

YAPI ÇELİKLERİNİN KAYNAKLANABİLİRLİĞİ

Murat VURAL(*), Filiz PİROĞLU(**), Özden B. ÇAĞLAYAN(**), Erdoğan UZGİDER(**)

Bu yazıda, çelik yapı tasarım ve imalatında çok büyük önem taşıyan “kaynaklanabilirlik” özelliği ve kaynaklama sonucu meydana gelen bazı problemler konu edilecektir.

1. KAYNAK KABİLİYETİNİN TANIMI

Kaynaklı yapı elemanlarının imalat amacı, mümkün olan en düşük maliyetle imal edilmesi, fonksiyonunu tam olarak yerine getirmesi ve işletmede uzun süreli kullanılmasıdır. Metalsel malzemeden bir yapı elemanın kaynak prosesinde, belirli bir kaynak yönteminin kullanıldığı uygun bir imalat sürecinde, maddelerin kaynakla birleştirilmesi sözkonusudur. Burada kaynak bölgesinin yerel özelliklerinin ve birleştirilen parçaların tüm konstrüksiyona etkilerinin, önceden belirlenmiş koşulları sağlaması gerekir. Kaynak kabiliyeti, üç temel faktöre, Malzeme, Konstrüksiyon ve İmalat’a aynı ağırlıkla bağlıdır (Şekil 1).



Şekil 1 - Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler ve Özelliklerle İlişkisi

(*) İTÜ Makina Fakültesi

(**) İTÜ İnşaat Fakültesi

Kaynak kabiliyeti ile bu temel faktörler arasında, aşağıdaki üç özellik yer alır:

- Malzemelerin kaynağa uygunluğu
- Konstrüksiyonun kaynak emniyeti ve
- İmalatın kaynak yapılabirliği.

Bu özelliklerin herbiri, kendi içinde malzemeye, konstrüksiyona ve imalata bağlı olmasına rağmen ağırlıkları birbirinden farklıdır.

Bir malzeme, eğer belirli bir konstrüksiyon ve imalat şeklindeki özellikleri, kendisinden beklenen her talebe uygun bir kaynak kalitesine ulaşabiliyorsa, o malzeme kaynağa uygun demektir.

Bir konstrüksiyon, eğer belirli malzeme ve imalat yöntemleri ile oluşturulduktan sonra, önceden tespit edilmiş işletme şartları altında kendisinden beklenen fonksiyonları yerine getirebiliyorsa, kaynak emniyetine sahip demektir.

Bir kaynaklı imalat, belirli malzemelerden oluşturulmuş bir konstrüksiyon halinde, önceden tespit edilmiş imalat şartları altında, kolayca imal edilebiliyorsa, kaynak yapılabirliğe sahip demektir. Tablo 1’de yukarıda sayılan faktörler bir arada verilmiştir.

Kaynak işleminde tatminkar bir kalitenin sağlanması, özellikle aşağıdaki nedenlerle güçtür:

- Kaynak işlemi, üretim sürecinde optimize edilmiş malzeme yapısına, sürekli olarak müdahale edilmesi demektir; çünkü termik olarak sınırlı içyapı dönüşümü, atmosferden gaz kapma, birleştirme yüzeyindeki katışkılar nedeniyle, malzemenin mekanik-teknolojik özellikleri değişir.
- Kaynak işlemleri, günümüzde hâlâ çoğunlukla elle veya ancak kısmen mekanize şekilde uygulanmaktadır. Bu nedenle mamullerin kalitesi, diğer bir imalat yönteminde olmadığı kadar insana ve tekrarlanabilir performans açısından insanın yeteneklerine bağlıdır.
- Kaynaklı birleştirmelerin kalitesinin değerlendirilme olanakları sınırlıdır. Özellikle eritme kaynağıyla birleştirilmiş kalın levhalarda, ayrıca köşe ve

bindirme dikişlerde, mevcut muayene yöntemleri, güvenilir kalite değerlendirmesi açısından sınırlı oranda bilgi verebilmektedir.

Tablo 1 - Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler

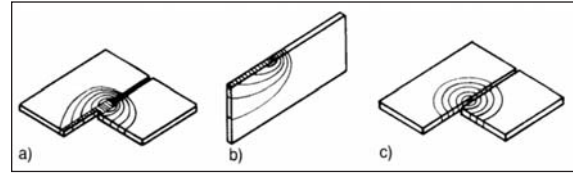
Malzeme (Kaynağa uygunluk)	Kimyasal bileşim	Sertleşme eğilimi Yaşlanma Gevrek kırılma Sıcak çatılma Kaynak metali karışım oranı
	Metallurjik özellikler	Segregasyon Kalıksıklar Tane büyüklüğü İçyapı Anizotropi
	Fiziksel özellikler	Genleşme özelliği Isıl iletkenlik Erime sıcaklığı Mukavemet Tokluk
Konstrüksiyon (Kaynak emniyeti)	Konstrüktif şekillendirme	Kuvvet hatlarının akışı Dikişlerin konumu Parça kalınlığı Çentik etkisi Rijitlik farklılıkları
	Gerilme durumu	Gerilmelerin tür ve şiddeti Gerilmelerin eksen sayısı Zorlanma hızı Sıcaklık Korozyon
İmalat (Kaynak yapılabilirlik)	Kaynağa hazırlık	Kaynak yöntemi İlave malzemenin türü Birleştirme türü Ağız biçimi Ön tavlama İklim koşulları
	Kaynağın uygulanması	Isı girdisi Isının uygulanışı Kaynak sırası
	Kaynak sonrası işlemler	Isıl işlem Taşlama Dekapaj, temizleme

2. KAYNAKTA ISI GİRDİSİ

Kaynak işlemi, genel ısıl işlemlerden aşağıdaki bakımlardan ayrılır:

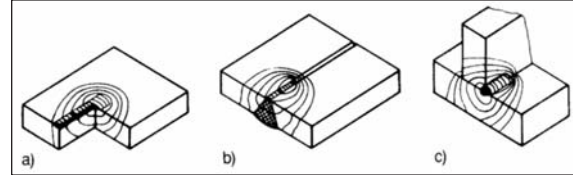
- Yüksek ısınma hızı
- Kısa tutma süresinde maksimum sıcaklık ve
- Yüksek soğuma hızı.

Güç yoğunluğuna, kaynak hızına ve malzeme türüne göre maksimum sıcaklık yüksek veya daha düşük ve esas malzemenin sıcaklığına düşüş, hızlı



Kaynakta düzlemsel sıcaklık alan örnekleri

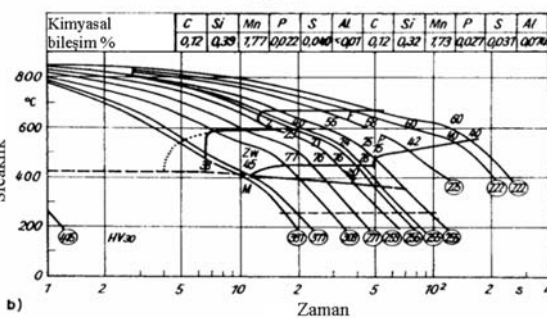
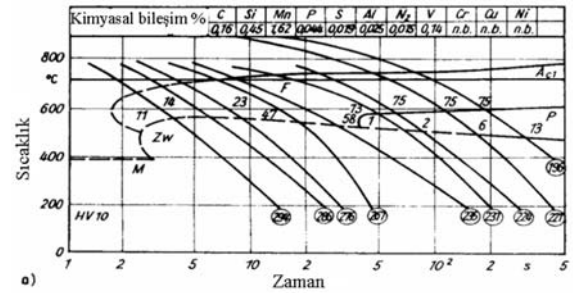
a)İnce saçlarda alın kaynağı, **b)**İnce bir sacın kenarında kaynak, **c)**İnce saçlar arasındaki birleştirme kaynağı



Kaynakta hacimsel sıcaklık alan örnekleri

a)Kalın bir levha üzerinde bir dikiş kaynağı, **b)**Bir V-dikişin kök bölgesinde sonraki paso, **c)**Kalın levhalar arasında içköşe kaynağı

Şekil 2 - Kaynaklı İmalatta En Çok Rastlanan Durumlar İçin Eşsıcaklık Eğrileri



Şekil 3 - H60 çeliği için (a) ZSD ve (b) Kaynak-ZSD diyagramlarının karşılaştırılması

veya yavaş olabilir. Bu davranışlar, kaynak bölgesindeki eşsıcaklık eğrileri ile gösterilebilir. Şekil 2, sabit tutulan bir t_x sıcaklığı için sıcaklık alanlarını göstermektedir.

Esas metalin, kaynak metalinin ısısının tesiri altındaki bölgesindeki (ITAB) sıcaklık dağılımının ve soğuma hızının bilinmesi halinde, kaynaktan sonra bu bölgede meydana gelebilecek içyapının tesbiti mümkün olabilmektedir. Bu amaçla Kaynak-ZSD diyagramları kullanılır. Şekil 3'te H60 çeliğinin ZSD diyagramı ve Kaynak-ZSD diyagramı karşılaştırılır.



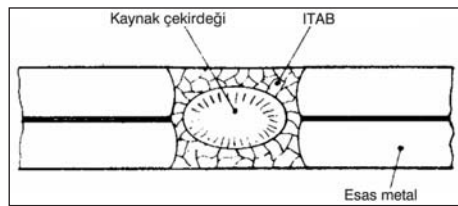
Şekil 4 - Kaynak ZSD Diyagramlarının Kullanılma Amaçları

malı olarak verilmiştir. Şekil 4'te ise Kaynak-ZSD diyagramlarının hangi amaçlar doğrultusunda kullanılabilirler açıklanmıştır.

3. KAYNAK BÖLGESİNİN YAPISI

Eritme kaynaklı bir birleştirmede oluşan yapı, eriyen esas metalden, eriyen ilave metalden ve esas metalin sınırlı bir ısının tesiri altındaki bölgesinden meydana gelir (ITAB) (bkz. Şekil 5 ve 6)

Fe-Fe₃C diyagramı, katılaşma sırasında termodinamik denge şartlarına dayanır. Kaynak bölgesinin erimiş banyosunda bu denge gerçekleşmez. Kaynak metali hızlı katılaşır ve çekirdek oluşumunu ve diyagramdaki dönüşüm sıcaklıklarını etkileyen çok sayıda refakat elemanları bulunur. Bu nedenle Fe-Fe₃C diyagramı, kaynak metalinde oluşan metalurjik reaksiyonların ancak kararlı durumlarını gösterir. Eritme kaynak işleminde, erimiş halde esas metal ve (birlikte kaynak metalini oluşturmak üzere) gerekli durumlarda katılan ilave malzemeler, sıvı durumda ve Likidüs çizgisinin hemen üzerinde bulunurlar. Burada her iki malzeme karışır ve içindeki mevcut gaz ve cürufırları dışarı atar. Devamında, Likidüs ve Solidüs çizgileri arasındaki sıcaklık bölgesinde katılaşma başlar ve çok sayıda difüzyon ve çekirdeklenme olayları meydana gelir.



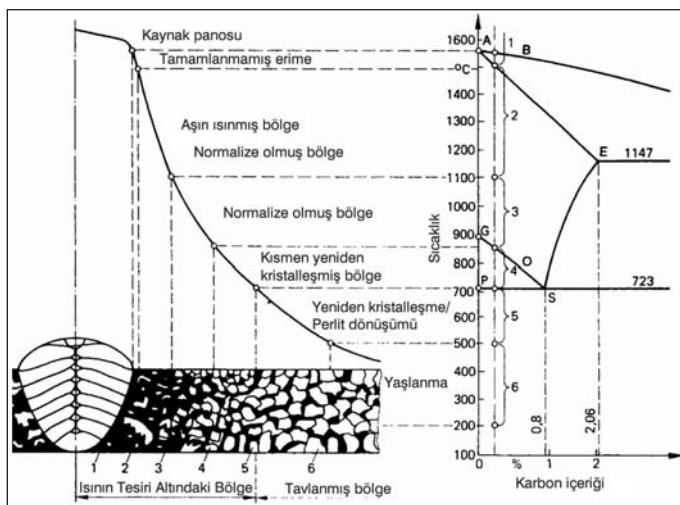
Şekil 5 - Direnç Kaynağında Kaynak Bölgesinin Yapısı

Kaynak metali döküm yapısı şeklinde katılaşır. Kristaller, esas metalden itibaren, ısı iletim yönünün zıt yönünde, eriyik ortasına doğru büyür. Bu kristaller genellikle uzundur ve dendritik yapıdadır. Isıl dengesizlik ve heterojen element dağılımı nedeniyle kristal segregasyonu meydana gelir. Malzeme ve imalat şartlarına bağlı olarak yerel ısınma nedeniyle kaynak metali, Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve esas metalin yapısal özellik bakımından birbirinden farklı içyapılara ve mekanik-teknolojik özelliklere olmasının hesaba katılması gerekir. Malzeme özelliklerinin bu yerel değişimi, dikiş çevresinde olumsuzluk yaratır.

Genellikle eriyen ve ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB'da), mümkün olduğu kadar ince taneli bir içyapı elde edilmeye çalışılır; bu sayede dayanım ve şekil değiştirme kabiliyeti aynı anda iyileştirilmiş olur. Bu duruma, herşeyden önce kısa süreli kaynak ısı çevrimiyle, çok pasolu kaynakla ulaşılabilir. Bu durumda alttaki pasolar ince taneli, yeniden kristalleşmiş yapı oluşturabilir veya daha sonradan uygulanacak bir ısıl işlemle, örneğin normalizasyon veya yeniden kristalleştirme tavlamaıyla ince taneli yapı elde edilebilir. Ancak ikinci seçenek, maliyetlerin düşürülmesi amacına uygun düşmez ve bu nedenle nadiren uygulanır.

4. ÇELİKLERİN KAYNAĞINDA ÇATLAMA PROBLEMİ

Kaynak açısından en önemli nokta, bazı tür çeliklerde görülen, yüksek sıcaklıktan itibaren hızlı soğuma sonucunda ortaya çıkan sertleşmedir. Çeliğin kimyasal bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak 64 HRC'ye kadar çıkabilen bu sert yapıya



Şekil 6 - Alaşımsız Çelikte Tek Pasolu Bir Eritme Kaynak İşleminde Kaynak Bölgesinin Demir-Demirkarbür (Fe-Fe₃C) Diyagramı Yardımıyla Analizi

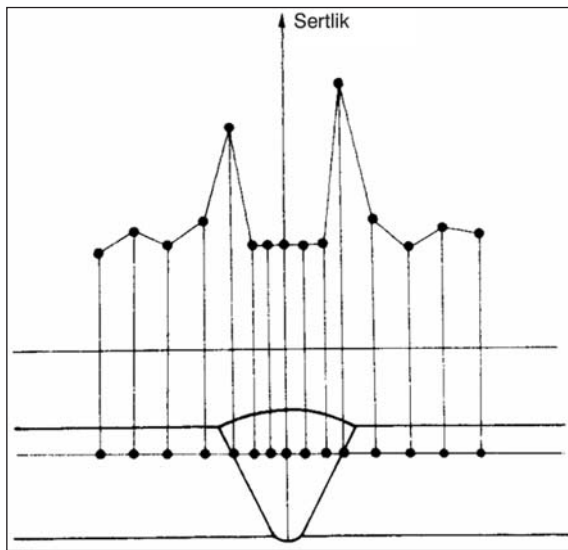
martenzit adı verilmektedir. Martenzit çok sert ve kırılğan bir yapıdır. Sertliği, çeliğin karbon miktarına bağlıdır. Uygulamada en yüksek sertlik, % 0,7-0,8 C içeren çeliklerde görülmektedir. Martenzitik yapının gelişmesinde, karbonun yanısıra en önemli etken, soğuma hızıdır. % 0,3'ten daha fazla karbon içeren çelikler, ancak yüksek sıcaklıktan itibaren suyun içine atılarak soğutulduklarında sertleşme göstermelerine karşın, alaşım elementi içeren çeliklerde çok daha yavaş soğuma hızlarında dahi sert ve kırılğan martenzitik yapı oluşabilmektedir.

Kaynak işleminde genellikle metal, önce erime sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa kadar ısınmakta, sonra da soğumaktadır. Yapılan deneyler ve ölçümler, kalın bir çelik parça üzerinde kaynak bölgesinin soğuma hızının, yüksek sıcaklığa kadar ısıtılmış ve suya atılarak soğutulmuş bir parçanın soğuma hızına eşit olduğunu göstermektedir. Bu bakımdan, belli bir miktarın üzerinde karbon ve alaşım elementi içeren çeliklerin kaynak bölgesinde böyle bir sert ve gevrek yapının ortaya çıkacağı, açıkça görülebilen bir olaydır.

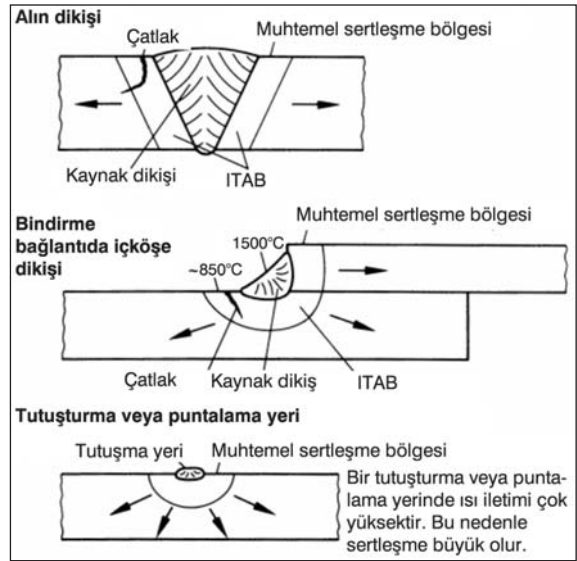
Şekil 7'de yapı çeliklerinin kaynağında, kaynak dikiş enkesitindeki tipik sertlik dağılımı verilmiştir.

IIW (International Institute of Welding = Uluslararası Kaynak Enstitüsü) tarafından, kaynak bölgesinde çatlama oluşmaması için, izin verilebilecek maksimum sertlik değeri 350 HV olarak belirtilmektedir.

Şekil 8'de ise, çeliklerin ark kaynağında sertliğin artması muhtemel bölgeler gösterilmiştir. Parça kalınlığı arttıkça soğuma sırasında iki boyutlu soğumadan üç boyutlu soğumaya geçilmektedir. Bu nedenle kalın parçalarda soğuma, ince parçalara



Şekil 7 - Kaynak Dikiş Enkesitinde Tipik Sertlik Dağılımının Şematik Gösterimi



Şekil 8 - Çeliklerin Ark Kaynağında Muhtemel Sertlik Artış Bölgeleri (NOT: alın dikişi = küt kaynak dikişi)

göre daha hızlı gerçekleşmekte ve sertleşme eğilimi de artmaktadır.

Özellikle karbon ve mangan, alaşımsız çeliğin sertleşme kabiliyetine etki eden en önemli iki elementtir. Düşük alaşımlı çeliklerde ise, çeliğin bileşiminde bulunan karbon ve mangan'a ek olarak, krom, molibden, vanadyum, nikel ve bakır gibi alaşım elementleri de sertliğe katkıda bulunur. Bu elementlerin sertliğe katkılarını belirlemek üzere KARBON EŞDEĞERİ kavramı oluşturulmuştur. Karbon eşdeğeri ifadesinde, çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliğe eşdeğer sertliği veren karbon miktarına Karbon Eşdeğeri denilmektedir. IIW tarafından oluşturulan ve tüm dünyada en yaygın şekilde kullanılan karbon eşdeğeri formülü aşağıdaki gibidir:

$$C_{es} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Yukarıda verilen formül, çeliklerde kaynak sırasındaki hızlı soğumayı engellemek için kullanılan ön tavlama işlemi için de bir kılavuz olarak görülebilir. Karbon eşdeğeri ile ön tavlama sıcaklığı arasında kabaca aşağıdaki gibi bir ilişki mevcuttur:

KARBON EŞDEĞERİ (%)	ÖN TAVLAMA SICAKLIĞI (°C)
$0,45 < C_{es}$	Normal atmosferik koşullarda ön tavlama gerektirmez.
$0,45 \leq C_{es} < 0,60$	100 - 200
$C_{es} > 0,60$	200 - 300

Bunun dışında, ön tavlama sıcaklığının belirlenmesine etki eden faktörler şunlardır:

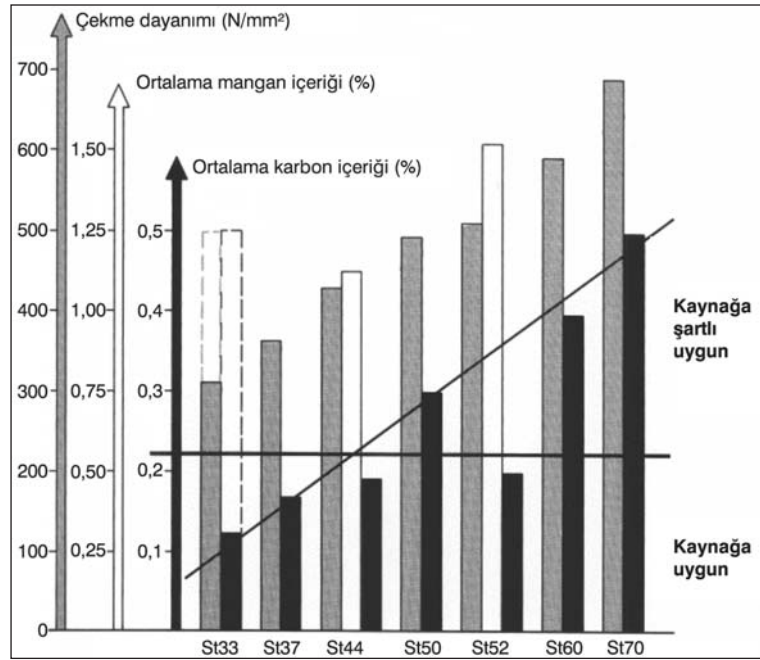
- Birleştirilen kalınlıklar
- Kaynak pozisyonu
- Parçanın geometrisi
- Elektrod çapı (ve dolayısıyla uygulanan akım, gerilim)
- Kaynak hızı
- Kaynak ağız formu
- Hava şartları

Sertleşme eğilimi olan çeliklerin kaynağında aşağıdaki noktalara dikkat edilmelidir:

- Uygun seçilmiş bir ön tavlama sıcaklığı uygulanmalıdır
- Bütün kaynak işlemi süresince bu sıcaklığın aynı kalmasına dikkat edilmelidir
- Bazı karakterli örtülü elektrodlar kullanılmalıdır.

5. YAPI ÇELİKLERİNİN KAYNAĞA UYGUNLUĞU

Şekil 9'da, kaynaklı imalatı kullanılan yapı çeliklerinin kaynağa uygunluğu gösterilmiştir. Bu şekle



Şekil 9 - Genel yapı çeliklerinin kaynağa uygunluğu

göre, çelikteki karbon miktarı % 0,2'nin üzerine çıktığında, ön tavlama ve kaynaktan sonra son tavlama gibi önlemlerin alınması gerekir.