

Rijitlik Levhalı Alın Levhalarında Akma Çizgileri ve Hesap Yöntemleri

Fatih Yılmaz^{1*}, Yasin Onuralp Özkılıç^{2*}

¹İnşaat Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği / Mühendislik Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

(* fatihyilmazfthylmz@gmail.com) Başlıca yazarın mail adresi

Özet – Önceleri kullanılan yöntemler; statik ve prying kuvvetleri barındıran varsayımlara dayanıyordu. Yeni denklemler geliştirmek için sonlu elemanlar analizi ve akma çizgisi teorisine dayanmaktadır. Akma çizgisi yöntemi, rijitlik levhalı alın levha bağlantıları da dahil olmak üzere çeşitli yapısal elemanların analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Rijitlik levhalı alın levha bağlantıları için akma çizgisi yöntemi, alın levhada ve bağlı kiriş veya kolonlarda oluşan akma çizgilerinin analizini içerir. Bu akma çizgileri, birleşimin göçmeye yakın alanlarını gösterir. Kritik akma çizgilerini belirleyerek, göçme meydana gelmeden önce birleşimin dayanabileceği maksimum yük hesaplanabilir. Bu tür bağlantılar için farklı yükleme şartlarında davranışını analiz etmede akma çizgileri yöntemi etkili olduğunu belirlenmiştir. Bu çalışmada akma çizgisinin ve hesap yöntemlerinin rijitlik levhalı alın levhalı bağlantılarındaki önemini vurgulamak için araştırma yapılmıştır. Öncelikle yönetmeliklerde kullanılan esaslar incelenmiştir. Ayrıca bu tür bağlantılar hakkında literatürde yapılmış bazı deneysel, analitik ve numerik çalışmaların irdelenmiştir. Sonuç olarak akma çizgisi yöntemi bu tür bağlantılarda sık kullanılmaktadır.

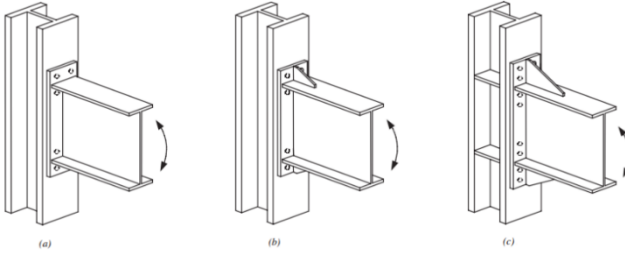
Anahtar Kelimeler – Alın Levhası, Çelik, Bağlantı, Rijitlik Levhası, Akma Çizgileri

I. GİRİŞ

Çelik yapıların sismik yükler altında iyi bir dayanım ve sünek bir davranış gösterdiği bilmekteydi. 1994'te gerçekleşen Northridge depreminden sonra hasarlı moment taşıyan çelik çerçeveli yapılar incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda çelik yapıların beklenen aksine kiriş kolon bağlantılarının gevrek bir şekilde kırılmalar gözlenmiştir. Moment taşıyan çelik çerçeveli yapılarda kolon-kiriş birleşim yerleri üzerinde araştırmalar yapılmış ve yönetmeliklerde yerini almıştır [1]. Moment aktaran birleşimlerden biri de alın levhalı birleşimlerdir. Alın levha moment bağlantıları, Amerika Birleşik Devletleri'nde öncelikle ön mühendisliği yapılmış endüstriyel binalarda kullanılmaktadır [2]. Uzatılmış alın levha moment bağlantıları, sismik moment dirençli çerçevelerdeki kiriş-kolon bağlantıları ve eksantrik çaprazlı çerçevelerdeki değiştirilebilir bağlantı-çerçeve bağlantıları dahil olmak üzere bir dizi uygulamada kullanılır [3]. Alın levhalı moment aktaran birleşimi, kirişin ucuna alın levhası kaynaklanarak diğer yapı elamanına yüksek

mukavemete sahip cıvatalarla birleşmesinden oluşur. Alın levhalı moment aktaran birleşim kiriş-kolon ya da kiriş-kiriş birleşimleri de olabilir. Alın levhalı moment aktaran birleşimler uzatılmış ve düz alın levhalı olmak üzere iki kısma ayrılır. Düz alın levhalı birleşimler de alın levhasının boyu kiriş yüksekliğine eşittir. Uzatılmış alın levhalı birleşimde ise, alın levhasının uzunluğu kirişin yüksekliğini aşarak uzatılmasını ifade eder. Bu birleşimlerin gerekliliğine göre alın levhası ile kirişin başlığı arasına rijitlik levhası (Şekil 1b,1c) ve kiriş başlıklarının hizasına kolon başlıklarının arasına süreklilik levhası (Şekil 1c) eklenerek kullanılabilir. Şekil 1.a'da 4 bulonlu rijitlik levhasız uzatılmış alın levhalı birleşim, şekil 1.b'de 4 bulonlu rijitlik levhalı uzatılmış alın levhalı birleşim, şekil 1.c'de ise 8 bulonlu rijitlik levhalı ve süreklilik levhalı uzatılmış alın levhalı birleşim görülmektedir. Alın levhalı moment birleşimleri kullanımı birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Sahada kurulum sırasında kaynak işçiliğini ortadan kaldırmakta ve her türlü iklim koşulunda saha montajını kolaylaştırmaktadır. Alın

levhalı birleşimlerin kullanıldığı taşıyıcı sistemlerin kurulumu kaynaklı birleşimden oluşturulmuş taşıyıcı sistemlere göre daha hızlı ve ekonomiktir. Kaynaklı birleşimlere göre daha az rijitliğe sahip olması sebebiyle deprem yükleri altında daha sünek davranış sergilerler. Çelik taşıyıcı sistemlerin analizinde kolon-kiriş mesnet davranışı rijit veya serbest olarak idealize edilir. Ancak gerçek mesnet davranışı bu iki sınır durum arasındadır. Son yıllarda alın levhalı birleşimlerin davranışını incelemek üzere deneysel ve analitik birçok araştırma yapılmıştır [4].



Şekil 1a,1b,1c. Uzatılmış Alın levhalı Moment Birleşimleri (AISC 358-10)

Akma çizgisi yöntemi ilk olarak beton döşemelerin dayanımını hesaplamak amacıyla geliştirildi. Bu yöntem temel olarak sanal çalışma yöntemine dayanmaktadır. Başarısızlık modellerini, diğer bir deyişle akma çizgilerini doğru bir şekilde belirlemek önemlidir. Hatalı akma çizgileri, akma çizgisinin uzunluğuna bağlı olarak güvenli ya da güvenli olmayan sonuçlara yol açabilir. Bu yöntem alın levhanın mukavemetinin hesaplanmasında kullanılır. Alın levha kırılması ve cıvata kırılması, alın levha bağlantısının ana göçme modlarıdır. Alın levha bağlantısının moment kapasitesinin tahmini, akma mekanizması için alın levha akma çizgileri tarafından üretilen sanal iş olarak hesaplanır [5].

Akma çizgileri yöntemi, nihai yük taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılan bir yapısal analiz tekniğidir ve malzemelerin kırılmadan önce plastik deformasyona uğradıklarını varsayarak, malzemelerin plastik davranışını dikkate alır.. Rijitlik levhalı alın levha bağlantıları bağlamında, rijitlik levhanın varlığını hesaba katarak alın levhanın mukavemetini değerlendirmek için akma çizgisi yöntemi kullanılır. Akma çizgisi yöntemini bu tür bağlantılarda uygularken, analiz hem alın levhadaki hem de rijitlik levhalarındaki akma çizgilerinin dikkate alınmasını içerir. Akma çizgileri, varsayılan göçme moduna ve kuvvet,

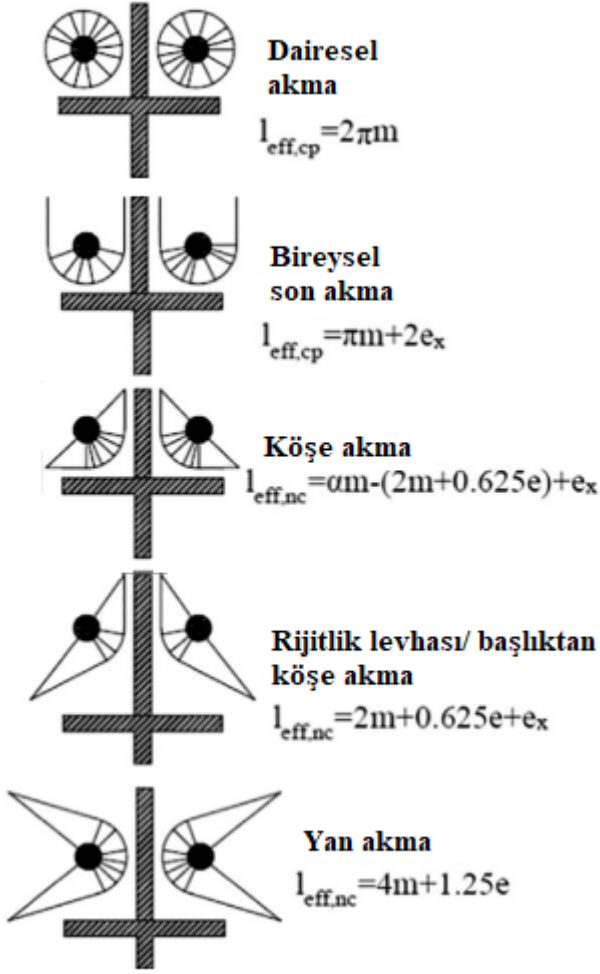
momentlerin dağılımına göre belirlenir. Akma çizgisi yöntemi, rijitlik levhalı alın levha bağlantısının yapısal bütünlüğünü ve güvenliğini sağlayarak, yük taşıma kapasitesinin ihtiyatlı bir tahminini sağlar. Tasarım sürecinde akma çizgisi yönteminin doğru şekilde uygulanmasını sağlamak için ilgili tasarım yönetmeliklerine ve kurallarına uymak önemlidir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, dört cıvatalı alın levha birleşimlerinde kullanılan alın levhanın plastik ve nihai eğilme mukavemetini hesaplamak için ifadeler geliştirmiştir. Yönetmeliklerde ve tasarım şartnamelerinde yaygın olarak kullanılan akma çizgisi hesaplamaları dikkate alınarak alın levhanın plastik mukavemetini hesaplamak için yöntemler sağlar. Daha önce yapılan çalışmalarda alın levhanın nihai mukavemetinin gerinim sertleşmesi nedeniyle plastik direncinden önemli ölçüde daha büyük olabileceğini göstermiştir. Bu bağlantıların kapasiteleri AISC Tasarım Yönergeleri ve EN1993-1-8 kullanılarak hesaplanmıştır. Bağlantıların plastik dirençlerinin AISC Tasarım Yönergeleri kullanılarak hesaplanan kapasitelerden ortalama %29 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Öte yandan EN1993-1-8 için test-tahmin oranlarının ortalama 1,08 olduğu görülmüştür. Nihai direncin hesaplanan plastik dirence oranları AISC ve Avrupa yaklaşımları için sırasıyla 2,07 ve 1,73'tür. AISC Yönergelerine uygun, plastik dayanım için değiştirilmiş tasarım ifadeleri önermek üzere sayısal bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca alın levhanın nihai mukavemeti ölçüldü. Rijitlik levhalı ve rijitlik levhasız T-profil modelleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edildi. Plastik ve nihai mukavemeti hesaplamak için akma çizgisi hesaplarına dayalı ifadeler geliştirilmiştir. Değerlendirmeler, önerilen ifadeler kullanıldığında plastik ve nihai mukavemet için test-tahmin edilen oranların ortalamalarının sırasıyla 1,06 ve 1,17 olduğunu göstermiştir.

Plastik moment mukavemeti, varsayılan tüm akma çizgileri boyunca akma çizgisi hesaplarının tamamen oluştuğu nokta olarak düşünülebilir.

Şekil 2'de rijitlik levhalı alın levhalı bağlantılarında cıvata sıraları için akma çizgileri modellerini göstermektedir [6].



Şekil 2. EN1993-1-8'e göre akma çizgisi desenleri [6]

Geometrik ve malzeme özelliklerinin T-profillerin mukavemeti üzerindeki etkileri sonlu elemanlar parametrik çalışması kullanılarak araştırılmıştır. Burada amaç, kodlanmış akma çizgisi hesaplamaların doğruluğunu değerlendirmek için her değişkenin etkisini incelemektir. Ayrıca faydalı ikinci dereceden etkiler ve gerinim setleşmesinin etkileri de incelenmiştir. Dört cıvatalı uzatılmış alın levha bağlantıları için akma çizgisi modellerini değerlendirmek amacıyla, aynı akma modellerinin T-profilleri için de geçerli olduğu kabul edilmiştir [6].

AISC Tasarım Yönergeleri tarafından önerilen akma çizgisi hesaplamalarına dayanarak, T-profillerin (P_{AISC}) gerilim altındaki direnci için aşağıdaki ifadeler türetilebilir:

$d_e \leq s$ Rijitlik levhalı T-profil için

$$P_{AISC} = F_y t_p^2 \left[\frac{b_p}{2} \left(\frac{1}{2s} + \frac{1}{p_f} \right) + \frac{2}{g} (d_e + p_f) \right]$$

$d_e \leq s$ Rijitlik levhalı T-profil için

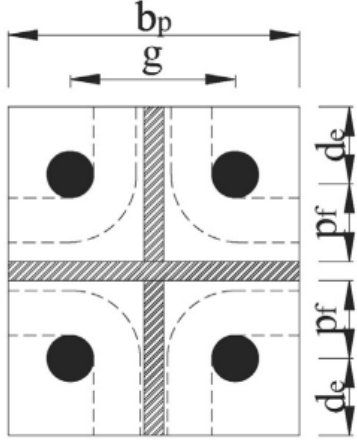
$$P_{AISC} = F_y t_p^2 \left[\frac{b_p}{2} \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_f} \right) + \frac{2}{g} (s + p_f) \right]$$

Sonuçlar, plastik direnci hesaplamak için kullanılan akma çizgisi mekanizmasının, 15 durumun ortalaması bire yakın olduğundan kapasiteye ilişkin iyi tahminler sağladığını göstermektedir. Öte yandan, tahminlerin standart sapmasının oldukça yüksek olması ve bazı durumlarda birden küçük oranlara sahip olması, akma çizgisi mekanizmasının ihtiyatlı olmadığını göstermektedir[6].

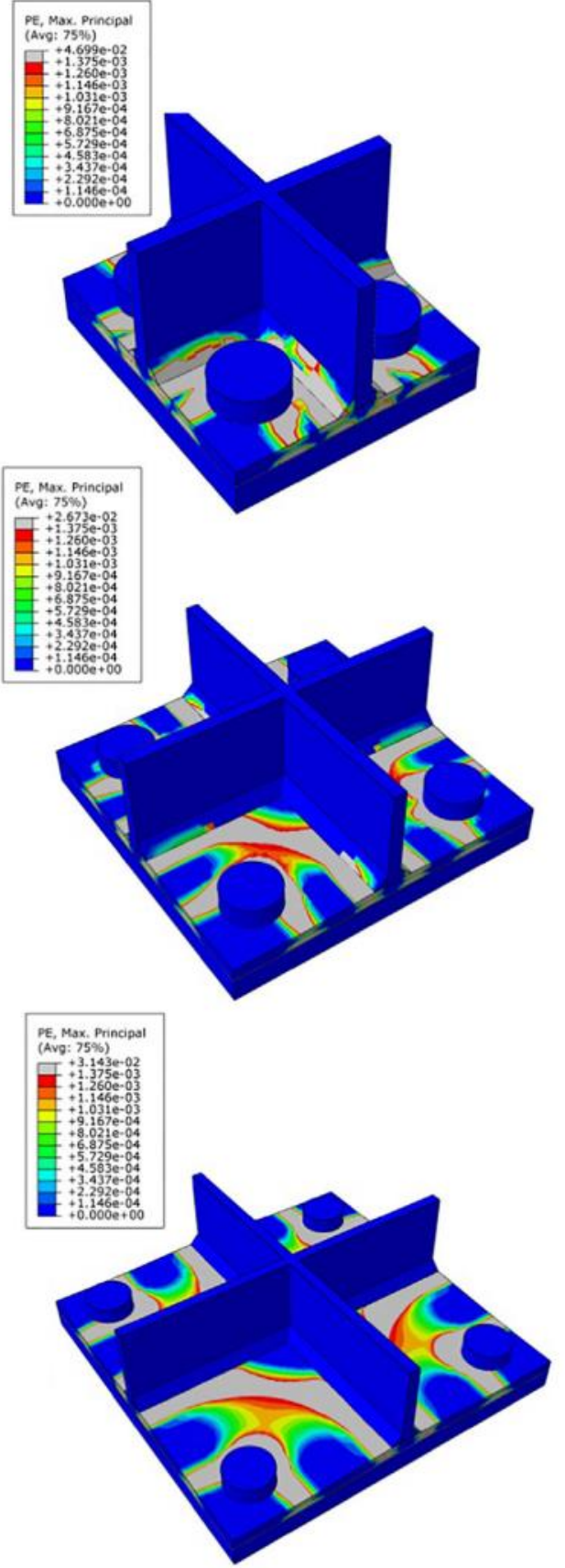
Oranların 0,99 ile 1,01 arasında değişmesi, kenar mesafesinin akma çizgisi mekanizması üzerinde derin bir etkisinin olmadığını göstermektedir[6].

Bu gözlemlere dayanarak, Şekil 3'te gösterilen rijitlik levhalı T-profil için yeni bir akma çizgisi modeli önerilmiştir. Bu akma çizgisi modeli, cıvata etrafındaki dairesel bir yoldan ve biri gövdeye, diğeri rijitlik levhasına paralel olan iki doğrusal yoldan oluşur. Sonlu eleman analizinden elde edilen akma modelleri Şekil 4'te verilmiştir; burada bu modeller önerilen akma modelini doğrulamaktadır. Rijitlik levhalı T-profillerin değiştirilmiş kapasitesi ($P_{MODIFIED}$) şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{MODIFIED} = F_y t_p^2 \left[\frac{4d_e}{g - d_w - t_s} + \frac{(b_p - g)}{p_f - 0.5d_w} + \pi \right]$$



Şekil 3. Rijitlik levhalı T-profiller için önerilen akma modeli [6].



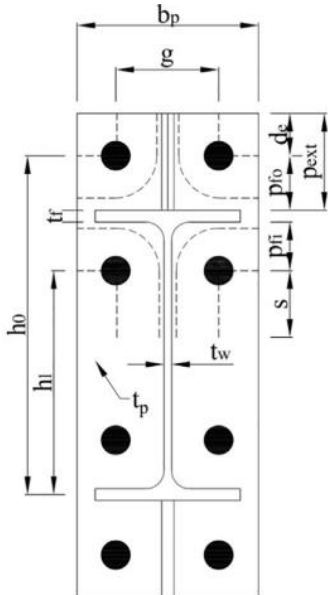
Şekil 4. Rijitlik levhalı T-profillerin akma desenleri [6]

T-profillerin davranışını inceleyerek elde edilen önerilen akma modelleri, uzatılmış alın levha bağlantılarında kullanılan alın levhanın kapasitesi için ifadeler geliştirmek üzere genişletilebilir. Önerilen akma çizgisi mekanizmaları Şekil 5'te verilmiştir. Bu hesaplamalara dayanarak alın levhanın gerekli kalınlığını hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$t_{p,reqd} = \sqrt{\frac{M_{reqd}}{\Phi_b \Omega_{ov} F_{py} Y_{MOD}}}$$

Burada Ω_{ov} gerinim sertleşmesinden kaynaklanan aşırı dayanımdır. Statik yüklere ve dinamik yüklere maruz kalan bağlantılar için Ω_{ov} sırasıyla 1,5 ve 1,0 olarak alınmalıdır. Y_{MOD} , aşağıdaki şekilde ifade edilen değiştirilmiş akma çizgisi mekanizması parametresidir:

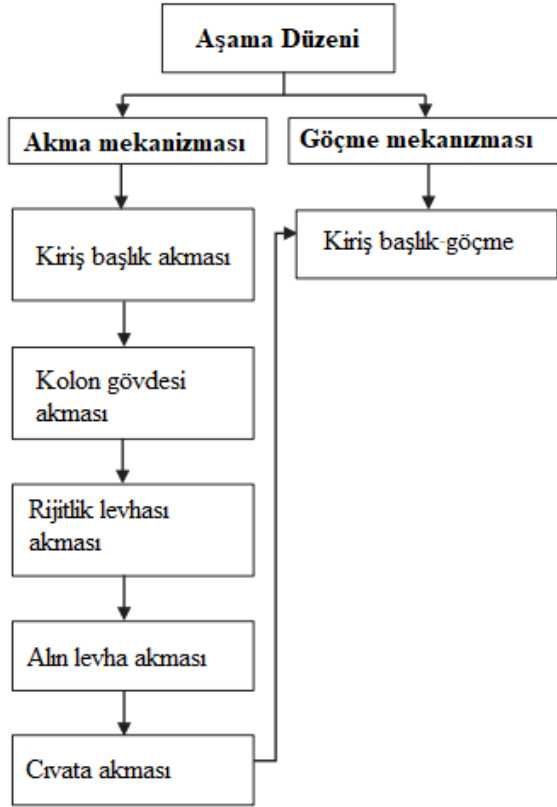
$$Y_{MOD} = h_0 \left[\frac{4d_e}{g - d_w - t_s} + \frac{(b_p - g)}{p_f - 0.5d_w} + \pi \right] + h_1 \left[\frac{4s}{g - d_w - t_s} + \frac{(b_p - g)}{p_f - 0.5d_w} + \pi \right]$$



Şekil 5. Rijitlik levhalıda önerilen akma çizgisi [6]

III. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Bu makalede birincil ve ikincil akma çizgileri aşama düzeni bir şekilde düzenlenerek bağlantı göçme önceden tanımlanmış bir şekilde gerçekleşmesi sağlanarak 6 model geliştirilmiştir. Bu modellerin sonuçlarına dayanarak aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür. Halihazırda uygulanan tasarım yönetmeliklerinden Eurocode 3, rijitlik levhalı uzatılmış alın levha bağlantılarının tasarımını kabul etmezken, AISC yönetmeliği, bu tür bağlantı bileşenlerinin tasarımı için bazı şartnameler sağlar. AISC yönetmeliği, cıvatalı rijitlik levhalı alın levha birleşimlerinin tasarımı için bir yöntem sunmasına rağmen, tasarım yöntemi, akma hesaplamaları aşama düzeni sağlamadığı için büyük dönme kapasitesi elde etmekte başarısız olur. Bu yüke dayanıklı tasarım yöntemiyle kapasiteye ulaşılabilsede daha fazla süneklik garanti edilemez. Burada önerilen performansa dayalı tasarım yöntemi, bağlantıyı aşağıda Şekil 6'da gösterildiği gibi akma hesaplarının mukavemetlerinin artan aşama düzeninde tasarlayarak cıvatalı rijitlik levhalı alın levha birleşiminin sünekliğini ve enerji dağıtma kapasitesini artırabilir. Mevcut yüke dayanıklı tasarım yöntemiyle tanıtılan yeni yöntem sayesinde, performansa dayalı tasarım yönteminde üç doğrusal davranış yerine çift doğrusal bir davranış gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlardan, rijitlik levhalı alın levha birleşimiyle, rijitlik levhasız bir bağlantıyla karşılaştırıldığında, başlangıç dönme rijitliği, dönme kapasitesi ve süneklik açısından sırasıyla %13, %64 ve %14 iyileştirme elde edilebileceği açıktır. Ayrıca, aşama düzeni tasarım yöntemi kullanılarak yukarıda belirtilen parametreler, rijitlik levhalı alın levha birleşimleri için sırasıyla %6, %88 ve %35 oranında artırılabilir. Böylece, tanıtılan performansa dayalı tasarım yöntemi kullanılarak rijitlik levhalı alın levha birleşimlerinin performansında önemli bir artış elde edilebilir[7].



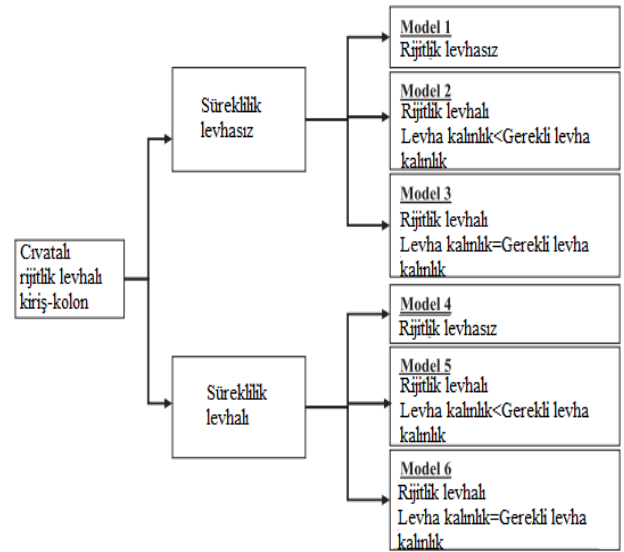
Şekil 6. Akma ve göçme mekanizmalarının aşama düzeni [7]

Bağlantıların akma çizgilerini ve hasar türlerini tanımlamak ve bunları hem süneklik hem de mukavemeti sağlamak için uygun bir sıraya koymak önemlidir. Bir tasarımcı, mukavemeti veya hem mukavemeti hem de sünekliği garanti altına almak üzere performans gereksinimine göre bağlantının akma çizgilerinin sırasını ve arıza modlarını seçebildiğinden, bu tasarım yönteminde performansa dayalı tasarım yöntemi adı verilir. Literatüre dayanarak, rijitlik levhalı alın levha birleşiminde ortaya çıkabilecek çeşitli akma çizgileri ve arıza modları sıralanabilir. Bu performansa dayalı tasarım yönteminde, verim çizgileri, birleşimin doluluk seviyelerini kıyaslayan birincil ve ikincil akma çizgileri olarak sınıflandırılabilir. Birincil akma çizgisi başlangıçta bağlantı mukavemetini ve sertliğini sağlamalıdır. Mukavemet ve rijitlik belirlendiğinde birleşim deformasyon kapasitesi, ikincil akma çizgilerinin konusu olan can güvenliği ve göçmeyi önleme performans seviyelerinde belirleyici bir faktör haline gelir. Bu nedenle, birincil akma çizgisinin ikincil çizgilerinden daha küçük mukavemetlerle ve tüm göçme sınıflandırılabilmesi gerekir [7].

Listelenen hasar modlarından, nihai hasar modu olarak kiriş başlığının kırılması arzu edilir. Çünkü

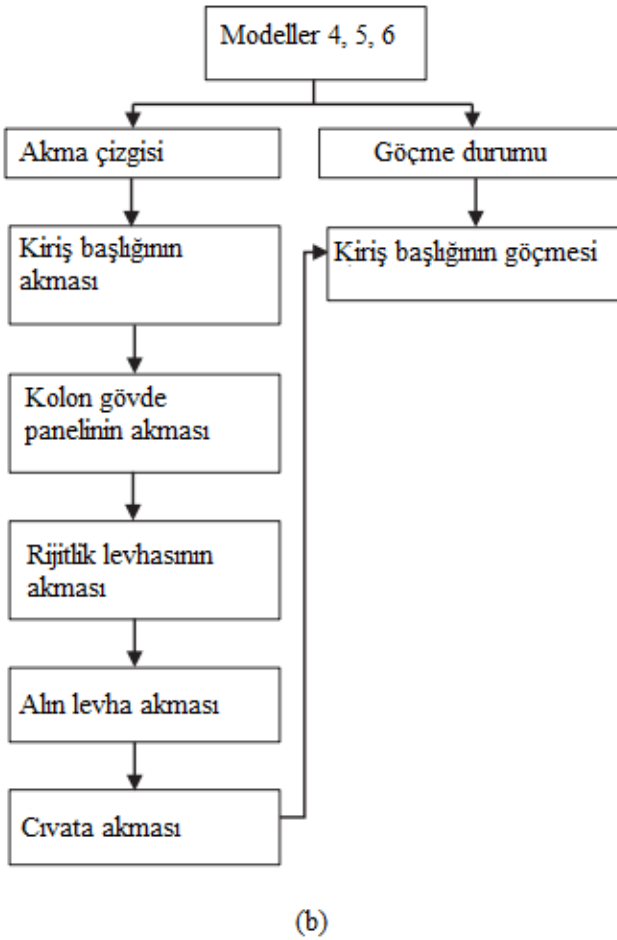
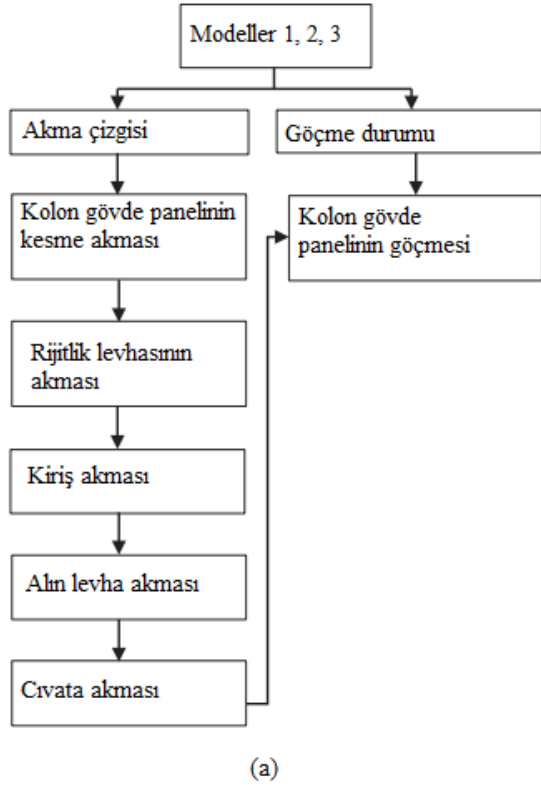
bu, birleşim bölgesi ve kolondan uzakta meydana gelen tek hasar modu olduğundan, güçlü kolon, güçlü bağlantı ve zayıf kiriş kavramı ile açık bir anlaşma yapılabilir. Böylece kiriş başlığının akması yönteminde en üst düzeye çıkarılabilir [7].

Birincil akma çizgisi seçiminin etkisini ve rijitlik levhalı cıvatalı uzatılmış alın levha kiriş-kolon birleşimin performansa dayalı tasarımının avantajlarını araştırmak için, Şekil 7'de gösterildiği gibi parametrik bir çalışma yapılarak altı model geliştirildi.



Şekil 7. Parametrik Çalışmanın Düzeni [7]

Performansa dayalı tasarım yöntemine göre, her birinde birincil akma çizgisi kiriş başlık akması ve kolon gövde panelinin kesme akması olarak değiştirilen iki ana model seti tasarlanmıştır. Model 1, 2 ve 3'te kolon gövde paneline süreklilik levhası dahil edilmemiştir ve bu nedenle birincil akma çizgisi, kolon gövde panelinin kesme akması olarak alınmıştır. Model 4, 5 ve 6'da birincil akma çizgisi, ek bir süreklilik levhası üretilerek kolon gövde panelinin mukavemetinin güçlendirilmesiyle kiriş başlığının akması olarak alınmıştır. 1,2,3 ve 4,5,6 modelleri için akma ve göçme mekanizmalarının sıralaması Şekil 8'de gösterilmektedir [7].

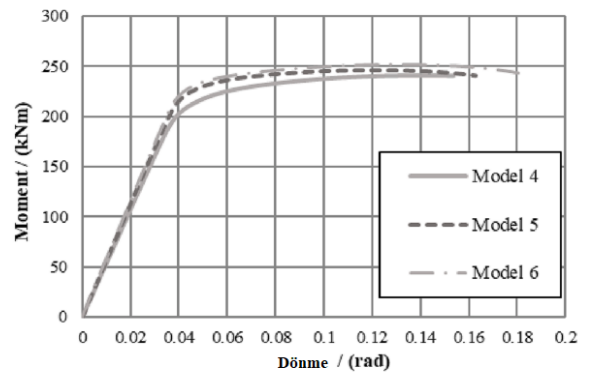
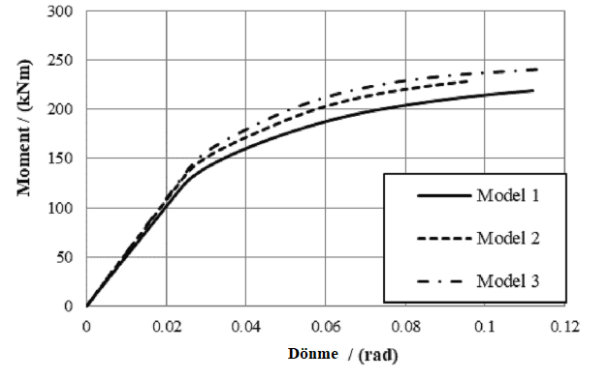


Şekil 8. İki durum için akma ve göçme mekanizmalarının sıralaması [7]

Rijitlik levhasının olmadığı model 1'de, tahmin edildiği gibi ilk olarak kolon gövde paneli akması, ardından kiriş akması ve alın levha akması gerçekleşmiştir. Sonuçta kolon gövde paneli cıvatalar akmadan arızalandı. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre, model 2 ve 3'ün ana akma mekanizması kolon gövde panelinin kesme akmasıdır. Daha sonra, sıralama yönteminde beklendiği gibi, kolon gövde panelinin kırılmasından önce, rijitlik levhası akması, kiriş akması, alın levha akması ve cıvata akması meydana gelmiştir [Şekil. 8a].

Benzer şekilde 4,5 ve 6 modellerinde de akma ve kopma mekanizmaları yöntemi düzende tahmin edildiği şekilde meydana gelmiştir [Şekil 8b]. Dolayısıyla, varsayılan akma ve göçme mekanizmaları yönteminin sonlu elemanlar analizine doğru bir şekilde yansıtıldığı açıktır.

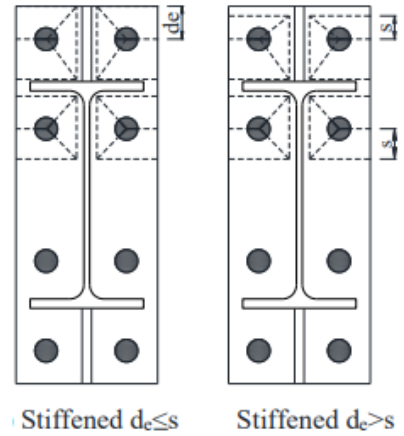
Birincil akma mekanizmasının etkisine rağmen, yeterli rijitlik levhalı birleşimin modelleri, rijitlik levhasız veya rijitlik levhasının kalınlığı yetersiz olanlardan daha iyi performans gösterdi. Şekil 9'da gösterilmiştir [7].



Şekil 9. Modellerin moment-dönme davranışının karşılaştırılması [7]

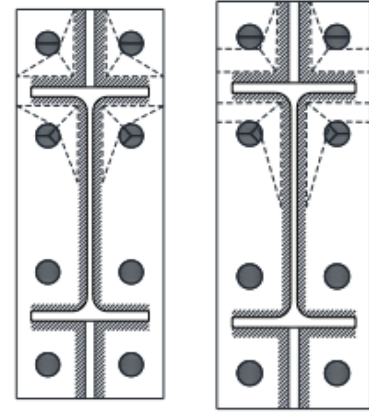
Bu çalışmada hem rijitlik levhalı hem de rijitlik levhasız uzatılmış alın levha birleşimleri için üç farklı akma mekanizması değerlendirilmiştir. Bu bağlamda doğrultusunda 14 farklı çalışmadan toplam 42 deneysel veri toplanmış ve sonlu elemanlar programı ile parametrik sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sayılan modeller uzatılmış alın levha birleşimlerinin davranışını tahmin etmede oldukça yeterlidir. Sonuç olarak, Rijitlik levhalı uzatılmış alın levhalı birleşimler için plastik moment kapasitesinin akma çizgisi mekanizmalarıyla tahmini, rijitlik levhasız olanlara göre daha doğrudur. Uzatılmış alın levha birleşiminin nihai kapasitesi, plastik moment kapasitesinin ortalama iki katına kadar çıkabilir. Alın levhanın kalınlığı azaldıkça, gerçek moment kapasitelerinin tahmin edilen moment kapasitelerine oranının artması yönünde genel bir eğilim gözlenmektedir ama yine de daha fazla çalışma yapılmalıdır. Daha önce yapılan çalışmada akma mekanizmasını kullanırken kirişin derinliğine dikkat edilmelidir. Kirişin derinliği nispeten yüksekse akma mekanizması kapasiteyi önemli ölçüde fazla tahmin eder. Sayısal sonuçlar, cıvataların, kirişlerin ve kolonların herhangi bir göçmesi veya akması ortadan kaldırıldığında kapasitenin eksik tahmin edilmesinin önemli ölçüde artabileceğini ortaya koymuştur. Srouji tarafından önerilen akma çizgisi mekanizması kapasiteyi olduğundan düşük tahmin etmektedir. Bu akma mekanizması şu anda AISC Yapısal Çelik Binalar için Sismik Hükümler tarafından 0,9 güvenlik faktörü ile kullanılmaktadır ve bu da onu daha muhafazakar hale getirmektedir. Şekil 10'da Akma çizgisi mekanizmasının hesaplanmasında kullanılan parametreleri Şekil 11'de ise daha önce çalışılmış akma çizgileri mekanizmalarını gösterilmiştir [5].

Srouji et al. (1983)



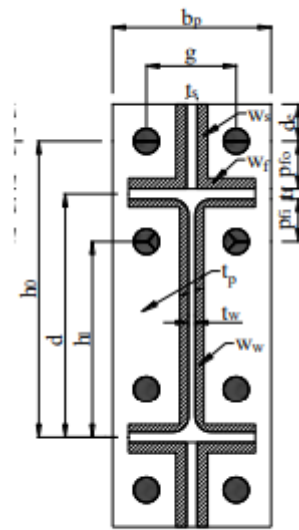
Stiffened Stiffened

Özkılıç (2020) Adey et al. (1997)



Stiffened Stiffened

Şekil 10. Önceki çalışmalarda kullanılan akma çizgisi mekanizmaları [5]



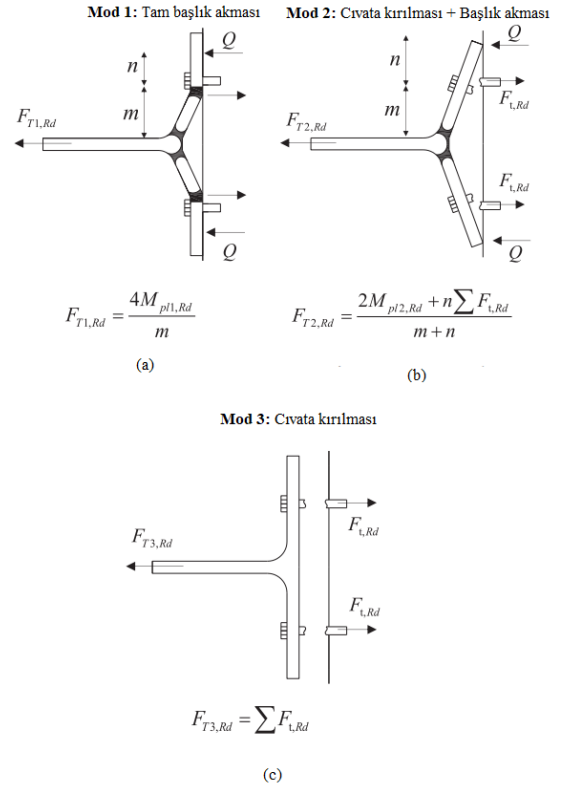
Stiffened

Şekil 11. Akma çizgisi mekanizmasının hesaplanmasında kullanılan parametre [5]

IV. NUMERİK ÇALIŞMALAR

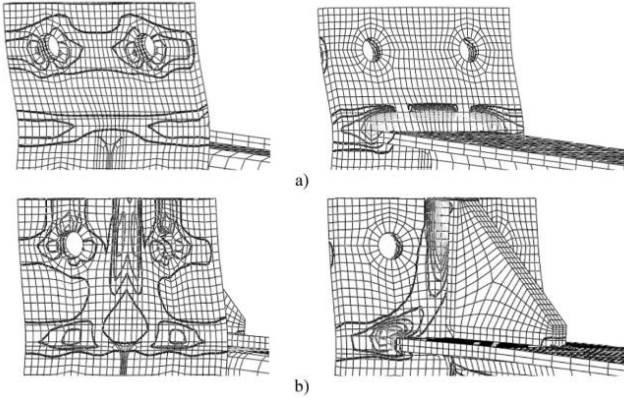
Bu çalışmada, uzatılmış alın levhalı bağlantılara yönelik tasarım kriterleri ve ilgili gereksinimler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak parametrik bir araştırma yapılmış ve farklı performans seviyeleri için ortak tepkiyi kontrol etmek amacıyla bir kapasite tasarım prosedürü önerilmiştir. Sonuç olarak, Eurocode 3 süneklik kriteri irdelenmiş ve Mod 3'ten kaçınmak ve sünek davranışı arttırmak için yeni tasarım yöntemi önerilmiştir. Eurocode 3 tarafından önerilen tasarım aşırı mukavemet faktörü, plastik deformasyonları önlemede etkili değildir fakat AISC tarafından önerilen aşırı dayanım faktörü, kirişte plastik kavramayı güçlendirmek ve bağlantının hasar görmesini önlemek için tatmin edicidir. Rijitlik levhaların varlığı, alın levha bağlantılarının mukavemetini ve rijitliğini önemli ölçüde artırır. Akma çizgisi deseni rijitlik levhasından önemli ölçüde etkilenir[8].

T-profil ile cıvata sırasındaki karşılık gelen eleman arasındaki mekanik eşdeğerlik, gerçek akma çizgisi modellerini (hem dairesel hem de dairesel olmayan) temsil eden etkin uzunluk (l_{eff}) aracılığıyla elde edilir. Bağlantının geometrisine bağlı olarak farklı akma çizgisi desenleri mümkündür; bunların her biri, eşdeğer T-profilinin etkin uzunluğu ile karakterize edilir. En kısa uzunluk minimum dayanıklılığa karşılık gelir ve o cıvata sırasının mukavemeti olarak alınır. Rijitlik levha mesafesi, eşdeğer T-profilinin mukavemetini önemli ölçüde etkiler. Rijitlik levhası ne kadar yakınsa T-profil mukavemeti de o kadar büyük olur. Tersine, rijitlik levhasız bir serbest kenara bitişik cıvatalar, eşdeğer T-profilinin daha kısa uzunluğuna, dolayısıyla daha küçük bir mukavemete neden olur. Her durumda Eurocode, bireysel cıvata sıraları ve bir grubun parçası olarak cıvata sıraları için eşdeğer T profillerinin etkili uzunluklarını sağlar. Etkin uzunluk belirlendikten sonra, T-profilin mukavemeti, minimum arıza modu 1 (Şekil 12a), mod 2 (Şekil 12b) ve mod 3 (Şekil 12c) olarak hesaplanabilir[8].

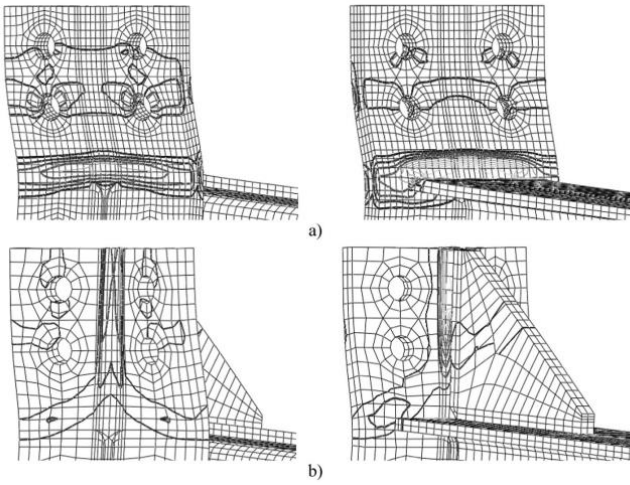


Şekil 12. T-profil göçme modları [8]

Şekil 13 ve 14, kiriş başlığının üzerinde sırasıyla bir ve iki cıvata sırasının çekme altında olduğu durum için %4'e eşit kiriş rotasyonunda elde edilen akma çizgisi modelini göstermektedir. Bir cıvata sırası yukarıya doğru, rijitlik levhasız birleşimin çekmesindeki kiriş başlığı üzerindeki eşdeğer T profili, kiriş tipi mod ile karakterize edilir (Şekil 13a), buna karşılık rijitlik levhalı alın levha birleşimleri için kiriş ve kiriş başlığı tarafından sınırlanan dairesel akma çizgileri gözlenir. (Şekil 13b). İki cıvatalı sıra konfigürasyonuna sahip durumlar benzer tepkiyi gösterir. Bir kez daha, T-profil mekanizmaları ve rijitlik levhasız alın levha birleşimi için ilgili grup etkisi Eurocode tahminleriyle tutarlıdır (Şekil 14a). Karşılık gelen rijitlik levhalı birleşimin plastik modu önemli ölçüde farklıdır (Şekil 14b). Bu durumda bile dairesel akma çizgisi kiriş ve kiriş başlığı tarafından sınırlanır ancak herhangi bir grup etkisi tanınmaz [8].



Şekil 13. Tek cıvata sıra düzeni için akma çizgileri a) Rijitlik levhasız b) Rijitlik levhalı [8]



Şekil 14. Çekme cıvatası sıraları için akma çizgileri a) Rijitlik levhasız b) Rijitlik levhalı [8]

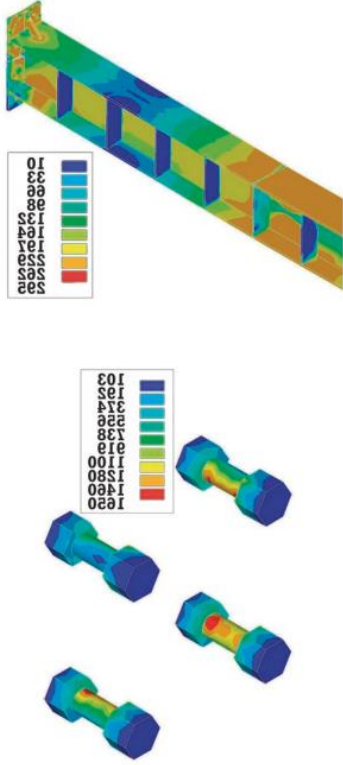
Bu çalışmada, uzun bağlantılara sahip dışmerkez çaprazlı çerçevelerde kolon birleşimleri olarak kullanılan uzatılmış rijitlik levhalı alın levha birleşimlerinin performansı sayısal olarak değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar modellerinin deforme olmuş şeklinin ve testlere verilen moment-dönme tepkisinin karşılaştırılması, modeller ve testler arasında iyi bir uyumla sonuçlandı. Bu tür birleşimlerin, bağlantının elastik kalabileceği bağlantı tasarım momenti için uygun bir yük faktörünü belirlemek üzere bağlantının maksimum moment kapasitesinin 1,0, 1,25 ve 1,5 katı olacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme koşulları altında tasarlanan rijitlik levhalı alın levha birleşimlerinin sonlu eleman analizi, bir bağlantıda beklenen uygulanan momentin 1,5 katı için tasarlanan bir bağlantının öncelikle elastik bir şekilde davranabileceğini gösterdi. Bu yük faktörü, bağlantıyı sağlamak için gereken mukavemeti ve rijitliği sergileyen bir bağlantıyla sonuçlanırken, kırılğan parçalar (cıvatalar) elastik kalır. Analiz

edilen modeller arasında kabul edilen modellerin rijitlik oranları 3 ila 4 aralığındadır. Sonuç olarak, rijitlik levhalı alın levha birleşimlerinin tasarımında sadece gerinim sertleşmesi etkilerinin dikkate alınması yeterli değildir. Rijitlik levhas - başlık bölgesinin yerel sünekliğinin değerlendirilmesi şunu göstermiştir: Birleşimin rijitliği arttıkça yerel süneklik azalır ve dolayısıyla daha büyük yük faktörleri rijitlik levha bölgesinin kırılğan performansına neden olabilir. Ayrıca birleşimin kesme kuvveti, moment-dönme tepkisinden bağımsızdır ve bağlantının kesme kuvveti tarafından kontrol edilir. Bağlantı tarafından tüketilen enerji ile toplam giriş enerjisinin karşılaştırılması, yani elastik bağlantıların toplam enerjisinin $< \%3$ 'ünü dağıttığını ve bağlantıyı sağlayabildiğini gösterdi. Bu enerji kaybı, rijitlik levhalarındaki bazı plastik deformasyonlardan ve alın levhanın sınırlı plastikleşmesinden kaynaklanıyordu. Mevcut sayısal çalışmanın sonuçlarını desteklemek için, bu tür bağlantıların ve diğer bağlantı uzunluklarının döngüsel performansını ve düşük döngüsel yorgunluğun etkilerini, özellikle de prying etkileri nedeniyle cıvataların azalan yorulma ömrünü değerlendirmek için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır [9].

Şekil 14, toplam bağlantının dönüşünün 0,005 rad'ında S1 numunesinin sonlu elemanlar modeli için bağlantı ve alın levhadaki von Mises gerilim dağılımını göstermektedir. Bu dönüş, birleşimin, alın levhanın ve rijitlik levhası akması yoluyla elde edilir. Çözümün yaklaşmasındaki zorluklar nedeniyle (alın levha ve cıvata başlarındaki büyük plastik gerinim), analiz 0,005 rad bağlantı dönüşünde durduruldu [9].

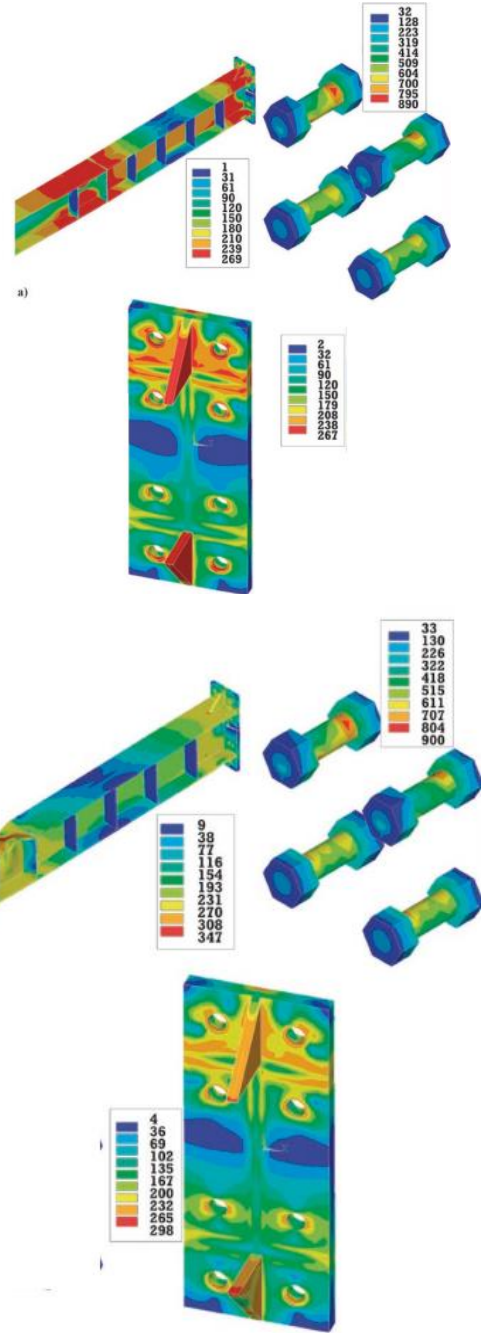
Şekil 14'e göre, von Mises gerilim eğrisiyle ayırt edilen esnek plastik mafsallık birleşimin yalnızca bir tarafında (sol tarafta) oluşturulmuştur ve sağ uçta birleşimin başlığı yerine alın levha akmıştır. Rijitlik levhasına bitişik bağlantı başlığının plastik deformasyonu, rijitlik levhanın ucundaki küçük bir bölgede yoğunlaşmıştır. Ayrıca alın levhadaki von Mises gerilim seviyesi baklaninkinden daha yüksekti. Bu şekil aynı zamanda cıvatalardaki von Mises gerilim dağılımını da göstermektedir. Cıvatalar akma geriliminin ötesinde yüksek düzeyde gerilime maruz kalmıştır. Bunun temel nedeni oldukça deforme olmuş alın levhasının prying etkisidir [9].

Bu sonuçlara göre birleşimin istenen performansı göstermemiş ve akma birleşimin ve bağlantının sınırlı bir kısmı ile sınırlı kalmıştır. Alın levhasının akması, birleşimin akmasını önler ve sistemin performansının düşmesine neden olur. Bağlantı gövdesindeki von Mises stres seviyesi 214 ile 249 MPa arasındaydı [9].



Şekil 14. Nihai sınır durumunda S1'deki (MPa) Von Mises gerilim dağılımı [8]

Şekil 15'de gösterildiği gibi, Bağlantının gücü, alın levhadaki von Mises geriliminin büyüklüğünün, bağlantıdaki von Mises geriliminden daha az olmasını sağlayacak kadar yüksekti. Alın levhadaki gerilimin büyüklüğü birleşimden daha düşük olmasına rağmen, levha başlığı -alın levhası ve rijitlik levhası arayüzleri boyunca aktı. Bu sınırlı miktardaki verim, enerjinin bir kısmını dağıtır ve faydalı olabilir. Bağlantıdaki rijitlikten sorumlu ana bileşen olan rijitlik levhası da akmıştır ve nervürdeki von Mises gerilimi bağlantı başlığındaki kadar yüksektir [9].



Şekil 15. S3 modelindeki Von Mises gerilim dağılımları [8]

V. YÖNETMELİKLER

A. EUROCODE 3

Tablo 1. T-profil başlığının $F_{T,Rd}$ tasarım mukaveti

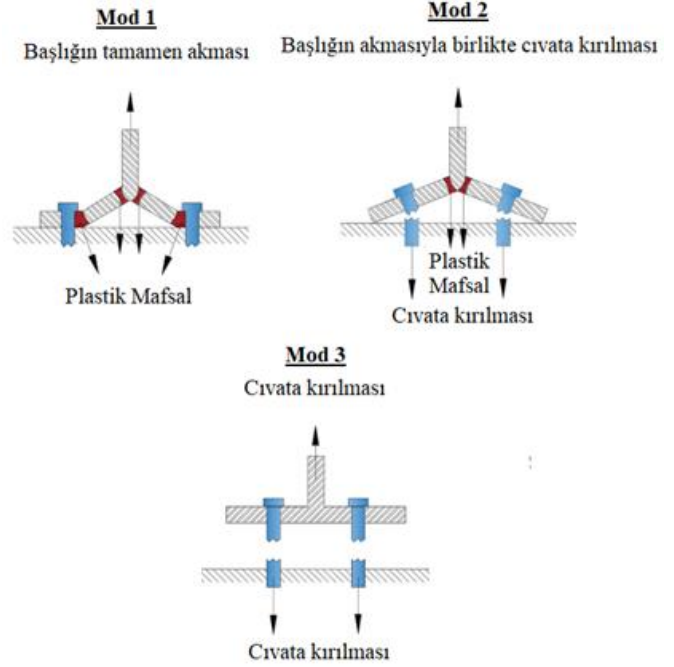
Prying etkisi gelişebilir, $L_b \leq L_b^*$	
Mod 1	
Destek Levhaları yoksa	
Yöntem 1	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$
Yöntem 2	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m + n)}$
Destek levhaları varsa	
Yöntem 1	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$
Yöntem 2	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m + n)}$
Mod 2	
$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n}$	
Prying etkisi gelişmiyorsa	
Mod 1 ve Mod 2	
$F_{T,1,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$	
Mod 3	
$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$	

Mod 1: Başlığın tamamen akması

Mod 2: Başlığın akmasıyla birlikte cıvata kırılması

Mod 3: Cıvata kırılması

Şekil 16'da 3 mod görsellerle gösterilmiştir.



Şekil 16. Üç göçme modu

L_b -Cıvata uzama uzunluğu, kavrama uzunluğuna (malzemenin ve pulların toplam kalınlığı) artı cıvata başının yüksekliği ile somunun yüksekliğinin toplamının yarısına eşit olarak alınır veya

-ankraj cıvatası uzama uzunluğu, nominal cıvata çapının 8 katı, harç tabakası, levha kalınlığı, pul ve somun yüksekliğinin yarısının toplamına eşit olarak alınır.

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s n_b}{\sum l_{eff,1} t_f^3}$$

$F_{T,Rd}$ = T-profil başlığının tasarım çekme mukavemeti

Q = Prying etkisi

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0}$$

$$n = e_{min} \text{ ama } n \leq 1,25mm$$

n_b cıvata sıralarının sayısıdır (sıra başına 2 cıvata ile)

$F_{T,Rd}$ bir cıvatanın tasarım çekme mukavemetidir, bkz. Yönetmeliğe;

$\sum F_{t,Rd}$ T-profildeki tüm cıvatalar için $F_{T,Rd}$ 'nin toplam değeridir;

$\sum l_{eff,1}$ mod 1 için l_{eff} değeridir;

$\sum l_{eff,2}$ mod 2 için l_{eff} değeridir;

e_{min} , m ve t_1 Şekil 10'te gösterildiği gibidir;

$F_{y,bp}$ destek levhalarının akma dayanımıdır;

t_{bp} destek levhalarının kalınlığıdır;

$e_w = d_w/4$;

d_w pulun çapı veya ilgili olarak cıvata başı veya somunun noktaları arasındaki genişliktir.

NOT 1: Cıvatalı kiriş-kolon birleşimlerinde veya kiriş birleşim yerlerinde, prying etkisinin gelişeceği varsayılabilir.

NOT 2: Yöntem 2'de, bir cıvata tarafından T-profil başlığına uygulanan kuvvetin, cıvatanın merkez hattında yoğunlaşmak yerine, pul, cıvata başı veya somunun altına (uygun olduğu şekilde) eşit şekilde dağıtıldığı varsayılmaktadır. Bu varsayım, mod 1 için daha yüksek bir değere yol açar, ancak $F_{T,1-2,Rd}$ ile mod 2 ve 3'ün değerlerini değiştirmeden bırakır.

B. ANSI/AISC

Tablo 2. Dört cıvatalı uzatılmış rijitlik levhali alın levha Akma çizgi mekanizması Parametresinin özeti

Alın Levha Geometrisi ve Akma Çizgisi Deseni	
Durum 1 ($d_e \leq s$)	
$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{p_{f0}} + \frac{1}{2s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{fi} + s) + h_0(d_e + p_{f0})]$	
Durum 2 ($d_e > s$)	
$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{f0}} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{fi} + s) + h_0(s + p_{f0})]$	
$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g}$ Not: Eğer $p_{fi} > s$, $p_{fi} = s$ kullan	

Tablo 3. Dört civatalı uzatılmış rijitlik levhalı alın levha birleşiminin kolon başlık akma çizgi mekanizması Parametresinin özeti

Rijitlik Levhalı Kolon Başlık Geometrisi ve Akma Çizgisi Deseni
$Y_c = \frac{b_{cf}}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{fi}} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{fo}} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{fi} + s) + h_0(s + p_{fo})]$
$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g}$ Not: Eğer $p_{fi} > s$, $p_{fi} = s$ kullan

SONUÇLAR

Rijitlik levhalı alın levhalı birleşimlerin akma çizgisi hesapları, rijitlik levhaların varlığının, alın levha birleşimlerinin plastik ve nihai eğilme mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Akma çizgisi hesaplamaları, yönetmeliklerde ve tasarım esaslarında yaygın olarak kullanılan akma çizgisi hesaplamalarını dikkate alarak alın levhanın plastik mukavemetini belirlemeye yönelik yöntemler sağlar. Önceki araştırmalarda gösterildiği gibi, alın levhanın nihai mukavemetinin, gerinim sertleşmesi nedeniyle plastik mukavemetten önemli ölçüde daha büyük olabileceğini ortaya koymaktadır. Bir alın levhalı birleşime rijitlik levhası eklendiğinde, rijitlik levhasız bir levhalı birleşime kıyasla olası akma çizgilerini kısıtlar.

Sonuç olarak, akma çizgisi hesapları, özellikle moment-dönme davranışını, sünekliği ve enerji

dağılımını anlamada, rijitlik levhalı alın levhalara sahip birleşimlerin davranışına ilişkin değerli bilgiler sağlamıştır. Hesaplar, rijitlik levhalı alın levha birleşimlerinin kapasitesinin, arıza modlarının ve dönme kapasitesinin analiz edilmesinde etkili olmuş, böylece tasarımlarını ve performanslarını etkilemiştir. Akma çizgisi analizi, varsayılan plastik mekanizmaya dayalı olarak rijitlik levhalı alın levhalara sahip bağlantıların moment direncini güvenilir bir şekilde hesaplamak için bir araç sağlar.

KAYNAKLAR

- [1] Bayülke Nejat, 1994 Northridge kaliforniya depremi sonrasında moment taşıyan çelik kolon-kiriş birleşim yerleri üzerinde yapılan deneyler, araştırmalar ve geliştirmeler, *Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı*. 425 (2003).
- [2] T.M. Murray, Recent Developments for the Design of Moment End-Plate Connections, 1988.
- [3] Y.O. Özkılıç, C. Topkaya, Extended end-plate connections for replaceable shear links, *Engineering Structures*. 240 (2021). doi:10.1016/j.engstruct.2021.112385.
- [4] A.İ. Akgönen, B. Güneş, Finite Element Analysis of End-Plate Moment Connections, *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*. 17 (2017) 646-657. doi:10.5578/fmbd.57564.
- [5] Y.O. Özkılıç, A comparative study on yield line mechanisms for four bolted extended end-plated connection, *Challenge Journal of Structural Mechanics*. 7 (2021) 93. doi:10.20528/cjsmec.2021.02.005.
- [6] Y.O. Özkılıç, C. Topkaya, The plastic and the ultimate resistance of four-bolt extended end-plate connections, *Journal of Constructional Steel Research*. 181 (2021). doi:10.1016/j.jcsr.2021.106614.
- [7] H.M.H.K. Herath, D.S. Jayaweeraratne, R.S.S.A. Wijesundara, K.K. Wijesundara, Performance-based design method for bolted stiffened end-plate connection under monotonic loading, *Structures*. 53 (2023) 214-227. doi:10.1016/j.istruc.2023.04.088.
- [8] M. D'Aniello, R. Tartaglia, S. Costanzo, R. Landolfo, Seismic design of extended stiffened end-plate joints in the framework of Eurocodes, *Journal of Constructional Steel Research*. 128 (2017) 512-527. doi:10.1016/j.jcsr.2016.09.017.

- [9] A. Pirmoz, P. Ahadi, V. Farajkhah, Finite element analysis of extended stiffened end plate link-to-column connections, *Steel Construction*. 9 (2016) 46-57. doi:10.1002/stco.201350003.