

# Moment Aktaran Kaynaklı Birleşimlerde Kullanılan Kaynak Yöntemlerinin Birleşim Performansına Etkisi

Hüdaı KAYA<sup>1\*</sup>  
Barlas Özden ÇAĞLAYAN<sup>2</sup>



## ÖZ

Özellikle moment aktaran yüksek sünek yapısal çelik çerçevelerde hedeflenen enerji sönüm seviyelerine ulaşılabilmesi, birleşimi oluşturan tüm elemanların tasarlandığı şekilde çalışmaları ile mümkündür. Bu araştırmaya konu olan deneysel çalışma, ülkemizde yapısal çelik sektöründe çoğunlukla tercih edilen üç farklı kaynak yöntemi üzerinde yapılmış ve yapısal çelik tasarım, imalat ve montaj konularında çalışan tüm meslektaşlarımız için halihazırdaki gri alanların azaltılmasına yönelik bir farkındalık oluşturmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. İki farklı boyda üçer numuneden toplamda 18 adet tam ölçekli numune testini takiben mevcut yönetmeliğin ilgili tanım ve şartlarında iyileştirmeler ve değişiklikler yapılmasını işaret eden sonuçlar elde edilmiş bu anlamda daha ileri seviyede araştırma yapılmasının gereklilik olduğu kanaatine varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapısal çelik, kaynak, süneklik, tam ölçekli test, moment aktaran çerçeve, deprem, tekrarlı yükleme.

## ABSTRACT

### Influence of Welding Methods on the Performance of Welded Moment Frame Connections

Achieving the targeted levels of energy dissipation, especially in ductile structural steel moment frames, is possible by ensuring that all components forming the assembly function as designed. The experimental study discussed in this research was conducted on three different welding methods, which are widely preferred in the structural steel sector in Türkiye. The aim was to create awareness and reduce existing uncertainties for all our colleagues working in structural steel design, manufacturing, and assembly. Following the

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 24 Temmuz 2024 günü ulaşmıştır. 19 Eylül 2024 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mayıs 2025 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1521635>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
kayah18@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-4221-4408>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
caglayan@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-8986-9188>

\* Sorumlu yazar

testing of 18 full-scale specimens, improvements and changes were indicated in the relevant definitions and conditions of the existing regulations, suggesting the necessity for further advanced research in this regard.

**Keywords:** Structural steel, weld, ductility, full scale test, moment frame, earthquake, cyclic loading.

## 1. GİRİŞ

Kaynak teknolojisindeki gelişmelerle birlikte bulon ve perçine göre daha hızlı ve ekonomik bir birleşim aracı olması sebebi ile kaynağın günümüzde yapısal çelik sistemlerde diğer iki birleşim elemanına göre daha çok tercih edildiğini görmekteyiz. Ancak kullanılan metot, detay, imalat ve montaj teknikleri ile çevresel şartlar sebebi ile oluşan veya süreksizlik, çatlak, artık gerilme yığılımları, mekanik veya metalürjik kusurlar gibi bırakılan hasar sebebi ile ilgili elemanın tasarlanan taşıma gücüne, enerji yutabilme ve plastik mafsallı oluşturabilme yeteneğine ulaşmadan yerel ya da tamamen göçtüğü diğer bir değişle sihirli ve mükemmel bir birleşim aracı olmadığı defalarca ispatlanmış ve tecrübe edilmiştir.

Sünek yapı kabulünün tek başına ve münferiden kolon ve kiriş olarak ilgili yapı elemanı veya elemanlarının sünek olma özelliği ile veya tasarımda kabul edilen parametreler ile sağlanamayacağı 1994 yılında A.B.D. Northridge bölgesinde meydana gelen ve sadece 10 sn süren 6,7 büyüklüğündeki deprem ile ortaya çıkmıştır. Depremin hemen sonrasındaki ilk kontrollerde çelik yapılarda önemli bir hasar oluşmadığı izlenimi olmuş ancak o dönemdeki yapı yönetmeliği doğrultusunda yaygın olarak kullanılan kolon-kiriş birleşimlerinin özellikle kiriş başlıklarını kolon başlığına bağlayan kaynak dikişleri civarında çatlaklar oluştuğu gözlenmiş ve Northridge depremi öncesi bir çok deneysel ve analitik çalışmalar sonucu kabul gören tasarım yönetmeliklerine giren ve kullanılması önerilen bu birleşim detayı, deprem sonrasında yayınlanan acil bir raporla, yönetmeliklerden çıkarılmıştır [1].

Ülkemizde yapılmakta olan yapısal çelik yapıların birleşim detay imalatlarında ağırlıklı olarak 3 tip kaynak yöntemi kullanılmakta, proje özel şartnamesi doğrultusunda da bu kaynak yöntemlerinin alt parametreleri tayin edilmektedir. Söz konusu yöntemlerin ve bunların alt parametrelerinin seçimi, ilgili kaynak nüfuziyetini ve sünekliğini tayin edeceğinden, doğrudan birleşimin sünekliğini ve düşük çevrimli yorulma ömrünü etkilemektedir. Bu sebeple sünek bir birleşimden bahsediliyorsa sadece o birleşimde bir araya gelen elemanların sünekliği değil, bir bütün olarak birleşimin sünekliğinden bahsedilme zorunluluğu ve gerekliliği sebebi ile kolon ve kirişin dışında ilgili birleşimde yer alan kaynağın da birleşimin bir eleman olarak kabul edilerek tayini, tasarımı ve teşkili önem taşımaktadır.

Kaynak metodu ve alt sınıfının seçimi çoğu kez atölyenin inisiyatifine bırakılmakla birlikte, nadiren ve özellik teşkil eden bazı yapılar için proje özel teknik şartnamesinin bir alt başlığı olarak yapısal çelik proje müellifi tarafından tayin edilmektedir.

Atölye inisiyatifine bırakılan kaynaklarda ise atölyenin, mühendislik detayının gereksinimlerinden bihaber olarak, maliyet merkezli, minimum malzeme bedeli, minimum işçilik ile maksimum iş prensibi doğrultusunda seçim yapılmasını beklemek hiç de zor değildir.

Bu araştırma için 2018 yılı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [2] kapsamında “Tam Dayanımlı Bulonlu Alın levhali Birleşimler” Madde 9B.2’ de yer alan rijitlik levhasız, 4 bulonlu, alın levhali birleşim referans alınarak test numuneleri üretilmiş, iki farklı boyda, her boy ve her kaynak tipi için 3’er numune olmak üzere toplam 18 adet numune test edilmiştir. Numunelerin üretimi için kullanılan kaynak metotlarına ait detaylar “Test Planlaması” başlığı altındaki ikinci bölümde verilmiştir.

Araştırma kapsamında yapılan literatür incelemesi sırasında, bir birleşim elemanı olarak kullanılan kaynak metoduna veya kaynak metodunun performansına ait bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Konu çevresinde yapılan araştırmalar tipik olarak; kaynak erişim deliğinin geometrisi ve boyutu, panel bölgesinin deformasyon kontrolü, giriş gövde kaynağının birleşim performansına katkısı ve bunların inelastik performans üzerindeki katkıları [3], farklı gerilme hızları altında küt ve köşe kaynakların dinamik davranışları [4], S355 yapı çeliğinin HAZ ve kaynak metali bölgelerinin muhtelif gerilme hızlarında yarı statik ve dinamik çekme testleri altındaki davranışları [5], moment çerçevesinde yer alan girişin başlıklarındaki tek berkitmenin plastik dönmeye katkısı [6], kaynaklı moment çerçevelerinde et kalınlığı yönünden kolon flanşının yüksek ısı girişli kaynak altında yüksek gerilme hızları ile kolon flanşındaki üç eksenli gerilme durumu [7], moment çerçevelerinde kaynaklı kolon giriş birleşimlerinin çelik sınıfı, yükleme hızı, köşe kaynak, tek ve çift eğimli düz kaynaklar açısından monolitik ve çevrimsel yükleme altındaki davranışları [8], 1994 Northridge depremi sonrası kaynaklı moment çerçevelerin sismik performanslarının yükseltilmesi ve iyileştirilmesi [1], moment çerçevelerinde yer alan kaynaklı kolon giriş birleşimlerinin farklı giriş flanş berkitme plakaları ile davranışları [9], moment bağlantılarının mukavemetini ve sünekliğini etkileyen kaynak metali kırılma tokluğu, kaynak erişim deliğinin geometrisi ve boyutu ile panel bölgesi deformasyon kontrolü [10], 1994 Northridge ve 1995 Hyogoken-Nambu depremleri sonrasında Amerika ve Japonya’daki mevcut moment çerçeveli yapıların hasarlarının gözden geçirilmesi ve karşılaştırması [11], moment çerçevelerinde kaynaklı flanş bağlantılı girişlerin inelastik davranışları ve süreklilik plakalarının etkinliği [12], 1994 Northridge depremi sonrası kaynaklı bağlantıların kırılma hasarlarının incelenmesi ve sünekliğin artırılması [13] konularında yoğunlaşmış, ilgili sayısal ve deneysel çalışmalara ait yayınlar incelenmiştir.

Üretilen tüm numuneler için ilgili imalat standardı [14] doğrultusunda imalat öncesinde, imalat sırasında ve sonrasında atölye, işçilik ve malzeme sertifikasyonları, çekme, kimyasal kompozisyon, sertlik, kaynak pasoları arası sıcaklık, çatlak kontrol, nüfuziyet ve kaynak hatalarına karşı radyografi testleri içeren kalite kontrol testleri akredite bir laboratuvar, sertifikalı ekipman ve lisanslı inspektörler aracılığı ile yapılmış, kayda alınmıştır

Her üç grup test numunesi için FEMA350/SAC2000 [15] yükleme protokolü kullanılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

### 1.1. Kaynak ve Kaynak Metotları

İki veya daha fazla parçanın ısı, basınç veya her ikisi birden kullanılarak birleştirilmesi işlemine kaynak adı verilmektedir. Bu, metal ve metal dışı tüm malzemeleri kapsayan

oldukça geniş bir tanım olup bu çerçevede onlarca farklı yöntem ve usulde kaynak işlemi mümkündür.

Yapısal çelik mühendisliği açısından yaklaşılacak olursa, ülkemizdeki imalat ve montajlarda aşağıda kısa tanımları verilen üç ana tip kaynak yöntemi kullanılmaktadır.

#### a) Gazaltı Ark Kaynağı

Gaz Metal Ark Kaynağı / Gas Metal Arc Welding / Metal Inert Gas (GMAW/MIG), kaplamasız sürekli bir tel elektrod ile ana metal malzeme (iş parçası) arasında koruyucu gaz altında elektrik arkı oluşturularak ana malzemenin eriyip birleşmesini sağlayan bir kaynak yöntemidir. Kaynak banyosunun içerisinde kullanılan elektrod da ergimiş olarak yer alır. Koruyucu atmosfer olarak asal veya yarı asal gazlar kullanılmaktadır.

Koruyucu atmosfer olarak Argon (Ar), Helyum (He) gibi soygazların kullanılması durumunda yöntem adı MIG, CO<sub>2</sub> gibi aktif gaz veya CO<sub>2</sub>-Ar, CO<sub>2</sub>-Ar-O<sub>2</sub> gibi karışım gazlar kullanılması halinde yöntem Metal Aktif Gaz / MAG olarak adlandırılır.

Gaz altı kaynağı ana başlığı altında bir başka bir yöntem de Özlü Tel Ark Kaynağı / Flux Cored Arc Welding (FCAW) olarak adlandırılan ve kullanılan tel dışında diğer tüm özellikleri MIG ile aynı olan bir kaynak yöntemidir. Kullanılan telin içi dolgulu olup MIG yöntemine göre tek pasoda daha fazla kaynak dolgusu bırakır. Kaynak banyosuna sağladığı enerji girişi daha yüksektir. Teknik olarak aynı gazlar, koruyucu atmosfer olarak kullanılabilir. Alternatif olarak, atmosferik korumaya ihtiyaç duymayan kendinden korumalı FCAW-S tipi tel kullanımı da mevcuttur.

Yine gazaltı kaynağı ana başlığı altına değerlendirilebilecek diğer bir yöntem de Gaz Tungsten Ark Kaynağı / Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) veya Tungsten Inert Gas (TIG) olarak adlandırılan ve ince et kalınlıkları, paslanmaz çelik ve demir dışı metal kaynaklarında tercih edilen kaynak türüdür. Burada elektrod olarak tungsten, koruyucu atmosfer olarak ise Argon veya Helyum gibi asal gaz kullanılır. GMAW yönteminin aksine tungsten elektrod kaynak banyosu içerisine dahil olmaz. Kaynak banyosuna enerji girdisi daha düşüktür. İşçiliği diğer yöntemlere göre daha fazla özen ve hassasiyet ister.

Tekniği gereği soğukta şekil verilmiş ince cidarlı çelik eleman, ince et kalınlıklı boru, kutu veya paslanmaz çelik imalatlarında kullanılmaktadır.

#### b) Örtülü Elektrod Ark Kaynağı

Günümüzde Örtülü Metal Ark Kaynağı / Shielded Metal Arc Welding (SMAW) ismi ile literatüre geçen ve Elektrik Kaynağı, Elektrod Kaynağı gibi kısaltılmış isimler ile kullanılan kaynak yönteminde, kaynak dikişinin mekanik parametrelerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir örtü tabakası çubuk elektrod parçası üzerinde sarma, daldırma veya günümüz teknolojisinde daha çok tercih edilen ekstrüzyon tekniği ile kaplanmış olarak kullanılmaktadır.

Elektrik enerjisi kullanılarak ana metal ile elektrod arasında ark oluşturularak yoğun bir ısı transferi ile ergitilmiş olan ana metale kaynak banyosuna elektrod da eriyerek dahil olmaktadır.

Kaynak banyosunun fiziksel ve mekanik özellikleri, örtü cinsine bağlı olarak değişmektedir. Kaynak dikişinin ana metal içerisine yapacağı nüfuziyet derinliği, kırılma tokluğu, çentik



darbe mukavemeti, akma ve kopma mukavemetleri, yığılan kaynak metali miktarı, birleşime etki eden enerji miktarı, kaynak dikişinin fiziksel görünümü gibi birçok husus örtü bileşiminin etkisi altındadır.

Örtüyü meydana getiren maddeleri birer başlık olarak görmek, örtünün kaynak banyosuna yukarıda sayılan fiziki ve mekanik etkileri nasıl oluşturduğu hakkında fikir vermesi açısından önemlidir.

1. Curuf teşkil eden maddeler
  - A. Karbonatlar
  - B. Silikatlar
  - C. Oksitler
2. Arkı stabilize eden maddeler
3. Gaz atmosferi meydana getiren maddeler
4. Ekstrüzyon işlemini kolaylaştırıcı maddeler
5. Deoksidasyon ve alaşım maddeleri

Yukarıda ana başlıklar olarak verilen element ve bileşiklerin farklı oranlarda kullanılması ile örtünün karakteri değiştirilerek elektrodun kaynak banyosuna fiziki ve mekanik katkısı belirlenmekte, rutil, bazik, asit, oksit, zirkon bazik, selülozik karakterli örtülü elektrodlar bu üretimleri bu şekilde gerçekleştirilmektedir.

#### c) Tozaltı Ark Kaynağı

Tozaltı ark kaynak / Submerged Arc Welding (SAW) yöntemi tekniği bakımından gazaltı ark kaynağına benzer olup koruyucu atmosfer gaz yerine örtülü elektrodun manto/örtü tabakasını oluşturan maddelerden teşkil toz granül (flux) örtü malzemesi kaynak banyosu üzerine kaynak arkı oluşmadan önce serilmeye başlar. Arkı oluşturan ve eriyerek kaynak banyosu içerisine dahil olan elektrod bu granül örtü tabakası altında atmosferik etkilerden uzak olarak çalışır. Granül örtünün bir kısmı, kaynak işlemi sırasında oluşan ısı sebebi ile örtülü elektrod ark kaynağında olduğu gibi cüruf olarak katılaştır. Reaksiyona girmeyen ve toz halini koruyan örtü malzemesi ise vakumlu bir uç tarafından toplanır.

Gazaltı ark kaynağından diğer bir farkı da kullanılan elektrod çapının gazaltı tekniğinde kullanılanlara göre daha yüksek olmasıdır. Böylelikle kaynak metali yığılması daha fazla, yapılan işe oran ile iş parçasına girdi olarak verilen enerjiye daha az olmaktadır.

Yapısal çelik imalatlarında tercih edilen ve yukarıda özet olarak açıklanan bu yöntemlerin ilgili proje için hangisinin veya hangilerinin tercih edileceği projenin detayına, mühendislik ihtiyacına, imalat ve montaj şartlarına ve atmosferik şartlara bağlıdır. Bu hususlar bir bütün olarak değerlendirilip uygun yöntem, uygulamadaki avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak tayin edilmelidir.

## 1.2. Kaynaklanabilirlik

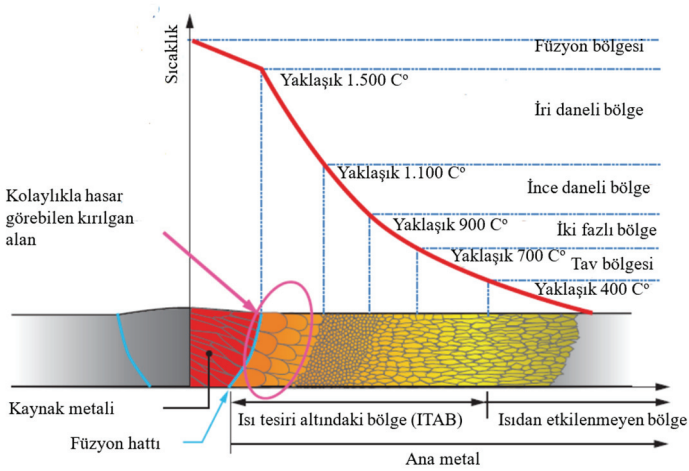
Kaynak kullanılarak yapılan imalat veya birleşimin güvenliği, kalitesi ve ömrü tek başına ne seçilen kaynak yöntemine ne de kaynak metalinin türüne bağlıdır. Bu noktada birçok parametre, yapılan birleşimin kalitesini, emniyetini ve ömrünü belirlemektedir. Ancak

bunların arasında, birleştirilen ana malzemelerin ergime noktasına kadar çıkarılıp nispeten kısa bir sürede soğutulduğu bir ısıl işlem olması sebebi ile sıcaklığın dağılımı ve değişimi ana parametre olarak öne çıkmaktadır.

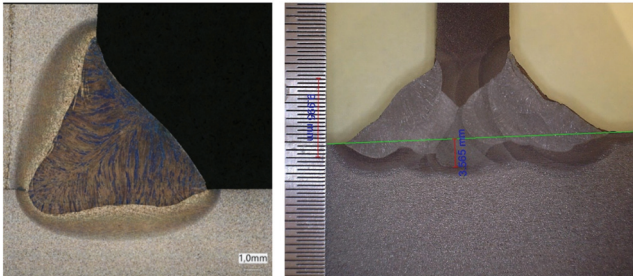
Bu aralıkta kısa sürede değişen sıcaklık ana metalde iç yapı değişikliklerine neden olduğu gibi bu ortamda bir araya gelen kaynak metali (elektrod), varsa cüruf, ana metal ve atmosfer arasında bazı kimyasal ve metalurjik reaksiyonlar meydana gelir.

Kaynak işlemi sırasında oluşan elektrik arkı sebebi ile kaynak metali ile ana metal eriyerek oluşan eriyik banyosunda (kaynak banyosu) karışırlar. Bu işlem sırasında ana malzemenin kaynak dikişi bölgesine komşu kısımlarında kaynak banyosu eriyik sıcaklığı ile atmosferik sıcaklığı kadar değişen sıcaklıklarda bir geçiş bölgesi oluşur. Bu bölgeye "Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) / Heat Affected Zone (HAZ)" ismi verilir.

Kaynak bölgesindeki ısı dağılımı ve ana metal yapısındaki değişimi gösteren karakteristik grafik Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 - Ergime ve ısı tesiri altındaki bölge [16].



Şekil 1.2 - Tek ve çok pasolu kaynakta ITAB ve ergime bölgesi.

Ergime bölgesi kaynak metali ve ana metalin karışımından oluşur. Tek pasolu kaynak dikişlerinde bu karışım oldukça homojen bir bileşim gösterir. Ancak çok pasolu kaynaklarda her pasonun ana metal ile karışma oranı farklıdır (Şekil 1.2). Hatta belirli et kalınlıklarından sonra iç pasolarda ana metale rastlanmayabilir. Ergime bölgesindeki ana metalin kaynak metaline oranı, uygulanan kaynak yöntemi, paso sayısı ve aktarılan enerjiye göre geniş bir aralık içerisinde değişir.

Kaynak sırasında birçok alaşım elementleri kayba uğrar. Bu kayıpları azaltmak ve kaynak bölgesinin fiziki, kimyasal ve metalurjik yapısını iyileştirmek için bu bölge kaynak anında atmosferik etkilerden korunur.

Sıvı haldeki kaynak banyosu içerisinde atomlar serbest haldedirler. Sıcaklık metal veya alaşımın katılaşma noktasına doğru düştükçe, atomlar kristal kafesleri meydana getirmek üzere birleşmeleri ile çekirdek oluşumu başlar. Soğuma devam ettikçe çekirdekler daneleri oluşturmak üzere yeni atom ve kristal kafesleri ile büyümeye devam eder. Katılaşma anında ortaya çıkan ergime ısısı doğal soğuma ısısını etkileyerek danelerin fazla büyümesini önler. Kaynak sırasında ısının büyük kısmı ergime bölgesinden iletilebilir. Bu nedenle soğuma yönüne paralel oldukça büyük silindirik daneler oluşur. Kaynak sırasında ısı girdisinin artması, parçanın yüksek sıcaklıkta daha uzun süre tutulması, ön tav uygulanması ergime bölgesinde danelerin irileşmesine neden olur. Tam ters olarak, kaynak bölgesinde soğutma hızının artması dane yapısının incelmeye sebep olur. Bu durum ise gevrek ve kırılmalı bir yapı oluşumuna sebep olacağı için arzu edilmez.

ITAB' da ortaya çıkan iç yapısal değişiklikler, ulaşılan sıcaklığın fonksiyonu olarak ana metalin türüne, bileşimine, kalınlığına, ısıl işlem ve üretim sürecine bağlı olarak oldukça çeşitlidir. Ana metal olarak çeliğin içerdiği karbon ve diğer alaşım elementleri kaynak metalinin sertliğini ve sertleşebilme yeteneğini dolayısıyla uygulanması gereken ön tav sıcaklığı etkiler. Sertlik genel bir ifade ile çeliğin içerdiği karbon miktarının bir fonksiyonudur. Sertleşebilme yeteneği ise çeliğin ostenit bölgesinden itibaren ani olarak soğutulması sonucu ortaya çıkan martenzitik yapının oluşma kolaylığının bir ölçüsüdür.

Sertleşebilme yeteneği düşük olan çeliklerin martenzitik yapı oluşturabilmeleri için kaynak işlemi sonrasında çok hızlı bir şekilde soğutulmaları gerekir. Sertleşebilme yeteneği yüksek çelikler ise kaynak sonrasında çok yavaş bir şekilde soğutulmaları halinde bile sert martenzitik yapı oluştururlar. Bu açıdan bakıldığında sertleşebilme kabiliyeti, çeliğin kaynak sonrası kaynak bölgesinde göstereceği sertliğin bir bakıma ölçüsüdür.

Sıcaklık değişiminin ve değişim hızının yapı içerisinde sebebiyet verdiği değişikliklere ait daha fazla detay, profesyonel olarak yapı mühendisliği alanı dışında olduğundan bu çalışmada bu noktadan daha ileri bir detay seviyesine girilmeyecektir. "Demir Karbon Denge Diyagramı" içeriği ve detayları için çeşitli referans kaynaklar mevcuttur [19].

Isının tesiri altındaki bölgede yukarıda anlatılan nedenlerle sert ve kırılmalı bir yapının ortaya çıkması, yapı içerisinde çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Gevrekleşen kaynak bölgesinde kaynaktan sonra ortaya çıkan iç gerilmelerin, dış yükler altında oluşan gerilmelerin ve kaynak banyosundan yayılan hidrojenin etkilerinin bir araya gelmesi ile kontrolsüz bir şekilde kırılmalı çatlaklar oluşmakta, statik veya değişken dış yükler sebebi ile bu çatlaklar ani kırılmalara sebep olmaktadır.

Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımını ve değişimini matematiksel olarak formüle etmek oldukça güç olmakla birlikte Rosenthal ve Rykalin tarafından belirli yakınsamalar ile kabul edilebilir sonuçlar alınmıştır. Ancak uygulamada daha pratik bir yöntem olarak “Karbon Eşdeğeri” yöntemi geliştirilmiştir.

Karbon ve manganez çeliğin sertleşme eğilimini ve çatlak oluşum olasılığını arttırdığından birçok şartnamede yapısal çelik olarak kullanılabilen çelikler için bu iki elementin miktarları sınırlandırılmıştır.

Karbon eşdeğeri büyüdükçe kaynaktan sonra soğumanın yavaşlatılması gerekmektedir. Bu amaçla parçaya kaynaktan önce ön tavlama uygulanarak soğuma hızı yavaşlatılmaktadır.

Uygulamada en fazla tercih edilen amprik karbon eşdeğer formülleri aşağıda verilmiştir;

Dearden ve Neill formülü

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} \quad (1.1)$$

Kihara, Suzuki Otani ve Tamura formülü

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \quad (1.2)$$

Fransız Ulusal Demiryolu şirketinin kullandığı formül

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{P}{2} + \frac{Cr}{5} + \frac{Cu}{13} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} \quad (1.3)$$

Uluslararası Kaynak Enstitüsü'nün kullandığı formül

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} \quad (1.4)$$

Görüleceği gibi yukarıdaki bütün formüllerde karbon ve mangan haricindeki tüm elementlerin katkıları farklı değerlendirilmektedir. Bu da yukarıda bahsedilen karbon ve mangan içeriğinin kısıtlanması konusunu açıklamaktadır.

Isı tesiri altındaki bölge sertliği için Uluslararası Kaynak Enstitüsü'nün tavsiyesi 350 Vickers'i aşmaması yönündedir. Bu amaçla yukarıda açıklandığı üzere soğuma hızı kontrol altında tutulmalı, çok pasolu kaynaklarda pasolar arası sıcaklık kontrol edilmelidir.

Karbon eşdeğerine göre yapı çeliklerinde uygulanacak ön tavlama sıcaklıklarına ait bilgiler literatürde mevcuttur [16].

Çeliklerin kaynaklanabilirliğini etkileyen diğer bir faktör de çelik üretimi sırasında yapılan gaz giderme işlemidir. Bazı üretim usullerinde çelikte segregasyon bölgesinde fosfor (P) ve kükürt (S) toplanır. İngotun haddelenmesi veya dövülmesi bu segregasyon bölgelerini yok etmez ve bunlar profil haddesi sırasında profilin boyun bölgelerinde kalır. Profil enkesitinin kaynaklanması gereken durumlarda boyun bölgelerinde biriken fosfor ve kükürt kaynak banyosuna karışarak gözenek ve çatlak oluşumuna sebep olur. Günümüz imalat şartnamelerinde bu tip enkesit kaynaklarında “Kaynak Erişim Deliği” olarak belirli formlarda kesim yapılıp bu bölgenin uzaklaştırılmasının sebeplerinden biri de budur [16], [17].

## 2. TEST PLANLAMASI

Söz konusu araştırma kapsamında ulusal ve uluslararası standartlar uyarınca ülkemizde faaliyet gösteren sertifikalı yapısal çelik atölyelerinde, proje şartnamesine, imalatı yapılan detaya ve eleman geometrisine bağlı olarak gazaltı ark kaynağı (GMAW), örtülü elektrod ark kaynağı (SMAW), sürekli ve boy kaynaklarında ise tozaltı ark kaynağı (SAW) olmak üzere üç tip ana kaynak metodu kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Bu doğrultuda, iki farklı açıklığa sahip test kirişi ve detaya uygun üç kaynak yöntemi için FEMA350/SAC2000 yükleme protokolü (Şekil 2.1) uygulanacak süneklik testlerine ait 18 adet tam ölçekli numune imalatı planlanmıştır. Numune setinin imalatlarında teste muhatap giriş alın levhası kaynaklarına ait yöntem detayları aşağıda paylaşılmıştır.

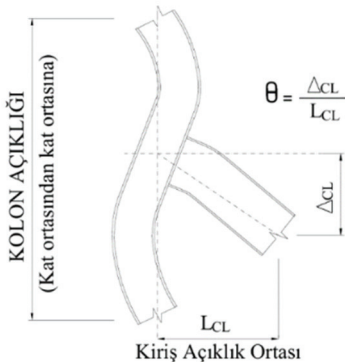
Birinci grup numuneler; GMAW metodu ile TS EN ISO 14341-A ile AWS A5.18 Standartlarına uygun ve sırasıyla G 42 3 C G4Si1/G42 3 M G4 Si1 ve ER70S6 sınıflarında, Akma Dayanımı 470 MPa, Çekme Dayanımı 570 MPa, Çentik Darbe Dayanımı  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 60 J olan bakır kaplı yüksek manganlı kaynak teli ve koruma gazı olarak da %100 CO<sub>2</sub> kullanılan alın levhalı kaynaklı kirişlerden,

İkinci grup numuneler; SMAW metodu ile TS EN ISO 2560-A ile AWS A5.1 Standartlarına uygun ve sırasıyla E 46 B32 H5, E7018-1 H4 sınıflarında, Akma Dayanımı 480 MPa, Çekme Dayanımı 580 MPa, Çentik Darbe Dayanımı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 180 J,  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 120 J olan bazik karakterli bir elektrod kullanılan alın levhalı kaynaklı kirişlerden,

Üçüncü grup numuneler ise; GMAW metodu ile TS EN ISO 17632-A ile AWS SFA – 5.20 Standartlarına uygun ve sırasıyla T46 2 P C 1 ve E71T-1C sınıflarında, Akma Dayanımı 500 MPa, Çekme Dayanımı 560 MPa, Çentik Darbe Dayanımı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 70 J olan rutil özlü, bakır kaplı kaynak teli ve koruma gazı olarak da %20 CO<sub>2</sub> + %78-79 Argon karışımı kullanılan alın levhalı kaynaklı kirişlerden imal edilmiştir.

### 2.1. Numune Tasarımı

Kiriş kesiti olarak IPE270 S275JR seçilmiş rijitlik levhasız, dört bulonlu, alın levhalı birleşim detayı referans alınmıştır. Test düzeneği bu doğrultuda tasarlanmıştır ve boyutlandırılmıştır.



Kat Öteleme Oranı (%)	Tekrar Sayısı
0,375	6
0,500	6
0,750	6
1,000	4
1,500	2
2,000	2
3,000	2
4,000	2
5,000	2
6,000	2

Şekil 2.1 - Dönme açısı ve FEMA350/SAC2000 yükleme protokolü

Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin kolon-kiriş birleşimlerinde yönetmeliğimiz minimum kriter olarak göreceli kat ötelemesi açısı için 0.04 Radyan değerini vermektedir (TBDY Md 9.3.4). Dolayısıyla, birleşim detayı içerisinde olan tüm elemanlar bu minimum değeri sağlamak, teyit etmek durumunda olmalıdır.

Çevrim testlerinin uygulanacağı test kirişi için TBDY 2018 Tablo 9B.1' de verilmiş olan uygulama sınırlarının kontrolü aşağıda yapılmıştır.

Plastik mafsalsın kolon yüzünden uzaklığı;

$$l_h = \min(d_b/2, 3b_{bf})$$

$$l_h = \min(270/2, 3 \times 135) l_h = 135 \text{ mm}$$

Alın levhası kalınlığı;

$$t_p = 30 \text{ mm} \quad 12 \leq t_p \leq 60 \text{ mm}$$

Alın levhası genişliği;

$$b_p = 255 \text{ mm} \quad 160 \leq b_p \leq 300$$

Bulonlar arasındaki yatay uzaklık;

$$g = 155 \text{ mm} \quad 100 \leq g \leq 155 \text{ mm}$$

$P_f$  ( $P_{fi}$  ve  $P_{fo}$ );

$$P_{fi} = 49.8 \text{ mm}, P_{fo} = 50 \text{ mm} \quad 40 \leq P_f \leq 115 \text{ mm}$$

Kiriş enkesit yüksekliği;

$$d_b = 270 \text{ mm} \quad 270 \leq d_b \leq 1400 \text{ mm}$$

Kiriş başlık kalınlığı;

$$t_{bf} = 10.2 \text{ mm} \quad 10 \leq t_{bf} \leq 25 \text{ mm}$$

Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı;

$$L_1 = 1890/270 = 7$$

$$L_2 = 2580/270 = 9.56$$

Kolon enkesit yüksekliği;

$$d_c = 360 \text{ mm} \quad d_c \leq 920 \text{ mm}$$

Bulon sınıfı;

$$8.8 \quad (8.8 \text{ veya } 10.9)$$

Bulon önçekme koşulları;

$$\text{Tam önçekme} \quad (\text{Tam önçekme})$$

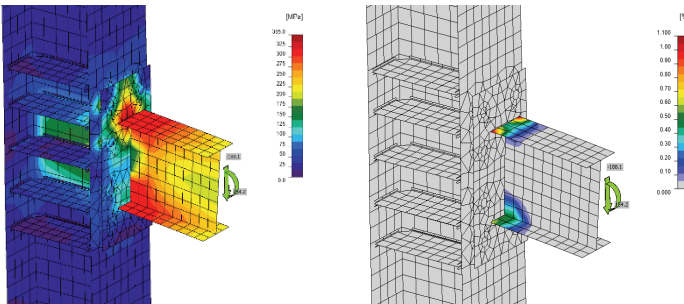
Alın levhası malzeme sınıfı;

$$S355JR \quad (S235, S275 \text{ veya } S355)$$

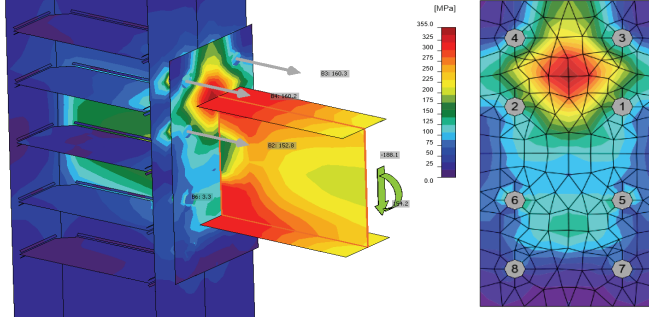
Başlık levhası kaynağı;

$$CJP \quad (\text{Tam penetrasyonlu küt kaynak})$$

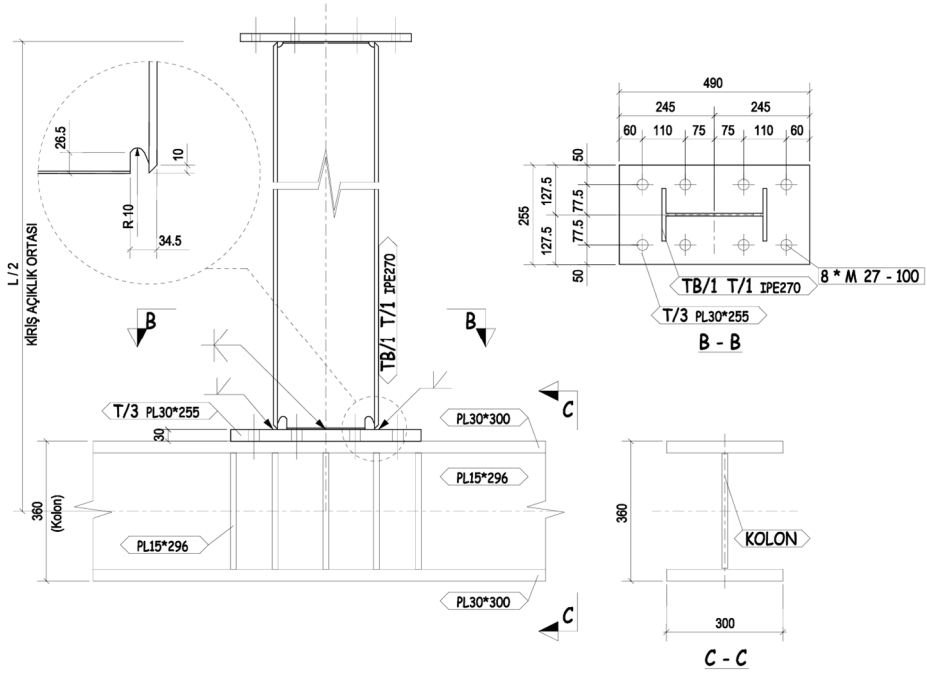
Yönetmelik uygulama sınırlarına uygunluğu teyit edilen numunenin ön boyutlandırması için IdeaStatica V24 [18] sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış, hidrolik veren, LVDT ve Strain Gauge özellik ve kapasiteleri bu doğrultuda seçilmiştir (Şekil 2.2 ve 2.3). İlaveten, sayısal analiz ile elde edilen gerilme ve öteleme değerlerinin deneyden elde edilenler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.2 - Kiriş-Kolon Birleşimi sonlu eleman analizleri – Gerilme ve Birim Şekil Değiştirme



Şekil 2.3 - Bulon kuvvetleri ve alın levhası gerilme dağılımı.



Şekil 2.4 - Test kirişi.

## 2.2 Numune Üretimi ve Test Düzenegi

Üretilen tüm numuneler için (Şekil 2.4) imalat öncesinde, imalat sırasında ve sonrasında atölye, işçilik ve malzeme sertifikasyonları, çekme, kimyasal kompozisyon, sertlik, kaynak pasoları arası sıcaklık, çatlak kontrol, nüfuziyet ve kaynak hatalarına karşı radyografi testleri içeren kalite kontrol testleri hem imalat atölyesi iç denetimi tarafından hem de bağımsız akredite bir laboratuvar, sertifikalı ekipman ve lisanslı denetimciler aracılığı ile yapılmış, kayda alınmıştır (Şekil 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 ve 2.9).

Numuneler, TS ISO 9001:2015 Kalite Yönetim Sistemi, EN ISO 3834-2 Kaynaklı İmalat Yeterlik, EN 1090-2 EXC4 Akreditasyon, TS EN ISO 14001:2015 Çevre Yönetim Sistemi ile TS EN ISO 45001:2018 İSG Yönetim Sistemi belgelerine sahip çelik atölyesinde, onaylı Kaynak Prosedür Şartnamesi (WPS Welding Procedure Specification) ve Kaynak Yöntem Onay (WPQR Weld Procedure Qualification Record) dokümanları doğrultusunda, kalite sertifikaları EN10204 Type 3.1 uyarınca takip edilebilir malzemeler ile TS ISO 9606-1:2014 Kaynakçı Belgelendirme standardı kapsamında sertifikalandırılmış kaynakçılar ile üretilmiş, atölyenin iç denetiminin dışında ISO 9001:2015 Kalite Yönetim Sistemi , TS EN ISO/IEC 17020 ve TS EN ISO/IEC 17025 akreditasyon belgelerine sahip bağımsız bir laboratuvar tarafından denetlenmiştir ve test edilmiştir.

IPE270 kirişlerin alın levhasına kaynaklanacak deneylerimizin odağını oluşturan ucunda flanş ve gövdelerine tam nüfuziyetli küt kaynak teşkili için kaynak ağzı, gövde-flanş birleşimlerine de AWS D1.8'e [17] uygun kaynak erişim delikleri açılmış, çatlak oluşumu ve ilerlemesi için başlangıç sınır durumu oluşturabilecek kılcal çatlak olup olmadığı penetrant test (PT) yöntemi ile test edilmiştir.



*Şekil 2.5 - Kaynak erişim delikleri için penetrant test uygulaması.*



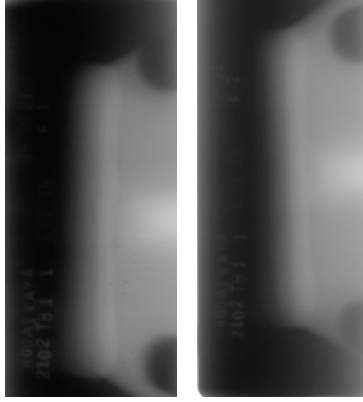
*Şekil 2.6 - Kök paso sonrası temizlik ve pasolar arası sıcaklık ölçümleri.*



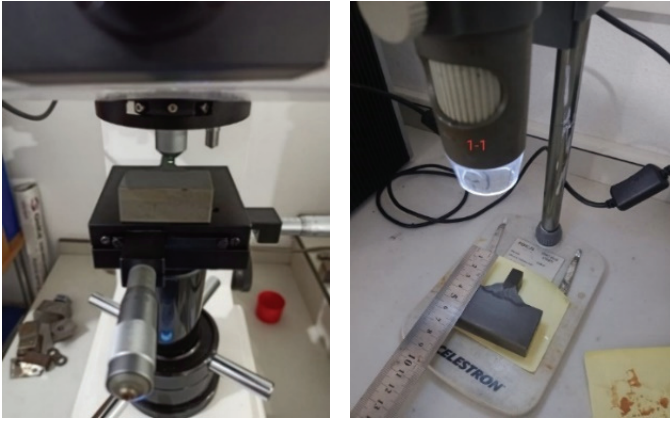
*Şekil 2.7 - IPE270 S275JR kiriş gövde ve flanş için çekme numuneleri ile kaynak makro test numuneleri*



Test kirişinin gövde ve başlıklarından alınan 9 adet çekme testi numunesinden (Şekil 2.7) elde edilen ortalama değerler Çizelge 2.1’ de, her kaynak metodundan hazırlanan 5 set numune (Şekil 2.7) için yapılan Makro testlerin ortalama sonuçları ise Çizelge 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.8 - Tüm numune kaynakları için kaynak sonrası radyografi (RT) ile kalite kontrol.



Şekil 2.9 - Kaynak bölgesi Vickers sertlik ve kaynak nüfuziyet ölçümleri.

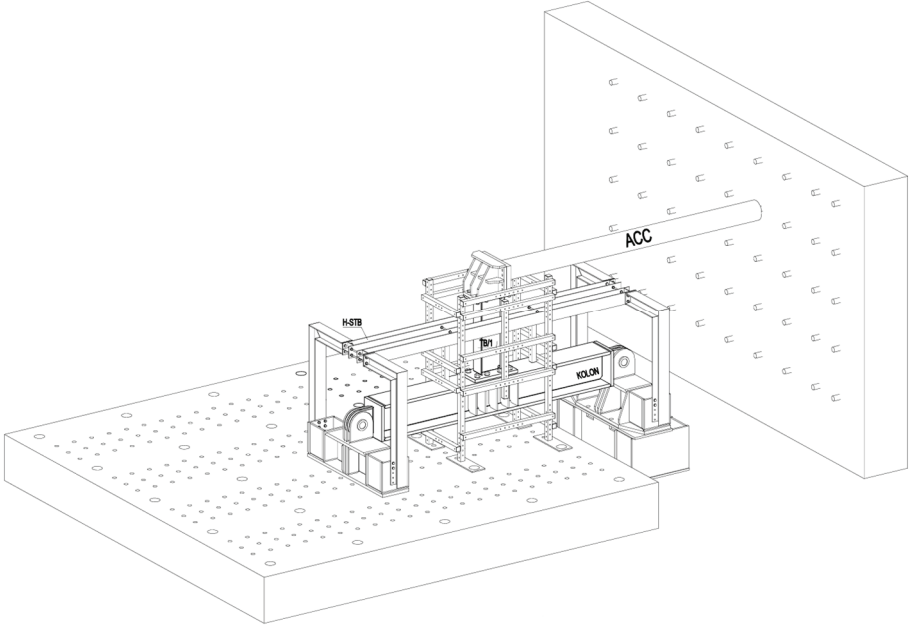
Çizelge 2.1 - Çekme testi sonuçları

IPE270 S275JR	Rp %0.2 (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
Gövde	306.3	29.2
Başlık	306.8	30.2

Çizelge 2.2 - Makro test sonuçları

	Kaynak Sertliği Vickers H10			Kaynak Nüfuziyeti (mm)
	Ana Metal	ITAB	Kaynak	
Grup I	190	228	245	2.05
Grup II	191	223	236	3.47
Grup III	189	235	245	1.69

İmalat ve kalite kontrol testleri tamamlanan numuneler ve deney düzeneği İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı' na sevk edilerek hazırlanmış olan imalat ve montaj projeleri (Şekil 2.10) uyarınca kurulumu yapılmıştır.

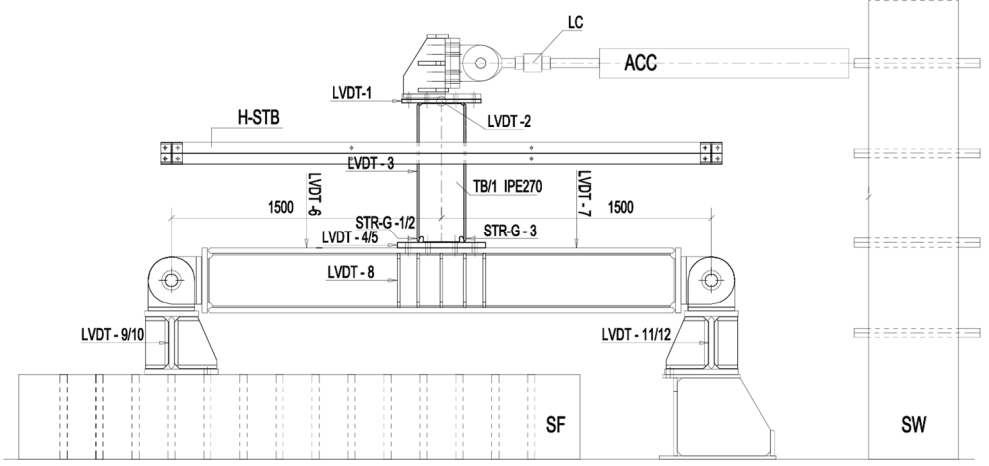


Şekil 2.10 - Test düzeneği

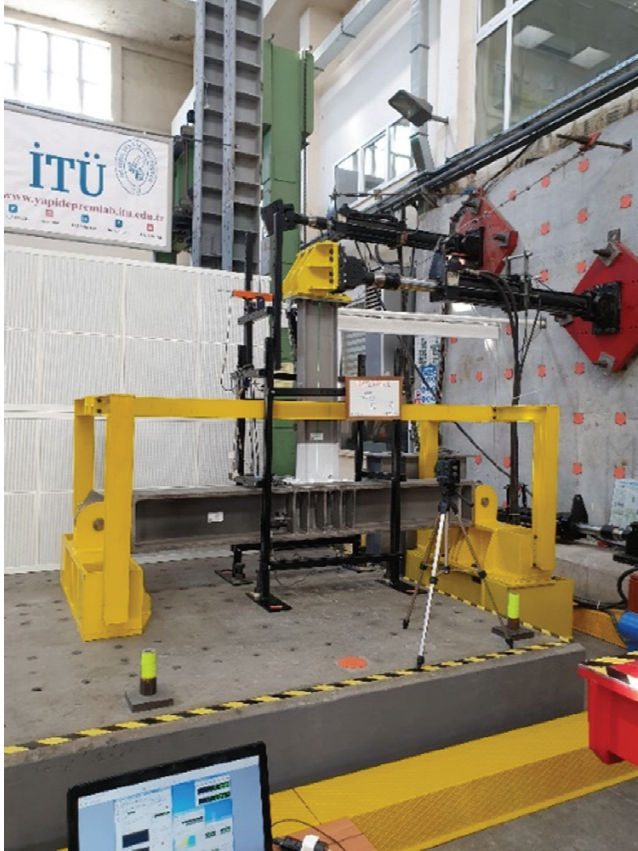
Planlanan testler için kat yüksekliği 3m olan, “I” kesitli kolon ve kirişten teşkil bir moment çerçeve esas alınmış (Şekil 2.4 ve 2.10 ve 2.11), Test kiriş kesiti IPE270 S275JR olarak seçilmiş, alın levhası olarak 30 mm et kalınlığında 255x490mm S355J2+N levha kullanılmıştır.

Kiriş-Kolon bağlantısı için 2x4 adet M27 bulon kullanılmıştır.

Kolon ise yapma “I” kesitinde, 30x300mm S355JR flanş ve 15x296mm S355JR gövde levhasından teşkil edilmiş ve mafsallı olarak mesnetlendirilmiştir.



Şekil 2.11 - Test Düzenegi ve veri toplama (enstrümantasyon) noktaları



Şekil 2.12 - Genel görünüş

Test için 609.6mm dinamik, 619.8mm statik stroka sahip 250kN yükleme yapabilen MTS marka hidrolik veren (ACC) ve 250kN kapasiteli MTS marka yük hücresi (LC), veri toplama ekipmanı olarak ise kiriş, kolon ve mesnet ötelemeleri için 12 adet deplasman ölçer (LVDT), kiriş-alın levhası kaynaklarındaki gerilme ölçümleri için ise 3 adet gerinim ölçer (Strain Gauge / STR-G) kullanılmıştır (Şekil 2.11).

Düzlem dışı öteleme ve burkulma stabilitesi için test kirişi sürtünmesiz olarak kılavuzlanmıştır (H-STB) (Şekil 2.10 ve 2.11).

Her numune için ortam ve numune sıcaklıkları ölçülmüş, 17-24 °C arasındaki değerlerde testler gerçekleştirilmiştir.

Üretilen numune bilgilerini içeren matris Çizelge 2.3’de verilmiştir. İki tip kiriş numunesinin 1890mm sistem açıklığına sahip ilki (Tip I), TBDY 2018 Tablo 9B.1 doğrultusunda süneklik düzeyi yüksek çerçeve kriteri için verilen minimum kiriş açıklığı/enkesit yüksekliği oranının 7,0 değerine, 2580mm sistem açıklığına sahip ikincisi (Tip II) ise 9,56 değerine karşılık gelmektedir.

Çizelge 2.3 - Numune matrisi.

Grup	FEMA350/SAC2000 Çevrimsel Yükleli Süneklik Testleri			
	Tip I		Tip II	
	Etiket No	L <sub>Sistem</sub> (mm)	Etiket No	L <sub>Sistem</sub> (mm)
I	GMAW CO <sub>2</sub>	TB.1.1	TB.1.7.L	
		TB.1.2	TB.1.8.L	2580
		TB.1.3	TB.1.9.L	
II	SMAW Bazık	TB.1.14	TB.1.17.L	
		TB.1.15	TB.1.18.L	2580
		TB.1.16	TB.1.19.L	
III	GMAW CO <sub>2</sub> +Ar	TB.1.24	TB.1.27.L	
		TB.1.25	TB.1.28.L	2580
		TB.1.26	TB.1.29.L	

### 3. TESTLER

#### 3.1. Birinci grup numune testleri (GMAW + %100CO<sub>2</sub>)

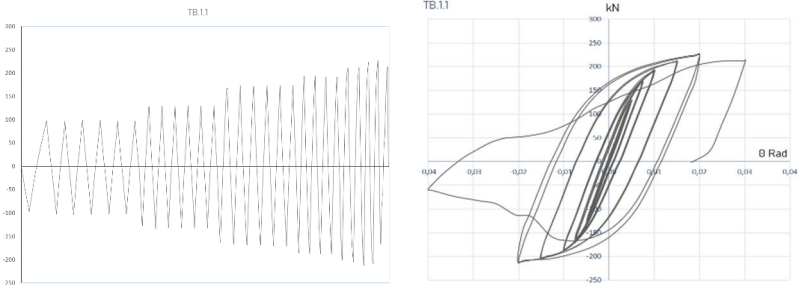
##### 3.1.1. Birinci tip numuneler (L=1890mm)

##### Birinci grup, birinci tip, bir numaralı numune TB.1.1 testi;

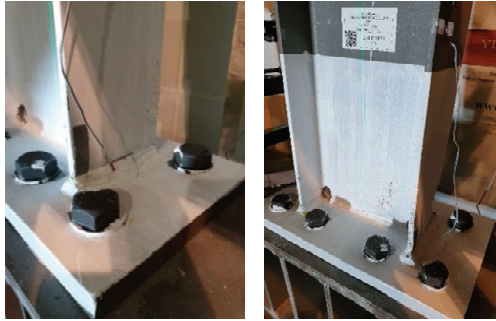
Bir nolu testte TB.1.1 numunesinin, 0,03 Radyan dönme açısına karşılık gelen 27nci çevrimde (7. Adım, birinci çevrim) flanş kaynağı çatlamış, toplamda 28 inci çevrimde tamamen kırılmıştır. Flanş ve gövdedeki plastikleşme bölgeleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.1 - TB.1.1 Numunesi



Şekil 3.2 - TB.1.1 Yükleme protokolü ve Kuvvet-Öteleme açısı döngüsü.

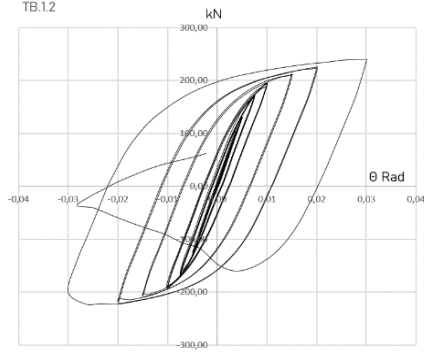


Şekil 3.3 - TB.1.1 çevrim sayısı 27, flanş kaynağında çatlak



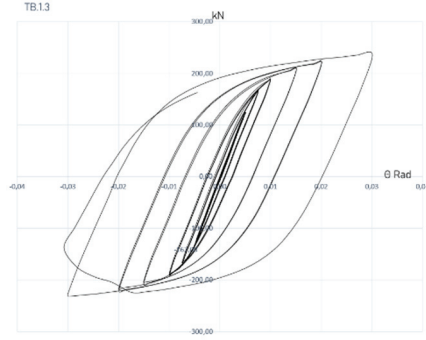
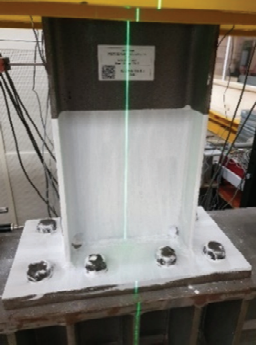
Şekil 3.4 - TB.1.1 çevrim sayısı 27, flanş kaynağında kırılma.

Birinci grup, birinci tip, iki numaralı numune TB.1.2 testi;



Şekil 3.5 - TB.1.2 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç. 27)

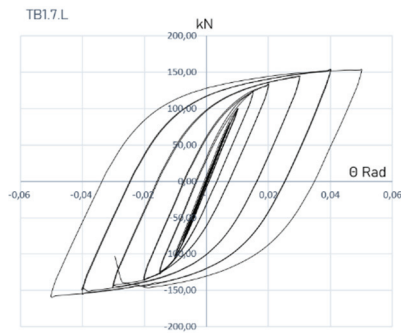
Birinci grup, birinci tip, üç numaralı numune TB.1.3 testi;



Şekil 3.6 - TB.1.3 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.27)

### 3.1.2. İkinci tip numuneler ( $L=2580mm$ )

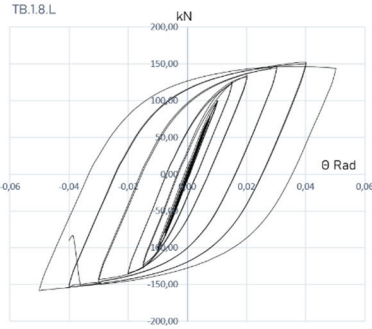
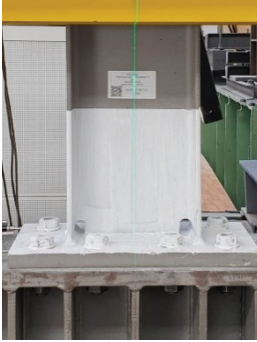
Birinci grup, ikinci tip, bir numaralı numune TB.1.7.L testi;



Şekil 3.7 - TB.1.7.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.32).

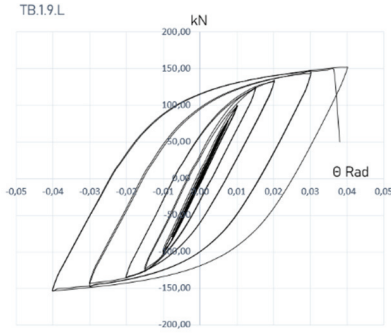
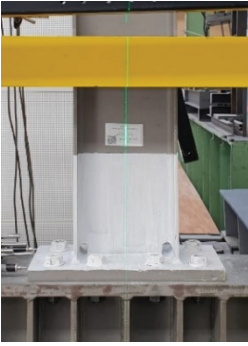


**Birinci grup, ikinci tip, iki numaralı numune TB.1.8.L testi;**



*Şekil 3.8 - TB.1.8.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.31).*

**Birinci grup, ikinci tip, üç numaralı numune TB.1.9.L testi;**

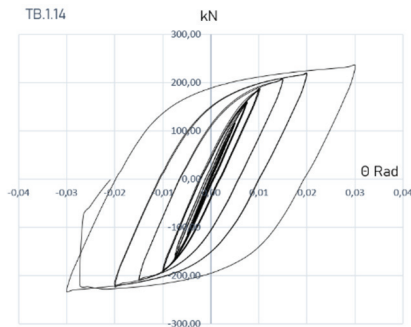
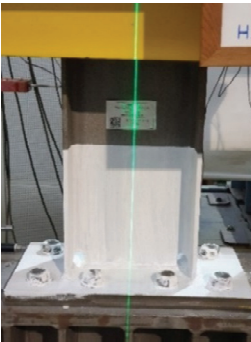


*Şekil 3.9 - TB.1.9.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.30).*

### 3.2. İkinci grup numune testleri (SMAW + Bazık)

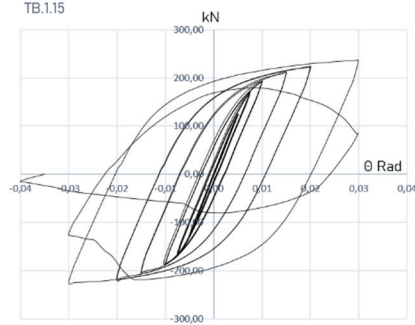
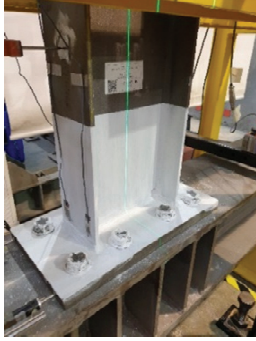
#### 3.2.1 Birinci tip numuneler

**İkinci grup, birinci tip, bir numaralı numune TB.1.14 testi;**



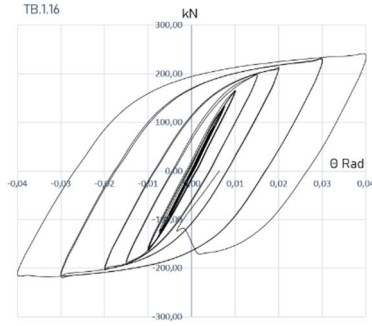
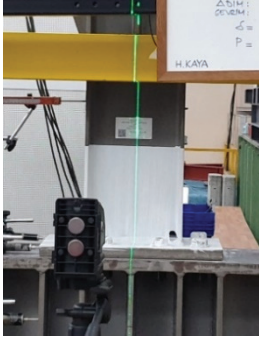
*Şekil 3.10 - TB.1.14 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kesitinde kırılma (Ç.28).*

**İkinci grup, birinci tip, iki numaralı numune TB.1.15 testi;**



Şekil 3.11 - TB.1.15 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kesitinde kırılma (Ç.28).

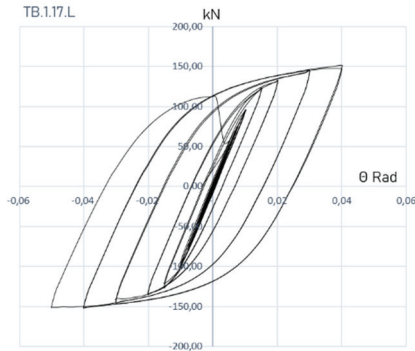
**İkinci grup, birinci tip, üç numaralı numune TB.1.16 testi;**



Şekil 3.12 - TB.1.16 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kesitinde kırılma (Ç.30).

**3.2.2. İkinci tip numuneler**

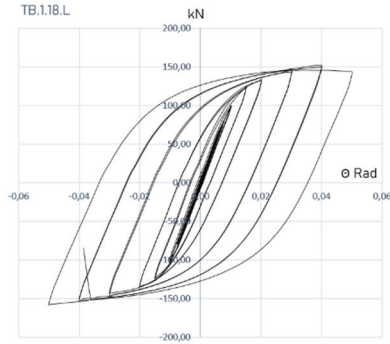
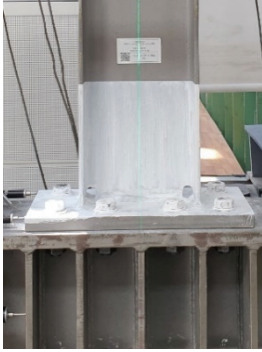
**İkinci grup, ikinci tip, bir numaralı numune TB.1.17.L testi;**



Şekil 3.13 - TB.1.17.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kesitinde kırılma (Ç.31).

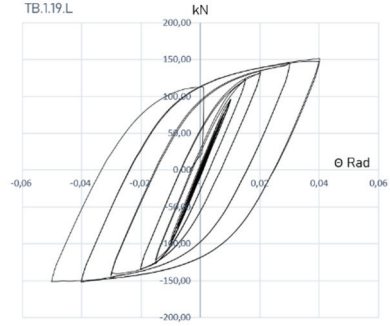
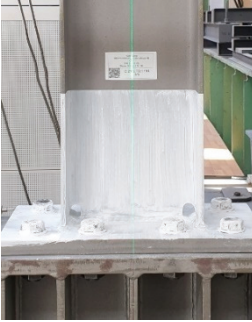


**İkinci grup, ikinci tip, iki numaralı numune TB.1.18.L testi;**



Şekil 3.14 - TB.1.18.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kesitinde kırılma (Ç.32).

**İkinci grup, ikinci tip, üç numaralı numune TB.1.19.L testi;**

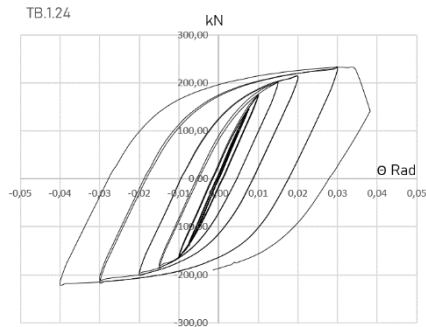
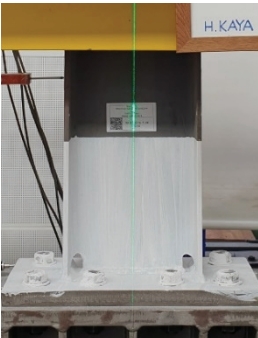


Şekil 3.15 - TB.1.19.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kesitinde kırılma (Ç.31).

**3.3. Üçüncü grup numune testleri (GMAW +%20 CO<sub>2</sub> + %78-79 Ar)**

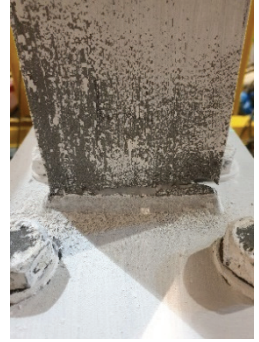
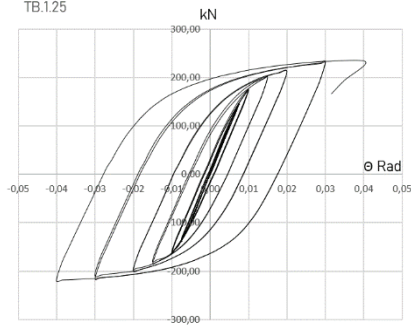
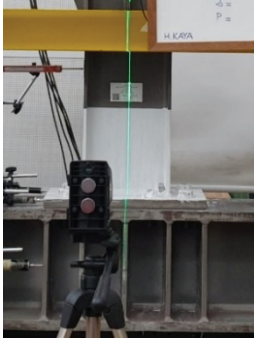
**3.3.1. Birinci tip numuneler**

**Üçüncü grup, birinci tip, bir numaralı numune TB.1.24 testi;**



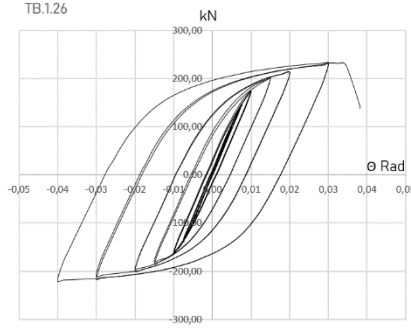
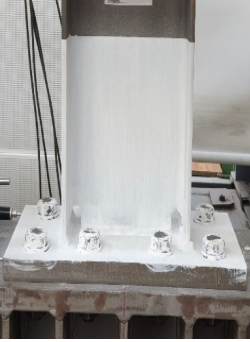
Şekil 3.16 - TB.1.24 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.29).

Üçüncü grup, birinci tip, iki numaralı numune TB.1.25 testi;



Şekil 3.17 - TB.1.25 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.29).

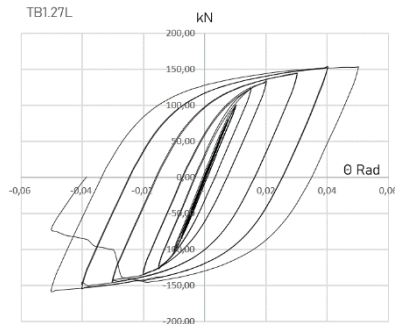
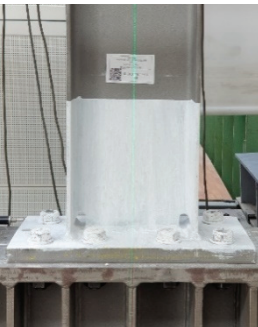
Üçüncü grup, birinci tip, üç numaralı numune TB.1.26 testi;



Şekil 3.18 - TB.1.26 Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.29).

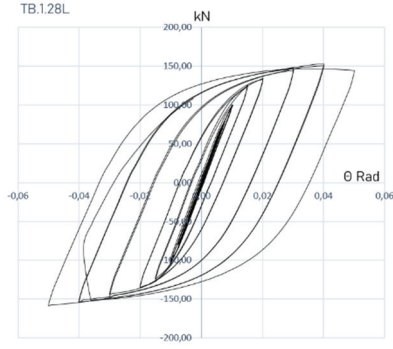
### 3.3.2. İkinci tip numuneler

Üçüncü grup, ikinci tip, bir numaralı numune TB.1.27.L testi;



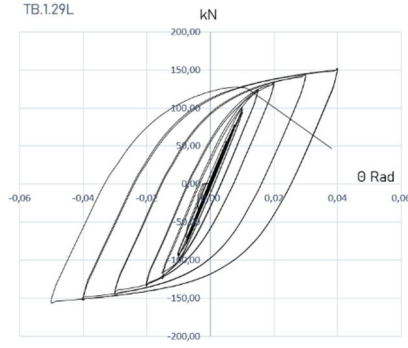
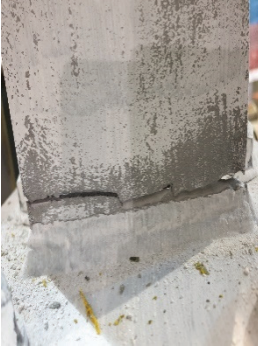
Şekil 3.19 - TB.1.27.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.32).

## Üçüncü grup, ikinci tip, iki numaralı numune TB.1.28.L testi;



Şekil 3.20 - TB.1.28.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.32).

## Üçüncü grup, ikinci tip, üç numaralı numune TB.1.29.L testi;



Şekil 3.21 - TB.1.29.L Kuvvet-Öteleme Açısı döngüsü ve flanş kaynağında kırılma (Ç.31).

Çizelge 3.1 - Birinci tip numuneler için çevrimsel yüklemeli süneklik testleri özeti.

Grup/Tip No	Etiket No	L <sub>sistem</sub> (mm)	t (°C)	Kırılma anındaki çevrim sayısı	Teyit edilen görelî kat ötelemesi (Radyan)	Kırılma yeri
I / 1	TB.1.1	1890	17	27	0,02	Füzyon hattı
	TB.1.2		15	27	0,02	Füzyon hattı
	TB.1.3		15	27	0,02	Füzyon hattı
II / 1	TB.1.14	1890	18	28	0,02	Kiriş
	TB.1.15		19	28	0,02	Kiriş
	TB.1.16		19	30	0,03	Kiriş
III / 1	TB.1.24	1890	21	29	0,03	Füzyon hattı
	TB.1.25		20	29	0,03	Füzyon hattı
	TB.1.26		21	29	0,03	Füzyon hattı

Çizelge 3.2 - İkinci tip numuneler için çevrimsel yüklemeli süneklik testleri özeti.

Grup/Tip No	Etiket No	$L_{sistem}$ (mm)	t (°C)	Kırılma anındaki çevrim sayısı	Teyit edilen görelî kat ötelemesi (Radyan)	Kırılma yeri
I / 2	TB.1.7.L	2580	21	32	0,04	Füzyon hattı
	TB.1.8.L		21	31	0,04	Füzyon hattı
	TB.1.9.L		22	30	0,03	Füzyon hattı
II / 2	TB.1.17.L	2580	22	31	0,04	Kiriş
	TB.1.18.L		21	32	0,04	Kiriş
	TB.1.19.L		22	31	0,04	Kiriş
III / 2	TB.1.27.L	2580	23	32	0,04	Füzyon hattı
	TB.1.28.L		24	32	0,04	Füzyon hattı
	TB.1.29.L		24	31	0,04	Füzyon hattı

#### 4. ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Deprem etkileri altında büyük plastik şekil değiştirmelere maruz kalabilecek yapılar için süneklik kapasitesi toptan göçme mekanizmasının önünde en büyük güvence olarak günümüz yönetmeliklerinde yer almaktadır. Elbette bu şartları sağlayabilmek için mühendislik tasarımın başında “yüksek sünek” veya “normal sünek” kabullerinin ötesine geçip yapının tasarlandığı matematik modele uygun davranabileceği detayları seçmek, bu detayların bir bütün olarak yapı davranışına etkilerini bilmek, üretim ve montajları sırasında çıkabilecek mahsurları öngörmek mühendislik temel prensipleri itibariyle önemlidir.

Betonarme yapılara kıyasla malzeme katsayılarının daha düşük olması, modelleme, analiz, tasarım, imalat ve montaj hatalarını daha az tolere edebilme yeteneğine sahip olmaları sebebi ile odak konumuz olan çelik yapılar, doğal olarak tasarım, üretim ve montaj dönemlerindeki hatalara karşı daha hassastırlar.

Günümüzde üretim hızının yüksek, detaylarının nisbeten daha basit ve işçilik maliyetlerinin düşük olması gibi sebeplerle tercih edilen kaynağı bir birleşim aracı olarak bulon ve perçinden ayıran önemli yapısal farklılıklar bulunmaktadır. Öncesinin, kaynaklama anının ve sonrasının birer ısıl işlem olmaları sebebi ile ana malzeme kalınlığına, karbon eşdeğerine ve uygulanan metoda bağlı olarak metalürjik mikro yapıda değişiklikler oluşur. Birleşim detayında tasarım sırasında öngörüleyen artık gerilmelere sebep olabilir. Yapı değişikliği sebebi ile füzyon ve ısı tesiri altındaki bölgeler kırılma hassasiyetine sahip alanlardır.

Uygulama öncesinde, sırasında ve sonrasında gösterilmesi gereken özen ve alınması gereken tedbirler her kaynak metoduna göre farklılık gösterir. Kaynak malzemesi ve yönteminin seçimi atölye, şantiye ve atmosferik şartlar ile proje ve detayına özel olarak yapılır. Tüm bu parametre ve usüllerin seçimi, yöntemlerin belirlenmesi mühendislik hizmeti altındaki yapılar için atölye inisiyatifine bırakılmayacak kadar önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, yönetmelik maddesi üzerinde araştırma yapmak değildir. Birinci bölümde de açıklandığı gibi ülkemiz yapısal çelik atölyelerinde tercihen kullanılan kaynak yöntemlerinin yönetmeliğimiz kapsamında performanslarını incelemektir.

Bu amaçla, yönetmelik asgari şartlarını referans olarak test düzeneği oluşturmak, aynı zamanda çalışma sonucunda elde edilecek bilgiler için kıyas veya referans düzlemi oluşturmak açısından anlam teşkil etmektedir.

Ancak, doğal olarak bu referansla üretilen test numunelerinden elde edilen sonuçlar, yönetmelik maddelerinin ülkemiz üretim şartları doğrultusunda irdelenmesi için öncü veriler oluşturmuş ve her ne kadar doğrudan amaç olmasa da dolaylı olarak yönetmelik ilgili madde ve şartları üzerinde yorum yapma imkanı ortaya çıkmıştır.

Bu araştırma için 18 Mart 2018 yılı 30364(Mükerrer) sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak 1 Ocak 2019 yılında yürürlüğe giren 2018 yılı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Moment Aktaran Çelik Çerçevelerde Kiriş-Kolon Birleşim Detayları Ek9B Bölümü, Md.9B.2 “Tam Dayanımlı Bulonlu Alın levhalı Birleşimler” alt bölümünde yer alan “Rijitlik Levhasız, 4 Bulonlu, Alın Levhalı Birleşim” referans alınmıştır.

Bu birleşim detayının test numunesi olarak seçilmesinin iki nedeni bulunmaktadır. Birincisi, kiriş ile alın levhası birleşiminde herhangi bir berkitme veya rijitlik levhası bulunmamaktadır. İkincisi ise ana kiriş enkesitinde Md. 9B.5 gibi bir zayıflatma ön görülmemiştir. Bu nedenle birleşim kaynağının performansının tam olarak gözlemlenebileceği öngörülmüştür.

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen tam ölçekli deneylerde aşağıdaki bilgilere ulaşılmıştır;

1. Süneklik düzeyi yüksek çerçeveler için minimum 7 olarak alt limiti verilen kiriş açıklığı/enkesit yüksekliği oranına ait Tip I numunelerinde görelî kat ötelemesi değeri I. Grup numuneler için 0,02 Radyan, II. Grup numuneler için 0,02 ve 0,03 Radyan, III. Grup numuneler için 0,03 Radyan olarak gerçekleşmiştir. Kırılmalar I ve III. Grup kaynaklar için kaynak füzyon bölgesinde, II. Grup kaynak için kiriş flanşı enkesitinde meydana gelmiştir (Çizelge 3.1).

Elde edilen görelî kat ötelemesine ait değerler, 0,04 Radyan olan yönetmelik minimum koşulunun altında kalmıştır.

2. Kiriş açıklığı/enkesit yüksekliği oranının 9,56 olarak tayin edildiği II. Tip numunelerinde görelî kat ötelemesi değeri I. Grup numunelerin biri 0,03 Radyan diğeri ikisi 0,04 Radyan, II. Grup numuneler için 0,04 Radyan, III. Grup numuneler için 0,04 Radyan olarak gerçekleşmiştir. Kırılmalar I ve III. Grup kaynaklar için kaynak füzyon bölgesinde, II. Grup kaynak için kiriş flanşı enkesitinde meydana gelmiştir (Çizelge 3.2).

I.Grup kaynak yöntemi için kararsız bir davranışın devam ettiği, II ve III. Grup kaynak yöntemleri için ise yönetmelik asgari şartlarını sağladıkları söylenebilir. Ancak I ve III. Grup kaynak yöntemleri ile üretilen numunelerdeki kırılmaların halen kaynak füzyon bölgesinde olduğu da ayrıca dikkat edilmesi gereken bir husus olarak tespit edilmiştir.

3. TBDY 2018 Madde 9 Tablo 9.1’de deprem yükleri etkisindeki elemanların birleşim ve eklerinde kullanılacak kaynak metali özellikleri ile ilgili olarak talep edilen minimum değerler ile bu araştırma kapsamında kullanılan kaynak metallerinin özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 - Kaynak metalleri karşılaştırması.

	TBDY 2018		Araştırma kapsamındaki kaynak metalleri		
	E480	E550	I Grup	II Grup	III Grup
Kaynak metali sınıfı	E480	E550	G 42 3 C G4Si1 G 42 3 M G4Si1	E 46 B32 H5	T 46 2 P C 1
Karakteristik akma gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	400	470	470	480	500
Min. Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	480	550	570	580	560
Min. Uzama (%)	22	19	25	30	25
Çentik tokluğu (CVN)	-18 °C min. 27J		-30 °C 60J	-20 °C 180J	-20 °C 70J

Görülebileceği üzere araştırma kapsamında seçilen tüm metotlarda kullanılan kaynak metallerine ait özellikler, yönetmelik asgarisi üzerindedir.

Buradan hareketle, test sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda, yönetmelik kapsamında yapılan asgari tarifin gerekli ancak tek başına yeterli olmadığı ifade edilebilir.

## 5. ÖNERİLER

Bu araştırma kapsamındaki testlerden elde edilen veriler incelendiğinde, özellikle sismik ve dinamik etkiler altındaki elemanlar, birleşimler veya taşıyıcı sistemler ile süneklik düzeyi yüksek çerçeveler için aşağıda verilen maddeler öne çıkmaktadır;

1. Bu tip sistemlerde derin nüfuziyetli, tam penetrasyonlu, çentik darbe tokluğu yüksek kaynak metali seçimi, olası kırılmanın kaynak yerine malzemede oluşması açısından alınması gereken bir tedbir olarak karşımıza çıkmaktadır.
2. Tasarımda, imalatta ve montajda çentik etkisi oluşturabilecek zorlanmış detaylardan ve süreksizliklerden kaçınılmalıdır.
3. Altlık veya kök plakası kullanılacak ise çentik etkisi yapabilecek metal kök plakası yerine seramik plaka tercih edilmeli, kaynak başlangıç ve bitişlerindeki krater bölgelerinin çentik etkisine sebep olacağı hususu dikkatten kaçırılmamalıdır.
4. TBDY 2018 asgari şart tanımları gerek kaynak metali gerekse de bu tip birleşimlerin uygulama sınırları açısından genişletilmeli ve ilave koşullar ile desteklenmelidir.

Bu amaçla gerçek boyutlu numuneler üzerinde yapılacak test sayı ve tipleri artırılmalıdır.

5. Et kalınlığı yüksek levha ve profiller için düzlemine dik kuvvetler altında oluşabilecek laminer yırtılma ile ilgili kısıtlar ve kontrol mekanizmaları yönetmelik kapsamına dahil edilmelidir.

6. Kaynak bölgesine enerji girişini optimize edebilmek, artık gerilme riskini düşürmek ve birleşim bölgesinde yapısal değişimi risk oluşturmayacak seviyelerde tutabilmek açısından kaynak öncesi, kaynak sırası ve kaynak sonrası tüm işlemler ile bunların sonuçları konusunda asgari bilgi sahibi olmak ve ana metal ile kaynak metali ve yönteminin seçimi konusunda tasarımcı olarak inisiyatif alınması önem teşkil etmektedir.

Bu amaçla, tasarımda, imalat ve montajda profesyonel olarak hizmet veren inşaat mühendisi meslektaşlarımızın, bir birleşim elemanı olarak kaynağa yaklaşımı konusunda farkındalığın artırılması önem kazanmaktadır.

### Semboller

$b_p$	: Alın levhası genişliği
$C_{eş}$	: Karbon eşdeğeri
$d_b$	: Kiriş enkesit yüksekliği
$d_c$	: Kolon enkesit yüksekliği
$E$	: Elastisite modülü
$g$	: Bulonlar arası yatay uzaklık
$K$	: Gerilme yoğunluk faktörü
$l_h$	: Plastik mafsalın kolon yüzünden uzaklığı
$M$	: Moment
$M_p$	: Plastik moment
$N$	: Tekrar sayısı
$P_{fi}, P_{fo}$	: Kiriş flanşına bulon mesafesi
$R$	: Dönme kapasitesi
$t_{bf}$	: Kiriş başlık kalınlığı
$t_p$	: Alın levhası kalınlığı
$\Theta_p$	: Plastik dönme açısı
$\sigma$	: Normal gerilme
$\tau$	: Kayma gerilmesi

### Kaynaklar

- [1] Gross, J.L., (1998), Design Guidelines For The Seismic Modification Of Welded Steel Moment Buildings, NIST Sp 931.
- [2] TBDY (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye



- [3] Changshi M., Fisher J., (2001), Effect of Local Details on Ductility of Welded Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, Vol 127, Issue 9, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:9\(1036\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:9(1036))
- [4] Chen Y., Huo J., Zhou X., Chen W., (2023), Dynamic Behaviors of Butt Welds and Fillet Welds Under Intermediate Strain Rate, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 201 <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107683>
- [5] Chen Y., Huo J., Zhou X., Chen W., (2021), Dynamic Tensile Behaviors of Welded Steel Joint Material, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 183, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106700>
- [6] Chen C., Lee J., Lin M., (2003), Behavior of Steel Moment Connections with a Single Flange Rib, *Engineering Structures*, Vol 25, Issue 11, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00104-4)
- [7] Dexter R., Melendrez M., (2000), Through-Thickness Properties of Column Flanges in Welded Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, Vol 126, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(24)
- [8] Dubina D., Stratan A., (2002), Behavior of Welded Connections of Moment Resisting Frames Beam to Column Joints, *Engineering Structures*, Vol 24, Issue 11, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00091-3)
- [9] Haghollahi A., Ahmadi H., (2018), Cyclic Behaviour of Steel Beam to Column Moment Connections Using Different Sizes of Flange Plates and Reinforced by a Single Rib Plate, *Civil Engineering Journal*, Vol 4, DOI:10.28991/cej-030975
- [10] Lu L., Ricles J., Mao C., Fisher J., (2000), Critical Issues in Achieving Ductile Behaviour of Welded Moment Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 55, DOI:10.1016/S0143-974X(99)00092-9
- [11] Nakashima M., Roeder C., Maruoka Y., (2000), Steel Moment Frames for Earthquakes in Unites States and Japan, *Journal of Structural Engineering*, Vol 126, Issue 8, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:8\(861\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:8(861))
- [12] Ricles J., Mao C., Lu L., Fisher J., (2003), Ductile Details for Welded Unreinforced Moment Connections Subject to Inelastic Cyclic Loading, *Engineering Structures*, Vol 25, Issue 6, DOI:10.1016/S0141-0296(02)00176-1
- [13] Ricles J., Fisher J., (2002), Development and Evaluation of Improved Details for Ductile Welded Unreinforced Flange Connections, SAC/BD-00/24
- [14] EN1090-2 (2018), Execution of Steel Structures and Aluminium Structures Technical Requirements for Steel Structures, European Committee for Standardization; Brussels, Belgium.
- [15] FEMA 350 (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings, Washington DC, USA
- [16] Tülbentçi, K. (1990), MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı, Gedik Holding, Istanbul, Türkiye
- [17] AWS D.1.8/D1.8M (2016), Structural Welding Code-Seismic Supplement, American Welding Society, MA, USA
- [18] IdeaStatiCa V24 (2024) Sonlu Elemanlar Yazılımı, Çek Cumhuriyeti