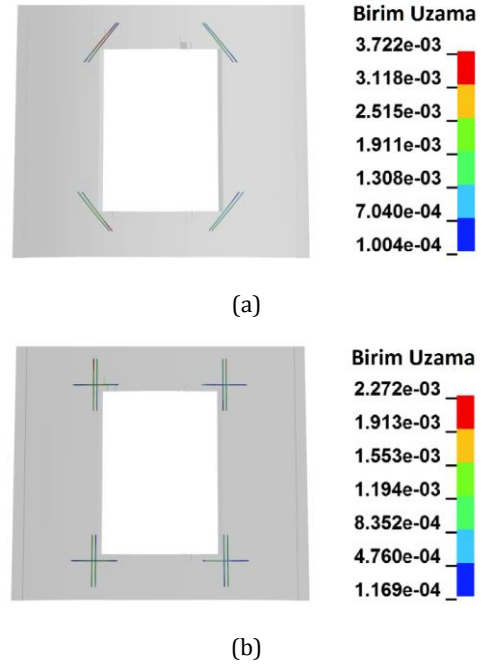
Şekil 11'de gösterilen yanal yük uygulaması için yapılan iki farklı sayısal çalışmada (ÇD ve DYD analizleri) boşluğun köşelerinde 45°'lik çatlaklar meydana gelmemiştir. Ayrıca, ÇD analizinde meydana gelen çatlak dağılımları ile DYD analizindeki çatlak dağılımları birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 12: Boşluk etrafındaki çatlak oluşumları:
(a): ÇD düzeneği, (b): DYD düzeneği.

Boşluk köşe donatılarının birim uzamaları Şekil 13a ve 13b'de ÇD ve DYD yerleşimleri için verilmektedir. Boşluk kesimi çekme bölgesinde yer aldığı için, ÇD ve DYD yerleşimlerinde hiçbir donatıda basınç birim uzamaları gözlemlenmemiştir. Analizde donatı malzeme modelinin akma birim uzaması için 0.0021 değeri kullanılmıştır. ÇD ve DYD donatı yerleşimlerinin sayısal analizlerinde azami çekme birim uzaması için sırasıyla 0.0037

ve 0.0023 değerleri elde edilmiştir. Bu sebeple iki analizde köşe donatıları akma limitlerini geçmiştir.

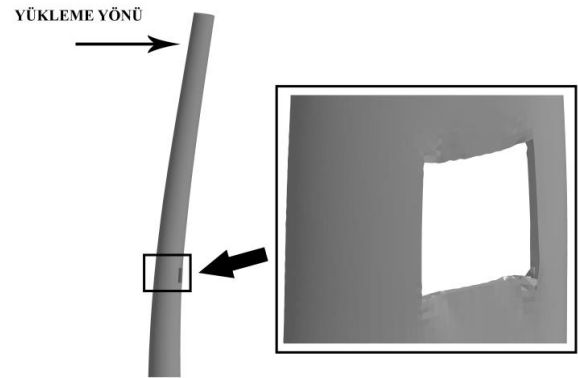


Şekil 13: Köşe donatılardaki birim uzama dağılımları:
(a): ÇD düzeneği, (b): DYD düzeneği.

Boşluk kesiminin çekme bölgesinde kaldığı analizlerde elde edilen çatlak oluşumları ve köşe donatısı birim uzamaları dikkate alındığında, alternatif tasarım önerisi olan DYD düzeneğinin geleneksel tasarımda kullanılan ÇD düzeneğine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

4.2 Yanal Yüklemeye için Analiz Sonuçları - Boşluk Basınç Bölgesinde

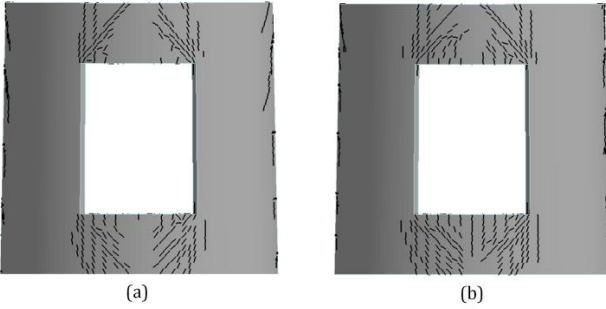
Şekil 14 bu analizde rüzgâr yüklerinin uygulanma yönünü ve bu yükler altında boşluk bölgesinin deformasyonunu vermektedir. Yanal yükler boşluk kesimini basınç bölgesinde bırakmıştır. Deformasyonlar bir önceki analizdeki gibi 30 kat büyütülmüştür. Basınç birim uzamaları kenar duvarlarda yoğunlaşmıştır. Bunun yanı sıra, alt ve üst eşiklerde çekme birim uzamaları meydana gelmiştir.



Şekil 14: Basınç bölgesindeki boşluğun deformasyonu.

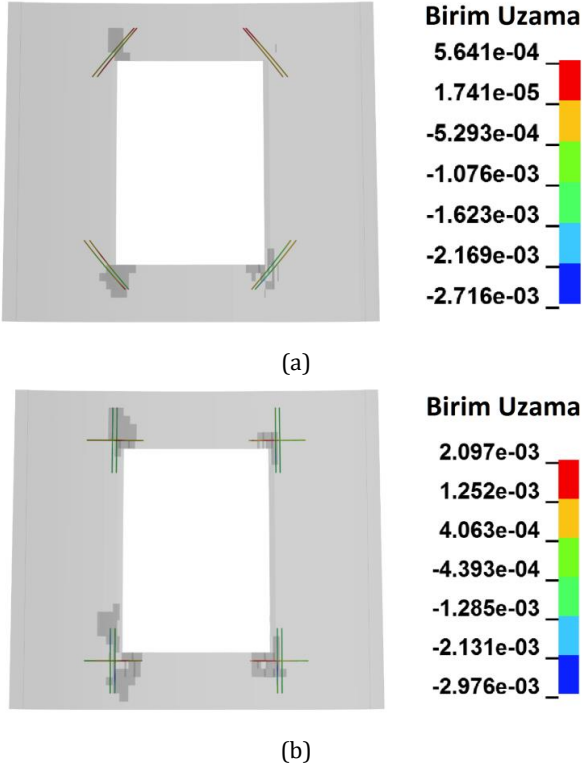
Şekil 15a ve 15b'de ÇD ve DYD köşe donatı yerleşimleri için boşluk çevresinde oluşan çatlaklar gösterilmektedir. Kenar duvarlar basınç birim uzamalarına maruz kaldığı için çatlak

meydana gelmemiştir. Çekme birim uzamalarına maruz kalan alt ve üst eşiklerde dikey çatlaklar gözlemlenmiştir. ÇD ve DYD analizlerinde benzer çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 15: Boşluk etrafındaki çatlak oluşumları:
(a): ÇD düzeneği, (b): DYD düzeneği.

Şekil 16a ve 16b boşluk köşe donatılarındaki birim uzamaları sırasıyla ÇD ve DYD yerleşimleri için göstermektedir. Boşluk kesiminin basınç bölgesinde yer almasından dolayı, ÇD ve DYD yerleşimlerinde azami basınç birim uzamaları için sırasıyla 0.0027 ve 0.0030 değerleri elde edilmiştir. Çekme birim uzamalarının basınç birim uzamalarına göre daha düşük bir mertebede olduğu saptanmıştır. ÇD düzeneğinde çapraz donatılarda basınç ve çekme birim uzamaları beraber oluşurken, DYD düzeneğinde dikey donatılarda basınç ve yatay donatılarda çekme birim uzamaları oluşmuştur. Her iki analizde de köşe donatıları akma limitlerini geçmiştir.

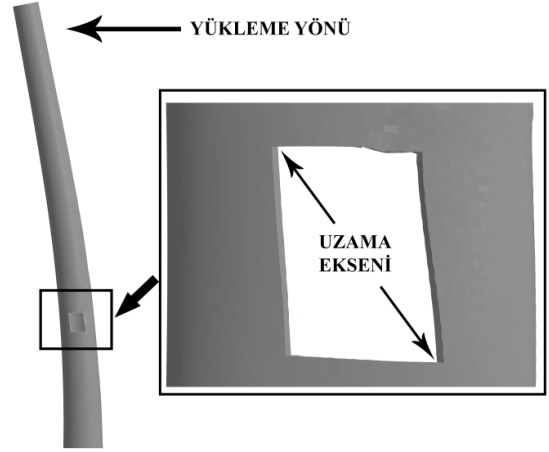


Şekil 16: Köşe donatılardaki birim uzama dağılımları:
(a): ÇD düzeneği, (b): DYD düzeneği.

Boşluğun çekme bölgesinde yer aldığı analizde olduğu gibi, bu analizde de DYD alternatif tasarım önerisinin ÇD geleneksel tasarımına yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

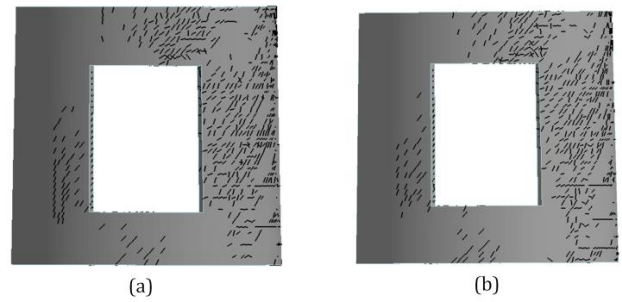
4.3 Yanal Yükleme için Analiz Sonuçları - Boşluk Kesme Bölgesinde

Boşluğun kesme bölgesinde olduğu analizdeki boşluk kesiminin deformasyonu Şekil 17'de gösterilmektedir. Önceki analizlerdeki gibi deformasyonlar 30 kat büyütülmüştür. Köşelerin yükleme öncesindeki dik açılarını koruyamadığı; çapraz köşelerin açılma veya kapanma davranışı sergiledikleri; boşluk geometrisinin dikdörtgen bir şekilden paralelkenar bir şekle dönüştüğü gözlemlenmiştir.



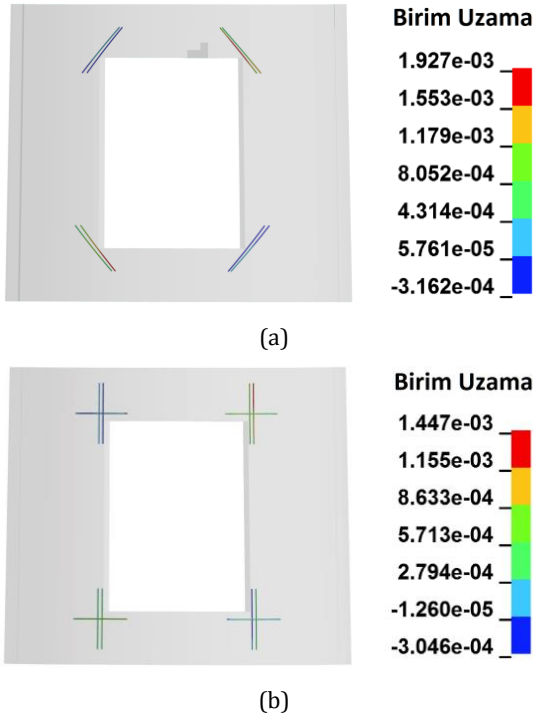
Şekil 17: Kesme bölgesindeki boşluğun deformasyonu.

Şekil 18a ve 18b'de ÇD ve DYD köşe donatı yerleşimleri için boşluk çevresinde oluşan çatlaklar gösterilmektedir. Boşluk bölgesi bir nevi çerçeve etkisi altında kalarak, kenar duvarlar kolon gibi davranış sergilemiştir. Yanal yüklere maruz kalan bir çerçevede olduğu gibi, devrilme momentinin etkisi altında sağ kenar duvarda çekme, sol kenar duvarda da basınç birim uzamaları gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı ana çatlak oluşumları sağ kenar duvar boyunca ve yatay doğrultuya göre eğimli bir şekilde oluşmuştur. Bu çatlaklar Şekil 17'de gösterilen uzama eksenine yaklaşık olarak dik doğrultuda meydana gelmiştir.



Şekil 18: Boşluk etrafındaki çatlak oluşumları:
(a): ÇD düzeneği, (b): DYD düzeneği.

ÇD ve DYD yerleşimleri için boşluk köşe donatılarındaki birim uzamaları sırasıyla Şekil 19a ve 19b'de verilmektedir. Şekil 17'de gösterilen uzama eksenine doğrultusundaki köşelerin kapanması sebebiyle, ÇD ve DYD köşe donatıları basınç birim uzamalarına maruz kalmıştır. Diğer iki köşede ise açılma meydana geldiğinden, bu köşelerdeki donatılarda çekme birim uzamaları gözlemlenmiştir. Köşe donatılarında oluşan çekme birim uzamaları basınç birim uzamalarından bir mertebe daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Azami çekme birim uzamaları için ÇD ve DYD yerleşimlerinde sırasıyla 0.0019 ve 0.0014 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 19: Köşe donatılardaki birim uzama dağılımları:
(a): ÇD düzenneği, (b): DYD düzenneği.

Boşluğun kesme bölgesinde yer aldığı analizlerde, DYD alternatif tasarım önerisinde ÇD geleneksel tasarımına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Köşe donatılarında akma durumu meydana gelmemiştir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada boşluk köşe donatıları için geleneksel çapraz donatı yerleşimine alternatif olarak, yatay ve düşey donatılardan oluşan yeni bir donatı yerleşimi önerilmiştir. Baca inşaatında genellikle kullanılan kayar kalıp sistemlerinin düşey destek elemanlarına engel teşkil etmediği hususu dikkate alınarak, önerilen alternatif donatı yerleşiminin daha avantajlı olabileceği vurgulanmıştır.

Boşluk etrafındaki çatlak oluşumları, boşluk bölgesinin deformasyonu, köşe donatılardaki birim uzamalar geleneksel ve alternatif donatı yerleşimleri için karşılaştırılarak, önerilen alternatif köşe donatı düzenneğinin elverişliliği irdelenmiştir.

Üç farklı yanal yükleme için yapılan sayısal analizler sonucunda, en kritik durumun boşluk kesiminin çekme bölgesinde yer aldığı yükleme yönü olduğu tespit edilmiştir. Köşelerdeki donatılarda oluşan en yüksek çekme birim uzamaları bu yönde meydana gelmiş olup, akma sınırı aşılmıştır. Çatlakların kenar duvarlar boyunca yatay bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir.

Baca boşluğunun basınç bölgesinde yer aldığı analizlerde köşe donatılarında akma sınırı aşılmıştır. Çatlaklar alt ve üst eşiklerde oluşmuştur. Baca boşluğunun kesme bölgesinde bulunduğu analizde ise, köşe donatılarının birim uzamaları akma sınırının altında kalmıştır. Çatlak oluşumları sadece bir kenar duvarda meydana gelmiştir.

Yatay ve düşey elemanlardan oluşan alternatif köşe donatı yerleşimi ile geleneksel çapraz donatı yerleşimi için yapılan bütün analizlerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapısal performans açısından alternatif donatı yerleşiminin betonarme bacaların boşluk köşelerinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6 Kaynaklar

- [1] ACI. "Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys and Commentary (ACI 307-08)". American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2008.
- [2] Mingle JG. "Design of reinforced concrete chimneys". *ACI Journal Proceedings*, 14(6), 278-289, 1918.
- [3] CICIND. "Model Code for Concrete Chimneys". International Committee on Industrial Chimneys, Ratingen, Germany, 2011.
- [4] Daniel J, Shiu K, Corley W. "Openings in earthquake-resistant structural walls". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 112(7), 1660-1676, 1986.
- [5] Boon K, Diah A, Loon L. "Flexural behavior of reinforced concrete slab with opening". *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, Pahang, Malaysia, 20-22 June 2009.
- [6] ACI. "Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys and Commentary (ACI 307-69)". American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1969.
- [7] Hallquist JO. "LS-Dyna Theoretical Manual". Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, USA, 2006.
- [8] Broadhouse BJ. "The Winfrith Concrete Model in LS-Dyna". Report SPD/D(95)363, AEA Technology, Winfrith Technology Centre, Structural Performance Dept, Dorset, UK, 1995.
- [9] Broadhouse BJ. "DYNA3D Analysis of Cone Crack Formation due to Heavy Dropped Loads on Reinforced Concrete Floors". Impact Technology Department, AEA Reactor Services, Winfrith Technology Centre, Dorchester, Dorset, UK, 1992.
- [10] Ottosen NS. "Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures". Riso National Laboratory, Report, Riso-R-411, Roskilde, Denmark, 1980.
- [11] Ottosen NS. "A Failure criterion for concrete". *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103(4), 527-535, 1977.
- [12] Ottosen NS. "Constitutive model for short-time loading of concrete". *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, 105(1), 127-141, 1979.
- [13] Clough RW, Penzien J. *Dynamics of Structures*. 2nd ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1993.
- [14] Bathe, KJ. *Finite Element Procedures*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1996.
- [15] Kilic SA, Saied F, Sameh A. "Efficient Iterative Solvers for Structural Dynamics Problems". *Computers & Structures*, (82), 2363-2375, 2004.
- [16] ANSI. "Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures". American National Standards Institute, New York, USA, 1972.