İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAKLI ÇELİK I VE KUTU KESİTLİ KOLON - I KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN PLASTİK DÖNME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkan POLAT

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. B.Özden ÇAĞLAYAN

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYNAKLI ÇELİK I VE KUTU KESİTLİ KOLON - I KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN PLASTİK DÖNME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkan POAT
(501051046)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. B.Özden ÇAĞLAYAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Filiz PİROĞLU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Fevzi DANSIK (M.Sinan Ü.)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Çalışmamda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Özden ÇAĞLAYAN'a, ve bu süreçte bana sabır ve anlayış gösteren aileme, iş yerinde genel müdürümüz Tayfur ÖZTÜRK'e, proje müdürümüz Selim ÖZTÜRK'e, ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2009 Erkan POLAT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
KISALTMALAR ..... **v**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
ÖZET **1**
SUMMARY **3**
1. GİRİŞ **5**
1.1 Tezin Amacı 6
1.2 Literatür Özeti 6
2. GENEL BİLGİ **8**
2.1 Çelik Yapılar 8
3. NORTHRIDGE DEPREMİ ÖNCESİ VE SONRASI KULLANILAN BİRLEŞİMLER **11**
3.1 Northridge Öncesi Birleşimler 11
3.1.1 Başlığı kaynaklı – Gövdesi bulonlu Birleşim 11
3.2 Northridge Sonrası Birleşimler 15
3.3 Northridge Depreminden Sonra Yapılan Çalışmalar 17
4. BİRLEŞİM TİPLERİ **20**
4.1 Kaynaklı Birleşim Tipleri 20
4.1.1 Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim 20
4.1.2 Zayıflatılmış kiriş en kesitli kaynaklı birleşim 21
4.1.3 Ek başlık levhalı birleşim kaynaklı birleşim 21
4.1.4 Serbest başlıklı kaynaklı birleşim 22
4.2 Bulonlu - Kaynaklı Birleşim Tipleri 22
4.2.1 Başlığı kaynaklı gövdesi bulonlu birleşim 22
4.3 Kaynaklı Kutu Kolon – I Kiriş Birleşim Tipleri 23
4.3.1 Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim 23
4.3.2 Dıştan süreklilik levalı kaynaklı birleşim 24
4.3.3 Ek berkitmeli kaynaklı birleşim 24
5. DÖNME KAPASİTESİ **26**
5.1 Toplam Dönme 26
5.2 Plastik Dönme 26
5.3 Dönme Kapasiteleri 27
5.3.1 FEMA' ya göre dönme kapasiteleri 27
5.3.2 TDY 2007' ye göre dönme kapasiteleri 29
6. SÜNEKLİK **31**
7. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ **35**
7.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri 36
7.2 Sonlu Eleman Tipleri 39

7.2.1 Tek boyutlu elemanlar 39
7.2.2 İki boyutlu elemanlar 39
7.2.3 Dönel elemanlar 39
7.2.4 Üç boyutlu elemanlar 40
7.2.4.1 Üçgen piramitli tane tipi 40
7.2.4.2 Dikdörtgenler prizmalı tane tipi 40
8. MODELLEME 41
8.1 Kaynaklı I Kolon - I Kiriş Birleşimleri 41
8.2 Kaynaklı Kutu Kolon - I Kiriş Birleşimleri 42
8.3 Kaynaklı Kutu Kolon - I Kiriş Birleşimleri 43
8.4 Malzeme Tanımı 44
8.5 Test Düzeneği 46
8.5.1 FEMA'ya göre test düzeneği 46
8.5.2 TDY 2007'ye göre test düzeneği 47
8.6 Kaynak Ulaşım Deliği ve Ön Kusur 48
8.6.1 Kaynak ulaşım deliği 48
8.6.2 Ön kusur 50
8.7 Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi 52
9. I KOLON – I KİRİŞ BİRLEŞİM ANALİZLERİ 53
9.1 FEMA' ya Göre Yapılan Analizler 53
9.2 TDY 2007'ye Göre Yapılan Analizler 58
10. KUTU KOLON – I KİRİŞ BİRLEŞİM ANALİZLERİ 68
10.1 FEMA'ya Göre Yapılan Analizler 72
10.2 TDY 2007'ye Göre Yapılan Analizler 79
11. SONUÇLAR 81
11.1 Konsol Test Düzeneği İle Çerçeve Test Düzeneğinin Sonuçlarının Karşılaştırılması 81
11.2 Plastik Mafsalın Yeri 84
KAYNAKLAR 85
ÖZGEÇMİŞ 87

KISALTMALAR

TDY 2007 : 2007 Türk Deprem Yönetmeliği
FEMA : Federal Emergency Management Agency
SAC : Seismic Design Criteria for Steel Moment Frame Construction
AISC :American Institute of Steel Construction
AISI : American Iron and Steel Institute
AWS : American Welding Society
NIST : National Institute of Standarts and Technology

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : FEMA yükleme protokolü.....28
Çizelge 5.2 : FEMA dönme açıları.....29
Çizelge 5.3 : Plastik dönme açıları.....29

Çizelge 8.1 : Modellemede kullanılacak kolon ve kiriş boyutları.....43
Çizelge 8.2 : Kaynak Ulaşım Deliği Boyutları.....50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Northridge depremi öncesinde kullanılan tipik birleşim 11
Şekil 3.2 : Tam moment aktaran birleşimde yapılan ilk deneylerden elde edilen tipik moment-dönme davranışı..... 12
Şekil 3.3 : 1988'de yapılan deneyden elde edilen Kuvvet-Plastik Dönme Diyagramı 14
Şekil 3.4 : Kiriş-kolon birleşimindeki tipik çatlak başlangıç bölgesi 17

Şekil 4.1 : Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim 20
Şekil 4.2 : Zayıflatılmış kiriş en kesitli kaynaklı birleşim..... 21
Şekil 4.3 : Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim..... 21
Şekil 4.4 : Serbest başlıklı kaynaklı birleşim..... 22
Şekil 4.5 : Başlığı kaynaklı gövdesi bulonlu birleşim..... 22
Şekil 4.6 : Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim 23
Şekil 4.7 : Dıştan süreklilik levhalı kaynaklı birleşim 24
Şekil 4.8 : Ek berkitmeli kaynaklı birleşim 24

Şekil 5.1 : Toplam dönmenin ölçülmesi..... 26
Şekil 5.2 : Plastik dönmenin ölçülmesi 27
Şekil 5.3 : FEMA'nın tanımladığı dönme açısı 28
Şekil 5.4 : TDY 2007'nin tanımladığı göreli kat ötelemesi açısı..... 30

Şekil 6.1 : Süneklik 31
Şekil 6.2 : Çeliğin kristal yapısında olan değişme sonucu sünekliğin oluşması, daha yoğun ve akma yönünde çentikli kristal yapı 32
Şekil 6.3 : Gerilme-Deformasyon eğrisi ve pekleşme..... 32
Şekil 6.4 : Tabakalı yırtılma çatlağı 33

Şekil 7.1 : Eksenel kuvvete maruz ankastre çubuk 37
Şekil 7.2 : Ankastre çubuğun sonlu elemanlara ayrılması..... 37
Şekil 7.3 : Çubuktaki SEM metodu ile hesaplanan ve gerçek olan gerilmeler..... 38
Şekil 7.4 : Lineer tetrahedran (4 düğüm noktalı) ve Parabolik tetrahedran (10 düğüm noktalı) 40
Şekil 7.5 : Lineer hegzagonan (8 düğüm noktalı) ve Parabolik hegzagonan (20 düğüm noktalı) 40

Şekil 8.1 : Kaynaklı I Kolon – I Kiriş Birleşimleri 41
Şekil 8.2 : Northridge depremi sonrası yapılan testlerde kiriş başlık kaynağında görülen kırılma 42
Şekil 8.3 : Ek berkitmeli kaynaklı birleşim 42
Şekil 8.4 : Gerilme – Şekildeğiştirme eğrisi tanımı 44
Şekil 8.5 : İdeal Elasto-Plastik Malzeme..... 45

Şekil 8.6 : St37 Malzeme için Gerilme –Deformasyon Eğrisi 45
Şekil 8.7 : SAC test düzeneği 46
Şekil 8.8 : TDY 2007'ye göre yapılacak test düzeneği..... 47
Şekil 8.9 : Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı Birleşim 48
Şekil 8.10 : Kaynak Ulaşım Deliği Detayı 49
Şekil 8.11 : Ön kusur..... 51
Şekil 8.12 : Katı (solid) model..... 51
Şekil 8.13 : Örnek sonlu elemanlar modellemesi 52

Şekil 9.1 : FEMA modelinin sonlu elemanlara bölünmüş durumu 53
Şekil 9.2 : Birleşim 1 Akma bölgesi 54
Şekil 9.3 : Birleşim 2 Akma bölgesi 54
Şekil 9.4 : Birleşim 1 toplam dönme..... 55
Şekil 9.5 : Birleşim 1 plastik dönme 55
Şekil 9.6 : Birleşim 2 toplam dönme..... 56
Şekil 9.7 : Birleşim 2 plastik dönme 56
Şekil 9.8 : Ankastre mesnetli çerçeve sistem 58
Şekil 9.9 : Mafsallı mesnetli çerçeve sistem 58
Şekil 9.10 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 1 akma bölgesi 59
Şekil 9.11 : Ankastre mesnetli çerçevede akma bölgeleri genel görünüm..... 59
Şekil 9.12 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 1 göreli kat – plastik dönme grafiği 60
Şekil 9.13 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 1 akma bölgesi..... 60
Şekil 9.14 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 1 göreli kat – plastik dönme grafiği 61
Şekil 9.15 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 2 akma bölgesi 62
Şekil 9.16 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği 62
Şekil 9.17 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 2 akma bölgesi..... 63
Şekil 9.18 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği 63
Şekil 9.19 : Mafsallı yarım kat çerçeve model 64
Şekil 9.20 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 1 akma bölgesi..... 65
Şekil 9.21 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği..... 65
Şekil 9.22 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 2 akma bölgesi..... 66
Şekil 9.23 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği..... 67

Şekil 10.1 : Uygulamada sık görülen hatalı birleşim detayları..... 68
Şekil 10.2 : Kutu Kolonlarda uygulanacak birleşim detayı..... 69
Şekil 10.3 : N.E. Shanmugam tarafından test edilen birleşim. [9] 69
Şekil 10.4 : N.E. Shanmugam tarafından test edilen birleşimin Moment - Toplam Dönme Eğrisi [8]..... 70
Şekil 10.5 : Test sonucunda kiriş başlıklarında kırılma. (yırtılma) [8]..... 70
Şekil 10.6 : Birleşim 4 için Sonlu Elemanlar Modeli 71
Şekil 10.7 : Birleşim 4 Kiriş başlığında gerilme dağılımı ve akma bölgesi (t/cm^2) 72
Şekil 10.8 : Birleşim 4 Toplam dönme 72
Şekil 10.9 : Birleşim 4 Plastik dönme..... 73

Şekil 10.10 : Birleşim 4 Pik gerilmeler 74
Şekil 10.11 : Gerilme dağılımını homojenleştirecek ek levha 74
Şekil 10.12 : Ek levhalı Birleşim 4 Gerilme dağılımı 75
Şekil 10.13 : Ek levhalı Birleşim 4 Akma bölgesi 75
Şekil 10.14 : Ek levhalı Birleşim 4 Toplam dönme 76
Şekil 10.15 : Ek levhalı Birleşim 4 Plastik dönme 76
Şekil 10.16 : Ek levhalı Birleşim 3 Akma bölgesi 77
Şekil 10.17 : Ek levhalı Birleşim 3 Pik gerilmeler 77
Şekil 10.18 : Ek levhalı Birleşim 3 Toplam dönme 78
Şekil 10.19 : Ek levhalı Birleşim 3 Plastik dönme 78
Şekil 10.20 : Ek levhalı Birleşim 3 Akma bölgesi 79
Şekil 10.21 : Ek levhalı Birleşim 3 Plastik dönme 79
Şekil 10.22 : Ek levhalı Birleşim 4 Akma bölgesi 80
Şekil 10.23 : Ek levhalı Birleşim 4 Plastik dönme 80

Şekil 11.1 : Birleşim 1 Plastik dönme karşılaştırması 82
Şekil 11.2 : Birleşim 2 Plastik dönme karşılaştırması 82
Şekil 11.3 : Birleşim 3 Plastik dönme karşılaştırması 83
Şekil 11.4 : Birleşim 4 Plastik dönme karşılaştırması 83
Şekil 11.5 : Kutu Kolon – I Kiriş Birleşimlerinde boyutlar 84

KAYNAKLI ÇELİK I VE KUTU KESİTLİ KOLON - I KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN PLASTİK DÖNME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

1994'de Northridge depreminden sonra önerilen birleşim tipleri üzerinde yapılan çalışmalar, uygun birleşim tipleri kullanıldığında, birleşimlerin 0.03 radyan plastik dönme kapasitesine sahip olduğunu gösterdi. Bu kapasite, birleşimde kullanılan kolon-kiriş en kesitleri, birleşimi oluşturan kolon ve kiriş dışındaki diğer elemanlara da bağlı olduğundan, herhangi bir birleşimin, yapıda kullanılabilmesi için bu dönmeyi sağladığı ya gerçek boyutlu bir laboratuar deneyi ile ya da bir sonlu elemanlar programı ile gösterilmelidir. Gerçek boyutlu deney yapmanın maliyeti yüksek olduğundan teze konu olan birleşimler, COSMOS programı ile modellenip NASTRAN Sonlu Elemanlar Modülü ile analiz edildi. İlk olarak standartlarda yer alan ve test edilmiş olan I kesitli kolon ve I kesitli kirişlerden oluşan kaynaklı bir birleşimin modellemesi yapılarak daha önce bulunan dönme kapasitelerinin bu programda da elde edilebildiği ve programın St37 malzemeli birleşimler içinde doğru sonuç verdiği ispatlandı. Daha sonra bu birleşimler TDY 2007 'nin tanımladığı göreli kat açısını sağlayıp sağlamadığına bakıldı. Ayrıca, kutu kolonların kirişlerle birleşiminde sık rastlanan ve çoğu zaman zorluğu nedeni ile yapılamayan, hatta dışarıdan gözle görülememesi nedeni ile de kontrolü zor olan süreklilik levhalarının daha basit ve kontrolü daha kolay olan bir birleşim detayı haline getirilmesini amaçlandı. Literatür araştırası yapılarak kutu kesitli kolonla I kesitli kiriş birleşimleri incelenip, yeni bir birleşim modeli üzerinde analiz yapılıp standartlara uygun olduğu ortaya konuldu.

DEFINING THE PLASTIC ROTATION CAPACITY OF WELDED JOINT BETWEEN THE STEEL I AND BOX COLUMNS & I BEAMS

SUMMARY

The studies about the joint types proposed after the 1994 Northridge earthquake indicated 0.03 radian of plastic rotation capacity when appropriate joint types are used. In order to use any joint in a structure which enables this rotation, it should be proved either with a real dimensioned laboratory test or a finite elements program since this capacity depends on the cross-sections of the columns and beams as well as the other elements used in the joint.The joints which are the subject of this thesis are modelled with the program COSMOS and analysed with NASTRAN Finite Elements Module since doing a real dimensioned laboratory test is a high-cost. First of all, the same rotation capacities which were found before are also obtained with this program and it is proved that the program provides the accurate results for joints with St37 materials by modelling a welded joint of standardized and tested I column and I beam. Afterwards it is analyzed if these joints ensure the relative floor angle stated in TDY 2007. Additionally it is aimed to propose a simpler and easily controlled joint design for continuity plates which are common in box column and beam connections but not easily produced many times in addition to the controlling difficulty as a result of it being invisible from the outside. The joint of box column and I beam is explored through literature research and a new joint model is analyzed which also ensured the requirements of standards.

1. GİRİŞ

Amerika'da 1994 yılında meydana gelen Northridge depreminden sonra çelik malzemesine sünekliliğinden dolayı olan kayıtsız şartsız güvenin, uygun birleşim detayı ve tasarım yapılmadan haklı olmadığı ortaya çıktı. Yani detaylandırma ve boyutlandırma doğru yapılmadığı takdirde yapının gevrek göçmeye maruz kalabileceği anlaşıldı. Bu gevrek göçmenin sebebi, kaynak bölgesinden kolon ve kiriş başlıklarına doğru olan çatlaklardır. Bu çatlaklar bir kez oluştuktan sonra kolon-kiriş birleşimi büyük eğilme rijitliği kaybına uğrar. Bu hasarların tespitinden sonra yapılan çalışmalar sonunda geliştirilmiş kaynak elektrotu, kaynak ulaşım deliği detayı ve birleşim tipleri önerildi.

Yapılarda süneklik şartları, yönetmeliklerde, elemanların kesit şekillerine göre düzenlenmiş en kesit koşulları ve birleşimdeki elemanların moment-kesme kapasitelerine göre düzenlemiş bir takım kontrollerle sağlanmaktadır. Deprem kuvvetlerinden gelen momentleri taşıması beklenen çelik çerçevelerin kaynaklı kolon-kiriş birleşim yerlerinin deprem dayanımı açısından "düktil ve yeterli dayanımda" kabul edilmesi için getirilmiş kıstas, birleşimin eğilme momenti taşıma gücünde en çok %20 azalma ile 0.03 radyan plastik dönmenin sağlanmasıdır.

Depreme dayanıklı yapı sık olan "küçük" depremlerde elastik bölgede ve kullanılabilir durumda davranmalı "büyük" depremlerde ise yıkılmadan ve can kaybına yol açmadan büyük elastik ötesi şekil değiştirmeler yapabilmelidir. Çelik yapılar düşük düzeyde yatay kuvvetlere elastik olarak karşı koyacak biçimde tasarlanırlar. Çünkü çelik yapıların büyük miktarda elastik ötesi şekil değiştirme güçlerinin, sünekliğinin, olduğu varsayılır.

Çelik yapıların ülkemizde uygulaması artarken standartlarda önerilen malzemeler ülkemizde kullanılan malzemelerden daha yüksek kalitede kalmaktadır. Bununla

birlikte bu fark test edilmemiş önemli belirsizlikleri ortaya çıkarmaktadır. Tezimize konu olan bu belirsizliklerden biri çelik kolon-kiriş birleşimlerinin st37 malzeme için yönetmeliklerde belirtilen 0.03 radyan dönme açışını sağlayıp sağlayamadığıdır

Bahsedilen 0.03 radyan plastik dönme kapasitesi, birleşimde kullanılan kolon-kiriş en kesitlerine de bağlı olduğundan, herhangi bir birleşimin, yapıda kullanılabilmesi için bu dönmeyi sağladığı ya gerçek boyutlu bir laboratuar deneyi ile ya da bir sonlu elemanlar programı ile gösterilmelidir.

Normalde en iyi sonucu gerçek boyutlu deneysel çalışmalar verebilmesine rağmen, teze konu olan çalışmamız, maliyeti yüksek olan laboratuar deneyleri yerine gerçekte uygulanan yüklerin uygulanabildiği COSMOS programı ile modellenip NASTRAN Sonlu Elemanlar Modülü ile analiz edildi. COSMOS program sayesinde model gerçek boyutları ile girilip, yine gerçekte uygulanması gereken yükler etkitilebilmektedir. Model daha sonra sonlu elemanlara bölünerek verilen gerilme-şekil değiştirme eğrisine göre gerilme ve deplasmanlar hesaplanmaktadır. Nastran ise, parça teması, lineer olmayan malzeme ve/veya geometri (büyük deformasyonlar) gibi lineer olmayan davranış gösteren sonlu eleman problemlerin analizleri için gerekli olan yetileri sağlar.

1.1 Tezin Amacı

I ve kutu kesitli kolon – I kiriş birleşimlerinin FEMA ve TDY 2007' ye göre sonlu elemanlar programı ile analiz edilip plastik dönme kapasitelerinin belirlenmesi.

1.2 Literatür Özeti

I Kolon – I Kiriş birleşimleri için daha önce bir çok analiz ve deney yapılmış yönetmeliklerde de uygun birleşim tipleri yayınlanmıştır. Fakat bu birleşimlerin testleri konsol kiriş test düzeneği üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada birleşimler çerçevenin bir parçası olarak da incelenecektir.

Kutu kesitli kolon – I kiriş birleşimleri için bu sayı oldukça azdır.Bunlardan bir kaçını şöyle sıralayabiliriz.

- Experimental Studies of Wide Flange Beam to Square Concrete-Filled Tube Column Joints with Stiffening Plates Around the Column. J. W. Park; S. M. Kang; ve S. C. Yang (2005)
- Welded Interror Box- Column To I-Beam Connections. N.E. Shanmugam and L.C. Ting (1995)
- Effectiveness of External Stiffeners Compared with Internal ones in I-Beam to Box- Column Moment Connections. Chen and Lin (1990
- Investigate Tehe Behavior of Connections Between Square Tubes. White and Fang (1965)

N.E. Shanmugam and L.C. Ting (1995) 'in kutu kolon – I kiriş için yaptığı model üzerinde durulacak ve çerçeve model üzerinde de test edilecek.

2. GENEL BİLGİ

2.1 Çelik Yapılar

Demir malzemenin kullanımı çok eski devirlere dayanmasına rağmen, yapı malzemesi olarak kullanımı 18.yüzyılda İngiltere'de ortaya çıkmıştır. Çelik yapı terimi ise 20. yüzyıl başında kaynaklı birleşimlerin uygulama alanına girmesiyle ortaya çıkmıştır. Hal konstrüksiyonu, karkas yapı ve köprü olarak çelik malzeme günümüzde yaygın şekilde kullanılır. Günümüzde gerek içerisinde kolon bulundurmayan büyük açıklıklı binalara, gerekse büyük yerleşim yerlerinde belirli merkezlerde toplanan yoğun insan kütlesini barındıracak çok katlı binalara olan ihtiyaç; bu binalara taşıyıcı iskelelerinde yüksek dayanımlı malzeme kullanma zorunluluğu getirmektedir. Ayrıca, depreme dayanım açısından da malzemenin yüksek dayanımdan başka sünek olması da istenir. Büyük açıklıklı ve çok katlı betonarme taşıyıcı sistem kullanılması halinde esas taşıyıcı elemanlara etkiyen kesit tesirlerinin büyüklüğü, çok büyük betonarme kesitlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Binalarda büyük kesitli kolon ve kirişler fazla yer kaplamakta, dolayısıyla bina öz ağırlığının artmasına ve ayrıca maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle çeliğin kullanılması ihtiyacı oraya çıkmaktadır. Böylece, büyük açıklıkların daha küçük kesitli taşıyıcı elemanlarla aşılması sayesinde rahat hacimler sağlanmış olacak ve nüfus yoğunluğu fazla olan yerleşim merkezlerinde çok katlı bina yapılarak ihtiyaçlar karşılanmış olacaktır. Günümüzde çok katlı çelik çerçeveli konut, işyeri, hastane, otel vb. binaların yaygın olarak bulunmamasına, betonarme yapılardan daha pahalı oldukları savı gerekçe gösterilmektedir. Ancak; çelik çerçeveli yapılar, %50'ye ulaşan hafiflikleri, azalan deprem yükleri ile birlikte taşıyıcı sistem ve temel boyutlarının da küçülmesini sağladığından yararlıdır. Yüksek dayanımı nedeniyle öz ağırlığının taşıdığı yararlı yüke oranı küçüktür ve montajı tamamlandığı anda tam yükle çalışabilme özelliği vardır. Yapı çeliği, homojen, izotrop ve sürekli denetlenerek üretildiğinden güvenli bir malzemedir. Sünek bir malzemedir. Ayrıca, çeliğin mimari özgürlük, narinlik, çok katlı bina yapılabilirliği,

depreme dayanıklılık, hızlı yapı üretimi, ekonomi, değişim, dönüşüm gibi önemli avantajları da vardır.

ABD, Japonya, Almanya, İngiltere, İsveç, İspanya, Fransa ve Finlandiya gibi gelişmiş ve daha çok deprem bölgelerinde bulunan ülkelerde yapı çeliği kullanımının önemli oranlara ulaştığı görülmektedir. Ülkemizde yapısal çeliğin kullanım alanları; demiryolu köprüleri, cebri borular, baraj kapakları ve endüstriyel yapılar ile sınırlı kalmıştır. Bu tür yapılarda bile çeliğin sunduğu olanaklardan yeterince yararlanılmadığı gözlenmektedir. Beklentileri karşılayabilmek ve teknolojiyi yakalayabilmek için, kalifiye işçilerin ve bu konuda çalışan projecilerin az olması gibi caydırıcı sebeplere rağmen çelik kullanımını artırmaya, ufku açık bireyler yetişmenin de önünü açmaya yönelik çalışmalar yapmak isteyen araştırmacılar bulunmaktadır.

Temel esaslardan biri olan doğru analizin yanı sıra malzeme seçiminde etken olarak, mimari, işlevsel katkılar, yapım süresi ve rekabet gücü gibi tasarıma dair özellikler söz konusudur. Bu noktada çelik malzeme, yapı tasarımı aşamasında özellikle detaylandırma ve uygulama konusunda proje yapan mühendislere değişik seçenekler sunmaktadır. İlerleyen teknoloji ve beyin gücü ile en zorlu uygulamalar bile hayata geçirilebilmektedir. Bu sürecin projelendirme aşamasında çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır.

Genel olarak tasarım, işlevsel tasarım ve taşıyıcı sistemin tasarımı olmak üzere iki bölümde düşünülebilir. İşlevsel tasarımda iç ve dış mimari göz önünde tutulur; taşıyıcı sistemin tasarımında ise işletme yüklerini güvenle taşıyacak elemanların seçimi gerekir. Tasarımın adımları, planlama, ön tasarım, yüklerin saptanması, ön boyutlandırma, analiz (yüklerin ve sistemin modellenmesi, iç kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin saptanması), değerlendirme (dayanım ve işletme koşullarının kontrolü; sonucun optimum tasarım kriterleriyle uyumunun belirlenmesi), gerekiyorsa yeniden tasarım ve sonuç şeklinde özetlenebilir.

Son yıllarda dünyada çelik yapılarda teorik ve pratik olarak önemli ilerlemeler olmuştur. Mesela northridge depremi sonrası sünek çelik yapı tasarımı konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Çeliğin kompozit olarak kullanımı gündeme gelmiştir ve çoğu yapıda bu kullanımın daha ekonomik sonuçlar doğurduğu ortaya

çıkmıştır. Çeşitli şekillerde çelik yapılar rijitlik yönünden incelenmiştir. Depreme dayanıklı çelik yapı tasarımında kiriş-kolon birleşimlerinin davranışı incelenmiştir.

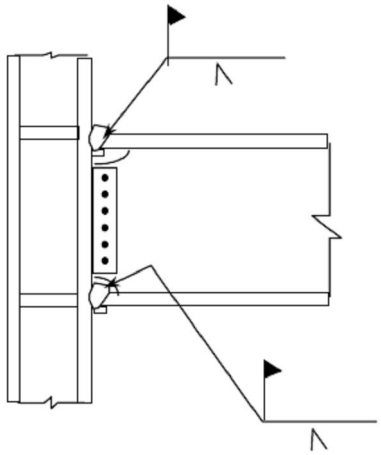
3. NORTHRIDGE DEPREMİ ÖNCESİ VE SONRASI KULLANILAN BİRLEŞİMLER

3.1 Northridge Öncesi Birleşimler

Yıllarca yönetmelikler, yapıların şiddetli yer sarsıntılarına karşı olası yapısal hasarlar almasına rağmen göçmeden dayanmalarını sağlamak hedefinde idiler. Bunu başarmak için modern yönetmeliklerin yapısında olan ilk prensip, sünekliğe sahip olan, yapı konfigürasyonlarını, yapısal sistemleri, malzeme ve detayları önermektir. Böyle bir yapı dayanımında önemli azalmalar görülmeden ve stabilite kaybı ve göçme başlamadan, büyük elastik olmayan deformasyon yapabilen sünek davranış gösteren bir yapıdır. Yönetmeliklerce özel yapısal sistemler için belirtilen dizayn yükleri, elde edilen bilgiler ışığında, süneklik miktarına bağlıdır. Yapıların sünekliğinin bir gereksinimi de birleşimlerin yeterli kapasiteye sahip olması ve yükleri güvenli bir şekilde aktarmasıdır. Northridge depremi öncesine kadar tasarlanan birleşimlerin yeterli kapasiteye sahip olduğuna inanılıyordu. Öncelikle Northridge depremi öncesi kullanılan birleşimleri inceleyelim.

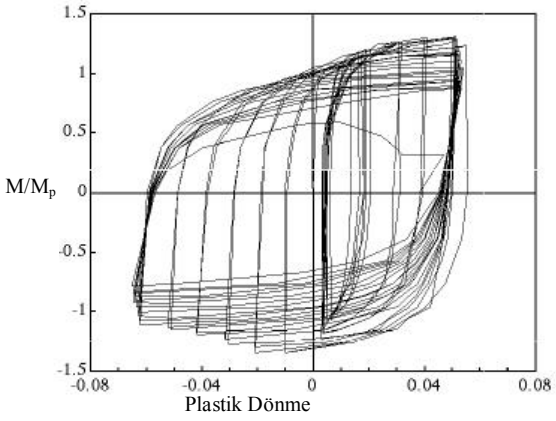
3.1.1 Başlığı kaynaklı – Gövdesi bulonlu Birleşim

Northridge depremi öncesinde çelik moment çerçevesi birleşimlerinde kullanılan Şekil 1.1'de görülen birleşimin, belirgin kapasite azalması görülmeksizin, 0.02 radyan veya daha fazla plastik dönme yapabileceğine inanılıyordu [1].



Şekil 3.1 : Northridge depremi öncesinde kullanılan tipik birleşim

Başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimler uzun yıllar çelik moment çerçevelerinin başlıca birleşimi olarak kaldı. Bu birleşimlerde, kiriş başlığıyla kolon başlığını tam nüfuziyetli küt kaynakları bağlıyordu. Kayma levhası, atölyede kolona köşe kaynakla veya küt kaynakla bağlanırdı. Bu kayma levhası daha sonra kirişe bulonla bağlanarak kayma kuvvetlerini aktarması sağlanırdı. Kiriş başlığından aktarılan büyük kuvvetlere dayanabilmeleri için, kolon başlığı ve gövdesi süreklilik levhaları ile güçlendirilirdi. Bu birleşim, elastik olmayan davranış için ideal olduğu düşünüldüğünden çok az tasarım hesabı yapılarak kullanılırdı.



Şekil 3.2 : Tam moment aktaran birleşimde yapılan ilk deneylerden elde edilen tipik moment-dönme davranışı

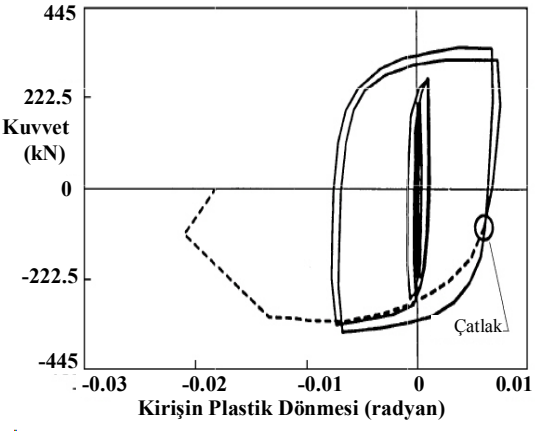
Bu birleşimin depreme dayanıklı yapı tasarımı için uygun olduğunu kanıtlayan oldukça fazla kanıt vardı. Şekil 3.2'de görülen mükemmel histeritik davranış bu kanıtlardan biridir [2]. Bunun yanında, bu birleşimle ilgili sorunlar olduğunu gösteren kanıtlar da vardı. Northridge depreminden önce bu birleşimle ilgili 100'den fazla deney yapıldı. Bu deneylerin çoğu gaz altı ark kaynağı kullanılarak yapılmıştır. Bu deneyler sırasında, histerisis eğrilerinde çok az sıkışma ve bozulmanın olduğu görüldü. Bu bozulmalar da genellikle deney kirişinin yanal burkulmasından kaynaklanıyordu. Başlık kaynağında çatlamalar görülüyordu ama bu çatlaklar, plastik dönme 0.02 radyanı geçtikten sonra başlıyordu [2]. O yıllarda 0.02 radyanlık plastik dönmenin, depreme dayanıklı yapı tasarımı için yeterli olduğu düşünülmekteydi.

Birleşimlerle ilgili yapılan çalışmalarda panel bölgesi akmasının ne kadar önemli olduğu görüldü. Panel bölgesi akmasının, çerçeve şekil değiştirmesinin, kat

ötelemesine ve enerji yutulmasına büyük katkı yaptığı doğrulandı. Bunun yanı sıra, başlıklar, gövdedeki ilk akmadan sonra kayma kuvveti aktarılmasına katkıda bulunduğundan, panel bölgesi akması eğilme akmasına göre daha büyük uzama pekleşmesine yol açmaktadır. Panel bölgesinin elastik olmayan şekil değiştirmeleri kolaylıkla öngörülebilir olmadığından, panel bölgesi akması dahil edildiğinde, bir çerçevenin elastik olmayan cevabı kolay tanımlanamaz. Dahası, panel bölgesinde oluşan elastik olmayan uzama, kaynaklı başlıklara yakın bölgelerde kritik uzama birikmeleri oluşturur.

Kiriş ve panel bölgesinin akması olduğu gibi kolonların akması da incelenmiştir. Büyük normal kuvvet taşıyan kolonların eğilme akmasına maruz kalması, dayanımın ve enerji emiliminin çok hızlı şekilde azalmasına yol açmaktadır. Bu deneylerde, başlık ve gövde narinlikleri, yanal destek, kuvvetli kolon zayıf kiriş felsefesi, süreklilik ve kayma bölgesi takviye levhası gereklilikleri gibi pek çok tasarım ilkelerini yerleştirecek çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda kullanılacak depreme dayanıklı yapı tasarım ilkeleri ve başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşiminin yapılarda kullanabilirliği bu çalışmalara dayandırılmıştır [2].

Daha sonraki çalışmalar, başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşim ile ilgili potansiyel problemleri ortaya koymuştur. Bu deneylerde kullanılan numuneler, birim uzunluğa gelen ağırlıkları fazla olan W18, W21 ve yapma kesitlerdi ve buna ilaveten kiriş uzunlukları da oldukça kısaydı. Bu deneylerde çok az eğilme sünekliği gözlemlendi [2]. Fakat, deneylerin çoğunda panel bölgesi sünekliği gözlemlendiği için, eğilme sünekliğinin eksikliğine rağmen tatmin edici sonuçlar alınmış oldu. Daha sonraki yıllarda, test numunelerinin gördüğü kaynak işlemini de dikkate alan ilk deneyleri gerçekleştirildi. Bu deneylerde gaz altı ark kaynağı ve toz altı ark kaynağı ve bulonlu alın levhası birleşimleri kullanılmıştır [2]. Deneyler sonucunda kısıtlı bir süneklik gözlenebilmiştir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi elde edilen kuvvet-plastik dönme eğrisi, depreme dayanıklı yapı tasarımı için yetersizdir [2].



Şekil 3.3 : 1988'de yapılan deneyden elde edilen Kuvvet-Plastik Dönme Diyagramı

Yazılanlardan anlaşıldığı üzere, başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimlerin kabul edilebilir sismik performans göstereceğini öneren güçlü kanıtlar vardı. İlk başlarda bu birleşimler, yapıdaki neredeyse, her birleşimde kullanılırdı [2]. Bunun sonucu olarak eleman büyüklükleri küçük olduğundan, yanal rijitliğin ve dayanımın eşit olarak dağıldığı söylenebilirdi. 20-30 katlı moment-çerçeve tipi binaları W21, W24, W27 gibi kirişlerle tasarlamak mümkün oluyordu. Bu kirişler, o sıralarda yapılan deneylerde kullanılan kiriş ebatlarına yakın boyutlardaydı [2]. Daha sonraları, mühendisler, sismik dayanımı, yapıyı çevreleyen belirli çerçevelerle sağlama yoluna gittiler. Bu tasarım felsefesi, moment-çerçevesi birleşimi sayısını azalttı ve eleman ile birleşimin boyutlarını büyüttü. Yapıdaki birleşim sayısının azalmış olması, sismik dayanımın belirli çerçevelere yoğunlaştırdı ve bu da eleman boyutlarını ayrıca büyülttü. Sismik kuvvetleri yapının bazı küçük kısımlarıyla karşılama fikri, 2-3 katlı binaların bile W36, W40 gibi kirişlerle tasarlanması sonucunu doğurdu. Bu felsefe sorgulanmalıydı, çünkü o zamana kadar bu boyutlardaki kirişlerle yapılan bir test mevcut değildi.

Birleşimlerin sismik davranışlarını incelerken, çeliğin, kaynak işlemlerinin ve elektrotların etkisini de göz önüne almalıyız. Yapısal çeliğinin ortalama akma gerilmesi 1950'lerden itibaren sürekli arttı. Bunun yanında, tarihsel olarak tasarımda ortalama akma değerlerinden çok daha düşük olan itibari akma değerleri kullanılmıştır. Fakat binaların gerçek performanslarını, kullanılan çeliğin gerçek değerleri belirlemektedir. Düşük akma gerilmesi değerleri, akmaya daha erken ulaşılmasını ve kirişte oluşan plastik mafsal sayesinde, kaynaklı bölgelerde yüksek gerilmelere yaklaşılmamasını sağlıyordu [2].

3.2 Northridge Sonrası Birleşimler

17 Ocak 1994 tarihinde Northridge depremi meydana geldi. İlk gelen raporlarda, çelik moment çerçeve sistemlerde herhangi bir hasar belirtilmiyordu, fakat bir kaç hafta sonra, ciddi sayıda çatlak ve birleşim hasarı raporları gelmeye başladı. Bina hasar araştırmaları sonucunda, çatlama tipleri hakkında yararlı bilgilere ulaşıldı. Pek çok kaynak çatlağı gözle görülebiliyordu ve bu çatlaklar çoğunlukla alt başlık kaynağında oluşmuştu. Bunun dışında üst başlık kaynağında, kirişte ve kolonda oluşan çatlaklar da vardı.

Oluşturulan veritabanına göre, yeni binalarda daha çok çatlağa rastlanıyordu. Hasar tespit edilen çerçevelerin %50'si 1990 sonrası yapılmıştı. Bu oran, yıllara göre bulunan ortalama değerden %80 daha fazladır. İncelenip hasar bulunan çerçeveler arasında, 1980 öncesi yapılanların oranı ise %24.5 idi ve bu oran, ortalama değerden %30 daha azdı. Aslında bu istatistik daha çarpıcı sonuçlar verebilirdi, çünkü 1975 yılından önce yapılan binalarda tespit edilen hasarların pek çoğu sadece tek bir binaya aitti. O binanın yetersiz mühendislik hizmeti gördüğünü varsayıp istatistiklerden çıkarılması durumunda 1975 öncesi binalarda tespit edilen hasar oranı %3 değerine iniyordu [2].

Veri tabanına göre yüksek kirişlerin ve kalın kiriş başlıklarının kullanıldığı binalarda daha fazla hasara rastlanıyordu. Kiriş yüksekliği W21 veya daha az olan hiç bir birleşimde kiriş veya kolonda çatlağa rastlanmıyordu. Bu istatistik oldukça değerlidir, çünkü bir çerçeve için, kiriş veya kolonunda oluşan hasar, yalnızca kaynakta oluşan hasara göre daha büyük tehlike arz eder ve onarılması daha güçtür. Oluşan hasarın daha yeni ve büyük kesitlerde oluşması, son yıllarda, hiperstatikliğin ve başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşim sayısının azaltılmasının doğal sonucudur [2].

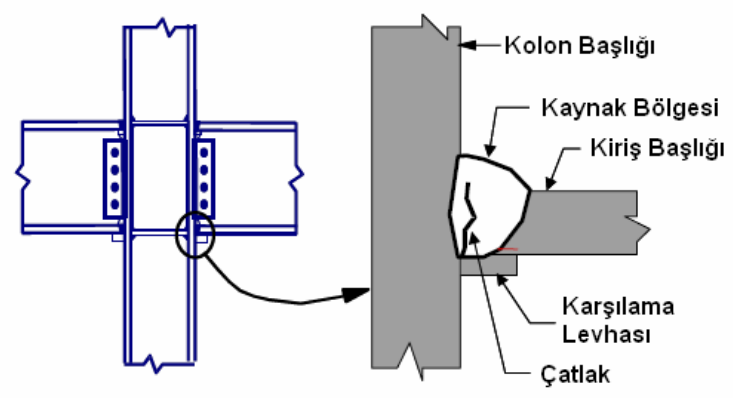
Bu depremden sonra, çok sayıda çelik moment çerçeve binasının kiriş kolon birleşimlerinde, gevrek kırılmalar görüldü. Hasar oluşan binaların kat yükseklikleri 1 ile 26 arasında; yaşları ise, 30 ile deprem anında inşası devam eden binalara kadar değişkenlik göstermekteydi [1]. Hasar gören binalar büyük bir coğrafi bölgeye yayılmıştı. Yer hareketinin şiddetli olduğu bölgelerde fazla bina olmamasına rağmen bu binalardaki hasarlar çok yoğundu. Beklenmeyen gevrek kırılmaların tespiti mühendisleri şaşırtmıştı. Bu hasarların tespitiyle beraber, başka bölgelerdeki

binalarda, daha önceki depremlerde meydana gelmiş fakat fark edilmemiş çatlakların olabileceğinden şüphelenildi ve daha sonraki çalışmalar bu şüpheleri haklı çıkardı.

Northridge depreminde hasar gören çelik moment çerçeve binalarının çoğu, yapı standartlarının öngördüğü temel koşulları sağlamışlardır. Yani, sınırlı yapısal hasara rağmen göçme görülmemiştir [1]. Buna rağmen, binaların davranışı tahmin edildiği gibi olmamıştır ve bazı bölgelerde görülen yer sarsıntıları standartların öngördüğü seviyeden az olmasına rağmen, oldukça fazla ekonomik kayıp görülmüştür. Bu ekonomik kayıplara, hasarların tespitinde ve onarılmasında harcanan masraflar ve onarım sırasında binanın kullanılamamasından dolayı oluşan ekonomik kayıplar da dahil edilmelidir.

Çelik moment çerçevesi binaları, deprem kuvvetlerine karşı dayanabilmeleri için tasarlanırken, dayanım kaybı olmadan büyük plastik şekil değiştirme ve akma yapabilme özellikleri olduğu kabul edilir. Kirişte ve kiriş-kolon birleşiminde plastik şekil değiştirme oluşup, binaya deprem sırasında gelen enerjiyi yutması beklenir. Oluşabilecek hasarların, çelik elemanların akması ve yerel burkulmalarla sınırlı kalması ve gevrek göçmenin kesinlikle oluşmaması beklenir. Bu durumlar öngörülerek, çelik moment çerçevesi binaları, deprem kuvvetlerine göre boyutlanırken, kuvvetlerin belirli oranlarda azaltılmasına izin verilir.

1994 yılında meydana gelen Northridge depreminde oluşan hasarın incelenmesiyle, öngörülen davranışın aksine, bazı binalarda çok az plastik şekil değiştirme yaptıktan sonra; bazı binalarda da hala elastik sınırlardayken, birleşimde gevrek çatlamalar görülmüştür. Çatlakların çoğu Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, kiriş başlığıyla kolon başlığı arasında yer alan kaynakta başlamıştır. Bir kere başladıktan sonra da her birleşimin kendi yapısına bağlı olarak çeşitli yolları izleyerek ilerlemiştir. [1]



Şekil 3.4 : Kiriş-kolon birleşimindeki tipik çatlak başlangıç bölgesi

3.3 Northridge Depreminden Sonra Yapılan Çalışmalar

Depremden sonra ilk olarak, çelik yapı endüstrisi bu beklenmedik hasarın nedenlerini aramaya başladı. Amerika Çelik Yapı Enstitüsü (AISC), hasarın boyutlarını belirleyip bilgi toplamak için özel bir komite kurarak çalışmalara başladı. Amerika Kaynak Derneği'de (AWS), oluşan hasarın kaynak işlemiyle ilgisini araştırmak ve gerekiyorsa kaynak standartlarında bir değişikliğe ihtiyaç olup olmadığını belirlemek üzere bir ekip oluşturdu [1]. Eylül 1994'de ise, SAC, AISC, Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) ve Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), çalışma yapan ekiplerin daha sistematik bir şekilde çalışmasını sağlayıp, yapılan çalışmaları koordine etmek için uluslararası bir seminer düzenledi [1]. Bu seminerden sonra, FEMA ve SAC, çelik moment çerçevesi binalarının sismik performanslarındaki sorunlara yoğunlaşıp, bu sorunlarla ilgili tavsiyeler üretecek ortak bir çalışma yapmak için anlaşmaya vardılar. Bu çalışmaya SAC Çelik Projesi Faz 1 dendi ve amacı, depremden etkilenen binaların önemli hasarları olup olmadığını belirlemek, hasarlı binaları onarmak, gelecekte meydana gelebilecek olası bir deprem için varolan binaları güçlendirmek ve yeni yapılacak binaları güvenilir bir sismik performansa göre tasarlamak olarak belirlendi [1].

1995 yılında belirlenen amaçlar doğrultusunda yoğun bir çalışma programı sürdürüldü. Bu çalışmalar arasında, literatür taraması, hasarlı binalardan veri toplanması, toplanan verilerin istatistiksel olarak incelenmesi, hasarlı olan ve olmayan binaların analitik çalışmalarının yapılması ve Northridge depremi öncesinde yoğun olarak kullanılan birleşim detayının laboratuar deneylerinin yapılması vardı. Bu çalışmalar tamamlandıktan sonra FEMA ve SAC, SAC Çelik Projesi Faz 2 için tekrar anlaştı ve çelik moment çerçeve ve birleşimlerinin, sismik tasarım kurallarını

geliştirebilmek için yapılan yoğun çalışmalar devam etti [1]. Bu çalışmalara, binaların ayrıntılı analizi, birleşim tipinin etkisini belirleyebilmek için, çeşitli birleşim tiplerinin detaylı sonlu eleman ve kırılma mekaniği analizleri, malzeme dayanımının, sertliğinin ve kaynak kalitesinin birleşim davranışına etkisi konusundaki çalışmalar ve 120'den fazla birleşim testi dahildi. Sonuç olarak, bu çalışma ve diğer bağımsız çalışmalar sonucunda, 1994 Northridge depremi öncesinde kullanılmakta olan tipik moment çerçevesi birleşim detayının, gevrek göçmeye sebep olabilecek tipte özelliklerinin olduğu görülmüştür. Bu özellikler:

- Birleşim üzerindeki en şiddetli gerilmeler, birleşimin en zayıf olduğu, kirişin kolona birleştiği noktada oluşuyor. Bu noktada, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri, başlık kaynakları ve kayma levhası vasıtasıyla kolona aktarılıyor. Bu elemanların kesit özellikleri, birleştirdikleri kirişe göre daha düşük olduğundan bu bölgede yüksek gerilmeler oluşuyor [1].
- Kolon başlığıyla kiriş alt başlığını birleştiren kaynak, genellikle kaynak ustasının kirişin üzerine oturup aşağı doğru eğilerek çalışması sonucu yapılıyordu. Bu pozisyonda kaynak yaparken, her geçiş, kiriş gövdesi yüzünden bölünüyordu. Bu kaynak tekniği yüzünden, bu kritik noktada, çatlak başlamasına sebep olabilecek kusurlar oluşuyordu [1].
- Birleşimin oluşturulma şekli, kolon başlığıyla kiriş başlığını birleştiren kaynaklarda oluşan çatlakların belirlenmesini güçleştiriyordu. Kaynak işlemi bittikten sonra yerinde bırakılan kaynak karşılama levhaları, kaynak kökünün görsel olarak incelenmesini engelliyordu. Görsel inceleme yapılamadığından kullanılması gereken ultrasonik test yöntemleri de, birleşimin geometrisi uygun olmadığından çok zor yapılabiliyordu. Bu sebeplerden dolayı kaynaklarda belirlenemeyen kusurlar bulunuyordu [1].
- Birleşim için yapılan tipik tasarım modelleri, kirişin tüm eğilme gerilmelerini başlıklarla; tüm kayma kuvvetini de gövdeyle taşıyacağı kabulünü yapıyordu. Ama, kolon şekil değiştirmesinin etkisiyle kiriş başlıklarının da önemli ölçüde kayma kuvveti taşıdığı görülmüştür. Bunun sonucu olarak da, kiriş başlığının kolon yüzeyinde eğilme gerilmeleri oluşuyordu. Bu gerilmeler yüzünden, belirlenemeyen kaynak kusurlarının olduğu, kiriş başlığını kolon

başlığına birleştiren kaynaklarda büyük ikincil etkiler ve dayanım ihtiyaçları doğuyordu [1].

- Kaynak ulaşım deliğinin geometrisinden dolayı kiriş başlığında uzama yoğunlukları oluşabiliyordu. Bu uzama birikmeleri yüzünden, kiriş başlığında düşük çevrimsel yorulma etkileri oluşabiliyordu [1].
- Kalın kiriş başlığı olan birleşimlerde, kolon başlığı-kiriş başlığı birleşiminin merkezi, harekete karşı tutulmuştu. Bu durum, bu noktalarda akma oluşmasını engelliyordu ve yüksek yerel gerilmeler oluşturuyordu [1].
- 1985-1994 arası yıllarda uygulanan tasarım kuralları, kısmen zayıf panel bölgesi tasarlıyordu. Panel bölgesi zayıf olan birleşimlerde, birleşimin elastik olmayan davranışına, panel bölgesinin kayma şekil değiştirmesi hakim oluyordu. Panel bölgesi şekil değiştirmesi ise, kolon başlığı-kiriş başlığı birleşiminde yerel bozulmalar oluşturuyordu [1].

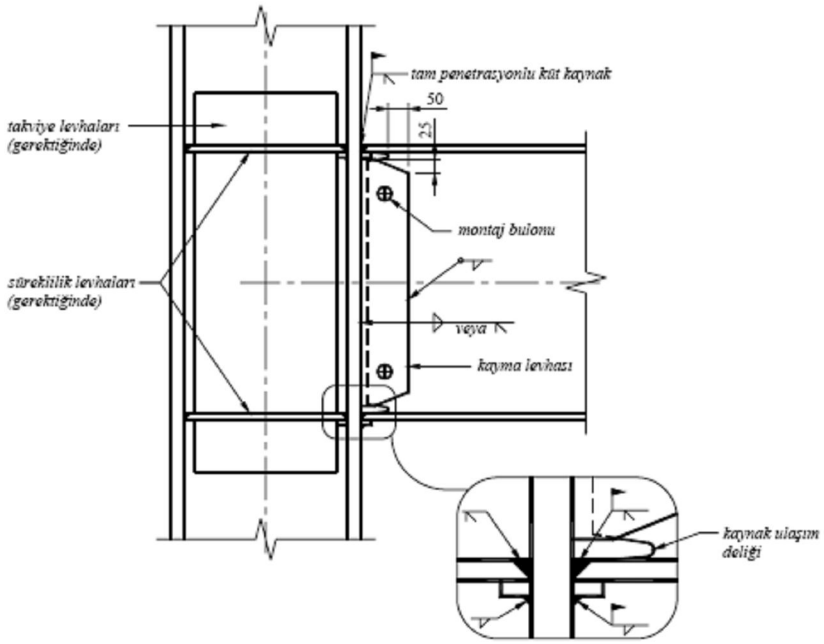
Bu sonuçlara ulaştıktan sonra, çelik moment birleşimlerinin güvenilir sünek davranış gösterebilmeleri için eskiden kullanılan tasarım, malzeme, işçilik ve birleşim detaylarında değişiklik ve iyileştirmeler yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

4. BİRLEŞİM TİPLERİ

Bu kısımda 0,03 radyan plastik dönme kapasitesine sahip olduğu deneylerle ispatlanmış, FEMA ve TDY2007 tarafından önerilen kaynaklı birleşim tipleri ve yönetmeliklerde belirtilmeyen Kutu Kolon – I Kiriş birleşimlerinden örnekler verilip yeni bir birleşim tipi önerilecektir , I ve Kutu kesitli kolon birleşimlerinden, analizi yapılacak birleşim üzerinde durulacaktır.

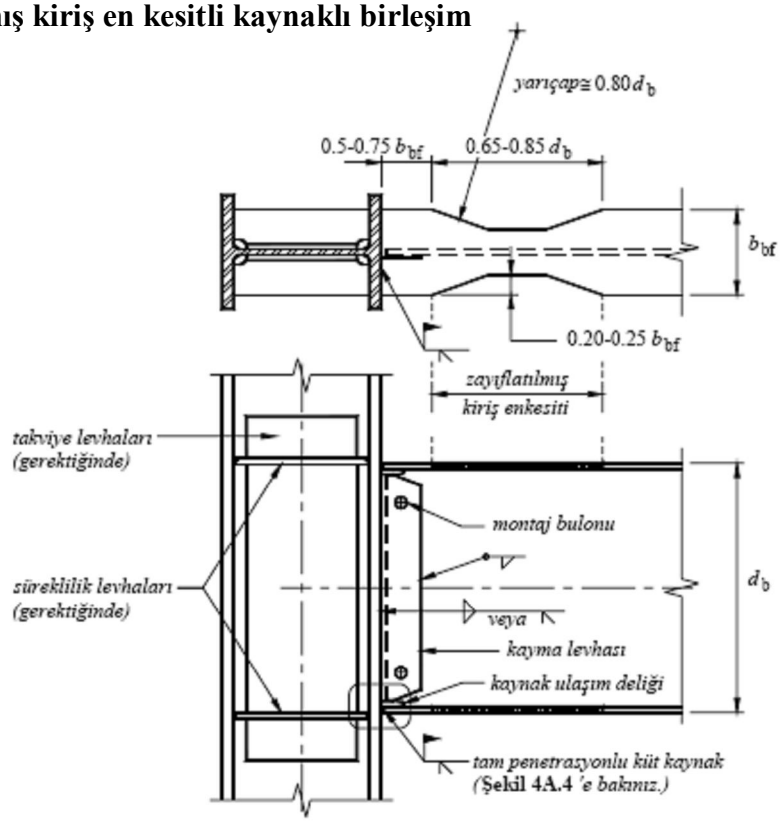
4.1 Kaynaklı Birleşim Tipleri

4.1.1 Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim



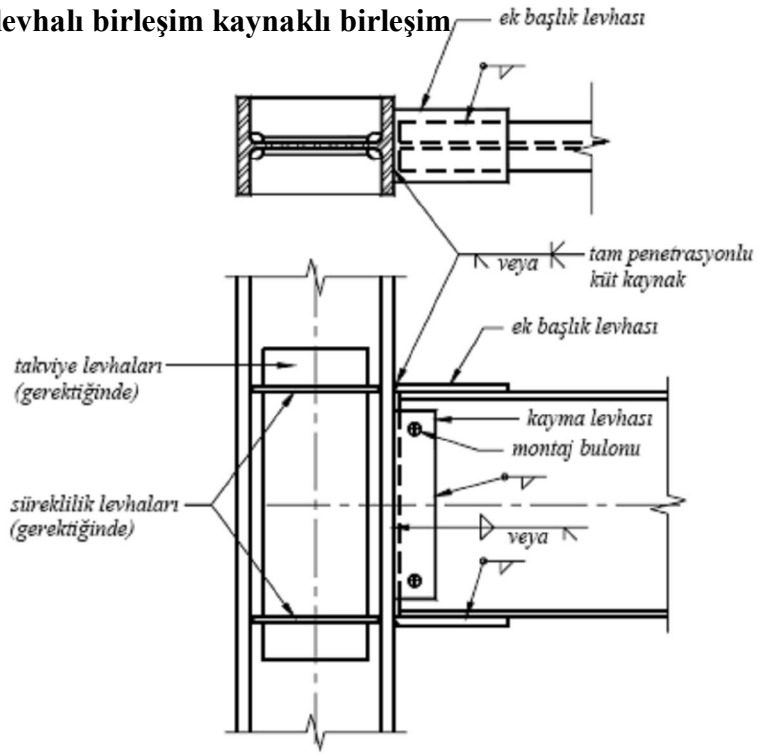
Şekil 4.1 : Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim

4.1.2 Zayıflatılmış kiriş en kesitli kaynaklı birleşim



Şekil 4.2 : Zayıflatılmış kiriş en kesitli kaynaklı birleşim

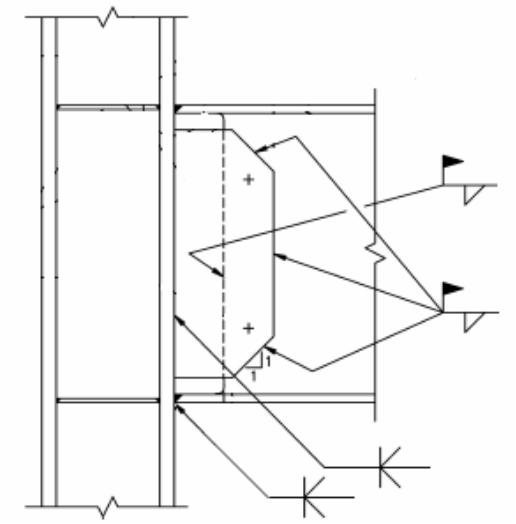
4.1.3 Ek başlık levhalı birleşim kaynaklı birleşim



Şekil 4.3 : Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim

4.1.4 Serbest başlıklı kaynaklı birleşim

Bu birleşim yalnız FEMA tarafından Normal ve Özel Moment Çerçeveleri için önerilir.

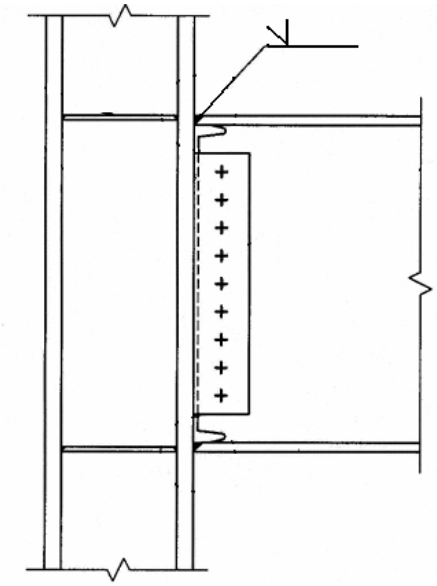


Şekil 4.4 : Serbest başlıklı kaynaklı birleşim

4.2 Bulonlu - Kaynaklı Birleşim Tipleri

4.2.1 Başlığı kaynaklı gövdesi bulonlu birleşim

Bu birleşim yalnız FEMA tarafından Normal Moment Çerçeveleri için önerilir



Şekil 4.5 : Başlığı kaynaklı gövdesi bulonlu birleşim

Bu tip birleşim Northridge depremi öncesinde sık kullanılan birleşim türü iken deprem sonrası bu birleşim sadece Normal Moment Çerçeveleri için izin verilen bir birleşim olmuştur.

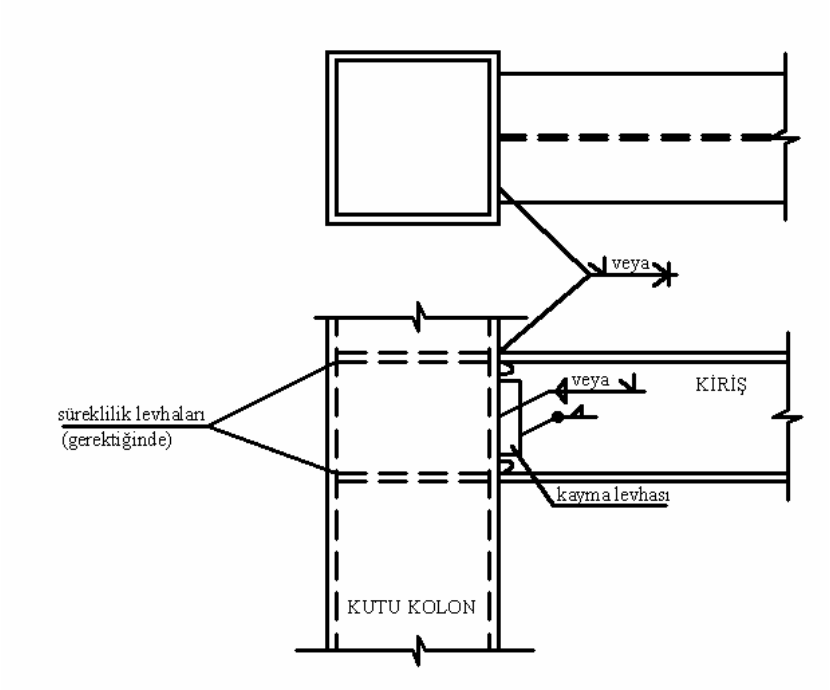
TDY 2007 de ise ;

“4.2.3.4 – Deprem yükleri etkisindeki elemanlarda, aynı birleşim noktasında, kaynaklı ve bulonlu birleşimler bir arada kullanılamaz.”

ibaresi ile bu tip birleşimlerin kullanımı engellenmiştir.

4.3 Kaynaklı Kutu Kolon – I Kiriş Birleşim Tipleri

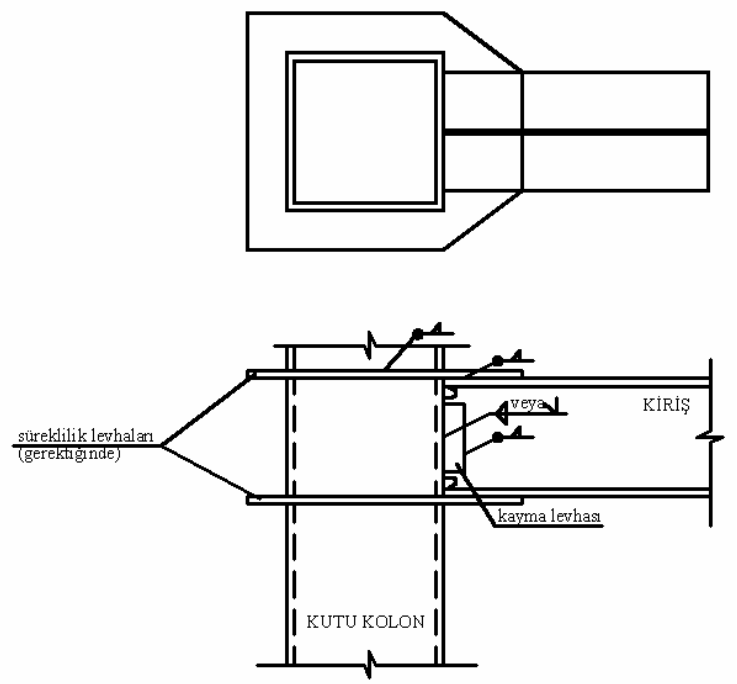
4.3.1 Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim



Şekil 4.6 : Başlığı kaynaklı gövdesi kaynaklı birleşim

Bu birleşim daha önce verilen kaynaklı I kesitli kolon kiriş birleşimlerindeki mantık ile süreklilik levhalarının, kiriş başlık hizasında kolon içerisine yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Kiriş, kolon yüzeyinden itibaren I kesitli kolon birleşimi ile aynı geometriye sahip olduğundan, I kesitli kolon ile yapacağı plastik dönme kapasitesi ile aynı kapasiteye sahip olduğu aşikârdır. Bu birleşimde kutu kolon içerisine süreklilik levhalarının yerleştirilmesi imalat açısından oldukça zordur. Bununla birlikte imalattan sonra kontrolü de bir o kadar zahmetlidir.

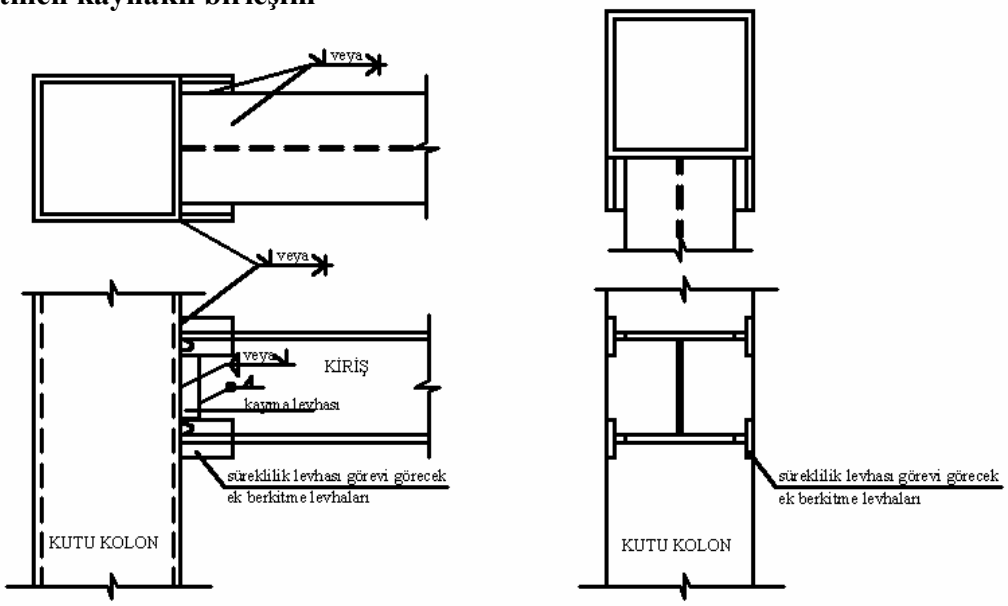
4.3.2 Dıştan süreklilik levalı kaynaklı birleşim



Şekil 4.7 : Dıştan süreklilik levhalı kaynaklı birleşim

Bu birleşimde ise kolon içerisine yerleştirilmesi gereken süreklilik levhaları kolon etrafından geçirilmiştir. Burada kirişin davranışı, I kesitli kolon-kiriş birleşimlerinden, ek başlık levhalı birleşim ile benzer olacaktır. Bu birleşimin bir benzeri, J. W. Park; S. M. Kang; ve S. C. Yang (2005) tarafından denemiş ve yeterli dönme kapasitesine sahip olduğu kanıtlanmıştır.

4.3.3 Ek berkitmeli kaynaklı birleşim



Şekil 4.8 : Ek berkitmeli kaynaklı birleşim

Bu yeni tip birleşimde süreklilik levhaları yerine, onların görevini görecek ek berkitme levhaları konulmuştur. Buradaki amaç kiriş başlığından gelen çekme ve basınç kuvvetlerini, ek berkitmeler ile düşey doğrultuda kolon gövdesine yayarak düşük gerilmeler ile birleşimin sağlıklı bir şekilde kuvvet aktarımını sağlamaktır. Uygulaması ve kontrolü süreklilik levhası kolon içinde olan birleşime göre kolay olduğundan öncelikle tercih edilecek bir birleşim detayıdır.

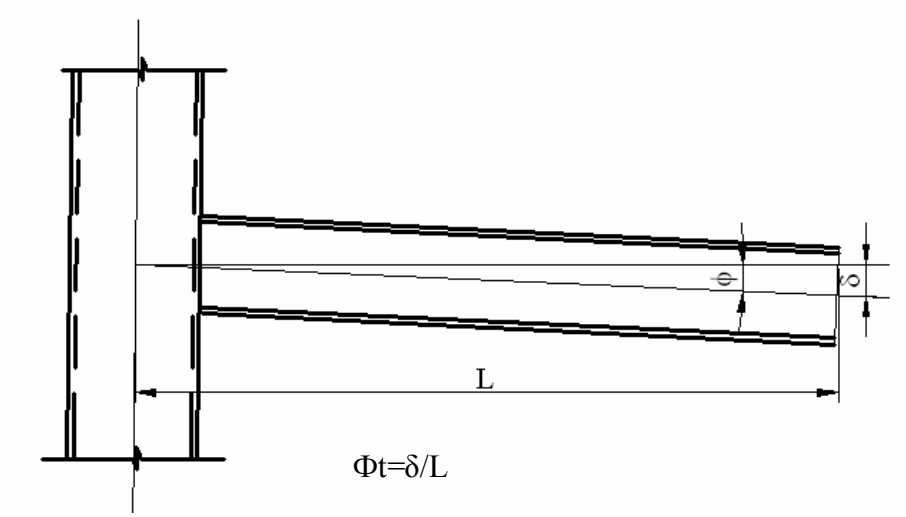
Bu birleşim tipi daha önce Shanmugam ve Ting (1995) tarafından sonlu elemanlar modeli ve gerçek bir model üzerinde denemiştir. Yapılan çalışma ve sonuçları bu birleşim incelenirken verilecektir.

5. DÖNME KAPASİTESİ

Yönetmeliklerde birleşimlerin kapasitelerini tanımlarken toplam dönme ve plastik dönme kavramları kullanılır. Bunlara kısaca göz atalım ve daha sonra dönme kapasitesini tanımlayalım.

5.1 Toplam Dönme

Toplam dönme konsol kirişin uç deplasmanının, kolon aksından kiriş ucuna kadar olan mesafeye bölünmesi ile bulunur.



Φt: Toplam dönme δ:Düşey deplasman L: Kolon aksından kiriş ucuna kadar olan mesafe

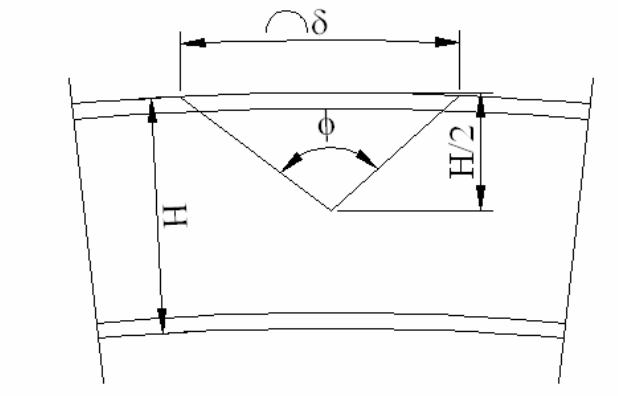
Şekil 5.1 : Toplam dönmenin ölçülmesi

Toplam dönmeye kolonun ve kirişin, plastik ve elastik dönmelerinin hepsi dahildir.

5.2 Plastik Dönme

Kirişin veya kolonun en dış lifinde sadece plastikleşmeden oluşan uzamanın, kesit yüksekliğinin yarısına bölünmesi ile elde edilir.

Φp=δp/(H/2)



δp:Plastik uzamaların toplamı H:Kiriş yüksekliği Φ:Plastik Dönme

Şekil 5.2 : Plastik dönmenin ölçülmesi

Plastik dönmeye ise sadece hesaplanan kesitin plastik uzamaları dahildir.

5.3 Dönme Kapasiteleri

Dönme bir birleşimde, artan dış yükler altında oluşan deformasyonların açı cinsinden değeridir. Dönme kapasitesi sitemde oluşabilecek maksimum (elastik + plastik) dönmedir. Bunu biz Toplam Dönme olarak adlandırdık. Plastik dönme kapasitesi ise sistemde sadece plastik uzamalardan oluşacak maksimum dönmedir.

Yönetmelikler sistemin süneklik düzeyine göre farklı dönme kapasiteleri istemektedir. Şimdi yönetmeliklerin birleşimler için istediği dönme kapasitelerini inceleyelim

5.3.1 FEMA' ya göre dönme kapasiteleri

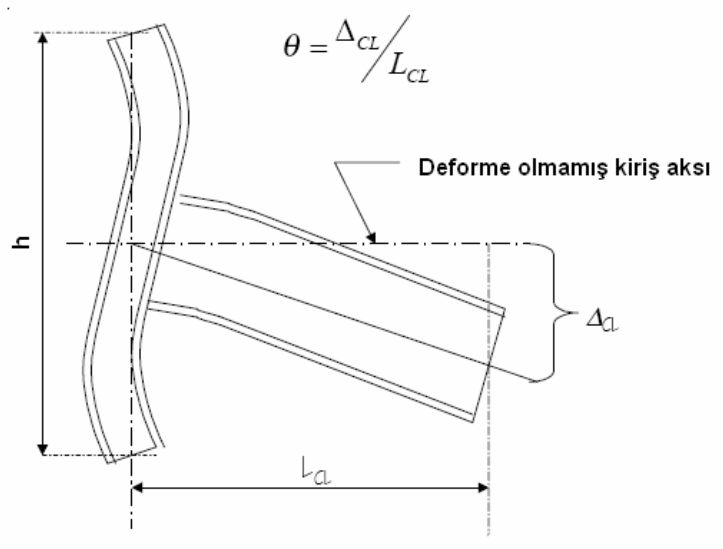
Fema-350, 3 tip süneklik düzeyi (moment çerçevesi) tanımlamıştır. Bunların her üçü farklı seviyedeki süneklik düzeylerinin ve elastik olmayan davranış kapasitelerinden dolayı farklı detay ve konfigürasyon gereksinimleri vardır.

Bunlar;

1- Normal moment çerçevesi
2- Orta moment çerçevesi
3- Özel moment çerçevesi

FEMA bu çerçevelerden Orta moment çerçevesini ihmal etmiş ve Özel moment çerçevesini tavsiye ederek kriterlerini oluşturmuştur.

Fema 350 de tavsiye edilen birleşim tipleri dışında, bir birleşimin yeterli olup olmadığını belirlemek için aşağıdaki gibi test düzeneği kurulup, yükleme protokolü uygulanarak istenilen dönme kapasitesine ulaşılması istenmiştir.



Şekil 5.3 : FEMA'nın tanımladığı dönme açısı

Yukarıdaki düzeneğe uygulanacak yükleme protokolü ise şu şekildedir.

Çizelge 5.1 : FEMA yükleme protokolü.

Yükleme Adımı	Uç deformasyon (radyan)	Döngü sayısı
1	0.00375	6
2	0.005	6
3	0.0075	6
4	0.01	4
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2

Yük artımına 2 döngüde bir 0.01 radyan deformasyon artımı yapacak şekilde devam edilir.

Fema istenen birleşim kapasitesini iki kritere göre sağlamak ister.

1- Dayanım azalması ΦSD : Birleşimin ani göçmesi durumundaki dönme veya nominal plastik kapasitenin altında, birleşimin dayanımının azaldığı ana kadar ki dönmeden küçük olanı.

2- Göçme durumu ΦU : Hasar görmüş birleşimin, belirsiz sabit yükler altında stabil kalıp taşıma gücünü devam ettirdiği ana kadar ki dönme miktarı.

Bu iki sınırda istenilen toplam dönme miktarları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 5.2 : FEMA dönme açıları.

Yapısal Sistem	İstenilen Eğilme Açısı Dayanım azalması ΦSD	İstenilen Eğilme Açısı Göçme durumu ΦU
Normal Moment Çerçevesi	0.02	0.03
Özel Moment Çerçevesi	0.04	0.06

Plastik dönmeyi hesaplamanın değişik yolları olmasına rağmen, genelde

Toplam dönme = plastik dönme + 0.01 radyan'a eşittir. [1]

0.01 radyan toplam dönmeden çıkarılır ise Dayanım Azalması durumuna göre aşağıdaki plastik dönmeler elde edilir.

Çizelge 5.3 : Plastik dönme açıları.

Çerçeve Tipi	Normal Moment Çerçevesi	Özel Moment Çerçevesi
Elastik Olmayan Dönme (plastik)	0.01	0.03

5.3.2 TDY 2007' ye göre dönme kapasiteleri

TDY 2007 çelik çerçeveler için iki çeşit süneklik düzeyi tanımlamıştır.

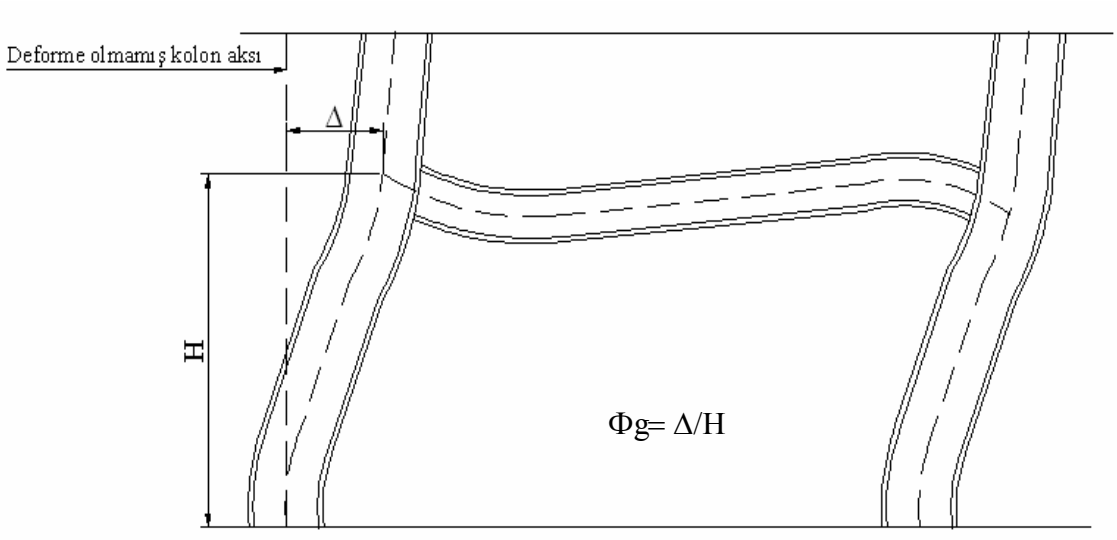
1- Süneklik Düzeyi Normal Çerçeveler
2- Süneklik Düzeyi Yüksek Çerçeveler

Birleşimin kapasitesi ile ilgili olarak sadece Süneklik Düzeyi Yüksek çerçeveler için bir tanım yapılmıştır.

TDY 2007'de FEMA ile benzer birleşim tiplerini önerip, bunlar dışında kullanılacak birleşimlerin yeterli kapasitede olduğunun test edilmesini istiyor.

TDY 2007, 4.3.4.1 a maddesinde dönme kapasitesi ile ilgili şu ifade yer alıyor.

"Birleşim en az 0.04 radyan G*öreli Kat Ötelemesi Açısı*'nı (göreli kat ötelemesi/kat yüksekliği) sağlayabilecek kapasitede olacaktır. Bunun için, deneysel ve/veya analitik yöntemlerle geçerliliği kanıtlanmış olan detaylar kullanılacaktır. "



Φg: Göreli kat ötelemesi açısı Δ: Kat yatay deplasmanı H: Kat Yüksekliği

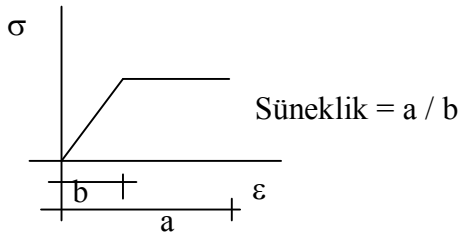
Şekil 5.4 : TDY 2007'nin tanımladığı göreli kat ötelemesi açısı

Yine TDY 2007 'nin bu tanımından, sadece plastik dönmenin değil toplam dönmenin dikkate alınacağı anlaşılıyor. Bu ise kirişin ne kadar plastik dönme yapması gerektiğini belirsiz bırakıyor. Sonlu elemanlarla yapacağımız analizler sonucunda yönetmeliğe göre kirişlerin ne kadar plastik dönme yapacağını elde edeceğiz.

Normal sünek ve yüksek sünek birleşimler için ayrı bir dönme kapasitesi sınırı tanımlanmamıştır. Normal sünek birleşimler için yüksek sünek birleşimler için koşulları ile birlikte kullanılması tavsiye edilen birleşimlerin, koşulsuz (kiriş- kolon yüksekliği, başlık et kalınlığı vb. koşulları olmadan.) olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

6. SÜNEKLİK

Yapıların ya da yapı elemanlarının sünek davranışı, deprem enerjisini kalıcı deformasyonlarla tüketilmesi demektir. Plastik deformasyonla enerji tüketim gücü yüksek olan yapılar depreme dayanıklı yapı olarak nitelenir. Bu nedenle "sünek" olma koşulu depreme dayanıklı yapılar için olmazsa olmaz bir koşuldur.

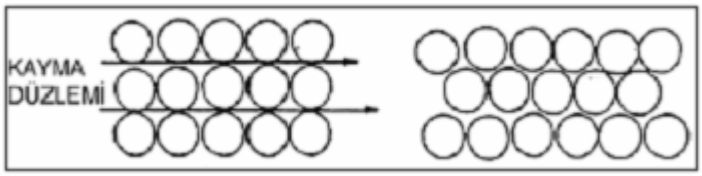


Şekil 6.1 : Süneklik

Yapının göçme anına kadar ki yaptığı toplam yer değiştirmenin lineer şekil değiştirmeye oranına süneklik oranı denir. (a/b)

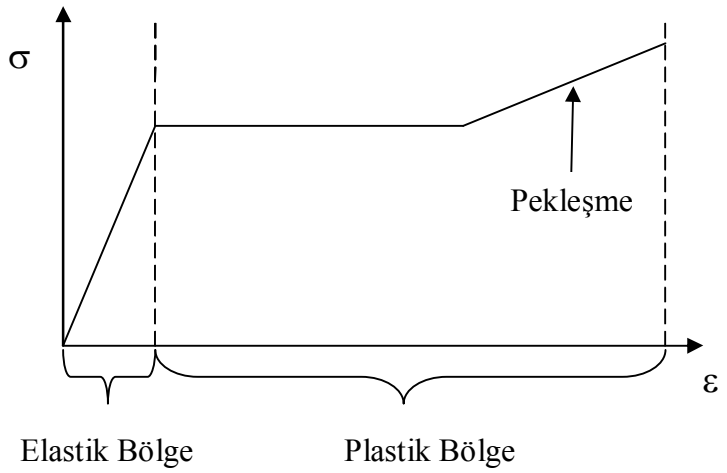
Gerek betonarmede gerekse çelik yapı elemanlarında süneklik inşaat demirinde ve çelikte liflere paralel yönde uygulanan kuvvet altında lifler arasındaki kayma ile oluşan uzamanın gerektirdiği enerji tüketimine bağlıdır. Sünek davranış için lifler arasında kayma ile serbestçe uzama olanağı var olmalıdır. Süneklik, plastik akma ile enerji tüketimidir.

Plastik akma için ise metalin kristal katmanları arasındaki kayma yüzeylerinde hareket olması ile gerçekleşir. Şekil-6.2'de görüldüğü gibi demir kristalleri arasındaki kayma ile oluşan yeni ve daha yoğun yapıda, daha fazla bir deformasyon için daha büyük gerilmelere gerek duymaktadır. [3]



Şekil 6.2 : Çeliğin kristal yapısında olan değişme sonucu sünekliğin oluşması, daha yoğun ve akma yönünde çentikli kristal yapı

Bu durum pekleşme ile demirin dayanım artışının nedenidir. Sünek enerji tüketimi için malzemenin ya da kristal katmanların hareket edebilme olanağı olmalıdır. Bu olanak çeşitli nedenlerle kısıtlanmış ise sünek davranış olanağı azalmaktadır.



Şekil 6.3 : Gerilme-Deformasyon eğrisi ve pekleşme

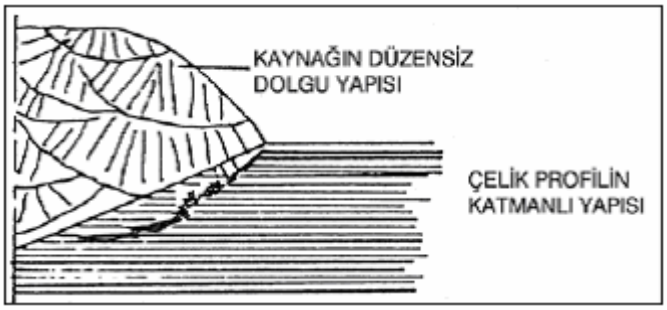
Demir katmanları arasındaki kayma olayı sıcaklıkla ile bağlantılıdır. Düşük sıcaklıklarda kayma hareketi olanağı azalır.

Çeliğin yapısındaki karbonun görevi alaşımı sertleştirmek ve demir atomlarının kaymasını engellemektir. Alaşımdaki karbon miktarı ile oynanarak çeliğin sertliği, esnekliği, sünekliği ve gerilme gücü değiştirilebilir. Alaşımdaki karbon miktarı artırılarak çeliğin sertliği artırılabilir, fakat bu işlem çeliğin kırılganlığını arttırıp, sünekliğini azaltır.

Kayma yüzeylerinde hareket için zaman gerekir. Eğer yükleme hızı yüksek ise, daha az kayma olur ve akma gerilmesi artar ancak buna karşılık tüketilen enerji azalır.

Düşük hızlı tersinir yüklemelerde kırılma daha çok sayıda yüklemede oluşurken, yüksek hızlı tersinir yüklemelerde ise çok daha az sayıda tersinme ile kırılma olmaktadır. Öte yandan eğer malzemenin, şekil değiştirme olanağı kısıtlanmış ise o zaman katmanlar arasında kayma olmadığı için yüksek gerilmede gevrek kırılma olacaktır. Burada sözü edilen mikro boyutta malzeme davranışı sünek davranış için malzemenin mikro yada molekül düzeyindeki yapısının önemini ortaya koyar. Kristal ve katmanlı yapısı olmayan bir malzeme sünek olamamaktadır. Çelik içindeki karbon gibi saflığı bozan elementlerin çoğalması demir molekülleri arasındaki ara yüzeylerin pürüzlü olmasına ve kristal katmanların arasındaki kaymanın güçleşmesine ve dayanımın artmasına neden olurken, sünek davranışa engel olmaktadır.

Beton ve pişmiş toprak olan tuğlada sünek davranış olamamasının nedeni sünekliğin yukarıda anlatılan mekanizma ile ortaya çıkmasına olanak veren katmanlı bir kristal yapının yokluğudur. Bu özelliği nedeni ile beton ve tuğla yığma "gevrek" bir malzemedir. Aynı şekilde elektrik kaynağı ile oluşturulan birleşim bölümündeki malzeme kristalli ve katmanlı yapıda olmayıp çok şekilsiz ve amorf bir kütledir. Kaymanın oluşması için düzenli katmanlı yapı yoktur. Bu nedenle de kaynaklar da gevrektir (Şekil-6.4).[3]



Şekil 6.4 : Tabakalı yırtılma çatlağı

Çelik yapıların sünek davranışı, tek başına çelik malzemesinin süneklik özelliği ile sağlanamaz. Buna ek olarak, çerçeveleri oluşturan yapı elemanlarının birleşimlerinde istenen plastikleşmelerin gerçekleşmesini sağlayacak yeterli dayanım, tasarımda dikkate alınan rijit çerçeve kabulüne ters düşmeyecek şekilde bir rijit davranış ve özellikle birleşim bölgelerinde tekrarlı yükler altında elastik olmayan deformasyonların oluşmasına engel olmayacak bir detaylandırma gerekir. Bu sayede kiriş-kolon birleşimlerindeki panel bölgeleri, kirişler ve bir ölçüde kolonlar da plastik

dönme kapasitelerini kullanmak suretiyle depremin yapıya aktardığı enerjiyi sönümlemeye çalışırlar. [4]

Yapılarda sünekliği sağlayacak bu detaylandırma, yönetmelikler ile elemanların kesit şekillerine göre düzenlenmiş en kesit koşulları, birleşimdeki elemanların moment-kesme kapasitelerine göre düzenlemiş bir takım kontrollerle sağlanmaktadır. Bu koşulların sağlanması ile sistem plastik deformasyonlar yaparken, birleşim noktalarının hasar alamadan güvenli bir şekilde yük aktarmaları hedeflenir.
Süneklik yapı elemanlarının daha ekonomik boyutlandırılmasını da sağlar.

7. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar metodu, karmaşık geometrideki fiziksel sistemlerin tümünü bir bütün olarak

incelemek yerine bu sistemi incelenmesi daha kolay olan elemanlara (Sonlu Elemanlar) ayırarak incelemek amacıyla kullanılan bir metottur. Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler çoğu zaman doğrudan çözülemez. Problem, çözümü daha kolay olan alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılır. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, bunlarda yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Örneğin, gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlarlar. Bu çözümler çoğu kez gerçek problemin yaklaşık çözümüdür. Sonlu Elemanlar Metodu; bir nümerik teknik olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu Elemanlar Metodunda (Finite Elements Method) (FEM) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, buna düğüm denir. Katı modellerde her bir elemandaki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilidir.

Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözmeye çalışır. Böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur. Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir.

Sonlu elemanlar metodu ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, günümüze kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok makine elemanının yapısal analizini kısa bir sürede yapıp, optimum dizaynı gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir.

Metot ilk defa 1950'li yıllarda havacılık endüstrisinde uçakların kanatlarındaki gerilmelerin analizi için kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda metodun matematik temelleri

o1uşturulmaya baş1anmış ve çeşitli mühendislik dallarında avantajları nedeniyle giderek artan oranda kullanılmaya başlanmıştır. İlk sonlu elemanlar terimi (Finite Element) 1960 yılında Clough (Moaveni, 2003) isimli bi1im adamı tarafından kullanılmıştır. 1970'li yıllarda metot özel bilgisayarlarda kendine uygulama alanı bulmuştur. 1980'li yıllara girerken mikro 3 bilgisayarların ge1iştirilmesi ile metodun uygulanması genişlemiştir. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise büyük ölçekli yapıların analiz edilmesi mümkün olmuştur.

Sonlu elemanlar metodu bugün bilgisayar destekli tasarım sistemleri ile entegre edilerek gerilme, doğal frekans, ısı transferi, akışkan1ar mekaniği, elektromanyetik, jeomekanik ve biyomekanik gibi sahalarda kendine uygulama alanı bulmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun uygulandığı yerler [6];

1) Yapı mühendisliği: Çubuk, plak, levha ve kabukların çözümünde,
2) Zemin mekaniğinde: Şevlerin gerilme analizlerinde, barajlarda ve tünellerde,
3) Hidrolikte: Viskoz akımda, sürtünme maddelerinin taşınmasında, dalga titreşiminde,
4) Isı transferinde: Isı iletiminde, ısı akımı taşınmasında,
5) Nükleer enerji: Reaktörün statik ve dinamik analizinde, ısı akımında,
6) Elektrik mühendisliğinde: Devre analizlerinde, manyetik potansiyel dağılımında kullanılabilir.

Analitik metotlara göre;

1) İncelenen yapı hakkında daha fazla bilgi verebiliyor olması,
2) Çok kompleks yapıların göreceli o1arak kolayca çözümüne olanak sağlaması,
3) Bilgisayar destekli tasarım sistemleri ile entegre çalışarak daha tasarım aşamasında yapının analiz ve optimizasyonuna olanak sağlaması,
4) Çok kompleks yapılarda hesaplama zamanını kısaltması,

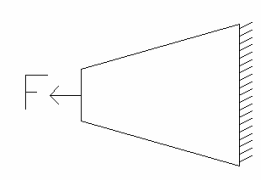
gibi avantajları nedeni ile metot günümüzde oldukça popülerdir.

7.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri

Tüm mühendislik problemlerinde bir fiziksel sistemin olduğu gibi analizlerinin yapılması ve matematik modellerinin oluşturulması mümkün olmamaktadır. Bir uçak

gövdesinin aerodinamik analizlerinin ya da bir otomobil karoserinin analizlerinin yapılması gibi durumlarda klasik mekanik yöntemleri ile problemlere çözüm bulmak çok zor ya da imkansız olmaktadır. Bu gibi durumlarda yapının tamamını analiz etmek yerine esas yapının özelliklerini taşıyan ve analiz edilmeleri daha kolay olan sonlu elemanları kullanmak incelenen problem için yaklaşık bir çözüm yolu olmaktadır.

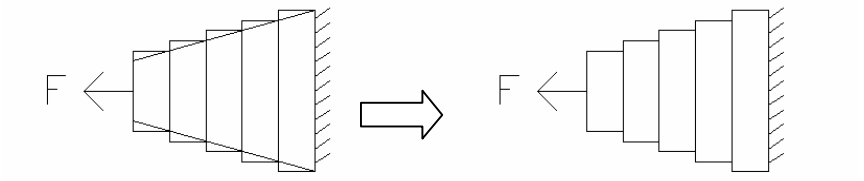
Metodun çalışma prensibini incelemek için Şekil 7.l'deki gibi F kuvvetine maruz bırakılan ankastre bir çubuğu göz önüne alalım. Çubukta meydana gelen deformasyon ve gerilmeleri analitik olarak hesaplamak çubuk kesiti uzunluk boyunca değiştiği için zor olacaktır. Bu durumda çubuğu bir bütün olarak incelemek yerine kesiti sabit olan silindirlerden oluşmuş bir yapı gibi düşünerek analiz etmek daha pratik olacaktır.



Şekil 7.1 : Eksenel kuvvete maruz ankastre çubuk

Bu amaçla inceleyeceğimiz çubuğu çapları sabit olan 4 silindire bölelim (Şekil 7.2). Aslında sonsuz sayıda elemandan oluşan (sürekli bir sistem olan) çubuk artık 4 adet sonlu sayıdaki elemandan oluşmaktadır ve bu elemanlara Sonlu elemanlar (Finite Elements) denilmektedir.

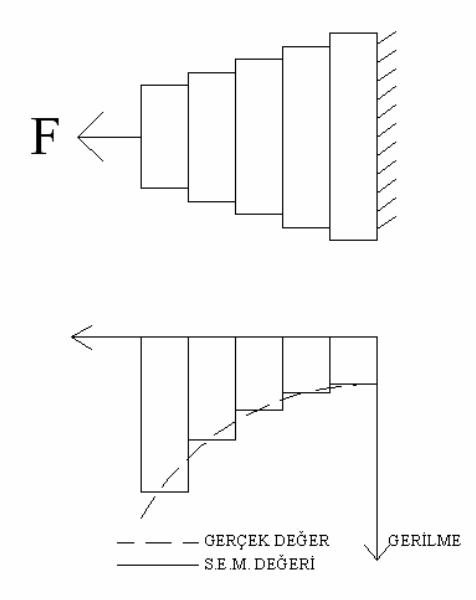
Bu sonlu elemanlar birbirilerine düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanmaktadırlar.



Şekil 7.2 : Ankastre çubuğun sonlu elemanlara ayrılması

Bir boyutlu olarak incelediğimiz bu sistemde her düğüm noktası sadece çubuk ekseni boyunca hareket edebileceğinden her bir düğüm noktasının bir serbestlik derecesi vardır. Tüm sistemin serbestlik derecesi 5 olmaktadır. Yapı artık basit sonlu elemanlara bölündüğünden her bir sonlu elemandaki deformasyon ve gerilme değerinin hesaplanması mümkündür. Gerilme değerleri hesaplandığı taktirde sonlu

elemanlar metodu ile hesaplanan gerilmelerin analitik olarak hesaplanan gerilme değerinden farklı olduğu görülecektir (Şekil 7.3)



Şekil 7.3 : Çubuktaki SEM metodu ile hesaplanan ve gerçek olan gerilmeler

Bu farklılığın nedeni yapının artık süreksiz olmasıdır. Çubuğu modellemek için kullanılan son1u eleman sayısının artması ile birlikte gerçek gerilme değerine yakın gerilme değerleri elde edilebilir. Çubuğun kuvvet etkisi altında göstermiş olduğu deformasyon her bir sonlu elemanın kuvvet etkisi altında göstermiş oldukları deformasyonların toplamına eşittir. Başka bir ifadeyle çubuğun toplam rijitliği sonlu elemanların rijitliklerinin toplamına eşittir. Sonlu elemanlara bölünmemiş çubukta olduğu gibi sonlu elemanların bir araya gelerek oluşturduğu ağ (mesh) yapıda da "uygulanan kuvvet sonucu oluşan deformasyonların yapının rijitliğine bağlı olması" ilkesi geçerliliğini korumaktadır.

Şimdiye kadar anlatılanları matematiksel olarak ifade etmek için her bir sonlu elemanın rijitliğini [k] matrisi ile, eleman üzerindeki kuvvetleri [f] vektörü ile ve deformasyonları da [d] vektörü ile gösterelim. Bu matrisler arasındaki ilişki;

$$[k] \times [d] = [f] \qquad (1.1)$$

şeklinde olmaktadır. Çubuğun toplam rijitliği her bir sonlu elemanın rijitliğinin birbirine monte ederek toplanması ile bulunmaktadır. Tüm yapıya etkiyen kuvvet ile

deformasyonlar arasındaki i1işki (1.1) denklemine benzer tarzda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K]\times[D] = [F] \qquad (1.2)$$

Burada [K] matrisi tüm yapının rijitlik matrisini, [D] tüm yapının deformasyon vektörünü ve [F] de çubuğa etki eden kuvvet vektörünü göstermektedir [7]

7.2 Sonlu Eleman Tipleri

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılabilir. [5]

7.2.1 Tek boyutlu elemanlar

Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır. Çubuk elemanlar bu gruba örnektir.

7.2.2 İki boyutlu elemanlar

İki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir.

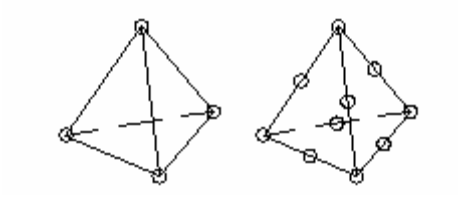
7.2.3 Dönel elemanlar

Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri ekseni etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözme imkanı sağladığı için çok kullanışlıdırlar.

7.2.4 Üç boyutlu elemanlar

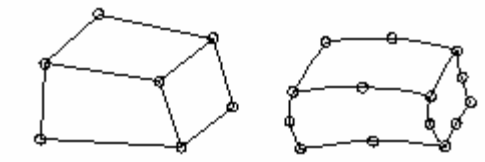
Bu grupta en temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve daha genel olarak altı yüzlü elemanlar üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.

7.2.4.1 Üçgen piramitli tane tipi



Şekil 7.4 : Lineer tetrahedran (4 düğüm noktalı) ve Parabolik tetrahedran (10 düğüm noktalı)

7.2.4.2 Dikdörtgenler prizmalı tane tipi



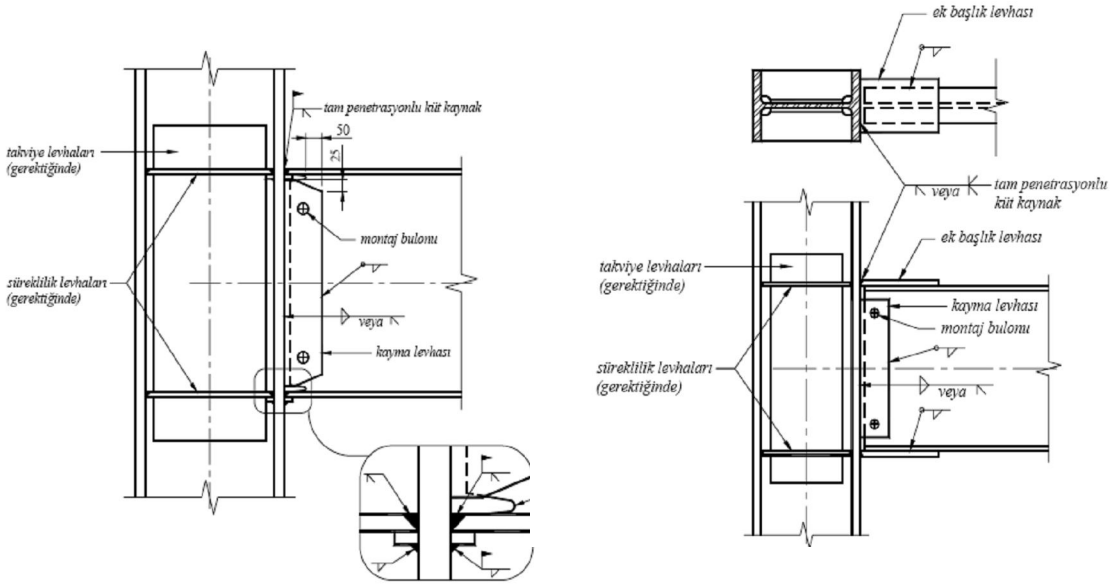
Şekil 7.5 : Lineer hegzagonan (8 düğüm noktalı) ve Parabolik hegzagonan (20 düğüm noktalı)

8. MODELLEME

Bu kısımda sonlu elemanlar programında modellenecek birleşimleri ele alacağız.

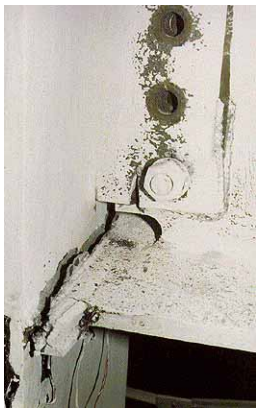
8.1 Kaynaklı I Kolon - I Kiriş Birleşimleri

I kesitli kaynaklı birleşimlerde daha öncede tanımlanan iki tip birleşim aşağıda verilmiştir. Bu birleşimlerin ikisinde de gövdede montaj bulonu kullanılıp sadece başlıklarda farklılık gösterilerek ilk tipte kiriş başlığı karşılama levhaları yardımı ile kolon yüzeyine kaynatılmış, ikinci tipte ise ek başlık levhası kullanılmıştır.



Şekil 8.1 : Kaynaklı I Kolon – I Kiriş Birleşimleri

Northridge depremi sonrasında yapılan testlerin çoğunda kiriş başlığını kolona bağlayan kaynaklarda oluşan çatlaklar sonucunda birleşimin kapasitesine ulaşamadan taşıma gücünü kaybettiği görülmüştür.



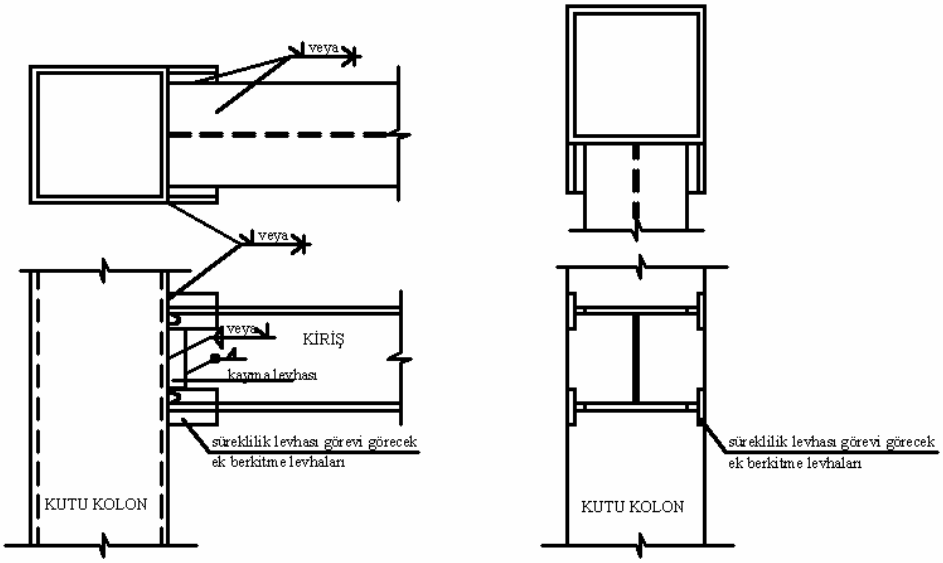
Şekil 8.2 : Northridge depremi sonrası yapılan testlerde kiriş başlık kaynağında görülen kırılma

Bu imalat koşulları,kalitesi yöntemi gibi teorik olmayan nedenleri içerdiğinden, tezin kapsamı dışında olacaktır. Biz birleşimlerimizde kaynakların tam kapasite ile yükleri aktardığını kabul edeceğiz.

Birleşim tipi olarak yönetmeliklerde verilen bu iki detaydan Başlığı Kaynaklı - Gövdesi Kaynaklı birleşim detayı incelenecektir.

8.2 Kaynaklı Kutu Kolon - I Kiriş Birleşimleri

Kutu kolon – I kiriş birleşimleri için daha öncede bahsedildiği gibi yönetmeliklerin tavsiye ettiği bir birleşim tipi olmadığından, daha önce Shanmugam ve Ting (1995) tarafından da test edilen Ek Berkitmeli Kaynaklı birleşim üzerinde durulacak.



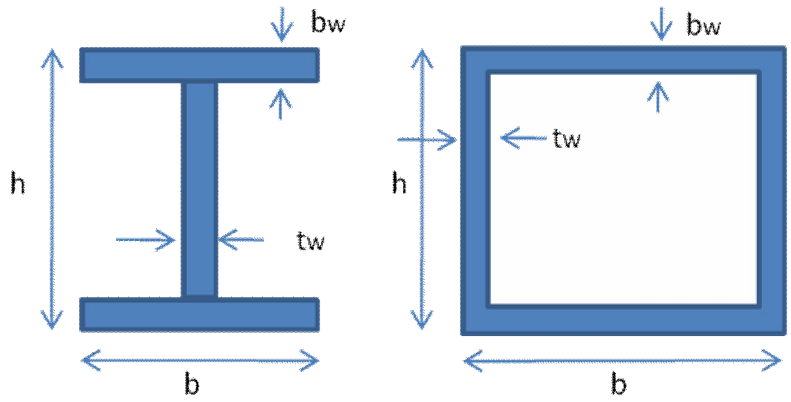
Şekil 8.3 : Ek berkitmeli kaynaklı birleşim

8.3 Kaynaklı Kutu Kolon - I Kiriş Birleşimleri

Birleşimlerde kullanılacak kolon ve kiriş kesitleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 8.1 : Modellemede kullanılacak kolon ve kiriş boyutları.

		BİRLEŞİM 1	**BİRLEŞİM 2**	**BİRLEŞİM 3**	**BİRLEŞİM 4**
KİRİŞ	h	450	390	450	390
	tw	14	11	14	11
	b	300	300	300	300
	bw	26	19	26	19
KOLON	h	399	500	400	350
	tw	24	14.5	35	25
	b	401	300	400	350
	bw	39.6	28	35	25

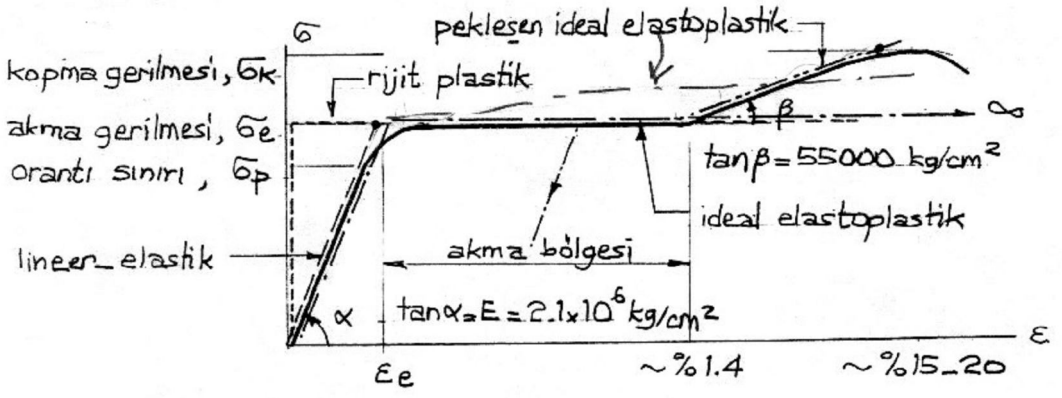


I KESİT KUTU KESİT

Birleşimde kolonlar, 1 ve 2 de I kesit, 3 ve 4'te kutu kesittir.

8.4 Malzeme Tanımı

Modellemeden sonra birleşimin yapacağı elastik ve plastik şekil değiştirmeleri belirleyecek gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları programa tanımlanmalıdır.

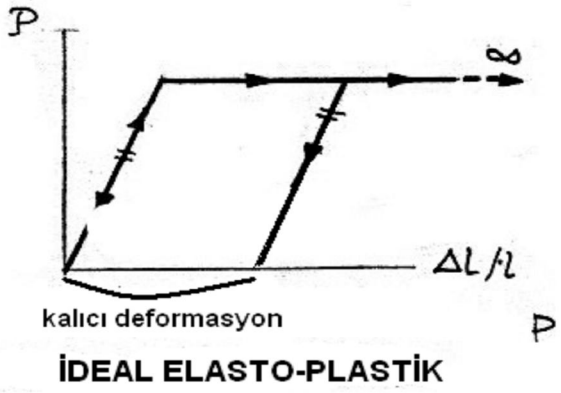


Şekil 8.4 : Gerilme – Şekildeğiştirme eğrisi tanımı

Gerilme-şekildeğiştirme eğrisini tanımlarsak,
1-Orijinden orantı sınırına kadar olan kısım elastik bölge,
2-Akma gerilmesi ile kopma noktası arasında kalan kısım akma bölgesi,
Burada idealleştirme yapılarak orantı sınırı ile akma başlangıcı noktası birleştirilmiştir.

Malzemenin doğrusal olmayışının sebebi, gerilme ile uzama arasındaki doğrusal olmayan ilişkidir. Yani, gerilme, uzamanın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Plastik teori, malzemelerin elasto-plastik davranışlarını, matematiksel bir ifadeye dönüştürebilmeyi sağlar. Plastik teorinin üç bileşeni vardır: Akma koşulu, akış kuralı ve pekleşme kuralı.

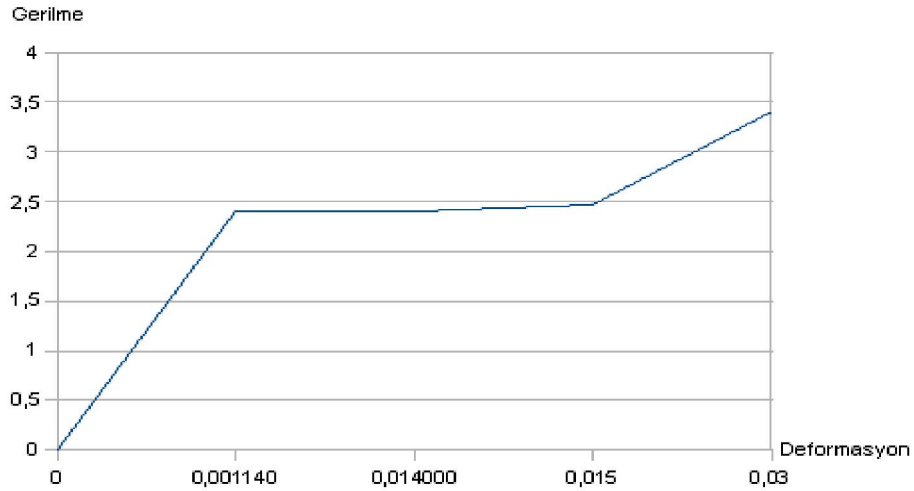
Akma koşulu, akmanın başlayacağı gerilme değerini belirler. Eşdeğer gerilme, malzemenin akma gerilmesine eşit olduğunda plastik uzama oluşur. Eğer eşdeğer gerilme, akma gerilmesinden küçükse, gerilme-uzama eğrisine göre elastik uzamalar oluşur. Çelik malzemesinin gerilme-uzama eğrisi, orantılılık sınırı denen bir gerilme değerine kadar doğrusal olarak devam eder. Bu sınırdan sonra malzemenin davranışı doğrusal olmaz ama elastiktir. Akma gerilmesi değerine kadar davranış bu şekilde devam eder. Kalıcı uzama olarak bilinen plastik davranış, malzemenin akma gerilmesi aşıldıktan sonra başlar.



Şekil 8.5 : İdeal Elasto-Plastik Malzeme

Programda malzemenin kalıcı deformasyon özelliği tanımlanamayıp yükün kalkması halinde malzeme kalıcı deformasyon yapmadan ilk halini almaktadır.

Modelde St37 malzeme kullanılacaktır.



Şekil 8.6 : St37 Malzeme için Gerilme –Deformasyon Eğrisi

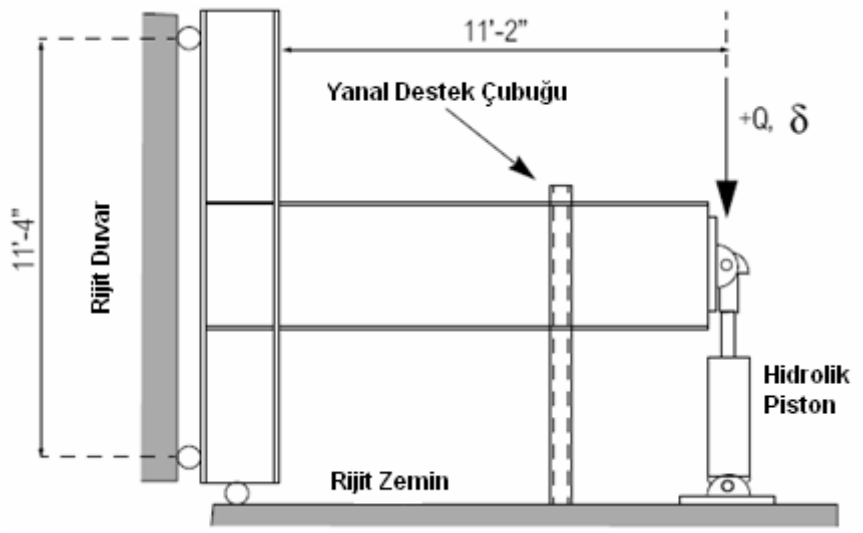
St 37 çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 8.6 da verildiği gibi programa girilmiştir.

8.5 Test Düzeneği

FEMA ve TDY 2007'ye göre test düzenekleri üzerinde birleşimler incelenecek.

8.5.1 FEMA'ya göre test düzeneği

FEMA'nın tanımladığı birleşim kapasitesini test etmek için, SAC tarafından da daha önce test edilmiş birleşimlerde kullanılan test düzeneği modelleme de kullanılacaktır.. Şekil 87 de SAC test düzeneği temsili resmi verilmiştir.



Şekil 8.7 : SAC test düzeneği

Kiriş ve kolon boyutları birim çevrilerek şu şekilde alınmıştır.

Kiriş Konsol Boyu 11' 2" = (12x11+2)x2.54 = 340.36 cm. --> 340 cm. alındı.

Mesnetler arası kolon yüksekliği 11' 4" =(12x11+4)x2.54= 345.44 cm. -->~350 cm. alındı.

Modelde kat yüksekliği hesaplandığı gibi 3.50 m. alınacak ve 3.4 m. konsol kiriş tanımlanarak konsol ucuna yükleme yapılacaktır.

Malzemenin akma sınırı üzerinde zorlanması halinde oluşan kalıcı plastik deformasyonlar bilgisayar programında dikkate alınamadığından, FEMA tarafından önerilen yükleme protokolü yaptığımız modeller de uygulamayacağız.

Dönme miktarı SAC raporlarında da belirtildiği gibi kiriş ucundaki deplasmanın kolon orta aksından itibaren kiriş konsol ucuna olan mesafeye bölünmesi ile hesaplanacaktır.

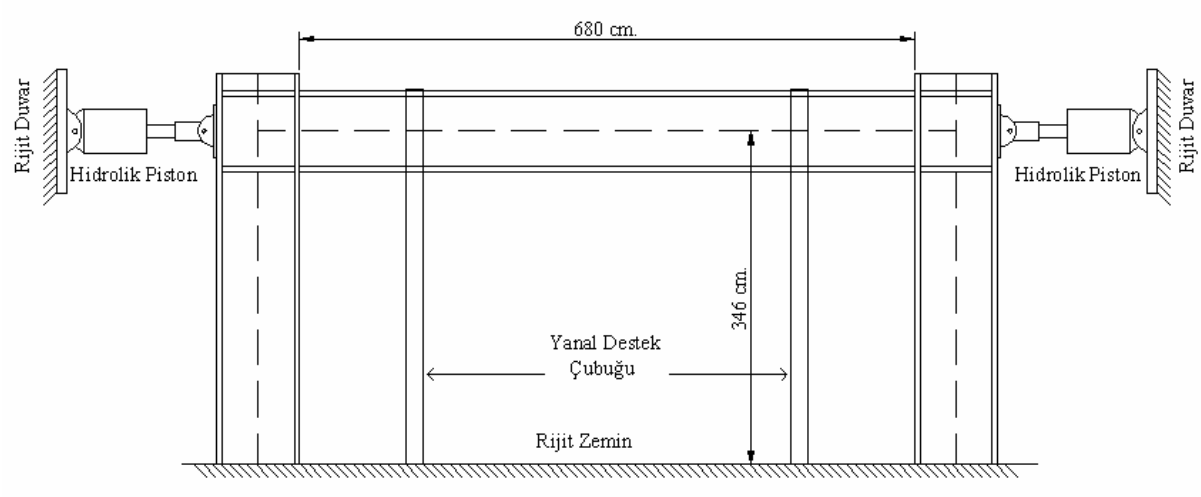
Örneğin kirişin 0.03 radyan plastik dönme yapabilmesi için FEMA ya göre birleşimin toplam 0.04 radyan dönme yapması gerekir bu ise kiriş ucunun düşeyde

Kolon Yüksekliği 39.9 cm. ve Kiriş boyu 340 cm. ise

$\delta=(340+39.9/2)x0.04=14.4$ cm. deplasman yapması gerekir.

8.5.2 TDY 2007'ye göre test düzeneği

TDY 2007 ye göre birleşimlerin kapasitesinin belirlenmesi için tek katlı bir çerçeve modellenecek ve istenilen göreli kat açısını sağlayacak kapasitede olup olmadığına bakılacak.



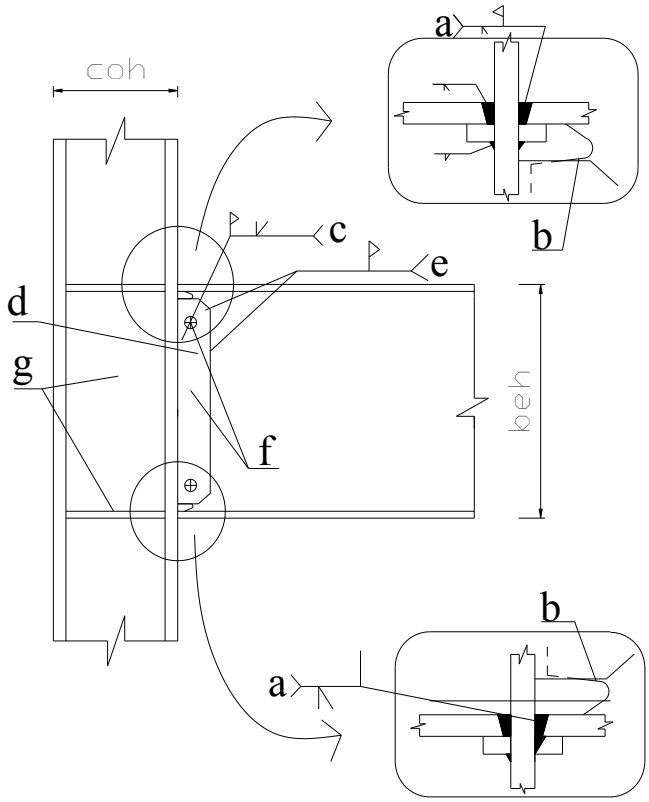
Şekil 8.8 : TDY 2007'ye göre yapılacak test düzeneği

Konsol kirişte olduğu gibi, çerçevede de yükleme protokolü programda uygulanmayacaktır. Çerçeve modelin yönetmelikte ayrıntılı bir açıklaması bulunmadığından kolonların mesnet koşullarına göre ayrı ayrı çözümler yapılacak.

8.6 Kaynak Ulaşım Deliği ve Ön Kusur

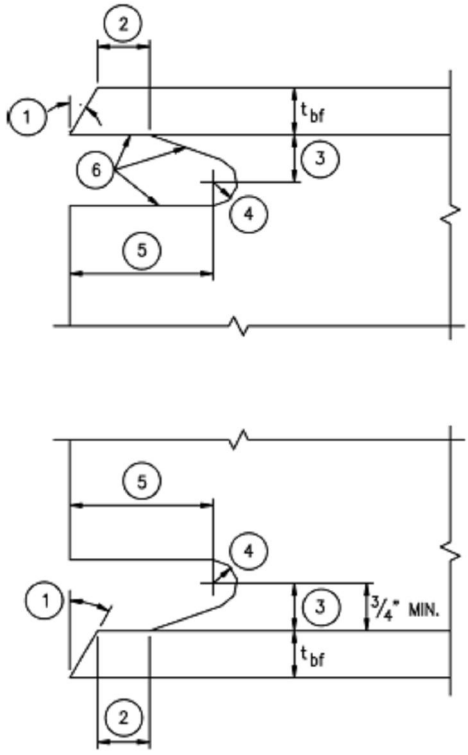
8.6.1 Kaynak ulaşım deliği

Modelleme yapılırken kolon, kiriş ve birleşim elemanlarının boyutları aynen programa 3 boyutlu katı (solid) elemanlar olarak girildi. Kaynak ulaşım deliği FEMA da belirtilen ölçülere uyularak modelde kiriş gövdesine işlendi. Bu detay kutu kolon-I kiriş birleşimlerinde de aynı şekilde uygulandı. Elemanlar santimetre (cm.) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 8.9 : Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı Birleşim

Kaynak ulaşım deliğinde FEMA'da tanımlandığı gibi hesaplanıp modele işlendi



Şekil 8.10 : Kaynak Ulaşım Deliği Detayı

Bu birleşimde,

a. Kiriş üst ve alt başlığı, kolona yarım V nüfuziyetli küt kaynakla birleştirilecektir. Bu küt kaynakların emniyet gerilmeleri, birleştirildikleri çelik malzemenin emniyet gerilmesine eşit alınacaktır.

   Üst başlık birleşiminde, ya kaynak karşılama parçası kaynaklama işleminden sonra yerinden alınır ve en az 5mm kalınlıklı köşe kaynağı çekilir ya da karşılama parçası yerinde bırakılır; ancak, karşılama parçası altına en az 5mm kalınlığında köşe kaynağı çekilir. Alt başlıkta, kaynak karşılama parçası yerinden alınır ve en az 5mm kalınlığında köşe kaynağı çekilir.

b. Kaynak ulaşım deliği detayları Şekil 3.3'de görüldüğü gibi olacaktır.

   1- Kaynak standartlarınca tanımlı, yarım V dikişi küt kaynak

   2- En az 1/2" veya t_{bf} kadar mesafe bırakılacak.

   3- 3/4 t_{bf} ile t_{bf} arası kadar mesafe bırakılacak.

   4- En az 3/8" yarı çap

   5- $3t_{bf}$ kadar mesafe bırakılacak.

c. Derin nüfuziyetli küt kaynak.

d. Kiriş gövde kalınlığına eşit et kalınlığında kayma levhası.

e. Kiriş gövdesine, kayma levhasını birleştiren köşe kaynağı.

f. Montaj bulonları.

g. Süreklilik levhaları ve kayma bölgesi takviye levhası.

Birleşim Detayı Parametreleri Uygulama Sınırları

Kiriş enkesit yüksekliği ≤ 1000 mm

Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı ≥ 7

Kiriş başlık kalınlığı ≤ 25 mm

Kolon enkesit yüksekliği ≤ 600 mm

Kaynak ulaşım deliği gerekli

Başlık levhası kaynağı Tam penetrasyonlu küt kaynak

Katı model tamamlandıktan sonra sonlu elemanlara bölünmüştür.

Verilen kiriş boyutu için kaynak ulaşım deliği şu şekilde olmalıdır.

Çizelge 8.2 : Kaynak Ulaşım Deliği Boyutları

	KISIM				
KİRİŞ	1	2	3	4	5
I 450	2.6	2.6	2.6	0.95	7.8
HEA 400	2	2	2.5	1.5	7.5

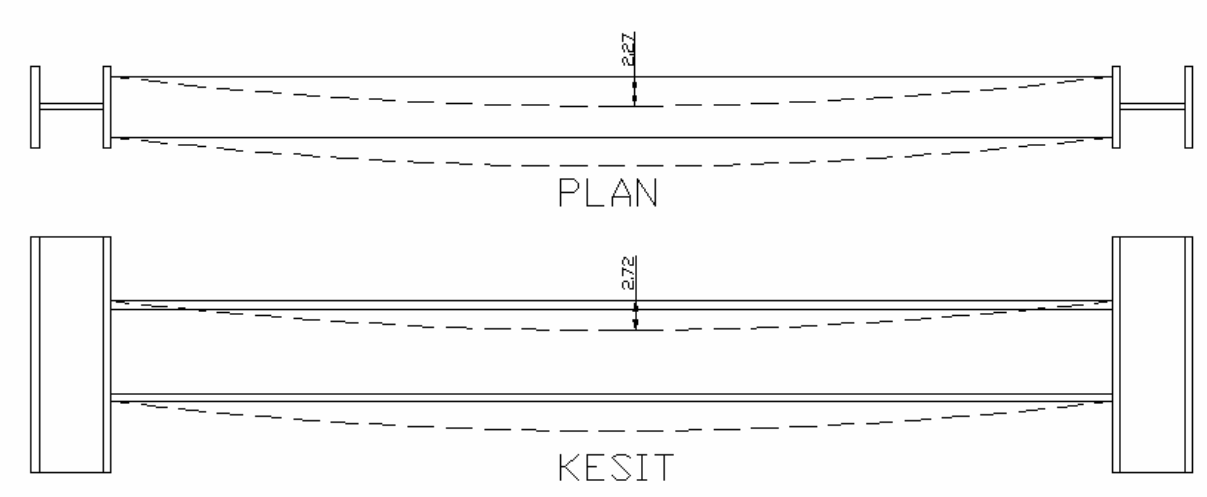
8.6.2 Ön kusur

Yapının imalatında kullanılacak çelik elemanlar yerlerine yerleştirilinceye kadar bir çok dış etkiler altında kalırlar. Bunlar, nakliye için vinçler tarafından kaldırılmaları, istiflenmeleri, ısıl işlem görmeleri gibi bazı ilk geometrik formunu bozacak etkiler olarak sıralanabilir. Elemanın ilk formunu koruyamaması mühendisin hesaplarda belirleyemeyeceği ek etkiler altında kalmasına ve hedeflenenin altında bir performans vermesine neden olacaktır. Bu farkı da göz önüne almak için

hazırlanacak modele geometrik ön kusur verilmiştir. Bu ön kusur, plan düzleminde $\frac{\ell}{300}$; düşeyde $\frac{\ell}{250}$ kadar dır. [DIN 18800]

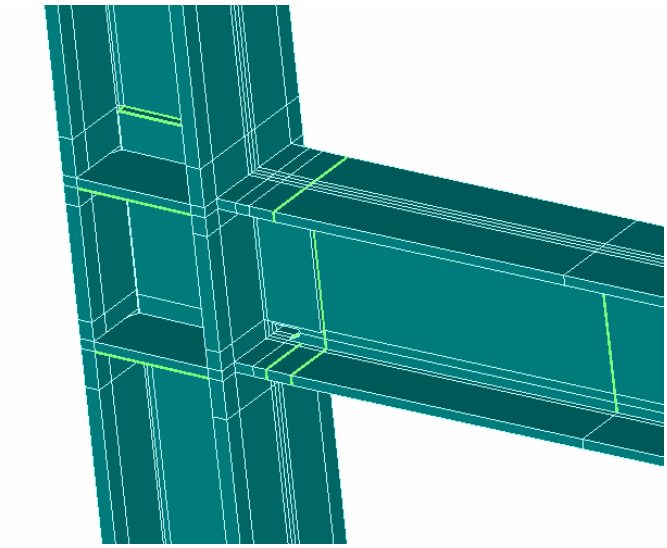
Hesabımızda konsol boyu 340 cm. Toplam açıklık 680 cm.

$\frac{\ell}{300}$= 680/300=2.27 cm. $\frac{\ell}{250}$=680/250=2.72 cm.



Şekil 8.11 : Ön kusur

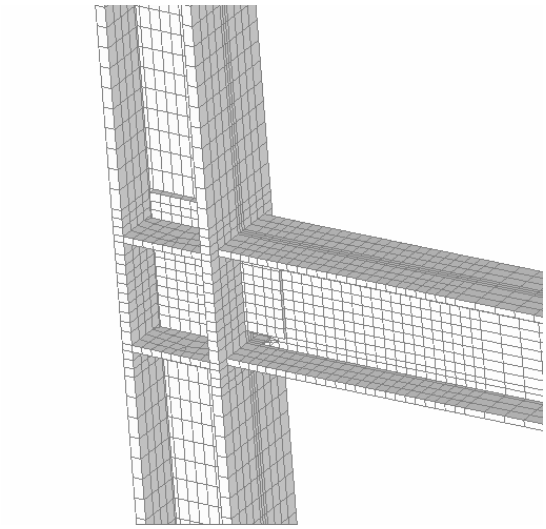
Belirtilen geometrik değerler hesaplandıktan sonra programa girilerek Şekil 8.12 deki katı (solid) model elde edildi.



Şekil 8.12 : Katı (solid) model

8.7 Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi

Model FEMAP programı kullanılarak hazırlanmıştır. Model sonlu elemanlara bölünürken hareketin fazla olduğu birleşim noktası yoğun bir şekilde bölünürken mesnetlere doğru programın hızlı sonuç vermesi için daha seyrek elemanlara bölünmüştür. Sonlu eleman tipi olarak, modellemede 3 boyutlu solid (katı) olarak girildiğinden ve modellenen profiller düzgün dörtgen şekilli elemanlar olduğundan hegzagonan (8 düğüm noktalı dörtgen prizma) eleman kullanılması uygun görülmüştür. Sonlu elemanlara bölme işleminden sonra mesnet koşulları ve yükler tanımlanmıştır. Mesnetler, konsol kirişli ve mafsallı çerçeve modellerde, kolon uçlarında iki noktadan mafsallı olarak, ankastre çerçeve sistemlerde ankastreliği sağlamak için tüm kolon uç düğüm noktaları mafsallı girilmiştir. Yükler ise sistemde kopma gerilmelerini (st37 için 3.7 t/cm²) oluşturacak kadar büyük seçilmiştir. Yük birimi ton girilmiştir.



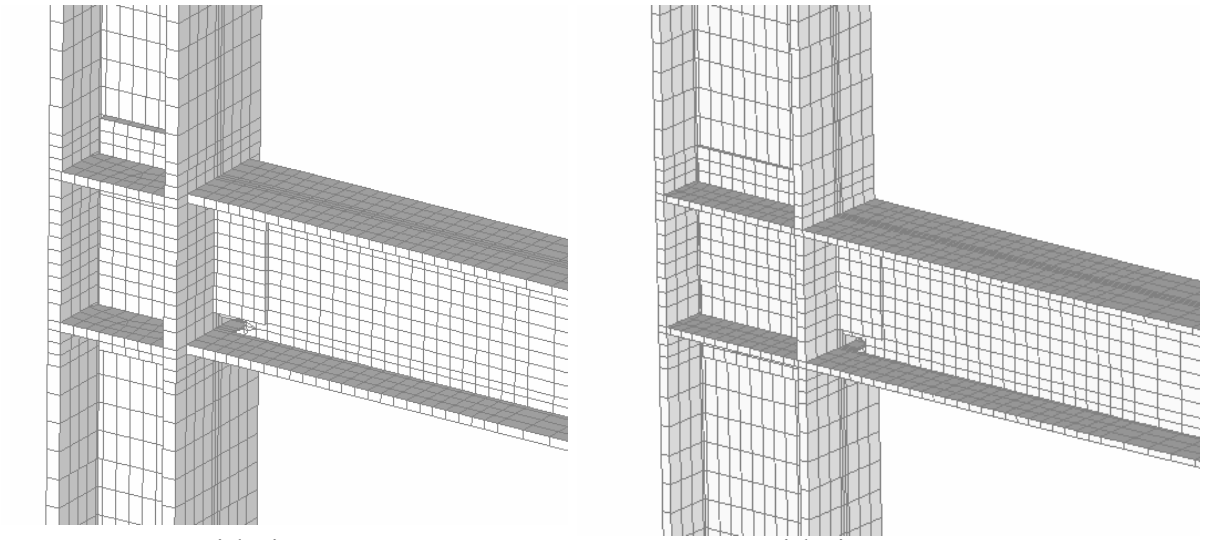
Şekil 8.13 : Örnek sonlu elemanlar modellemesi

9. I KOLON – I KİRİŞ BİRLEŞİM ANALİZLERİ

Her birleşimi FEMA ve TDY 2007'ye göre kurduğumuz modeller ile analiz edildi.

9.1 FEMA' ya Göre Yapılan Analizler

Birleşim 1 ve Birleşim 2 için yapılan sonlu elemanlar modelleri aşağıdaki gibidir.

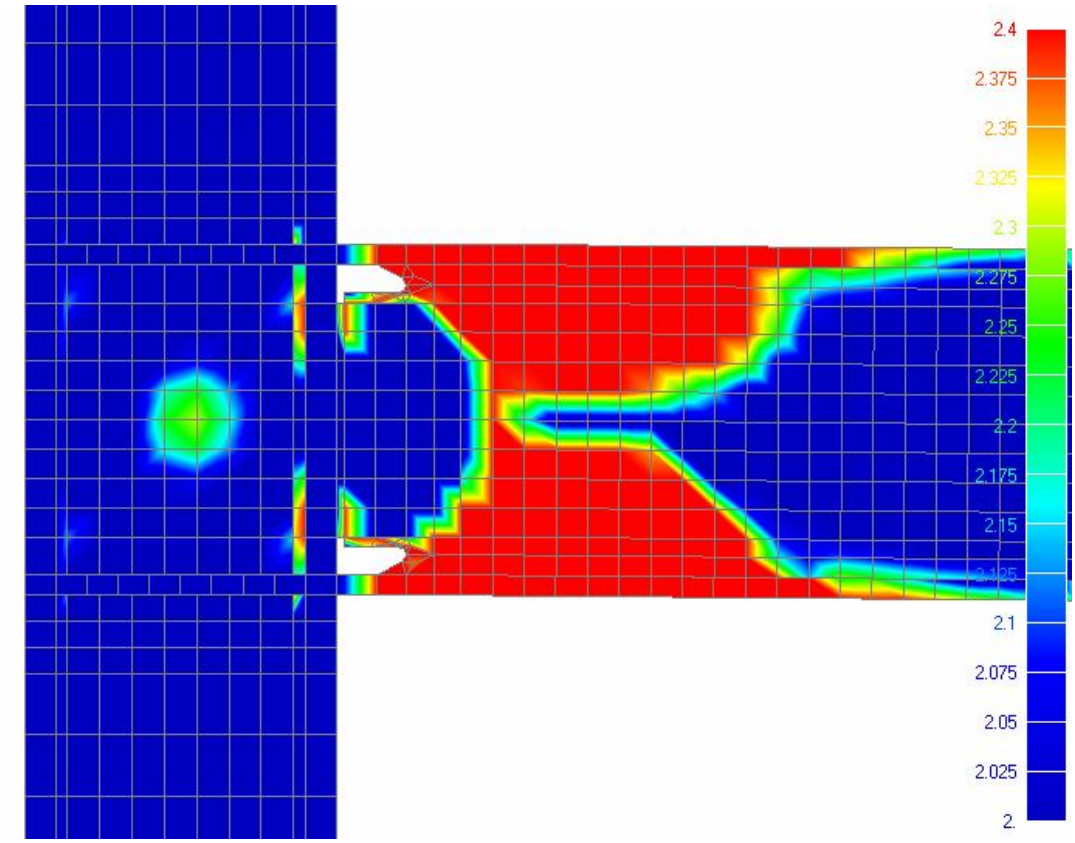


Birleşim 1 Birleşim 2

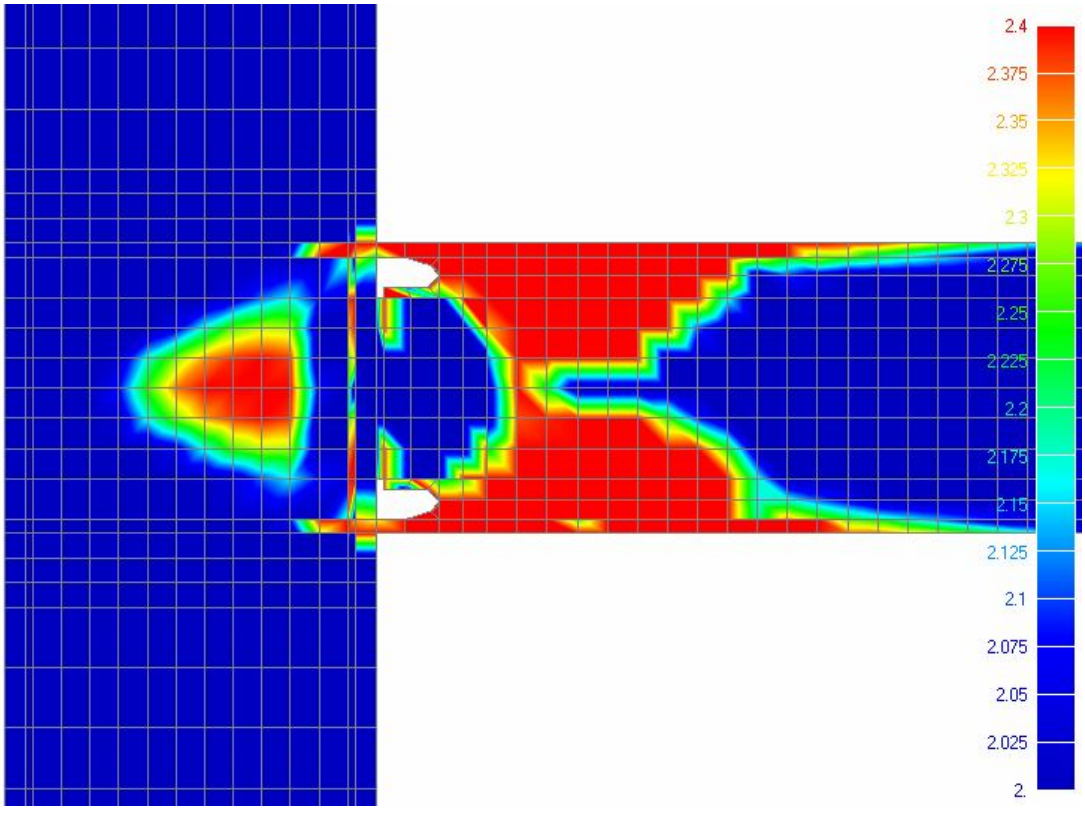
Şekil 9.1 : FEMA modelinin sonlu elemanlara bölünmüş durumu

Her iki modelde de görüldüğü gibi süreklilik levhaları ve kolon gövde takviye levhaları birleşim bölgesine yerleştirilmiştir.

Grafiklerde 0,04 radyanlık toplam dönmenin veya daha önce oluşuyor ise 3.7 t/cm² lik kopma gerilmesinin oluştuğu andaki akma bölgelerinin resimleri verilmiştir. Analizlere st37 için 3.7 t/cm² lik kopma gerilmesinin oluştuğu ilk durumda son verilmiştir.



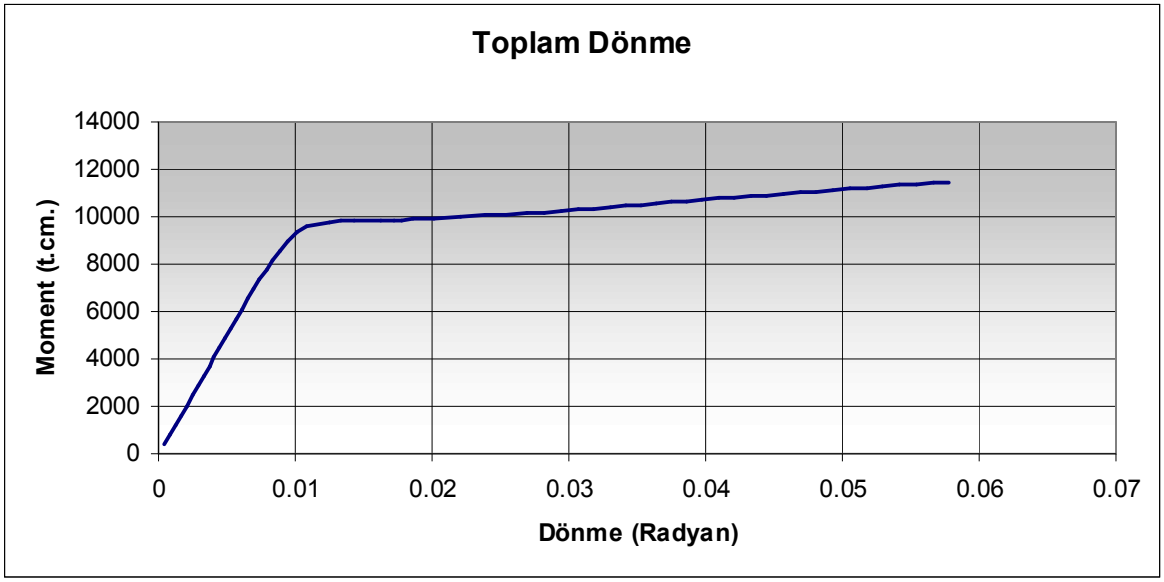
Şekil 9.2 : Birleşim 1 Akma bölgesi



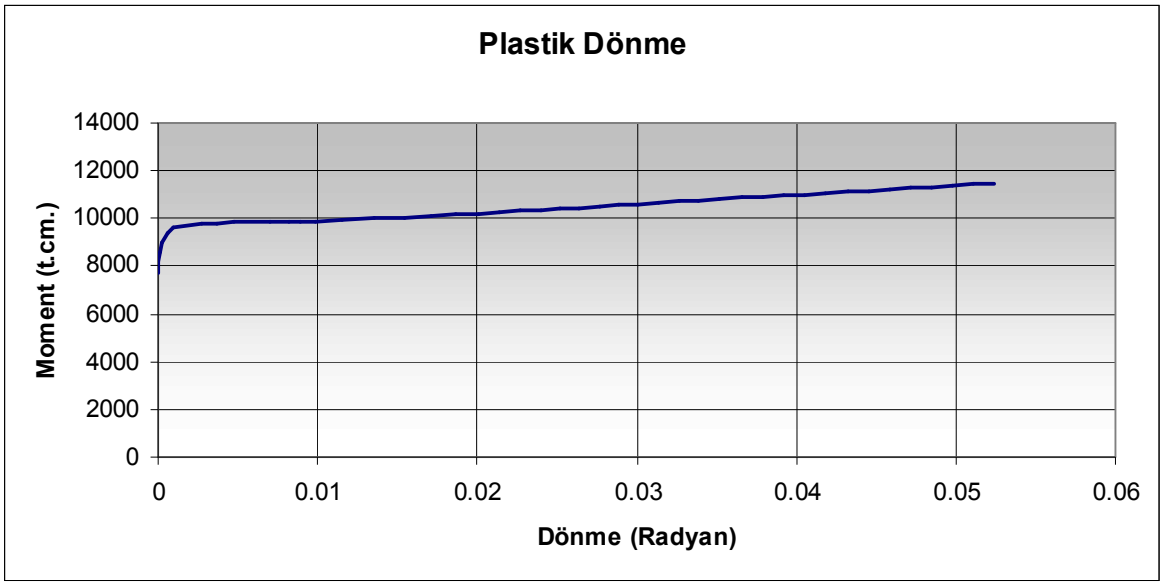
Şekil 9.3 : Birleşim 2 Akma bölgesi

Resimlerde de görüldüğü üzere her iki birleşimde de plastik mafsal oluşmuştur. Birleşim 2'nin kolon gövdesinde de akma başlamıştır. Bu toplam dönmeye katkıda bulunur

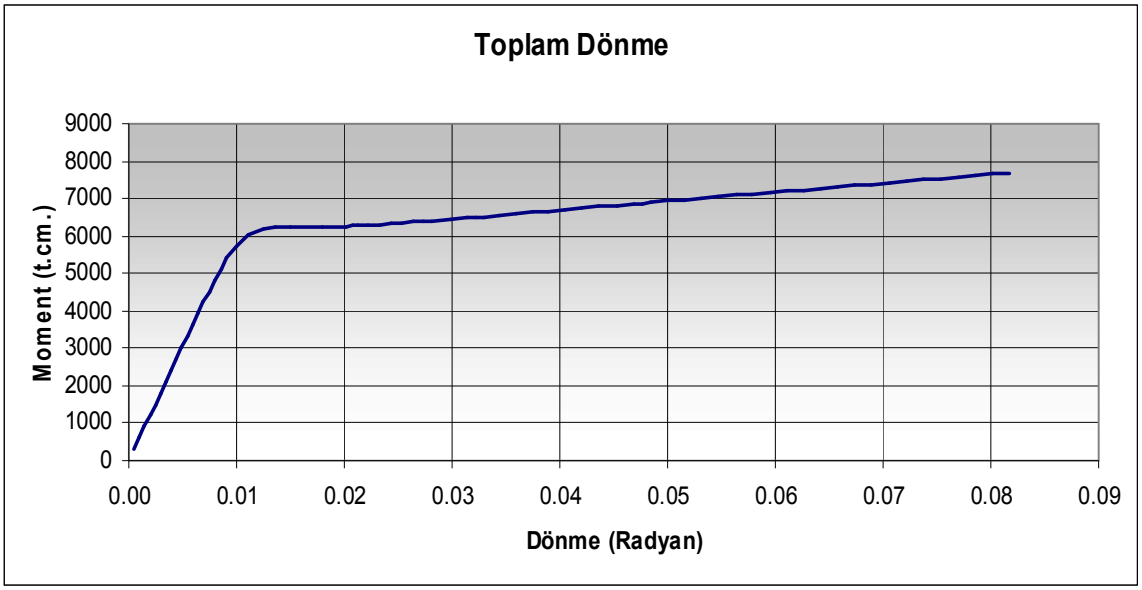
Bu birleşimlerin toplam ve plastik dönme grafikleri aşağıdaki gibidir.



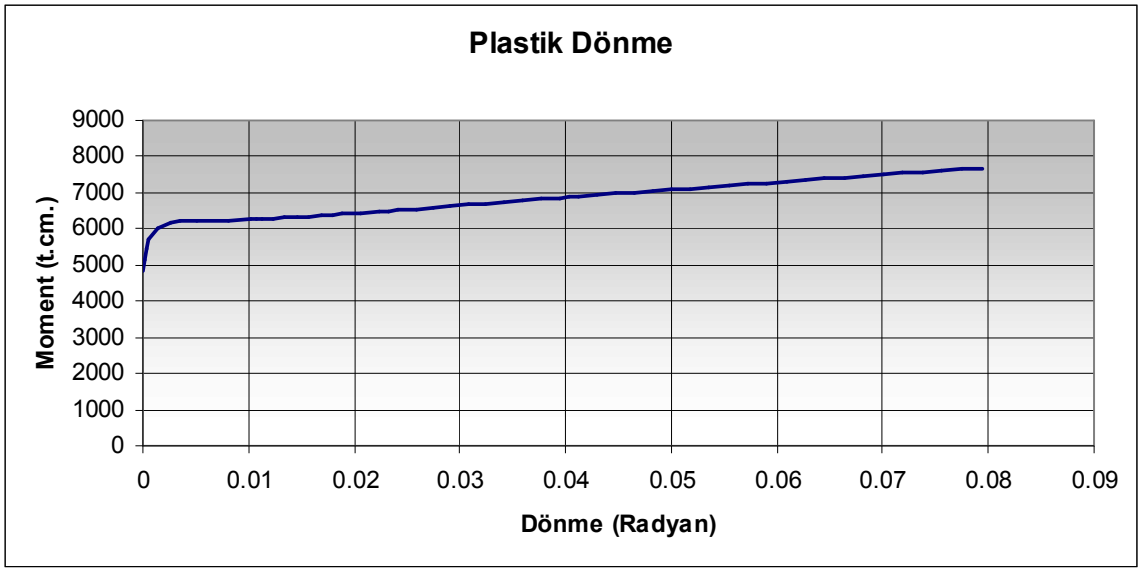
Şekil 9.4 : Birleşim 1 toplam dönme



Şekil 9.5 : Birleşim 1 plastik dönme



Şekil 9.6 : Birleşim 2 toplam dönme



Şekil 9.7 : Birleşim 2 plastik dönme

Birleşim 2'nin Birleşim 1'e göre daha fazla toplam ve plastik dönme yaptığı görülüyor. Bunun nedenini kiriş yüksekliğinin azalması olarak düşünebiliriz. Burada toplam dönme grafiklerinden eğrinin eğiminin ilk değiştiği nokta yaklaşık 0.01 radyanlık dönmeye denk geliyor. Buradan plastikleşmenin 0.01 radyanlık toplam dönmeden sonra başladığını söyleyebiliriz. Daha öncede bahsettiğimiz gibi FEMA, plastik dönme ile toplam dönme arasında 0.01 radyanlık fark olduğunu belirtiyordu. Bu grafik FEMA'nın söylediğini doğruluyor.

El ile grafiklerin doğruluğu hakkında şöyle bir kontrol yapabiliriz.

Birleşim 1 deki kirişin mukavemet momenti

$W_x=3447\ cm^3$

profilde plastik deformasyonların başlaması gereken moment

$M_x=3447x2.4=8272$ t.cm. dir.

Yine Birleşim 2 deki kirişin mukavemet momenti

$W_x=2218\ cm^3$

profilde plastik deformasyonların başlaması gereken moment

$M_x=2218x2.4=5323$ t.cm. dir.

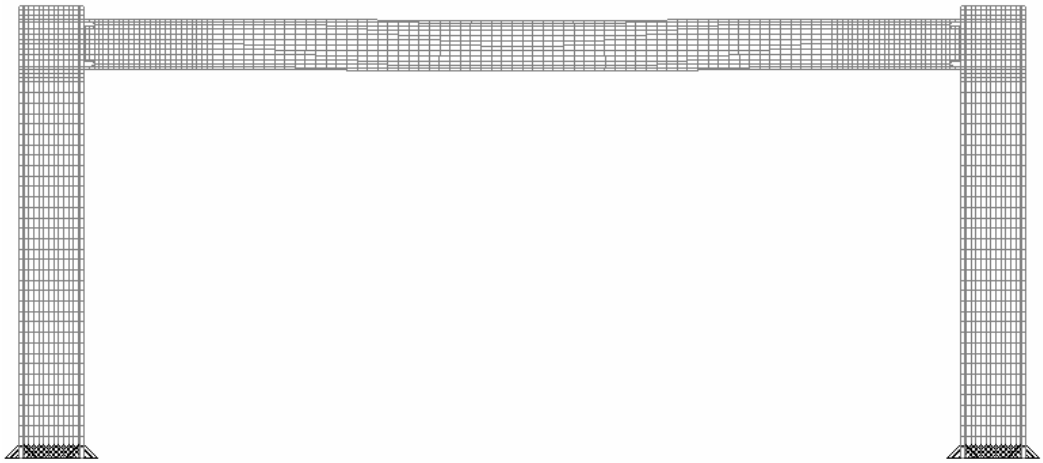
Birleşim 1 ve 2 nin plastik dönme grafiklerine bakar isek bu momentler mertebesinde, plastik uzamalardan dolayı oluşan plastik dönmeler başlamıştır.

Grafiklerin birbiri ile uyumluluğunu kontrol edersek, toplam dönmede grafiğin eğiminin değiştiği nokta, akmanın başladığı noktadır ve bu noktadan sonra plastik uzamalar başlar. Bu noktadaki moment değerlerini, plastik dönme grafiğindeki değerler ile karşılaştırdığımızda plastik dönmenin başladığı moment değerleri ile aynı olduğunu görürüz.

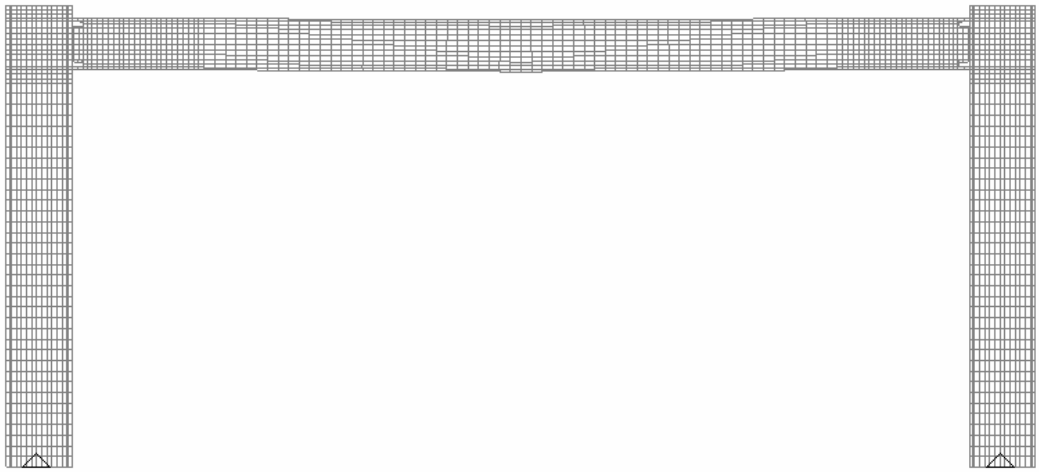
Sonuç olarak, Birleşim 1 ve 2'nin istenilen dönme kapasitelerini sağlamıştır.

9.2 TDY 2007'ye Göre Yapılan Analizler

Çerçeve sistemlerde 0.04 radyan göreli kat açısını elde etmek için mesnet koşulları farklı, iki ayrı model kullanıldı. Bunlardan ilkinde kolonların tüm düğüm noktaları tutularak ankastrelik sağlandı. İkincisinde ise her kolonda ortadaki iki düğüm noktaları tutularak mafsallı bir mesnet tanımlandı.

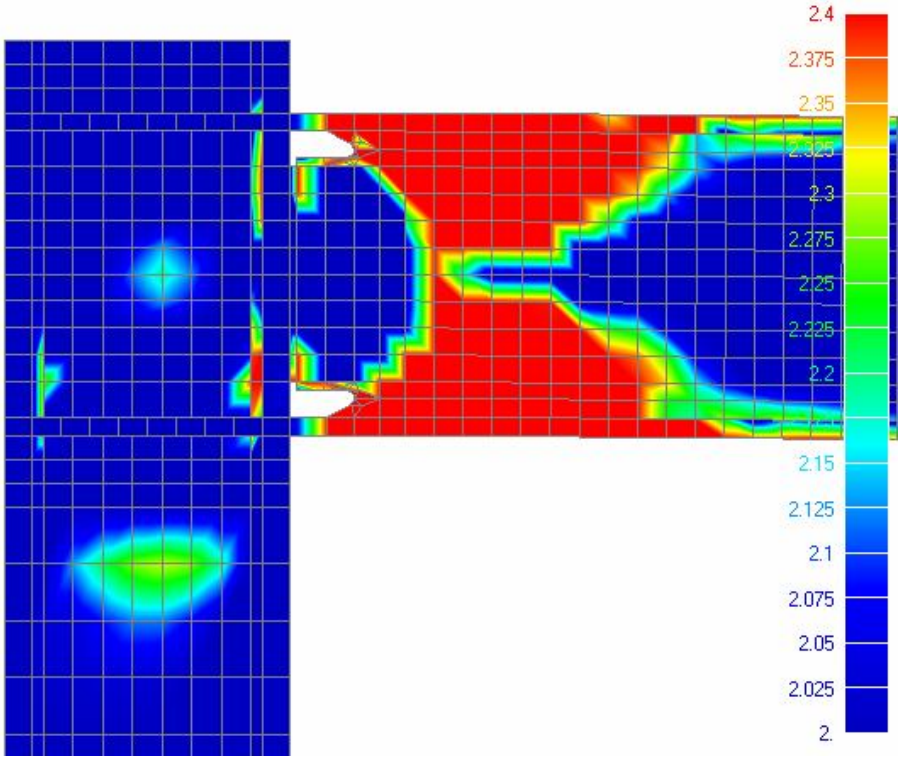


Şekil 9.8 : Ankastre mesnetli çerçeve sistem



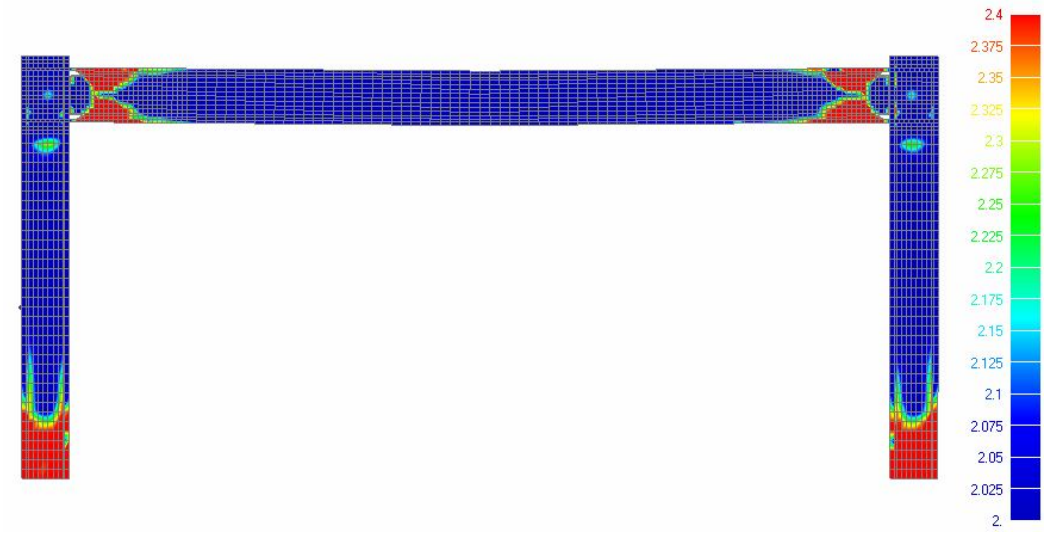
Şekil 9.9 : Mafsallı mesnetli çerçeve sistem

Yukarıdaki gibi modellenen birleşimlerin akma bölgeleri ve dönme grafikleri ise söyle sonuçlandı.



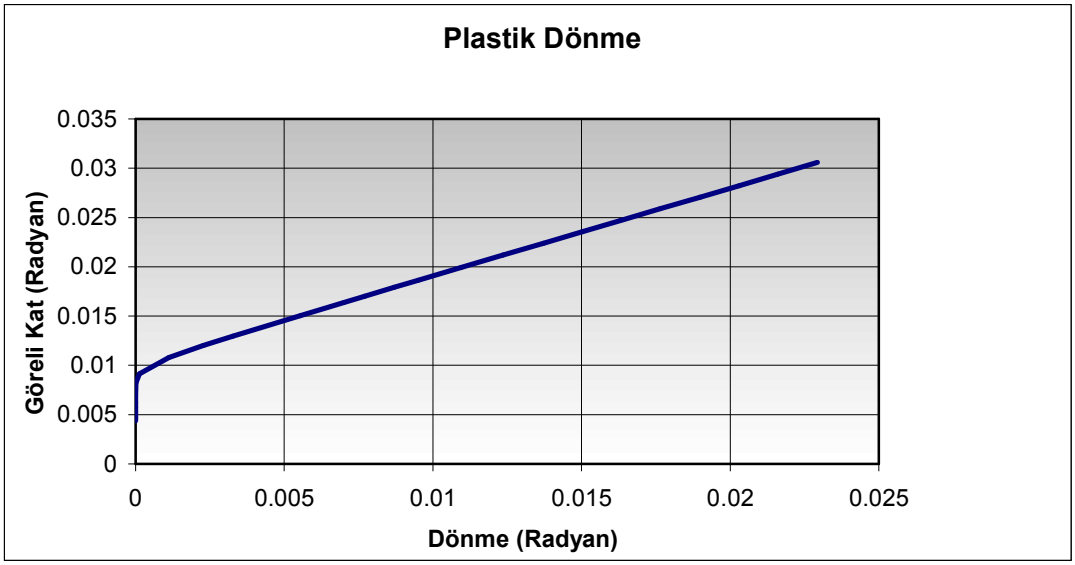
Şekil 9.10 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 1 akma bölgesi

Ankastre mesnetli çerçevenin tamamına bakınca mesnetlerde kolonlarda da akmanın başladığını görüyoruz.



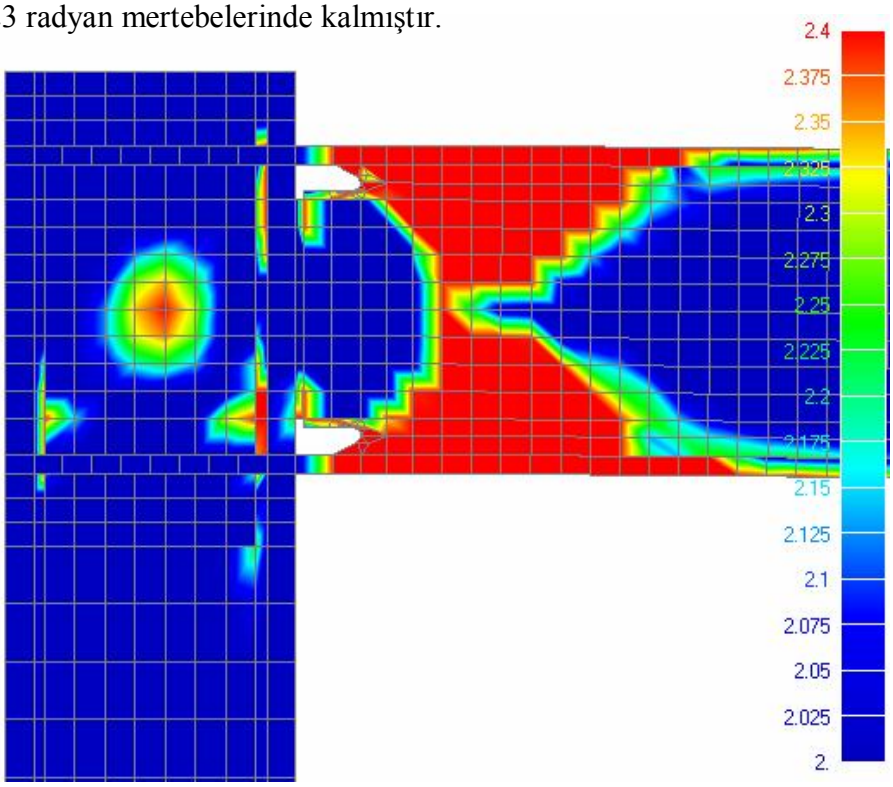
Şekil 9.11 : Ankastre mesnetli çerçevede akma bölgeleri genel görünüm

Bu birleşimin göreli kat açısına göre yaptığı plastik dönme grafiği ise Şekil 9.12 de ki gibidir.

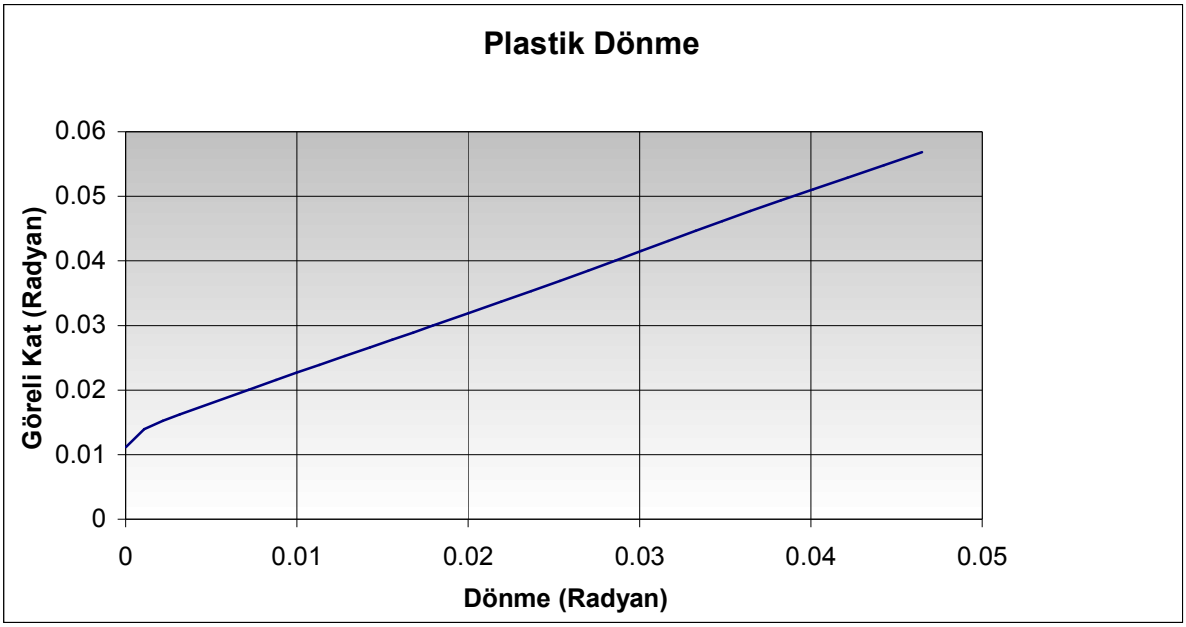


Şekil 9.12 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 1 göreli kat – plastik dönme grafiği

Ankastre birleşimde istenilen göreli kat açısı ve plastik dönme sağlanamadan sistemde kopma gerilmesine ulaşılmıştır. Göreli kat ötelemesi 0.03 radyan, Plastik dönme 0.023 radyan mertebelerinde kalmıştır.



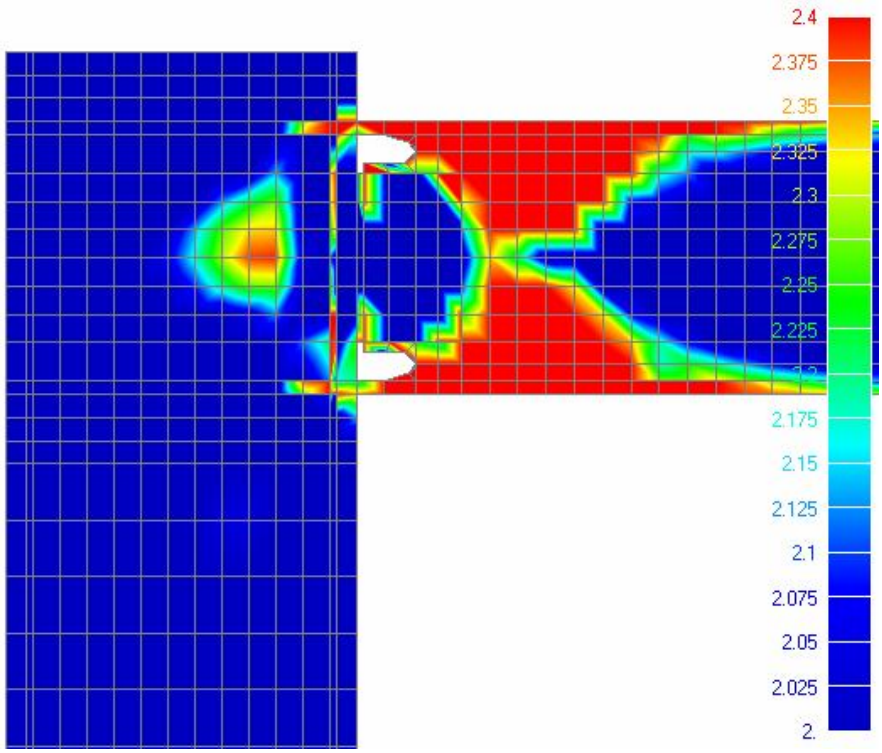
Şekil 9.13 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 1 akma bölgesi



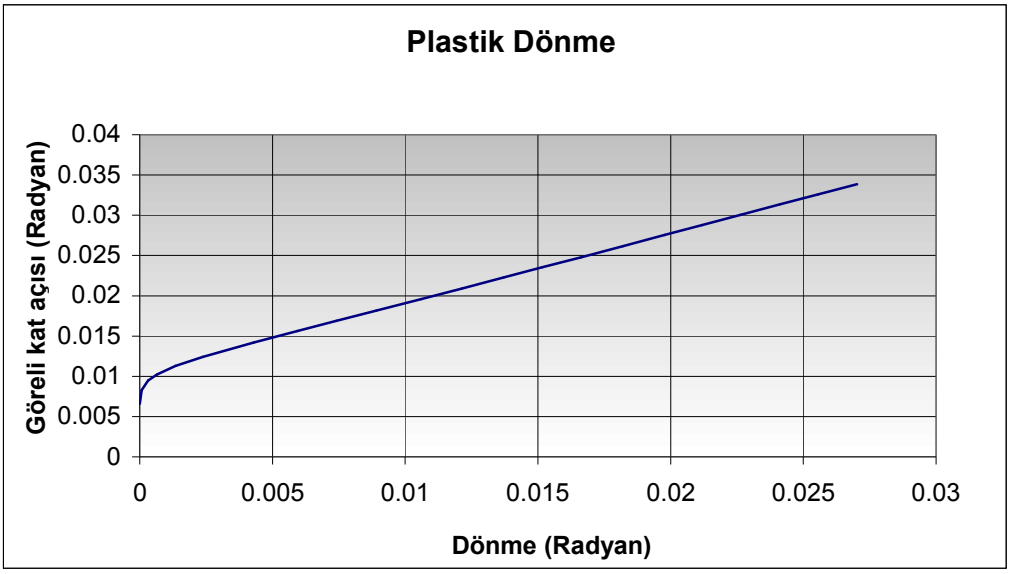
Şekil 9.14 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 1 göreli kat – plastik dönme grafiği

Mafsallı çerçeve modelde grafikten de görüldüğü üzere 0,04 radyan göreli kat ötelemesi ve 0,03 radyan plastik dönme sağlanmıştır. Burada yine dikkat edilir ise yaklaşık 0,01 radyanlık göreli kat ötelemesi ile plastik uzamalar başlamıştır. Göreli kat ötelemesi, toplam dönme gibi elastik ve plastik uzamalardan oluşan dönmeleri içine aldığından, toplam dönme gibi de yorumlayabiliriz.

Çerçeve modelde de göreli kat ötelemesi (toplam dönme) ile plastik dönme arasında FEMA'nın da tanımladığı gibi 0,01 radyan fark olduğunu görüyoruz. Yine göreli kat ötelemesi 0,04 radyan iken Plastik dönme 0,029 radyan civarında olduğu okunuyor.



Şekil 9.15 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 2 akma bölgesi

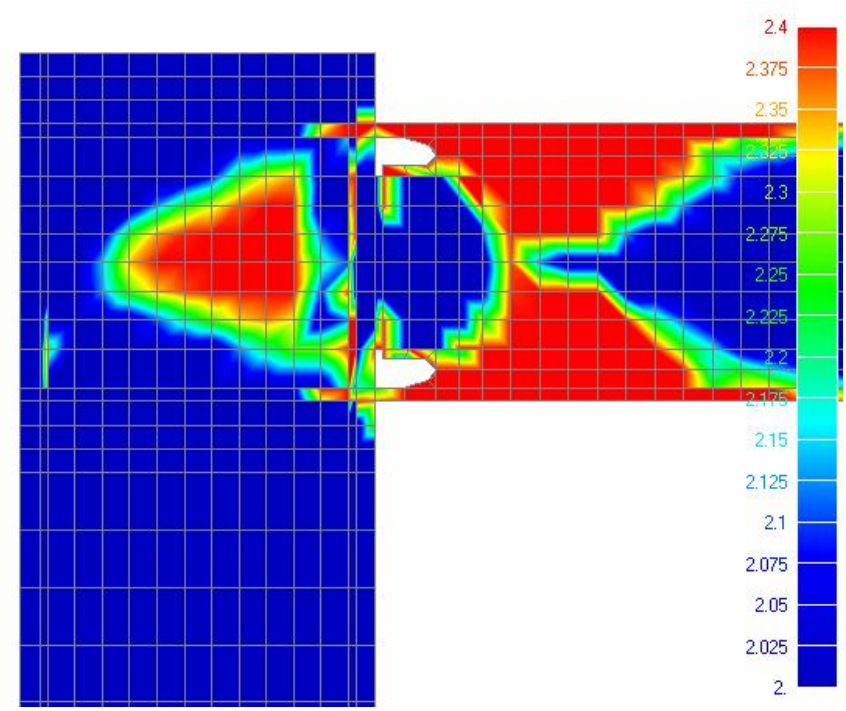


Şekil 9.16 : Ankastre mesnetli çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği

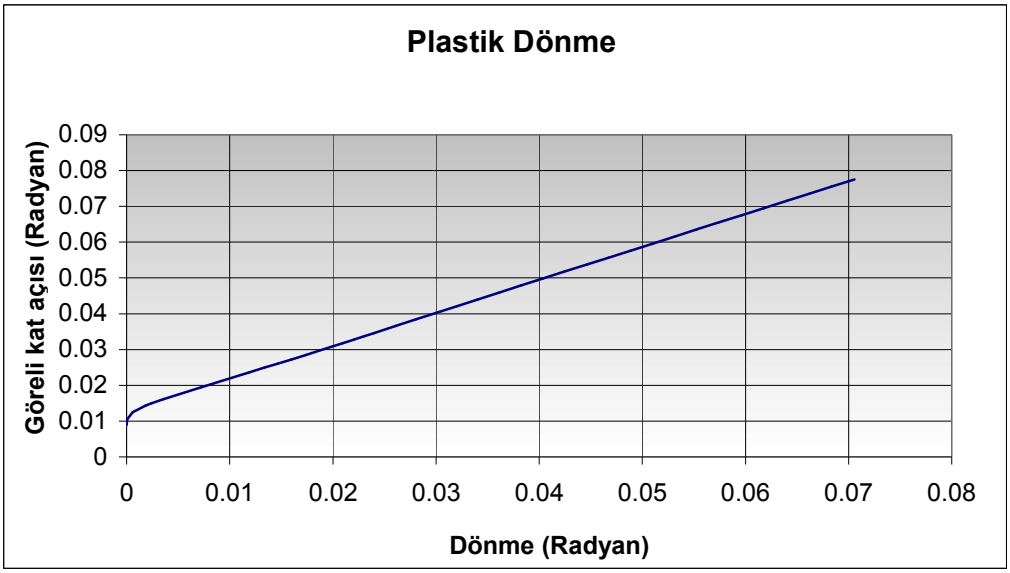
Birleşim 1'de olduğu gibi Birleşim 2'de de ankastre mesnetli çerçeve modelde hedef dönme açısına ulaşılamamıştır. Birleşim 2 de,

Göreli kat açısı 0,034 radyan

Plastik dönme 0,027 radyan mertebesinde kalmıştır.



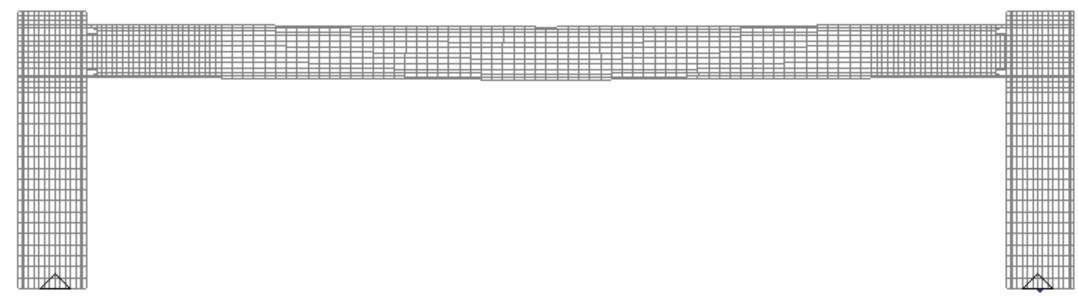
Şekil 9.17 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 2 akma bölgesi



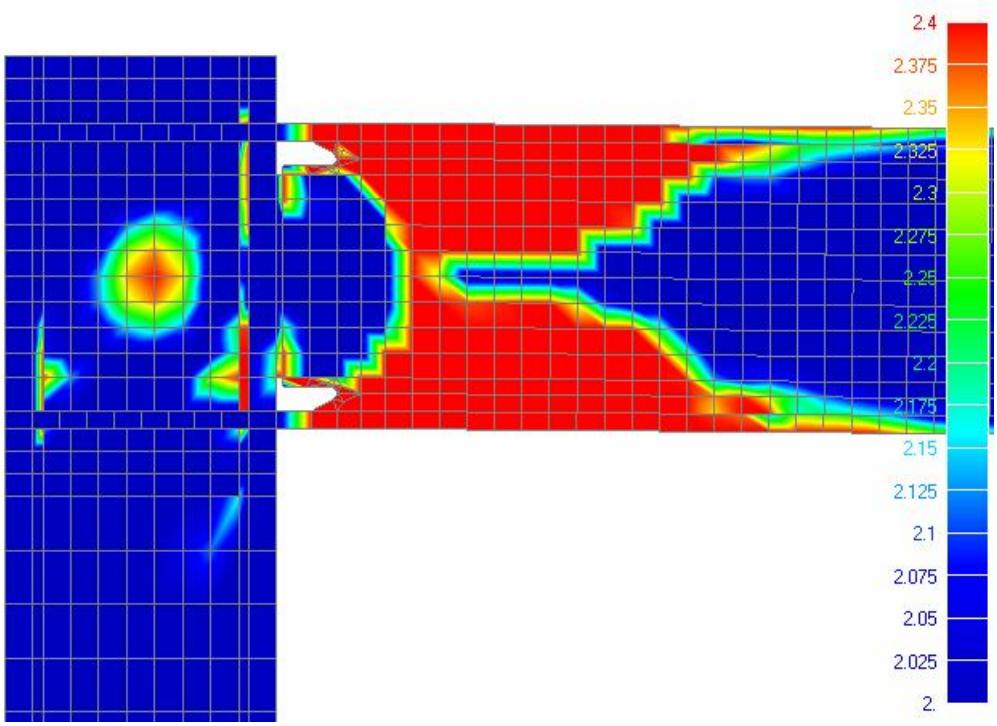
Şekil 9.18 : Mafsallı mesnetli çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği

Göreli kat açısı 0,078 radyan, plastik dönme 0,07 radyan mertebesine ulaşmıştır. Göreli kat açısına kolon gövdesindeki akmanın katkısı olmuştur.

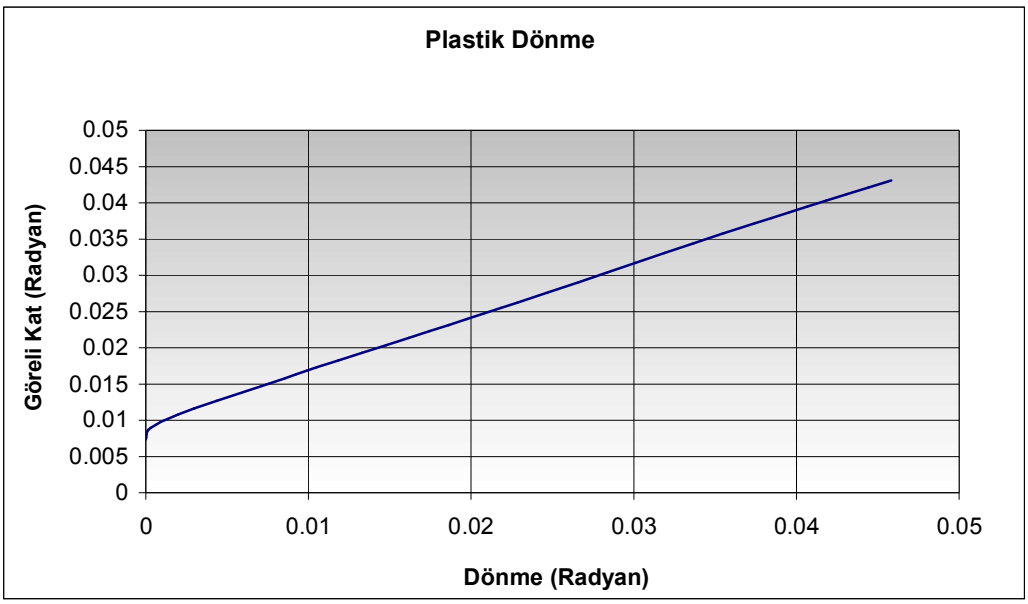
Ankastre çerçeve sistemde kirişte plastikleşme başladıktan bir süre sonra kolonda ankastre mesnet ucundan itibaren plastikleşmeler başlıyor. Çerçevede 0.04 radyan göreli kat ötelemesi sağlansa dahi bu noktadaki plastikleşme nedeni ile kirişin yaptığı plastik dönme azalıyor. Başka bir deyişle ankastre mesnetli çerçeve birleşim, konsol model veya mafsallı çerçeve modeline göre daha az zorlanmış oluyor. Yönetmeliğin bu belirsizliği ortadan kaldırması için göreli kat ötelemesi ibaresi ile birlikte net bir test modelini tanımlaması gerektiğine inanıyoruz. Şayet tek katlı bir çerçeve modelde test yapılacak ise, tüm plastikleşmenin kirişte olması hedeflendiğinden, test modelinin, mafsallı çerçeve modeli olması gerektiğini düşünüyoruz. İki veya daha fazla katlı bir çerçeve modeli düşünülürse ilk katında yine aynı problem ile karşılaşılacaktır. FEMA'nın test düzeneği ile karşılaştırılarak yorumlar isek, orada da kolon üst noktaları mafsallı olarak mesnetlendirilmiş idi. Fakat düzenekte kolonlar kat ortasından kesilmiş ve momentin sıfır olduğu noktalardan mesnetlenmiş. Momentin bu noktalarda sıfır olması, mesnetlerin mafsallı olmasını ve yerini mantıklı kılıyor. Aynı mantık ile çerçeve sistemde momentin sıfır olduğu noktalardan (kat ortasından) çerçeve kesilip bu noktalardan mafsallı olarak mesnetlendirilmesi gerekir. Bu yorumdan hareket ile çerçeve modelli bir kez de kat ortasından bölerek modelleyip sonuçları inceledik.



Şekil 9.19 : Mafsallı yarım kat çerçeve model



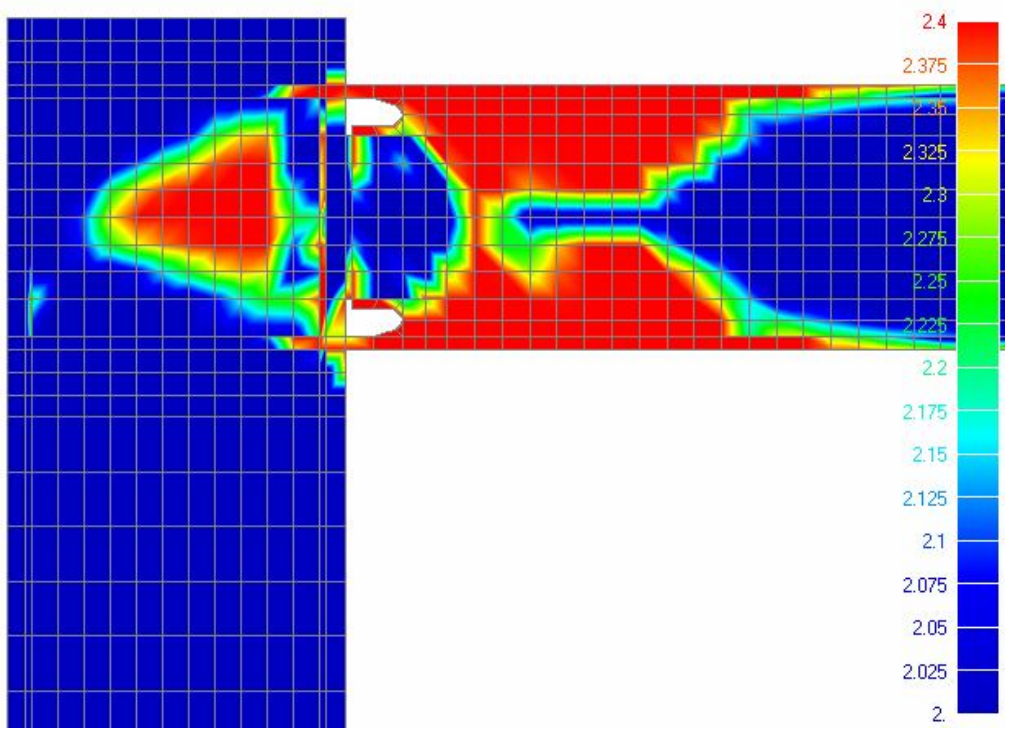
Şekil 9.20 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 1 akma bölgesi



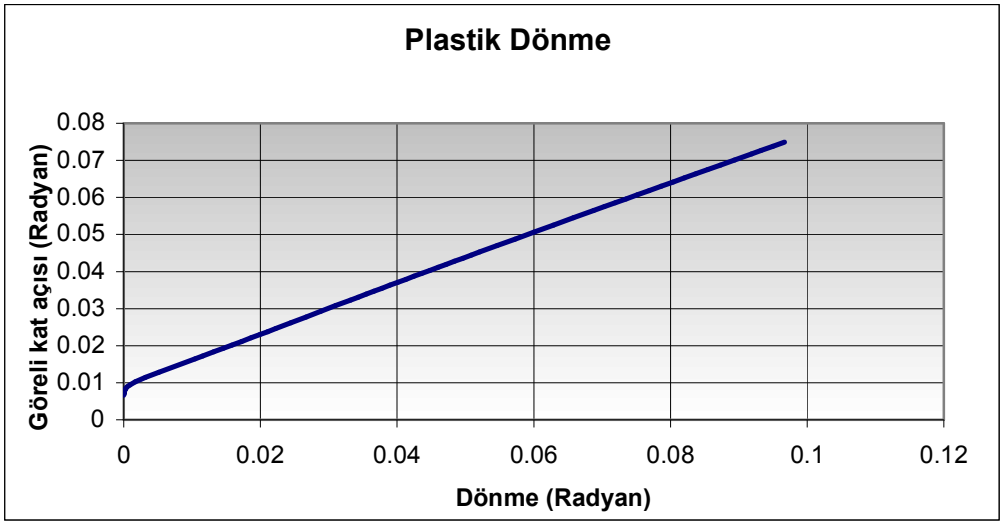
Şekil 9.21 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği

Yarım kat çerçeve model sonuçlarını tam kat ile karşılaştırdığımızda kirişin plastik dönmelerinin yaklaşık eşit olduğunu, göreli kat açısı ile plastik dönme arasındaki

ilişkinin değiştiğini görüyoruz. Tam kat çerçeve model 0,04 radyan göreli kat açısı yaptığında plastik dönme 0,03 radyanın biraz altında, yarım kat çerçeve model de ise 0,04 radyan göreli kat açısına karşılık yaklaşık 0,04 radyan plastik dönme yapıyor. Önceki konsol modellerde ve FEMA'nın tanımında toplam dönme ile plastik dönme arasında 0,01 radyanlık fark olduğunu söylemiştik. Bu neden ile tam çerçeve mafsallı mesnetli modelin en uygun test düzeneği olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 9.22 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 2 akma bölgesi



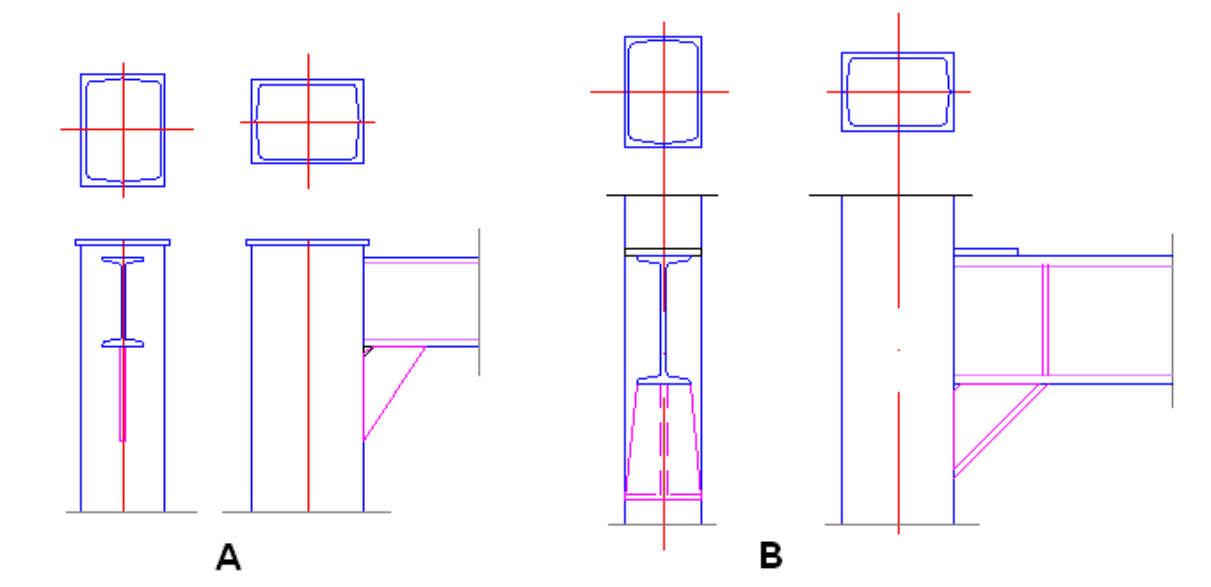
Şekil 9.23 : Mafsallı mesnetli yarım kat çerçeve birleşim 2 göreli kat – plastik dönme grafiği

Birleşim 2 içinde Birleşim 1 de olduğu gibi göreli kat açısı ve plastik dönmeler arasında farklılıklar görülüyor. 0,04 radyan göreli kat ötelemesine karşılık gelen plastik dönme 0,037~0,038 radyan civarlarında. Tam kat çerçeve modelde bu fark 0,01 radyan civarında idi. Bu modelden de tam kat çerçeve modelin daha uygun sonuçlar verdiği sonunca varılıyor.

10. KUTU KOLON – I KİRİŞ BİRLEŞİM ANALİZLERİ

Kutu kesitli kolon - kiriş birleşimlerde süreklilik levhası uygulama zorluğundan dolayı bu tip birleşimler genelde tercih edilmemektedir. Bu birleşimlerde süreklilik levhası konulmaz ise birleşimin rijit olarak kabul edildiği hesaplar gerçeği yansıtmayacaktır.. Birleşimler beklenen performansı göstermeden mafsallaşacak ve taşıma gücünü kaybedecektir.

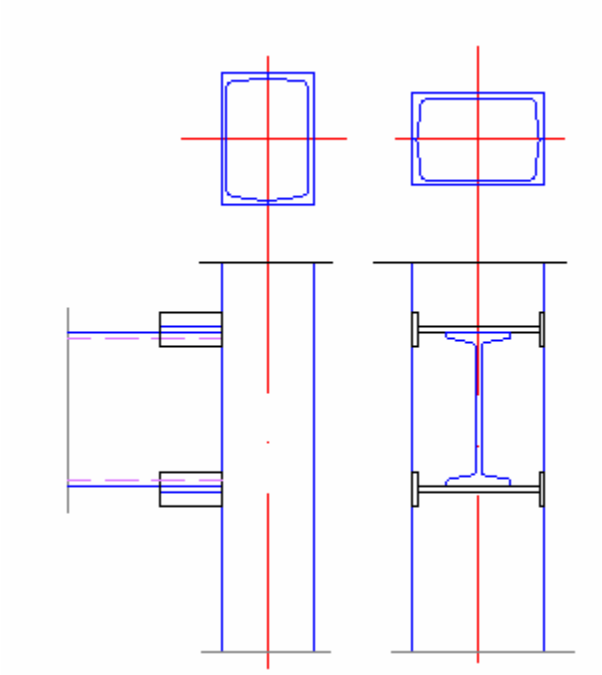
Kutu kesitli kolon kullanılan birleşimlerde piyasada sıkça yanlış olarak kullanılan birleşim tipleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 10.1 : Uygulamada sık görülen hatalı birleşim detayları

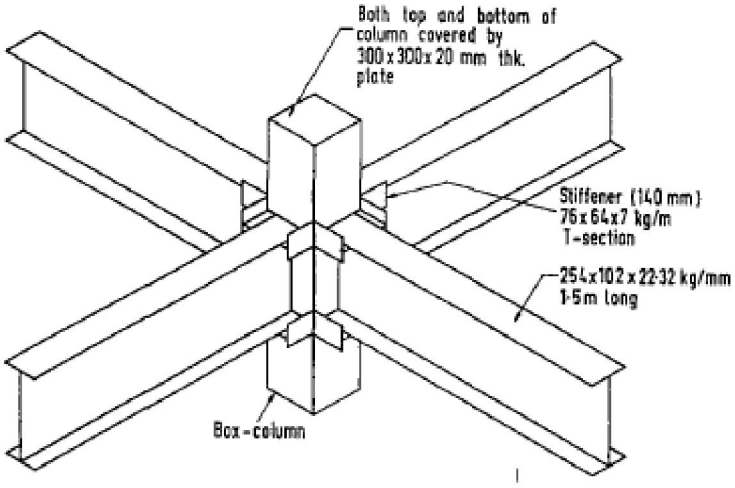
Kutu kesitli kolonlarda deneyeceğimiz birleşim detayında Şekil 10.1 de gösterildiği gibi başlıklardan gelen çekme ve basınç etkilerini kolon yüzeyinde belirli bir alana dağıtarak, kirişin kolonla sağlıklı bir şekilde yükleri aktarması amaçlanmıştır. Örneğin kiriş başlığında moment nedeni ile oluşan çekme kuvveti bu birleşim tipi

sayesinde kolon gövdesine yayılım yaparak, kolon ile kirişin birleştiği noktalarda ve kolonda gerilme yoğunlaşması olmadan daha düşük gerilmeler ile kolona aktarılmaktadır..



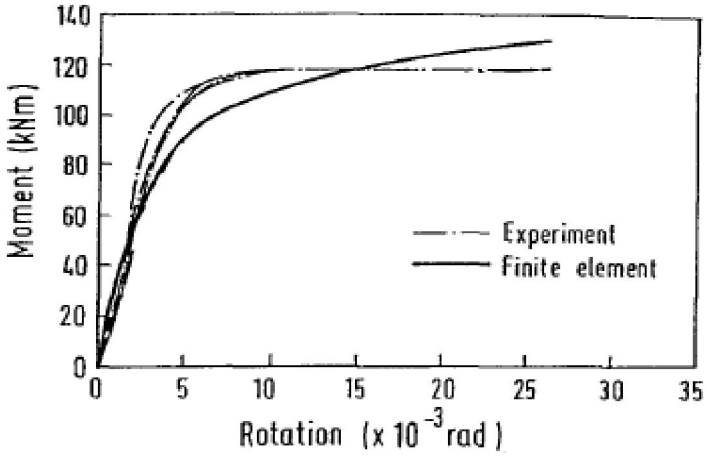
Şekil 10.2 : Kutu Kolonlarda uygulanacak birleşim detayı

Bu birleşim detayı daha önce N.E. Shanmugam tarafından da bilgisayar ortamında ve deneyler ile incelenmiştir.



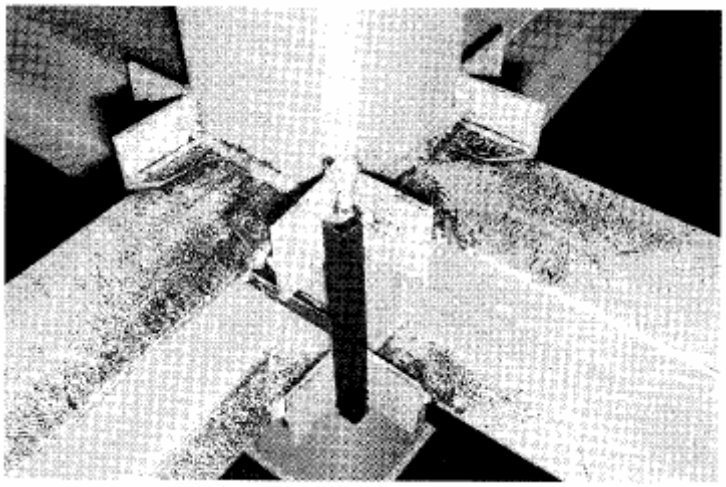
Şekil 10.3 : N.E. Shanmugam tarafından test edilen birleşim. [9]

Yapılan testler sonucunda birleşimlerin 0,026~0,027 radyan civarında toplam dönme yapabildiği belirlenmiş. [8]



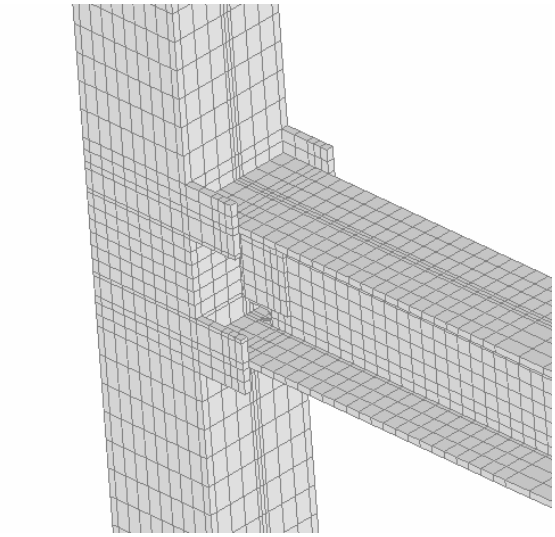
Şekil 10.4 : N.E. Shanmugam tarafından test edilen birleşimin Moment - Toplam Dönme Eğrisi [8]

Birleşimlerin test sonuçlarında ilk kırılmaların ek berkitme levhalarının sonunda, kiriş başlığında oluştuğu raporlanmış. Bizim yaptığımız analizlerde de bu kısımlarda yüksek gerilmelerin yoğunlaştığını gördük.



Şekil 10.5 : Test sonucunda kiriş başlıklarında kırılma. (yırtılma) [8]

Bu birleşimin bilgisayarda analizi ve performansının artırılması için yapılabilecekleri belirleyip yeniden test etmek için bilgisayarda modelleme yapıldı. Şekil 10.6 da Birleşim 4 için yapılan sonlu elemanlar modeli görülmektedir



Şekil 10.6 : Birleşim 4 için Sonlu Elemanlar Modeli

Bu modelde Shanmugam'ın yaptığı gibi kiriş başlıklarının sağından ve solundan düşey ek levhalar yerleştirilmiştir. Bu levhaların yüksekliği 15cm. , uzunluğu 15 cm. ve et kalınlığı 2.5cm. dir. Levhaların boyutları kiriş başlığından gelecek çekme veya basınç kuvvetlerinin tamamını aktaracak şekilde seçilmiştir. Örneğin bu birleşimdeki kirişimizin mukavemet momenti

$W_x=2218\ cm^3$

Akma sınırında kirişe gelecek moment

$M_x=2218x2.4=5323$ t.cm.

Kiriş başlığında oluşacak çekme/basınç kuvveti

Kiriş Yüksekliği h=39cm. $F=5323/39= 136.5$ ton

Her bir düşey levhaya gelecek yük

$F_L=136.5/2=68.25$ ton

Levhada olaşacak gerilme

Levha boyutu 15x2.5 cm.

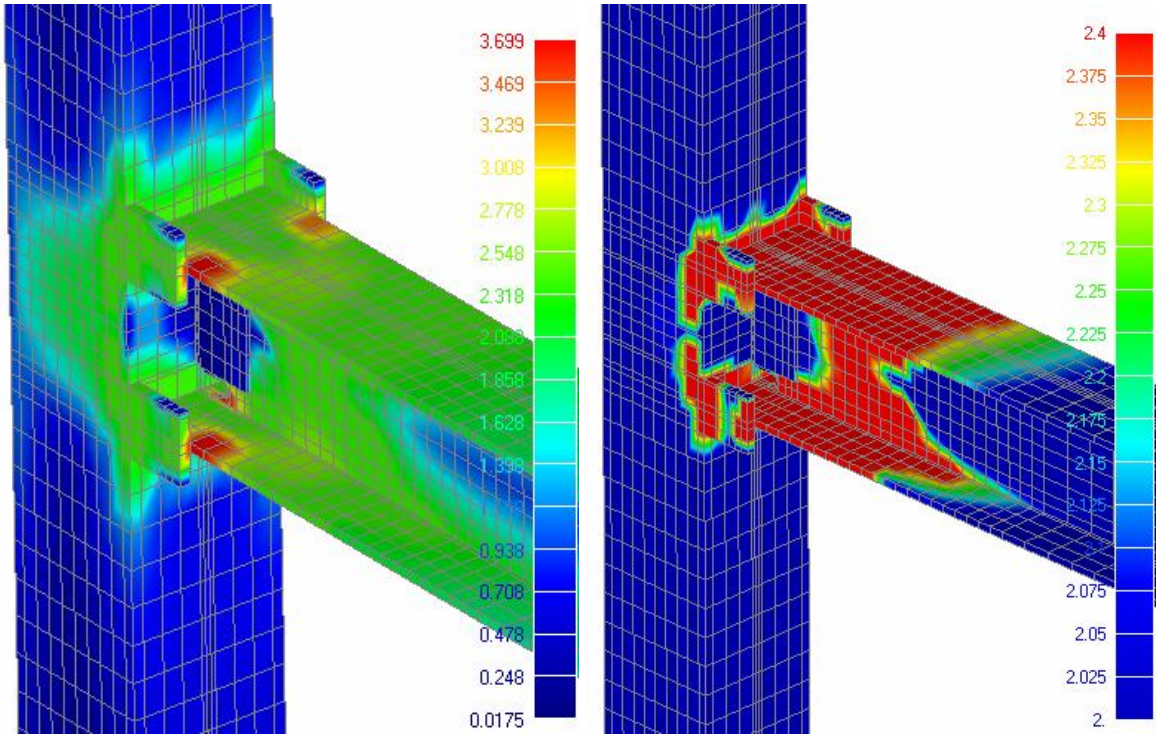
$\sigma=68.5/(15x2.5)=1.82\ t/cm^2 < 2.4\ t/cm^2$

(Levhalar kiriş başlığına göre %20 daha az zorlanmaktadır.)

Yukarıdaki ön hesaba göre levhalar kirişten gelecek yükleri aktarabilecek kapasitedir.

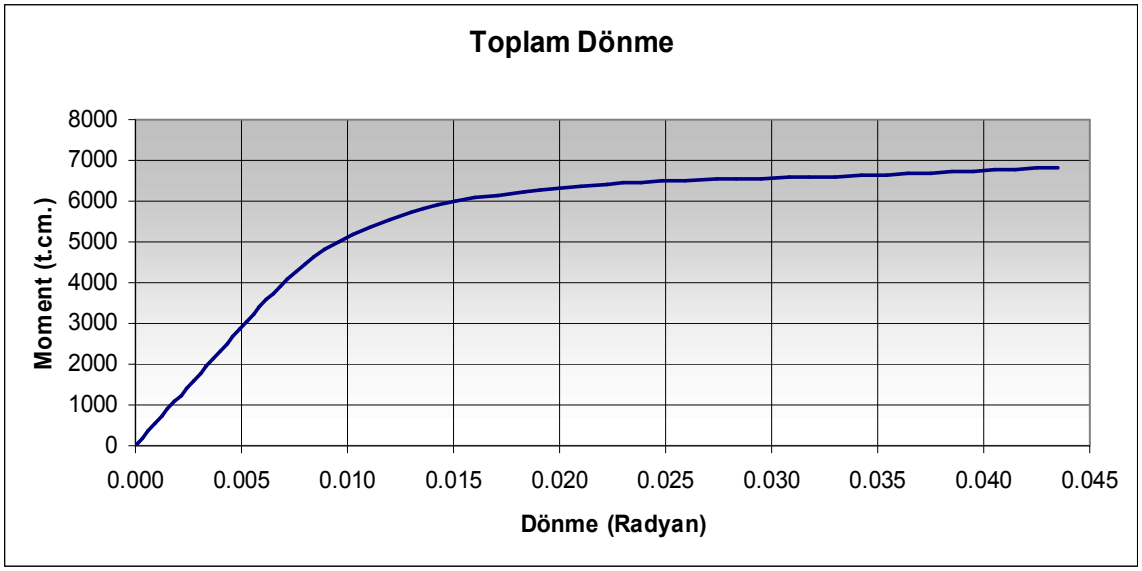
10.1 FEMA'ya Göre Yapılan Analizler

Birleşim 4 için yapılan analizde kopma gerilmeleri oluşuncaya kadar ki gerilme dağılımı Şekil 10.7 deki gibidir. Burada sonlu elemanların köşe noktalarındaki pik gerilmeler ihmal edilmiştir.

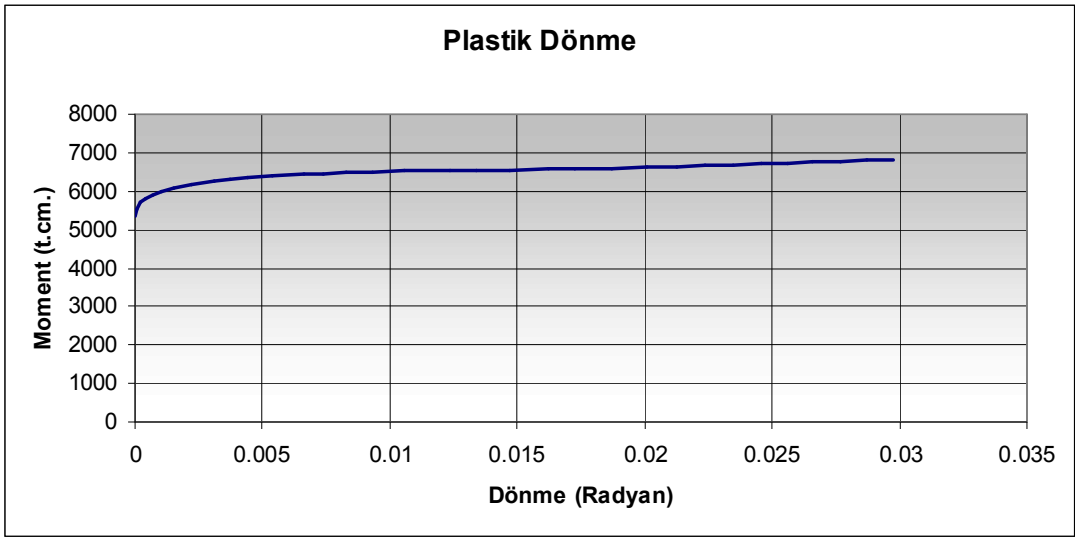


A-Gerilme dağılımı B- Akma bölgesi

Şekil 10.7 : Birleşim 4 Kiriş başlığında gerilme dağılımı ve akma bölgesi (t/cm²)



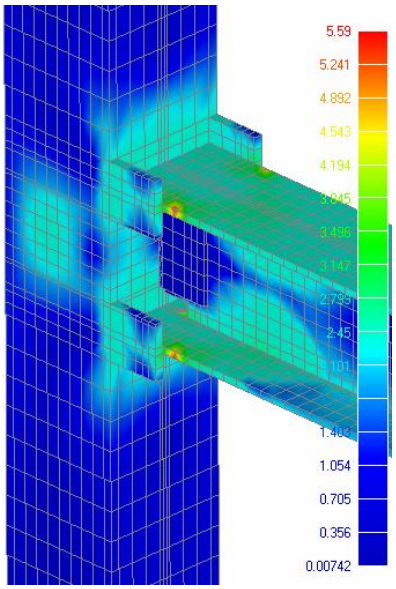
Şekil 10.8 : Birleşim 4 Toplam dönme



Şekil 10.9 : Birleşim 4 Plastik dönme

Kutu kolon için tasarlanan bu birleşim modelinde, kiriş başlık levhaları ile düşey berkitmeler arasında kayma gerilmelerinin yüksek oluşundan dolayı kopma gerilmesine çabuk ulaşılıyor. Daha sonra Shanmugam'ın yaptığı test sonuçlarında olduğu gibi kiriş başlığı ile düşey berkitme levhası arasında yırtılma başlayacak ve kolon başlığına doğru ilerleyecektir.

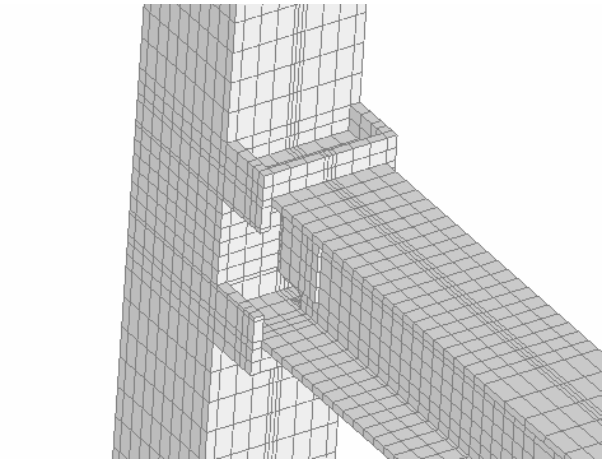
Shanmugam'ın test sonuçlarını inceler isek toplam dönme grafiğinin eğiminin değiştiği nokta yaklaşık 0,05 radyan civarındadır. Bu dönme açısı toplam dönmeden çıkarır ise plastik dönmenin 0,02 radyan civarında kaldığını elde ederiz. Bu değer yönetmeliklerin istediği değerin altında kalmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde daha yüksek dönme açısının elde edilmesinin sebebi Şekil 10.10'da da görülen sonlu eleman köşe noktalarındaki pik gerilmelerin ihmal edilerek, elemanın ortasında kopma gerilmeleri oluşuncaya kadar analize devam edilmesidir. Gerçek bir deneyde daha küçük dönme açılarında kiriş başlığında yırtılmanın başlayacağı yorumlanabilir. Bunun ile birlikte Shanmugam'ın elde ettiği dönme açılarına yakın bir değer elde edileceği anlaşılıyor.



Şekil 10.10 : Birleşim 4 Pik gerilmeler

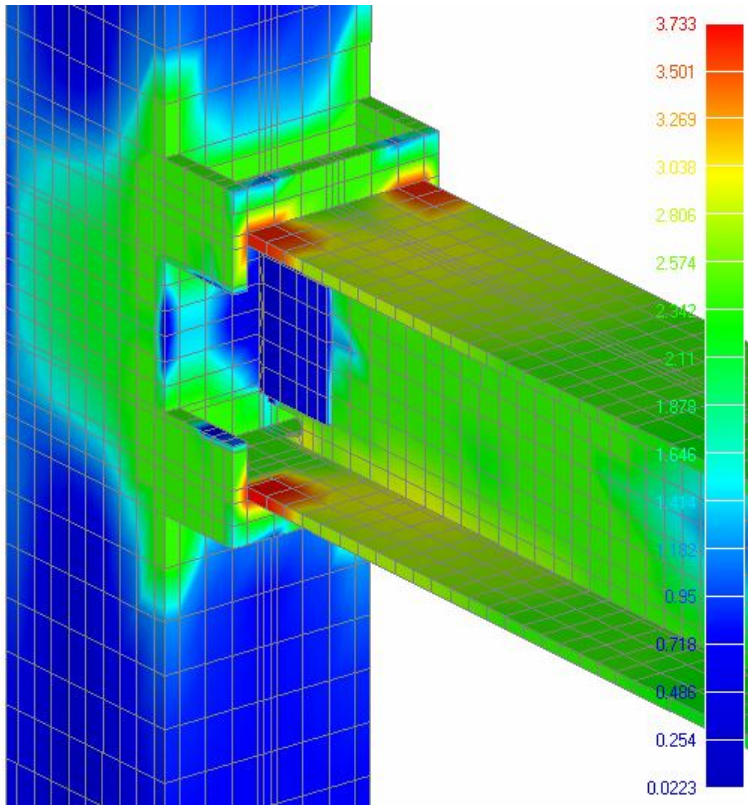
Sonlu elemanlar analizinde plastik dönmenin 0,03 radyanı biraz altında kaldı görülüyor. Gerçekte dönmenin bu değerin daha altında olacağı göz önüne alınır ise yüksek sünek birleşimler için yetersiz kaldığı sonucuna varılır.

Birleşimin performansını artırmak için şekilde de görüldüğü gibi düşey berkitme levhalarını ve kiriş başlığını birleştiren yeni bir berkitme levhası eklenmiştir (Şekil 10.11). Bu sayede kiriş başlık levhası ile düşey berkitme levhaları arasında oluşacak yüksek kayma gerilmeleri engellenerek daha homojen bir dağılım sağlanmıştır.

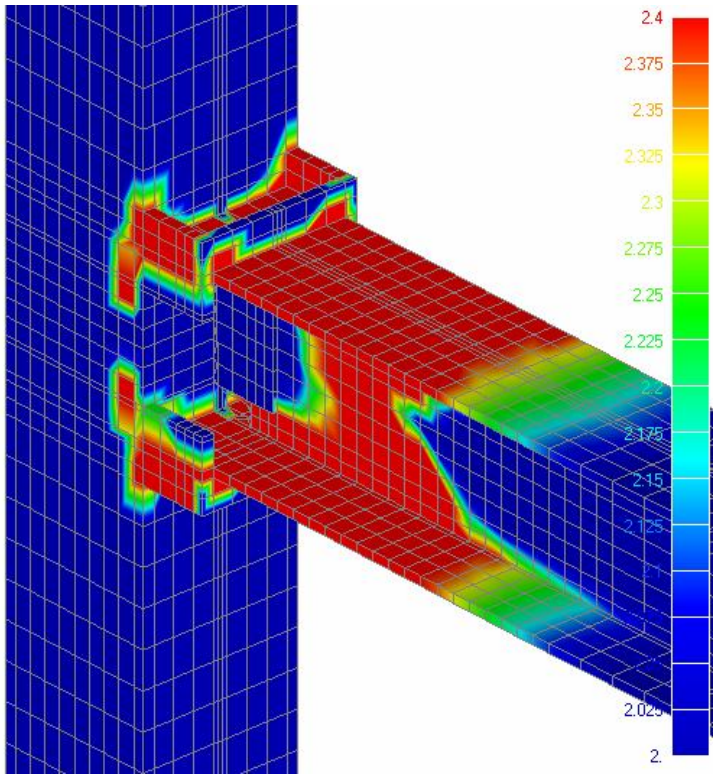


Şekil 10.11 : Gerilme dağılımını homojenleştirecek ek levha

Yeni modelin analizini yaptığımızda daha yüksek plastik dönme kapasitesi elde edildi.

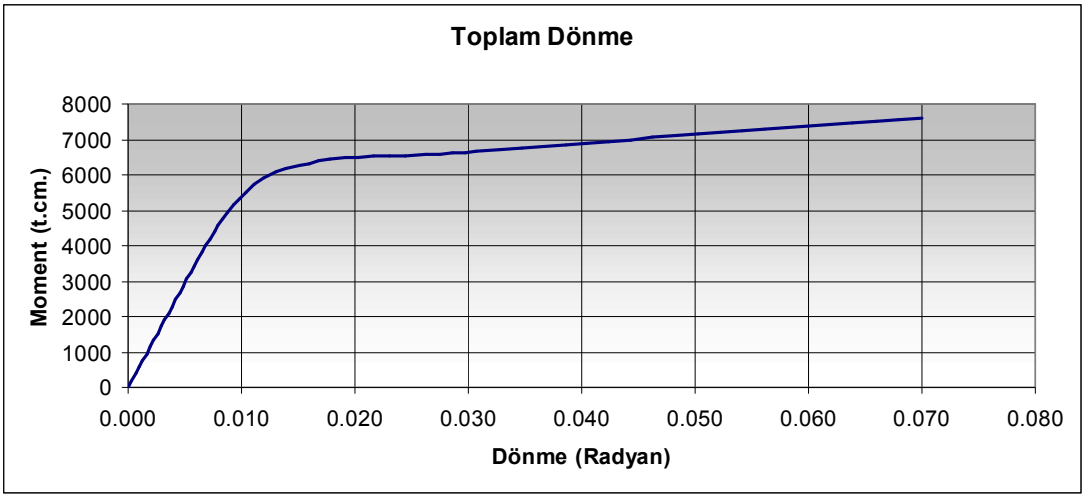


Şekil 10.12 : Ek levhalı Birleşim 4 Gerilme dağılımı

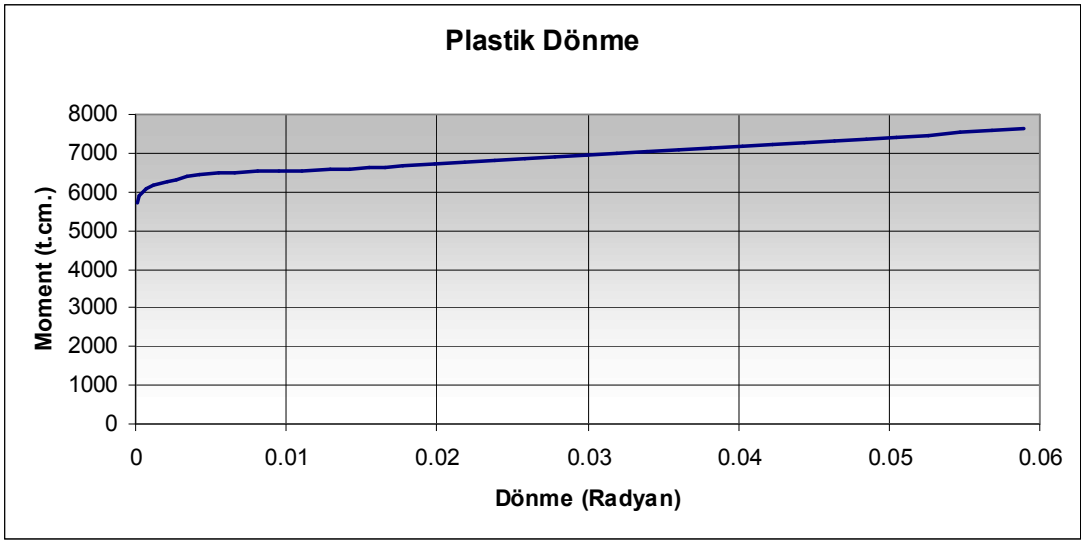


Şekil 10.13 : Ek levhalı Birleşim 4 Akma bölgesi

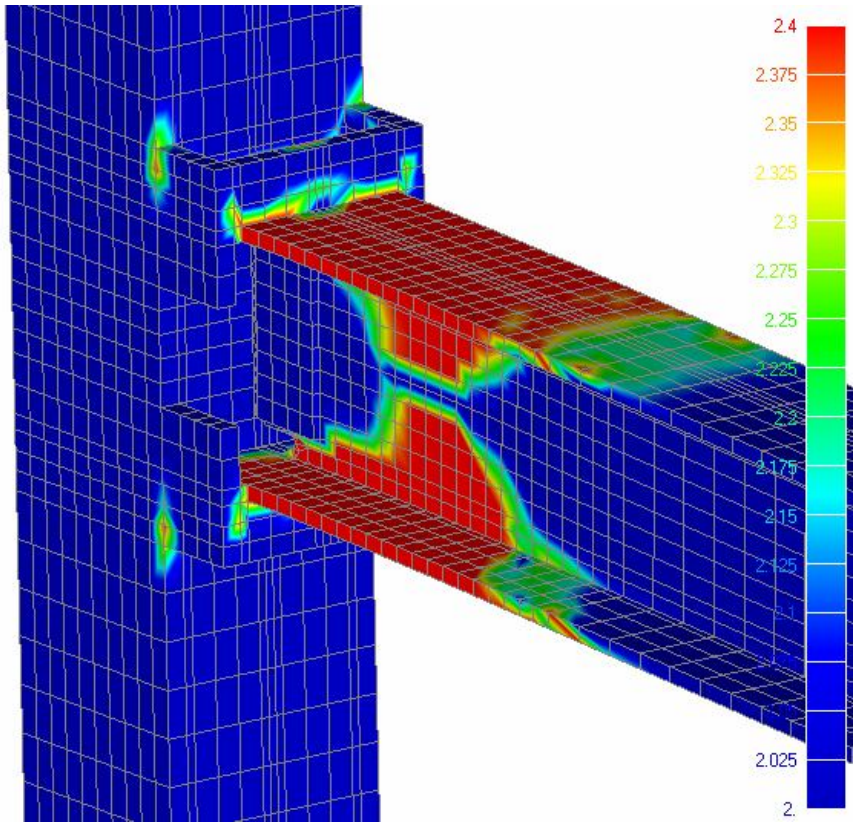
Birleşimde kopma gerilmelerine daha geç ulaşılsa da yine aynı noktalarda ilk yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Fakat istenilen plastik dönme açısının rahatlık ile sağlandığı görülüyor. Burada pik kopma gerilmeleri oluşmakta fakat ek levhasız modelde olduğu kadar ani yükselişe geçmemektedir. Bu gerilme artışı kullanılan ek levhaların boyutları ve kalınlıkları ile doğrudan ilgilidir. Örneğin aynı boyutlarında daha kalın levha kullanılması gerime dağılımını daha homojen hale getirecektir. Bunu Birleşim 3 ün analiz sonuçlarında daha iyi göreceğiz.



Şekil 10.14 : Ek levhalı Birleşim 4 Toplam dönme

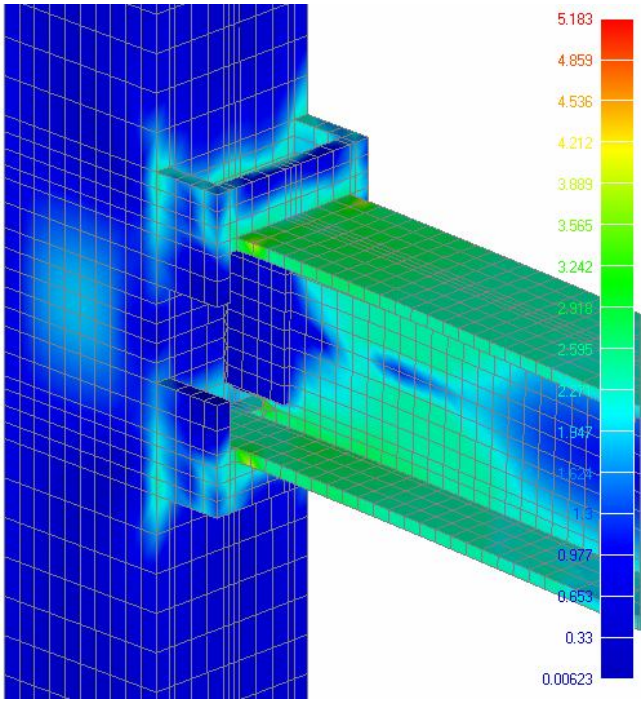


Şekil 10.15 : Ek levhalı Birleşim 4 Plastik dönme

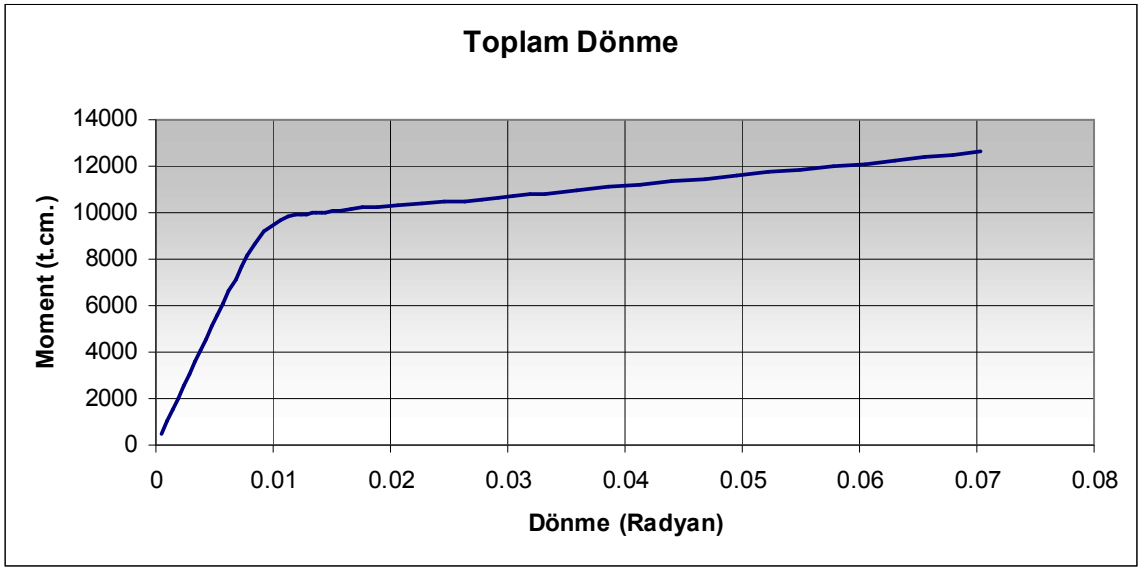


Şekil 10.16 : Ek levhalı Birleşim 3 Akma bölgesi

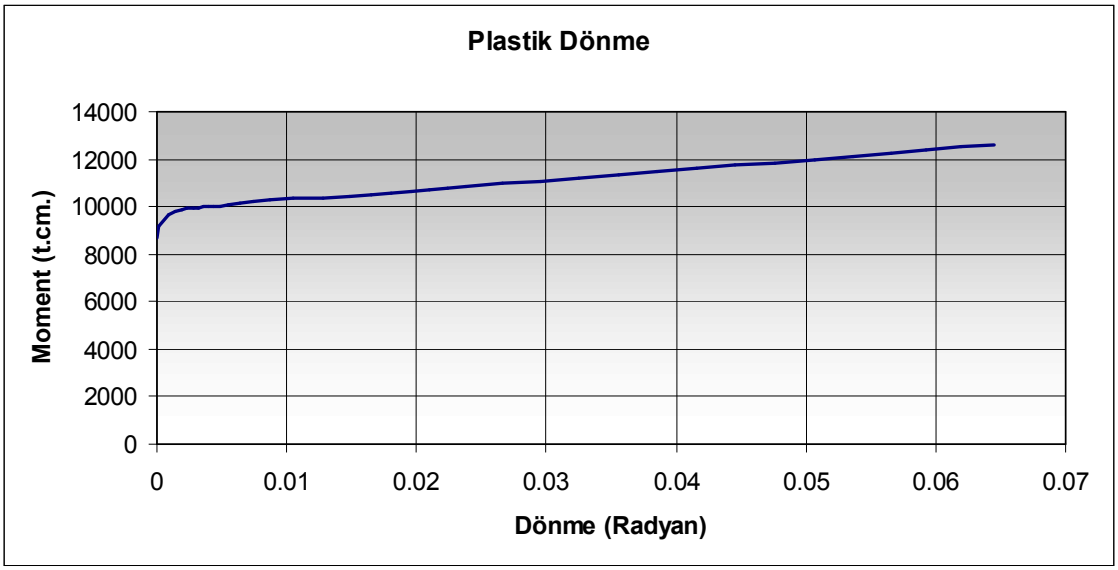
Bileşim 3 de kullanılan ek birleşim levhaları Birleşim 4'e oranla daha fazla et kalınlığına sahip olduklarından kiriş başlığında daha homojen bir gerile dağılımı sağlanmış ve Birleşim 4 de görülen pik gerilmeler daha da azalmıştır.



Şekil 10.17 : Ek levhalı Birleşim 3 Pik gerilmeler



Şekil 10.18 : Ek levhalı Birleşim 3 Toplam dönme

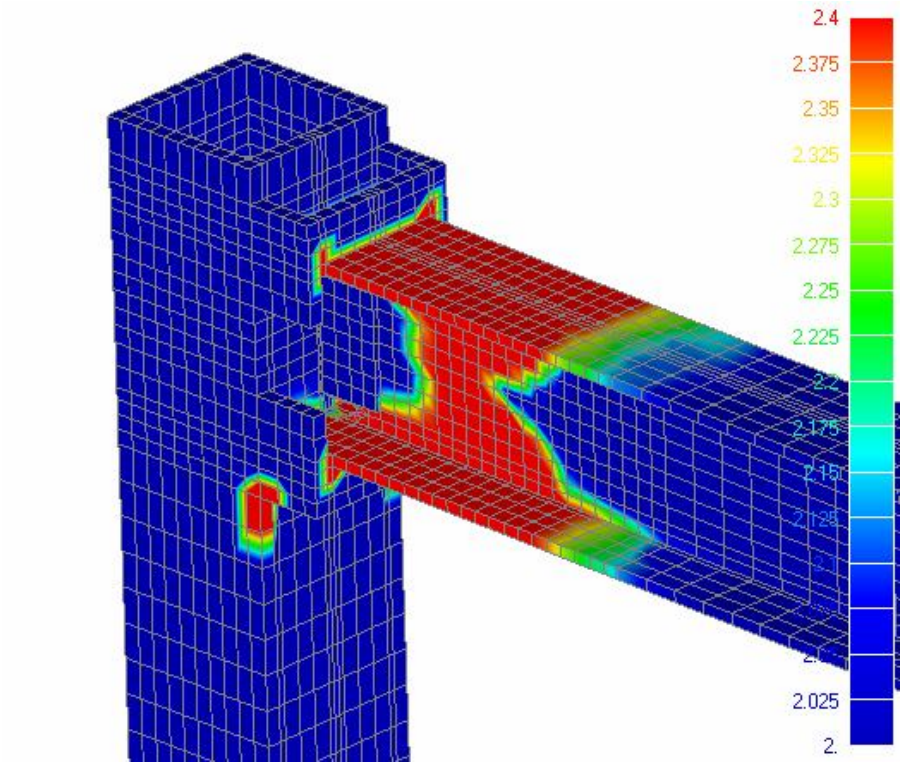


Şekil 10.19 : Ek levhalı Birleşim 3 Plastik dönme

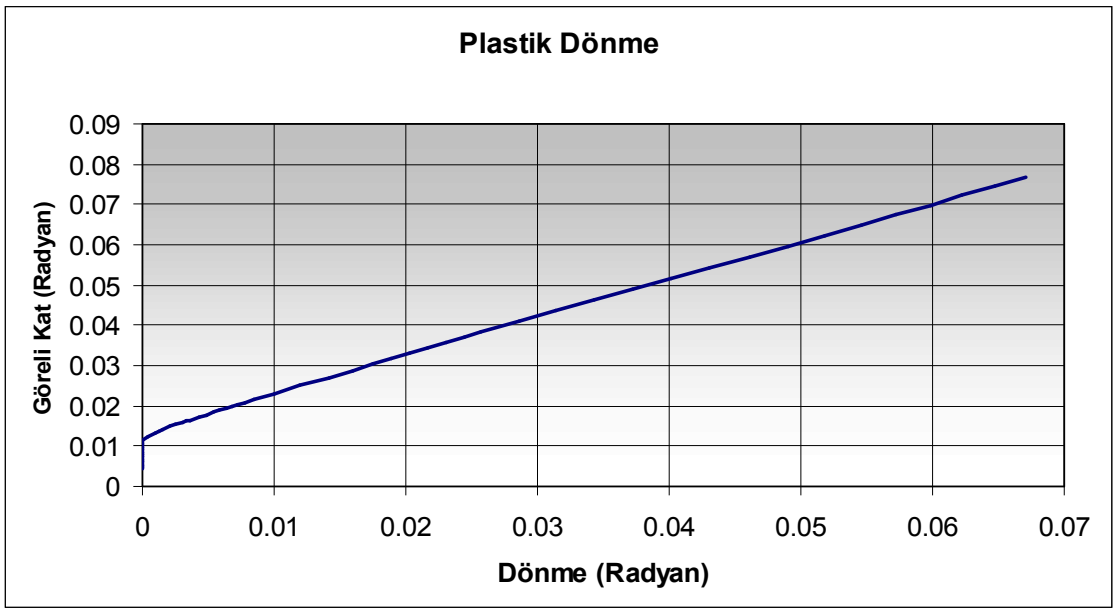
Birleşim 3 içinde istene plastik dönme sağlanıyor. Bu birleşimde pik gerilmeler azaldığından sonlu elemanlar analizi ile gerçek deney sonuçlarının yaklaşık aynı kalacağı yorumlayabiliriz.

10.2 TDY 2007'ye Göre Yapılan Analizler

I Kolon – I Kiriş birleşimlerinin mafsallı mesnetli tam çerçevede uygun sonuç verdiğinden kutu kolon – I Kiriş birleşimleri sadece mafsallı mesnetli tam çerçevede analiz edildi.

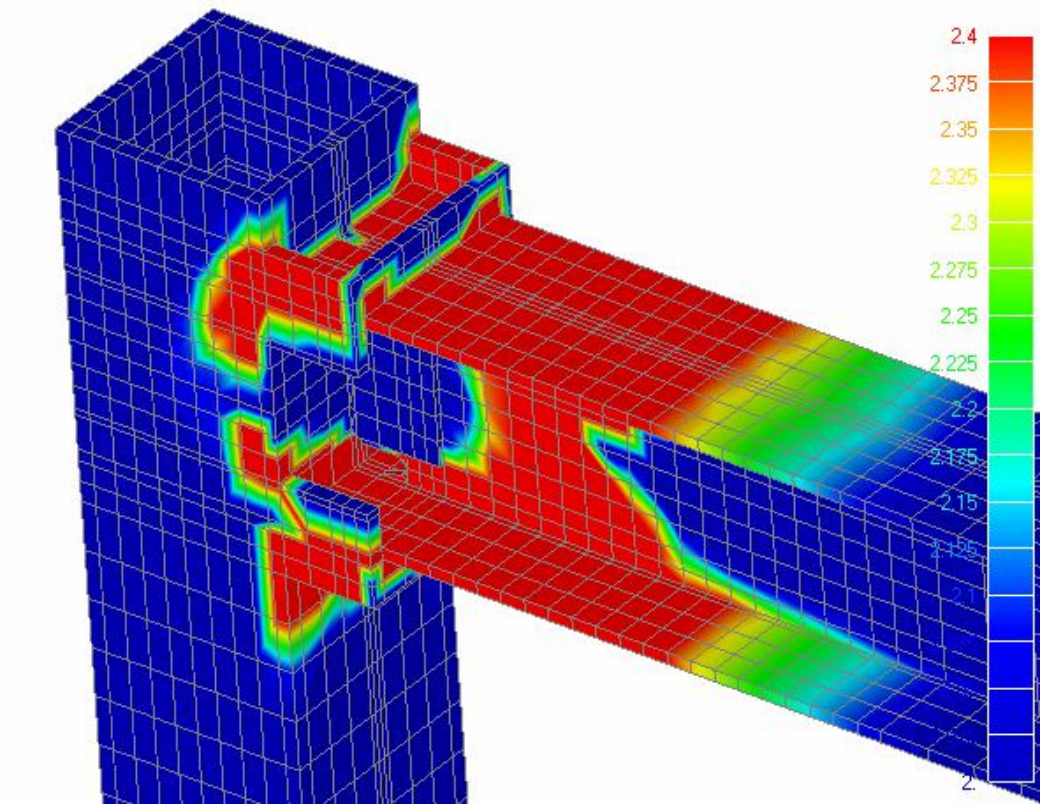


Şekil 10.20 : Ek levhalı Birleşim 3 Akma bölgesi

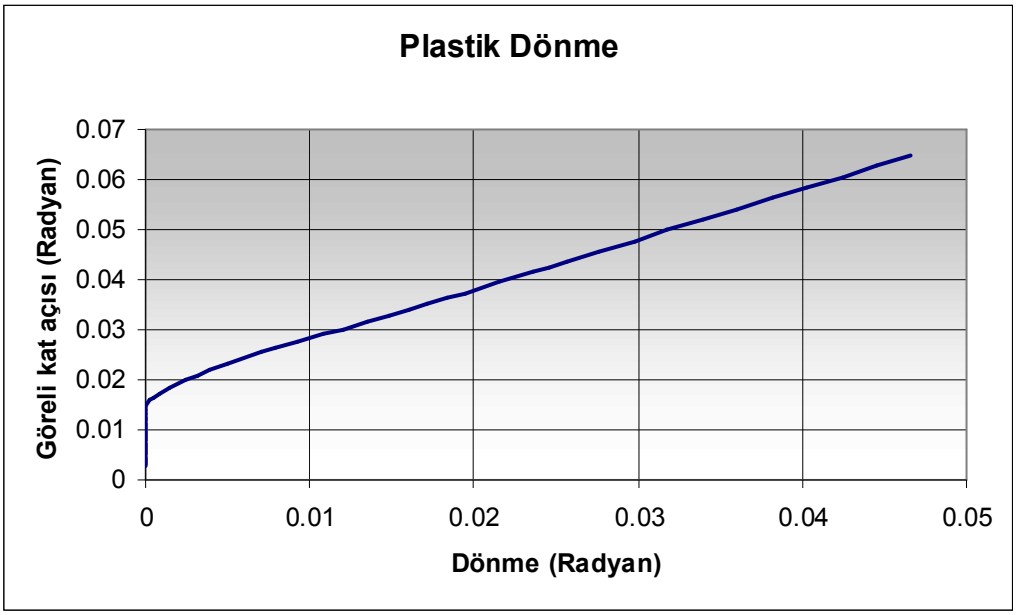


Şekil 10.21 : Ek levhalı Birleşim 3 Plastik dönme

Birleşim 3 de konsol modelde oldu gibi çerçeve modelde de kiriş başlığında gerilme dağılımı daha homojen yayılmış, istenen plastik dönme açısı sağlanmıştır.



Şekil 10.22 : Ek levhalı Birleşim 4 Akma bölgesi



Şekil 10.23 : Ek levhalı Birleşim 4 Plastik dönme

11. SONUÇLAR

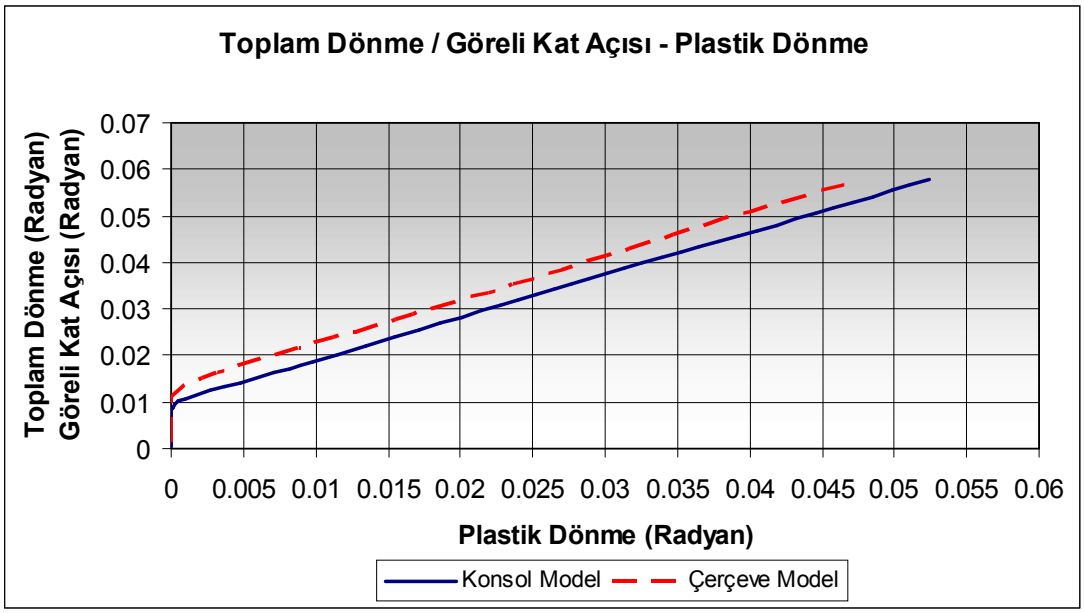
Yönetmeliklerde I Kolon – I Kiriş birleşimleri için belirtilen Başlığı Kaynaklı – Gövdesi Kaynaklı birleşim tipi için FEMA test düzeneğine göre yapılan sonlu elemanlar analizinde de beklenen dönme kapasiteleri sağlanmıştır. TDY 2007'nin birleşimlerin dönme kapasitesi için belirttiği 0,04 radyan göreli kat açısının, aynı kesit ve birleşim tipleri içinde sağlandığı görülmüştür. Ancak TDY 2007'nin istediği göreli kat açısını basit bir çerçeve üzerinde elde etmek istenildiğinde kolonların mesnet şartlarına göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bunlardan en uygununun Mafsallı Mesnetli Tam Çerçeve modelinin oluğu sonucuna varılmıştır.

Kutu Kolon – I Kiriş birleşimlerinde ise Shanmugam tarafından da daha önce test edilen birleşim tipinin analiz sonuçlarında yüksek sünek birleşim için istenen dönme kapasitesinin altında kaldığı sonucuna varıldı. Birleşimin kapasitesinin artırılması için birleşime eklenen yeni bir levha ile yapılan analizler sonucunda bu birleşiminde istenen plastik dönme kapasitesine ulaştığı görüldü.

Kutu Kolon – I Kiriş birleşimlerinin çerçeve modeli üzerinde yapılan analizler sonucunda TDY 2007'nin istediği göreli kat açısını sağlamıştır.

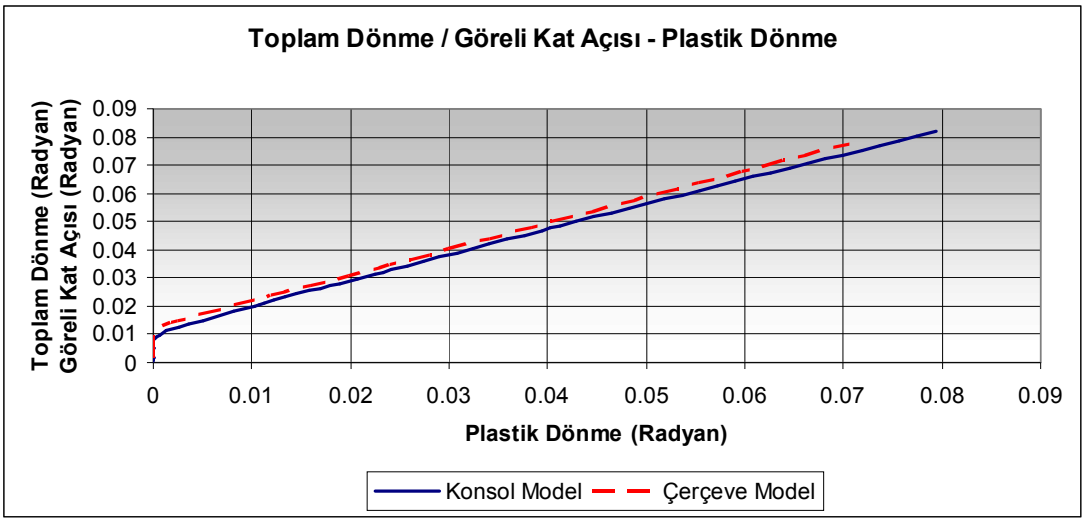
11.1 Konsol Test Düzeneği İle Çerçeve Test Düzeneğinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çerçeve ve konsol test düzenekleri sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemek için konsol modelde Toplam Dönme – Plastik Dönme, çerçeve modelde ise Göreli Kat Açısı – Plastik Dönme grafiklerini tek koordinat sisteminde birleştirildi. Göreli kat açısının, toplam dönmede olduğu gibi elastik ve plastik deformasyonların toplamını içerdiğinden ve her ikisinde de 0,04 radyan dönme şartı istendiğinden aynı kategoride kabul edip bir eksende gösterebiliriz. Çerçeve modelde, mafsallı mesnetli tam çerçeve modeli sonuçları kullanılmıştır.



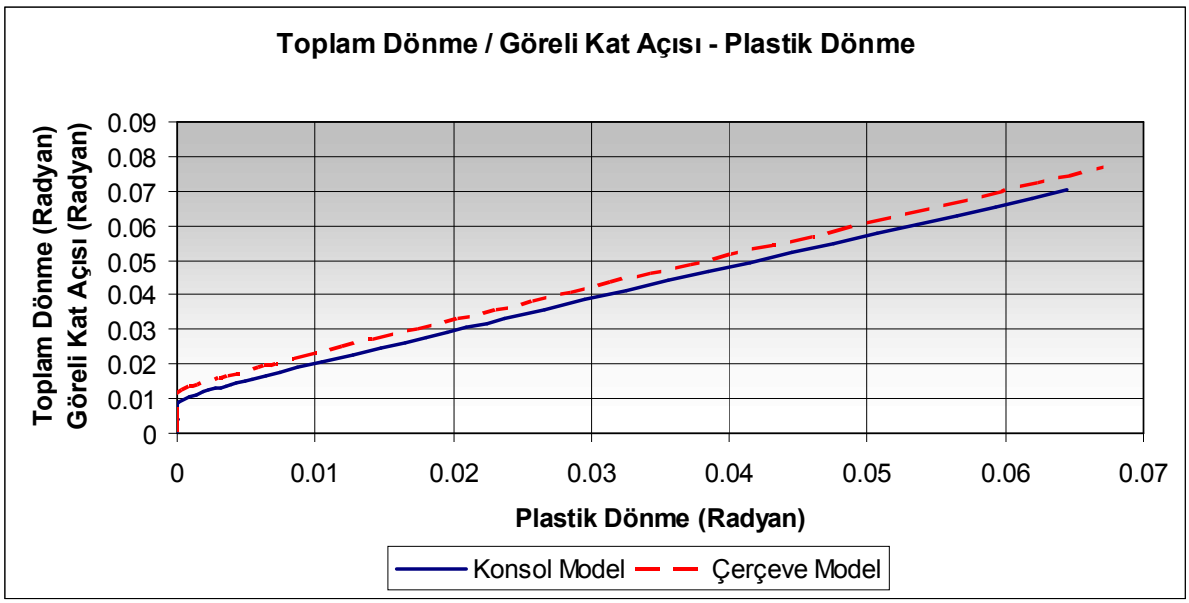
Şekil 11.1 : Birleşim 1 Plastik dönme karşılaştırması

Birleşim 1 için 0,04 radyan toplam dönme/ göreli kat açısı için konsol modelde 0,033 radyan, çerçeve modelde 0,028 radyan civarına plastik dönme sağlanmıştır.



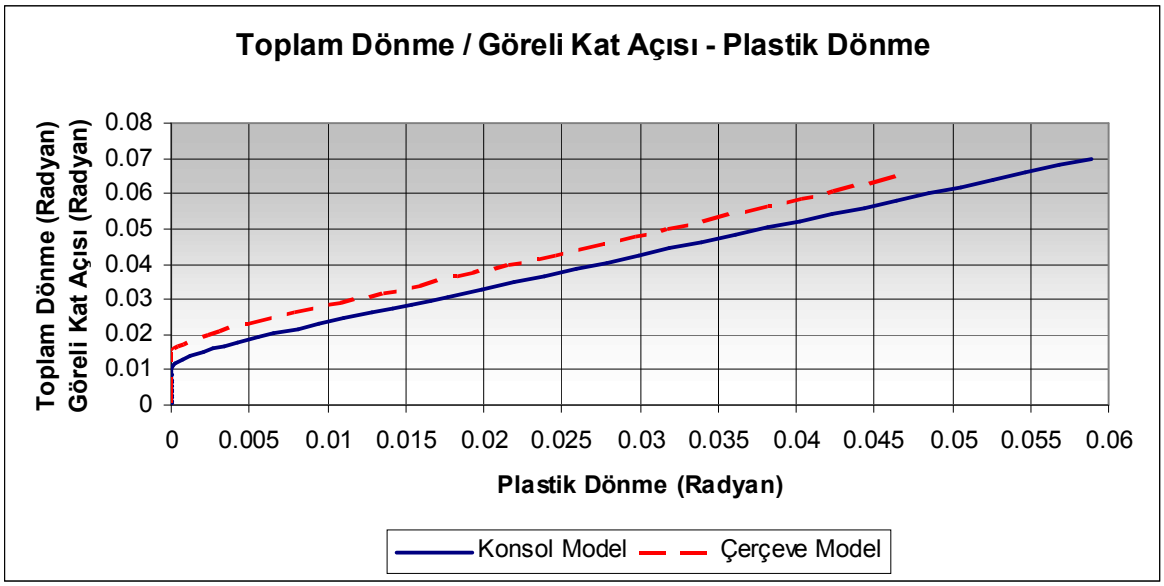
Şekil 11.2 : Birleşim 2 Plastik dönme karşılaştırması

Birleşim 2 de 0,04 radyan toplam dönme/ göreli kat açısı için konsol modelde 0,035 radyan, çerçeve modelde 0,03 radyan civarına plastik dönme sağlanmıştır.



Şekil 11.3 : Birleşim 3 Plastik dönme karşılaştırması

Birleşim 3 de 0,04 radyan toplam dönme / göreli kat açısı için konsol modelde 0,032 radyan, çerçeve modelde 0,028 radyan civarına plastik dönme sağlanmıştır.



Şekil 11.4 : Birleşim 4 Plastik dönme karşılaştırması

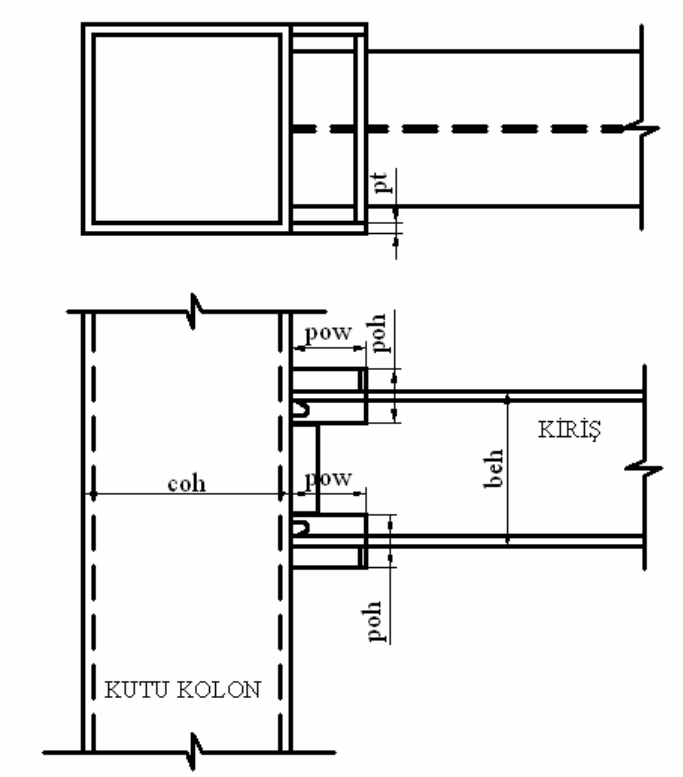
Birleşim 4 de 0,04 radyan toplam dönme / göreli kat açısı için konsol modelde 0,028 radyan, çerçeve modelde 0,022 radyan civarına plastik dönme sağlanmıştır. Konsol modellerde genel olarak toplamda daha fazla plastik dönme değerine ulaşılmıştır.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda şu sonuçları çıkarabiliriz.

- Test edilen kaynaklı birleşim tipi St 37 malzeme için de yeterli dönme kapasitesi sağlıyor.
- Mafsallı çerçeve model, konsol modele en yakın sonuç veren test düzeneğidir.
- Göreli kat açısına göre test edeceğimiz birleşimler aynı göreli kat ötelemesi – toplam dönme açısı değeri için, konsol modele göre daha az plastik dönme yapıyor.
- Test edilen Kutu Kolon – I Kiriş birleşim tipi TDY 2007 ve FEMA yönetmelikleri için istenen dönme kapasitelerini sağlamıştır.

11.2 Plastik Mafsalın Yeri

I Kolon –I Kiriş birleşimleri için plastik mafsalın yerinin FEMA'da belirtildiği gibi kolon aksından coh/2 + beh/2 konumunda olduğu görüldü.



Şekil 11.5 : Kutu Kolon – I Kiriş Birleşimlerinde boyutlar

Kutu Kolon – I Kiriş birleşimleri için ise coh/2 + beh/2 + pow olarak belirlendi.

KAYNAKLAR

Bayülke Nejat, 2003. 1994 Northridge Kaliforniya Depremi Sonrasında Moment Taşıyan Çelik Kolon-Kiriş Birleşim Yerleri Üzerinde Yapılan Deneyler, Araştırma ve Geliştirmeler. Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 425

Celasun H.,1976. Yapı Sistemleri Matris Analizi ve Sonlu Elemanlar Metodu, Eskişehir

Deren, H., Uzgider E. Piroğlu, F. Çağlayan Ö., 2008. Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.

FEMA 350, 2000. Recommended Seismic Desin for New Steel Momet –Frame Buidings

Köksal T.,1995. Sonlu Elemanlar Metodu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 304,İstanbul.

M.Bruneau, C.M.Uang, A.Whittaker ; 1998Ductile Design of Steel Structures, McGraw-Hill Co.,.

N.E. Shanmugam and L.C. Ting, 1995**.** Welded Interror Box- Column To I-Beam Connections. Journal of Structural Engineering 824

Roeder C.W., 2001. Connection Performance State of the Art Report, FEMA Rep. No. 355D, *Federal Emergency Management Agency,* Washington D.C.

Şenalp A.Z., 2005. Tasarım Optimizasyonu ve FEM Sonlu Elemanlar Metodu, Sonlu Elemanlar Analizi Ders Notu, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli

TDY 2007, 2007 Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

[1] **FEMA 350,** 2000. Recommended Seismi Desin for New Steel Momet –Frame Buidings

[2] **Roeder C.W.**, 2001. Connection Performance State of the Art Report, FEMA Rep. No. 355D, *Federal Emergency Management Agency,* Washington D.C.

[3] **Bayülke Nejat,** 2003. 1994 Northridge Kaliforniya Depremi Sonrasında Moment Taşıyan Çelik Kolon-Kiriş Birleşim Yerleri Üzerinde Yapılan Deneyler, Araştırma ve Geliştirmeler. Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 425

[4] **M.Bruneau, C.M.Uang, A.Whittaker** ; 1998Ductile Design of Steel Structures, McGraw-Hill Co.,.

[5] **Şenalp A.Z.,** 2005. Tasarım Optimizasyonu ve FEM Sonlu Elemanlar Metodu, Sonlu Elemanlar Analizi Ders Notu, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli

[6] **Köksal T**.,1995. Sonlu Elemanlar Metodu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 304,İstanbul.

[7] **Celasun H**.,1976. Yapı Sistemleri Matris Analizi ve Sonlu Elemanlar Metodu, Eskişehir

[8] **N.E. Shanmugam and L.C. Ting,** 1995**.** Welded Interror Box- Column To I-Beam Connections. Journal of Structural Engineering 824

[9] **TDY 2007**, 2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

[10] **Deren, H., Uzgider E. Piroğlu, F. Çağlayan Ö.,** 2008. Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

İlk öğrenimimi Erzurum'da yaptıktan sonra İstanbul'da Maltepe Lisesinden 1998 yılında mezun oldum. Aynı yıl Atatürk Ünv. İnşaat Müh. Bölümüne başladım. Üniversiteden mezun olduktan sonra CEM İnşaat Mimarlık ve Müh. Ltd. Şti. de statik proje müh. olarak işe başladım ve halen devam etmekteyim.

Ad Soyad : Erkan POLAT

Doğum Yeri ve Tarihi : Pasinler / Erzurum 05/03/1981

Lisans Üniversite : Atatürk Ünv. Erzurum