

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN PLASTİK
DÖNME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Fırat ÇINGİ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Erdoğan UZGİDER

TEMMUZ 2004

**ÇELİK KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN PLASTİK
DÖNME KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Fırat ÇINGİ
(501011111)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Temmuz 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Temmuz 2004**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Nesrin YARDIMCI
Prof. Dr. Gülay ALTAY (B.Ü.)**

Temmuz 2004

ÖNSÖZ

Küçüklüğümden itibaren inşaatlarla ve mühendislikle içice olmam, beni, meslek olarak İnşaat Mühendisliğine yöneltmiş olabilir ama Sayın Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER’le birlikte çalışmaya başladıktan sonra mühendisliğin sadece bir meslek olmadığını, bir düşünce biçimi olduğunu gördüm. Kendisine, lisans bitirme çalışmasından başlayarak, bugüne kadar bilgisini ve tecrübesini benden esirgemediği için teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Sayın Yrd. Doç. Dr. B. Özden ÇAĞLAYAN olmasaydı çelik yapılar alanında uzmanlaşmak istemeyebilirdim. Bu kararımı etkilediği için kendisine hayatım boyunca müteşekkir kalacağımı belirtmek isterim.

Bu çalışma, kürsümüz Araştırma Görevlilerinden Sayın Övünç TEZER ve Sayın S. Gökhan KARAMAN sayesinde benim için daha kolay hale gelmiştir. Sorularıyla ilgilenip bana yardım ettikleri için kendilerine teşekkürü borç bilirim.

Verdiğim kararlara saygı duyup beni destekleyen aileme ne kadar teşekkür etsem azdır. Bu ve bundan sonraki çalışmalarında en çok onların emeğinin ve fedakarlığının olduğu, benim için yadsınamaz bir gerçektir.

Temmuz 2004

Fırat ÇINGİ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Northridge Depremi ve Sonuçları	1
1.2. Northridge Depremi Sonrasında Yapılan Çalışmalar	4
2. NORTHRIDGE ÖNCESİNDE KULLANILAN BİRLEŞİM	7
2.1. Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Bulonlu Birleşim	7
2.2. Göçme Durumları	11
2.3. Northridge Öncesi Tasarımın Zayıf Noktaları	13
2.3.1. Kaynak Türü ve İşlemi	13
2.3.2. Kaynak Ulaşım Deliği Geometrisi	15
3. NORTHRIDGE SONRASI MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ	16
3.1. Kaynaklı Birleşimler	20
3.1.1. Rijitleştirilmemiş Birleşimler	21
3.1.2. Başlık Levhası Kaynaklı Birleşimler	24
3.2. Bulonlu Birleşimler	27
3.2.1. Başlık Levhası Bulonlu Birleşimler	28
3.2.2. Uzatılmış Alın Levhası Birleşimleri	31
4. SONLU ELEMAN MODELİNİN KURULMASI	37
4.1. Eleman Tipi	37
4.2. Malzeme Modeli	39
4.3. Geometrik Önbozukluk	42
4.4. Sınır Koşulları	43
4.5. Bulonlar ve Öngerme Kuvveti	44
4.6. Plastik Dönmenin Hesaplanması	45
4.7. Modellerin Kontrolü	46

5. PARAMETRİK ÇALIŞMA	49
5.1. Eleman Boyutu ve Geometrisinin Etkisi	51
5.2. Çeliğin Malzeme Özelliğinin Etkisi	55
5.3. Panel Bölgesi Kaymasının Etkisi	58
5.4. Süreklilik Levhasının Etkisi	60
5.5. Narinlik ve Yerel Burkulmanın Etkisi	62
5.5.1. Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı Birleşim	65
5.5.2. Başlık Levhası Kaynaklı Birleşim	68
5.5.3. Başlık Levhası Bulonlu Birleşim	71
5.5.4. Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim	73
5.5.5. Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim	77
6. SONUÇLAR	80
6.1. Moment-Plastik Dönme Eğrileri	80
6.2. Plastik Mafsalın Yeri	81
6.3. Zayıf Kolon-Kuvvetli Kiriş Davranılı	82
6.4. Alın, Süreklilik ve Panel Bölgesi Takviye Levhaları	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	86

KISALTMALAR

AISC	:American Institute of Steel Construction
AISI	: American Iron and Steel Institute
AWS	: American Welding Society
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
NIST	: National Institute of Standards and Technology

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. Analizlerde Kullanılan Kiriş ve Kolon Boyutları.....	65
Tablo 6.1. Birleşimde Oluşan Plastik Mafsalların Yerleri.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	: Northridge depremi öncesinde kullanılan tipik birleşim 3
Şekil 1.2	: Kiriş-Kolon birleşimindeki tipik çatlak başlangıç bölgesi..... 3
Şekil 2.1	: Tam Moment Aktaran birleşimde yapılan ilk deneylerden elde edilen tipik moment-dönme davranışı..... 7
Şekil 2.2	: 1988’de yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-plastik dönme diyagramı..... 9
Şekil 2.3	: İlk çatlak oluşumundan sonra gözlenen moment-dönme eğrisi.. 11
Şekil 2.4	: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Bulonlu birleşimin tipik akma mekanizmaları..... 12
Şekil 2.5	: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Bulonlu birleşimin tipik göçme durumları..... 13
Şekil 2.6	: Geliştirilmiş kaynak ulaşım deliği ve kaynak elektrotu kullanılan bir numunenin moment dönme eğrisi..... 15
Şekil 3.1	: Zayıf kiriş-kuvvetli kolon felsefesi.....18
Şekil 3.2	: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim.....23
Şekil 3.3	: Önerilen kaynak ulaşım deliği detayı..... 24
Şekil 3.4	: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimin akma mekanizmaları ve göçme durumları..... 25
Şekil 3.5	: Başlık Levhası Kaynaklı birleşim..... 26
Şekil 3.6	: Kısmi dayanımlı birleşimlerin dayanım ve rijitlikleri.....28
Şekil 3.7	:Başlık Levhası Bulonlu birleşimde görülen kayma ve sıyrılma mekanizmaları..... 29
Şekil 3.8	: Başlık Levhası Bulonlu birleşimin akma mekanizmaları ve göçme durumları..... 30
Şekil 3.9	: Başlık Levhası Bulonlu birleşim.....30
Şekil 3.10	: Bulonunda çatlak oluşan birleşimin moment dönme eğrisi.....32
Şekil 3.11	: Alın levhasında plastik şekil değiştirme oluşan birleşimin moment-dönme eğrisi.....32
Şekil 3.12	: Kirişte plastik şekil değiştirme oluşan birleşimin moment dönme eğrisi..... 32
Şekil 3.13	: Uzatılmış Alın Levhalı Birleşimlerin tipik akma mekanizmaları ve göçme durumları.....33
Şekil 3.14	: Değişik tipteki Uzatılmış Alın Levhalı birleşimler.....34
Şekil 3.15	: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim.....35
Şekil 3.16	: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim.....36
Şekil 4.1	: ANSYS programında kullanılan eleman tipleri.....37
Şekil 4.2	: SOLID186 elemanı.....38
Şekil 4.3	: Newton-Raphson metodu..... 39
Şekil 4.4	: Elastoplastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi..... 40
Şekil 4.5	: Analizlerde kullanılan gerilme-şekil değiştirme eğrisi..... 41
Şekil 4.6	: ANSYS programının kullandığı pekleşme kuralları..... 41
Şekil 4.7	: Analizlerde kullanılan önkusur..... 43

Şekil 4.8	: Analizlerin yapıldığı çerçevenin bina içindeki yeri.....	43
Şekil 4.9	: Kolondaki mesnetlerin durumu.....	44
Şekil 4.10	: Bulonların gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	44
Şekil 4.11	: Bulonların sonlu elemanlara bölünmüş hali.....	45
Şekil 4.12	: Öngerme kuvvetinin bulonlarda yarattığı gerilme.....	45
Şekil 4.13	: Alın Levhalı birleşimde uygulanan kuvvet değeri.....	46
Şekil 4.14	: Bulonlarda oluşan kayma gerilmesi.....	47
Şekil 4.15	: Kaynaklı birleşimin kuvvet-plastik dönme eğrisi.....	47
Şekil 4.16	: Kayma levhasında oluşan kayma gerilmesi.....	48
Şekil 5.1	: Analizlerde kullanılan deney geometrisi.....	50
Şekil 5.2	: Değişik yüksekliklere sahip kirişlerin elastik ve plastik uzama dağılımı.....	51
Şekil 5.3	: Kesit yüksekliğinin plastik şekil değiştirmeye etkisinin incelendiği kesitler.....	52
Şekil 5.4	: Aynı özelliklere fakat farklı yüksekliklerine sahip kesitlerin moment-plastik dönme eğrileri.....	52
Şekil 5.5	: Kiriş açıklığının sünekliğe etkisi.....	53
Şekil 5.6	: Kiriş açıklığının plastik şekil değiştirmeye etkisinin incelendiği çerçeveler.....	54
Şekil 5.7	: Aynı özelliklere fakat farklı kiriş açıklıklarına sahip çerçevelerin moment-plastik dönme eğrileri.....	54
Şekil 5.8	: Kiriş açıklığının plastikleşen bölge uzunluğuna etkisi.....	55
Şekil 5.9	: Amerika’da ölçülen akma ve çekme gerilmelerinin yıllara göre değişimi.....	56
Şekil 5.10	: Analizlerde kullanılan iki farklı gerilme-şekil değiştirme eğrisi	57
Şekil 5.11	: Farklı çelik malzeme özelliğinin plastik dönmeye etkisi.....	57
Şekil 5.12	: Çeliğin malzeme özelliğinin plastikleşen bölge uzunluğuna etkisi.....	58
Şekil 5.13	: Farklı panel bölgesi davranışının plastik dönmeye etkisi.....	59
Şekil 5.14	: Panel bölgesi kaymasının plastikleşen elemanlar üzerine etkisi	60
Şekil 5.15	: Süreklilik levhasının plastikleşen bölgeye etkisi.....	61
Şekil 5.16	: Süreklilik levhasının plastik dönmeye etkisi.....	61
Şekil 5.17	: Plastik dönme- kiriş başlık narinliği etkileşimi.....	62
Şekil 5.18	: Kesit uzunlukları.....	64
Şekil 5.19	: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim.....	66
Şekil 5.20	: Kaynak ulaşım deliği detayı.....	66
Şekil 5.21	: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşiminde görülen moment-plastik dönme eğrileri.....	67
Şekil 5.22	: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim tipi kullanılarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsal oluşumu.....	68
Şekil 5.23	: Başlık Levhası Kaynaklı birleşim.....	69
Şekil 5.24	: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimde görülen moment plastik-dönme eğrileri.....	69
Şekil 5.25	: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimi kullanarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsal oluşumu.....	70
Şekil 5.26	: Başlık Levhası Bulonlu birleşim.....	71
Şekil 5.27	: Başlık Levhası Bulonlu birleşimde görülen moment-plastik dönme eğrileri.....	72
Şekil 5.28	: Başlık Levhası Bulonlu birleşimi kullanarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsal oluşumu.....	73

Şekil 5.29	: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim.....	74
Şekil 5.30	: İnce alın levhasında görülen açılma.....	74
Şekil 5.31	: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın levhalı birleşimde görülen moment plastik dönme eğrileri.....	75
Şekil 5.32	: Birleşim4_11’de alın levhasıyla kolon başlığı arasında oluşan ayrılma.....	75
Şekil 5.33	: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimini kullanarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsall oluşumu.....	76
Şekil 5.34	: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim.....	77
Şekil 5.35	: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimde görülen moment-plastik dönme eğrileri.....	78
Şekil 5.36	: Birleşim5_11’de alın levhasıyla kolon başlığı arasında oluşan ayrılma.....	78
Şekil 5.37	: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim tipini kullanarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsall oluşumu.....	79
Şekil 6.1	: Birleşimlerin moment-plastik dönme eğrileri.....	81
Şekil 6.2	: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimde plastik mafsall yeri.....	82
Şekil 6.3	: Zayıf kolon-kuvvetli giriş davranışı.....	83
Şekil 6.4	: Alın ve panel bölgesi güçlendirme levhalarının plastik dönmeye etkileri.....	84

SEMBOL LİSTESİ

beh	: Kiriş yüksekliği
coh	: Kolon yüksekliği
fph	: Başlık Levhası uzunluğu
sph	: Rijitleştirme levhası uzunluğu
ept	: Alın levhası kalınlığı
Sig	: Gerilme
Eps	: Şekil değiştirme
F	: Kayma levhasının alanı
My	: Akma Momenti
Mp	: Plastik Moment
P_{bf}	: Tasarım kuvveti
Q	: Kayma Kuvveti
b_f	: Kesitlerin başlık genişliği
b_{fb}	: Kirişin Başlık genişliği
λ	: Çerçeveadaki iki kolon arası mesafe
t_{cf}	: Kolon başlığı kalınlığı
t_f	: Kesitlerin başlık kalınlığı
t_w	: Kesitlerin gövde kalınlığı
σ_y	: Akma gerilmesi
σ_{yc}	: Kolonun akma gerilmesi
σ_{yb}	: Kirişin akma gerilmesi
τ_{sem}	: Bulondaki makaslama gerilmesi
τ_k	: Kayma levhasındaki kayma gerilmesi

ÇELİK KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN PLASTİK DÖNME KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

1994 yılında meydana gelen Northridge depremi, depreme karşı dayanıklı çelik yapı tasarımı ilkelerinin yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini mühendislere gösterdi. Çünkü, sünekliği sayesinde, çelik yapıların dayanımının depremin oluşturduğu kuvvetlere karşı yeterli olduğu düşünülüyordu. Fakat birleşim detayına gerekli önemin gösterilmeyişi ve tasarım yanlışları yüzünden Northridge depremi çelik yapılara büyük maddi hasar verdi. Oluşan hasarların çoğu kaynak bölgesinde oluşmuştu ve kolon başlığına ya da kiriş başlığına doğru ilerlemişti. Bu çatlaklar bir kere oluştuğundan sonra kiriş-kolon birleşimi büyük eğilme rijitliği kaybına uğruyordu. Hasar tespit edildikten sonra, hasara yol açan sebepleri araştırmak için çalışmalar başladı.

Bu çalışmalar esnasında, bazı kuruluşların biraraya gelmesiyle meydana gelen SAC, FEMA ile birlikte, uzun araştırmalar sonucunda bazı raporlar hazırlandı ve bu raporları mühendislerin kullanımına sundu. Bu çalışmaların ilk aşamasında hasara sebep olan unsurlar belirlendi. Bu unsurlar arasında, kaynak malzemesi ve kaynağın uygulanma şekli, kaynak ulaşım deliği detayı ve birleşim detayının zayıf olması da vardı. Bu yönde yapılan çalışmalardan sonra geliştirilmiş kaynak elektrotu, kaynak ulaşım deliği detayı ve birleşim tipleri önerildi. Bu birleşim tipleri üzerinde yapılan çalışmalar, birleşimlerin uygun kesitler kullanıldığında 0.03 radyan plastik dönme kapasitesine sahip olduğunu gösterdi. Fakat, bahsedilen dönme kapasitesi, birleşimde kullanılan kiriş-kolon enkesitlerine bağlı olduğundan, yapıda kullanılmadan önce ya gerçek boyutlu deneyle ya da bir sonlu eleman programıyla 0.03 radyan plastik dönme kapasitesine sahip olduğunun gösterilmesi gereklidir. Bu çalışmanın amacı, kiriş-kolon enkesitlerinin ve birleşimde yer alan diğer elemanların plastik dönme kapasitesine olan etkilerini incelemek ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan enkesitlerin plastik dönme kapasitelerini belirlemektir.

Bu çalışmada, ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Bu program sayesinde mühendis, yapıların ya da bileşenlerinin bilgisayar modeli hazırlanabilmekte ve bu modele, gerçekte karşılaşılabilecek yükler etkitilebilmektedir. Böylece, mühendis için, daha pahalı olan laboratuvar testlerini yapmadan, yapının ya da bileşeninin tasarımını yapmak mümkün hale gelir.

SAC tarafından önerilen beş model üzerinde analizler yapılmıştır. Bu analizler için 3 adet kiriş ve 2 adet kolon enkesiti seçilip bunların kombinasyonları yapılmıştır. Kiriş enkesitleri seçilirken, Eurocode tarafından tanımlanan, plastik, kompakt ve yarı kompakt sınıflarından seçilmiştir. Kolonların her ikisi de plastik kesit sınıfına aittir.

Hazırlanan bu numunelerden sadece birer tanesinin yeterli plastik dönme kapasitesine sahip olduğu öngörülüyor olmasına rağmen, birleşim geometrisinin plastik dönme kapasitesine etkisinin anlaşılabilmesi için diğer numunelerde önemlidir.

İlk önce, eleman boyutlarının, çelik malzeme özelliğinin, birleşimlerde kullanılan alın levhası, süreklilik levhası, panel bölgesi takviye levhasının etkisini anlayabilmek için analizler yapıp kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra her birleşim tipi için altı adet numune analiz edilip, kesit sınıflarının davranışı gözlemlenmiştir. Bu gözlemlerin değerlendirilmesi sonuç bölümünde sunulmuştur.

EVALUATING PLASTIC ROTATION CAPACITY OF THE STEEL BEAM-COLUMN CONNECTIONS

SUMMARY

The northridge earthquake in 1994, taught the engineers to reevaluate the basic concepts of the seismic design. Because, it was thought that the strength of the steel structures were enough to resist against the earthquake induced forces with its ductile behaviour. But, poor detailing of the connection and some design mistakes caused enormous economic loss after Northridge earthquake. Most of the fractures were initiated in the weld zone and progressed along the column flange or beam flange. Once such fractures have occurred, the beam-column connection has experienced a significant loss of flexural rigidity. After the damages have been reported, studies began to search the reasons behind this damage.

During this studies, SAC joint venture cooperated with FEMA and after some extensive research they offered some provisions to the engineers. First of all, the reasons that causes such damage were investigated. Among the reasons were, weld material, weld access hole detail and poor connection detailing. Following studies offered improved weld electrode, weld access hole detail and connection types. Studies using these new connections showed that these connections possess 0.03 radians of plastic rotation capacity. However, the mentioned plastic rotation capacity is highly depended on the cross-sections used in the connection, that's why before using the cross-sections in the construction the plastic rotation capacity must be calculated with either full-scale tests or finite element software. The scope of this study is, evaluating the effects of beam-column cross-sections and components of the connection to the plastic rotation capacity and the plastic rotation capacity of the common cross-sections used in Turkey.

In this study ANSYS finite element software is used. This software enables engineers to build computer models of the structures or components and apply operating loads. So, engineer can design the structure or components without performing the more expensive full-scale tests.

Five models offered by SAC are analysed. For these analyses three beam cross-sections and two column cross-sections are chosen and made combinations in each other. While choosing the beam cross-sections, plastic, compact and semi-compact cross-sections are chosen which are defined by Eurocode. Both of the column cross-sections are belong to plastic section.

Although it was foreseen that only one of the six specimens were able to perform the 0.03 radians of plastic rotation, they were important in terms of understanding the effects of connection geometry to the plastic rotation capacity.

First of all, the analyses were performed to understand the effects of steel material property, the absence of endplate, continuity plate, and doubler plate and the results were checked with a control specimen. Then for all the connection types six specimens were analysed to monitor the cross-section classes. The results obtained from the study is presented in the last section.

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı standartların amacı, yer sarsıntılarında, ciddi yapısal hasar oluşması pahasına olsa da, yapıların tümünden göçmesine izin vermemektir. Standartlar bunu sağlamak için de, sünek davranış gösterebilen bazı yapı düzenlerinin, yapı sistemlerinin, malzeme ve detayların yapıda kullanılmasını teşvik edici önlemler alır. Bir yapının sünek davranış gösterdiğini söyleyebilmek için, yük taşıma kapasitesinde büyük bir azalma olmadan ve stabilite bozukluğuna uğramadan, elastik olmayan büyük şekil değiştirme yapabilmesi gerekir. Yapı standartları, belirli yapı sistemlerine geldiği farz edilen tasarım kuvvetlerini, o sistemin sünekliğine göre belirler. Yapı standartları genel olarak, sünek olan sistemleri, daha az sünek olanlarına göre daha küçük kuvvetlere göre boyutlandırılmasını sağlar. Çünkü, sünek sistemler, elastik limitlerinin çok üzerinde şekil değişikliği yapabilirler. 1960lardan itibaren, yapı standartlarında yer alan sistemler arasında, kaynaklı moment çerçeve birleşimleri, mühendisler tarafından en sünek sistemlerden biri olarak görüldü. Pek çok mühendise göre, kaynaklı çelik kiriş kolon birleşimi, depremin oluşturduğu kuvvetlerden hasar göremezdi ve böyle bir hasar görülse bile, eleman ve birleşimlerin sünek akması tarafından sınırlanırdı. Deprem kuvvetlerinin göçmeye sebep olamayacağı düşünülüyordu.

1.1 NORTHRIDGE DEPREMİ VE SONUÇLARI

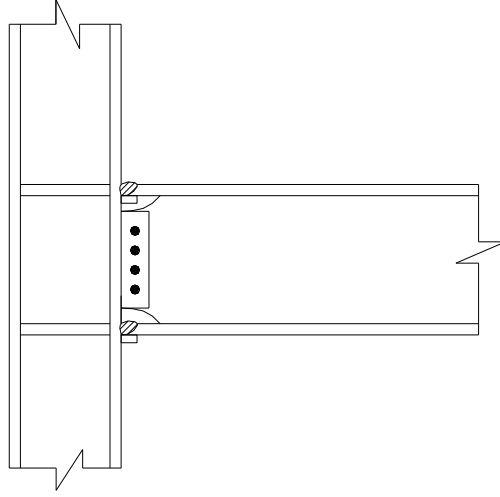
17 Ocak 1994 tarihinde meydana gelen Northridge depremi bu inanışları yıktı. Bu depremden sonra, çok sayıda çelik moment çerçeve binasının kiriş kolon birleşimlerinde, gevrek kırılmalar görüldü. Hasar oluşan binaların kat yükseklikleri 1 ile 26 arasında; yaşları ise, 30 ile deprem anında inşası devam 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 tesbiti

mühendisleri şaşırtmıştı. Bu hasarların tesbitiyle beraber, başka bölgelerdeki binalarda, daha önceki depremlerde meydana gelmiş fakat farkedilmemiş 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 tesbitinde ve onarılmasında harcanan masraflar ve onarım sırasında binanın kullanılamamasından dolayı oluşan ekonomik kayıplar da dahil edilmelidir.

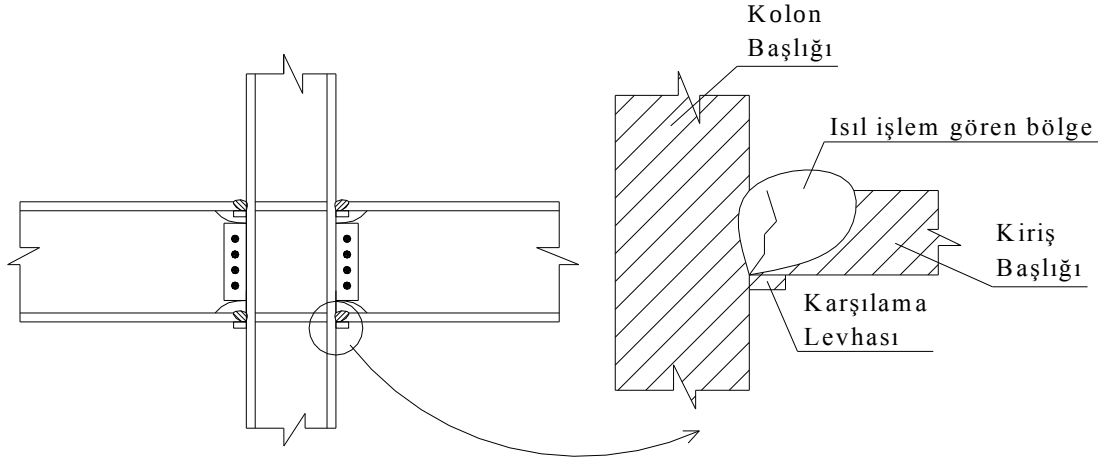
Çelik moment çerçevesi binaları, deprem kuvvetlerine karşı dayanabilmeleri için tasarlanırken, dayanım kaybı olmadan büyük plastik şekil değiştirme ve akma yapabilme özellikleri olduğu kabul edilir. Kirişte ve kiriş-kolon birleşiminde plastik şekil değiştirme oluşup, binaya deprem sırasında gelen enerjiyi 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.

Çelik moment çerçevesi binalarının süneklikleri, kiriş kolon birleşimlerinde meydana gelen akma sonucunda oluşur. Bu akma sonucunda kirişte veya istenmemesine rağmen kolonda plastik mafsallık ve kolon panel bölgesinde plastik kayma şekil değiştirmesi, ya da bu durumların kombinasyonu oluşabilir. Çelik moment çerçevesi birleşimlerinde kullanılan Şekil 1.1’de görülen birleşimin, belirgin kapasite azalması görülmeksizin, 0.015 ile 0.02 radyan mertebesinde plastik dönme yapabileceğine inanılıyordu [1].



Şekil 1.1: Northridge depremi öncesinde kullanılan tipik birleşim

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 çatlamlar görülmüştür. Çatlakların çoğu Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, kiriş başlığıyla kolon başlığı arasında yer alan kaynakda başlamıştır [1]. Bir kere başladıktan sonra da her birleşimin kendi yapısına bağlı olarak çeşitli yolları izleyerek ilerlemiştir.



Şekil 1.2: Kiriş-kolon birleşimindeki tipik çatlak başlangıç bölgesi.

Bazı çatlaklar, kaynakta başlayıp kaynak kalınlığı boyunca ilerlemiştir. Bazı çatlaklar ise kolon başlığında oluşmuştur. Bu tip çatlakların görüldüğü durumlarda, kolon başlığının bir parçası kiriş başlığına bağlı kalıp kolonun kalanından ayrılmıştır. Bazı çatlaklar ise, kiriş alt başlığının hizasında, yataya yakın bir eksenle kolon başlığında

oluşup, yine kolon başlığında ilerlemiştir. Bazı durumlarda ise bu çatlaklar kolon gövdesine doğru ilerlemiştir.

Bu tip çatlaklar bir kere oluştuğundan sonra, kiriş-kolon birleşimi büyük bir eğilme rijitliği kaybına uğruyordu. Bu kayıba rağmen pek çok hasarlı binada bu hasarı belirten fazla bir iz yoktu. Mimari elemanlarda ya da yangın kaplamalarında hasar oluşmamıştı. Bu durumda hasarların tesbit edilebilmesi için mimari elemanların ve yangın kaplamalarının kaldırılması gerekiyordu. Hasar bulunamasa bile bu pahalı bir işlemdi. Hasarlı birleşimlerin onarımı ise daha da pahalı bir işlemdi. Bazı binaların tümünden yıkılması, hasarların onarılmasından daha pratik bulunmuştu.

1.2. NORTHRIDGE DEPREMİNDEN SONRA YAPILAN ÇALIŞMALAR

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'nde (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 yoğunlaşp, 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 binlardan veri toplanması, toplanan verilerin istatistiksel olarak incelenmesi, hasarlı olan ve olmayan binaların analitik çalışmalarının yapılması ve Northridge depremi öncesinde yoğun olarak kullanılan birleşim detayının laboratuvar deneylerinin yapılması vardı.

Bu alışmalar tamamlandıktan sonra FEMA ve SAC, SAC elik Projesi Faz 2 için tekrar anlaştı ve elik moment ereve 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 erevesi birleşim detayının, gevrek göçmeye sebep olabilecek tipte özelliklerinin olduğu görülmüştür. Bu zellikler:

- Birleşim zerindeki 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 yapılıyor. 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. Grsel inceleme yapılamadığından kullanılması gereken ultrasonik test yöntemleri de, birleşimin geometrisi uygun olmadığından çok zor yapılabilirdi. 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].

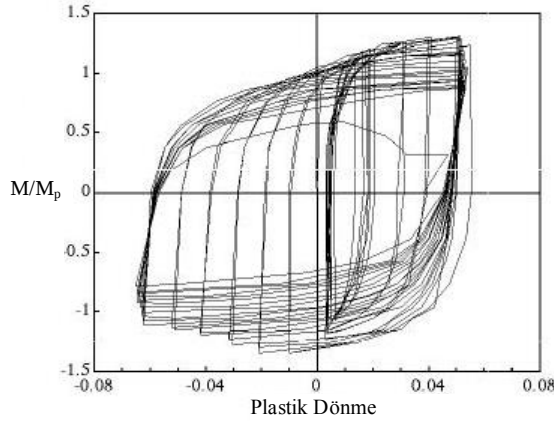
- Kaynak ulaşım deliğinin geometrisinden dolayı kiriş başlığında uzama yoğunlukları oluşabiliyordu. Bu uzama birikimleri yüzünden, kiriş başlığında düşük çevrimsel yorulma etkileri oluşabiliyordu [1].
- Kalın kiriş başlığı olan birleşimlerde, kolon başlığı-kiriş başlığı birleşiminin merkezi, harekete 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 ulaşıldıktan sonra, çelik moment birleşimlerinin güvenilir sünnek davranış gösterebilmeleri için eskiden kullanılan tasarım, malzeme, işçilik ve birleşim detaylarında değişiklik ve iyileştirmeler yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

2. NORTHRIDGE ÖNCESİ KULLANILAN BİRLEŞİM

2.1 BAŞLIĞI KAYNAKLI-GÖVDESİ BULONLU BİRLEŞİM

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 2.1: 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 2.1’de görülen mükemmel histeritik davranış bu kanıtlardan biridir [1]. 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 kaynağı¹ kullanılarak yapılmıştır.

¹ İngilizce’de Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

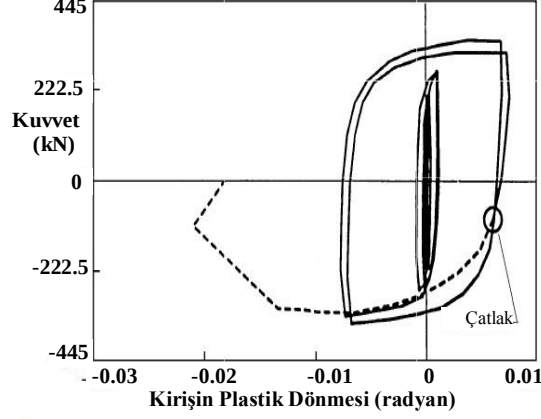
Bu deneyler sırasında, histerisis eğrilerinde çok az sıkışma ve bozulmanın olduğu görüldü. Bu bozulmalar da genellikle deney kirişinin yanal burkulmasından kaynaklanıyordu. Başlık kaynağında çatlamlar görölüyordu ama bu çatlaklar, plastik dönme 0.02 radyanı geçtikten sonra başlıyordu [1]. O yıllarda 0.02 radyanlık plastik dönmenin, depreme dayanıklı yapı tasarımı için yeterli olduğu düşünölmekteydi.

Birleşimlerle ilgili yapılan çalışmalarda panel bölgesi akmasının ne kadar önemli olduğu görüldü. Panel bölgesi akmasının, çerçeve şekil değıştirmesinin, 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 değıştirmeleri kolaylıkla öngörölebilir 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 birikimleri 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 yolaçmaktadır. Bu deneylerde, başlık ve gövde narinlikleri, yanal destek, kuvvetli kolon zayıf kiriş felsefesi, süreklilik ve kayma bölgesi takviye levhası gereklilikleri gibi pekçok 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 [1].

Daha sonraki çalışmalar, başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşim ile ilgili potensiyel 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 [1]. 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

kaynağı² ve bulonlu alın levhası birleşimleri kullanılmıştır [1]. Deneyler sonucunda kısıtlı bir süneklik gözlenebilmiştir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi elde edilen kuvvet-plastik dönme eğrisi, depreme dayanıklı yapı tasarımı için yetersizdir [1].



Şekil 2.2: 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 [1]. 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 [1]. 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 büyüttü. 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

² İngilizce'de Flux Core Arc Welding (FCAW)

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 mafsallara sayesinde, kaynaklı bölgelerde yüksek gerilmelere yaklaşılmamasını sağlıyordu [1].

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

Oluşturulan veritabanına göre, yeni binalarda daha çok atlağa 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 [1].

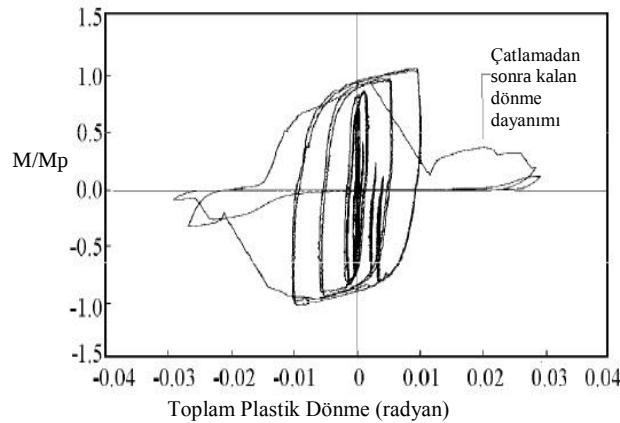
Veri tabanına göre yüksek kirişlerin ve kalın kiriş başlıklarının kullanıldığı binalarda daha fazla hasara rastlanıyordu. Kiriş yüksekliliği W21 veya daha az olan hiç bir birleşimde kiriş veya kolonda atlağa rastlanmıyordu. Bu istatistik oldukça değerlidir, çünkü bir ereve için, kiriş veya kolonunda 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 [1].

2.2. GÖÇME DURUMLARI

Başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimlerin rijitliği, birleşimin elastik esnekliğinin özel gereksinimlere ihtiyaç hissetmeyeceği kadar yüksektir. Bu durumda odaklanılması gereken nokta, birleşimin dayanıklılığı ve sünekliğidir. Dayanımı ve süneklik ya da dönme kapasitesini kontrol eden etkenler, akma mekanizması ve göçme durumlarıdır. Bu durum Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'nin incelenmesiyle daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.1, belirgin bir eğilme akması yapıp yerel burkulmadan dolayı göçen, W18 kirişten oluşan bir birleşimin moment-dönme davranışını göstermektedir. Şekil 2.2'deki benzer boyuttaki kirişten oluşan birleşim ise kaynak çatlama yüzünden çok az süneklik göstermiştir [1]. Bu iki birleşim arasındaki davranış farklılıklarını, akma mekanizmalarındaki ve göçme durumlarındaki farklılıkla açıklayabiliriz.

Göçme durumlarıyla akma mekanizması, birbiriyle ilişkili olan fakat farklı kavramlardır. Göçme durumları çatlağa yol açar, şekil değiştirme kapasitesini veya dayanımı belirgin şekilde azaltır. Tek bir göçme durumu, sünekliğin ve dayanımın azalmasına yol açar ama dayanımın tümünden kaybedileceğini söyleyemeyiz.

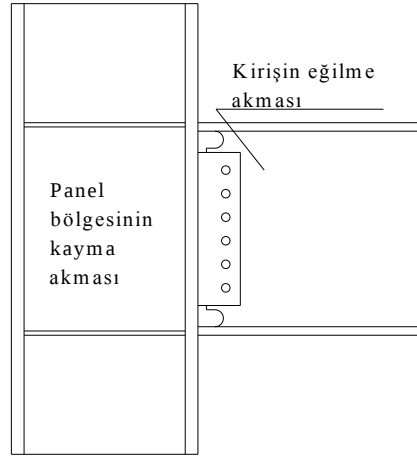
Şekil 2.3'de, başlık kaynağında ve daha sonra başlığında çatlama oluşmuş kirişin davranışı görülmektedir [1]. Bu şekilden açıkça görebildiği gibi, birleşim her iki çatlaktan sonra da, çatlakların olduğu dönme değerlerinden belirgin seviyede yüksek dönme değerlerine ulaşmıştır. Bu da, ilk göçme durumunun önemli olduğunu, fakat birleşimin tüm taşıma kabiliyetini ve elastik olmayan dönme kapasitesini kaybetmediğini gösteriyor.



Şekil 2.3: İlk çatlak oluşumundan sonra gözlenen Moment-Dönme eğrisi

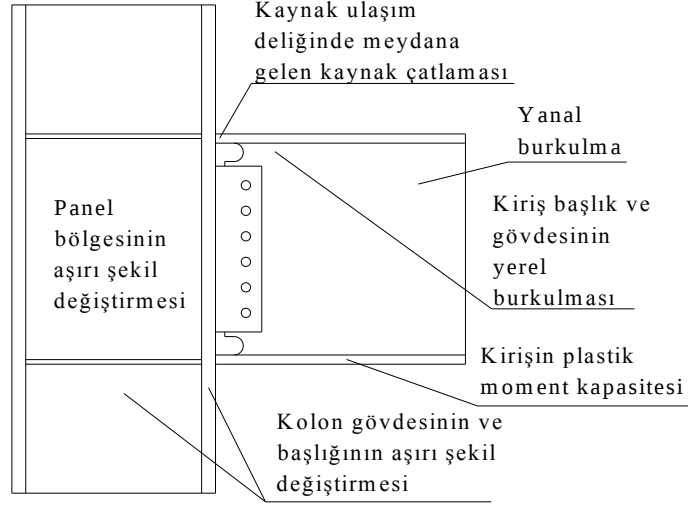
Akma mekanizmaları, elastik olmayan şekil değiştirmeler doğurur ve sonuç olarak enerji Emilimi ve rijitlikte değişme görülür. Bazı akma mekanizması ve göçme durumu kombinasyonları sünek davranış oluştururken; bazıları gevrek göçmeyle sonuçlanır; bazıları ise iki durumun arasında davranış gösterir. Belirgin plastik dönme kapasitesi öngörebilmek için, bir veya birkaç sünek akma mekanizmasına karşılık gelen dayanım değeri, göçme durumlarına karşılık gelen dayanımdan daha düşük olmalıdır. Gevrek göçme durumlarından birine ait olan dayanım, sünek akma mekanizmalarından daha düşükse, bu durumda sınırlı plastik dönme beklenebilir.

Şekil 2.4’de başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimde karşılaşılan yaygın akma mekanizmaları görülmektedir [1]. Kolonun akması engellenmiştir, çünkü zayıf kolon davranışı olan çerçevelerin, zayıf kiriş çerçevelere göre daha fazla elastik olmayan kat ötelemesi yaptığı bilinmektedir. Sonuç olarak, kirişin eğilme akması ve panel bölgesi akması, bu birleşimden oluşmuş çerçeveler için kabul edilebilecek akma mekanizmalarıdır. Kolon başlık ve gövdesinde oluşabilecek yerel akmalar da elastik olmayan dönmeye katkıda bulunabilir, ama bunlar küçük katkılardır.



Şekil 2.4: Başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimin tipik akma mekanizmaları

Şekil 2.5’de başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşiminde karşılaşılan yaygın göçme durumları görülmektedir. Bu göçme durumları oldukça çeşitlidir. Çatlak, kaynakta veya kirişteki kaynak ulaşım deliğinde oluşabilir, ya da kaynakta oluşup kolona doğru ilerleyebilir [1].



Şekil 2.5: Başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimin tipik göçme durumları

Yırtılma, çatlak oluşumu ya da yetersiz süreklilik levhalarından dolayı kolon başlığında veya gövdesinde aşırı şekil değiştirmeye bağlı olarak göçme oluşabilir. Panel bölgesi akması ya da kiriş eğilmesi akma mekanizması olduğu gibi, aşırı plastik şekil değiştirme halinde göçme durumu da olabilir. Fakat bu göçme durumlarının dayanımı, ilk akma dayanımından daha yüksek olacağı için yeterli plastik dönme elde edilebilir. Büyük şekil değiştirmeler, kirişin yanal burkulması veya başlıkların ya da gövdenin yerel burkulması, dayanımı düşüreceğinden, göçme durumu olabilir. Son olarak da, kayma levhasının çatlaması veya yırtılması sayılabilir, fakat geçmiş tecrübeler göstermiştir ki bu durum, sadece diğer göçme durumları oluşuktan sonra görülebilmektedir.

Göçme durumlarının oluşması ve oluşum sırası, her birleşimin geometrisine ve tipine bağlıdır. Birleşimin tipi, bazı göçme durumlarını ön plana çıkarıp bazılarını yok edebilir fakat, aynı birleşim tipine sahip birleşimlerin farklı davranış göstermeleri, ancak geometri farklılıklarıyla açıklanabilir. Bu sebeple, geometri değişikliklerinin, birleşim performansına olan etkisi de incelenmiştir.

2.3. NORTHRIDGE ÖNCESİ TASARIMIN ZAYIF NOKTALARI

2.3.1. Kaynak Türü ve İşlemi

Northridge öncesi birleşimin başlıkları E70T-4 FCAW-SS kaynak metali kullanarak kaynaklanmıştı. Bu kaynak metali, gerekli en düşük CVN sertliğine sahip değildi ve

CVN testleriyle tanımlanmış çentik sertliğinin çok düşük olduğu gösterilmiştir [1]. Düşük CVN sertliği, birleşim çatlaklarının oluşmasında etkili olan faktörlerden biridir. Northridge öncesi kaynaklarda, kaynak karşılama parçası hep yerinde bırakılırdı. Yerlerinde bırakılan karşılama parçaları, kaynak kökü geçişlerinin sebep olduğu kaynak kusurlarını gizliyordu. Kaynak kusurları ve karşılama parçaları, Northridge öncesi kaynakları çatlak oluşumuna karşı hassaslaştırmıştır ve çalışmalar sonucunda akma gerilmesinin hemen altında veya düşük plastik uzama değerlerinde çatlak oluşumu beklenmesi gerektiği görülmüştür. Büyük CVN sertliği olan ve daha az kusura sahip olan bir kaynağın, çatlamlara karşı daha büyük bir direnci olduğu ve sünek göçme durumlarından birine ulaşma şansını arttırdığı bilinir. Dolayısıyla E70T-4 FCAW-SS kaynak metalinin sismik uygulamalar için kullanılmasının uygun olmadığı görülmüştür [1].

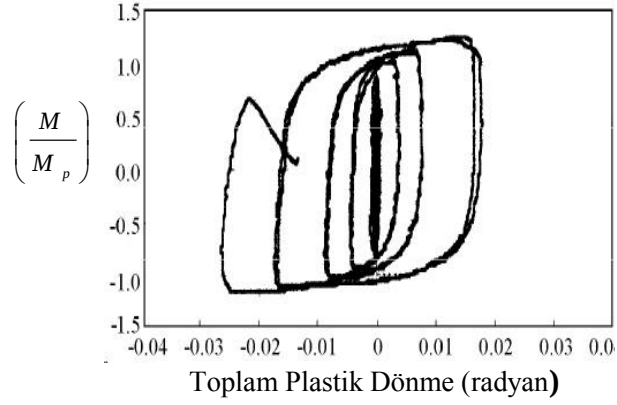
Kaynak metali üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda yeterli CVN sertliğine sahip olan E70TG-K2 FCAW-SS elektrotu kullanılmıştır. Alt başlık kaynağı için karşılama parçaları yerinden kaldırılmış ve kaynak geçişleri E71T-8 FCAW-SS elektrotu ile güçlendirilmiştir. Üst başlık, kararsız kaynak büyümesi için daha az tehlikeli olduğu için karşılama parçası yerinde bırakılmıştır. Analizlerde, iç kusurların kararsız hale gelebilmeleri için yüzey kusurlara göre daha büyük olmaları gerektiği gözlemlenmiştir. Bu durumda, iç kusurlar daha az tehlike arz ederler. Bu sebeple, karşılama parçasının altına, muhtemel kusurları iç kusur haline getirmek için köşe kaynağı çekilmiştir [1].

Geliştirilen kaynak elektrotları ve yeni işlemler, birleşim performansını belirgin şekilde arttırmış olmasına rağmen, plastik dönme kapasitesi üzerinde önemli bir artış görülmemiştir. Görülen performans artışının sebebi, çatlakların, başlık kaynaklarında oluşmamış olmasıdır. Çatlaklar, kiriş başlığında, kaynak ulaşım deliği yakınlarındaki ısıtıl işlem görmüş olan bölgenin dışında oluşmuştur. Görüldüğü gibi sadece kaynak elektrotlarını ve uygulanan işlemleri geliştirmek, birleşimin, yeterli sismik performansa ulaşmasında yetersiz kalıyor. Fakat bu çalışmayla, Northridge depremin çok sık karşılaşılan kaynak çatlama sorunu bir çözüm üretilmiştir.

Bu deneylerden sonra, kullanılan kaynak türünün önemi anlaşılmış ve Northridge sonrası birleşimler hazırlanırken, depreme karşı dayanıklı tasarım kurallarına uygun olan yeni elektrotlar tasarlanmıştır.

2.3.2. Kaynak Ulaşım Deliği Geometrisi

Kaynak ulaşım deliğinde oluşan çatlaklar, ulaşım deliğinin geometrisiyle ilgili soru işaretleri oluşmasına yol açtı. Standartlar, ulaşım delikleri için genel gereksinimleri ve şekli veriyordu fakat son detaylar konusunda serbestlik sağlıyordu. Önceki bölümde görüldüğü gibi, ulaşım deliğinin geometrisi, kiriş başlığının çatlama potansiyelini etkileyebiliyordu. Bunun üzerine, birleşim performansını arttırabilmek için ulaşım deliğinin geometrisi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Şekil 2.6) [1].



Şekil 2.6: Geliştirilmiş kaynak ulaşım deliği ve kaynak elektrotu kullanılan bir numunenin moment-dönme eğrisi

Geliştirilmiş kaynak ulaşım deliği detayı, birleşimin daha büyük plastik şekil değiştirme yapmasını sağlamıştır ama elde edilen sonuç yine de sismik tasarım için yetersizdir. Buna ek olarak, geliştirilmiş kaynak ulaşım deliği detayı, çatlak ya da yırtılma olmadan önce önemli enerji emilimi sağlamıştır. Fakat, geliştirilmiş detaylı birleşim, kayma levhası yırtılması ile başlık yırtılması hemen hemen aynı şekil değiştirme değerinde başladığından, yırtılmaya sebep olabilir. Bu, geliştirilmiş detayın birleşim gövdesinde çatlak yarattığı anlamına gelmez; büyük plastik dönmeler oluştuğunda gövde ile başlık birleşiminde etkileşimin arttığını gösterir.

3. NORTHRIDGE SONRASI MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Sismik tasarımda kullanılan üç çeşit moment çerçevesinden bahsetmek mümkündür. Bunlar, normal moment çerçevesi, orta moment çerçevesi ve özel moment çerçevesidir. Normal moment çerçevelerinin, deprem hareketinden oluşan yükler etkisindeyken elastik olmayan sınırlı şekil değiştirme göstermesi beklenir. Normal moment çerçevesi olarak hazırlanan bir birleşimin, 0.01 radyan elastik olmayan dönme yapması gerekir. Orta moment çerçevelerinin ise, yer hareketi sonucunda oluşan kuvvetler etkisindeyken orta seviyelerde elastik olmayan dönme yapması beklenir. Bu kategoride yer alan birleşimlerin 0.02 radyan elastik olmayan dönme yapması gerekir. Son olarak, özel moment çerçeveleri ise yer hareketinin sebep olduğu kuvvetlere karşı sergilediği performansın oldukça iyi olması beklenir. Bu kategoride yer alan birleşimlerin 0.03 radyan elastik olmayan dönme kapasitesi değerini geçmesi gerekir [2].

Tam moment aktaran çerçevelere rijit çerçeve ya da sürekli birleşim de denir. Bu tip kiriş-kolon birleşimlerinin moment ve kayma kuvvetlerini aktardığı ve yapısal analizlerde yapılan süreklilik kabulünü karşılayacak kadar rijit olduğu kabul edilir. Bu kabulün sonucu olarak, birleşimi oluşturan elemanlar arasında kalan açı, yükler etkitildikten sonra da değişmeden kalması gerekir [2].

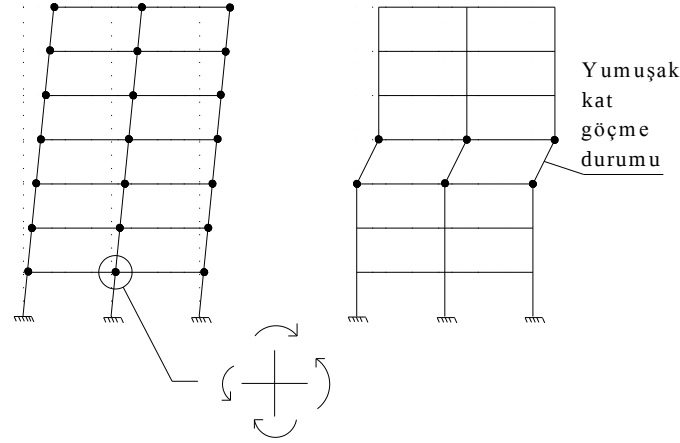
Kısmi moment aktaran birleşimlerin ise yükler etkidikten sonra, birleşimi oluşturan elemanlar arasında kalan açıyı korumaya yetecek rijitliğinin olmadığı kabul edilir. Dönme rijitliği gözardı edilirse birleşime, basit birleşim denir. Sahip olduğu moment-dönme bağıntısı geliştirilirse birleşime yarırijit birleşim denir. Yarırijit birleşimler, rijit ve basit birleşimler arasında kalan bir davranışa sahiptir. Kaynaklı birleşimler, tam moment aktaran çerçeve sınıfına girerken; bulonlu birleşimler, birleşimin geometrisine göre tam veya kısmi moment aktaran çerçeve sınıfına girebilir. Sismik tasarımda, oluşacak olan plastik mafsallı birleşim elemanlarından uzakta tutabilmek için birleşimin, kendisini meydana getiren elemanlardan daha fazla

rijitliğe sahip olması gerekir. Dolayısıyla, tam moment aktaran çerçevelerin oluşturulması gerekir [2].

Bir önceki bölümde Northridge depremi öncesinde kullanılan birleşimin, pek çok sismik uygulama için yeterli plastik dönme kapasitesi gösteremediği belirtilmişti. Ayrıca, kaynak işleminin, kaynak elektrotunun ve kaynak ulaşım deliği detayının iyileştirilmesiyle giderilecek sorunlar ortaya konmuştu.

Binaların depreme karşı dayanıklı tasarım standartlarında yapılan kabul göre, sık oluşan küçük depremlerde taşıyıcı sistem elastik sınırlarda ve depremden sonra kullanılabilir olarak kalmalı, fakat büyük depremlerde, taşıyıcı sistem, göçme durumuna erişmeden önce elastik olmayan büyük değiştime yapabilmelidir. Kullandığımız deprem standartlarına göre, gerilme kontrolü, azaltılmış deprem kuvvetleri kullanılarak yapılır. Moment taşıyan özel çelik çerçeveler, çok sünek sistemler olarak kabul edildiğinden, sismik kuvvetlerde büyük azaltmalar yapıldıktan sonra tasarımda kullanılacak kuvvetler belirlenir.

Bu yaklaşıma göre, çelik moment çerçevesi birleşiminden elastik olmayan büyük şekil değiştirmeler yapması beklenir. Bu şekil değiştirme, birleşimi oluşturan kirişte, birleşimin kendisinde ve kolon panel bölgesinde oluşur. Zayıf kolon davranışı ya da elastik olmayan kolon eğilmesi de istenen elastik olmayan şekil değiştirmeyi sağlar, fakat kolonda oluşan plastik mafsalları, elastik olmayan hasarı kolonda yoğunlaştırır ve çerçeve kararlılığını azaltır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, çelik çerçeve sistemleri, aşırı deprem yükleri halinde plastik mafsalların kolonlardan ziyade kirişlerde oluşması halinde daha çok histeretik enerji yutarlar [3]. Plastik mafsalların kirişte oluşması sonucu ortaya çıkan göçme mekanizması, yumuşak kat mekanizmasının oluşumunu engeller. Bunun sonucu olarak, çok katlı çerçevelerde, zayıf kolon-kuvvetli kiriş birleşimlerinden kaçınmak gerekir. Sismik performans açısından, kolon panel bölgesini ve birleşimi oluşturan kiriş daha önemlidir.



Şekil 3.1: Zayıf kiriş-kuvvetli kolon felsefesi

Depreme karşı dayanıklı tasarımın önemli konuları arasında birleşimin dayanımı, rijitliği ve sünekliği yer alır. Birleşimin dayanımı, azaltılmış sismik kuvvetlere göre kontrolü yapılan çerçevenin dayanımını etkiler. Birleşim rijitliği, yapının dinamik cevabını ve gereken şekil değiştirme ihtiyacını belirler. Birleşimin sünekliği ise yapının elastik olmayan şekil değiştirme kapasitesini ve plastik dönme kapasitesini belirler. Northridge depreminden önce, Northridge öncesi birleşimin, tüm sismik ihtiyacı karşılayabildiği düşünüldüğünden, birleşimin dayanımı, rijitliği ve sünekliği tasarımda hesaba katılmazdı. Birleşimin rijitliğinin, kolon panel bölgesinin rijitliğinden veya kirişin plastik dönme kapasitesinden büyük olduğu kabul edilmişti. Birleşim rijitliği gözardı edilmişti çünkü birleşimin rijit bir birleşim olduğu kabul ediliyordu ve böylece eleman rijitliği ve deprem etkisinin yapı üzerindeki elastik sismik ihtiyacı kontrol edebileceği düşünülüyordu.

Northridge depremi bu düşünceyi yıktı. Northridge öncesi birleşiminin sünek olmadığı ve mühendislerin beklediği plastik dönmeyi yapamadığı görüldü. Bu birleşim, elastik olmayan çok az şekil değiştirme yaptı ve beklenmeyen göçme durumları yüzünden kirişin ve panel bölgesinin akma dayanımından daha az dayanım gösterebildi. Karşılaşılan bu durumdan sonra moment çerçeve birleşimlerinin ayrıntılı incelemelerinin yapılması gerekti. Pek çok birleşim tipi ele alındı ve her birleşim tipinin rijitlik, dayanım ve sünekliği incelendi.

Yeterli bir sismik davranış için yeni birleşimlerin geliştirilmesinde mühendisin seçeceği üç yol vardır [4]. Bunlar:

1. Eğilme momentine ve kayma kuvvetine sebep olan kuvvetleri tamamen yeni bir yöntemle saptamak ve böylece birleşimin her parçasının dayanımı, rijitliğini ve sünekliğini iyice anlaşılır ve kontrol edilebilir kılmak;
2. Birleşimde, dayanım, rijitlik ve süneklik değerleri bilinen bir sigorta tasarlayarak birleşimin diğer elemanlarını tahmin ya da kabul edilemeyen davranıştan korumak;
3. Sismik davranışları zayıf, ya da belirsiz olan birleşim elemanlarını güçlendirmek veya dayanım ve süneklik ihtiyacının, davranışı bilinen başka noktalara taşındığından emin olmak.

Bu üç seçeneğin çeşitli kombinasyonları kullanılarak yeni birleşimler tasarlanmıştır.

Stratejiler çoğunlukla, her birleşim tipinin akma mekanizmasının ve göçme durumunun tam olarak anlaşılabilmesini gerektirmektedir. Çünkü, akma mekanizması ve göçme durumları, birleşimin dayanımını ve sünekliğini belirlemektedir. Akma mekanizması dayanımı, akmanın başladığı ve ilk rijitlik değişiminin beklendiği moment değeridir. Akma mekanizmaları sonucu, önemli plastik dönme, rijitlik değişimi ve enerji yutulması oluşur. Çoğu birleşimin bir kaç tane akma mekanizması vardır, ve en düşük dayanımlı akma mekanizması, elastik olmayan şekil değiştirmeyi kontrol eder. Bunun yanında, eğer bütün akma mekanizmalarının dayanımı, birleşimin kritik göçme durumu dayanımından küçükse, bütün akma mekanizmaları, oluşan θ_p 'ye katkıda bulunabilir. İyi bir sismik performans için, birden fazla sayıda mekanizmanın olması tercih edilir. Pek çok birleşimde değişik mekanizmalardan katkı alabilmek için denge durumlarına ihtiyaç duyar. Bu denge durumları, en çok istenilen akma mekanizmasının ilk önce gerçekleşmesini; istenmeyen durumun ise geciktirilmesini veya tamamen önlenmesini sağlar [4].

Göçme durumları, çatlağa, yırtılmaya ya da birleşimin dayanımında azalmaya sebep olurlar. Her birleşimin bir kaç tane olası göçme durumu vardır ve kritik göçme durumunun, o birleşim için olan dayanımı diğer durumlardan daha düşüktür. Bir birleşimin sünekliği ve elastik olmayan şekil değiştirme yapabilme kabiliyeti, kritik göçme durumu dayanımının en elverişsiz akma dayanımı mekanizmasına yakınlığına bağlıdır. Elverişsiz akma mekanizması dayanımı, kritik göçme durumu dayanımından belirgin bir şekilde küçük olan birleşimler, belirgin elastik olmayan

şekil değiştirme ve büyük plastik dönme oluştururlar. Elverişsiz akma mekanizması dayanımı, kritik göçme durumu dayanımına yakın ya da daha büyük olan birleşimler ise çok az süneklik gösterir ya da hiç göstermez. Büyük depremlerde, binaların, yeterli sismik performans gösterebilmeleri için sünek olmaları gerekir. Bu sebeplerden dolayı, elverişsiz akma mekanizması ile kritik göçme durumu dayanımı arasında bir denge olmalıdır [4].

Göçme durumu ile akma mekanizmasının dengelenebilmesi için, birleşimin, tüm akma mekanizmaları ve göçme durumları anlaşılmalıdır. Mühendis, bu durumları ve mekanizmaları, göçme durumlarının her birini, kötü etkileri yok edecek şekilde birleştirmelidir. Sonuç olarak, yapısal tasarımda kullanabilecek kadar basit ama sismik davranış açısından yeterli olacak birleşim tipleri üzerinde durulmuştur. Bu modellerde, her birleşimin, elverişsiz akma dayanımı ve kritik göçme durumları bulunmuş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, modellerin güvenilir ve yeterli olmalarını sağlamıştır. Plastik dönme kapasitesi θ_p ise, seçilen denge koşulunu sağlayan birleşimlerin, deneysel dönme kapasitelerinin istatistiksel analizlerinden elde edilmiştir. Elverişsiz akma mekanizması ile kritik göçme durumu dayanımı arasında en az veya en fazla uzaklaştırmaya ihtiyaç duyulduğunda denge kurallarından yararlanılmıştır. Uzaklaştırmanın büyüklüğü, değişik denge kuralları kullanarak, deneylerden elde edilen birleşim davranışlarını karşılaştırarak belirlenmiştir. En az uzaklaştırma, bir akma mekanizması açıkca diğerlerinden üstünse uygulanmıştır. En fazla uzaklaştırma ise mekanizmaların hepsinde de akmaya ihtiyaç duyulduğu durumlarda uygulanmıştır. Bu denge kuralları her birleşim tipi için ayrı ayrı belirlenir [4].

Northridge sonrası birleşimlerde, kolonların eğilme akmasına ulaşması engellenmiştir. Çünkü bu tip birleşimlerin, belirgin elastik olmayan kat ötelemesi ihtiyaçı olduğu bilinmektedir. Bunun sonucu olarak, genellikle, kolon başlığını kiriş başlığına birleştiren kaynaklarda kritik gerilmeler oluşmaktadır. Bütün birleşimlerdeki ortak kaygı, kolonun eğilme akması yapmasını engellemektir.

3.1. KAYNAKLI BİRLEşİMLER

Kolonla kiriş arasındaki bağlıl dönme azaltıcı özelliğinden dolayı, kaynaklı birleşimler, tasarımda en çok kullanılan birleşim tipini temsil ederler. Bu birleşim tipi sayesinde, pekçok durumda, yapıları sürekli çerçevelermiş gibi modellemek

mümkündür. Nitekim, kaynaklı birleşimlerde, kolon gövdesinin süreklilik levhalarıyla ve kayma bölgesi takviye levhalarıyla güçlendirilmesi durumunda, kiriş kolon birleşiminin davranışı, ideal rijit davranışa çok yakındır.

Kaynak malzemesi çok az şekil değiştirme yapabilir. Dolayısıyla kaynak malzemesi gevrek göçme davranışı gösterir. Bu yüzden, kaynak elemanlarını, uygun tasarım yöntemleriyle boyutlandırıp, kaynak göçmesinden kesinlikle kaçınılmalıdır.

Northridge Depreminden çıkarılan sonuçlardan faydalanarak hazırlanan yedi farklı kaynaklı birleşim dört ana kategoride toplanabilir [1]:

- Rijitleştirilmemiş Birleşimler
- Rijitleştirilmiş Birleşimler
- Kiriş Kesiti Azaltılmış Birleşimler
- Başlık Levhası Kaynaklı Birleşimler

Bu çalışmada, rijitleştirilmemiş ve kaynaklı başlık levhalı birleşimleri üzerinde durulmuştur. Birleşimlerin ortak özellikleri olduğu gibi, kendilerine has özellikleri de vardır. Her birleşim ayrı ayrı ele alınacak ve akma mekanizmalarıyla göçme durumları incelenip, bu durumların birleşim sünekliğine olan etkileri üzerinde durulacaktır.

3.1.1. Rijitleştirilmemiş Birleşimler

Northridge sonrası oluşturulan birleşim tiplerinden dört tanesi bu grup içinde yer alır. Bunlar,

- Geliştirilmiş kaynak kullanarak hazırlanan başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimler
- Geliştirilmiş kaynak ve kaynak ulaşım deliği kullanarak hazırlanan başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimler
- Geliştirilmiş kaynak ve kaynak ulaşım deliği kullanarak hazırlanan başlığı kaynaklı-gövdesi kaynaklı birleşimler
- Serbest başlık levhalı birleşimler

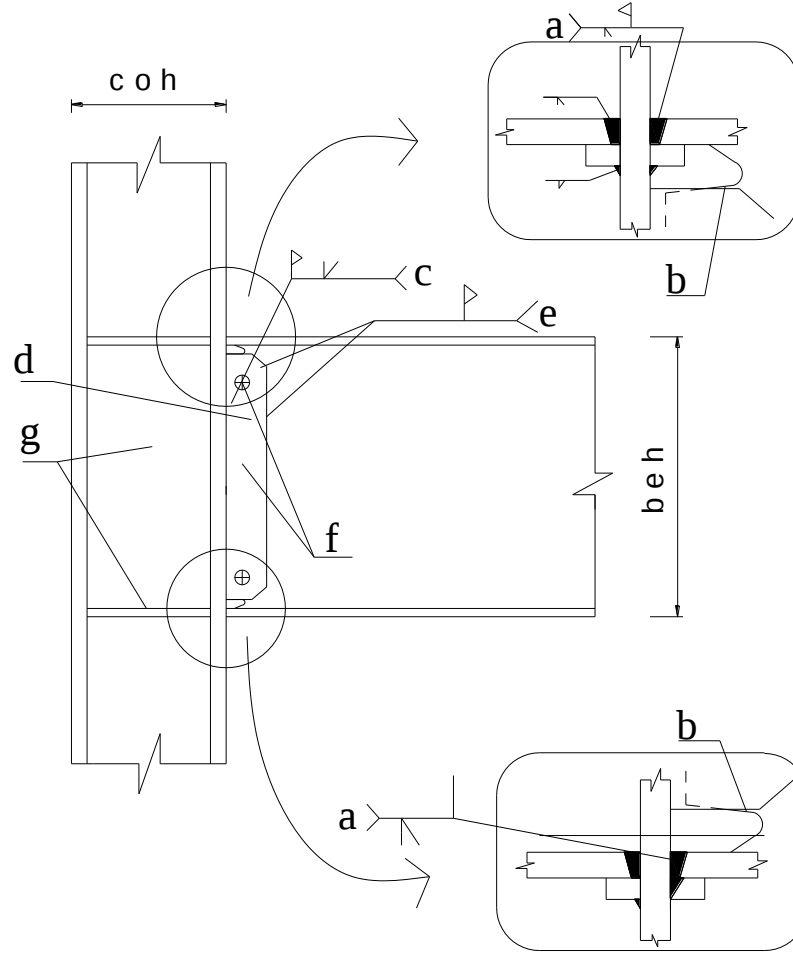
Bu birleşimlerin hepsinde de, panel bölgesinde kayma akması ve kirişte eğilme akması olduğundan ortak plastik şekil değiştirme gösterirler [1]. Şekil 2.4’de bu tip

birleşimlerde görülen akma mekanizmaları, Şekil 2.5’de ise göçme durumları görülmektedir [1]. Bu birleşimin göçme durumları ve akma mekanizmaları Northridge öncesi birleşimine benzese de, tasarımdaki değişiklikler sayesinde hakim göçme durumu, Northridge öncesi birleşimlerinden farklıdır.

Bu çalışmada, rijitleştirilmemiş birleşim grubundan, başlığı kaynaklı-gövdesi kaynaklı birleşimi seçilerek bu birleşim üzerinde çalışılmıştır. Birleşimin detayları Şekil 3.2’de görülmektedir [3].

Çelik çerçeve yapılarda kullanılan büyük elemanların süneklik davranışını geliştirmek için, geliştirilmiş kaynak elektrotunun, geliştirilmiş karşılama levhasının ve geliştirilmiş kaynak ulaşım deliğinin katkıları yeterli olmayabilir. Dahası, doğrusal olmayan analizler göstermiştir ki, rijit ve kuvvetli gövde bağlantıları, birleşimin kritik bölgelerindeki elastik olmayan ihtiyacı azaltıyor. Sonuç olarak, gövde bağlantısı, birleşimin performansına fazladan bir iyileştirme kazandırabilmek için incelenmiştir.

Birleşim davranışının elastik olmayan analizlerinde, elastik olmayan büyük uzamalar oluşana kadar gövde bağlantılarından çok az kayma kuvveti geçmektedir. Bu kayma kuvveti, eleman büyüklüğüne ve birleşimin rijitlik ve dayanımına bağlıdır. Gövde bağlantısı, kirişe gelen kayma kuvvetinin kendisine düşen kısmını aktaramadığında, kiriş başlığında, kaynak ulaşım deliğiyle kolon yüzü arasında yerel gerilme artışı görülmüştür. Bunun sonucu olarak, kiriş gövdesinin kaynaklı birleşimi deneysel olarak çalışılmıştır [1].



Şekil 3.2: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı Birleşim

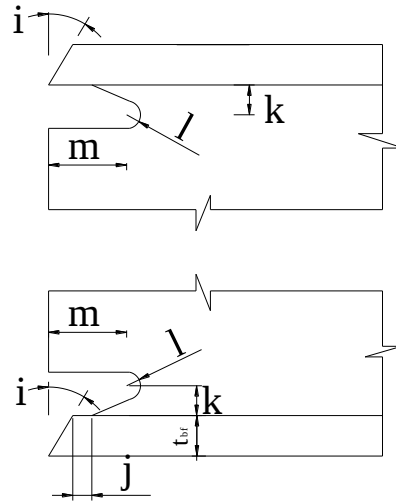
Bu birleşimde,

- 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.
 - i. Kaynak standartlarınca tanımlı, yarım V dikişi küt kaynak
 - j. En az t_{bf} veya 1.5cm kadar mesafe bırakılacak.

- k. En az t_{bf} kadar mesafe bırakılacak.
- l. $0.75t_{bf}$ mesafesinde delik eğrilik merkezi yer alacak.
- m. $3t_{bf}$ 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.



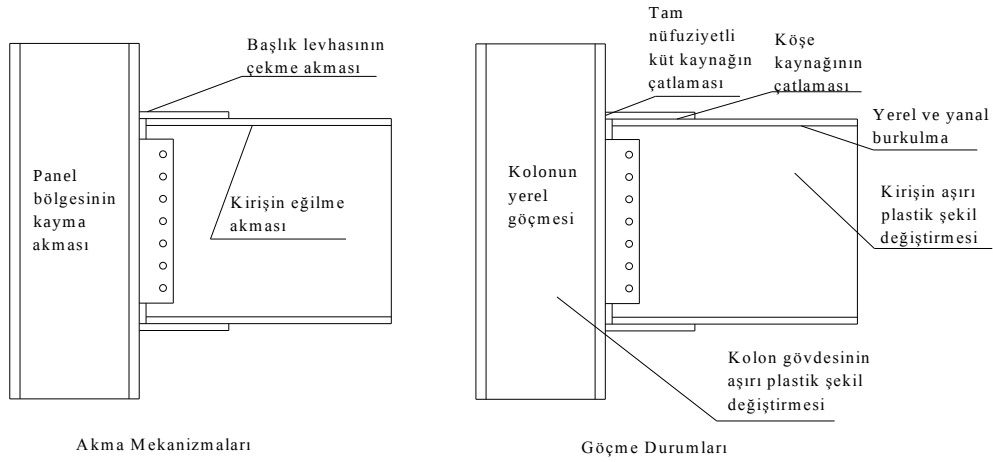
Şekil 3.3: Önerilen kaynak ulaşım deliği detayı

3.1.2. Başlık Levhası Kaynaklı Birleşimler

Şekil 3.5’de görülen Başlık Levhası Kaynaklı birleşimi, araştırmalar sonucu ortaya çıkan bir birleşim tipidir. Başlık Levhası Kaynaklı birleşimin, Başlık Levhası Bulonlu birleşimle benzerlikleri bulunmasına rağmen, tasarımı daha kolay olduğundan tercih edilebilir bir birleşimdir. Başlık Levhası Kaynaklı birleşimin akma mekanizması ve göçme durumları Şekil 3.4’de görülmektedir [1]. Akma mekanizmalarının başlıcaları, panel bölgesinin kayma akması ve kirişin eğilme akmasıdır. Uygun boyutlarda kullanılması halinde, başlık levhasının çekme akması da söz konusu olabilir fakat, başlık levhası bu duruma izin vermeyecek şekilde boyutlandırılır. Göçme durumları, başlık levhasının veya tam nüfuziyetli kaynağın çekme kırılması, kiriş ve başlık levhası arasındaki köşe kaynağa çatlama, yerel veya

yanal burkulma ve kirişte ya da kolonda aşırı şekil değiştirme olarak sayılabilir. Bulonlar yüzünden azalan kesitler Başlık Levhası Bulonlu birleşimler için bir sorunken, Başlık Levhası Kaynaklı birleşimlerde bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Bu sebepten dolayı, Başlık Levhası Kaynaklı birleşimlerden de büyük dönme kapasitesi elde etmek daha kolaydır.

Başlık Levhası Bulonlu birleşimini de içeren çalışmalar göstermiştir ki, panel bölgesinde kayma akması, çekme levhası akması ve kirişte eğilme akmasını birlikte gösteren birleşimler en iyi sismik performansı vermektedir [1].



Şekil 3.4: Başlık Levhası Kaynaklı Birleşimin akma mekanizmaları ve göçme durumları

Başlık Levhası Kaynaklı birleşimle ilgili detaylar Şekil 3.5’de görülmektedir [3].

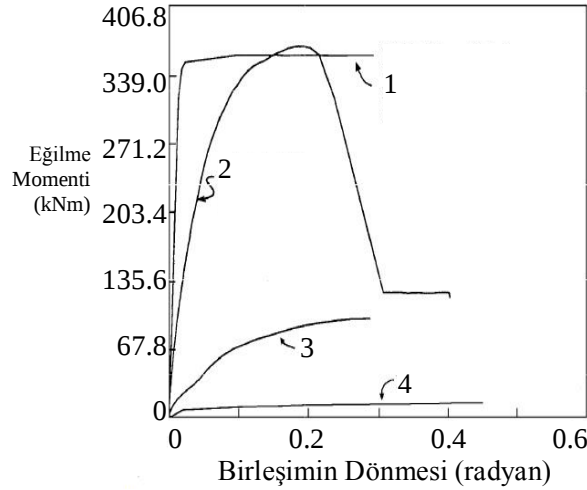
j. Süreklilik levhaları ve kayma bölgesi takviye levhası.

3.2. BULONLU BİRLEŞİMLER

Kiriş başlıkları kaynaklı birleşimler, çerçeve analizlerinde rijit birleşimler olarak kabul edilirler. Bu birleşimler, kirişin tam plastik kapasitelerine ulaşacak şekilde tasarlanırlar ve çoğunlukla panel bölgelerinde akma kayması oluştururlar. Bu birleşimlerin davranışlarını, her birleşimde farklı olabilen akma mekanizmaları ve göçme durumları belirler.

Bulonlu birleşimler ise bazı durumlarda rijit birleşim gibi davranamazlar ve birleşimin tam plastik kapasitesine ulaşamayabilirler. Bu birleşimlerin akma mekanizmaları ve göçme durumları, kaynaklı birleşimlerden farklı ve daha karışık olabilir. Yine de bu birleşimlerde büyük plastik şekil değiştirmeler ve yeterli sismik performans oluşturulabilir.

Northridge öncesi birleşiminin kötü performansı, mühendisleri alternatif çözümlere yöneltti. Bu çözümlerden biri de, bazı koşullar altında, hemen hemen tamamı kısmi moment aktaran birleşim olan, bulonlu birleşimlerdir. Kısmi moment aktaran birleşimlerin davranışı, kısmi rijit birleşimler, kısmi dayanımlı birleşimler ya da her ikisi birden olabilir. Kısmi rijit-kısmi moment aktaran birleşimler, birleşim göçme dayanımına ulaşmadan önce yeterli dönme gerçekleştirirler. Kısmi moment aktaran birleşimlerinin esnekliği ve rijitliği, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi çok değişken olabilir [1]. Şekilde, aynı boyutlardaki dört değişik birleşimin moment-dönme eğrilerinden görülebildiği gibi, bazı birleşimler açıkça kısmi dayanımlıdır.



Şekil 3.6: Kısmi Dayanımlı birleşimlerin dayanım ve rijitlikleri

Şekil 3.6'da görülen 1 numaralı eğri, kirişi tam plastik dayanımına ulaştıran, başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimin davranışdır. 2 numaralı eğri ise rijit ve dayanımı yüksek kısmi moment taşıyan bir birleşimin gösterdiği davranıştır. 3 numaralı eğri, kısmi moment taşıyan esnek bir birleşimin eğrisiyken; 4 numaralı eğri ise kısmi moment taşıyan mafsallı bir birleşimin gösterdiği davranış eğrisidir. 4 numaralı birleşimin hemen hemen hiç moment taşımadığı dikkate değerdir.

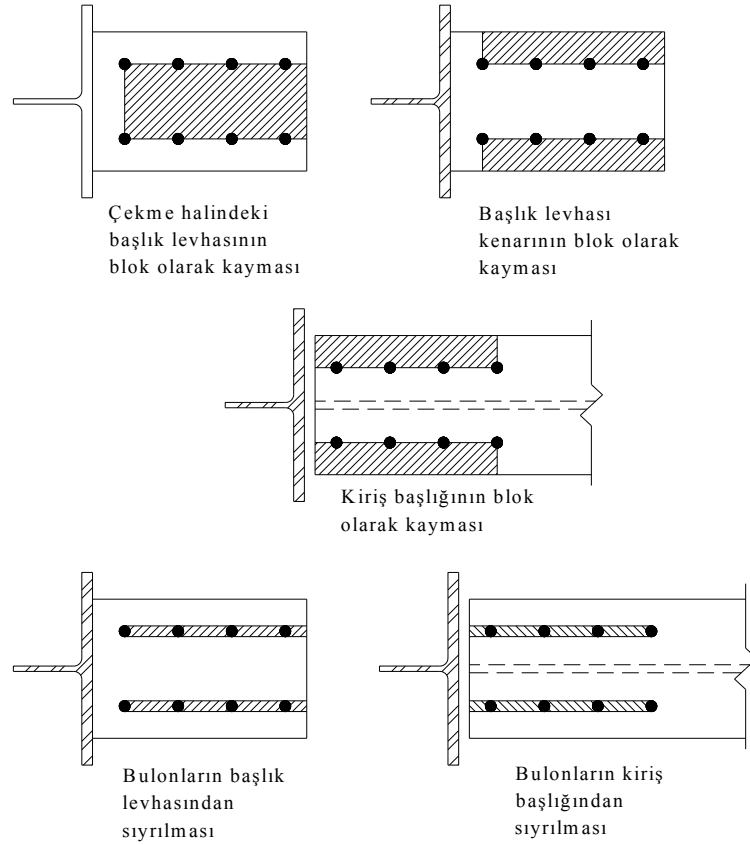
Tam moment aktaran birleşimlerde olduğu gibi kısmi moment aktaran birleşimlerde de, her birleşimin göçme durumu ve akma mekanizması ile dayanım, rijitlik ve süneklik kapasitesi arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Kiriş yüksekliği, kısmi moment aktaran birleşimlerde de önem arz ederken; kiriş açıklığı, kısmi moment aktaran birleşimlerde, tam moment aktaran birleşimlere nazaran daha az önemlidir.

3.2.1 Başlık Levhası Bulonlu Birleşimler

Başlık Levhası Bulonlu birleşimler, Uzatılmış Alın Levhalı birleşimler kadar olmasa da sıkça kullanılan birleşimlerdenidir. Başlık Levhası Bulonlu birleşimleriyle ilgili sınırlı sayıda deney vardır ve çoğu çevrimsel yükleme altında yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan birinde [1] kullanılan dört numuneden üçünde, kiriş başlığında çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çatlaklar, kiriş başlığındaki en büyük çekme kuvvetine maruz kalan, kolon yüzünden en uzakta olan bulon sırasında oluşmuştur.

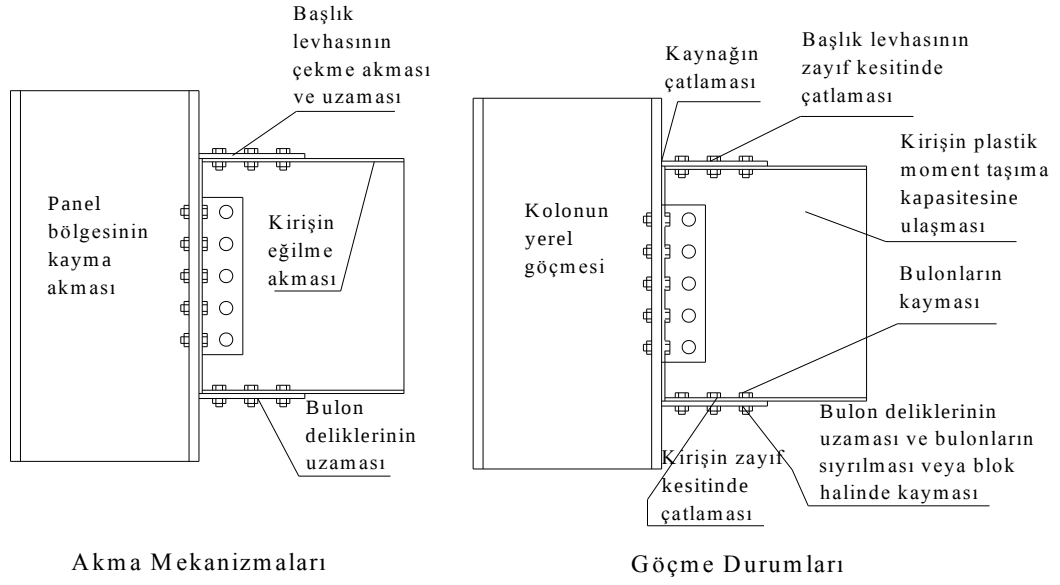
Yapılan diğer bir çalışmada da [1] kullanılan üç numunede de başlık levhasında çatlama görülmüştür. Bu çatlaklar, başlık levhasındaki en büyük çekme kuvvetine maruz kalan, yani kolon yüzüne en yakın olan bulon sırasında oluşmuştur. Bu

Çalışmalardan anlaşılaçağı üzere kiriş veya başlık levhası çatlaması bu birleşimde görülen en yaygın göçme durumudur (Şekil 3.7) [1]. Bu göçme durumları geciktirilmezlerse, elastik olmayan yeterli şekil değiştirme yapmadan oluşan gevrek göçmeler oluşur.



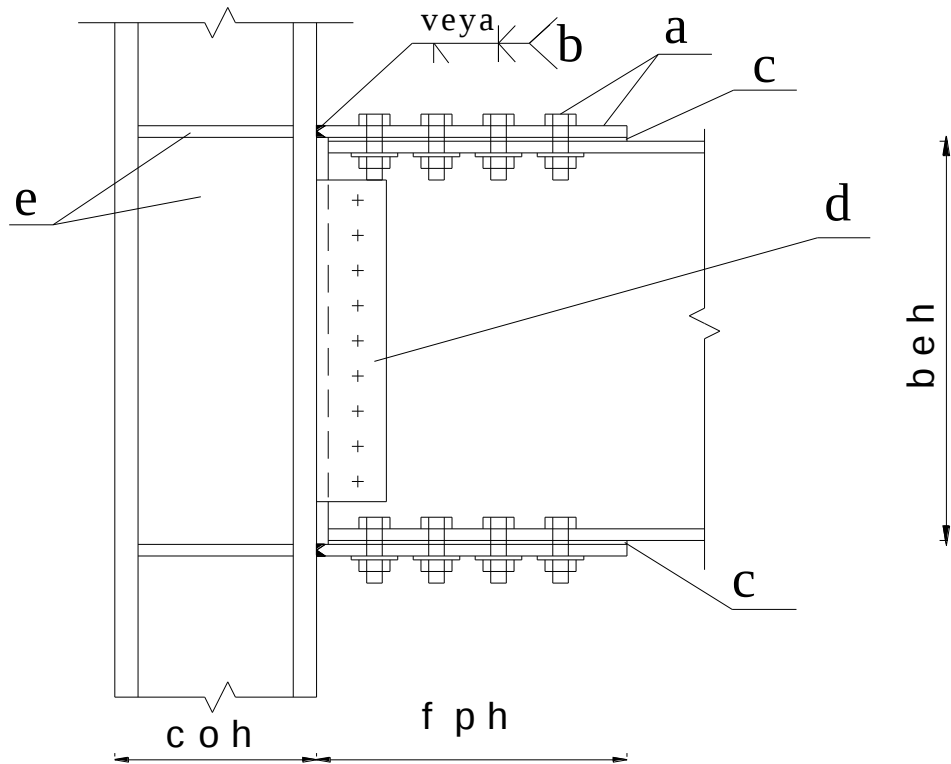
Şekil 3.7: Başlık Levhası Bulonlu Birleşimde görülen kayma ve sıyrılma mekanizmaları

Başlık Levhası Bulonlu birleşimlerde meydana gelen akma mekanizmaları ve göçme durumları Şekil 3.8’de görülmektedir [1]. Akma mekanizmaları, kirişin eğilme akması, başlık levhasının çekme akması ve kolon panel bölgesinin kayma akmasıdır. Bunların yanı sıra şekilde gösterilmemiş olmasına rağmen, kolon başlığında ve gövdesinde oluşan şekil değiştirme yüzünden kalıcı şekil değiştirme oluşumu, birleşim kayması ve yerel burkulma etkileri küçük olmasına rağmen sayılabilecek mekanizmalardır. Göçme durumları ise, kiriş başlığı ya da kayma levhasında oluşan kesit çatlaması, bulonlarda oluşan kayma çatlakları, bulonlarda uzama ve başlık levhasıyla kolon arasındaki kaynakta çatlama olarak sayılabilir.



Şekil 3.8: Başlık Levhası Bulonlu birleşimin akma mekanizmaları ve göçme durumları

Başlık Levhası Bulonlu birleşimle ilgili geometri Şekil 3.9’da görülmektedir [3].



Şekil 3.9: Başlık Levhası Bulonlu birleşim

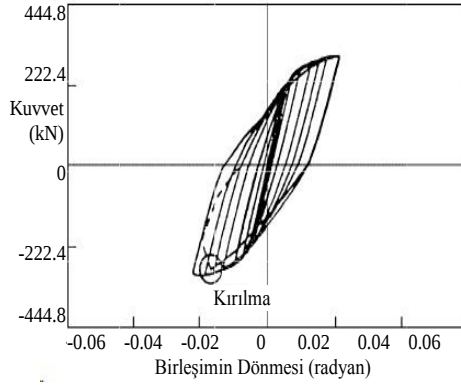
Bu birleşimde,

- a. Başlık levhası. Bulonların tümü 10.9 kalitesinde olup, öngerilmeli olarak kullanılır.
- b. Yarım V veya yarım X, tam nüfuziyetli küt kaynak. Bu kaynakların emniyet gerilmesi, birleştirildikleri çelik malzemenin emniyet gerilmesi kadar alınacaktır.
- c. Kiriş başlığı ile başlık levhası arasında uygun kalınlıkta şim kullanılabilir.
- d. Kayma levhası ve onu kiriş gövdesine birleştiren yüksek mukavemetli bulonlar.
- e. Süreklilik levhası ve kayma bölgesi takviye levhası.

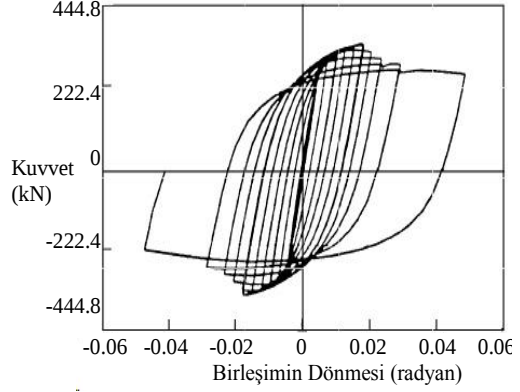
Olarak verilmiştir.

3.2.2. Uzatılmış Alın Levhası Birleşimleri

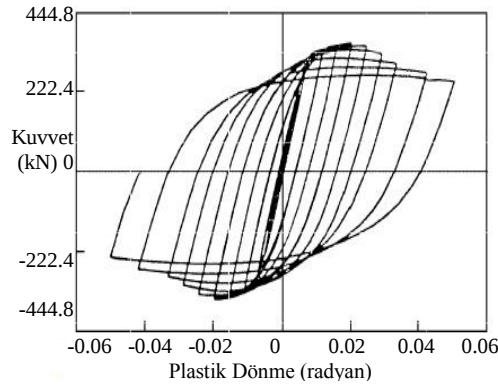
Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da görülen Uzatılmış Alın Levhalı birleşimleri çelik yapılarda yıllardır kullanılan, rijit, yüksek dayanımlı, kısmi moment aktaran birleşimlerdendir [3]. Bu birleşimlerle ilgili oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır. Genel olarak, Uzatılmış Alın Levhası birleşimlerinin histeritik davranışı, göçme durumuna bağlı olarak iyi de olabilir; göreceli olarak kötü de olabilir. Yapılan deneylerde görülmüştür ki, bulonlarda çatlama oluşan numunelerde, plastik dönme kapasitesi 0.03 radyan değerini geçmemektedir (Şekil 3.10) [1]. Alın levhasında akma oluşan numuneler 0.03 radyanlık plastik dönme kapasitesi değerini geçiyor olsa da en iyi davranışı, kirişte plastik mafsallık oluşturabilecek kadar güçlü olan birleşimler göstermektedir (Şekil 3.11, Şekil 3.12) [1].



Şekil 3.10: Bulonda çatlak oluşan moment birleşimin dönme eğrisi

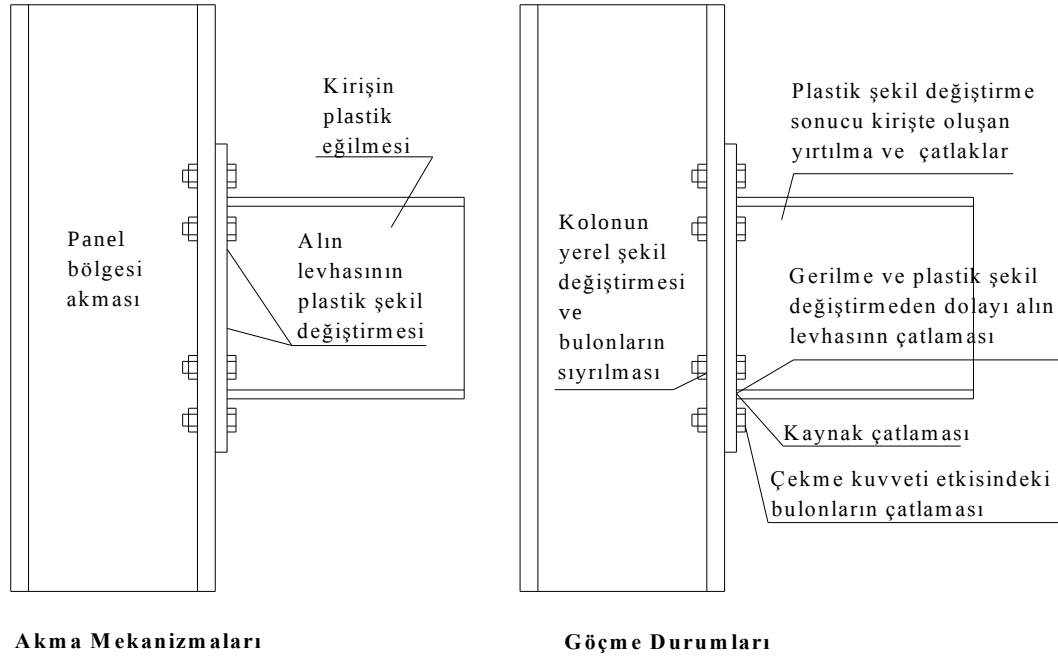


Şekil 3.11: Alın levhasında plastik şekil değiştirme oluşan birleşimin moment dönme eğrisi



Şekil 3.12: Kirişte plastik şekil değiştirme oluşan birleşimin moment dönme eğrisi

Uzatılmış Alın Levhalı birleşimlerin davranışı diğer birleşimler arasında en karışık olanıdır. Karışıklığın artmasındaki sebepler, bulonlardaki çekme kuvvetleri ve çok sayıda göçme durumu olmasıdır. Bu birleşimlerde görülen akma mekanizmaları ve göçme durumları Şekil 3.13’de görülmektedir [1]. Akma mekanizmaları arasında, kirişin eğilme akması, alın levhasının eğilme akması ve kolon panel bölgesinin kayma akması vardır. Kolon başlığında, gövdesinde ve rijitleştirme levhalarında şekil değiştirme ve burkulma da birleşimin şekil değiştirme kapasitesine katkıda bulunabilir ama bunlar önemli ve güvenilir plastik dönme bileşenleri sayılmazlar. Akma mekanizmaları ve göçme durumları, birleşimin geometrisine ve birleşim elemanlarının malzeme özelliklerine bağlıdır.



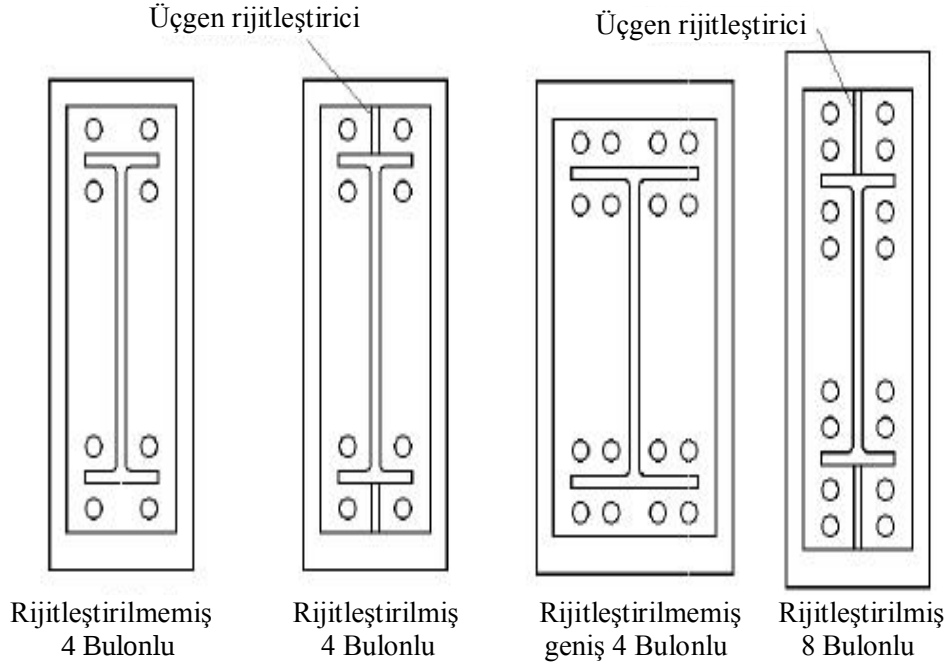
Şekil 3.13: Uzatılmış Alın Levhalı Birleşimlerin tipik akma mekanizmaları ve göçme durumları

Alın Levhalı birleşimlerini, ince alın levhalı ve kalın alın levhalı olarak ayırmak mümkündür. İnce alın levhalı birleşimler yeterli süneklik gösterebilmelerine rağmen kirişin tam plastik kapasitesini oluşturamazlar. Bu yüzden depreme karşı dayanıklı tasarım için kalın alın levhalı birleşimlerin tercih edilmesi gerekir.

Kiriş-alın levhası birleşiminde kullanılan köşe kaynağı üzerinde de araştırmalar yapılmıştır ve kaynak göçmesine bağlı yetersiz performanslar görülmüştür [1]. Tam nüfuziyetli küt kaynaklarla hazırlanan birleşimlerde ise, kaynak ulaşım deliği kaldırıldığında yeterli performans elde edildiğinden, bu tip kaynaklar tavsiye edilen kaynak türüdür. Kiriş ile alın levhası arasındaki kaynağın çatlaması, diğer göçme durumlarına göre belirgin derecede düşük süneklik, enerji harcanması ve elastik olmayan dönme kapasitesiyle sonuçlanmaktadır.

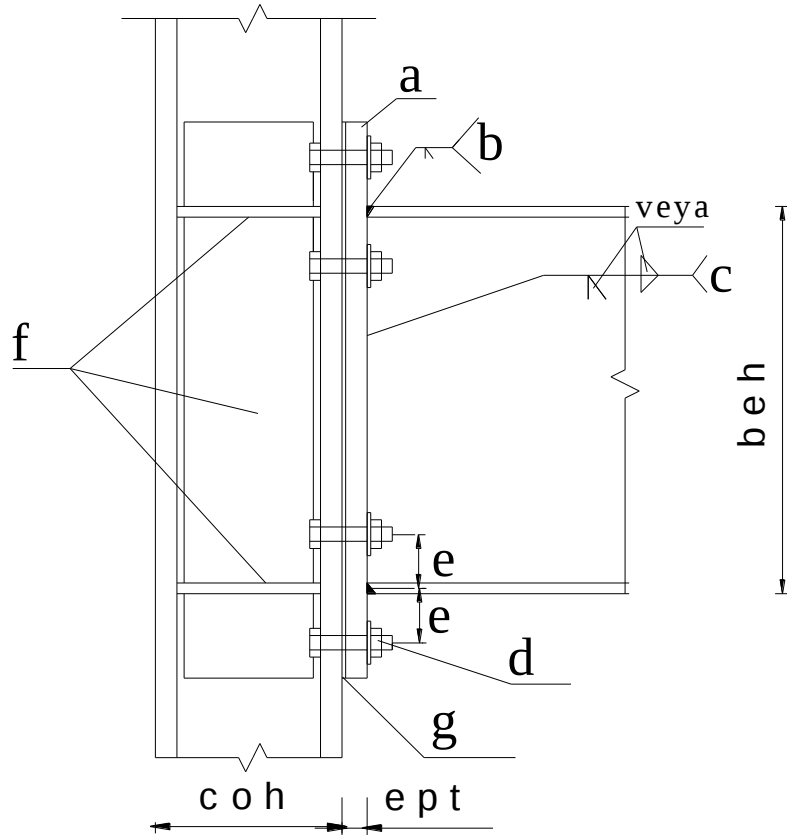
Panel bölgesinde kayma akması da, plastik dönme oluşturmak için cazip bir seçenek olabilir. Fakat, Uzatılmış Alın Levhalı birleşimlerde panel bölgesi akmasını öngörmek, Başlık Levhası Kaynaklı birleşimlerine göre daha zordur. Uzatılmış Alın Levhalı birleşimlerin davranışı, birleşimi oluşturabilecek seçeneklerin fazlalığı nedeniyle (rijitleştirilmiş veya rijitleştirilmemiş, 4 bulonlu veya 8 bulonlu) karışıktır [1]. Bazı seçenekler Şekil 3.14’de görülmektedir. Uzatılmış Alın Levhalı birleşimi, bulonların çekme kapasitesiyle sınırlıdır. Rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş 4

bulonlu tasarımlar küçük kirişler için uygundur. Fakat, 4 bulonlu tasarımlar, genellikle, ağır kiriş kesitlerinde plastik eğilme kapasitesine ulaştırarak çekme kapasitesini oluşturmazlar. Bunun sonucu olarak, 4 bulonlu geniş, ve rijitleştirilmiş 8 bulonlu tasarımlar ağır veya yüksek kirişler için kullanılan birleşim türüdür [1].



Şekil 3.14: Değişik tipteki Uzatılmış Alın Levhali Birleşimler

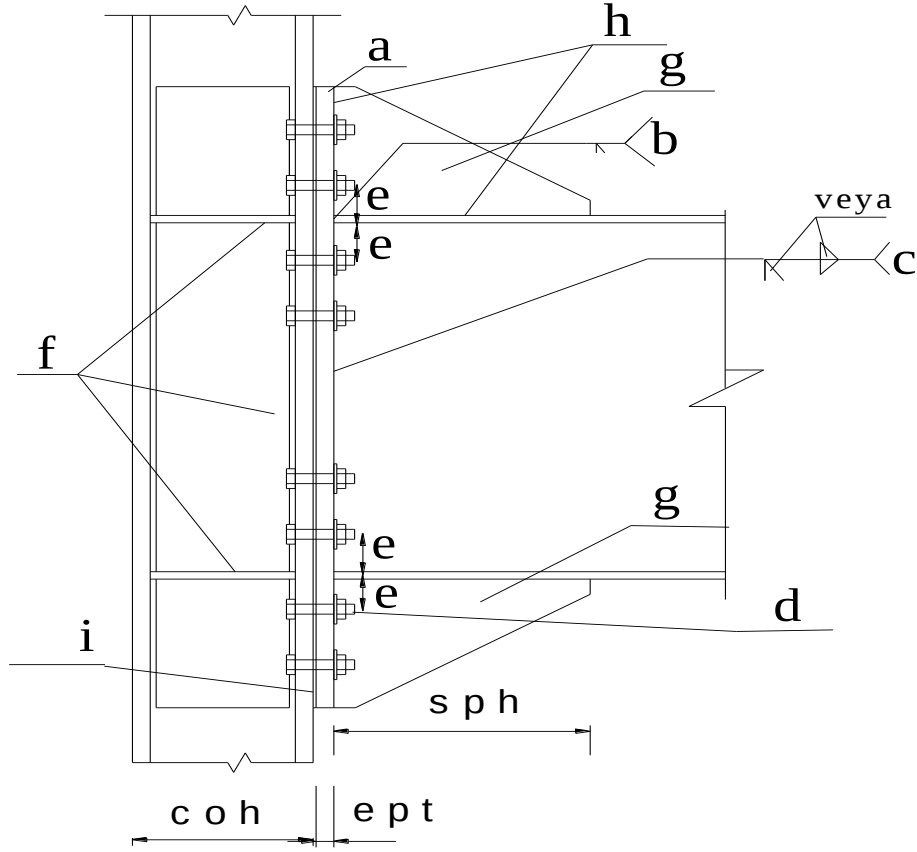
Rijitleştirilmemiş 4 bulonlu Uzatılmış Alın Levhali birleşimlerle yapılan çalışmalarda, birleşimin 0.04 radyan gibi oldukça iyi bir plastik dönme yaptığı görülmüş ve kiriş başlığında yerel burkulma olduğu görülmüştür. Daha büyük kiriş kesitleri kullanarak rijitleştirilmiş 4 bulonlu ve rijitleştirilmemiş 4 bulonlu Uzatılmış Geniş Alın Levhali birleşimler çalışılmıştır. Bu deneylerde, kalın alın levhası kullanıldığında, rijitleştirilmiş 4 bulonlu Uzatılmış Alın Levhali birleşimi iyi sonuçlar verirken; rijitleştirilmemiş 4 bulonlu Uzatılmış Geniş Alın Levhali birleşimi düzensiz sonuçlar vermiştir. 4 bulonlu rijitleştirilmiş birleşim performansı, 4 bulonlu rijitleştirilmemiş birleşimden çok da farklı olmadığı için sadece rijitleştirilmemiş 4 bulonlu ve rijitleştirilmiş 8 bulonlu birleşimlerin davranışları incelenmiştir [1].



Şekil 3.15: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim

Bu birleşimde,

- a. En az Fe 37 kalitesinde alın levhası.
- b. Tam nüfuziyetli yarım V küt kaynak dikişi. Kaynakların emniyet gerilmeleri, birleştirildikleri malzemenin emniyet gerilmesi kadar olacaktır.
- c. Her iki taraftan köşe kaynağı veya tam nüfuziyetli küt kaynak.
- d. 10.9 kalitesinde öngerilmeli bulonlar.
- e. Bulon aralıkları alın levhaları boyutlandırılırken belirlenecektir.
- f. Süreklilik levhaları ve kayma bölgesi takviye levhası.
- g. Gerekliği kalınlıkta şım kullanılabilir.



Şekil 3.16: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhası Birleşimi

Bu birleşimde,

- a. En az Fe 37 kalitesinde alın levhası.
- b. Tam nüfuziyetli yarım V küt kaynak dikişi. Kaynakların emniyet gerilmeleri, birleştirildikleri malzemenin emniyet gerilmesi kadar olacaktır.
- c. Her iki taraftan köşe kaynağı veya tam nüfuziyetli küt kaynak.
- d. 10.9 kalitesinde öngerilmeli bulonlar.
- e. Bulon aralıkları alın levhaları boyutlandırılırken belirlenecektir.
- f. Süreklilik levhaları ve kayma bölgesi takviye levhası.
- g. Şekilde görüldüğü biçimde rijitleştirme levhaları. Bu levhaların kalınlığı, kiriş gövdesinin kalınlığı kadar olacaktır.
- h. Takviye levhalarının alın levhası ve kiriş başlıklarına birleştirilen tam nüfuziyetli yarım X küt kaynak.
- i. Gerekliği kalınlıkta şim kullanılabilir.

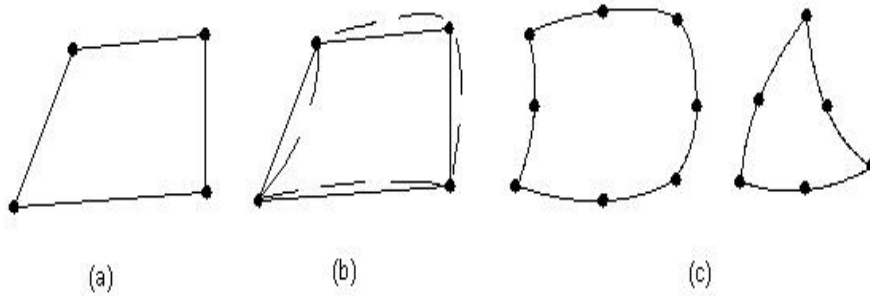
4. SONLU ELEMEN MODELİNİN KURULMASI

Bu çalışmada oluşturulan modeller ANSYS programı kullanılarak hazırlanmıştır. ANSYS mühendisler tarafından tercih edilen bir sonlu eleman analiz yazılımıdır. Bu program sayesinde, yapıların ya da bileşenlerinin bilgisayar modeli hazırlanabilmekte ve bu modele, gerçekte karşılaşılabilecek yükler etkitilebilmektedir. Bu yüklerin etkisi altındayken yapıdaki gerilme seviyeleri ya da fiziksel davranış gözlemlenebilir. Böylece, mühendis için, daha pahalı olan laboratuvar testlerini yapmadan, yapının ya da bileşeninin tasarımını yapmak mümkün hale gelir.

Kurulan sonlu eleman modelinin gerçek bir birleşimi temsil etmesi için ANSYS programının sunduğu çözüm yöntemleri ve özellikler kullanılmıştır.

4.1. ELEMEN TİPİ

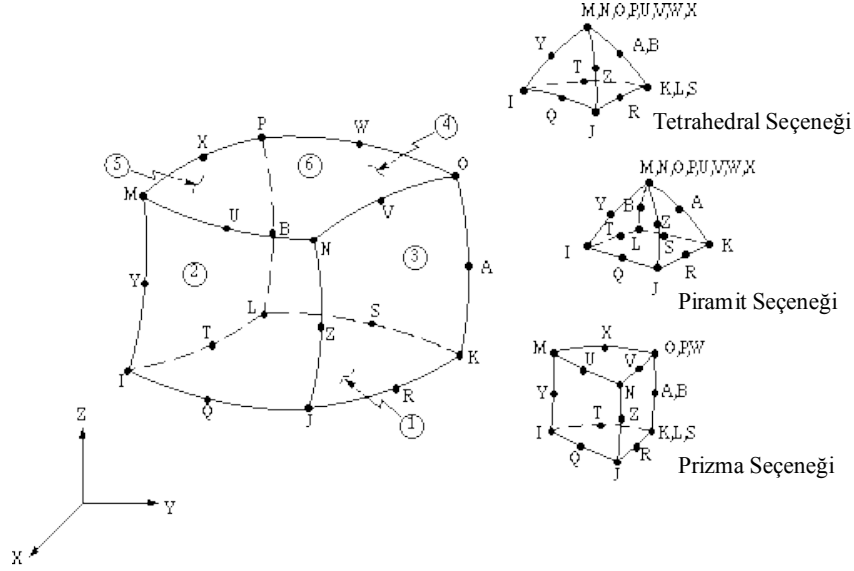
ANSYS programının eleman kütüphanesi iki çeşit eleman tipi sunar: Doğrusal ve Doğrusal olmayan. Bu eleman tipleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekildeki (a) tipi elemanlar, doğrusal isoparametrik; (b) tipi elemanlar, ekstra şekilli doğrusal isoparametrik ve (c) tipi elemanlar da doğrusal olmayan olarak adlandırılır [5].



Şekil 4-1: ANSYS programında kullanılan eleman tipleri

Hazırlanan modellerde ANSYS programının sunduğu SOLID186 elemanı kullanılmıştır. SOLID186, yüksek mertebeli, 3 boyutlu – 20 düğüm noktalı bir elemandır. Yüksek mertebeli elemanlarla çözüm yapmak daha kapasiteli bilgisayar

işlemcisi ve daha uzun çözüm süresi gerektirse de, gerçeğe daha yakın çözüm verdiği için tercih edilmiştir [6]. Elemanın her düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi bulunmaktadır: x, y ve z eksenlerinde ötelemeler. Eleman, plastikleşmeyi, gerilme pekleşmesini, büyük şekil değiştirmeyi ve büyük uzamayı desteklediği için bu çalışmada kullanılacak model için çok uygundur.



Şekil 4.2: SOLID186 Elemanı

SOLID186, eleman formülasyonu olarak, deplasman formülasyonu ve karma formülasyon seçeneklerini sunar. Deplasman formülasyonu pek çok araştırmacı tarafından kullanılmış bir formüldür fakat, deplasman formülasyonu kullanılan elemanların, deplasman alanı, çözümü aşırı hiperstatik yapar. Bazı durumlarda ise, formülde kullanılan deplasman interpolasyonları, kolon-kiriş elemanı boyunca yayılı olan plastisitenin eğriliklerinin dağılımını doğru olarak temsil edemez [7]. Deplasman formüllü bir modelden elde edilen gerilmeler, genellikle elastik olmayan kiriş-kolonun diferansiyel denge denklemlerini sağlamaz.

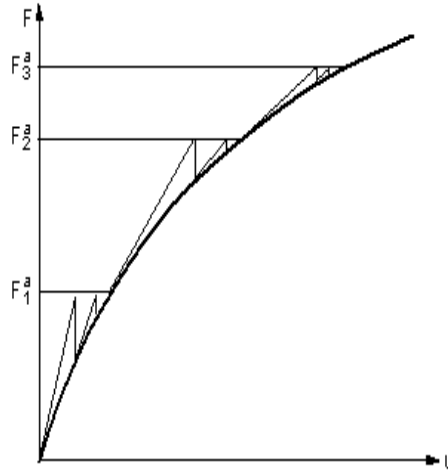
Karma (ya da hibrit) elemanlar ise, yukarıda anlatılan sorunu hafifletmek için büyük bir potansiyele sahiptir. Karma sonlu eleman yaklaşımı kullanarak, elemanlar üzerinde yayılı olan plastisite etkisini, gerilmeye dayalı plastik bölge modeli veya enkesit gerilme sonuçlu bir model kullanarak, yüksek doğrulukla elde etmek mümkün olur [7].

4.2. MALZEME MODELİ

Bir çerçevenin, limit durum eğrisi, dört farklı analizden elde edilen eğrilerle karşılaştırılabilir: Birinci derece elastik analiz, ikinci derece elastik analiz, birinci derece elastik olmayan analiz ve ikinci derece elastik olmayan analiz. Birinci derece analizlerde geometrinin doğrusal olmayışı analize dahil edilmez. İkinci derece analizlerde bu etkiler gözönüne alınır. Elastik analizlerde malzemenin doğrusal olmayışı dikkate alınmazken, elastik olmayan analizlerde dahil edilir.

Çoğu durumda, ikinci derece ve elastik olmayan etkilerin yapı stabilitesi üzerinde ayrı ayrı etkileri vardır. İkinci derece etkiler, elastik olmayan davranışa yol açarken, bu durum da ikinci derece etkileri artırabilir.

Geometrisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde, ANSYS sonlu eleman programı, Newton-Raphson yöntemini kullanır. Bu yaklaşıma göre, uygulanan kuvvet bir dizi yük artımlarına ayrıştırılır. Bu yük artımları çok sayıda yükleme adımında uygulanabilir. Şekilde tek serbestlik dereceli bir sistemin Newton-Raphson eşitliği adımları görülüyor [5].



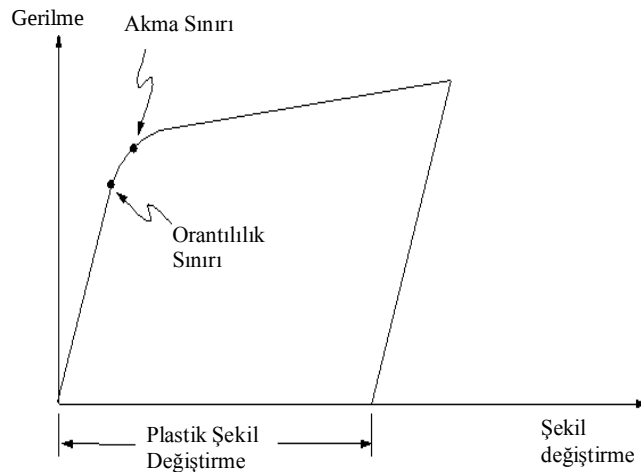
Şekil 4.3: Newton-Raphson metodu

Her çözümünden önce, Newton-Raphson metodu, uygulanan kuvvetle elemanlar üzerindeki gerilmeyi oluşturan kuvvet arasındaki farkı bularak, denge dışında kalan yük vektörünü hesaplar. Bundan sonra program, denge dışında kalan yükü kullanarak doğrusal çözüm yapar ve yakınsama olup olmadığına bakar. Eğer, konulan yakınsama koşulu sağlanmadıysa denge dışı kalan kuvvet tekrar hesaplanır, rijitlik matrisi bu sonuca göre güncellenir ve yeni bir çözüm bulunur. Çözüm yakınsayana

kadar bu süreç devam eder. Eğer yakınsama sağlanamazsa, program, daha küçük yük artışları kullanarak tekrar çözmeyi dener.

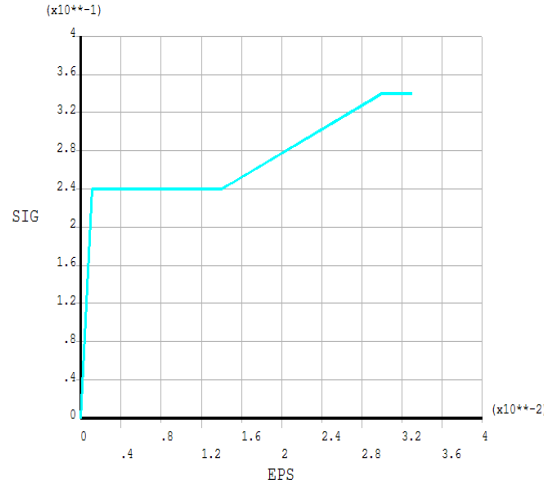
Malzemenin doğrusal olmayışının sebebi, gerilme ile uzama arasındaki doğrusal olmayan ilişkidir. Yani, gerilme, uzamanın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Plastik teori, malzemelerin elasto-plastik davranışlarını, matematiksel bir ifadeye dönüştürebilmeyi sağlar. Plastik teorinin üç bileşeni vardır: 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 [5].



Şekil 4.4: Elastoplastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi

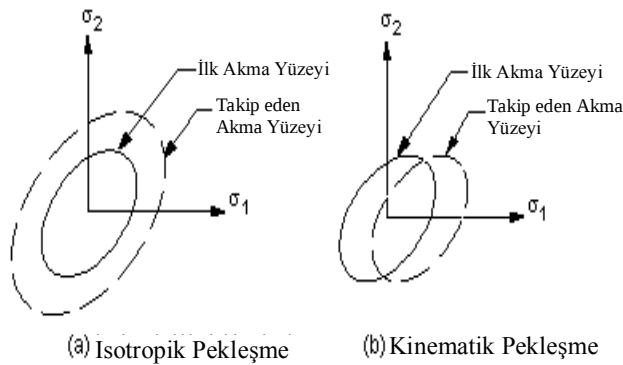
Şekilde görüldüğü gibi, orantılılık gerilmesi ile akma gerilmesi arasında küçük fark vardır, ama ANSYS sonlu eleman programı bu iki noktayı çakışık kabul eder. Bu çalışmada kullanılan gerilme-uzama eğrisi Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4-5: Analizlerde kullanılan gerilme şekil değiştirme eğrisi

Akış kuralı, oluşacak plastik uzamanın yönünü belirler. Plastik uzama, akma yüzeyine dik doğrultuda oluşur.

Pekleşme kuralı, akma işlemi sırasında, akma yüzeyinin nasıl değiştiğini tanımlar. ANSYS sonlu eleman programı, plastikleşme davranışını modelleyebilmek için iki pekleşme kuralı seçeneği sunar. Bunlar, kinematik pekleşme ve isotropik pekleşme modelleridir. İsootropik pekleşme kuralına göre, akma yüzeyi merkez doğrusundaki konumunu korur, plastik uzamalar oluştuğunda sadece yüzeyi genişler. Kinematik pekleşme ise, akma alanı sabit kalır ve plastik uzamalar oluştuğunda yüzey ötelenir (Şekil 4.6). Bu özelliğinden dolayı, kinematik pekleşme modeli, isotropik pekleşme modelinden farklı olarak tekrarlı yüklemeler için de elverişlidir [5].



Şekil 4.6: ANSYS programının kullandığı pekleşme kuralları

Kinematik pekleşme modelinde Besseling modeli kullanılır. Besseling modeline göre, malzemenin davranışının küçük hacimlere bölündüğü kabul edilir. Küçük hacimlerin tümüne aynı toplam uzama etki eder, fakat herbirinin ayrı bir akma dayanımı vardır. Küçük hacimlerin herbirinin basit bir gerilme-uzama davranışı vardır, fakat birleştirildiklerinde model, karışık bir davranış gösterir. Plastisite hesaplamalarında aşağıdaki adımlar izlenir [5]:

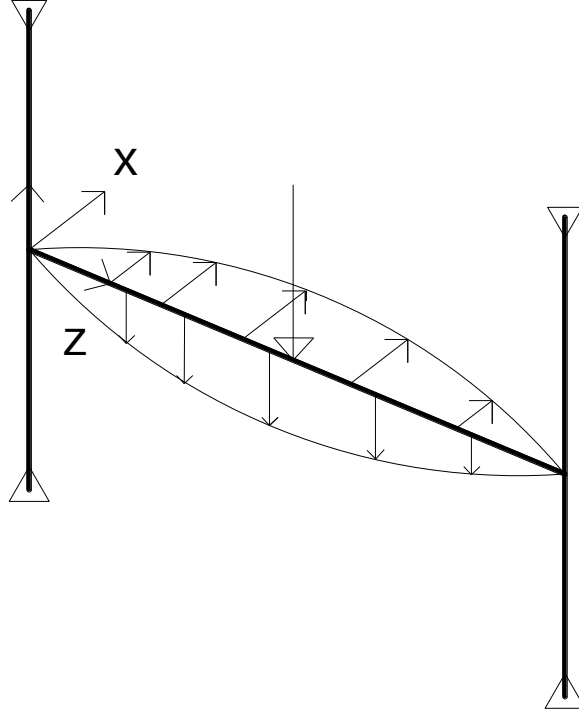
1. Küçük hacimlerin toplam hacime olan oranları (ağırlıklı oran) ve bu orana denk gelen akma dayanımları belirlenir.
2. Küçük hacimlerin hepsine aynı toplam uzamanın etki edildiği düşünülerek, herbiri için plastik uzamadaki artış elde edilir.
3. Ayrı ayrı hesaplanan plastik uzamalar, 1. adımda hesaplanan ağırlıklı oranlar kullanılarak toplanır ve toplam plastik uzama bulunur.
4. Plastik uzama güncellenir ve elastik uzama hesaplanır.

4.3. GEOMETRİK ÖNKUSUR

Çelik yapı elemanları atölyelerde üretildikten sonra, satışı gerçekleşinceye kadar depolarda üst üste yerleştirilerek istiflenirler. Satışı gerçekleştikten sonra gruplar halinde veya teker teker vinçlerce kaldırılarak nakliye araçlarına yerleştirilirler ve çeşitli yollarla şantiye alanına nakliye edilirler. Nakliye sürecinden sonra tekrar vinçlerle kaldırılarak şantiye alanına indirilirler. Daha sonra binanın yapılması aşamasında yine vinçlerle kaldırılarak yerlerine yerleştirilir. Kendisine bağlanan diğer yapı elemanları yerleştirilinceye kadar, çelik eleman, normalde maruz olmaması gereken kuvvetleri taşımak zorunda kalabilir. İşte tüm bu süreçten dolayı, şantiyede yerine yerleştirilmiş bir yapı elemanı, öngörüldüğü gibi kusursuz bir geometriye sahip olmayabilir. Bu durumda, yapı elemanı hesaba katılmamış gerilmelere maruz kaldığından, mühendisin öngördüğü gibi davranmaz.

Bu sebeplerden dolayı, hazırlanan modellere, geometrik önkusur dahil edilmiştir. Bu önkusur, x-ekseninde $\frac{\lambda}{300}$; y-ekseninde ise $\frac{\lambda}{250}$ mertebesindedir [8]. Burada belirtilmesi gereken husus, λ uzunluğu çerçevede iki kolon arasında kalan açıklık

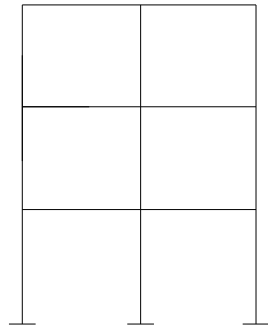
olarak alınmıştır. Bu durumda, kuvvetin etkidiği mesafe, kolon aksından $\frac{\lambda}{2}$ uzaklığındadır.



Şekil 4.7: Analizlerde kullanılan önkusur

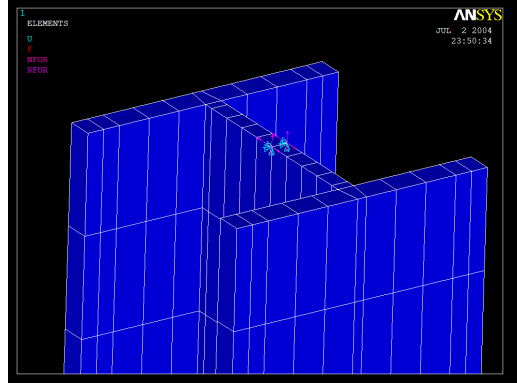
4.4. SINIR KOŞULLARI

Bu çalışmada modellenen birleşim tipik bir dış kolon-kiriş birleşimidir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Analizlerin yapıldığı çerçevenin bina içinde yeri

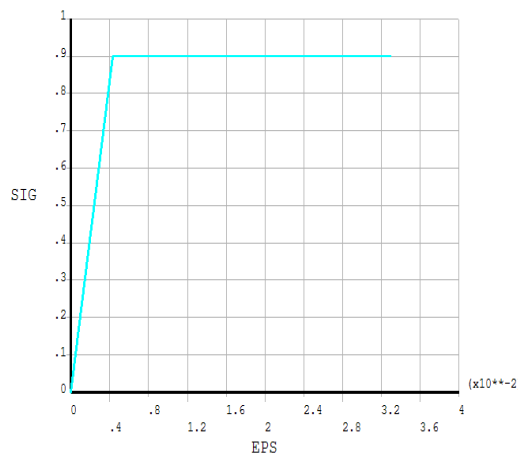
Bu birleşimin davranışını modele yansıtacak sınır koşullarının durumu Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Konulan mesnetler, o noktada dönmeye izin verecek şekilde sadece gövdenin iki yanındaki birer düğüm noktasını ötelemelere karşı tutmuştur.



Şekil 4.9: Kolondaki mesnetlerin durumu

4.5. BULONLAR VE ÖNGERME KUVVETİ

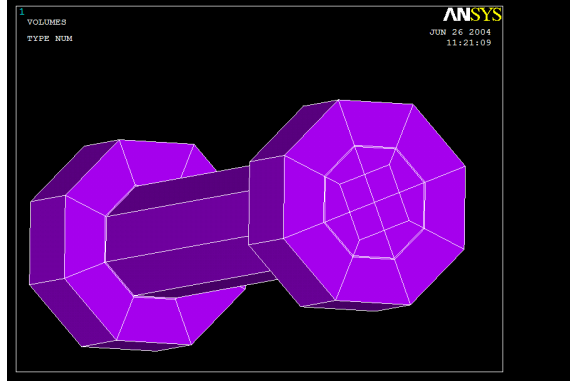
Hazırlanan modellerde kullanılan bulonlar 10.9 değerinde olan yüksek mukavemetli bulonlardır. Analizlerde, standart olarak M24 bulonları kullanılmıştır. M24 bulonlarının yetersiz kaldığı durumlarda ise M30 bulonları tercih edilmiştir. Her iki bulon için de gövde çapı olarak, A_s net alanına denk gelen çap hesaplanarak bu çap kullanılmıştır. Bu bulonlarda kullanılan gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Bulonların gerilme-şekil değiştirme eğrisi

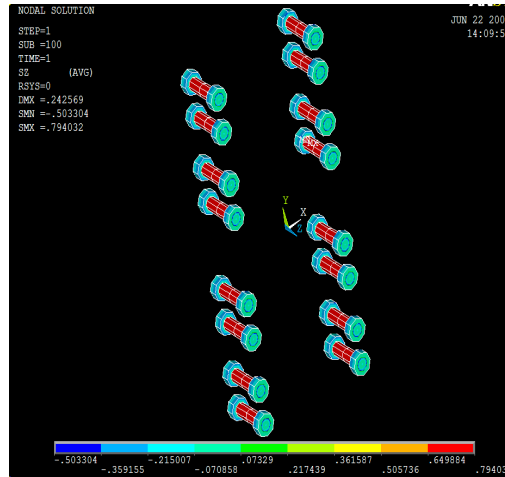
Bulonların sonlu elemanlara bölünme şekli Şekil 4.11’de görülmektedir. Bulon davranışını modele yansıtabilmek için, bulon gövdesi ile bulon için açılan delik

arasında 0.25 mm uzunluğunda bir boşluk bırakılmıştır. Bulon gövdesi ikiye bölünmüştür ve öngerme elemanları bu iki parça arasına yerleştirilmiştir.



Şekil 4.11: Bulonların sonlu elemanlara bölünmüş hali

Günümüzde, öngermeli bulon kullanmak oldukça yaygın bir uygulamadır, bu sebeple modeldeki bulonlar, gerçek durumu daha iyi yansıtabilmesi için öngermeli olarak tasarlanmıştır. ANSYS sonlu eleman yazılımı, öngerme kuvvetini, iterasyonun ilk adımında sisteme etkitep analizin sonuna kadar bu kuvveti sabit tutmaktadır. Şekil 4.12’de analiz sonucunda bulonlarda görülen σ_z gerilmesi görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi, bulon başlıklarında basınç; gövdesinde ise çekme gerilmesi oluşmaktadır.



Şekil 4.12: Öngerme kuvvetinin bulonlarda yarattığı gerilme

4.6. PLASTİK DÖNMENİN HESAPLANMASI

Birleşimin yaptığı plastik dönmeyi hesaplarken ilk önce plastik mafsalın olduğu kesit tespit edildi. Daha sonra kolon yüzeyinden itibaren plastikleşen kesite kadar olan bölgenin plastik uzaması bulunup kesit yüksekliğinin yarısına bölünerek plastik

dönme değeri bulunmuştur. Plastik uzama değeri bulunurken de, plastikleşen kesite kadar olan her sonlu elemanın gerilme eğrisi ve elastisite modülünden yararlanarak elastik uzama değeri bulunup toplanmıştır ve bu değer toplam uzamadan çıkarılmıştır.

4.7. MODELLERİN KONTROLÜ

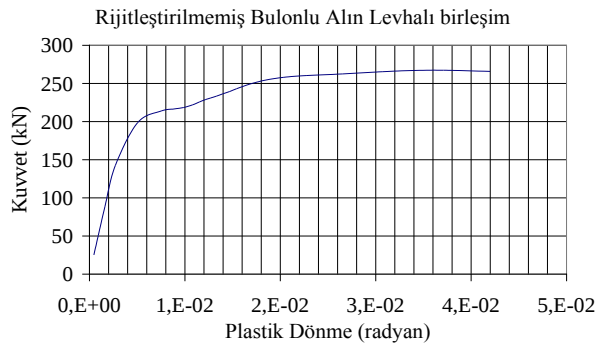
Sonlu eleman modellerin gerçek modelin davranışını yansıtıp yansıtmadığını görmek için gerçek ölçekli deney sonuçları tercih edilse de bazı elemanlarda yapılacak kontroller da bir sonuç verebilir.

Kontrol amacıyla bulonlardaki kayma kuvveti hesaplanarak modeldeki deneyle karşılaştırılmıştır. Kullanılan bir modelden alınan Kuvvet-Plastik dönme grafiği Şekil 4.13'de görülmektedir.

Bulon eksenine dik doğrultuda olmak üzere, her makaslama alanı için bir bulonunun taşıyabileceği kuvvet,

$$N = \tau_{sem} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (4.1)$$

formülüyle bulunur.

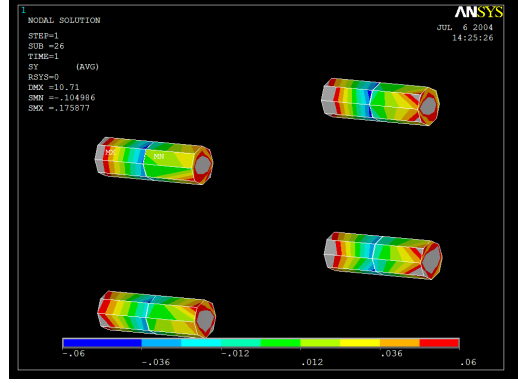


Şekil 4.13: Alın Levhalı birleşimde uygulanan kuvvet değeri

Bu durumda,

$$\tau_{sem} = \frac{N}{\pi \cdot d^2 / 4} \quad (4.2)$$

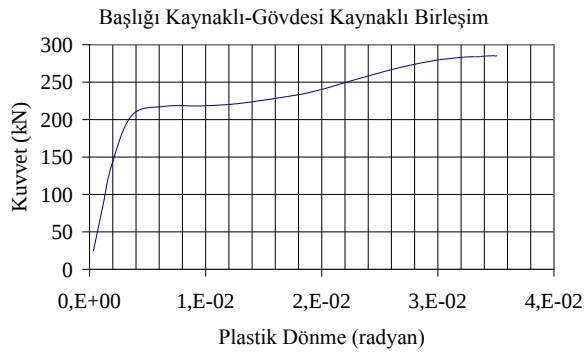
formülünde, birleşimdeki bulon sayısının 8 adet ve sistemdeki kuvvetin 265kN olduğunu gözönüne alarak bilinmeyenleri koyarsak, $\tau_{sem} = 0.059 \text{ kN/m}^2$ değerini elde ederiz.



Şekil 4.14: Bulonlarda oluşan kayma gerilmesi

Şekil 4.14'te bulonlarda oluşan kayma gerilmesi görülmektedir. Bulon başlığı ve somunun kenar noktalarında aşırı uzama yoğunlukları olduğundan grafikteki kontürlerin gösterim aralığını etkilemektedir. Bu sebeple, bulon başlığı ve somun şekilden çıkarılmıştır. Bulonu oluşturan iki sonlu eleman parçasından sol tarafta yer alanlar kolon başlığını; sağ tarafta yer alanlar ise alın levhasını tutmaktadır. Görüldüğü gibi her iki elemanın birleştiği kesitte görülen gerilme 0.06 kN/m^2 dir.

Kaynaklı birleşimlerde yapılan kontrolde ise, kaynak fiziksel olarak modele dahil edilmediğinden, kayma levhasının kolona birleştiği kesitteki kayma gerilmeleri kontrol edilmiştir.

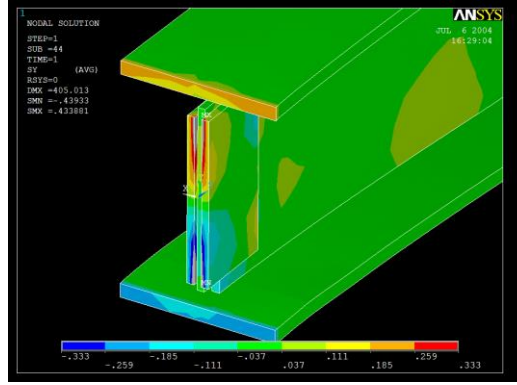


Şekil 4.15: Kaynaklı birleşimin kuvvet-plastik dönme eğrisi

Kayma levhalarında görülen gerilme,

$$\tau_k = \frac{Q}{F} \quad (4.3)$$

formülünden bulunur. Kayma kuvveti 285 kN iken bulunan gerilme değeri, $\tau_k = 0.32$ kN/mm² dir. Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, kayma levhalarında oluşan kayma gerilmesi değeri 0.333 kN/mm² dir.



Şekil 4.16: Kayma levhasında oluşan kayma gerilmeleri

5. PARAMETRİK ÇALIŞMA

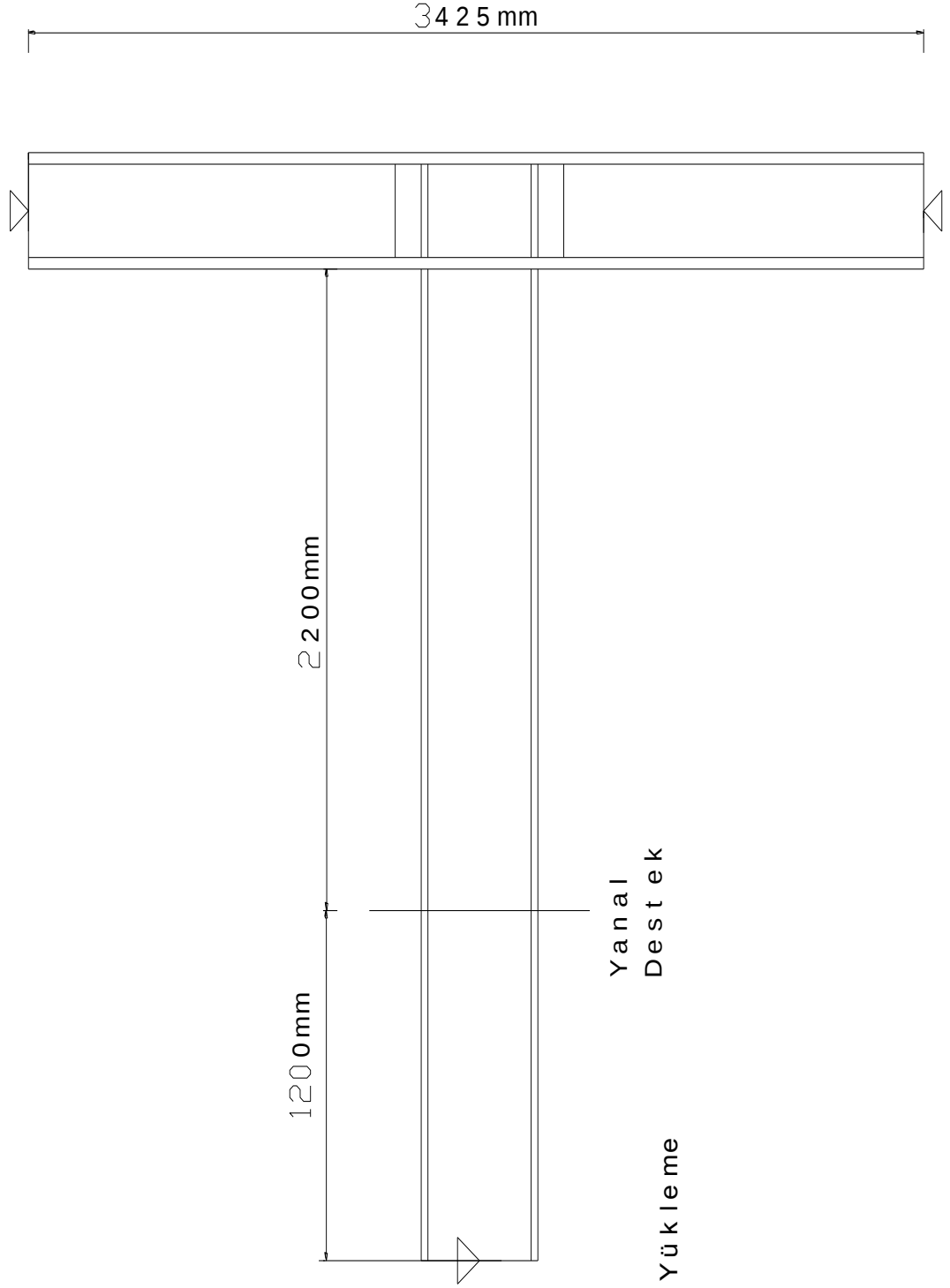
Birleşimlerin davranışını daha iyi anlayabilmek için bir dizi doğrusal olamayan sonlu eleman analizi yapılmıştır. Elastik olmayan davranışa etkilerini görebilmek için bazı geometrik ve malzeme parametreleri değiştirilmiş ve modeller birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu analizler sırasında, kaynak malzemesinin kiriş malzemesiyle aynı malzeme özelliklerine sahip olduğu kabul edilmiştir.

Birleşim geometrisinin, plastik dönmeye etkisini görebilmek için Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim model olarak alınarak değişik geometrilerde ve özelliklerde numuneler oluşturulmuştur. Bu numuneler, bir kontrol numunesiyle karşılaştırılarak geometri değişikliğinin yarattığı etki görülmüştür. Çalışılan parametreler arasında, kiriş açıklığının ve yüksekliğinin etkisi, çeliğin malzeme özelliğinin etkisi, panel bölgesi takviye levhasının ve süreklilik levhalarının olmaması halidir. Bu yapılan deneylerde bulunan sonuçlar hep aynı numuneyle karşılaştırılarak deneyler arasında bağlantı kurulmaya çalışılmıştır.

Birleşim geometrisiyle ilgili yapılan çalışmadan sonra, FEMA tarafından önerilen ve bu çalışmada temel olarak alınan 5 değişik birleşim tipi, farklı kolon ve kiriş boyutları için analiz edilmiştir. Bu analizlerde, yeterli plastik dönme göstermesi beklenen bir numunenin yanı sıra, davranışlarını ve göçme durumlarını görebilmek için kuvvetli kiriş-zayıf kolon davranışı göstermesi beklenen ve yeterli plastik dönmeyi gösteremeyeceği düşünülen numuneler de vardır. Bu çalışmada da 3 adet kiriş ve 2 adet kolon seçilerek oluşturulan 6 değişik numune , 5 değişik birleşim tipi için de uygulanmıştır.

Şekil 5.1’de tüm analizlerde kullanılan deney geometrisi gösterilmiştir. Kiriş uzunluğu, kolon yüzeyinden itibaren sabit alınmıştır. Fakat kolon boyutunun değişmesiyle, kuvvet eksenine kolon eksenine arasındaki mesafe değişkendir. Kolon 1’in kullanıldığı modellerde bu mesafe 3599.5mm iken; Kolon 2’nin kullanıldığı modellerde 3584mm dir. Gerek duyulduğunda yanal burkulmayı önlemek amacıyla destek kullanılmıştır. Bu desteklere Kiriş 2 ve Kiriş 3’ ün kullanıldığı numunelerde

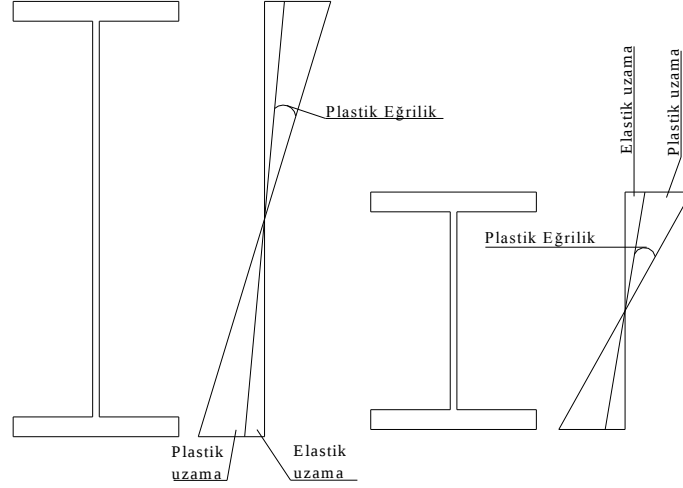
ihtiyaç duyulmamıştır çünkü, kirişler, yanal burkulmadan önce yerel burkulmayla göçme durumuna ulaşmaktadır.



Şekil 5.1: Analizlerde kullanılan deney geometrisi

5.1. ELEMAN BOYUTU VE GEOMETRİSİNİN ETKİSİ

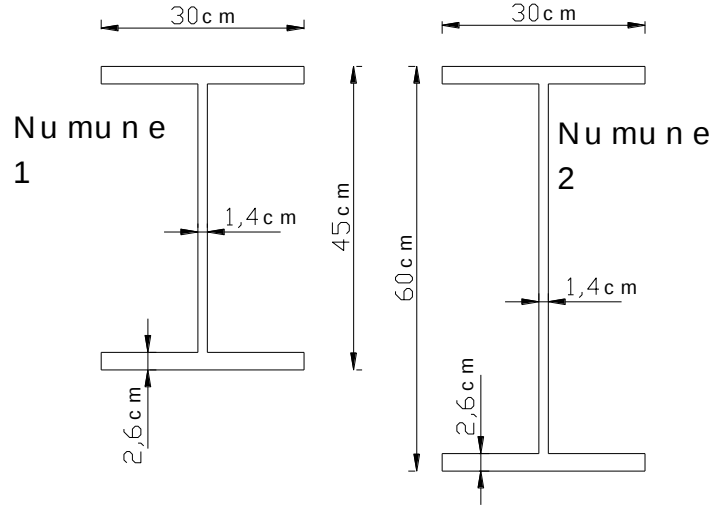
Kesit yüksekliği arttıkça elde edilen süneklik daha azdır. Bu, basit mekanik kurallarına dayanan bir sonuçtur ve bütün birleşim tipleri için geçerlidir. Şekil 5.2’de, kesit yükseklikleri dışında aynı özellikleri taşıyan iki kesitin, elastik ve plastik uzama dağılımı gösterilmiştir [1].



Şekil 5.2: Değişik yüksekliklere sahip kirişlerin elastik ve plastik uzama dağılımları

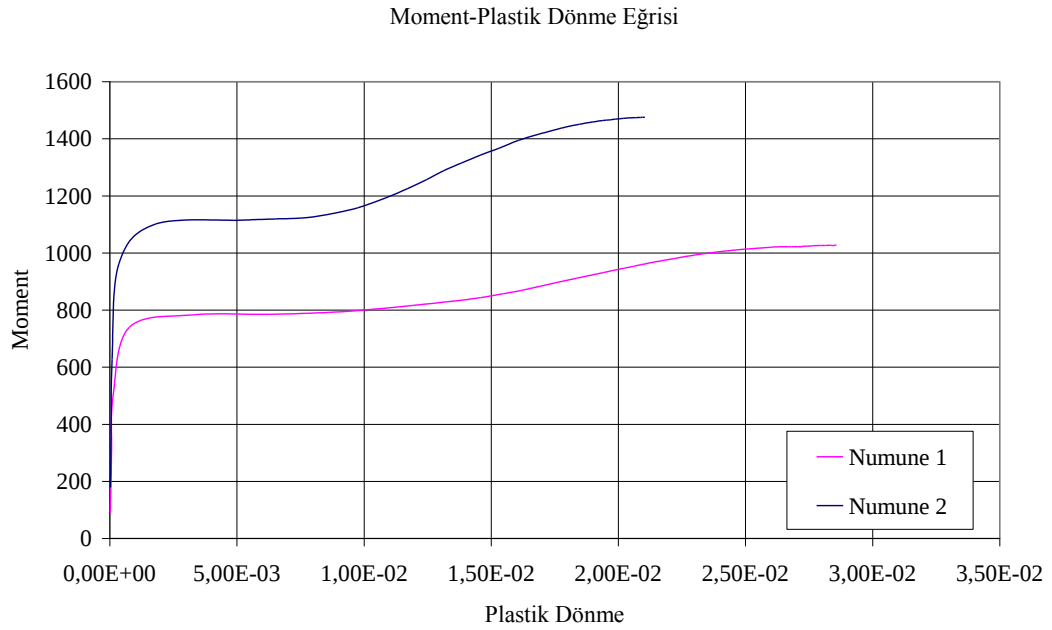
Plastik eğrilik, iki dış lif arasındaki plastik uzama farkının kesit uzunluğuna bölünmesiyle elde edilir. Bu durumda, yüksek bir kesit için plastik eğrilik, alçak bir kesite göre daha azdır. Plastik dönmeyi bulmak için, plastik eğriliğin, akma uzunluğu için integrali alınır. Bu durumda, kiriş uzunluğu sabitse, yüksek kesitlerin plastik dönmeleri daha azdır. Genel olarak, eğer kesit yüksekliği iki katına çıkarsa, bu birleşimde oluşabilecek en büyük plastik dönme ortalama olarak yarıya düşer [1].

Bu etkiyi incelemek için hazırlanan numunelerden alınan sonuçlar, bu etkiyi net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3: Kesit yüksekliğinin plastik şekil değiştirmeye etkisinin incelendiği kesitler

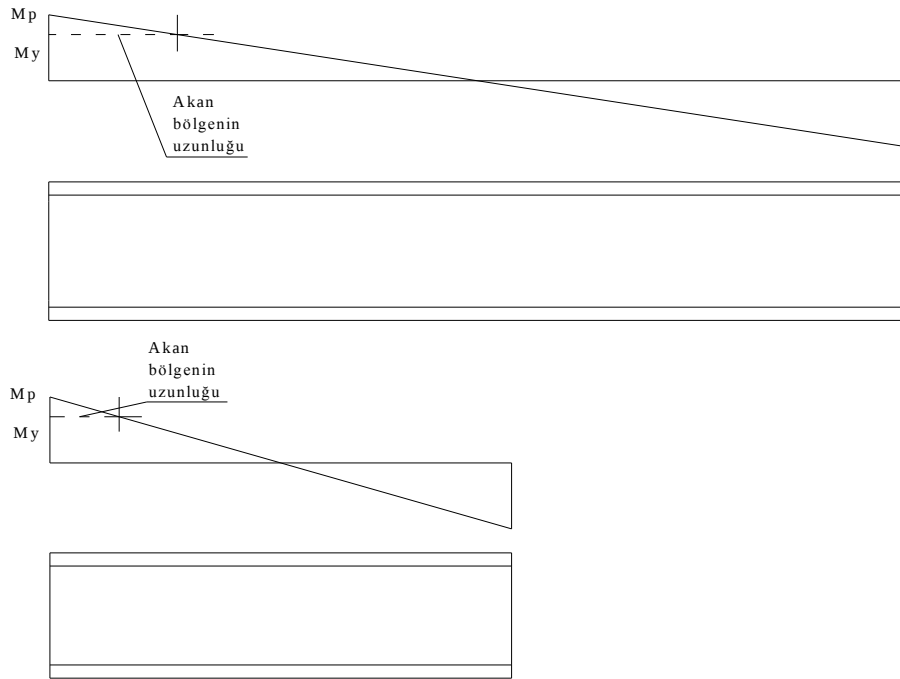
Şekil 5.3'de enkesit boyutları verilen iki numune için yapılan analizde, gövde yüksekliği daha fazla olan Numune 2'nin daha az plastik dönme yaptığı görülmüştür (Şekil 5.4).



Şekil 5.4: Aynı özelliklere fakat farklı yüksekliklerine sahip kesitlerin moment-plastik dönme eğrileri

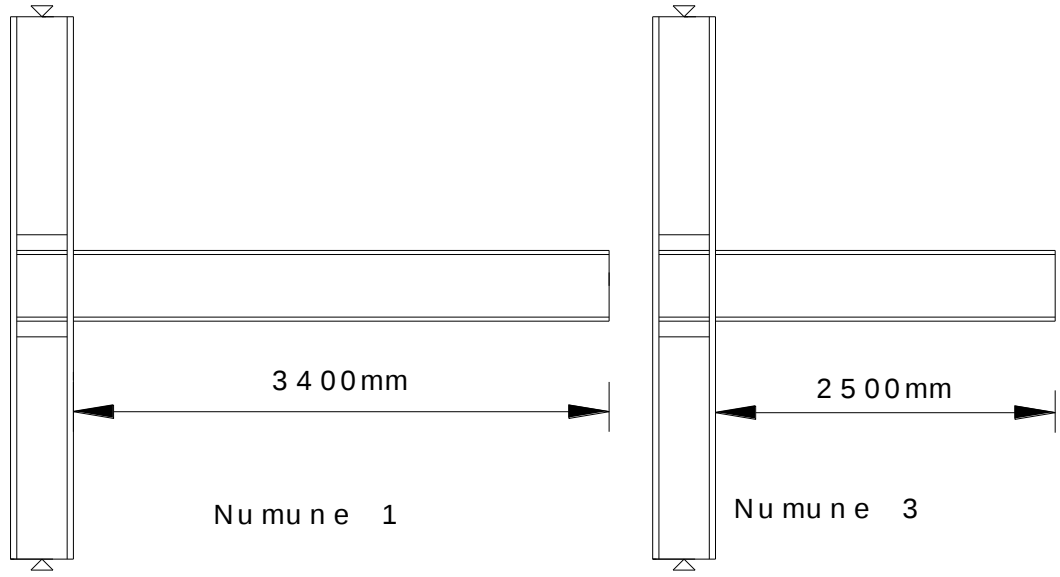
Kesit yüksekliklerinin süneklığe etkisi olduğu gibi, çerçeveyi oluşturan kirişin açıklığının da süneklığe etkisi vardır. Kısa açıklıklı kirişlerin, uzun açıklıklı kirişlere göre elastik olmayan dönme kapasiteleri daha azdır. Şekil 5.5'de bu tanım ile ilgili açıklamayı da basit mekanik kurallarını kullanarak yapmak mümkündür [1]. Sismik

yükler altındaki kirişin moment eğrisi çift eğriliklidir. Başlığı kaynaklı-gövdesi bulonlu birleşimlerin, plastik momenti, kolon yüzünde veya yakın bir yerde oluşturacak şekilde tasarlanmışlardır. Plastik mafsalsal, (ve dolayısıyla plastik dönme) kiriş üzerinde momentin M_y değerinden yüksek olduğu bölgede oluşur. Bu bölgenin uzunluğu, plastik moment değerine, çeliğin uzama pekleşmesine ve kiriş açıklığına bağlıdır. Kiriş açıklığı, bir kesitte, en büyük uzama kapasitesini ya da plastik eğrilik değerini etkilemez. Plastik eğrilik, en büyük moment değerinde en fazladır ve akma momentinde sıfıra doğru azalır. Yani kiriş kesitleri sabitse, kirişin plastik dönmesi, kirişin uzunluğuna bağlıdır [1].

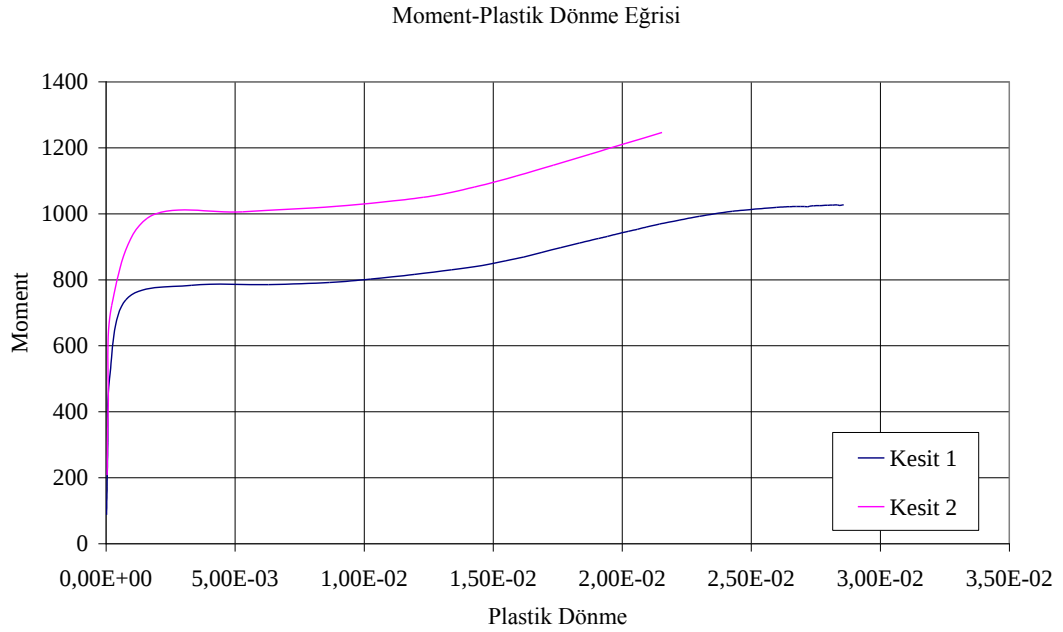


Şekil 5.5: Kiriş açıklığının sünekliğe etkisi

Birleşim davranışının bu özellikleri önemlidir, çünkü, yapının performansı üzerindeki etkileri azımsanmayacak seviyededir. Kiriş açıklığının plastik kapasite üzerindeki etkisini inceleyebilmek için hazırlanan modelde kiriş uzunluğu 3.4m olan standart numunenin yanı sıra, kiriş uzunluğu 2.5 m olan ikinci bir numune kullanılmıştır.

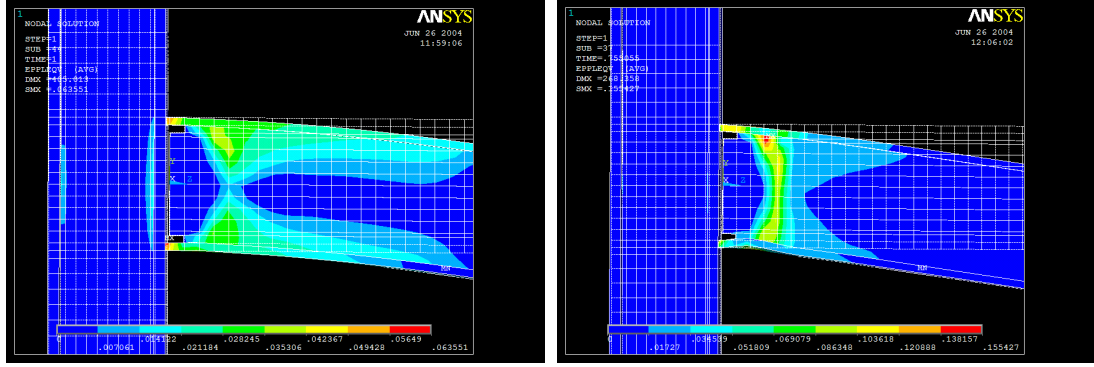


Şekil 5.6: Kiriş açıklığının plastik şekil değiştirmeye etkisinin incelendiği çerçeveler



Şekil 5.7: Aynı özelliklere fakat farklı kiriş açıklıklarına sahip çerçevelerin moment-plastik dönme eğrileri

Grafikten de görüldüğü üzere, kiriş açıklığı daha az olan numune daha az plastik şekil değiştirme yapmıştır. Sonuçlar daha ayrıntılı incelenecek olunursa, her iki numunenin kiriş uzunlukları oranıyla, plastik şekil değiştirme oranlarının eşit olduğu görülecektir. Bunun dışında, plastikleşmiş kesitler incelenecek olursa, Şekil 5.5’de gösterilen durum açıkça görülebilir. Kiriş uzunluğu daha fazla olan numunenin plastik şekil değiştirme yapan uzunluğu daha uzundur.



Numune 1

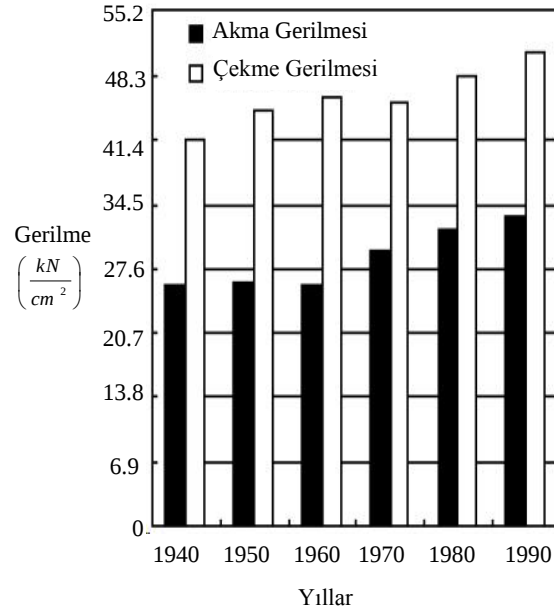
Numune 3

Şekil 5.8: Kiriş açıklığının, plastikleşen bölge uzunluğuna etkisi

Şekil 5.8’de görüldüğü üzere, kiriş açıklığı daha fazla olan Numune 1’de plastik uzama yapan bölge daha uzundur. Bunun yanında, Numune 3’de plastik uzama yapan bölgede büyük gerilme yığılmaları oluşmuştur. Numune 1’de ise uzama dağılımı daha dengelidir.

5.2. ÇELİĞİN MALZEME ÖZELLİĞİNİN ETKİSİ

Araştırmalar sırasında yapılan deneyler, pek çok numunenin, başlık kaynağında başlayan kaynak sonucu gevrek göçme durumuna geldiği görülmüştür. Yine bazı numunelerde, büyük tekrarlı uzamalara bağlı olarak yanal burkulma olduğu gözlenmiştir. 1970’lerde yapılan deneylerle son zamanlarda yapılan deneyler arasındaki önemli farklardan biri, eski deneylerde kullanılan çeliğin akma gerilmesinin belirgin şekilde az olmasıdır. Şekil 5.9’da bu durum açıkça görülmektedir. Çelik çerçevelerin sismik tasarımı ile ilgili standartlar 1970’li yılların başlarında tamamlanmıştı ve o yıllarda yapı çeliği olarak A36 çeliği yaygın olarak kullanılmaktaydı [1]. O yıldan 1990’lı yıllara gelinceye kadar A36 çeliği kullanılmaya devam etti fakat, üretilen çeliğin ortalama akma gerilmesinin %20 arttığını söyleyebiliriz [1]. Vurgulanması gerekir ki, en küçük akma gerilmesi değeri istatistiksel bir büyüklüktür. Zira, beklenen akma gerilmesi ve ortalama akma gerilmesi değeri bu değerden belirgin şekilde yüksek olmalıdır. Bir yapının sismik davranışını belirleyen faktör ise yapıda kullanılan çeliğin, en küçük akma gerilmesi değil; gerçek akma gerilmesi değeridir.

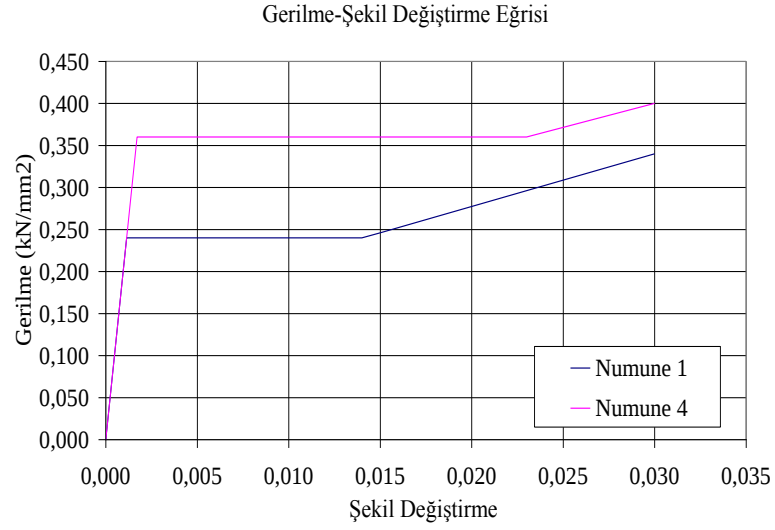


Şekil 5.9: Amerika'da, ölçülen akma ve çekme gerilmelerinin yıllara göre değişimi

Northridge öncesi birleşimin üzerinde yapılan araştırmalarda, akma gerilmesinin azalmasıyla birleşimin kritik bölgelerinde çatlama olmadan önce, plastik uzama ve plastik dönmeler artmıştır [1]. Başka bir deyişle, akma gerilmesinin azalmış olmasıyla oluşan erken akma, yüksek hidrostatik ve asal gerilmeler oluşmasını geciktirmiştir.

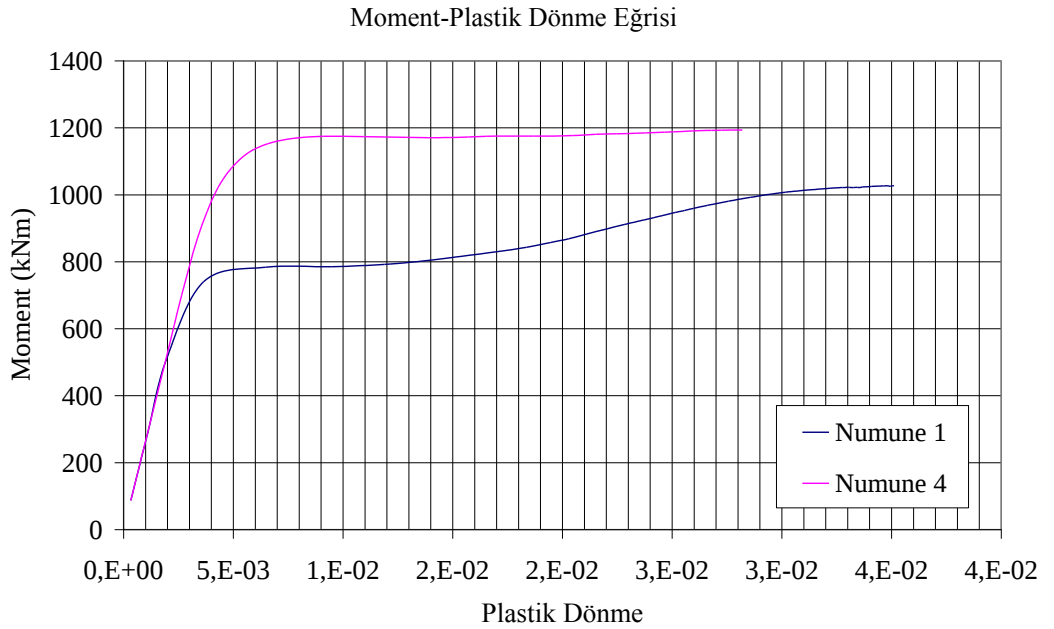
Kaliforniya Üniversitesinde 1996 yılında yapılan deneyde kullanılan PN1, PN2, PN3 numuneleri, PN1 ve PN2'nin akma gerilmesinin 41.4 kN/cm^2 ; PN3'ün akma gerilmesinin 27.6 kN/cm^2 olması dışında aynı özelliklere sahipti. Bu deney sonucunda PN1 ve PN2 0.006 radyanlık plastik dönme yapmış; buna karşın PN3 0.011 radyanlık plastik dönme değerine ulaşmıştır [1]. Northridge öncesi tasarımın kullanılmış olması, kaynağın CVN değerinin çok düşük olması ve kiriş yüksekliğinin fazla olması üç numunenin de plastik dönme değerini düşük seviyelerde tutmuştur fakat PN3 ile PN1 ve PN2 arasındaki plastik dönme oranının da iki kata yakın bir değer olduğu gözden kaçmamalıdır. Bu deneyden, akma gerilmesi düşük kirişlerin, akma gerilmesi yüksek kirişlere göre daha sünek davranış gösterdiği sonucunu çıkarabiliriz. Bu gözlem sayesinde de, Northridge depreminde daha yeni binaların daha fazla hasar görmesinin önemli bir sebebinin açıklayabiliriz. Zira, 1970li yıllarda, yapılarda kullanılan çeliğin beklenen akma gerilmesi 27.6 kN/cm^2 değerinin altındayken, bu değer 1990lı yıllara geldiğimizde 34.5 kN/cm^2 civarındaydı [1].

Çelik malzeme özelliğinin, plastik dönme kapasitesini incelemek için iki numune kullanılmıştır. Modellerden, Numune 1 St37 çelik sınıfı; Numune 4 ise St52 çelik sınıfı kullanılmıştır. Kullanılan gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 5.10'da görülmektedir.



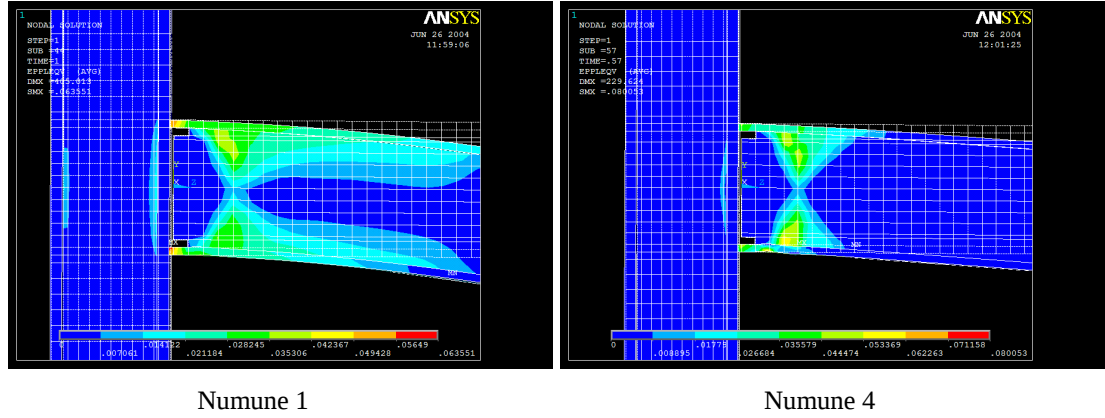
Şekil 5.10: Analizlerde kullanılan iki farklı gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Bu numunelerle yapılan analizlerde, çelik malzeme sınıfı St52 olan modelde, beklendiği gibi daha az plastik dönme gerçekleştirmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11: Farklı çelik malzeme özelliğinin plastik dönmeye etkisi

Bu grafiğin yanısıra, her iki modelin analiz sonundaki plastik şekil değiştirme resimlerine bakılırsa, St52 kullanılan modelde, plastikleşen bölgenin daha kısa olduğu görülür (Şekil 5.12).



Şekil 5.12: Çeliğin malzeme özelliğinin plastikleşen bölge uzunluğuna etkisi

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi, St52 malzeme sınıfına ait olan Numune 4’te, plastik uzama yapan bölgenin uzunluğu daha kısadır. Buna rağmen plastik uzamalar dengeli dağılmıştır.

5.3. PANEL BÖLGESİ KAYMASININ ETKİSİ

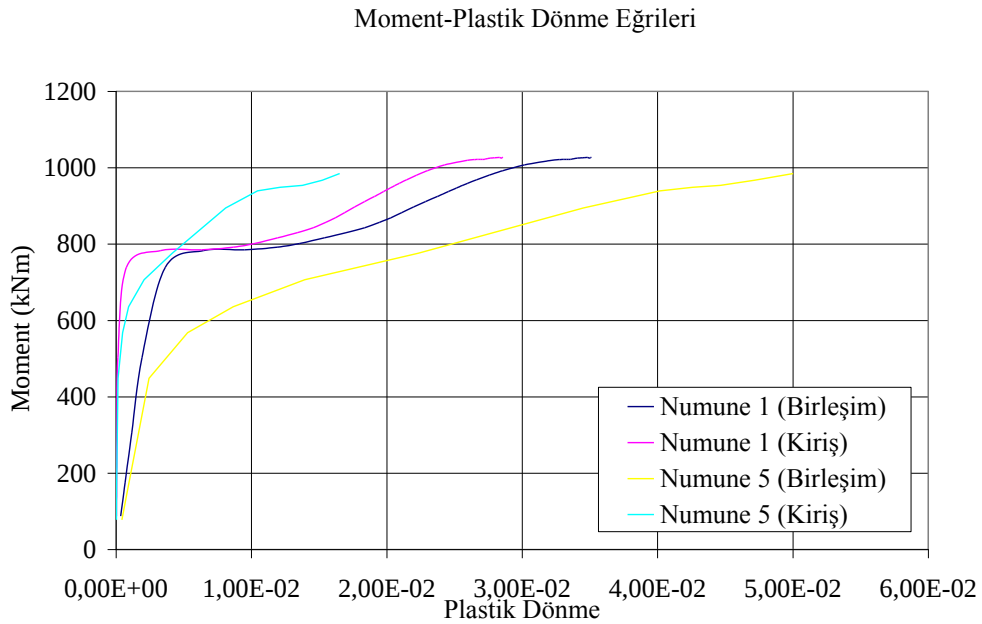
Panel bölgesi akması birleşim performansı için önemli bir konudur. Panel bölgesi akmasının, elastik olmayan şekil değiştirmeye önemli katkısı olduğu bilinmektedir. Günümüzde de yapı standartları, sismik tasarımda bu sünekliği daha fazla vurgulamaya başlamıştır.

Yapılan elastik ve elastik olmayan çalışmalar sonucunda, panel bölgesinde oluşan yüksek kayma gerilmesinin ve kolon başlığında oluşan yüksek gerilmelerin, kaynakta başlayan çatlakları kolona doğru yönlendirdiği görülmüştür. Kolon çatlaması ise, moment çerçevesi birleşimlerde olması en az istenen göçme durumudur. Bunun dışında, panel bölgesinin kayma kapasitesine ulaşması için panel bölgesinde aşırı şekil değiştirmeler oluşması gerekir [1]. Panel bölgesinin aşırı şekil değiştirme yapması ise büyük yerel şekil değiştirmelere yol açmaktadır ve birleşimin kritik bölgelerinde gerilme yığılmaları yaratmaktadır. Bu durum, birleşimin göçme durumuna yaklaşmasına sebep olabilir.

Panel bölgesi akması, sismik tasarım için plastik dönme kapasitesi sağlayabilir ama bu sünekliğe tam olarak güvenmek uygun olmaz. Analizlerin sonuçlarına göre, panel bölgesinde oluşan büyük şekil değiştirmeler, kaynaklı birleşimde, büyük yerel

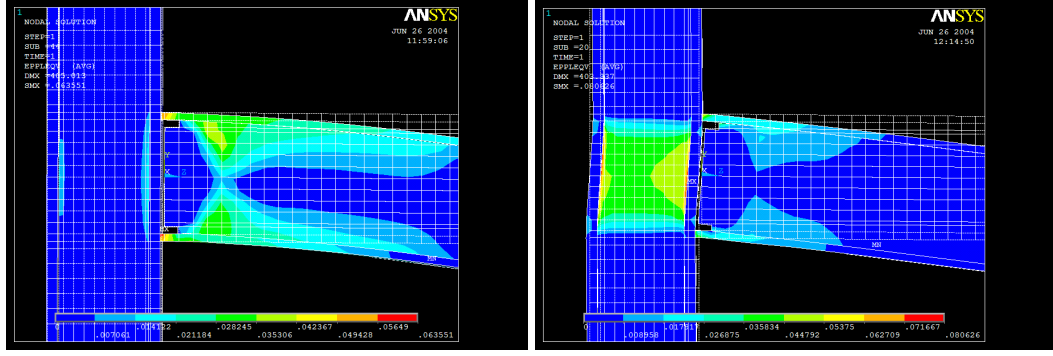
gerilme ve uzama ihtiyacı oluşturuyor. Buna göre, panel bölgesi zayıf olan birleşimler, dengeli tasarlanmış birleşimlere göre daha az plastik dönme yaparlar. Bunun yanında, panel bölgesinin fazla güçlü olması da bu bölgede akma olmamasına yol açacak ve süneklik azalacaktır. Bu durumda en iyi performansın elde edilebilmesi için, panel bölgesinde kayma akması ve kirişte eğilme akmasının beraber görüldüğü bir tasarıma ihtiyaç vardır [1].

Panel bölgesi akmasının, plastik dönmeye olan katkısını incelemek için iki model hazırlanmıştır. Bu modeller Şekil 5.5’de tanımlanan geometrilere sahiptir fakat Numune 5’de, panel bölgesi takviye levhası kullanılmamıştır. Analizlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 5.13’de görülmektedir.



Şekil 5.13: Farklı panel bölgesi davranışının plastik dönmeye etkisi

Grafikteki eğriler her iki modelde de, sadece kirişin ve tüm birleşimin yaptığı plastik dönmeyi göstermektedir. Görüldüğü gibi, Numune 1’de hemen hemen tüm plastikleşmeyi kiriş yapmıştır ve tek başına kirişin plastik dönmesi bile 0.03 radyan değerine yakındır. Oysa, Numune 5’de birleşimin yaptığı plastik dönme 0.05 radyan değerine yaklaşmasına rağmen kirişin yaptığı plastik dönme değeri 0.016 radyan değerinde kalmıştır.



Numune 1

Numune 5

Şekil 5.14: Panel bölgesi kaymasının plastikleşen elemanlar üzerine etkisi

Numunelerin plastik şekil değiştirme resimlerinden görüldüğü üzere, Numune 5'in panel bölgesinde aşırı şekil değiştirmeler oluşmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi, panel bölgesi akması yeterli plastik dönme oluştursa da depreme karşı dayanıklı tasarım için en iyi çözüm, panel bölgesi akmasının kiriş eğilme akmasıyla dengelenmesidir. Bu sebeple panel bölgesi takviye levhalarının tasarımda önemli bir yeri vardır.

5.4. SÜREKLİLİK LEVHASININ ETKİSİ

Moment çerçeve birleşimlerinden büyük süneklik beklendiğinden, süreklilik levhasının sünekliğe etkisi de düşünülmesi gereken bir konudur. Northridge depreminden önce kullanılan AISC Sismik Tasarım standartlara göre,

$$t_{cf} \leq 0.4 \sqrt{\frac{P_{bf}}{\sigma_{yc}}} \quad (5.1)$$

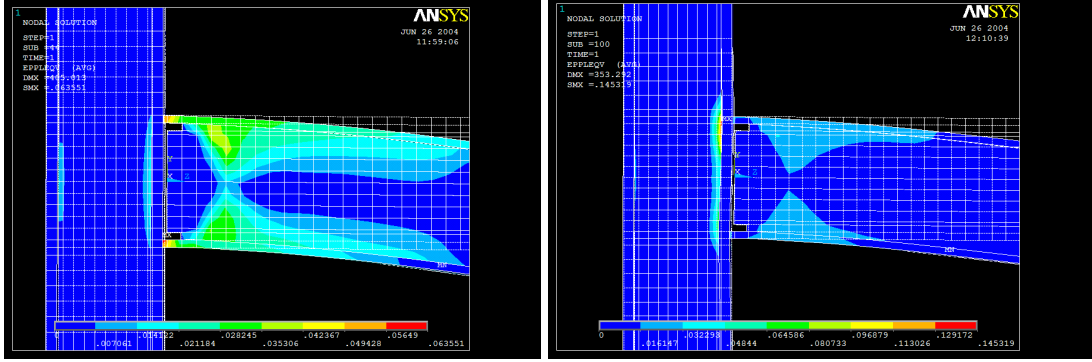
durumunda süreklilik levhasının kullanılması gerekirdi [1]. Bu formülde,

$$P_{bf} = 1.8 t_{fb} b_{fb} \sigma_{yb} \quad (5.2)$$

olarak bulunur [1].

Süreklilik levhalarının elastik olmayan davranışa etkilerini incelemek için deneyler yapılmıştır. Deneylerde aynı birleşim geometrisi üzerinde, değişik süreklilik levhası kalınlıkları ve hiç levha kullanılmaması hali gözönüne alınmıştır. Analiz sonuçlarında gerilme uzama davranışının, kullanılan süreklilik levhası kalınlığından

hemen hemen hiç etkilenmediği görülmüştür. Fakat, süreklilik levhasının hiç kullanılmaması durumunda, davranışta büyük değişiklikler gözlenmiştir. Özellikle kaynak-kolon başlığı kesitinde gerilme artışları ve kolon başlıklarında yerel burkulmalar görülmüştür.

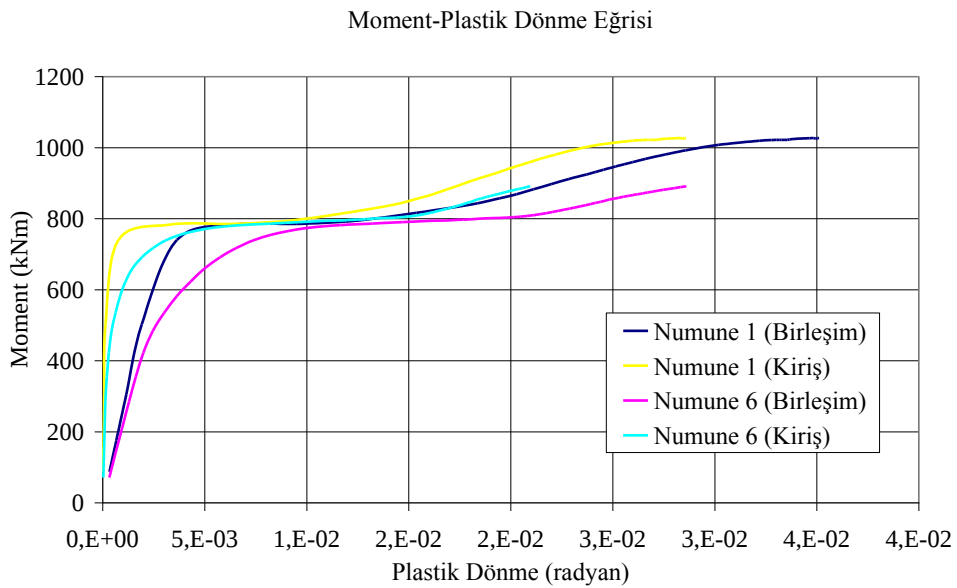


Numune 1

Numune 6

Şekil 5-15: Süreklilik levhasının plastikleşen bölgeye etkisi

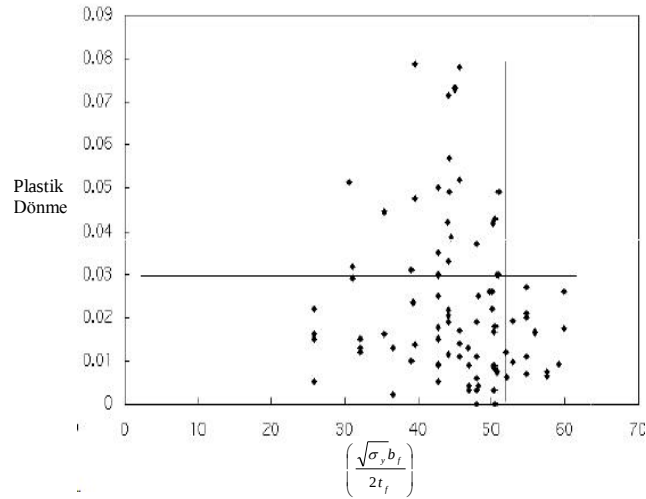
Şekil 5.15’de süreklilik levhası kullanılmayan Numune 6 modelinin davranışı, kiriş başlık kalınlığına eşit kalınlıkta süreklilik levhası içeren Numune 1 modeliyle karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, süreklilik levhası kullanılan model daha fazla plastik dönme yapmıştır. Süreklilik levhasının eksikliği, panel takviye levhasının eksikliğinde olduğu gibi panel bölgesinde aşırı şekil değiştirmeye yol açmamıştır ancak, kolonun Y ekseninde dönme yaptığı görülmüştür. Ayrıca, kolon başlığında yerel burkulmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 5.16: Süreklilik levhasının plastik dönmeye etkisi

5.5. NARİNLİK VE YEREL BURKULMANIN ETKİLERİ

Çelik moment çerçevesi birleşimlerinin sismik tasarımında, gövde burkulması, başlık burkulması ve yanal burkulma durumları sürekli ilgi çekmiştir. Çünkü, kiriş enkesitini oluşturan plak elemanlarda oluşan yerel burkulma ve önlem alınmadıysa yanal burkulma, çelik elemanların dönme kapasitelerini azaltan önemli faktörlerdendir. Yeterli dönme kapasitesine sahip enkesitler tasarlayabilmek için yerel burkulma olayının dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Özellikle de, yerel burkulmanın elastik bölgede oluşması kesinlikle engellenmelidir. Yani, kesit özellikleri, burkulmanın plastik bölgede oluşmasını sağlamalıdır. Northridge öncesi yapılan birleşim testlerine göre, burkulma sonucunda dayanımda azalma ve süneklik kaybı gösterilmiştir.



Şekil 5.17: Plastik dönme-kiriş başlık narinliği etkileşimi

Şekil 5.17’de değişik başlık narinliğine sahip birleşimlerin plastik dönmeleri görülmektedir [1]. Özel çelik moment çerçevelerinde sağlanması gereken süneklik koşulunu kullanarak;

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{\sigma_y}} \quad (5.3)$$

plastik dönme, kiriş başlık narinliğinin bir fonksiyonu olarak yazılabilir [1]. Değişik kiriş yükseklikleri, göçme durumları ve test koşulları olduğundan, şekildeki veri çok dağınık durumdadır. Yine de 0.015 ile 0.02 radyanlık plastik dönme, Northridge depremine kadar kullanılan ve sismik performans için başarılı sayılan bir değerdi ve

Şekilde 5.17’de de, o bölgede yoğunluk görülmektedir. Ayrıca, $b_f/2t_f$ değeri $52/\sigma_y$ den büyük olan hiç bir numunenin, 0.03 radyanlık dönme değerini aşmadığını görebiliyoruz. Başlık levhaları daha kalın olan numuneler ise bu dönme değerini aşmıştır. Numunelerin büyük kısmı 0.015 ile 0.02 radyanlık plastik dönme yapmıştır. Bu da, geçerli olan tasarım kuralının, sünek davranış elde etmek için yeterli olduğunu gösteriyor. Narinlik limitinin oldukça altında kalmak, yerel burkulma doğurduğu için güvensizken; hemen üstüne çıkmak da plastik dönme kapasitesini azaltan bir durumdur.

Çelik yapıların tasarımında çok önemli olan bir konu ilk defa Eurocode 3 tarafından kullanılmıştır ve yapısal çelik kesitleri, davranışlarına göre alt sınıflara ayrılmıştır. Bu sınıflar [9]:

- 1. Sınıf (Plastik Kesitler)
- 2. Sınıf (Kompakt Kesitler)
- 3. Sınıf (Yarı Kompakt Kesitler)
- 4. Sınıf (Narin Kesitler)

1. Sınıfta değerlendirilen kesitler yüksek dönme kapasitesine sahip plastik mafsalları oluşturma yeteneğine sahiptir. Bu sınıfta yer alan kesitlerin gövdelerinde,

$$\frac{d}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon \quad (5.4)$$

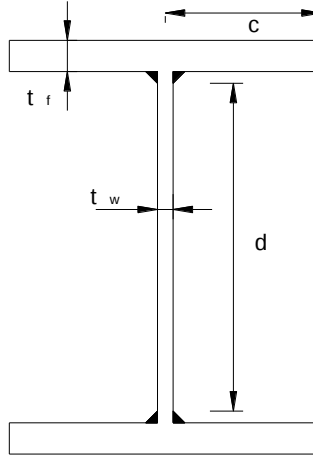
oranı aranır. Başlıklarında ise,

$$\frac{c}{t_f} \leq 10 \varepsilon \quad (5.5)$$

oranı aranır. Bu formüllerde,

$$\varepsilon = \sqrt{235 / \sigma_y} \quad (5.6)$$

ifadesi kullanılır [9]. Formüllerde yer alan geometrik boyutlar Şekil 5.18’de görülmektedir.



Şekil 5.18: Kesit uzunlukları

2. sınıfta yer alan kesitler, en büyük plastik eğilme dayanımına ulaşabilirler fakat şekil değiştirme kapasiteleri sınırlıdır. 2. sınıfta yer alan kesitlerin gövdelerinde,

$$\frac{d}{t_w} \leq 83 \cdot \varepsilon \quad (5.7)$$

oranı aranır. Başlıklarında ise,

$$\frac{c}{t_f} \leq 11 \varepsilon \quad (5.8)$$

oranı aranır. ε değeri formülden bulunur [9].

3. sınıfta yer alan kesitlerde, eğilme momenti, eğilme akmasına yol açmasına rağmen yerel burkulma olayı yüzünden kesit plastikleşmez. Bu sınıfta yer alan kesitlerin gövdelerinde ve başlıklarında sırasıyla,

$$\frac{d}{t_w} \leq 124 \cdot \varepsilon \quad (5.9)$$

$$\frac{c}{t_f} \leq 15 \cdot \varepsilon \quad (5.10)$$

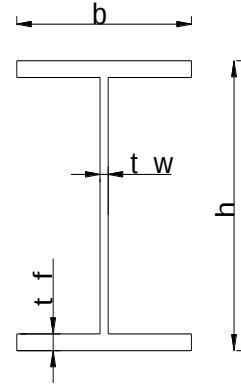
oranları aranır. ε değeri formülden bulunur.

Son olarak, 4. sınıfta yer alan kesitler, basınç başlığında oluşan yerel burkulma yüzünden, tüm elastik eğilme dayanımını gösteremezler.

Bu denklemlerde, kesit sınıfını belirleyici olan faktör, basınç başlığının c/t_f oranıdır ve kesitin sınıfını belirler. Yukarıda verilen kesit sınıflarından 1. ve 2. kesit sınıflarını içeren çerçevelerin analizinde plastik metod; 3. ve 4. kesit sınıflarına ise elastik metod kullanılmalıdır. Plastik analiz kullanabilmenin şartı plastik enkesit kullanmaktır. Böylece, plastik mafsallar, yeterli dönme kapasitesine ulaşabilir ve yapı içinde oluşan moment yayılımı sayesinde plastik mekanizma oluşumuna yol açar. Kompakt kesitlerin kullanımı ise plastik mekanizmaya ulaşılmasını engelleyebilir. Çünkü bu enkesitler, plastik mafsallı oluşturabilse bile yeterli plastik dönmeyi garanti edemediklerinden moment yayılımı oluşamaz. Yarı kompakt ve narin kesitlerde ise plastik kapasiteler tam olarak oluşamaz. Bu çalışmada kullanılan kiriş ve kolon boyutları Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Analizlerde kullanılan kiriş-kolon boyutları

		Boyutlar (mm)			
		h	b	t _f	t _w
Kiriş	Kiriş 1	450	300	26	14
	Kiriş 2	450	300	14	10.5
	Kiriş 3	450	300	10.5	9.5
Kolon	Kolon 1	399	401	39.6	24
	Kolon 2	368	391	24	15

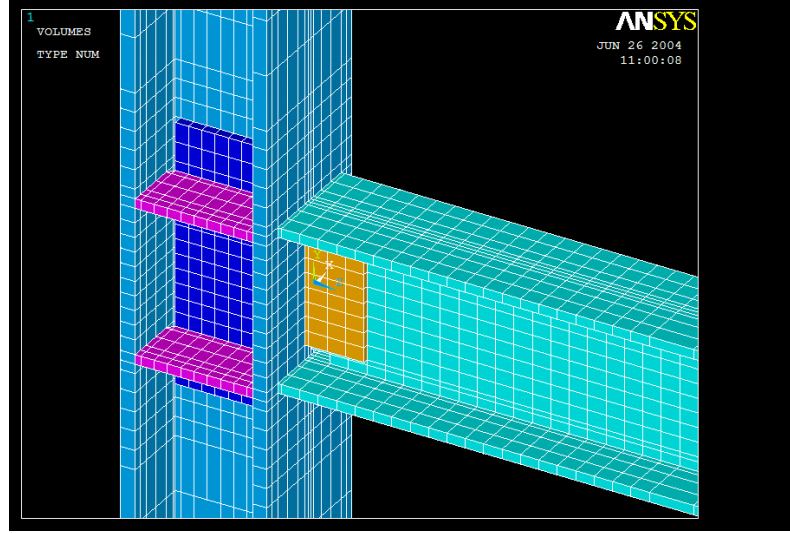


İleriki sayfalarda, her birleşim tipi için hazırlanan 6 numune, birleşim tipi, birleşimi oluşturan kiriş ve kolon numaralarının birleştirilmesiyle oluşacaktır. İncelenecek birleşim tipleri sırasıyla, Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim, Başlık Levhası Kaynaklı birleşim, Başlık Levhası Bulonlu birleşim, Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim ve Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimdir. Birleşim tipi belirtildikten sonra gelen ilk numara kirişi; ikinci numara ise kolonu belirtecek şekilde seçilmiştir. Örneğin, Birleşim3_21 isimli numune, Kiriş 2 ile Kolon 1 kullanılarak hazırlanan Başlık Levhası Bulonlu birleşim tipidir.

5.5.1. Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı Birleşim

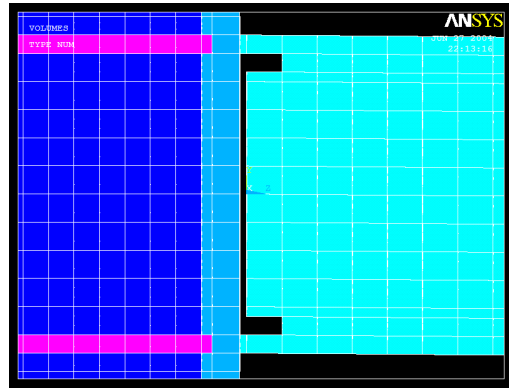
Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim, Northridge öncesi birleşimin esas alınarak hazırlanmış bir birleşimdir (Şekil 3.2). Northridge öncesi birleşimden

ayrılan noktaları geliştirilmiş kaynak elektrotu ile kaynak uygulama işlemi ve geliştirilmiş kaynak ulaşım deliği detayıdır. Bu analizlerde kaynak malzemesi analize dahil edilmemiş ve kaynak malzemesinin, kiriş ve kolon malzemesiyle aynı mühendislik özelliklere sahip olduğu kabul edilmiştir. Birleşim, Şekil 5.19’da görülmektedir.



Şekil 5.19: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim

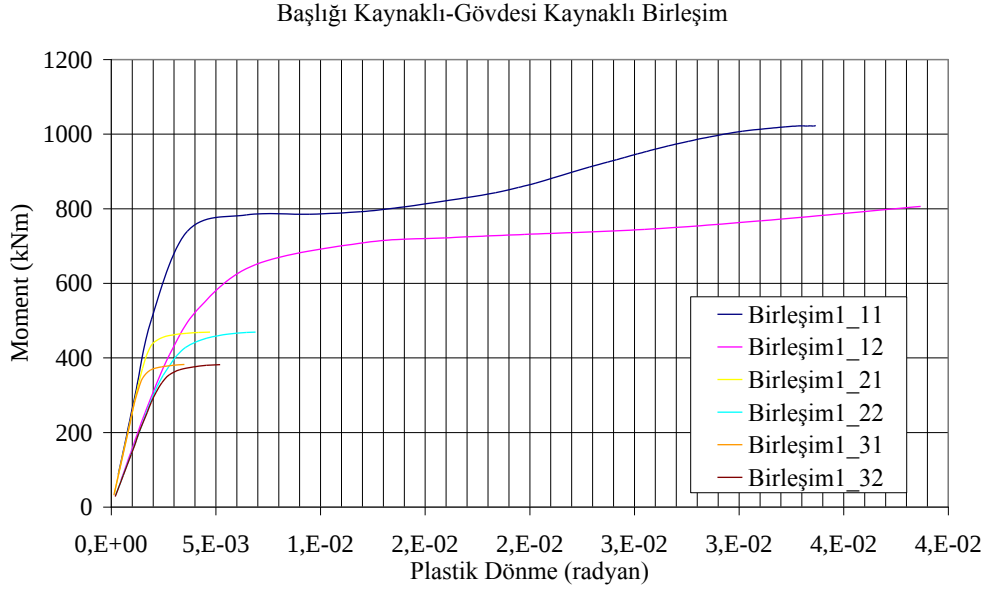
Ayrıca, bu çalışmada kaynak ulaşım deliği Şekil 5.20’de ki gibi modellenmiştir. Hazırlanan bu detayın bu çalışmanın amacına yeteceği düşünülmüştür. Bunun yanında, kaynak ulaşım deliği detayını, FEMA’nın tanımladığı şekilde modele dahil etmenin, bilgisayar analiz süreleri açısından modelin ekonomikliğini yokedeceği gözönünde bulundurulmuştur.



Şekil 5.20: Kaynak ulaşım deliği detayı

Şekil 5.20’de, kaynak ulaşım deliği detayının görülebilmesi için kayma levhası detayda gösterilmemiştir.

İncelenen ilk birleşim olan Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşimin davranış eğrileri Şekil 5.21’de görülmektedir.

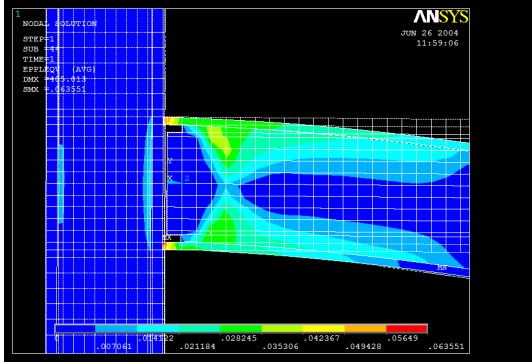


Şekil 5.21: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşiminde görülen moment-plastik dönme eğrileri

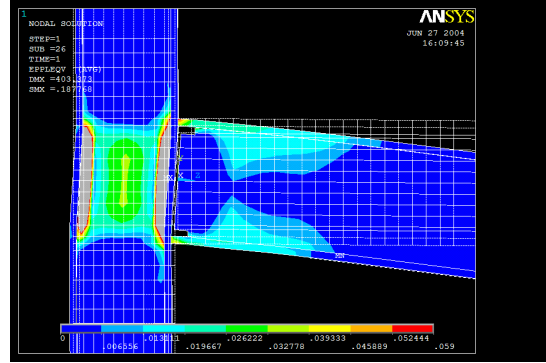
Moment-Plastik Dönme eğrilerinden görüldüğü gibi Kiriş 2 ve Kiriş 3’ün dahil olduğu birleşimler yeterli plastik dönme değerine ulaşamamıştır. Her iki kiriş te, basınç başlığında oluşan yerel burkulma yüzünden plastik mafsallı oluşturamamıştır. Grafikler incelendiğinde, her iki kolon durumunda da, Kiriş 2 ve Kiriş 3’ün plastik dönme değerleri arasında çok fazla fark olmadığı görülebilir. Fark sadece moment taşıma kapasite değerleri arasındadır. Zayıf kolon-kuvvetli kiriş olarak tasarlanmış olan Birleşim1_12 numunesi 0.04 radyana yakın plastik dönme yapmış olmasına rağmen, plastikleşmenin büyük kısmını panel bölgesi yapmıştır. Depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesinde panel bölgesi şekil değiştirmesinin kontrol altında tutulması istenir. Bu sebeple, istenilen plastik dönmeyi sağlamış olmasına rağmen tercih edilmesi gereken bir birleşim değildir.

Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşim tipi kullanılarak hazırlanan numunelerin oluşturduğu plastikleşme Şekil 5.22’de görülmektedir. Diğer tüm birleşimlerde de aynı gösterim şekli kullanılacağından şekille ilgili açıklama gerekebilir. Bu şekillerde, sayfanın sol tarafında yer alan alt alta birleşimler, Kolon 1; sağ tarafında alt alta yer alan birleşimler ise Kolon 2 kullanılarak hazırlanmıştır. Sayfanın solundan sağına doğru gidilince, kolonu oluşturan levha kalınlıkları azalmaktadır.

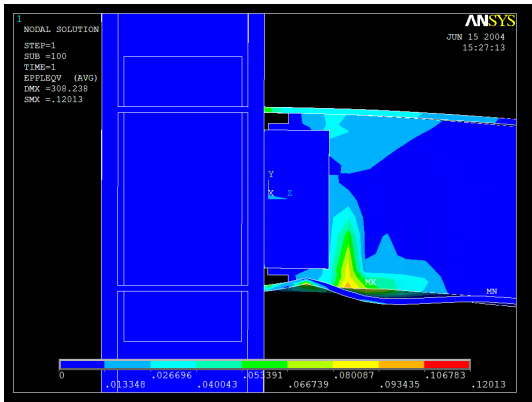
Sağ taraf ya da sol tarafta alt alta olan resimlerde değişen bileşen ise kirişlerdir. Üstten alta doğru inildikçe kirişi oluşturan levha kalınlıkları azalmaktadır.



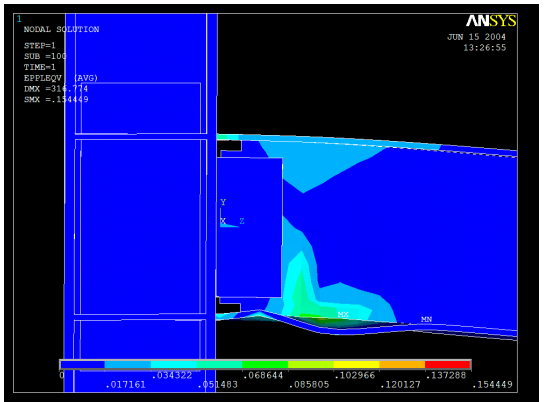
Birleşim1_11



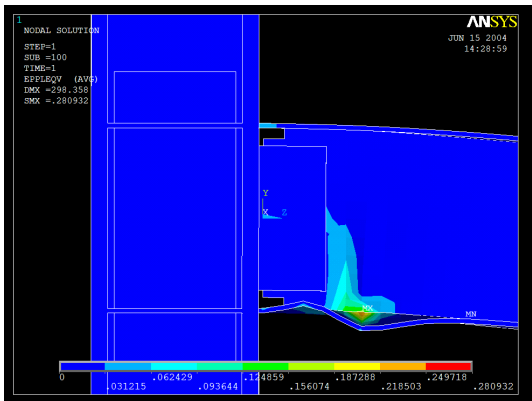
Birleşim1_12



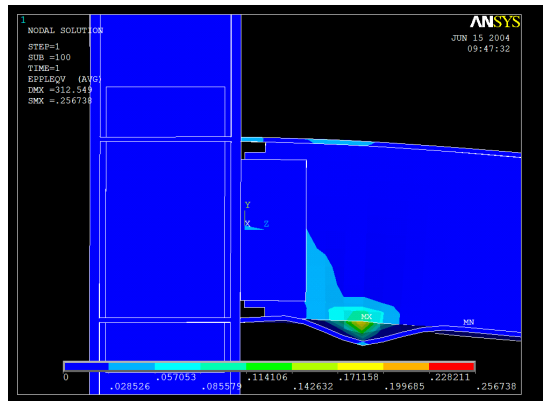
Birleşim1_21



Birleşim1_22



Birleşim1_31



Birleşim1_32

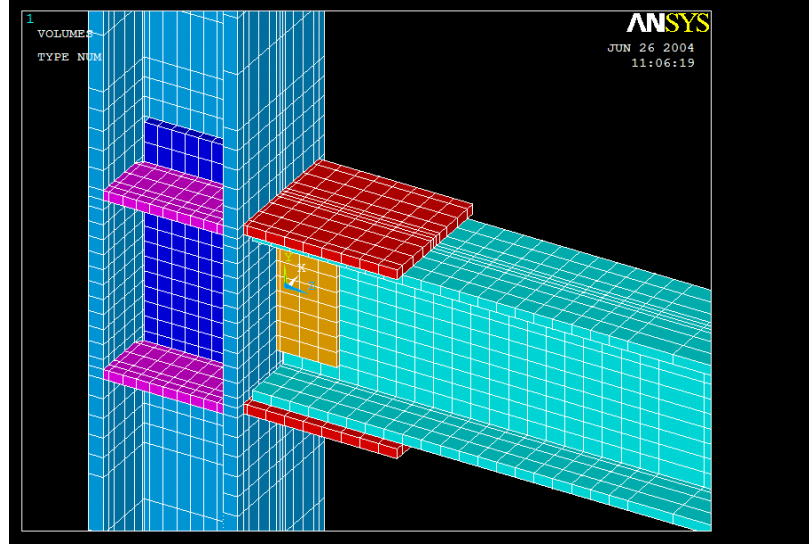
Şekil 5-22: Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı Birleşim tipi kullanılarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsal oluşumu

5.5.2. Başlık Levhası Kaynaklı Birleşim

Başlık Levhası Kaynaklı birleşim, teşkili kolay olduğundan tercih edilebilecek bir birleşim tipidir (Şekil 3.5). Bu birleşimin analizlerinde kullanılan başlık levhası kalınlığı, kiriş başlık kalınlığına eşit seçilmiştir. FEMA raporlarında başlık levhasının uzunluğuyla ilgili bir kriter olmadığından başlık levhası uzunluğu kiriş yüksekliğine

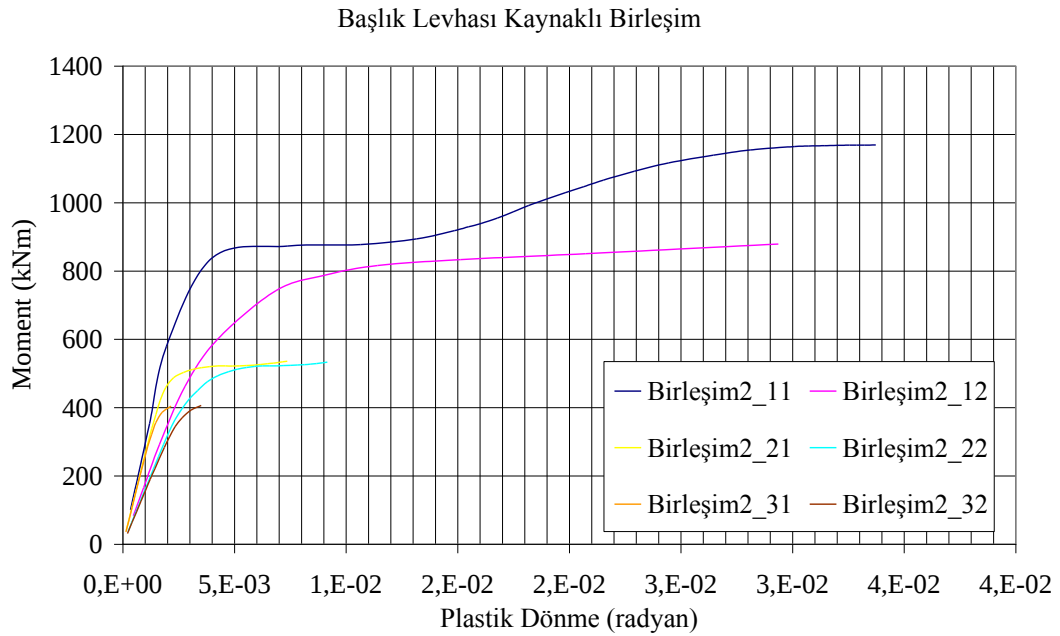
yakın bir değer olan 41cm, 51cm ve 61cm seçilerek analizler yapılmıştır. Standart modelde başlık levhası uzunluğu 41cm olarak kullanılmıştır.

Şekil 5.23’de, Başlık levhası Kaynaklı birleşim görülebilir.



Şekil 5.23: Başlık Levhası Kaynaklı birleşim

Başlık Levhası Kaynaklı birleşimin Moment-Plastik Dönme eğrileri Şekil 5.24’de görülmektedir.

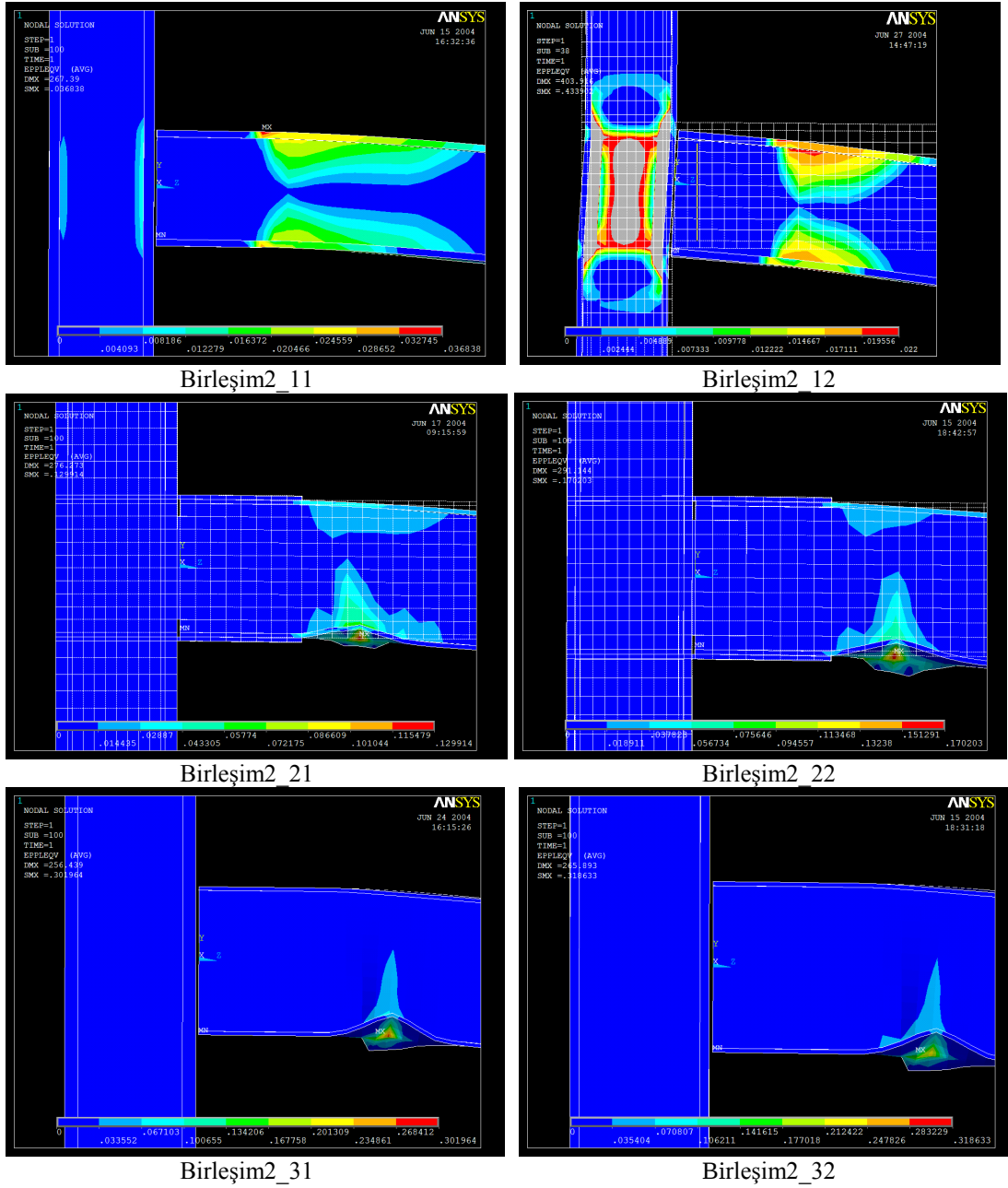


Şekil 5.24: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimde görülen moment-plastik dönme eğrileri

Şekilden görüldüğü üzere, sadece Kiriş 1’in kullanıldığı birleşimler 0.03 radyan plastik dönme kapasitesi değerini geçebilmiştir. Bu birleşimlerden, Birleşim2_12

numunesi ise zayıf kolon-kuvvetli kiriş davranışı göstermiştir. Kiriş 2’den teşkil edilmiş numuneler 0.01 radyan değerine ulaşmadan basınç başlığında oluşan yerel burkulma sonucu göçme durumuna ulaşmışlardır. Kiriş 3’den teşkil edilen numuneler ise plastik bölgenin hemen başında basınç başlığında oluşan yerel burkulma sonucu göçme durumuna ulaşmışlardır.

Şekil 5.25’de, Başlık Levhası Kaynaklı birleşimde yapılan analizlerden elde edilen plastikleşme görülmektedir.



Şekil 5-25: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimi kullanılarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsall oluşumu

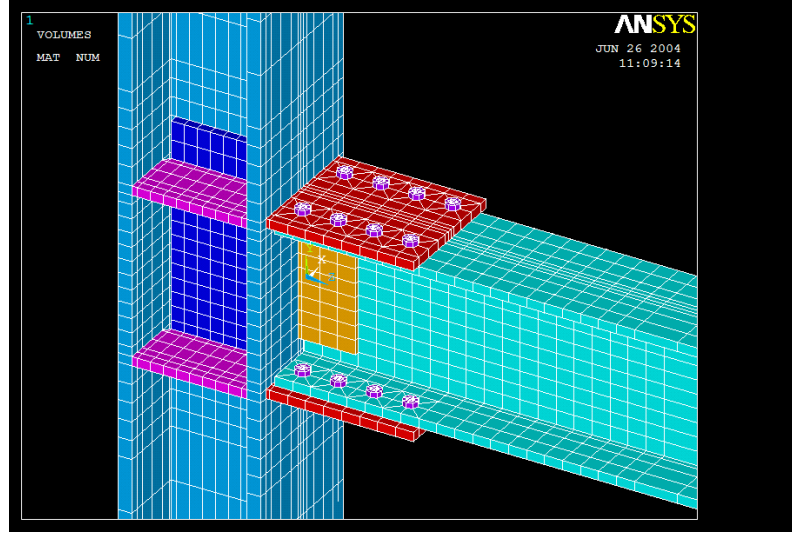
Başlık Levhası Kaynaklı tipi numunelerin burkulma olayından sonra da moment taşıma kapasitelerinde azalma olmadığı, ve bir süre daha moment değerlerinin artarak devam ettiği görülmüştür. Özellikle Kiriş 2'nin kullanıldığı birleşimlerde bu etki daha net olarak görülebilmektedir.

Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı tipteki numunelerde ise, yerel burkulma ile moment taşıma kapasitesinde azalma görülmesi aynı adımlarda olmuştur.

Başlık levhasının etkisi net bir şekilde ortaya çıkmış ve plastikleşme beklendiği gibi kolon yüzeyinden uzaklaşmıştır.

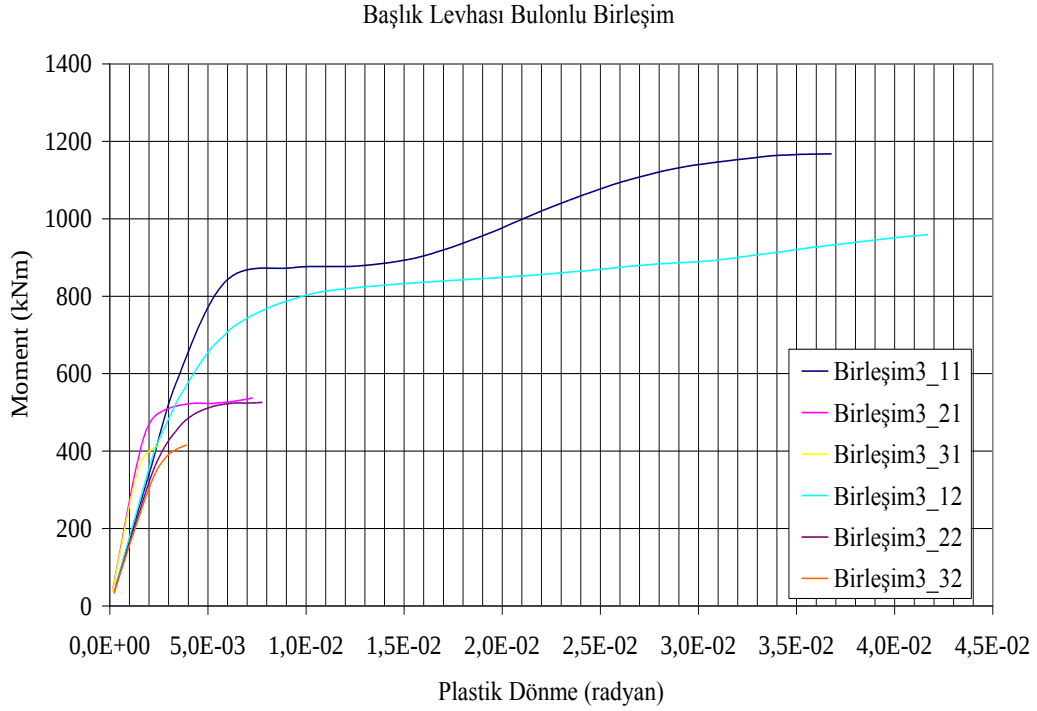
5.5.3. Başlık Levhası Bulonlu Birleşim

Başlık Levhası Bulonlu birleşim, Uzatılmış Alın Levhalı birleşimler kadar sık olmasa da yaygın olarak kullanılan bir birleşimdir (Şekil 3.9). Özellikle, Northridge depreminde kaynak detaylarının yetersiz sismik performans vermesinden sonra yönelinen alternatiflerden biri olmuştur. Bu birleşimin plastik dönme kapasitesine pek çok bileşenden katkı gelmektedir. Bunlar arasında, kiriş, başlık levhası, panel bölgesi ve özellikle bulonda oluşan kayma akması sayılabilir. Birleşimin geometrisi, Şekil 5.26'da görülebilir.



Şekil 5.26: Başlık Levhası Bulonlu birleşim

Bulonda oluşan kayma akmasının incelenmesi için bazı araştırmacılar gereğinden büyük bulon delikleri içeren numuneler de kullanmışlardır fakat bu çalışmada bulon delikleri standart olarak alınmış ve yeni bir parametre olarak etkisi araştırılmamıştır.



Şekil 5-27: Başlık Levhası Bulonlu birleşimin birleşimde görülen moment-plastik dönme eğrileri

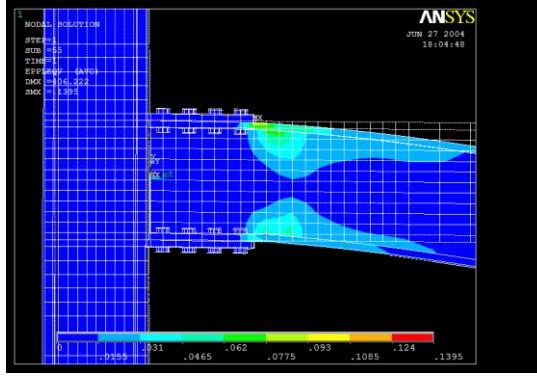
Başlık Levhası Bulonlu birleşimin analizleri sonucunda elde edilen Moment-Plastik Dönme eğrileri Şekil 5.27’de görülmektedir.

Eğrilerden görüldüğü üzere sadece Kiriş 1’in kullanıldığı birleşimlerde gerekli plastik dönme olan 0.03 radyan değeri elde edilmiştir. Kiriş 1 ve Kolon 1’den oluşturulan Birleşim3_11 numunesi 0.036 radyan plastik dönme kapasitesi değerine ulaşmıştır. Birleşim3_12 numunesinin yaptığı plastik dönme 0.04 radyan değerini geçmiş olsa da kirişin yaptığı plastik dönme sadece 0.004 radyan değerinde kalmıştır. Yani plastikleşmenin büyük kısmı birleşimin kendisinde meydana gelmiştir. Bu durum, plastik mafsalı mümkün olduğunca birleşimden uzaklaştırma felsefesine aykırıdır.

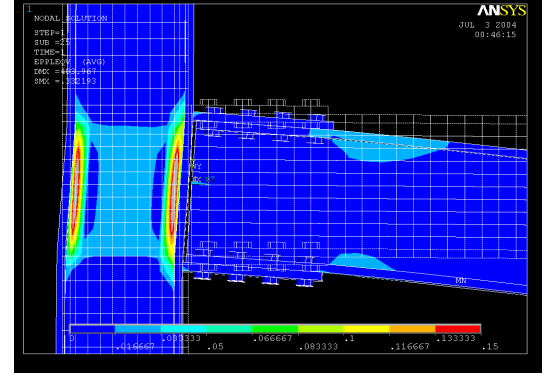
Bunun yanında, Kiriş 2’nin kullanıldığı birleşimler, tıpkı Başlık Levhası Kaynaklı birleşim tipinde görüldüğü gibi, yerel burkulma olayından sonra da moment taşıma kapasitesinde bir azalma olmadan yük taşımaya uzun süre devam etmişlerdir.

Kiriş 3’ün kullanıldığı birleşimler ise plastik bölgenin hemen başında, basınç başlığında oluşan yerel burkulma sebebiyle göçme durumuna ulaşmışlardır.

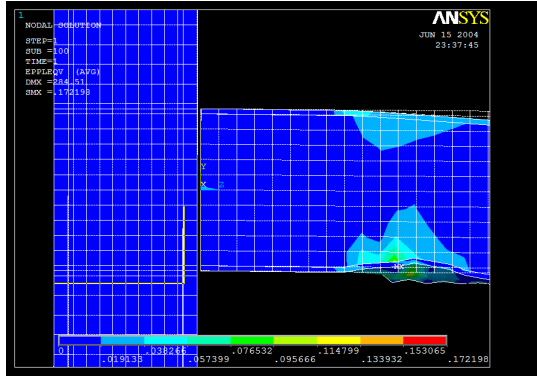
Başlık Levhası Bulonlu birleşim kullanılarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsal oluşumu Şekil 5.28’de görülmektedir.



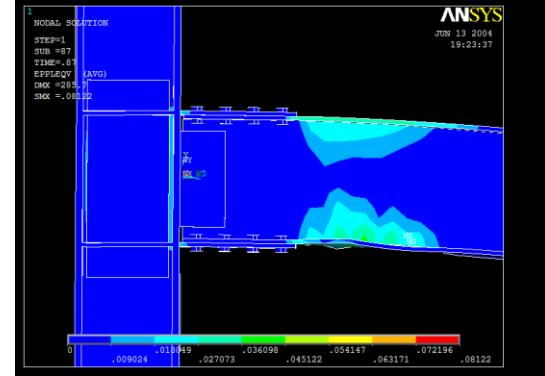
Birleşim3_11



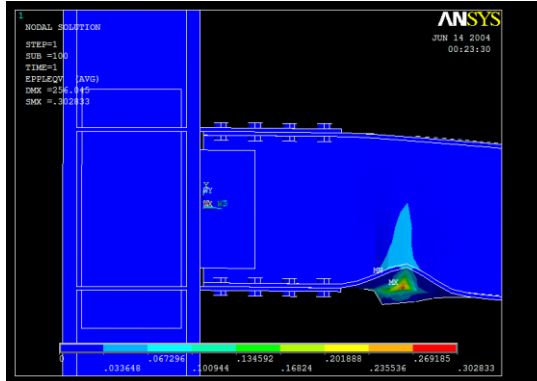
Birleşim3_12



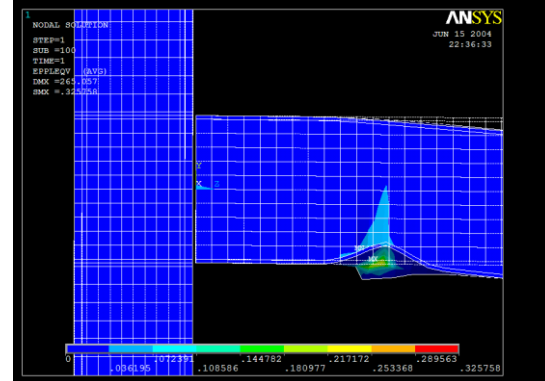
Birleşim3_21



Birleşim3_22



Birleşim3_31

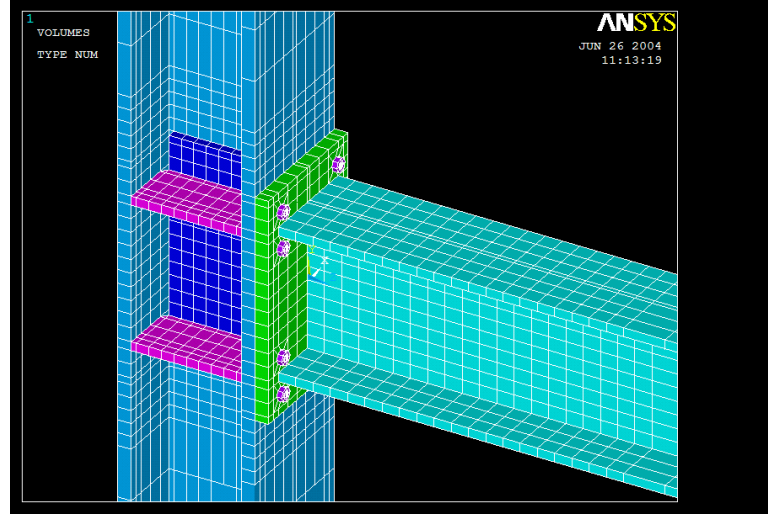


Birleşim3_32

Şekil 5.28: Başlık Levhası Bulonlu birleşimi kullanılarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsall oluşumu

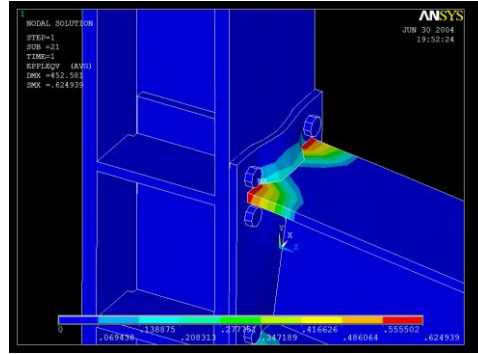
5.5.4. Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim

Uzatılmış alın levhalı birleşimler Northridge depreminden sonra çok sık olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şantiye kaynağı gerektirmediğinden uygulanması daha kolaydır. Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimde, kiriş başlığının altında ve üstünde bir sıra bulon olacak şekilde tasarlanmıştır. Kolon başlığı ve alın levhası birbirine sabitlenmemiştir ve bağıl hareket yapabilirler. Birleşimde öngermeli bulon kullanılmıştır. Birleşimin geometrisi Şekil 5.29’da görülmektedir.



Şekil 5.29: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim

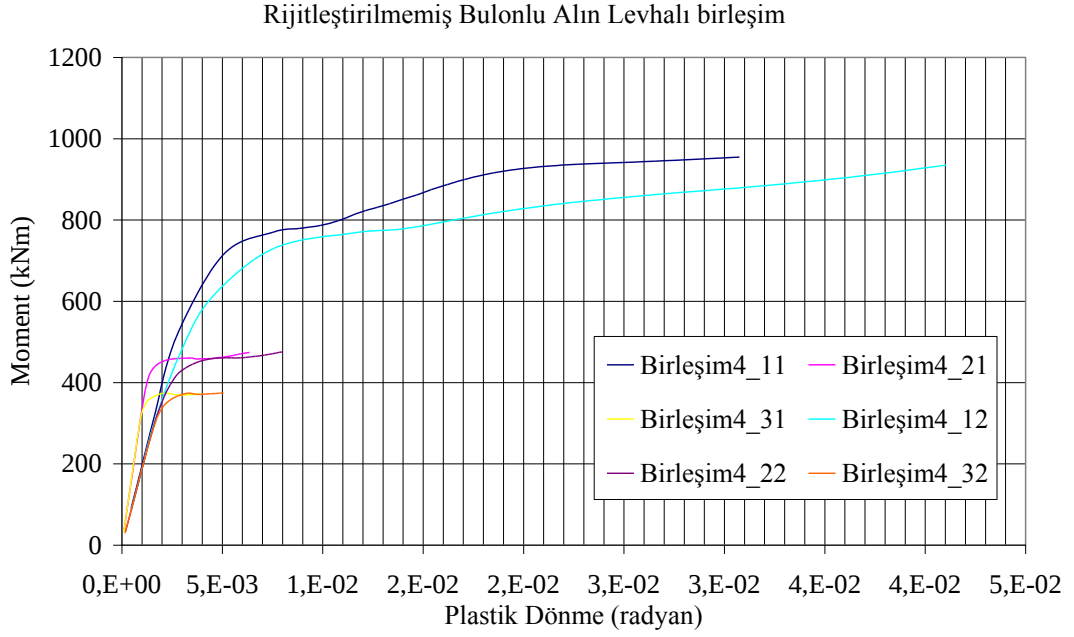
Sismik tasarım standartlarına göre, kiriş-kolon birleşimi, oluşacak plastik mafsallı kolon yüzeyinden uzaklaştıracak kadar rijit olmalıdır. Alın levhalı birleşimde, alın levhasının kalınlığı birleşimin davranışını büyük ölçüde etkiler. İnce alın levhasının kullanılması durumunda bulonların tutmadığı noktalarda alın levhasında açılmalar olabilir. Bu etkinin en büyük olduğu bölge, kiriş başlığıyla gövdesinin birleştiği bölgedir. Bu etkinin sebep olduğu şekil değiştirme Şekil 5.30’da açıkça görülmektedir.



Şekil 5.30: İnce alın levhasında görülen açılma

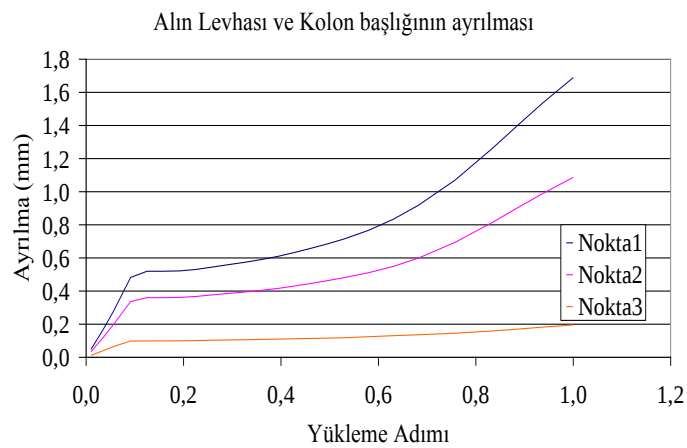
Bu sebeple, kullanılan alın levhası kolon başlığıyla aynı kalınlıkta, yani rijit seçilmiştir. Alın levhası ile panel bölgesi takviye levhası aynı yüksekliğe sahiptir.

Şekil 5.31’de bu birleşim tipiyle yapılan analizlerden elde edilen moment-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.31: Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimde görülen moment-plastik dönme eğrileri

Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim kullanılarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsall oluşumu Şekil 5.31’de görülmektedir. Birleşim4_11 numunesi küçük farkla da olsa 0.03 radyan plastik dönme sınırını geçmiştir. Daha önceki birleşim tiplerinde olduğu gibi bu birleşim tipinde de Kiriş 1 ile Kolon 2’nin kullanılmasıyla oluşturulan birleşim panel bölgesinde oluşan aşırı şekil değiştirme sonucu göçme durumuna ulaşmıştır. Kiriş 2 ve kiriş 3 ile oluşturulan birleşimler ise basınç başlığının yerel burkulması sonucu göçme durumuna ulaşmıştır.

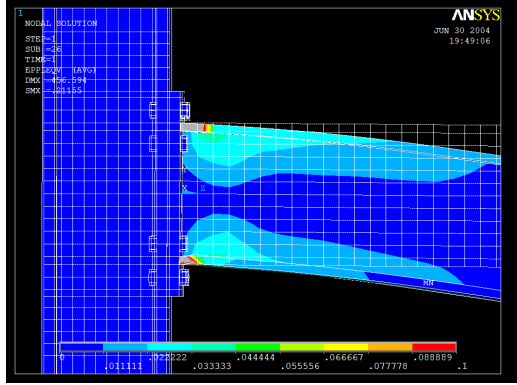


Şekil 5.32: Birleşim4_11’de alın levhasıyla kolon başlığı arasında oluşan ayrılma

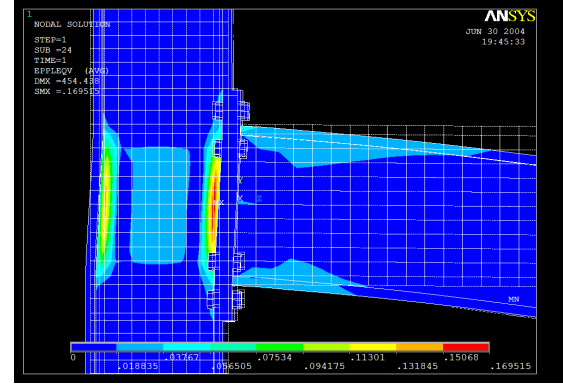
Yeterli plastik dönme davranışı gösteren Birleşim4_11 numunesinde, alın levhası ile kolon başlığı arasında oluşan ayrılma küçük mertebelerde kalmıştır. Ayrılmanın

küçük olmasının sebebi, kullanılan kalın alın levhasıdır. Ayrılmanın az olması sonucu bu bölgede plastikleşme oluşmamıştır ve plastik mafsallardan uzaklaştırılmıştır. Şekil 5.32 de, alın levhasıyla kolon başlığı arasındaki ayrılma etkisi 3 adet düğüm noktasında incelenmiştir. Kiriş gövdesine yaklaştıkça ayrılma artmaktadır.

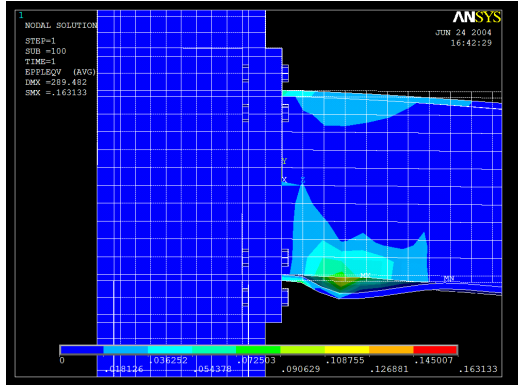
Şekil 5.33’de Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim için yapılan analizlerden elde edilen plastik uzama şekilleri gösterilmiştir.



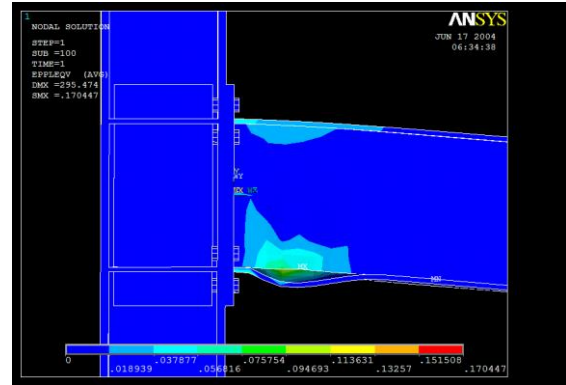
Birleşim4_11



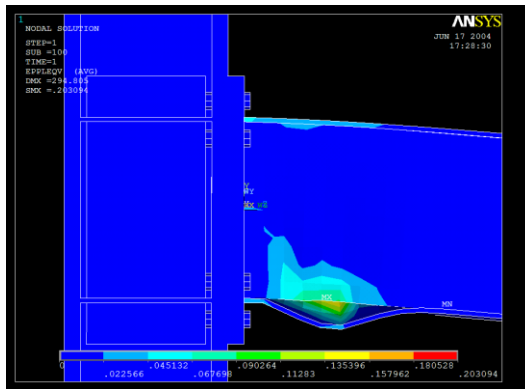
Birleşim4_12



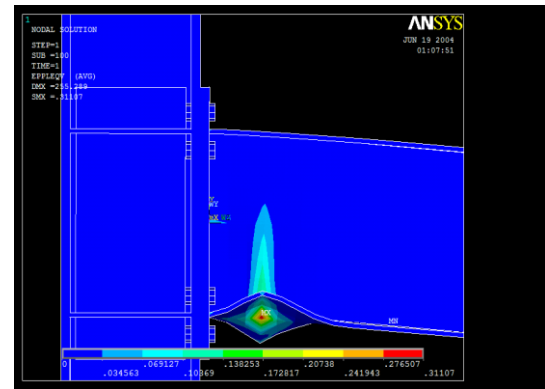
Birleşim4_21



Birleşim4_22

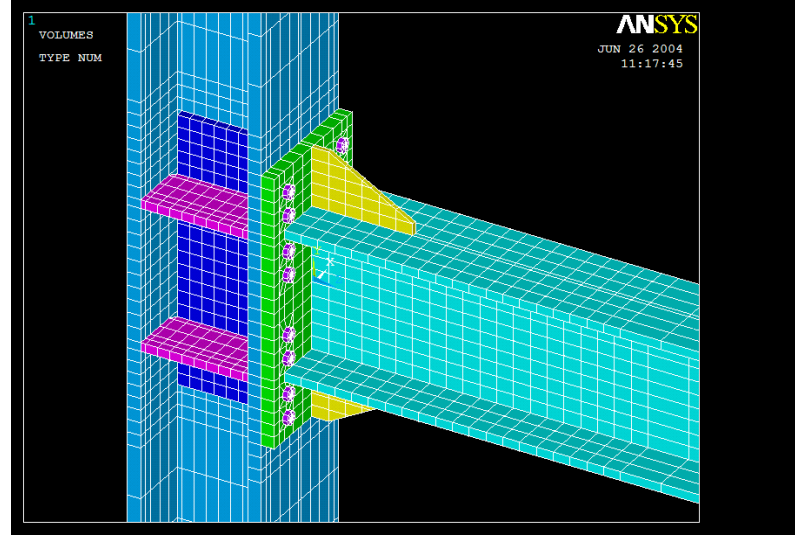


Birleşim4_31



5.5.5. Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim

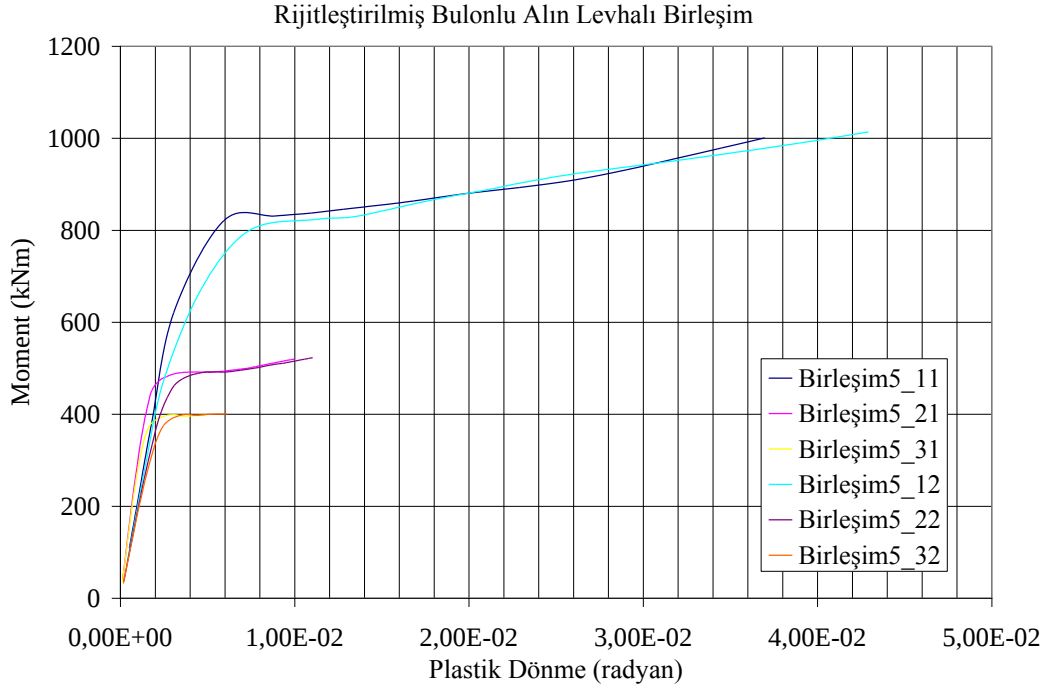
Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim, Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimin kiriş başlığının rijitleştirme levhalarıyla güçlendirilmesiyle oluşur (Şekil 3.16). Rijitleştirme levhası dışındaki diğer bir farkta, kiriş başlığının altında ve üstünde bir yerine iki sıra bulon bulunuyor olmasıdır. Birleşimin geometrisi Şekil 5.34'te görülmektedir.



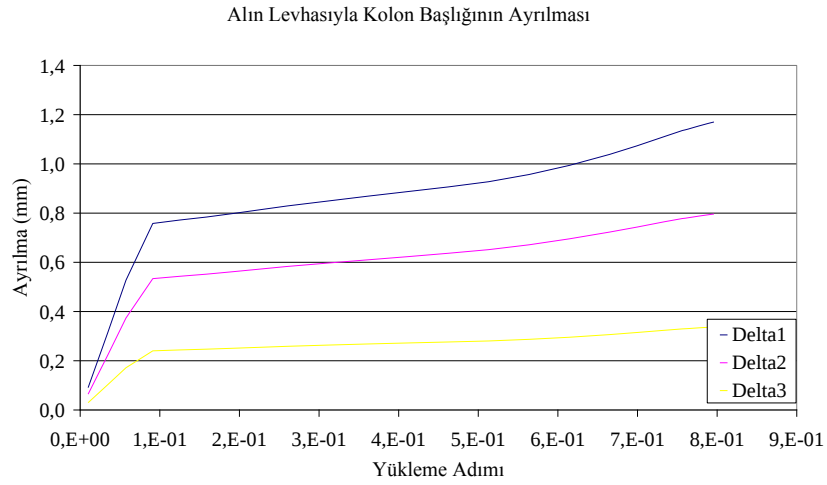
Şekil 5.34: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı Birleşim

Tıpkı Birleşim4 numunelerinde olduğu gibi Birleşim5 numunelerinde de kalın alın levhalı birleşim kullanılmıştır. İnce alın levhası kullanılması durumunda Şekil 5.30'da görülen ayrılma etkisi bu birleşim için de geçerlidir. Şekil 5.35'de Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen moment-plastik dönme eğrileri yer almaktadır.

Birleşim5_11 numunesi, 0.037 radyan plastik dönme yaparak sünek bir davranış göstermiştir. Birleşim5_12 numunesi 0.04 radyan plastik dönme değerini geçmiştir fakat diğer birleşimlerde olduğu gibi panel bölgesinde aşırı uzama yığılmaları oluşmuştur. Yine de, bu numunenin kirişi, 0.024 radyan gibi azımsanmayacak bir plastik dönme yapmıştır. Bu haliyle bu numune kirişin eğilme akmasıyla panel bölgesinin kayma akması halini dengelemeye yakındır. Şekil 5.36'da alın levhasıyla kolon başlığı arasındaki ayrılma gösterilmiştir. Ayrılma küçük boyutta kalmıştır ve kiriş gövdesine yaklaştıkça, fark artmaktadır. Bu grafikte görülen eğriler, alınan belirli noktalarda, Şekil 5-34'te görülen Z ekseninde, kolon başlığıyla alın levhası arasındaki yer değiştirme farkını ifade eder.



Şekil 5.35: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimde görülen moment-plastik dönme eğrileri

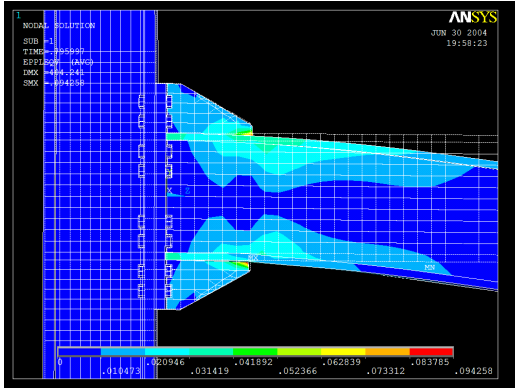


Şekil 5.36: Birleşim5_11'de alın levhasıyla kolon başlığı arasında oluşan ayrılma

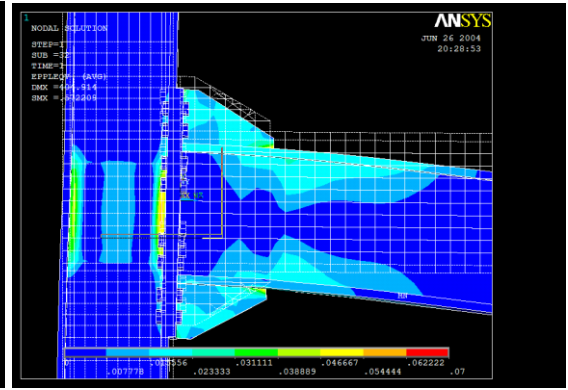
Şekil 5.37'de Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhalı birleşim tipi kullanılarak hazırlanan numunelerden elde edilen plastikleşme şekilleri görülmektedir. Şekillerden, rijitleştirme levhasının birleşim davranışı üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Plastik mafsal, rijitleştirme levhasının dışına itilmiş olmasına rağmen, kolon yüzeyine daha yakın olan bir kesitte de gerilmeler yoğunlaşmıştır. Kirişin, plastikleşen kısmı oldukça uzundur. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da, zayıf kolon-kuvvetli kiriş davranışı göstermesi beklenen Birleşim5_12 numunesinde, kirişin de önemli ölçüde plastikleştiğidir. Rijitleştirme levhalarının

kullanılmış olması, birleşimdeki, panel bölgesi kayma akması ve kirişteki eğilme akması mekanizmalarını dengeleyen bir geometri oluşturmuştur. Yine, Birleşim5_11 numunesinde, kolonda hiç plastikleşme oluşmaması da rijitleştirme levhalarının sebep olduğu bir durumdur.

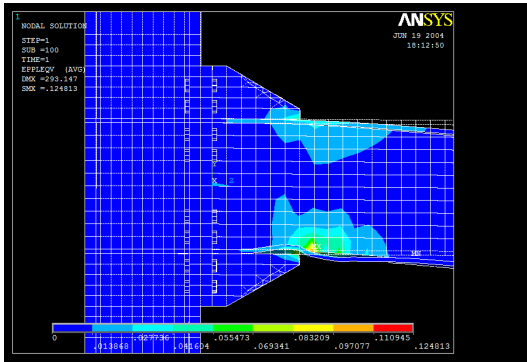
Daha zayıf kirişlerin kullanıldığı numunelerde, basınç başlığında, rijitleştirme levhalarının hemen bitiminde yerel burkulmalar oluşmuştur. Rijitleştirme levhaları nedeniyle kolonlarda plastikleşme oluşmadığından Kiriş 2 ve Kiriş 3 kullanılan birleşimlerde, kolonların farklı olmasının, davranışa belirgin bir etkisi olmamıştır.



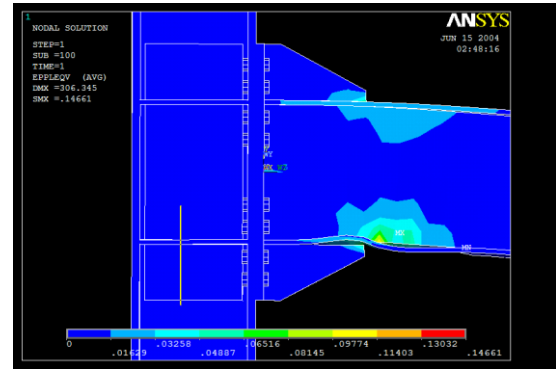
Birleşim5_11



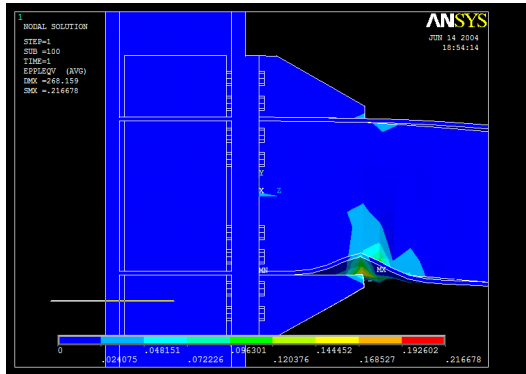
Birleşim5_12



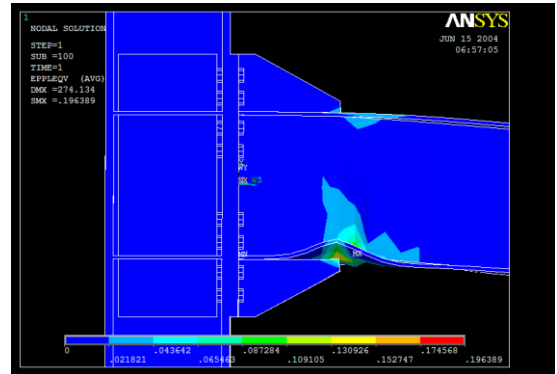
Birleşim5_21



Birleşim5_22



Birleşim5_31



Birleşim5_32

Şekil 5.37: Rijitleştirilmiş Bulonlu Alın Levhali birleşim tipini kullanarak hazırlanan numunelerde görülen plastik mafsall oluşumu

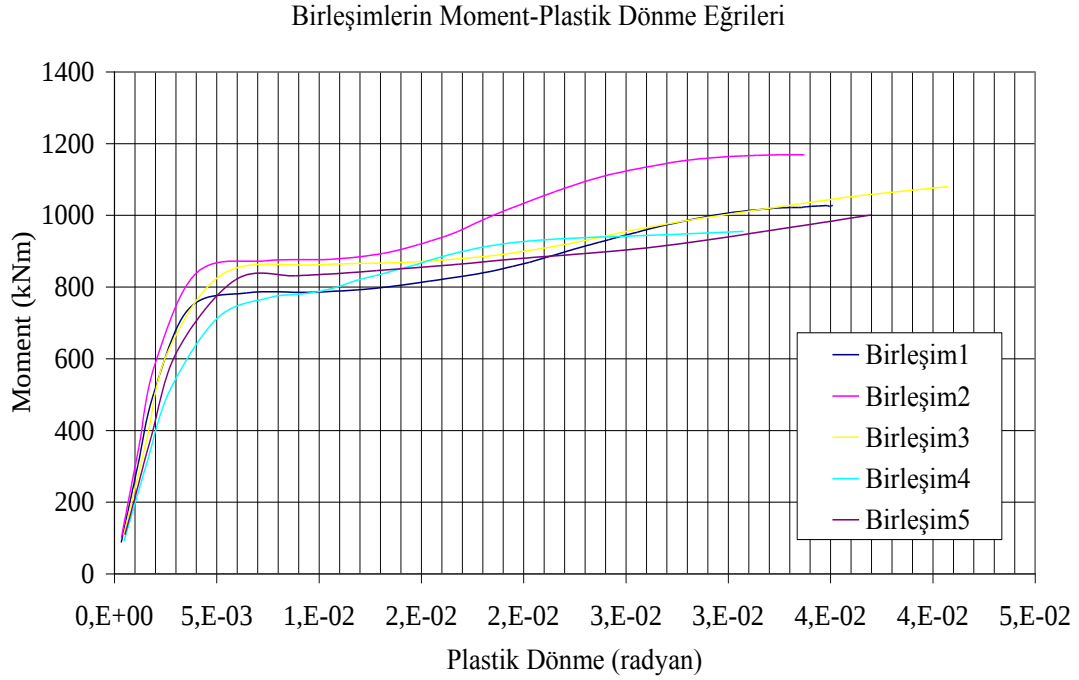
6. SONUÇLAR

Birleşim tiplerinin plastik dönme kapasitelerini belirlemek için Kiriş 1 ve Kolon 1'den oluşturulan birleşimler kullanılmıştır. Diğer birleşimler ise plastik dönme kapasitesine etkileyen faktörleri görmek ve daha iyi anlamak için kullanılmıştır. Yapılan çalışmaların ardından, seçilen birleşim tiplerinin, uygun kesitler kullanıldığında, hepsinin öngörülen plastik dönmeyi yaptığı görülmüştür. Bu birleşim tiplerinin, Amerika Birleşik Devletleri'nde, çok katlı yapı inşaatlarında yaygın olarak kullanılan kesitlerle deneyleri yapıp, gerekli plastik dönmenin sağlandığı daha önceki çalışmalarda gösterilmişti. Fakat, Avrupa'da ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan kesit tipleri ile ABD'de kullanılan kesit tipleri arasında farklar mevcuttur. ABD'de kullanılan birleşimler daha ağır ve özellikle kirişi daha rijit olan bir birleşimdir. Bu sebeple, birleşim, daha fazla panel bölgesi akması yapar. Eurocode'un sınıflama yöntemine göre seçilmiş olan üç kiriş kesitinden, bu çalışmada kullanılan Kiriş 1 ve Kolon 1'den teşkil olan kesit ise plastikleşmeyi kiriş üzerinde oluşturma amacını taşımaktadır.

6.1. MOMENT-PLASTİK DÖNME EĞRİLERİ

Analizi yapılan birleşimlerden Başlık Levhası Kaynaklı ve Başlığı kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşimler kaynakla teşkil edilmiş Tam Moment Aktaran birleşimlerdir. Başlık Levhası Bulonlu ve Bulonlu Alın Levhalı birleşimler ise Kısmi Moment Aktaran birleşim sınıfına girer. Bu durumda, Tam Moment Aktaran birleşimlerin, elastik bölgedeki M/θ_p oranlarının diğerlerinden daha büyük olması beklenir. Tam Moment Aktaran birleşimlerden de, Başlık Levhası Kaynaklı birleşimin kiriş başlığının bir kısmı takviye edildiğinden daha rijit bir davranış göstermesi beklenir. Bu durum, Şekil 6.1' de açıkça görülmektedir.

Şekil 6.1'de her birleşim tipine ait olan moment-plastik dönme eğrileri görülmektedir.



Şekil 6.1: Birleşimlerin Moment-Plastik Dönme eğrileri

6.2. PLASTİK MAFSALIN YERİ

Yapılan analizler sonucunda, Başlık Levhali birleşimlerde (Birleşim2 ve Birleşim3), bulunan plastik mafsalları yerinde FEMA raporları arasında uyumsuzluk görülmüştür. Fema raporlarının öngördüğü plastik mafsalları yerleri ve bu çalışmada bulunan plastik mafsalları yerleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

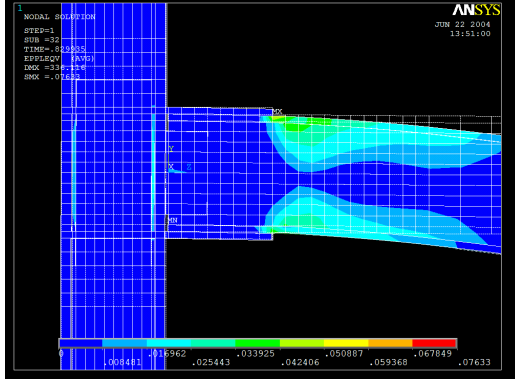
Tablo 6.1: Birleşimlerde Oluşan Plastik Mafsalların Yerleri

Birleşim No	FEMA Raporları	Bulunan değer
Birleşim 1	coh/2 + beh/2	coh/2 + beh/2
Birleşim 2	coh/2 + fph	coh/2 + fph + beh/3
Birleşim 3	coh/2 + fph	coh/2 + fph + beh/3
Birleşim 4	coh/2+ept+beh/3	coh/2+ept+beh/3
Birleşim 5	coh/2+ept+sph	coh/2+ept+sph

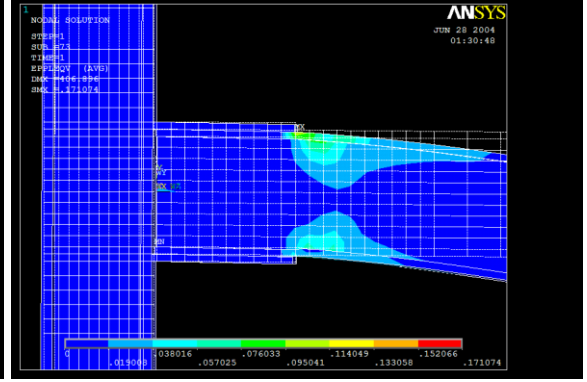
Tablo 6.1 ile ilgili parametreler, Şekil 3.2, Şekil 3.5, Şekil3.9, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da gösterilmiştir.

Değişik başlık levhası uzunluklarıyla yapılan analizlerde Başlık Levhali birleşimlerde plastik mafsalları, hemen başlık levhası bitiminde değil; kiriş yüksekliğinin üçte biri kadar ötelenmiş olduğu görüldü. Şekil 6.2’de, Numune7,

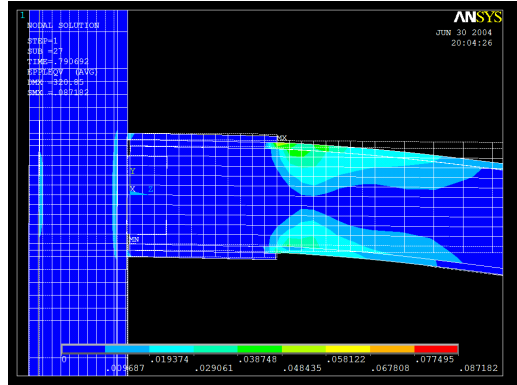
Numune8 ve Numune 9 birleşimleri görülüyor. Bu birleşimlerin başlık levhası uzunluğu sırasıyla 41cm, 51cm ve 61 cm dir. Şekillerden görüldüğü üzere, her üç modelde de başlık levhasından itibaren üç adet sonlu eleman sonra plastik mafsall oluşmuştur. Kiriş gövdesindeki sonlu elemanların uzunluğu 5cm, ve kiriş yüksekliği 45cm olduğuna göre, bu sonuç şekillerden görülebilmektedir.



Numune 7



Numune 8



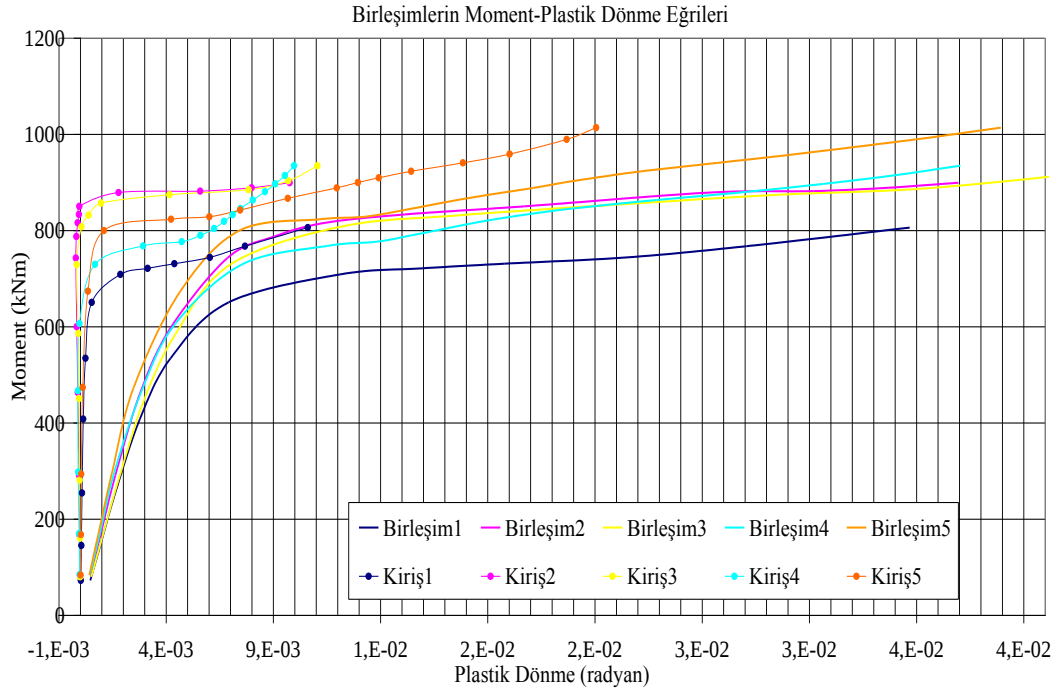
Numune 9

Şekil 6.2: Başlık Levhası Kaynaklı birleşimde plastik mafsall yeri

6.3. ZAYIF KOLON-KUVVETLİ KİRİŞ DAVRANIŞI

Kiriş 1 ve Kolon 2 kullanılan birleşim, zayıf kolon-kuvvetli kiriş davranışını incelemek için hazırlanmıştır. Bu numunelerin hepsinde de panel bölgesinde kayma akması olmuş ve kiriş çok az eğilme akması gerçekleştirebilmiştir. Şekil 6.3'te tüm birleşimlerden elde edilen moment-plastik dönme eğrileri hem birleşim için hem de sadece kiriş için çizilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere sadece panel bölgesinde rijitleştiriciler bulunan Birleşim5 numunesi tatmin edici sonuçlar vermiştir. Diğer tüm birleşimlerde, kirişin, toplam plastik dönmeye katkısı %25'in altında kalmıştır. Birleşim 5 de ise bu değer %50'nin üzerindedir. Bu durumda, daha dengeli akma

mekanizması için rijitleştirme levhalarından yararlanmak geçerli bir yoldur. Bu şekilde panel bölgesinin kayma akmasından da faydalanmak mümkündür.

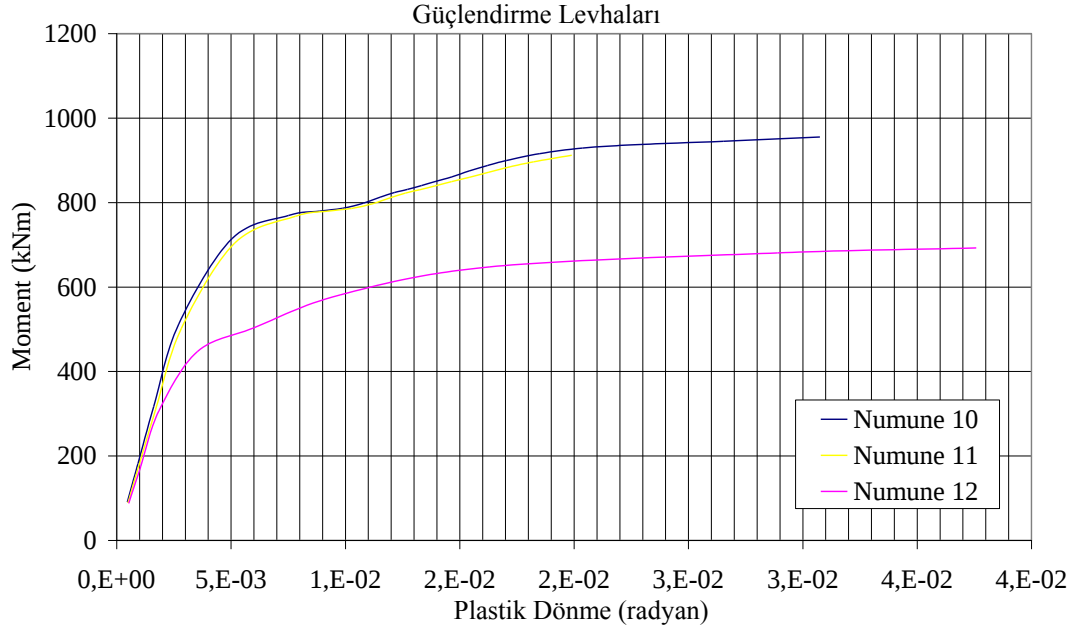


Şekil 6.3: Zayıf Kolon-Kuvvetli Kiriş davranışı

6.4. ALIN, SÜREKLİLİK VE PANEL BÖLGESİ TAKVİYE LEVHALARI

Kolon-kiriş birleşimlerinin önemli elemanlarından biri de alın, süreklilik ve panel bölgesi takviye levhalarıdır. Bu levhaların varlığı ya da boyutları bir birleşimin tüm davranışını etkileyebilir. Bu açıdan davranışlarını anlamak için analizler yapılmıştır.

Panel bölgesi akma levhasıyla ilgili yapılan analizlere ait moment-plastik dönme eğrisi Şekil 5.13'te verilmişti. Bu eğri incelenecek olursa, panel bölgesi takviye levhasının kolon gövdesinin yarısı olarak seçildiği Numune 5 birleşiminin elastik bölgedeki M/θ_p oranının oldukça büyük olduğu, belirli bir akma sahanlığı olmadığı görülebilir. Bunun yanısıra plastik dönme değerlerine karşılık gelen moment değerleri Numune 1'e göre daha düşük olduğu görülebilir. Birleşimin bu hali, Tam Moment Aktaran bir birleşim olan Başlığı Kaynaklı-Gövdesi Kaynaklı birleşimin davranışını Kısmi Moment Aktaran birleşim davranışına yaklaştırdığını söylemek mümkündür. Bu tesbit üzerine, daha önceden planlanmış olmasına rağmen aynı analizler Kısmi Moment Aktaran bir birleşim olan Rijitleştirilmemiş Bulonlu Alın Levhalı birleşimiyle tekrarlanmıştır. Bu analizlerin sonuçları Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4: Alın ve Panel bölgesi güçlendirme levhalarının plastik dönmeye etkileri

Bu analizlerde kullanılan Numune 10 birleşimi, Rijitleştirilmemiş Alın Levhalı birleşimin gösterdiği davranıştır (Şekil 5.31) ve kontrol birleşimi olarak kullanılacaktır. Numune 11’de alın levhası kalınlığı, kontrol birleşiminde kullanılan levhanın yarı kalınlığı olarak seçilmiştir. Numune 12 de ise, panel bölgesi güçlendirme levhası, kontrol numunesinde kullanılan levha kalınlığının yarısı olarak seçilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere, Numune 10 ve Numune 11’in davranışları, Numune 11 alın levhasının aşırı şekil değiştirmesi sonucu göçme durumuna ulaşınca kadar birbirine çok yakındır. Numune 12 ise tıpkı Tam Moment Aktaran birleşimde yaptığı etkiye benzeyen bir etkide bulunmuştur ve akma sahanlığını ve moment taşıma kapasitesini azaltmıştır. Böylece, alın levhasının, göçme durumunu ortadan kaldırıp birleşimin yük taşımaya devam etmesini sağlamak açısından; panel bölgesi takviye levhasının ise birleşimin moment taşıma ve rijitliğini artırma açısından büyük önemi olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Roeder C.W.**, 2001. Connection Performance State of the Art Report, FEMA Rep. No. 355D, *Federal Emergency Management Agency*, Washington D.C.
- [2] **Galambos, T.V., and Lin, F.J. and Johnston B.G.**, 1996. Basic Steel Design with LRFD, pp. 136-138, Pearson Education, New Jersey.
- [3] **Deren, H., Uzgider E. ve Piroğlu, F.**, 2003. Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.
- [4] **Roeder, C.W.**, 2002. Connection Performance for Seismic Design of Steel Moment Frames, *J. Struct. Engt.*, **128**, 517-525.
- [5] **ANSYS 7.0**, 2000. Documentation, *ANSYS Inc.*
- [6] **El-Tawil S., Mikesell T., Vidarsson E., Kunnath S.**, 1998. Strength and ductility of fr welded-bolted connections, Report No. SAC/BD-98/01, *SAC Joint Venture*, Sacramento, California.
- [7] **Nukala, P.K.**, 1997. Three-Dimensional Second Order Inelastic Analysis of Steel Frames, *PhD Thesis*, Purdue University.
- [8] **DIN 18800**, 1990. Structural Steelwork Design and Construction, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin.
- [9] **Eurocode 3**, 1992. Design of Steel Structures. Part 1.1: Genaral Rules and Rules for Buildinds, *European Prestandart*.

ÖZGEÇMİŞ

Fırat Çıngı, 1979 yılında Van'da doğmuştur. İlköğrenimini Bolu'da tamamlayıp orta öğrenimine Bolu İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nde başlamıştır ve Ankara Gazi Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazanmıştır. Lisans eğitimini 2001 yılında tamamladıktan sonra aynı yıl, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Yapı Mühendisliği Anabilimdalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2003 yılı Ocak ayından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ahşap ve Çelik Yapılar Kürsüsünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.