ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERDE YARI-RİJİT BAĞLANTILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

A. Köseoğlu[1] ve A. Sarıtaş[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Atılım Üniversitesi, Ankara*
[2] *Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: asaritas@metu.edu.tr

ÖZET:

Bu çalışmada kuvvet-bazlı sonlu eleman formülasyonuna dayalı ve yarı-rijit bağlantıların eleman içinde yayılı olarak konumlandığı doğrusal olmayan bir çerçeve elemanın türetimi yapılmaktadır. Bu elemanla hem kolon yüzeyinde kiriş bağlantılı ve hem de kolondan çıkmalı tipte kirişe bağlantılı çelik çerçeve yapısal sistemlerin deprem altında doğrusal olmayan analizinin yapılması mümkün olabilecektir. Bilindiği üzere mevcut yapı analizlerinde genellikle tamamen rijit veya basit olmak üzere iki çeşit bağlantı varsayımı bulunmaktadır. Tamamen rijit bağlantıların hiçbir dönme yapmadan tüm momenti aktardığı, basit bağlantıların ise dönmeye serbest olup hiç bir moment aktarmadığı farzedilir. Halbuki pratikte hem bir miktar dönme yapan hem de bir miktar moment aktaran üçüncü bir bağlantı tipi yarı-rijit bağlantı ile karşılaşılmaktadır. Yarı-rijit bağlantıların çerçeve sistemlerde deprem yükleri altında doğrusal olmayan analize etkisinin katılması için bu bağlantıların moment-dönme eğrilerinin döngüsel karakterinin bilinmesi gereklidir. Bu tipte eğrilerinin elde edilmesi kolay olmayıp bu eğrilerin yapı analizine dahil edilmesi de ayrı bir çaba gerektirmektedir. Bu çalışmada daralma etkisi, hasar ve artık moment kapasitesinin varlığı dikkate alınarak dört parça lineer histeretik bir moment-dönme modeli geliştirilmiştir. Modelin tepkisi literatürdeki mevcut deneysel veriler aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca kiriş boyunca yayılı plastik davranışı dikkate alan kuvvet bazlı bir makro eleman modeli sunulmuştur. Bu elemanla deplasman bazlı elemanlara göre daha az serbestlik derecesi kullanarak kirişin herhangi bir yerinde olabilecek bir çok yarı rijit bağlantı analize dahil edilebilmektedir. Düğüm noktalarında oluşan deplasmanların hesabında korotasyonel formülasyon kullanılarak doğrusal olmayan geometri etkilerinin yakalanabilmesi de mümkün olmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen elemanın formülasyonu ve ayrıca doğrusal olan ve olmayan yarı-rijit bağlantı davranışını yakalamadaki başarısı sayısal olarak sunulmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Yarı-rijit bağlantılar, çelik çerçeveli yapılar, doğrusal olmayan analiz, sonlu eleman formülasyonu.

1. GİRİŞ

Çelik yapıların analizinde genellikle kolon-kiriş bağlantıları ya basit (kesme tipi) ya da rijit (moment aktaran) olarak kabul edilir. Gerçekte ise basit bağlantılar bir miktar moment taşımakta rijit bağlantılar ise bir miktar esnekliğe sahiptir. Dolayısıyla yarı-rijit denilen üçüncü bir bağlantı sınıflandırması ortaya çıkmıştır. Bu yarı-rijit bağlantıların doğrusal olmayan davranışlarının analize katılabilmesi için moment-dönme eğrilerinin doğru bir şekilde modellenmesi ve çözümlenmesi gerekmektedir. Araştırmacılar tarafından bir çok deneysel ve analitik yarı-rijit modeller ortaya konmuş ve bu modellerin analize dahil edilmesi hala süregelen bir araştırma konusudur.

Lui ve Chen (1986)'nin çalışmasında sunulan kiriş elemanı kiriş içinde plastikleşmeyi ihmal etmiş, eleman uçlarında plastik mafsal oluşumunu dikkate almıştır. Bu formülasyonda elemanın prizmatik olduğu, düzlem kesitlerin deformasyon sonrası düzlem kaldığı, kesit üstündeki çarpılmanın ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve plastikleşmenin sadece kiriş uçlarında sıfır uzunlukta lokalize olduğu ve eleman boyunca doğrusal elastik davranışın bulunduğu varsayılmıştır. Ayrıca bağlantıların moment-dönme eğrileri için eksponansiyel bir fonksiyon kullanılmıştır.

Sekulovic ve Salatic (2001)'in çalışmasında yarı-rijit bağlantı davranışı sonucu oluşan esnekliğin statik yükler altında yapıların davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hem bağlantının doğrusal olmayan davranışını hem de doğrusal olmayan geometri etkilerini hesaba katan sayısal bir model kullanılmıştır. Kiriş modeli Lui ve Chen'in çalışmasındaki varsayımları dikkate almıştır. Sonuç olarak da bağlantı esnekliğinin kritik yük üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sekuloviç v.d. (2002) başka bir çalışmasında bağlantı esnekliğinin yapıların doğrusal olmayan davranışı üstündeki etkisini incelemiştir. Bağlantılar bir dönme yayı ve bir amortisörün (dashpotun) parallel bağlanmasıyla modellenmiştir. Dönme yayının monotonik yük altındaki davranışı Kishi v.d.(1993) tarafından sunulan 3 parametreli power modeli kullanılarak modellenmiştir. Bağlantının çevrimsel yük altındaki elastik olmayan davranışı için ise bağımsız pekleşme modeli (independent hardening) uygulanmıştır. Sonuç olarak da bağlantı esnekliğinin yapıların doğrusal olmayan davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Valipour ve Bradford (2012)'ın yakın bir zamandaki çalışmasında ise, eleman üzerine yayılı plastisiteyi ve eleman uçlarında doğrusal olmayan bağlantıları hesaba katan bir çerçeve elemanı geliştirilmiştir. Eleman kuvvet bazlı formülasyonla elde edilmiştir. Bu sayede kiriş ve uçlarındaki bağlantılar tek bir elemanla modellenebilmiştir. Bağlantının doğrusal olmayan davranışında rijitlik ve dayanım azalmaları ve daralma etkisi dikkate alınmamış; fakat kinematik pekleşmeli iki parça lineer model ve alternatif olarak da Ramberg-Osgood modeli kullanılmıştır.

Çerçeve sonlu eleman modelleri deplasman veya kuvvet bazlı (diğer bir deyişle karma) formülasyonla elde edilebilir. Yarı-rijit bağlantıların kirişlerin uçlarında veya eleman boyunca herhangi bir yerde olduğu durumlarda kuvvet bazlı formülasyonun serbestlik derecesini artırmadan eleman türetilebilmesi yönünde avantajı vardır. Ayrıca bu yaklaşımla tek eleman kullanımı ile eleman üzerinde yayılı elastik olmayan davranışın doğru bir şekilde yakalanabilmesi mümkün olmaktadır. Kuvvet bazlı elemanların bu iki özelliğinden ötürü bu çalışmada kuvvet bazlı, yarı-rijit bağlantı içeren ve üzerinde yayılı plastikleşmeyi içeren bir makro eleman modeli geliştirilmişir. Bu elemanla yarı-rijit bir bağlantının doğrusal olmayan davranışı kolaylıkla analize dahil edilebilecektir. Geliştirilen bu eleman istenilen adette ve kiriş üzerinde istenilen konumda yarı-rijit bağlantı içerebilmektedir. Yarı-rijit bağlantıların histeretik enerji soğurma davranışlarını doğru bir şekilde gösterebilmek için daralma, hasar, yumuşama ve artık moment gibi özellikleri içeren dört parça lineer bir moment-dönme modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen moment-dönme modeli literatürde mevcut olan yarı-rijit bağlantıların deneysel verisi kullanılarak karşılaştırılmış ve kalibre edilmiştir. Ayrıca geliştirilen eleman doğrusal olmayan geometri etkilerini de hesaba katabilecek şekilde formüle edilmiştir. Çelik yapı analizlerinde kiriş ve bağlantı üzerinde muhtemel doğrusal olmayan plastikleşmeler gerçekçi bir şekilde hesaba katılmalıdır. Yarı-rijit bağlantıların çevrimsel davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesinin önemi çelik çerçeve moment aktaran bir yapının analizi ile değerlendirilmiştir.

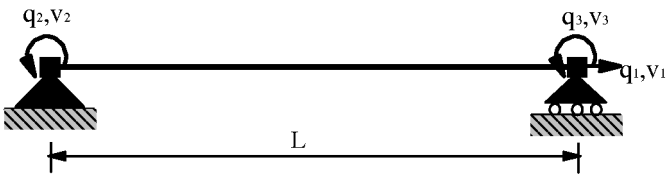
2. ÇERÇEVE ELEMANI FORMÜLASYONU

Doğrusal olmayan ve yarı-rijit bağlantılar içeren bir makro elemanın deplasman bazlı formülasyonla modellenmesi çözüm için gerekli olan eleman sayısı artımını ve dolayısıyla serbestlik derecesinde de artımı gerektirmektedir. Saritas ve Soydas (2012)'ın yakın zamanda yayınlanan çalışmasında yapısal sistemlerin deplasman bazlı elemanlarla çözümlenmesinin kuvvet bazlı elemanlara kıyasla çözüm zamanını önemli miktarda artırdığı gösterilmiştir. Eğer eleman boyunca yayılı plastikleşmenin olduğu dikkate alınarak analiz yapılacaksa doğrusal olmayan davranışın başarılı bir şekilde yakalanabilmesi için 8 ile 16 adet deplasman bazlı elemana ihtiyaç duyulmaktadır. Kiriş elamanlarının yarı-rijit bağlantıları içerdiği durumlarda bağlantılar kirişin uçlarına dönme yayları eklenerek modellenir. Literatürde artık deplasman bazlı formulasyonla yeni makro eleman modellerinin türetilmesi yenilik olarak kabul edilememektedir; çünkü var olan elemanların diğer yay elemanları ile bağlanması standart işlem olmuştur. Buna rağmen deplasman bazlı elemanların kullanılmasıyla bile yarı-rijit bağlantıların çevrimsel olmayan davranışının gerçekçi olarak modellenmesi ve yapısal analizde bunun dikkat alınması gerekmektedir ve bu açıdan yapısal analiz çözümlemeleri açısından yarı-rijit bağlantı modelleri sunumu ve ayrıca yapı analizinin parçası olarak kullanımı konusunda eksiklik bulunmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen yarı-rijit bağlantıları içeren doğrusal olmayan çerçeve elemanı, eleman tepkilerini hesaplamakta kuvvet enterpolasyon fonksiyonlarının kullanılması esasına dayanır. Bu elemanın türetiminde yarı-rijit bağlantı davranışı dönme yayları kullanılarak dikkate alınmıştır. Elemanın bağlantılar dışındaki sürekli kısımları Euler-Bernoulli kiriş teorisinin varsayımlarını kabul etmektedir. Bu varsayımda düzlem kesitler deformasyondan sonra da düzlem kalmaktadır. Ayrıca kesme deformasyonları ihmal edildiği için eleman üzerinde sadece eksenel gerilmelerin oluştuğu varsayılmıştır. Elemanın doğrusal olmayan tepkisi, eleman boyunca oluşabilecek plastikleşmenin kontrol kesitlerinde hesaplanması ve ayrıca her bir kesitte de fiber model kullanımı ile tepkinin elde edilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Eleman formülasyonu rijit modlardan arındırılmış temel bir sistem kullanılmasına dayanmaktadır. Bu sisteme örnek olarak Şekil 1'de görüldüğü gibi basit mesnetli kiriş gösterilebilir, diğer bir temel sistem de konsol kiriştir. Şekil 1'deki kirişin uçlarındaki destekler sayesinde rijit mod davranışları bulunmamaktadır ve eleman ucuna uygulanan temel kuvvetler q_1, q_2 ve q_3 etkisi altında eleman boyunca herhangi bir yerde eksenel kuvvet ve momentin kesin değeri hesaplanabilmektedir. Eleman yüklemesinin sadece uçlarda olduğu durumda eksenel yük ve moment aşağıdaki denklemle elde edilmektedir:

$$\boldsymbol{s}(x)=\begin{Bmatrix}N(x)\\M(x)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}q_1\\\left(\dfrac{x}{L}-1\right)q_2+\dfrac{x}{L}q_3\end{Bmatrix} \tag{1}$$



Şekil 1. Kiriş elemanı için temel kuvvet ve deplasmanlar

Eleman üzerinde eksenel ve dik düzgün yayılı yük olduğu durumda ise yukardaki denklem aşağıdaki gibi genişletilebilir:

$$\boldsymbol{s}(x)=\boldsymbol{b}(x)\boldsymbol{q}+\boldsymbol{s}_p(x) \tag{2}$$

burada $\boldsymbol{q}$ temel eleman kuvvetleri vektörü, $\boldsymbol{b}(x)$ kesit kuvvetleri ile temel kuvvetler $\boldsymbol{q}$ arasında transformasyon sağlayan kuvvet enterpolasyon fonksiyonu ve $\boldsymbol{s}_p(x)$ ise yayılı yükler w_x ve w_y'den kaynaklanan kısmi çözümdür ve tüm bunlar aşağıdaki denklemde sunulmuştur.

$$\boldsymbol{q}=\begin{Bmatrix}q_1\\q_2\\q_3\end{Bmatrix};\ \boldsymbol{b}(x)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & x/L-1 & x/L\end{bmatrix};\ \boldsymbol{s}_p(x)=\begin{bmatrix}L(1-x/L) & 0\\0 & L^2\left((x/L)^2-x/L\right)/2\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}w_x\\w_y\end{Bmatrix} \tag{3}$$

Virtüel kuvvetler prensibi, gerçek uç deplasmanlarıyla virtüel uç kuvvetlerinin çarpımının virtüel kesit kuvvetleriyle gerçek kesit deformasyonlarının çarpımının eleman boyunca entegrasyonu arasında eşitlik kurulmasını gerektirir. Bu eşitlik aşağıdaki denklemde gösterilmiştir;

$$\delta\boldsymbol{q}^T\boldsymbol{v}=\int_L\delta\boldsymbol{s}^T(x)\boldsymbol{e}(x)dx \tag{4}$$

burada kesit deformasyonları vektörü $\mathbf{e} = \left(\varepsilon_a \quad \kappa\right)^{\mathrm{T}}$ dır.

Yukarıdaki denkleme kesit enterpolasyon fonksiyonları katıldığı takdirde eleman uç kuvvetleri kesit deformasyonlarından aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\boldsymbol{v} = \int_L \boldsymbol{b}^T(x)\boldsymbol{e}(x)dx \tag{5}$$

Eleman esneklik matrisi $\boldsymbol{f}$ yukarıdaki denklemin eleman uç kuvvetlerine gore kısmi türevi alınarak elde edilebilir;

$$\boldsymbol{f} = \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{q}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\left[\int_L \boldsymbol{b}^T(x)\boldsymbol{e}(x)dx\right] = \int_L \boldsymbol{b}^T(x)\underbrace{\frac{\partial \boldsymbol{e}(x)}{\partial \boldsymbol{s}(x)}}_{\boldsymbol{f}_s(x)}\underbrace{\frac{\partial \boldsymbol{s}(x)}{\partial \boldsymbol{q}}}_{\boldsymbol{b}(x)}dx \tag{6}$$

burada $\boldsymbol{f}_s$ kesit esneklik matrisidir ve bu değer kesit rijitlik matrisinin tersi alınarak elde edilir.

Bu noktada eleman formülasyonunda sürekli entegraller diskritize edilecek ve yarı-rijit bağlantıların dahil edilmesiyle yukarıdaki denklemler aşağıdaki gibi elde edilecektir;

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_{Elem} + \boldsymbol{v}_{Con} \\ &\boldsymbol{v}_{Elem} = \sum_{i=1}^{nIP} \boldsymbol{b}^T(x_i)\boldsymbol{e}_i wIP_i \;; \text{ve } \boldsymbol{v}_{Con} = \sum_{i=1}^{nSC} \boldsymbol{b}^T(x_i)\Delta_{SC,i} \end{aligned} \tag{7}$$

burada *nIP* elemanın kesiti için alınan entegrasyon nokta sayısıdır, *nSC* eleman üzerindeki toplam yarı-rijit bağlantı adedidir; *wIP* her bir entegrasyon noktasının ağırlığı ve $\Delta_{SC} = [\delta \quad \theta]^T$ eksenel deformasyon ve dönmeden oluşan yarı-rijit bağlantıların deformasyon vektörüdür.

Benzer şekilde eleman esneklik matrisi de aşağıdaki gibi diskritize edilebilir:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{f} = \boldsymbol{f}_{Elem} + \boldsymbol{f}_{Con} \\ &\boldsymbol{f}_{Elem} = \sum_{i=1}^{nIP} \boldsymbol{b}^T(x_i)\boldsymbol{f}_{si}\boldsymbol{b}(x_i)wIP_i \quad \text{ve} \quad \boldsymbol{f}_{Con} = \sum_{i=1}^{nSC} \boldsymbol{b}^T(x_i)\boldsymbol{f}_{SC,i}\boldsymbol{b}(x_i) \end{aligned} \tag{8}$$

5 adet Gauss veya Gauss-Lobatto entegrasyon noktası (*nIP*) doğrusal olmayan davranışı yakalayabilmek için yeterli olmaktadır. Yarı-rijit bağlantıların tepkisinde, eksenel davranışın rijit kaldığı ve sadece dönme açısından esnekliğin olduğu varsayılmıştır. Böylece bağlantıların esneklik ve deformasyon denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\boldsymbol{f}_{Elem} = \sum_{i=1}^{nIP} \boldsymbol{b}^T(x_i)\boldsymbol{f}_{si}\boldsymbol{b}(x_i)wIP_i \quad \text{ve} \quad \boldsymbol{f}_{Con} = \sum_{i=1}^{nSC} \boldsymbol{b}^T(x_i)\boldsymbol{f}_{SC,i}\boldsymbol{b}(x_i) \tag{9}$$

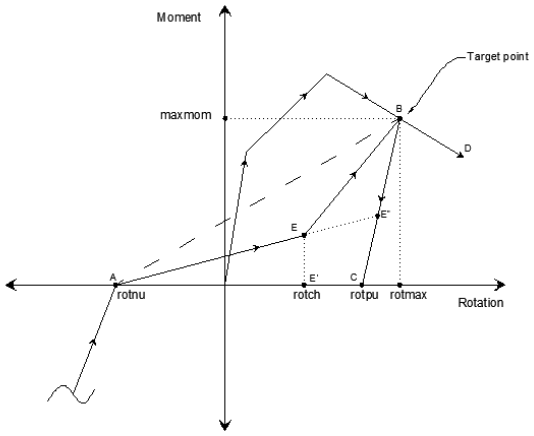
$$\boldsymbol{f}_{Con} = \sum_{i=1}^{nSC} \begin{bmatrix} 0 \\ x_i/L - 1 \\ x_i/L \end{bmatrix} \left[\frac{\partial M}{\partial \theta}\right]^{-1}_{SC,i} \begin{bmatrix} 0 & x_i/L - 1 & x_i/L \end{bmatrix} \tag{10}$$

Geliştirilen bu eleman, eleman tepkilerini yani tepki kuvveti ve rijitlik matrisini hesaplayabilmekte ve sonuç olarak kendisini standart bir sonlu elemanlar programına sanki deplasman bazlıymış gibi sunabilmektedir. Yani elemanın standart programların içinde çalışması hususunda herhangi bir uyumluluk sorunu bulunmamaktadır.

3. YARI-RİJİT BAĞLANTILAR İÇİN HİSTERETİK KESİT MODELİ

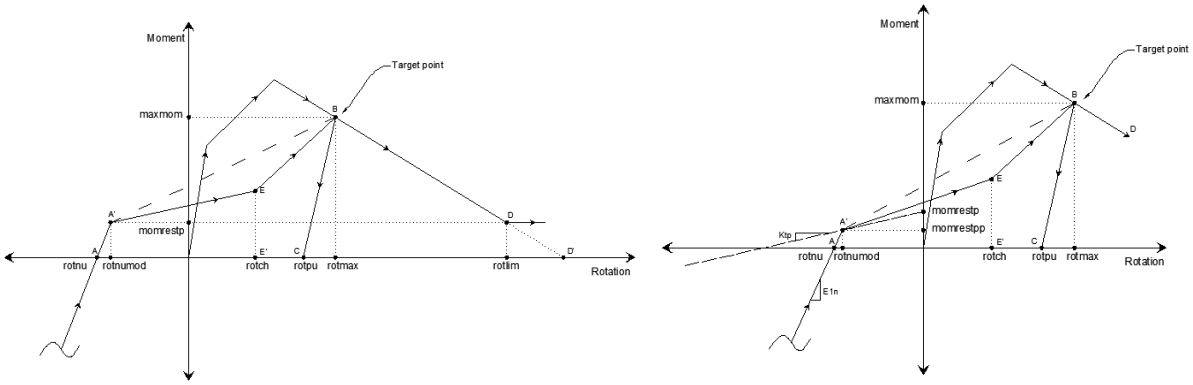
Çevrimsel yükler altında çelik bağlantıların davranışını dayanım ve rijitlik azalımı içeren döngülerle karakterize edilmesi mümkündür. Geneleksel olarak bu işlem için çok parametreli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Fakat bilhassa çevrimsel yükler altında malzeme ve geometrik doğrusal olmayan davranışlardan kaynaklanan daralma (pinching) gibi bazı özelliklerden dolayı bu bağlantıların davranışları oldukça karmaşıktır. Şu noktada vurgulanmalıdır ki farklı bağlantı tipleri için moment-dönme eğrileri türetebilmek için kullanılan bu çok parametreli modellerin parametrelerinin kalibre edilmesi de önem arzetmektedir.

Literatürde lineer, iki parça lineer, üç parça lineer ya da genelleştirmek gerekirse çok parça lineer ve lineer olmayan birçok matematiksel model mevcuttur. Fakat bahsedilen ilk iki model çevrimsel davranışın doğru bir şekilde yansıtılması açısından yetersizdir. Bu çalışmada dört parça lineer bir model türetimi gerçekleştirilmiştir. Seçilen model Fedeaslab ve OpenSees sonlu eleman programlarındaki üç parça lineer modeli esas almaktadır. Daha önceden mevcut olan modelin üç parça lineer sırt (backbone) eğrisi, yükleme-boşaltma ve daralma davranışları altında Şekil 2'de gösterilmektedir. Parçalı lineer modellerin başlangıç rijitliği, akma moment dayanımı ve en fazla taşınabilecek moment dayanımı değerleri deneysel verilerden ya da şartnamalerde ve literatürde sunulan yaklaşımlar kullanılarak teorik olarak da hesaplanabilir. Ayrıca deneysel testleri göz önüne getirdiğimizde yük boşaltma rijitliği (unloading stiffness) başlangıç rijitliğine eşit olarak alınabilir.



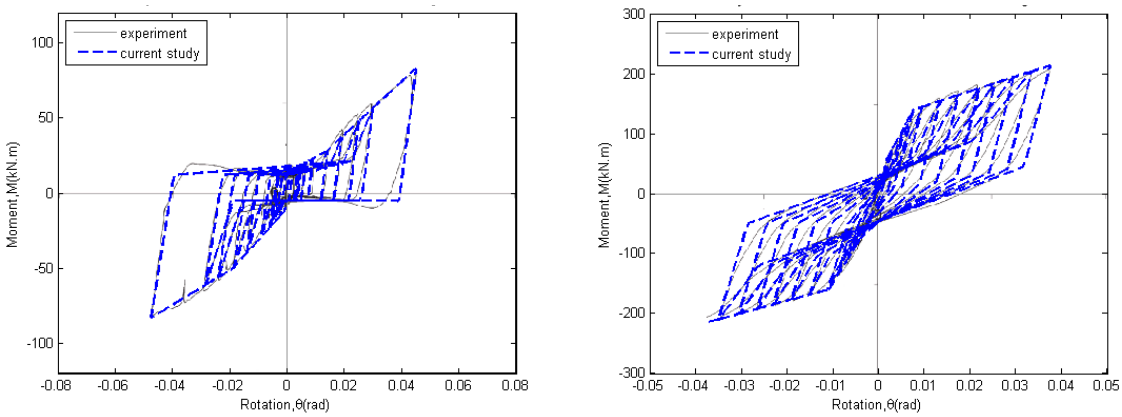
Şekil 2. Mevcut modelin davranışı

Bağlantıların artık moment kapasitesi ve daralma etkisini daha iyi yakalayabilmesi için mevcut modelin ilerletilmesi gerekmiştir. Bulonlu çelik bağlantılarda daralma bulon boşluğunun elipsleşmesine neden olan kalıcı deformasyondan kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu özelliğin belirgin olduğu deneylerde daralmadan kaynaklanan rijitlik azalmasının sıfırdan farklı bir moment değerinde başladığı görülmektedir. Bu yük boşaltma, rijitlik değerinin tekrar yükleme kısmında bir moment değerine ulaşana kadar aynı kaldığı anlamına gelmektedir. Bu moment değeri de artık moment olarak adlandırılmakta ve daralmanın başladığı noktayı belirlemekte kullanılmaktadır. Bu çalışmada yeni geliştirilen modelde bu artık momenti dolayısıyla daralmanın başladığı noktayı kullanıcı belirlemektedir. Bir başka deyişle, program algoritması dönme değeri bazlı olduğu için artık momentin ulaşıldığı dönme noktası (Şekil 3'teki A' noktası) daralmanın başladığı nokta olarak kabul edilmektedir. Ayrıca yükleme sırasında moment değerinin alabileceği minimum değer bu artık moment değeriyle kısıtlanmıştır. Bu kısıtlama da artık moment değerindeki dönme değerini, rotlim değeri (yani Şekil 3'teki D noktası) değeriyle algoritmaya katılmıştır.



Şekil 3. Geliştirilen bağlantının moment-dönme modeli

Bazı deneysel sonuçlarda yükleme döngüsü arttıkça artık moment değerinin de azaldığı gözlemlenmiş olduğu için mevcut modelde yükleme döngüsü genişledikçe belli bir eğimle artık moment değerini azaltan bir modifikasyon yapılmıştır. Bir başka deyişle artık moment değerinden çizilen ve eğimi kullanıcı tarafından girilen bir doğru çizilerek her yükleme döngüsünde bu doğru üzerinde yeni bir artık moment değeri belirlenmektedir (Şekil 3). Her döngüde değişen bu artık moment değeri de momrestpp değişkeniyle algoritmaya katılmıştır. Dikkat edilmesi gereken bir husus da bu değerin bazen negatif değer alabildiğidir ki bazı deney sonuçları bu durumu makul kılmaktadır (Şekil 4).



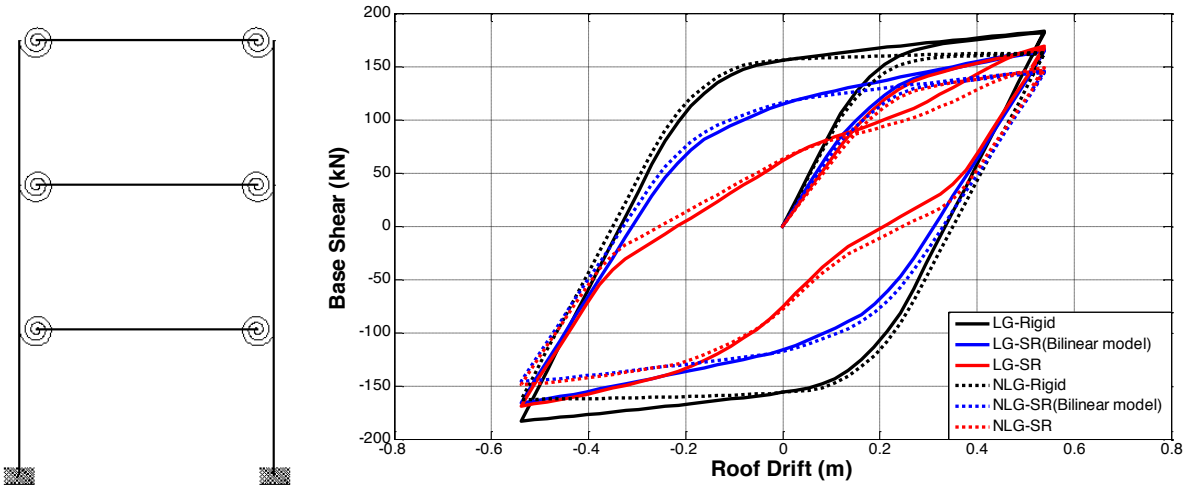
Şekil 4. Abolmaali vd. (2003) numunelerinin deneysel ve analitik kıyasının sonuçları
Sol Numune: DW-BB-127-13-16-114-5-610; Sağ Numune: DW-WB-152-19-19-191-5-610

Yukarıda sunulan modelin doğruluğu literatürdeki mevcut yarı-rijit bağlantıların deneysel sonuçlarıyla değerlendirilebilir. Bunun için Abolmaali v.d. (2003)'nin gerçekleştirdiği çalışma dikkate alınmıştır. Bahsi geçen çalışmada bulonlu-bulonlu ve kaynaklı-bulonlu çift L plaka gövde bağlantılı olmak üzere iki farklı tipte bağlantının testi gerçekleştirilmiştir. Bulonlu-bulonlu bağlantıda gövde bağlantı L plakaları hem kiriş gövdesine hem de kolon flanjına bulon ile bağlıyken kaynaklı-bulonlu bağlantıda L plakalar kiriş gövdesine kaynaklı ve kolon flanjına bulonludur. Daralmanın nedeni bu iki tip bağlantıda farklıdır. Bulonlu-bulonlu bağlantıda bulonların üzerindeki yüksek miktardaki kesme kuvveti kiriş gövdesindeki bulon deliklerinin elipsleşmesine sepep olmaktayken kaynaklı-bulonlu bağlantıda kolon flanjını L plakaya bağlayan bulonlar üzerindeki yüksek miktarda eksenel yük bulonların kalıcı uzama deformasyonu göstermesine sebep olmakta ve bu iki durum bağlantının moment-dönme eğrisinde daralma olarak görülmektedir. Şüphesiz L plaka, kiriş, kolon ve bulonların sağlamlıklarına ve bağlantı tipine gore hasar modları da farklılık gösterecektir. Örneğin bulonlu-bulonlu bağlantıda bulonlar gerekli sağlamlıktaysa hasar modu gövde yırtılması olacak kaynaklı-bulonlu bağlantıda kaynak çok sağlam olduğu için hasar modu L plakanın akması olacaktır. Bu çalışmada anılan makaleden 5 bulonlu-bulonlu ve 5 kaynaklı-bulonlu bağlantı deney numunesinin hepsi

bahsedilen bağlantı modeli ile başarıyla modellenebilmiştir; ancak bu makalede yer kısıtlığı sebebiyle sadece elde edilen iki sonuç gösterilmiştir (Şekil 4).

4. ÖRNEK ÇELİK ÇERÇEVE YAPININ GELİŞTİRİLEN MODELLER İLE ANALİZİ

Yarı-rijit bağlantılar içeren bahsedilen makro elemanın davranışını ve yarı-rijit bağlantıların yapıların çevrimsel davranışı üzerindeki etkisini görebilmek için Şekil 5'te gösterilen 3 katlı tek açıklıklı yapı modellenmiştir. Tüm kolonlar 3.6-m uzunlukta ve IPE330 kesitli ve tüm kirişler 6-m uzunlukta ve IPE300 kesitlidir. Böylelikle güçlü kolon-zayıf kiriş tasarım kriteri de sağlanmış olmaktadır. Tüm kolon ve kirişler için f_y=355 MPa E=200GPa ve E_h=0.01E değerlerine sahip iki parça lineer histeretik çelik malzeme modeli yayılı plastisiteyi yakalamak için elemen üstündeki kontrol kesitlerindeki malzeme noktalarında kullanılmıştır. Kesit tepkisinin elde edilmesinde fiber model kullanılmış ve kesit flanjlarının her biri 4 bölgeye ve gövdesi de 8 bölgeye ayrılmış ve orta entegrasyon kuralı ile kesit tepkisi elde edilmiştir. Eleman tepkisi ise eleman boyunca 5 Lobatto kontrol noktası kullanılarak hesaplanmıştır. Kirişlerin yarı-rijit bağlantılarında daralma davranışını bağlantının çevrimsel tepkisine dahil edebilmek için Şekil 4'teki DW-WB-152-19-19-191-5-610 numunesinin parametreleri kullanılmıştır. Seçilen bağlantının dönme başlangıç rijitliği 30670 kN.m/rad alınmıştır. Böylelikle yarı-rijit bağlantı tanımına uyabilmek için gerekli olan bağlantının başlangıç rijitliğinin kirişin eğilme rijitliğine oranının 2 den büyük ve 20 den küçük olması şartı $\left(2 < a = R_{ki} \times \left(L/EI\right)_{kiriş} \cong 11 < 20\right)$ sağlanmıştır. Yarı-rijit bağlantı modeli olarak 3.Kısım'da sunulan model ve ayrıca alternatif olarak iki parça lineer model kullanılmıştır. İki parça lineer modelde daralma etkisi bulunmamakta ve bu sebeple daralma etkisinin bu karşılaştırma sonucu yapının tepkisi üstündeki etkisini de incelemek mümkün olacaktır.



Şekil 5. Yarı-rijit bağlantı, daralma ve doğrusal olmayan geometrinin yapı tepkisine etkisi

Yükleme için çatı seviyesinde 0.5 metrelik tersinir bir deplasman uygulanmıştır. Yarı-rijitlik, linear olmayan geometri ve daralma etkilerini göstermek bakımından 6 farklı analiz yapılmıştır: doğrusal geometrili ve rijit bağlantı; doğrusal olmayan geometrili ve rijit bağlantı; doğrusal geometrili ve geliştirilen yarı-rijit bağlantı modeli; doğrusal olmayan geometrili ve yarı-rijit bağlantı modeli; doğrusal geometrili ve iki parça lineer yarı-rijit bağlantı modeli; doğrusal olmayan geometrili ve iki parça lineer yarı-rijit bağlantı modeli. Tüm analizlerde elemanlar boyunca yayılı plastisitenin varlığı dikkate alınmıştır. Şekil 5'te gösterilen analiz sonuçları yarı-rijit bağlantıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının yapı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Ayrıca iki parça lineer daralma etkisiz yarı-rijit bağlantı modeli ile dört parça lineer daralma etkili yarı-rijit bağlantı modelinin tepkileri arasında önemli miktarda enerji soğurma farkı da dikkat

çekmektedir. Bu tür tepki farkının doğru olarak modellenmesinin deprem titreşimine maruz kalmış bir yapının simüle edilen tepkisi üstünde çok daha farklı sonuçlar oluşturabileceğinin açık göstergesidir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada kuvvet bazlı formülasyona dayalı ve yarı-rijit bağlantılar içeren bir kiriş elemanı geliştirilmiştir. Bu elemanla yarı-rijit bağlantılara sahip bir kiriş deplasman bazlı elemanlara kıyasla daha az serbestlik derecesiyle analiz edilebilmektedir. Ayrıca bu elemanla kiriş açıklığı üzerinde oluşan plastisiteyi de analize katabilmek mümkündür. Bağlantılar geliştirilen makro eleman üzerinde herhangi bir yerde ve çok sayıda bulunabilir.

Bu çalışmanın bir parçası olarak yarı-rijit bağlantıların periyodik davranışlarını daha gerçekçi modelleyebilmek için histeretik bir model geliştirilmiştir. Daralma ve artık moment gibi önemli fiziksel etkilerin modele katılmasıyla deneysel moment-dönme eğrilerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen bu bağlantı modeli kolaylıkla geliştirilen makro kiriş elemanına dahil edilebilmekte ve bu elemanla daha gerçekçi bir yapı analizi yapılabilmektedir.

Yarı-rijit bağlantı modelinin rijit modele kıyasla yapının yanal rijitliği üzerindeki etkisi görülmüştür. Yarı-rijit bağlantı modeli yapının yanal rijitliğini azaltmıştır. Daralma özelliğine sahip yarı-rijit bağlantı modeli ve daralma etkisini ihmal eden iki parça lineer bağlantı modeli ile yapılan analiz sonuçları da daralma etkisinin yapının enerji soğurma kapasitesi üzerindeki etkisini göstermiştir. Yarı-rijit bağlantıların moment-dönme eğrilerindeki daralmanın yapının enerji soğurma kapasitesini önemli ölçüde azalttığı dolayısıyla bu etkinin deprem yükü altındaki yapı analizine katılma gerekliliği gözlemlenmiştir. Son olarak doğrusal olmayan geometrinin her bir analiz durumunda yapının yumuşamasına sebep olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Lui, E.M. ve Chen, W.F. (1986). Analysis and behaviour of flexibly-jointed frames. *Engineering Structures*, **8:2**, 107-118.

Sekulovic, M. and Salatic, R. (2001), Nonlinear analysis of frames with flexible connections. *Computers and Structures*, **79-11**, 1097-1107.

Sekulovic, M., Salatic, R., and Nefovska, M. (2002), Dynamic analysis of steel frames with flexible connections. *Computers and Structures*, **80-11**, 935-955.

Kishi, N., Chen, W.F., Goto, Y., and Matsuoka, K.G. (1993), Design aid of semi-rigid connections for frame analysis. *Engineering Journal*, **30-3**, 90-107.

Valipour, H.R. and Bradford, M. (2012), An efficient compound-element for potential progressive collapse analysis of steel frames with semi-rigid connections. *Finite Elements in Analysis and Design*, **60**, 35-48.

Saritas, A. and Soydas, O. (2012), Variational base and solution strategies for non-linear force-based beam finite elements. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **47-3**, 54-64.

Abolmaali, A., Kukreti, A.R., and Razavi, H. (2003), Hysteresis behavior of semi-rigid double web angle steel connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **59-8**, 1057-1082.