



FİBER-BERNOULLI&EULER ELEMAN YÖNTEMİ KULLANILARAK BETONARME ÇERÇEVELERİN LİNEER OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

Muhammet Karaton¹
Fırat Üniversitesi, Elazığ

ÖZET

Bu çalışmada, rijitlik matrisi üzerine dayalı fiber eleman yöntemi kullanılarak betonarme çerçevelerin lineer ve lineer olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Rijitlik matrisi elde edilirken, Benoulli-Euler kiriş teorisi kullanılmış ve yer değiştirme-şekil değiştirme bağıntıları için Hermite şekil fonksiyonlarından faydalanılmıştır. Eleman rijitlik matrisi elde edilirken elemanlar, segment adı verilen alt elemanlara bölünmüş ve eleman uçlarında yer alan serbestlikler için dinamik sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Segment kesitleri üzerinde bulunan beton ve çelik için farklı malzeme özelliğine sahip fiber elemanlar kullanılmış olup bu fiberler arasında aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Her bir segmente ait kesitlerinin lineer olmayan özellikleri kullanılarak segment rijitlik matrislerine ulaşılmış lineer olmayan dinamik sıkıştırma yöntemi yardımıyla da eleman rijitlik matrisleri elde edilmiştir. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde integrasyon algoritması olarak Bossak- α yöntemi seçilmiştir. Nümerik uygulama olarak 8 katlı bir betonarme çerçevenin lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak lineer olmayan davranışın etkinliği irdelenmiştir. Çözümler yazar tarafından geliştirilen bir program yardımıyla elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fiber eleman, Bernoulli&Euler kiriş teorisi, betonarme çerçeve, sismik hasar ve Bossak- α yöntemi

GİRİŞ

Depremler, kısa bir süre içerisinde yapılarda büyük hasarlar oluşturabilen ve yıkıcı özelliğe sahip olan en önemli doğal afetlerden biridir. Aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde bulunan ülkemizde geçmişte önemli mal ve can kayıplarına sebep olan depremler meydana gelmiştir gelecekte de meydana gelecektir. Depremlerin oluşumu sırasında insanların yoğunlukla bulunduğu bina türü yapılarda önemli hasarlar oluşabilmekte veya tamamıyla yıkılabilmektedir. Bu tür yapıların deprem altında yıkılması birçok can ve mal kaybına neden olacağından deprem altında gösterecekleri performanslarının belirlenmesi, bu kayıpların azaltılması açısından önem arz etmektedir. Binalar genelde yığma ve karkas tarzda inşa edilmektedirler. Karkas tarzındaki binalar, genelde çelik ve betonarme malzemeleri kullanılarak

¹ Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: mkaraton@firat.edu.tr

inşa edilmekte olup ülkemizde en çok tercih edileni ise betonarme yapı malzemesidir. Bu nedenle bu tür yapıların deprem altındaki davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve gerçek taşıma güçlerinin gelişmiş yöntemlerle incelenmesi ülkemiz ekonomisi ve can güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Son 30 yıl içerisinde betonarme elemanların nümerik modellenmesinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, eleman içerisinde oluşan çatlak veya hasarlar, elemanın belirli bölgeleri içerisinde kaldığını kabul eden toplanmış plastik mafsallı yaklaşımı ve tüm eleman boyunca yayılı olduğunu kabul eden yayılı tip yaklaşım olmak üzere iki kabul kullanılarak modellenmektedir [1-9]. İlk yaklaşımda lineer olmayan moment-dönme(eğrilik) ve kuvvet-yer değiştirme bağıntıları kullanılarak eleman üzerinde belirli bölgelerin lineer olmayan davranışları hesaba katılmakta diğer bölgelerin ise lineer davranış gösterdiği kabul edilmektedir [1-5]. Eleman üzerinde hasarların yayılı olarak kabul edildiği ikinci yaklaşımda ise eleman rijitliği elde edilirken rijitliğe ve esnekliğe (flexibility) dayalı iki yöntem kullanılmaktadır. Fiber eleman yöntemi adı verilen bu yaklaşımda, hem rijitlik hem de esneklik yöntemi için elemanın kesiti üzerinde oluşan gerilmeler bilinmeyen olarak kabul edilmektedir. Bu gerilmeler, her bir fibere ait malzemenin tek eksenli gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları yardımıyla elde edilmektedir [6-9]. Bu amaçla, elemanın rijitlik veya esneklik matrisi elde edilirken eleman, eksenli doğrultusunda istenen sayıda kesite ayrılmakta ve her bir kesit içerisinde bulundurduğu farklı malzemeler için istenen sayıda fiber/tabaka parçalarına ayrılmaktadır. Çözümün hassasiyetine göre bu sayılar arttırılmaktadır [6-9].

Bu çalışmada, rijitlik matrisi üzerine dayalı fiber eleman yöntemi kullanılarak betonarme çerçevelerin lineer olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Rijitlik matrisi elde edilirken, Benoulli-Euler kiriş teorisi kullanılmış ve yer değiştirme-şekil değiştirme bağıntıları için Hermite şekil fonksiyonlarından faydalanılmıştır. Eleman rijitlik matrisi elde edilirken elemanlar, segment adı verilen alt elemanlara bölünmüş ve eleman uçlarında yer alan serbestlikler için lineer olmayan dinamik sıkıştırma işlemi yapılmıştır [10,13]. Segment kesitleri üzerinde bulunan beton ve çelik malzemeleri için ayrı fiber elemanlar kullanılmış olup bu fiberler arasında aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Her bir segmente ait kesitlerinin lineer olmayan malzeme özellikleri kullanılarak segment rijitlik matrislerine ulaşılmış ve lineer olmayan dinamik sıkıştırma yöntemi yardımıyla da eleman rijitlik matrisleri elde edilmiştir. Nümerik uygulama olarak 8 katlı bir betonarme çerçevenin lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak lineer olmayan davranışın etkinliği irdelenmiştir. Çözümler yazar tarafından geliştirilen bir program yardımıyla elde edilmiştir.

BETONARME KİRİŞ-KOLON ELEMANLAR İÇİN FİBER BERNAULLİ&EULER YAKLAŞIMI

Bu bölümde, ilk olarak rijitlik matrisi üzerine dayalı fiber eleman yöntemi kullanılarak rijitlik ve kütle matrislerinin elde edilmesinden bahsedilmiştir. Rijitlik matrisi elde edilirken, Benoulli-Euler kiriş teorisi kullanılmış ve yer değiştirme-şekil değiştirme bağıntıları için Hermite şekil fonksiyonlarından faydalanılmıştır [11,12]. Eleman rijitlik matrisi elde edilirken elemanlar, segment adı verilen alt elemanlara bölünmüş ve her bir segmentin kesiti beton ve çelik için ayrı ayrı fiber/tabaka elemanlara ayrılmıştır (Şekil 1). İkinci alt bölümde ise eleman uçlarında yer alan serbestlikler için dinamik sıkıştırma işleminden bahsedilmiştir.

Segment (Alt Eleman) Rijitlik ve Kütle Matrislerinin Elde Edilmesi

Burada, Bernaulli&Euler giriş teorisinde kullanılan eğilmeden önce düzlem olan kesitlerin eğilmeden sonrada düzlem kaldığı varsayımı (kayma gerilmelerinin ihmal edildiği durum) dikkate alınmıştır. Aynı zamanda herhangi bir kesit üzerinde oluşan şekil değiştirmenin eksenel normal kuvvetten dolayı üniform; eğilmeden dolayı lineer olarak değiştiği kabul edilmiş ve bu iki şekil değiştirme yardımıyla toplam şekil değiştirmeye ulaşılmıştır. Böylece, şekil değiştirmelerin küçük oluşu kabulü ile her hangi bir en kesit üzerindeki bir fibere ait toplam şekil değiştirme için,

$$\varepsilon_{\xi,n} = d\varepsilon_{\xi,o} - \eta_n' d\phi_{,\xi} = \begin{Bmatrix} 1 & -\eta_n' \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} du/d\xi \\ d^2v/d\xi^2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

eşitliği yazılabilir. Burada, $d\varepsilon_{\xi,o}$, segment' in ξ lokal eksenini doğrultusunda normal kuvvetten dolayı oluşan şekil değiştirmesini, $d\phi_{,\xi}$ segment' in ξ eksenini etrafındaki dönmesini, $\varepsilon_{\xi,n}$ ise η' lokal eksenini üzerinde yer alan n . fiberin ξ lokal eksenini doğrultusunda ait toplam şekil değiştirmesini ifade etmektedir (Şekil 1). Aynı zamanda, u ve v sırasıyla ξ ve η eksenleri doğrultusundaki yer değiştirmeleri göstermektedir. Böylece şekil değiştirmeleri yer değiştirmelerle ilişkilendirmek için Hermite şekil fonksiyonları kullanılırsa denklem (1),

$$\varepsilon_{\xi,n} = \begin{Bmatrix} 1 & -\eta_n' \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d[N]/d\xi \\ d^2[N]/d\xi^2 \end{Bmatrix} \{q\} = \begin{Bmatrix} 1 & -\eta_n' \end{Bmatrix} [B] \{q\} \quad (2)$$

formunda yazılabilir [6-10]. Burada $\{q\}$ segment düğüm noktalarına ait yer değiştirme ve dönmeleri içeren vektör olup $[N]$ ve $[B]$ ise sırasıyla Hermite şekil fonksiyonları matrisini ve şekil değiştirme-yer değiştirme arasındaki matrisi göstermektedir. Buradan, ξ lokal eksenini doğrultusunda bir fiberde oluşan gerilme ise,

$$d\sigma_{\xi,n} = E_{T,n} d\varepsilon_{\xi,n} = E_{T,n} \begin{Bmatrix} 1 & -\eta_n' \end{Bmatrix} [B] \{q\} \quad (3)$$

eşitliği ile elde edilebilmektedir [6-10]. Burada, $E_{T,n}$ n . fibere ait teğet elastisite modülünü göstermektedir. Bu değer her bir fiber malzeme için tek eksenli gerilme-şekil değiştirme bağıntıları yardımıyla ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Böylece bir segmentin toplam şekil değiştirme enerjisi için denklem (2) ve (3) kullanılırsa,

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \int_{L_{Seg}} \sigma^T \varepsilon A_{Seg} dx &= \frac{1}{2} \int_{-l}^l \{q\}^T [B]^T \begin{Bmatrix} 1 \\ -\eta_n' \end{Bmatrix} E_{T,n} A \begin{Bmatrix} 1 & -\eta_n' \end{Bmatrix} [B] \{q\} d\xi \\ &= \frac{1}{2} \int_{-l}^l \{q\}^T [B]^T \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N E_{T,n} A_n & -\sum_{n=1}^N \sigma_n A_n \eta_n' \\ -\sum_{n=1}^N \sigma_n A_n \eta_n' & \sum_{n=1}^N \sigma_n A_n (\eta_n')^2 \end{bmatrix} [B] \{q\} d\xi \end{aligned} \quad (4)$$

bağıntısı elde edilebilir. Burada L_{Seg} ve A_{Seg} sırasıyla, segmentlerin uzunluğunu ve en kesit alanını göstermektedir. Böylece Fiber-Bernaulli&Euler kiriş-kolon elemanına ait segment rijitlik matrisi minimum potansiyel enerji prensibi yardımıyla,

$$[K]_{Seg} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [B]^T \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N E_{T,n} A_n & -\sum_{n=1}^N \sigma_n A_n \eta_n' \\ -\sum_{n=1}^N \sigma_n A_n \eta_n' & \sum_{n=1}^N \sigma_n A_n (\eta_n')^2 \end{bmatrix} [B] d\xi \quad (5)$$

olarak elde edilebilir. Bu eşitlik yardımıyla, Hermite şekil fonksiyonları kullanılarak ξ lokal eksenini doğrultusunda seçilen bir integrasyon yöntemi yardımıyla segment rijitlik matrisi hesaplanabilmektedir. Böylece hesaplarda kullanılacak farklı en kesitler için Gauss-Quadrature integrasyon noktalarında hesap yapılabilmektedir [6-10]. Ancak bu yöntemin uygulanması durumunda çatlak veya hasarların yoğun olduğu bölgeler için elde edilen sapma değerleri esneklik matrisi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha büyük olduğu belirtilmiştir [6-9]. Bu durum Hermite şekil fonksiyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu bu sapma değerlerinden kaçınmak amacıyla elemanlar segmentlere bölünüp lineer olmayan dinamik sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Aynı zamanda, segment içerisinde oluşacak hasarın hesaplanması için her bir fiber içerisindeki oluşacak hasar ayrı ayrı hesaba katılmaktadır. Buradan bir fiber içerisinde oluşan hasar büyüklükleri (d_n), her bir fiberin teğet elastisite modülü yardımıyla,

$$d_n = 1 - \frac{E_{T,n}}{E_{o,n}} \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada verilen $E_{o,n}$ n . fiberin başlangıç elastisite modülünü göstermektedir. Bu hasar büyüklüğü, her bir fiber için çekme ve basınç bölgelerinde ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Beton ve çelik malzemeleri için literatürde verilen tek eksenli gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 1' de görülmektedir. Betonun etriyeli (sargılı) ve etriyesiz (sargısız) durumları için ayrı malzeme bağıntıları tanımlanarak hesaplar yapılmaktadır [6-9]. Bu çalışmada kullanılan beton ve çeliğin tek eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrileri ise Şekil 2' de görülmektedir. Şekil 2.a' da görülen ve beton için verilen eğride etriyenin etkisini hesaba katmak için bir α malzeme katsayısı tanımlanmıştır. Bu katsayı çekme altında yumuşamayı; basınç altında ise pekleşme ve yumuşama kısmının modellenmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, çelik için tanımlanan eğri ise (Şekil 2.b) iki doğrulu kinematik pekleşme davranışını göstermekte olup tekrarlı yüklemeler için Bauschinger etkisini dikkate almamaktadır.

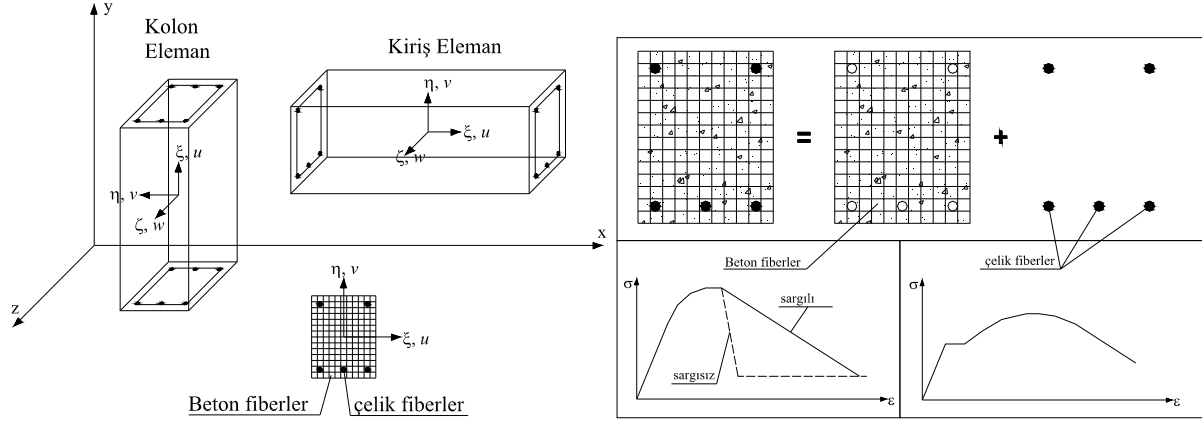
Segmentlerin kütle matrislerinin hesabında ise kinetik enerji ifadesi kullanılırsa,

$$T = \frac{1}{2} \int_{\Omega} v_{\xi} \rho v_{\xi} d\Omega \quad (7)$$

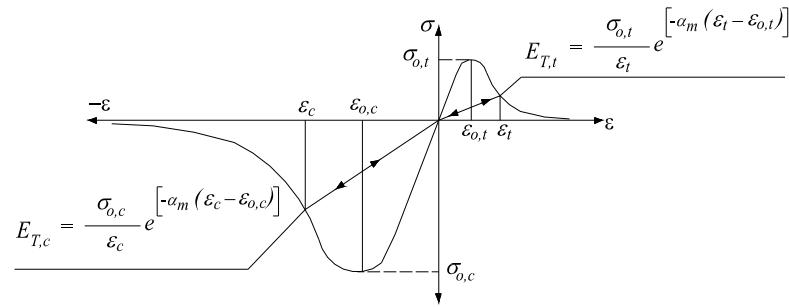
eşitliği yazılabilir. Burada, ρ kesitin birim hacim kütlesini, v_{ξ} ise kesit üzerindeki diferansiyel hacmin hızını göstermektedir. Böylece bir segmentin kütle matrisi fiber elemanlar yardımıyla,

$$[M]_{Seg} = \int \sum_{-In=-I}^I [N]^T(\xi) \rho_n [N](\xi) d\xi \quad (8)$$

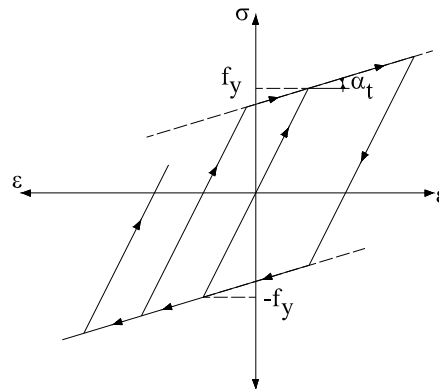
eşitliği kullanılarak elde edilebilir [6-9].



Şekil 1. Elemanların global ve lokal eksenleri ile Beton ve çelik fiberlerin malzeme davranışları.



a) beton



b) çelik

Şekil 2. Betonarme malzemesinde a) beton ve b) çeliğin gerilme-şekil değiştirme bağıntıları.

Eleman Rijitlik ve Kütle Matrislerinin Dinamik Sıkıştırma İle Elde Edilmesi

Yüksek katlı binaların dinamik analizleri yapılırken serbestlik derecesi sayısının azaltılması çözümlerin kısa bir sürede elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu amaçla segmentlere ayrılan elemanların uçlarında yer alan serbestliklere iç bölgelerdeki serbestliklerin sıkıştırılması gerekmektedir. Bu işlemde öncelikle ardışık bir şekilde yer alan segmentlerin rijitlik ve dış kuvvet vektörlerinin tamamı bir eleman rijitlik matrisi ve dış kuvvet vektörü içerisinde olacak şekilde toplanmaktadır. Elemanın uçlarındaki serbestlikler için E ; iç bölgelerdeki serbestlikler için ise I indisi kullanılırsa söz konusu matris ve vektör için,

$$[K_{EE}]\{u_E\} + [K_{EI}]\{u_I\} = \{F_E\} \quad (9.a)$$

$$[K_{IE}]\{u_E\} + [K_{II}]\{u_I\} = \{F_I\} \quad (9.b)$$

eşitlikleri yazılabilir [6,10]. Burada görülen $\{U\}_E$ ve $\{U\}_I$ vektörleri sırasıyla dış ve iç serbestliklere ait yer değiştirme vektörlerini göstermektedir. Dinamik sıkıştırma işlemi uygulandığı zaman eleman uçlarına ait denge denklemi, rijitlik matrisi ve dış kuvvet vektörü için,

$$[K_{EE,F}] \{u_E\} = \{F_{E,F}\} \quad (10.a)$$

$$[K_{EE,F}] = [K_{EE}] - [K_{EI}] [K_{II}]^{-1} [K_{IE}] \quad (10.b)$$

$$\{F_{E,F}\} = \{F_E\} - [K_{EI}] [K_{II}]^{-1} \{F_I\} \quad (10.c)$$

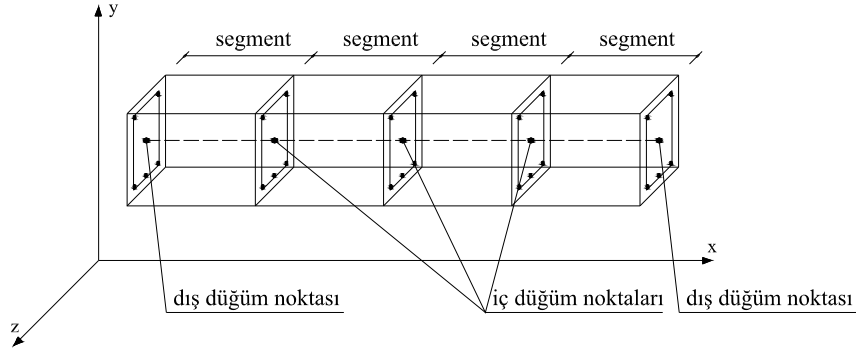
bağıntıları elde edilebilir. Kütle matrisi için Guyan azaltma (reduction) işlemi uygulanırsa,

$$[M_{EE,F}] = [M_{EE}] - [K_{EI}] [K_{II}]^{-1} [M_{IE}] - [M_{EI}] [K_{II}]^{-1} [K_{IE}] + [K_{EI}] [K_{II}]^{-1} [M_{II}] [K_{II}]^{-1} [K_{IE}] \quad (11)$$

olarak yazılabilir [13]. Böylece tüm çerçeve sistemine ait rijitlik, kütle matrisleri ve dış kuvvet vektörü ise,

$$[K_E] = \sum_{j=1}^{nelem} [K_{EE,F}]; \quad [M_E] = \sum_{j=1}^{nelem} [M_{EE,F}]; \quad \{F_E\} = \sum_{j=1}^{nelem} \{F_{E,F}\} \quad (12)$$

şeklinde elde edilebilir. Her bir lineer olmayan zaman adımı için bu işlem tekrarlanmakta böylece lineer olmayan dinamik sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. Eleman içindeki Segmentler(alt elemanlar), dış ve iç düğüm noktaları.

Dinamik Denge Denklemi İçin Bossak- α Yöntemi

Bu çalışmada, çerçeve taşıyıcı sisteminin sönüm matrisi, düğüm noktalarına sıkıştırılmış kütle ve teğet rijitlik matrisleri yardımıyla elde edilmekte olup,

$$[C_E] = \alpha_{dam}[M_E] + \beta_{dam}[K_E] \quad (13)$$

bağıntısıyla hesaba katılmaktadır. Burada, α_{dam} ve β_{dam} sırasıyla Rayleigh sönüm katsayılarını belirtmektedir [11]. Böylece çerçeve sistemine ait dinamik denge denklemi,

$$[M_E] \{a_E\}_{t+\Delta t} + [C_E] \{v_E\}_{t+\Delta t} + [K_E] \{u_E\}_{t+\Delta t} = \{F_{E,gr}\}_{t+\Delta t} + \{F_{E,stat}\} \quad (14)$$

formunda yazılabilir. Burada *gr* ve *stat* alt indisleri sırasıyla yer ivmesi ve statik yüklerden dolayı ortaya çıkan dış kuvvet büyüklüklerini göstermektedir. Denklem (14)' e Bossak- α integrasyon formu uygulanırsa,

$$\begin{aligned} (I - \alpha_B)[M_E] \{a_E\}_{t+\Delta t} + \alpha_B[M_E] \{a_E\}_t + [C_E] \{v_E\}_{t+\Delta t} + \{F_E\}_{t+\Delta t} = \\ (I - \alpha_B)\{F_{E,gr}\}_{t+\Delta t} + \alpha_B\{F_{E,gr}\}_t + \{F_{E,stat}\} \end{aligned} \quad (15)$$

eşitliğine ulaşılabilir [14]. Bu integrasyon formu Newmark metoduna dayalı olup kütle matrisi ve yer ivmesi vektörüne bir α parametresi uygulanmaktadır. Bu parametre nümerik dağılımı kontrol parametresidir. Şartsız stabilite ve ikinci dereceden doğruluğu sağlamak için Bossak ve Newmark parametreleri,

$$\alpha_B < 0.5; \quad \beta = \frac{I}{4}(I - \alpha_B)^2; \quad \gamma = \frac{I}{2} - \alpha_B \quad (16)$$

eşitlikleri kullanılarak seçilmelidir. Bu çalışmada α_B -0.1 olarak seçilmiş ve lineer olmayan davranışın elde etmesi amacıyla Bossak- α yöntemi, tahmin-düzeltilme (predictor-corrector) yöntemi ile birleştirilmiştir. Böylece, $t+\Delta t$ zaman anı için tahmin edilen yer değiştirme ve hız vektörü, t zaman adımındaki bilinen yer değiştirme ve hız vektörleri yardımıyla,

$$\{\tilde{u}_E\}_{t+\Delta t} = \{u_E\}_t + \Delta t \{v_E\}_t + \frac{I}{2} \Delta t^2 (I - 2\beta) \{a_E\}_{t+\Delta t} \quad (17.a)$$

$$\{\tilde{v}_E\}_{t+\Delta t} = \{v_E\}_t + \Delta t (I - \gamma) \{a_E\}_t \quad (17.b)$$

eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir. Buradan, $t+\Delta t$ zaman anı için yer değiştirme ve hız vektörleri ise,

$$\{u_E\}_{t+\Delta t} = \{\tilde{u}_E\}_{t+\Delta t} + \beta \Delta t^2 \{a_E\}_{t+\Delta t} \quad (18.a)$$

$$\{v_E\}_{t+\Delta t} = \{\tilde{v}_E\}_{t+\Delta t} + \Delta t \gamma \{a_E\}_{t+\Delta t} \quad (18.b)$$

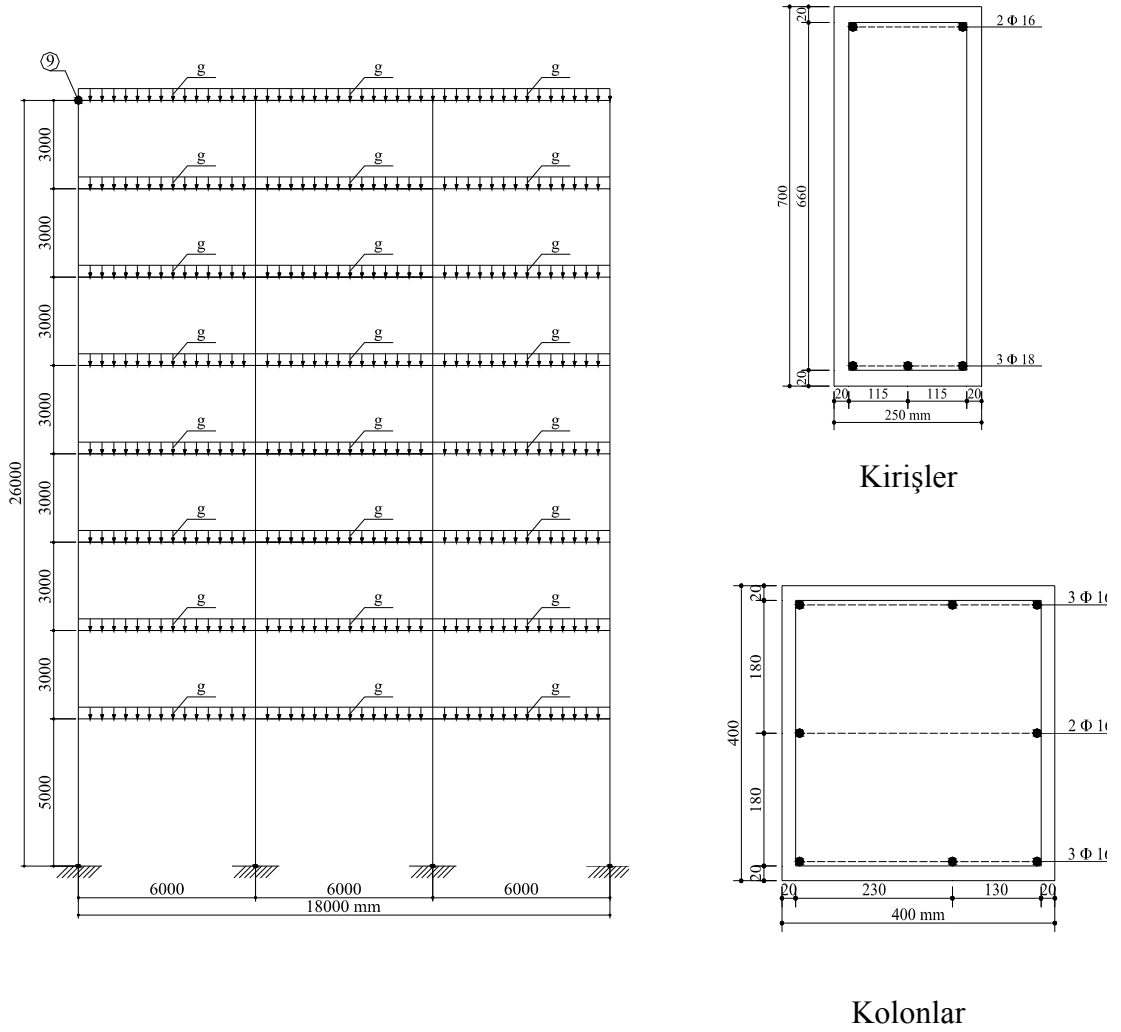
bağıntıları ile hesaplanabilir [15]. Denklem (18), denklem (15)' de yerine yazılarak integrasyon algoritması tamamlanmaktadır.

NÜMERİK UYGULAMA

Nümerik uygulama olarak, 8 katlı, 3 açıklıklı ve zemin katı yumuşak kat olan bir betonarme çerçevenin lineer olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Kiriş ve kolonlarına ait malzeme özellikleri Tablo 1' de betonarme çerçevenin geometrik özellikleri ve yükleme durumu ise Şekil 4' de verilmiştir. Statik yükler ve çerçevenin kendi ağırlığı başlangıç şartları olarak tanımlanmıştır. Dinamik etki olarak Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik-2007 [16]' de verilen Z1 tipi zemin için önerilen spektrum ivme grafiği hedef spektrum eğrisi olarak seçilmiş ve maksimum ivme değeri 0.3g olacak şekilde sentetik bir deprem ivme kaydı üretilmiştir. Bu deprem dataları SeismoArtif programı [17] yardımıyla elde edilmiş ve söz konusu çerçeveye yatay doğrultuda etki ettirilmiştir (Şekil 5). Çözümler elde edilirken hasar görmemiş çerçevenin doğal titreşim frekansları yardımıyla %5 sönüm oranı için Rayleigh sönüm katsayısı elde edilmiş ve teğet rijitlik matrisi yardımıyla elde edilen sönüm matrisi her zaman adımında güncellenmiştir. Lineer olmayan davranışın çözümler üzerindeki etkisini tam yansıtabilmek amacıyla integrasyon zaman adımı 0.001 s olarak seçilmiştir.

Tablo 1. 8 katlı çerçevenin kolon ve kirişlerine ait malzeme ve en kesit özellikleri

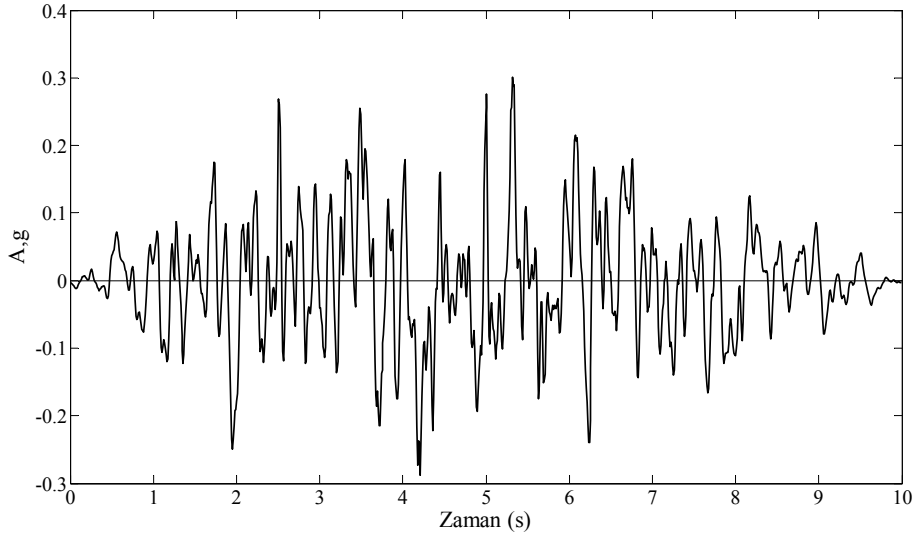
Malzeme		Kirişler	Kolonlar
Beton	Elastisite Mod., (E_c MPa)	25742.960	25742.960
	Basınç. Dayanımı (f_c , MPa)	30.00	30.00
	Çekme (f_t , MPa)	2.74	2.74
	Birim hacim kütlesi (ρ , ton/m ³)	2.4	2.4
Çelik	Elastisite Mod., (E_c MPa)	210000	210000
	Basınç. Dayanımı (f_c , MPa)	420.0	420.0
	Çekme (f_t , MPa)	0.05	0.05
	Birim hacim kütlesi (ρ , ton/m ³)	7.951	7.951



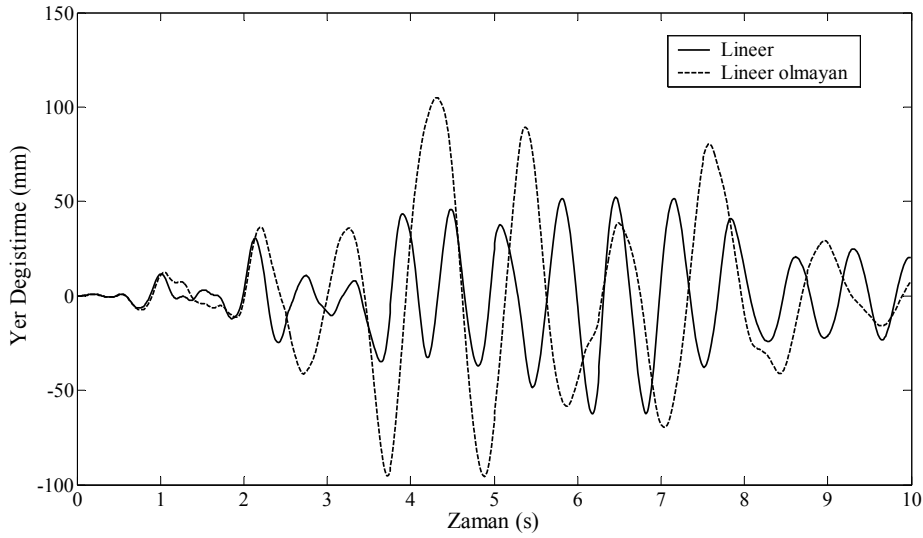
Şekil 4. Betonarme çerçevenin geometrik özellikleri ve yükleme durumu.

Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerden elde edilen 9 nolu düğüm noktasına ait yatay yer değiştirme-zaman grafiği Şekil 6’ da görülmektedir. Her iki çözüm için yaklaşık 1.0 s. anına kadar benzer bir ilerleyiş görülürken bu andan sonra çerçevede hasarların oluşmasıyla birlikte yer değiştirme değerlerinde artışlar görülmüştür. Bu yer değiştirme değeri hasarın artışına bağlı olarak yaklaşık 2.1 s. anına kadar önemli farklar görülmezken bu andan itibaren lineer olmayan analizden elde edilen yer değiştirme genlik değerlerinde önemli artışlar görülmüştür. Aynı zamanda bu andan itibaren her iki analiz arasında bir faz farkı ortaya çıkmıştır. Her iki çözümden elde edilen yer değiştirme genlik değerleri 8.0 s. anından itibaren deprem ivme genlik değerlerinin küçülmesine bağlı olarak küçülmektedir. Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen mutlak maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 62.4 mm ve 104.9 mm’ dir. Buradan lineer olmayan analizden elde edilen yer değiştirme değerlerinin lineer analize göre % 68 oranında daha büyük değerler elde edildiği görülmektedir.

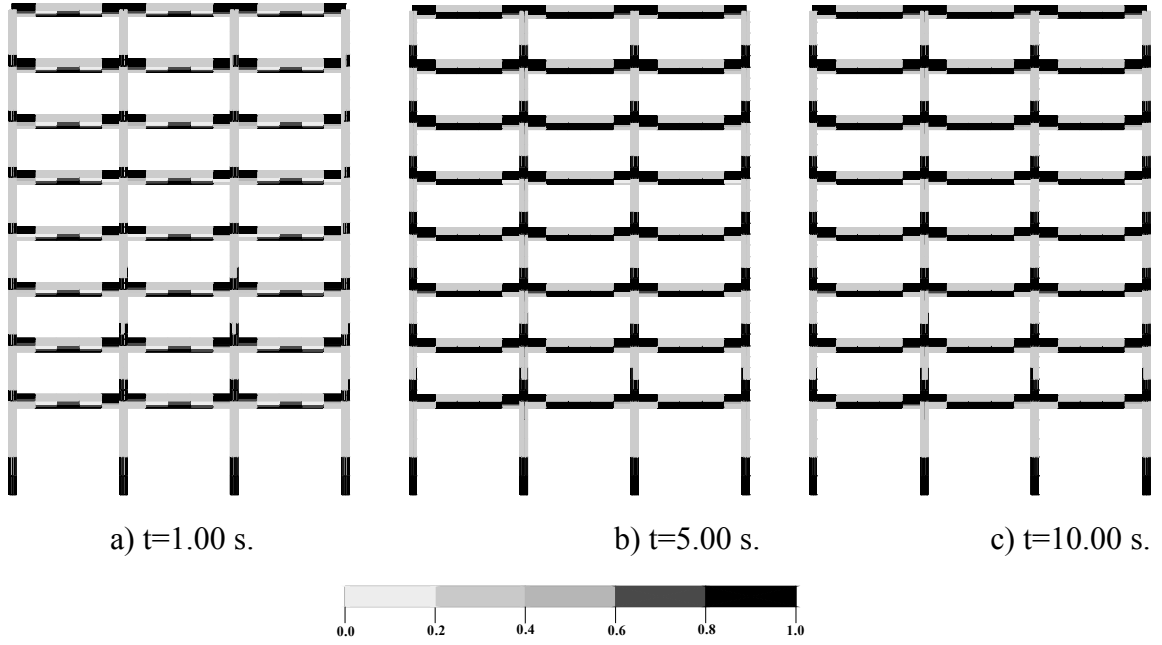
Yığılımlı çekme hasar bölgeleri Şekil 6' görülen 8 katlı çerçevede oluşan hasar bölgeleri, genelde kiriş orta bölgesinin alt yüzeyinde ve kiriş uç bölgelerinin üst bölgelerinde görülmektedir. Bu durum eğilme etkisiyle ortaya çıktığı rahatlıkla görülmektedir. Ayrıca her katta kiriş-kolon birleşim bölgelerinde ve zemin katın temelle birleşim bölgesinde de hasarlar meydana gelmekte olup bu durumdaki hasar bölgeleri ise depremin etkisiyle ortaya çıkmıştır. Bu hasar bölgeleri ilerleyen zamanlarda genişlemektedir.



Şekil 5. Sentetik depremin ivme-zaman grafiği.



Şekil 6. Düğüm noktası 9' un x doğrultusu için yer değiştirme-zaman grafiği.



Şekil 7. 8 katlı çerçevenin değişik anlara ait yığışımlı çekme hasar bölgeleri.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, rijitlik matrisi üzerine dayalı fiber eleman yöntemi kullanılarak betonarme çerçevelerin lineer ve lineer olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Rijitlik matrisi elde edilirken, Benoulli-Euler kiriş teorisi kullanılmış ve yer değiştirme-şekil değiştirme bağıntıları için Hermite şekil fonksiyonlarından faydalanılmıştır. Eleman rijitlik matrisi elde edilirken elemanlar, segment adı verilen alt elemanlara bölünmüş ve eleman uçlarında yer alan serbestlikler için lineer olmayan dinamik sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Segment kesitleri üzerinde bulunan beton ve çelik malzemeleri için farklı malzeme özelliklerine sahip fiber elemanlar kullanılmış olup bu fiberler arasında aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Her bir segmente ait kesitlerinin lineer olmayan özellikleri kullanılarak segment rijitlik matrislerine ulaşılmış dinamik sıkıştırma yöntemi yardımıyla da eleman rijitlik matrisleri elde edilmiştir. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde integrasyon algoritması olarak Bossak- α yöntemi seçilmiştir. Nümerik uygulama olarak 8 katlı bir betonarme çerçevenin lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak lineer olmayan davranışın etkinliği irdelenmiştir. Çözümler yazar tarafından geliştirilen bir program yardımıyla elde edilmiştir.

Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında lineer olmayan analizden elde edilen sonuçların lineer analize göre daha büyük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum lineer olmayan analizde elemanlarda oluşan hasarlardan kaynaklanmaktadır. Bu hasarın artışına bağlı olarak her iki çözüm arasında davranış açısından bir faz farkı ortaya çıkmıştır. Yığışımlı çekme hasar bölgeleri ise genelde kiriş orta bölgesinin alt yüzeyi ve kiriş uç bölgelerinin üst yüzeyine yakın bölgelerde oluşmuştur. Aynı zamanda, her katta kiriş-kolon birleşim bölgelerinde ve zemin katın temelle birleşim bölgesinde de hasarlar meydana gelmiştir. Bu hasar bölgeleri ilerleyen zamanlarda genişlemiştir.

Fiber eleman ile Bernaulli&Euler kiriş teorisinin birleştirildiği bu çalışmada, eleman içerisinde oluşan hasarlar fiber parçalar yardımıyla lokal eksenden global eksene taşınabilmektedir. Böylece, hasarların oluşum bölgesinin detaylı belirlenmesi ve gerilmenin lineer olmayan dağılımının hesaba katılması mümkün olmuştur. İleriki çalışmalarda, çözümlerde kayma gerilmesinin dikkate alındığı Timoshenko kirişi gibi yaklaşımlar için bu yöntemin geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Anagnostopoulos, S. (1981), "Inelastic beams for seismic analysis of structures", Jour.Eng. (ASCE), **107** (ST7), 1297-1311.
- [2]. Banon H., Biggs, J. and Irvine, M. (1981), "Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames", Jour. Struc.Eng.(ASCE), **107** (ST9), 1713-1729.
- [3]. Bazant, S. and Bhat, P. (1977), "Prediction of hysteresis in reinforced concrete members", Jour. Struc.Eng.(ASCE), **103** (ST1), 151-167.
- [4]. Iemura, H. and Jennings, P.C. (1973) "Hysteretic response of a nine story reinforced concrete building during the San Fernando Earthquake", EERL 1973/07, Earthquake Engineering Research Laboratory, Berkeley, California.
- [5]. Zeris, C. and Mahin, S. (1991) "Behavior of reinforced concrete structures subjected to biaxial excitation", Jour.Struc.Eng.(ASCE), **117**(ST9), 2657–2673.
- [6]. Carlson, A.E. (1999), "Three-dimensional nonlinear inelastic analysis of steel moment-frame buildings damaged by earthquake excitations", EERL Report 1999/02, Earthquake Engineering Research Laboratory, Berkeley, California.
- [7]. Filippou, F.C. and Issa, A. (1988), "Nonlinear analysis of reinforced concrete frames under cyclic load reversals", EERC Report 1988/12, Earthquake Engineering Research Laboratory, Berkeley, California.
- [8]. Taucer, F.F., Spacone E. and Filippou, F. C. (1991) A Fibre beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures, EERC 1991/17, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
- [9]. <http://opensees.berkeley.edu>. <http://opensees.berkeley.edu>, *Open System for Earthquake Engineering Simulation, OpenSees, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*.
- [10]. Krishnan, S. (2003), "Three-dimensional nonlinear analysis of tall irregular steel buildings subject to strong ground motion", EERL Report 2003/01, Earthquake Engineering Research Laboratory, Berkeley, California.
- [11]. Bathe, K.J. (1982), *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [12]. Chandrupatla, T.R. and Belegundu, A.D. (2002), *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

- [13]. Guyan, R.J. (1965) “Reduction of stiffness and mass matrices”, AIAA Journal, **3**(2), 380.
- [14]. Wood, W. L., Bossak M., and Zienkiewicz, O.C. (1981) “A alpha modification of Newmark’s method”, Inter.Jour.Num.Meth.Eng., **15**, 1562-1566.
- [15]. Miranda I., Ferencz R.M. and Hughes T.J.R. (1989) “An improved implicit-explicit time integration method for structural dynamics”, Earth.Eng.&Struc.Dyn., **18** (5), 643-653.
- [16]. ABYYHY, (2007), “ Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik”.
- [17]. <http://www.seismosoft.com>, *SeismoArtif Ver 1*.