

Kaynaklı Birleştirmelerin Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler

HAZIRLAYAN
Doğukan Alkan CAE Uygulama Mühendisi

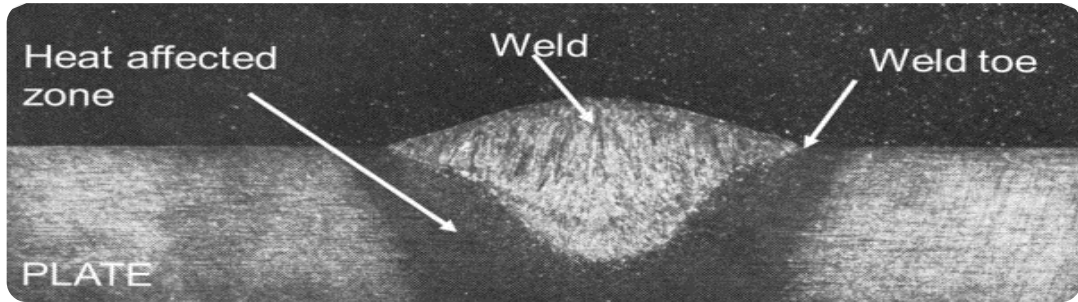
Tarih : 11 / 05 / 2023

Tekrarlı yüklemelere maruz kalan makine parçaları ve yapılar genellikle yorulma sonucu hasara uğrarlar. Yapılan hasar analizleri, çelik yapıların yorulma çatlğının genellikle gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu çentikli kaynak geometrilerinde başladığını göstermiştir. Yorulmayı etkileyen faktörlerin sayısı çok olduğundan, kaynak bağlantısı ana metale göre daha düşük yorulma dayanımına sahiptir.

Bu faktörler arasında, çekme gerilmesinin büyüklüğü, ısının etkisi altındaki bölgenin (ITAB) mikro-yapısal etkisi ve bağlantı noktalarındaki çekme artık gerilmesi ve çentik etkisi yer almaktadır. Kaynak bağlantısının yorulma özelliklerinin iyileştirilmesi, ITAB'ın dayanımının toklukta düşüşe yol açmadan artırılması, çekme artık gerilmesinin ve çentik etkisinin minimize edilmesiyle sağlanmaktadır. Bu çalışmada, kaynak ile birleştirilmiş kaynak bağlantılarının yorulma özelliklerini etkileyen faktörler ve yorulma ömrünü arttırmaya yönelik teknikler özetlenmiştir.

1. Giriş

Kaynakla birleştirme yöntemi, makine imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kaynaklı bağlantıların, değışken zorlamalar altında çalışan parçalarda yorulma hasarı riski taşıdığı bilinmektedir.



Figür 1 — Kaynak dolgu metalinin hemen çevresinde bulunan HEZA bölgeleri

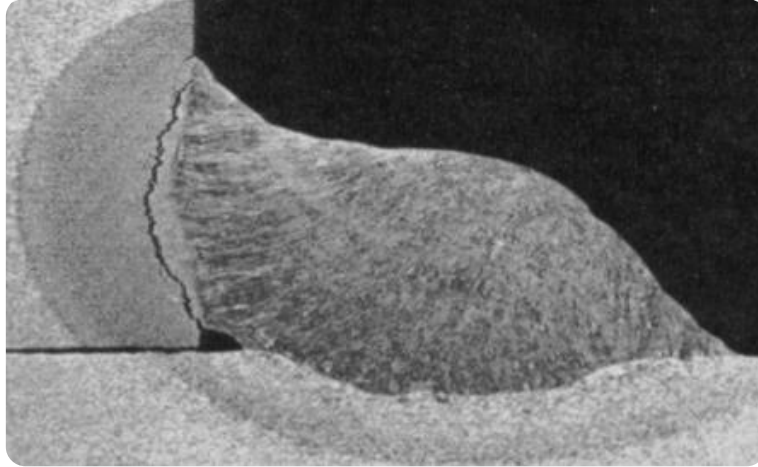
Yüksek ısı ve/veya basınç altında gerçekleştirilen kaynak işlemi, bağlantıda ısıl gerilmelere neden olur ve ayrıca kaynak dikişinde oluşan sıcaklık malzemenin ergime sıcaklığının üzerinde olduğundan, metalurjik yapının ana malzemeden farklılık göstermesine yol açar.

Bu durum, dinamik zorlamalar altında çalışan parçalarda yorulma çatlak başlangıç ve ilerleme süresini kısaltır. Bu nedenle, kaynakla birleştirilmiş bağlantıların yorulma ömrü, ana metale göre daha kısadır. Kaynak bağlantısının yorulma dayanımını arttırmak için önerilen iyileştirme teknikleri arasında, kaynak malzemesinin değiştirilmesi yer alır. Aynı zamanda kaynak süresinin aşırı tutulması, yüksek ısı girdisinin bir sonucu olarak kaynakla birleştirmede çekme türünde ısıl gerilmeler oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilmeler, yalnızca yorulma davranışı için değil, statik zorlamalara maruz kalan konstrüksiyonlarda da istenmeyen sonuçlara neden olmaktadır.

Bu teknik yazı, kaynakla birleştirilmiş bağlantının yorulma dayanımını etkileyen değişkenlerin sistematik olarak incelenmesini ve bağlantının yorulma davranışını iyileştirmeye yönelik metotlar üzerinde durulmasını içermektedir. Kaynak bağlantılarının yorulma hasarına karşı direncinin artırılması için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Ancak bu tekniklerin arasında ters bir ilişki olduğu için, hangi tekniğin ne zaman kullanılacağı konusunda doğru bir strateji belirlemek önemlidir.

2. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler

Elde edilen kaynaklı birleştirmelerin statik ve özellikle yorulma dayanımı, birçok faktörden etkilenir. Bu faktörler arasında, kaynak tipi, kaynak geometrisi, çentik etkisi, malzeme seçimi, kaynak işlemi, kaynak hatalarının etkisi, yük tipi, iç gerilmelerin etkisi ve ortam şartları yer alır. Yapılan bu çalışmada etkili olan faktörlerin bazıları incelenmiştir.



Figür 2 — Kaynağın sıklıkla çatlak başlangıç bölgesi olarak görev alması

2.1. Kaynak Tipinin Etkisi

Kaynak tipi, kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımını etkileyen önemli faktörlerdendir. Farklı kaynak tipleri, farklı yorulma dayanımlarına sahiptir. Örneğın, MIG ve TIG kaynakları, yüksek yorulma dayanımı özellikleri ile bilinirken, spot kaynakları daha düşük bir yorulma dayanımına sahiptir. Bu nedenle, kaynak tipi seçilirken, birleştirmenin kullanım amacına uygunluğu ve yorulma dayanımı özellikleri dikkate alınmalıdır.



Figür 3 — Geleneksel Kaynak Tiplerinin Listesi

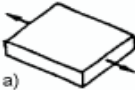


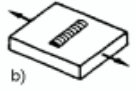
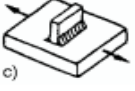
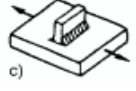
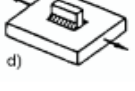
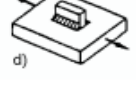
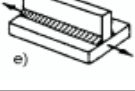
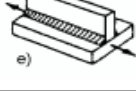
2.2. Kaynak Geometrisinin Yorulma Ömrüne Etkisi

Kaynak geometrisi de yorulma dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Kaynak boyutu, kaynak şekli ve kaynak bölgesinin konumu gibi faktörler, birleştirmenin yorulma dayanımını etkilemektedir. Örneğın, daha büyük kaynak boyutları ve daha az keskin geometriler, daha yüksek yorulma dayanımına sahiptir.

Kaynak dikişlerinin, taşıyıcı konstrüksiyon parçalarının statik dayanımına veya yorulma dayanımına etkisi, kaynaklı konstrüksiyonlarda son derece önemlidir. Malzeme üzerindeki dolgu kaynak pasolarının, enine veya boyuna yerleştirilen kanatların statik zorlamalarda taşıma kabiliyetine bir etkisi yoktur. Ancak, yorulma zorlamaları altında etkileri büyük olmaktadır. Levhada enine bir kaynak pasosu bulunması durumunda, kaynaklanmamış bir levhaya göre önemli ölçüde yorulma dayanımının azaldığı gözlemlenir. Bu durum, kuvvet akışında bir değişim olmamasına rağmen ilginç bir sonuçtur.

İyi yapılan bir kaynak dikişinde kaynak pasosu ile esas malzeme arasında düzgün bir geçiş olduğu gözlemlenir. Ancak, bir büyüteçle bakıldığında kaçınılmaz gözeneklerin, cüruf artıklarının ve küçük bağlantı hatalarının çentikler oluşturduğu görülebilmektedir. Bu yanma çentikleri, dışarıdan bakıldığında görünmüyor olsa da, yorulma dayanımını önemli ölçüde azaltabilmektedir.

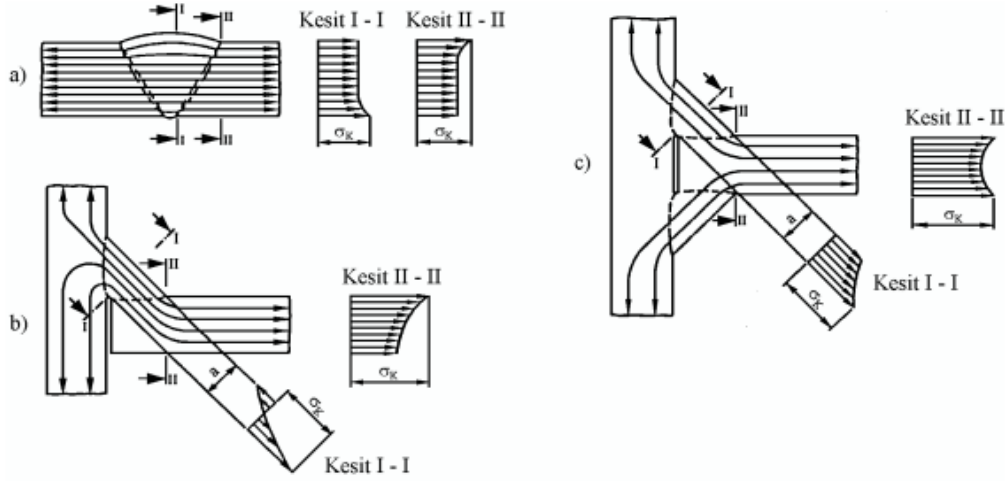
Kaynak pasosunun bulunduğu yüzey taşındığında, bu kenar çentikleri uzaklaştırılır ve sonuç olarak yorulma dayanımı değerleri önemli ölçüde artar. Bu sayede, kolaylıkla kaynaklı parçaların dayanım değerlerine ulaşılmaktadır. Bu nedenle, kaynak dikişlerinin doğru şekilde hazırlanması ve yüzeylerin uygun işlenmesi, taşıyıcı konstrüksiyonların dayanıklılığı ve güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır.

İşlenmemiş kaynak dikişi	N/mm ²			İşlenmiş kaynak dikişi	N/mm ²		
	$\sigma_{Değ}$	σ_{Dal}	R_e		$\sigma_{Değ}$	σ_{Dal}	R_e
	140	240	240		140	240	240
	95	160	240		140	240	240
	75	130	240		95	160	240
	45	80	240		45	85	240
	115	195	240		115	195	240

Figür 4 — İşlenmiş ve İşlenmemiş Kaynak Dikişlerinin Mukavemet Değerleri

2.2.1 Kaynak Geometrisinin Gerilme Dağılımına Etkisi

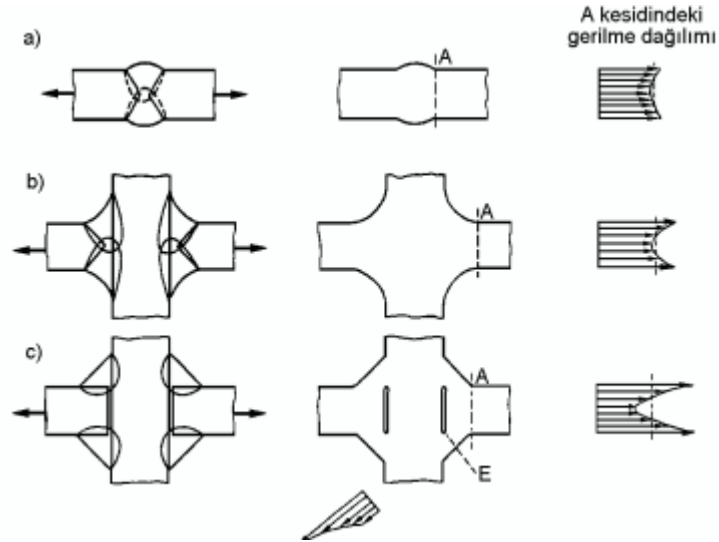
Konstrüksiyonun şekli yorulma dayanımının azalmasında en önemli faktörlerden birisidir. Bu etki, konstrüksiyonda kaynak dikişinin varlığıyla daha da güçlenir. Kesit değişiklikleri veya bölgesel gerilme yoğunlukları gibi etkiler, genellikle çentik etkisine neden olan faktörlerdir. Çentik etkisi, kesitlerde meydana geldiğinde, doğrusal kuvvet akışından sapmalar oluşur ve çentik bölgesinde gerilme yoğunlaşması meydana gelir. Çentik bölgesinin şekline ve geometrisine bağlı olarak, gerilme yoğunlukları farklılık gösterir. Kaynaklı birleştirmenin şekli, kaynak dikişindeki kuvvet akışı ve gerilme dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Figür 5 — Kaynaklı Birleştirme Şekline göre Gerilme Dağılımları

a) Alın Kaynak Dikişi b) Tek taraflı köşe Kaynak Dikişi c) Çift taraflı köşe Kaynak Dikişi

Figür 5' te, iyi bir şekilde yapılan alın kaynaklarındaki bölgesel gerilme yığılmaları düşük seviyelerde kalırken, tek taraflı köşe kaynağı dikiş şekli ve güçlü iç çentik nedeniyle uygun olmayan bir kuvvet akışı ve gerilme dağılımı oluşturur. Çift taraflı köşe kaynağı ise, tek taraflıya göre daha uygun bir kuvvet akışı ve gerilme dağılımına sahiptir. Ancak, mevcut iç çentik nedeniyle burada da gerilme yığılmaları nispeten yüksektir. Bu nedenle, köşe kaynaklı birleştirmelerin dinamik yüklemeler altında yorulma mukavemeti ve taşıma kabiliyeti oldukça düşük olmaktadır. Alın kaynağı dikişlerinde, gerilme yığılmalarına bağlı olarak, bu düşüş daha azdır ve yorulma mukavemeti daha yüksektir.



Figür 6 — Kaynaklı Birleştirmelerde Çekme Etkisinin Gerilme Dağılımları

a) Alın Kaynak Dikişi b) K şeklinde Kaynak Dikişi c) Köşe Kaynak Dikişi

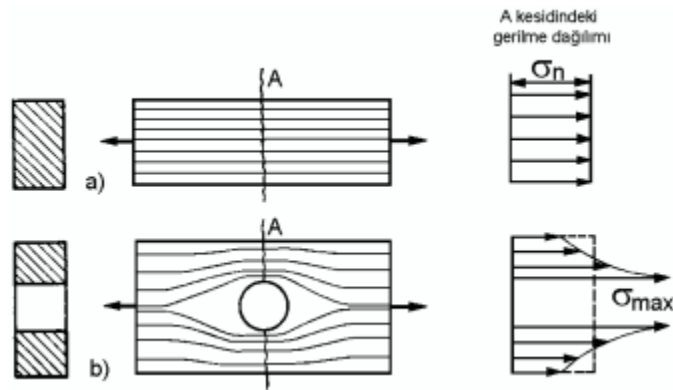
Figür 6' daki örnekte farklı kaynak dikişleri için belirlenen α_k form sayıları ve buna bağlı gerilme dağılımları incelenmiştir. Bu veriler, kaynaklı birleştirmelerin taşıma kabiliyeti açısından yorulma zorlamasında nasıl davrandığını göstermektedir. Sonuçlar, kötü yorulma davranışlarına sahip kaynak dikişlerinin a'dan c'ye doğru sıralandığını göstermektedir. Bu bulgular, kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımının değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken faktörlerden biridir.

2.3. Çentik Etkisi

Çentik etkisi, bir malzemenin gerilme dayanımının çentikli bölgede düşmesine neden olan bir faktördür. Çentik, malzemenin kesitinde bir kesik, oyuk veya diğer şekillerdeki bir deformasyondur. Bu çentikler, gerilmenin yoğunlaştığı bölgeleri oluşturur. Gerilme dağılımında düzensizliklere neden olur. Çentikli bir malzemenin yorulma mukavemeti, çentikli bölgedeki gerilme yoğunluğunun artması nedeniyle düşebilmektedir. Bu nedenle, yapısal tasarımda çentik etkisi göz önünde bulundurulmalı ve çentikli bölgelerin etkisi minimize edilmelidir.

Kuvvet akışının yorulma dayanımına olan etkisi, konstrüksiyon parçaları için oldukça önemlidir. Normal durumda kuvvet çizgilerindeki sapmalar gerilme tepelerinin oluşmasına ve buna bağlı olarak yorulma dayanımının azalmasına neden olur. Bu durum çentik etkisi olarak adlandırılır.

Çentik etkisi, parçaların kuvvet çizgilerindeki sapmalardan dolayı gerilme dağılımlarındaki düzensizlikleri ifade eder. Figür 7'de verilen örnek ile çentik etkisi açıklanmaktadır. Figür 7a'da düzgün bir kesit ve buna bağlı olarak düzgün bir gerilme dağılımı görülmektedir. Figür 7b'deki delikli parçada ise aynı nominal değere sahip bir kesit mevcuttur. Ancak, delik etrafındaki kuvvet çizgilerindeki sapmadan dolayı, düzenli bir kuvvet akışı yerine düzensiz bir kuvvet akışı ortaya çıkmaktadır. Bu da delik kenarlarında gerilme tepelerinin ve parça kenarında gerilme azalmasına neden olur. Ancak, ortalaması aynı kalmaktadır. Kuvvet sapmaları daha keskin olduğunda ise gerilme tepeleri daha büyük olmaktadır. Çentik etkisi, parçaların yorulma davranışlarını da etkilemektedir. Kuvvet çizgilerindeki sapmalar, yorulma dayanımını azaltarak parçaların ömrünü kısaltır. Bu nedenle, parça tasarımı sırasında çentik etkisi göz önünde bulundurulmalı ve kuvvet akışı düzenli olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.

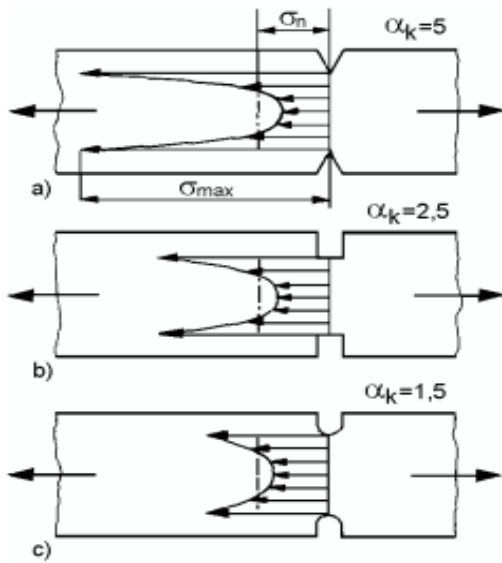


Figür 7 — Çentik Etkisine Sahip bir Parça ile Düz bir Parça Arasındaki Gerilme Dağılımının Farkı

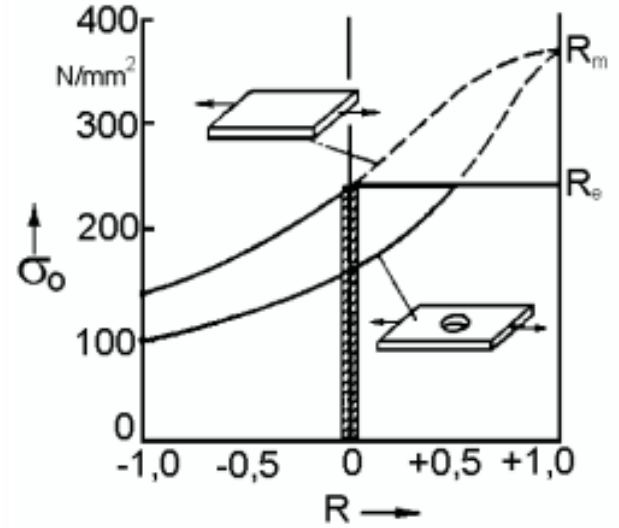
Parçalardaki çentiklerin geometrik şekli, gerilme dağılımını ve dolayısıyla form sayısını etkiler. Çentiklerin iç kısımlarında veya dış yüzeylerinde farklı geometrilerdeki çentiklerin etkisi de farklıdır. Figür 8'de dış yüzeydeki üç farklı geometrideki çentiklerin gerilme dağılımına ve form sayısına etkisi gösterilmiştir. Bu grafikte keskin çentiklerin gerilme artışının daha yüksek olduğu görülmektedir. Dikdörtgen şeklindeki çentikler daha uygun form sayılarına sahipken, yuvarlatılmış çentikler ise en uygun olanlarıdır. Form sayıları, çentiklerin etkisinin ne kadar büyük olduğunu ifade etmektedir.

$$\alpha_k = \frac{\theta_{max}}{\theta_n} \quad (1)$$

Form sayısı olarak bilinen α_k değeri, bir kesitteki çentik etkisinin büyüklüğünü ölçmek için kullanılan bir parametredir. Bu değer, θ_{max} (maksimum gerilme) ve θ_n (nominal gerilme) değerlerine göre Denklem 1'e göre hesaplanmaktadır.



Figür 8 — Farklı Çentik Şekilleri için Gerilme Dağılımları ve Form Sayıları



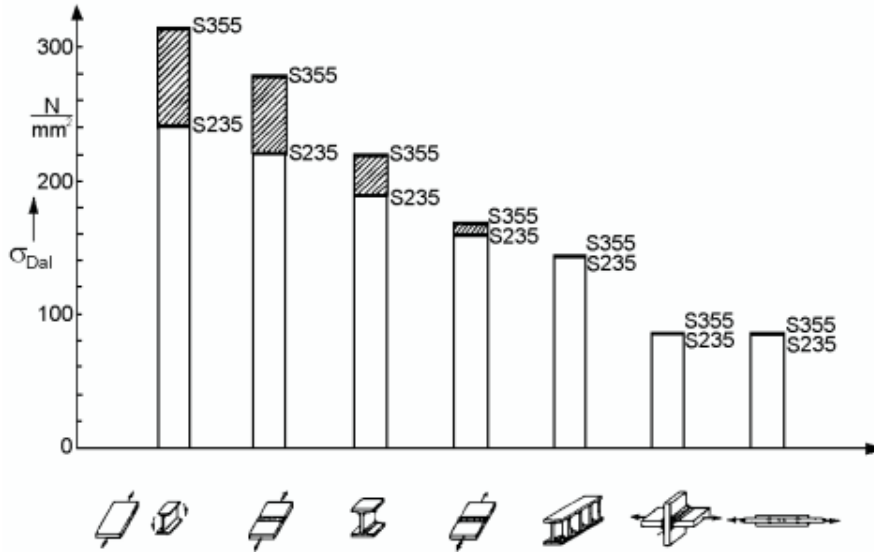
Figür 9 — Yorulma Dayanımı Diyagramına Delikli ve Deliksiz Parçaların Etkisi

Çentiksiz bir parça ile çentikli bir parçanın statik dayanımları yaklaşık olarak eşittir, ancak malzemenin yorulma dayanımı dinamik yüklemeler altında çentikli bir parçada çentiksiz bir parçaya göre daha düşüktür. Bu durum, çekme yükü altında çentikli ve çentiksiz parçalar için Figür 9 'da verilen sayısal örnekte gösterilmiştir. Şekilde, St37 malzemesinden yapılmış düz bir parça ile delikli bir parçanın R_m , R_e ve yorulma dayanım değerleri karşılaştırılmaktadır. Statik yüklemeler altında yaklaşık olarak aynı değerler ortaya çıkmaktadır. Ancak dinamik yüklemeler altında, delikli parçada önemli bir şekilde yorulma dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu nedenle, kaynaklı veya kaynaklı olmayan herhangi bir konstrüksiyonda kuvvet çizgilerinin akışında önemli bir sapma oluştuğunda yorulma dayanımının önemli ölçüde azalabileceği unutulmamalıdır. Bu durum, dinamik olarak zorlanan kaynaklı konstrüksiyonların şekillendirilmesinde önemli bir etken olarak dikkate alınmaktadır.

2.4. Malzeme Seçimi

Kaynaklı yapılarda malzeme seçimi faktörü, kaynaklı birleşim bölgesindeki yorulma dayanımını ve diğer mekanik özellikleri etkileyen bir faktördür. Kaynaklı birleşim bölgesindeki malzeme özellikleri, kaynak işleminin neden olduğu termal ve mekanik deformasyonlardan etkilenir. Bu nedenle, kaynaklı birleşim bölgesindeki malzeme seçimi yapılırken, kaynak işlemi ve birleştirilecek malzemelerin özellikleri dikkate alınarak uygun malzeme seçilmelidir.

Malzeme seçimi faktörü, yorulma dayanımı, mukavemet, süneklik, tokluk ve diğer mekanik özelliklerin yanı sıra kaynak işleminin türüne, kaynak bölgesindeki termal deformasyonlara ve işlem sırasında oluşabilecek gerilmelere de bağlıdır. Kaynaklı birleşim bölgesindeki malzeme seçimi, kaynak işleminin neden olduğu ısıl etki bölgesi (HEAT AFFECTED ZONE) ve erime bölgesindeki mekanik özelliklerin kaybedilmesi nedeniyle özellikle önemlidir. Malzeme seçimi faktörü, kaynaklı yapının tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, kaynak işlemi ve birleştirilecek malzemelerin özellikleri dikkate alınarak, birleşim bölgesindeki malzeme seçimi yapılmalıdır. Malzeme seçimi faktörü, kaynak işleminin neden olduğu deformasyon ve gerilmeleri en aza indirmek için uygun malzeme seçerek birleşim bölgesindeki mukavemet ve yorulma dayanımını artırarak, kaynaklı yapının ömrünü artırmaya yardımcı olmaktadır.



Figür 10 — Farklı Şekillerdeki Birleştirmeler için Çeliklerin Dalgalı Dayanım Değerlerinin Karşılaştırılması

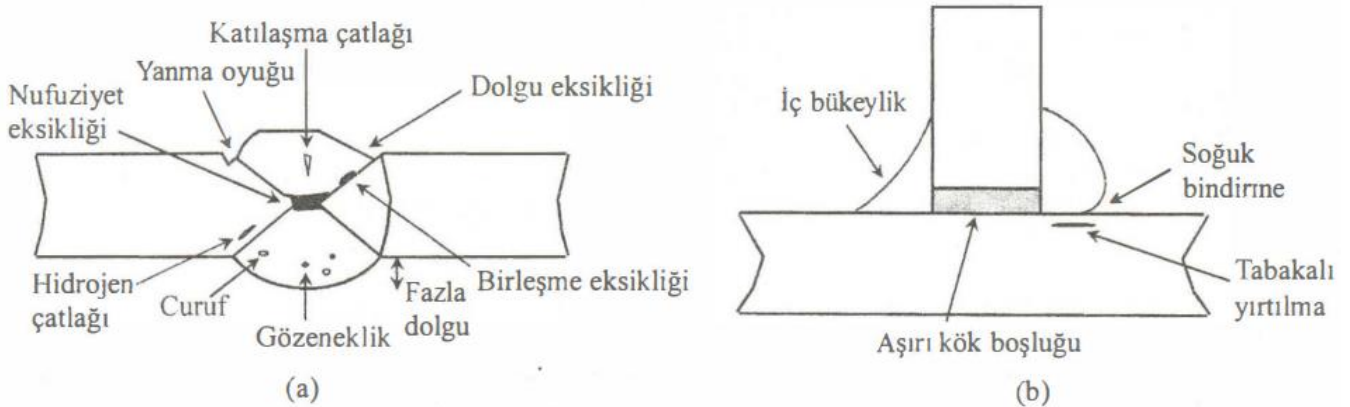
Farklı çelik türleri, yapısal konstrüksiyonlardaki statik dayanım ve yorulma dayanımı davranışlarında farklılıklar gösterirler. Yüksek dayanımlı çelikler, yüksek akma sınırı ve çekme dayanımı değerlerine sahip olduklarından prensip olarak daha yüksek zorlanma değerlerine dayanabilmektedirler. Kaynaklı yapıların malzeme seçiminde, kaynaklı birleştirme yapılacak malzemenin seçimi büyük önem taşımaktadır.

Örneğin, yüksek mukavemetli bir çelikten (örneğin S355) yapılan kaynaklı birleştirme ile alaşımsız bir çelikten (örneğin S235) yapılan kaynaklı birleştirme arasında, statik ve yorulma dayanımlarında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Statik zorlamalarda, yüksek dayanımlı çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinin taşıma kabiliyeti artan akma sınırı (veya çekme dayanımı) ile birlikte artmaktadır. Ancak, dinamik zorlamalarda artan akma sınırı veya çekme dayanımı ile yorulma dayanımının lineer olarak artmadığı saptanmıştır. Bu durum Figür 10'da çeşitli kaynak dikişlerinin dalgalı dayanımları için gösterilmiştir. Bu nedenle, kaynaklı konstrüksiyonlarda malzeme seçimi faktörü, statik ve dinamik yüklemeler altında yeterli dayanım sağlamak için dikkatlice değerlendirilmelidir.

2.5. Kaynak Hatalarının Etkisi

Kaynaklı birleştirmelerin taşıma kabiliyetini olumsuz etkileyen faktörler arasında, kaynak hataları da yer almaktadır. Kaynak hataları, yapılan araştırmalar sonucu yorulma çatlaklarının çoğunlukla yerel gerilme yığılmasına yol açan geometrik süreksizlikler veya kuvvet akış çizgilerinin düzgün yönlendirilmemesi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Bu hatalar, statik ve yorulma dayanımlarını azaltarak kaynaklı birleştirmenin taşıma kabiliyetini negatif yönde etkilemektedir.


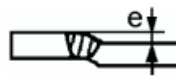
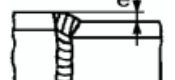

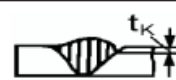

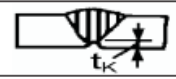
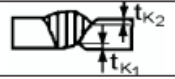

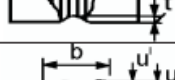




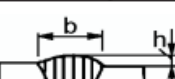

Her ne kadar gerekli önlemler alınsa da, genellikle bütün kaynaklı birleştirmeler farklı büyüklüklerde hatalar içermektedir. Kaynak işlemine ait değişkenlerin uygun şekilde seçilmemesi doğrudan veya dolaylı olarak kaynak hatalarına neden olmaktadır. Bu hatalar tek boyutlu ve düzlemsel olabileceği gibi, farklı geometride hacimsel süreksizliklerden de oluşabilmektedir. Figür 11'de, kaynak dikişi ve etrafında oluşabilecek başlıca kaynak hataları şematik olarak gösterilmektedir. Kaynaklı birleştirmelerde kaynak hatalarının önlenmesi için birçok önlem alınmaktadır. Örneğin, kaynak operatörlerinin eğitimi, kaynak prosesi ve malzemelerin uygun seçimi, kalite kontrol ve testlerin düzenli yapılması, kaynak işleminin belirlenen parametrelerine uygunluğun sürekli kontrol edilmesi, vb. gibi önlemler alınarak kaynak hatalarının sayısı ve boyutu minimize edilebilmektedir. Bu sayede kaynaklı birleştirmelerin taşıma kabiliyeti artırılabilir ve daha güvenli yapılar inşa edilmektedir.



Figür 11 — a) ve b) — Kaynak hataları ve gerilme yığılmasına yol açan diğer süreksizlikler

Dış kaynak hataları, yani dış çentikler genel olarak Figür 12'de gösterilmiştir. Dinamik yükler altında kaynaklarda meydana gelen dış hatalar, özellikle de geçiş bölgelerindeki derin yanma çentikleri ve kök çentikleri (olukları), Figür 12b ve 12c'de gösterildiği gibi, ciddi bir tehlike oluştururlar. Bu hatalar kolayca meydana gelebilir ve genellikle önemsenmezler, ancak yorulma mukavemetini önemli ölçüde azaltırlar. Başka bir önemli hata ise aşırı dikiş yüksekliğidir, Figür 8'i de görüldüğü gibidir.

Statik olarak zorlanan yapıların kaynak dikişlerinin geçiş bölgelerinde meydana gelen yanma çentiklerinin (oluklarının) etkisi daha azdır. Burada kesit azalması önemli değildir, ancak kalite seviyelerinin altında kalmamaları gerekmektedir. Derin yanma çentikleri ise hatalı kaynak işleminden kaynaklanmaktadır ve bu bölgelerde statik yükler altında da kesinlikle kabul edilemezler. Ayrıca sıçramalar ve imalat sırasında ortaya çıkabilecek düzensizlikler de yorulma dayanımını azaltırlar. Alın dikişlerinde aşırı dikiş yükseklikleri de yorulma dayanımını düşürür, bu nedenle yorulmaya zorlanan yapılar için belirli bir yorulma dayanımı garantisi sağlamak için dikiş yüksekliklerinin belirli bir sınırdan (DIN 25817'ye göre) altında olması gerekmektedir.

	Çift taraflı kaynak yapılmış	Tek taraflı kaynak yapılmış	Boru çevre dikişi
a) Eksen kayması			
b) Yanma çentikleri			
c) Kök çentikleri			
d) Sarkık dikiş kökü			
e) Dikiş kökündeki iç bükeylik			
f) Dikiş yüzeyindeki iç bükeylik			
g) Açık hatalar(gözenekler, cüruf kalıntıları, vs.)			
h) Simetrik olmayan iç köşe dikişi			
i) Aşırı dikiş yüksekliği			

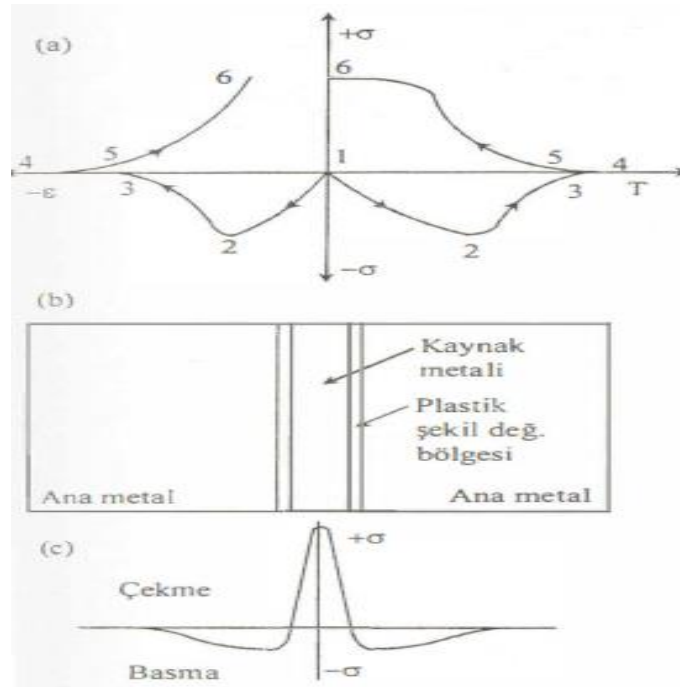
Figür 12 — Kaynaklı Birleştirmelerde Gözmlenen Kaynak Hataları

2.6. İç Gerilmelerin Etkisi

Kaynak dikişinin ergiyip katılaşması sırasında ısının etkisiyle meydana gelen iç gerilmeler, malzemenin akma sınırı ile sınırlıdır. Bu gerilmeler, farklı ısınip soğuma süreçleri sonucu oluşur ve genellikle çekme iç gerilmeleri ve basma iç gerilmeleri olarak ikiye ayrılır. İç gerilme miktarı, malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Ancak, akma sınırının üzerindeki gerilmeler, malzemenin plastik deformasyona uğramasına (çarpılma) veya çatlmasına neden olmaktadır.

Basma iç gerilmeleri, genellikle çekme zorlamalarının olduğu durumlarda olumlu bir etkiye sahip olurken, çekme iç gerilmeleri yorulma dayanımına farklı şekillerde etki eder. Özellikle yorulmaya zorlanan keskin çentikli yapı elemanlarında, gerilmelerin giderilmesi için gerekli olan plastik şekil değiştirme yeterli olmadığından veya hiç meydana gelmediğinden, çekme iç gerilmeleri büyük önem taşır. Bu tür yapı elemanlarında, kaynak dikişinden kaynaklanan çekme iç gerilmeleri, iç gerilmelerin giderilememesi sonucu, çok eksenli gerilme sistemlerinde yorulma dayanımının ciddi şekilde düşmesine neden olmaktadır.

Özellikle dinamik yükleme durumunda, kaynak dikişinde meydana gelen hatalar ve özellikle geçiş bölgelerindeki derin yanma çentikleri ve kök çentikleri, büyük bir tehlike oluşturur. Bu hatalar, kaynağın yapıldığı sırada kolayca oluşur ve genellikle küçümsenir. Ancak, bu hatalar yorulma mukavemetini önemli ölçüde düşürürler. Bunların yanı sıra, aşırı dikiş yüksekliği gibi diğer hatalar da yorulma dayanımını azaltmaktadır. Bu nedenle, yorulmaya zorlanan konstrüksiyonlarda, belirli bir yorulma dayanımı değerini garanti etmek için dikiş yüksekliklerinin belirli bir sınır değerinin altında kalması gerekmektedir.

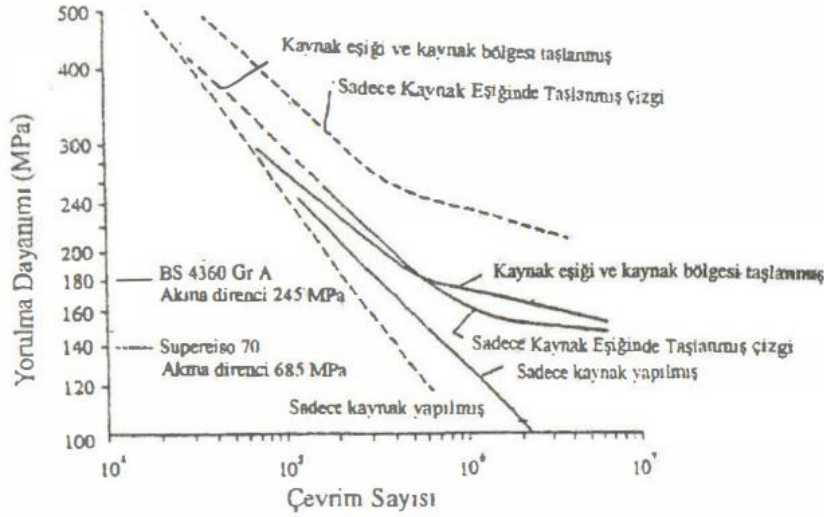


Figür 13 — a) Kaynak sırasında sıcaklık, birim şekil değiştirme ve gerilme arasındaki ilişki
b) — c) Alın kaynağındaki artık gerilmenin dağılımı

3. Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Davranışını İyileştirmeye Yönelik Metodlar

Kaynaklı bağlantıların yorulma davranışını iyileştirmeye yönelik birkaç yöntem vardır. İlk olarak, yüksek dövülebilirlik özelliğine sahip malzemelerin kullanılması, yorulma ömrünü arttırmaktadır. Bu, malzemelerin yorulma davranışı üzerindeki Stress etkisini azaltarak gerilme konsantrasyonlarını azaltır. Diğer deneyebileceğimiz şunlardır;

- **Yüksek kaliteli kaynak malzemeleri kullanımı:** Yüksek kaliteli kaynak malzemeleri, yorulma davranışını iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Bu malzemeler daha dayanıklıdır ve yüksek gerilmelere karşı daha iyi direnç gösterirler.
- **Geçiş bölgelerinde özel dikişler kullanımı:** Geçiş bölgelerinde özel dikişler kullanarak yorulma davranışını iyileştirmek mümkündür. Bu dikişler, kaynaklı bağlantının yüksek gerilimli bölgelerinde yüksek gerilmeleri dağıtarak gerilim konsantrasyonunu azaltır.
- **Geçiş bölgelerinde hava oluşumunu önlemek:** Geçiş bölgelerinde hava oluşumunu önlemek, yorulma davranışını iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Hava oluşumu, kaynaklı bağlantının yorulma davranışını olumsuz yönde etkiler.
- **Kaynak dikişlerinin optimize edilmesi:** Kaynak dikişlerinin optimize edilmesi, yorulma davranışını iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Dikiş yüksekliği, boyutu, şekli ve konumu, kaynaklı bağlantının yorulma davranışını etkileyen faktörlerdir.
- **İyi bir tasarım kullanmak:** İyi bir tasarım kullanarak kaynaklı bağlantının yorulma davranışını iyileştirmek mümkündür. Tasarımda, kaynaklı bağlantının yüksek gerilimli bölgelerini en aza indirmek için uygun geometri ve boyutlar kullanılmalıdır.
- **Yüzey kalitesine dikkat edilmesi:** Yüzey kalitesine dikkat ederek kaynaklı bağlantının yorulma davranışını iyileştirmek mümkündür. Pürüzlü yüzeyler, yorulma davranışını olumsuz yönde etkiler ve kaynaklı bağlantının ömrünü azaltır.
- **Kalite kontrolünün sıklaştırılması:** Kalite kontrolü sıklaştırarak kaynaklı bağlantının yorulma davranışını iyileştirmek mümkündür. Kalite kontrolü, kaynaklı bağlantının yorulma davranışının tahmin edilmesine yardımcı olur ve kaynaklı bağlantının ömrünü artırır.



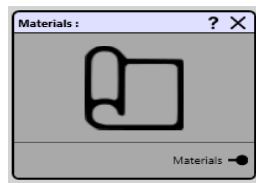
Figür 14 — Taşlama işleminin kaynak bağlantısının yorulma davranışına etkisi

Disk taşlama işleminin taşlama bölgesindeki farklılığa göre yorulma davranışına olan etkisi Figür 14'de verilmiştir. Sadece kaynak eşiğinin taşlanması durumunda $2 \cdot 10^6$ çevrim sayısı için yorulma dayanımındaki iyileşme % 23 mertebesinde kalırken, kaynak dikiş yüzeyinin tamamen taşlanması durumunda artış % 35 kadar ulaşabilmektedir.

4. CAEFatigue İçerisinde Yorulma Davranışını İyileştirmek

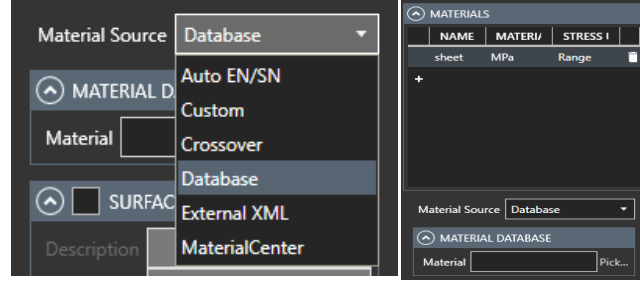
Kaynak malzemesinin değiştirilmesi, yorulma davranışını iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, bir malzemenin yorulma ömrünü arttırmak veya yorulma hasarını azaltmak için uygulanmaktadır. Bir metal parçasının yorulma ömrü arttırılabilirken aynı zamanda malzemenin mukavemeti de arttırılabilmektedir. Bu, malzemenin yüksek stres altında çalıştığı durumlarda daha dayanıklı hale gelmesine yardımcı olur. Uygun şekilde seçilmiş bir kaynak malzemesi, yorulma davranışını büyük ölçüde iyileştirebilir ve malzemenin ömrünü arttırabilmektedir.

CAEFatigue içerisinde oldukça geniş bir malzeme kütüphanesi bulunmaktadır. Kullanıcılar bu kısımdan, kendileri için uygun olan malzemeleri seçebilir veya yeni custom bir malzeme oluşturabilmektedir.



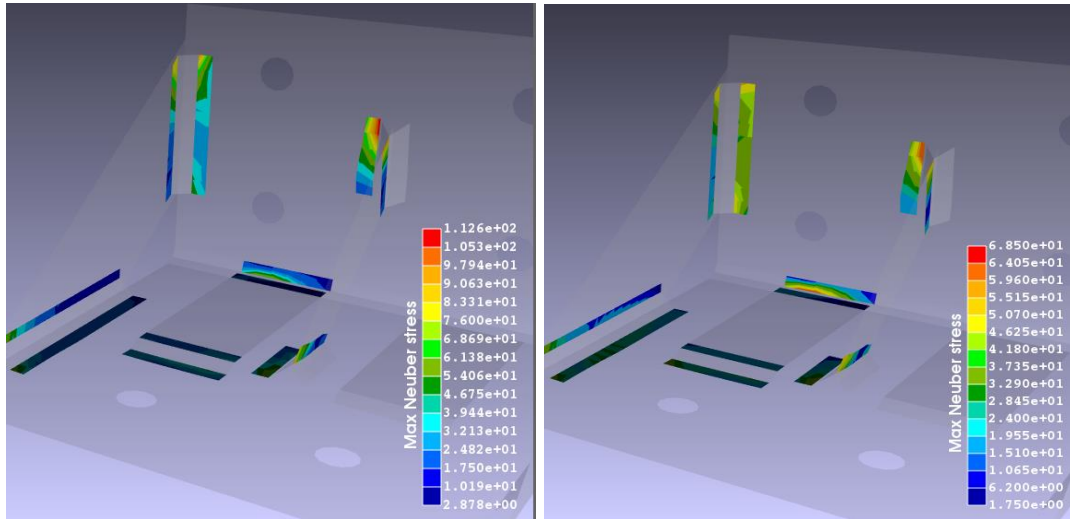
Figür 15 — CAEFatigue içerisinde malzeme eklemek için kullanılan sekme

Materials kutusuna tıkladıktan sonra, sol açılır pencerede karşımıza geniş malzeme kütüphanesi ve malzeme ile ilgili ayar yapılan bölüm gelmektedir. Burada; analizimize dahil olan malzemelerin listesi sol üst kutucukta gözükmetedir. Alt kısmında ise drop-down-list şeklinde, malzeme ekleme metodları gözükmetedir. Buradan karşılaştırma yapmak için, Database kısmından 2 farklı EN eğrisine sahip malzeme kullanacağız.



Figür 16 — CAEFatigue içerisinde malzeme ekleme metodları ve var olan malzeme tablosu

İlk senaryoda; Steel 1045 (942 UTS), diğer senaryoda ise daha yüksek dayanıma sahip olan; Steel 1045 (1516 UTS) kaynak malzemesi olarak kullanılmıştır. Seçilen malzemeler için EN grafikleri; yazılımın arayüzünde gösterilmektedir.



Figür 17 — 2 Farklı Kaynak Malzemesi ile Yapılmış Farklı Analizlerin Sonuçları

Figür 17' de iki farklı senaryonun stress sonuçları gözükmetedir. Elde ettiğimiz sonuçları özetlemek gerekirse, daha kaliteli bir malzeme kullanarak yaptığımız kaynak, daha az stress değerine sahip oldu. Buna ek olarak, daha kaliteli malzeme kullanımı, yorulma davranışını da olumlu yönde etkileyecektir. Ancak, daha kaliteli malzemelerin maliyetleri genellikle daha yüksek olmaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek kaliteli malzemelerin kullanımının, daha uzun bir ömrü olan ve daha az bakıma ihtiyaç duyan bir yapıyı oluşturabileceği unutulmamalıdır. Sol taraftaki stress değeri 112.6 Mpa gelmişken, sağ taraftaki stress değeri ise; 68.5 Mpa olarak gelmektedir. Burada kopma dayanımı daha yüksek olan bir materyal kullanılmış ve bu faktör, kaynak dikişi üzerine gelen stress değerleri açısından olumlu ilerlemiştir. Bu örnekte; daha iyi malzeme kullanarak, kaynak dikişleri üzerindeki yorulma davranışı iyileştirilmiştir.

5. Referanslar

- I. CAEfatigue Software (Cf) USER GUIDE 2022
- II. CAEfatigue Software (Cf) Training PDF's — Background Theory
- III. K.Aydoğdu, (2002) Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002)
- IV. Neuman. A. Kompendium der Schweitechnik Band 4 -Berechnung und Gestaltung von Schweikonstruktionen, Fachbuchreihe Schweitechnik Band 128/4, Düsseldorf, 1997
- V. Karakaş. Ö., Kaynaklı Yapı Elemanlarının Hesaplanmasında Kullanılan Yöntemlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2002