



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KAYNAKLI BAĞLANTILARIN SONLU
ELEMENLAR ANALİZLERİNDE
KONVANSİYONEL METOTLARIN
KARŞILAŞTIRILMASI VE YENİ
YAKLAŞIMLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Osman Bahadır ÖZDEN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Osman Bahadır ÖZDEN tarafından hazırlanan “Kaynaklı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Analizlerinde Konvansiyonel Metotların Karşılaştırılması ve Yeni Yaklaşımların Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 17/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

.....

Danışman

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

.....

Üye

Doç. Dr. Ümit ÖNEN

.....

Üye

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 23DR19005 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Osman Bahadır ÖZDEN

Tarih:17.02.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KAYNAKLI BAĞLANTILARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİNDE KONVANSİYONEL METOTLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE YENİ YAKLAŞIMLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Osman Bahadır ÖZDEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Barış GÖKÇE

2025, 213 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Doç. Dr. Ümit ÖNEN

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK

Kaynaklı bağlantılar birçok endüstriyel ürünlerde kullanılmakta olup statik ve dinamik zorlanmalara karşı değerlendirmeler, yapının ve can güvenliği açısından önem arz etmektedir. Dinamik zorlama durumunda sonlu elemanlar metodu analizlerinde kaynaklı bağlantıların gerilme-zaman düzleminde doğru gerilme ve doğal frekans değerlerinin tespiti, gerilme konsantrasyonları, yorulma ömür tahmini ve modellenmesi, genel yapı emniyeti ve güvenilirlik açısından oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında 80 adet yorulma testi gerçekleştirilerek, malzeme, sonlu elemanlar modelleme teknikleri, kaynak sonrası gerçekleştirilen yüksek frekansla dövme, taşlama işlemlerinin etkileri karşılaştırılmış olup her değişken için yeni S-N eğrileri tespit edilmiştir. Ultra yüksek mukavemetli çelik olan S960 ve S1100 malzemelerde yorulma testleri gerçekleştirilmiş olup sonlu elemanlar analizlerinde farklı katı ve kabuk modellemelerde S-N eğrileri önerilmiştir. Çift T kaynak bağlantılı yapıda gerçekleştirilen çalışmalarda çalışma neticesinde her parametreye göre farklı FAT değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca T köşe kaynaklı bağlantıda 13 farklı kaynak parametresi ile 39 adet modal test gerçekleştirilmiş olup farklı parametrelerin doğal frekansa etkileri karşılaştırılmıştır. Doğal frekans ve yorulma testlerindeki tüm numuneler lazer tarayıcı ile numuneler taranmış olup sonlu elemanlarda analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerilme konsantrasyon değerlerinin farklı geometrilerdeki etkilerini incelemek için ise latin hiperküp metodu ile hazırlanan yazılım vasıtası ile dağıtılan verilerin analizleri gerçekleştirilip sonuçları yapay sinir ağıyla eğitilmiş ve yeni parametrik denklemler literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve önerilmiştir. Yorulma çalışmaları neticesinde, önerilen FAT 36 sınıfından daha yüksek değerlerde FAT değerleri tespit edilmiştir. Kaynak sonrası yapılan işlemlerin ise FAT sınıfını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, kaynaklı bağlantılar, gerilme konsantrasyon, doğal frekans, yorulma ömür tahmini

ABSTRACT

Ph.D THESIS

COMPARISON OF CONVENTIONAL METHODS AND DEVELOPMENT OF NEW APPROACHES IN FINITE ELEMENT ANALYSIS OF WELDED JOINTS

Osman Bahadır ÖZDEN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

2025, 213 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Assoc. Prof. Dr. Ümit ÖNEN

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Assist. Prof. Dr. Ziya ÖZÇELİK

Welded joints are used in many industrial products and evaluations against static and dynamic stresses are important for the safety of the structure and life. In the case of dynamic stress, determination of correct stress and natural frequency values, stress concentrations, fatigue life estimation and modeling of welded joints in the stress-time plane in finite element method analyses are quite important in terms of general structural safety and reliability. Within the scope of this thesis, 80 fatigue tests were performed and the effects of materials, finite element modeling techniques, high frequency forging and grinding processes performed after welding were compared and new S-N curves were determined for each variable. Fatigue tests were performed on S960 and S1100 materials, which are ultra-high strength steels, and S-N curves were proposed in different solid and shell models in finite element analyses. In the studies carried out on the double T welded joint structure, different FAT values were determined according to each parameter as a result of the study. In addition, 39 modal tests were performed with 13 different welding parameters in the T corner welded joint and the effects of different parameters on natural frequency were compared. All samples in natural frequency and fatigue tests were scanned with a laser scanner and their analyses were performed in finite elements. In order to examine the effects of stress concentration values on different geometries, the data distributed by means of the software prepared with the Latin hypercube method were analyzed and the results were trained with an artificial neural network and new parametric equations were compared with studies in the literature and proposed. As a result of fatigue studies, FAT values higher than the recommended FAT 36 class were determined. It was determined that the processes performed after welding positively affected the FAT class.

Keywords: Finite element analysis, welded joints, stress concentration, natural frequency, fatigue life estimation

ÖNSÖZ

Başta sabır ve destekleri için eşim ve ailem olmak üzere, doktora çalışmam haricinde her alanda ilgi, tecrübe, destek ve yönlendirmelerini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Barış GÖKÇE'ye, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa ACARER ve Doç. Dr. Ümit ÖNEN'e ve desteklerini esirgemeyen tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen MPG A.Ş.'ye, Dr. Abdullah ERDEMİR'e, Dr. Öğr. Üyesi Muhammed İhsan ÖZGÜN'e, NEÜ BİTAM laboratuvar ekibine ve MPG A.Ş.'de destek olan mesai arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, vatan uğruna canlarını feda eden aziz şehitlerimize ve sınırlı olanaklarla ülkemiz için bilim dünyasına katkı sağlamaya çabalayan tüm bilim insanlarına ithaf edilmiştir.

Osman Bahadır ÖZDEN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER TABLOSU.....	ix
ÇİZELGELER TABLOSU.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Kaynaklı Bağlantıların Numerik Analizlerinde Yorulma Ömür Tahmini.....	27
3.2. Kaynaklı Bağlantılarda Numerik Analizler için Kullanılan Modelleme Teknikleri.....	32
3.3. Kaynaklı Statik Testler için Kullanılan Test Düzenegi ve Numuneler	34
3.4. Kaynak Parametrelerinin Doğal Frekans Etkisinin İncelenmesi için Hazırlanan Test Düzenegi ve Numuneleri	37
3.4.1. Kalıntı Gerilme Etkisinin İncelenmesi için Hazırlanan Test Düzenegi ve Numune.....	37
3.4.2. Kaynak Parametrelerinin Karşılaştırılması için Hazırlanan Test Düzenegi ve Numuneler	41
3.5. Yorulma Testlerinde Kullanılan Deney Düzenegi, Kaynak Sonrası İşlemler ve Numuneler	50
3.6. Kaynaklı Bağlantıların Gerilme Konsantrasyon Faktörü Tahmini için Geliştirilen Yaklaşım	62
3.7. Yorulma Ömür Tahmini, Yapay Sinir Ağı ve Termal Analizler için Geliştirilen Yazılım Arayüzleri	68
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	72
4.1. Statik Testlerin ve Numerik Analizlerin Sonuçları.....	72
4.1.1. Doğrusal Ekstrapolasyona Göre Sonuçlar	72
4.1.2. Kuadratik Ekstrapolasyona Göre Sonuçlar	73
4.1.3. Statik Durum için Elde Edilen Gerilme Büyütme Faktörünün Değişimi	76
4.2. Kaynak Parametrelerinin Doğal Frekansa Etkileri için Gerçekleştirilen Testlerin ve Numerik Analizlerin Sonuçları	78

4.2.1. Kalıntı Gerilme Etkisinin İncelenmesi için Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	79
4.2.2. Kaynak Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi için Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	84
4.3. Gerilme Konsantrasyon Faktörü Tespiti için Geliştirilen Yeni Yaklaşımın Tahminlerinin Sonuçları ve Karşılaştırılması	91
4.3.1. T Kaynak Bağlantılı Bir Yapıda Gerilme Konsantrasyon Faktörü Parametrik Formülasyonu	92
4.3.2. Çift T Kaynak Bağlantılı Bir Yapıda Gerilme Konsantrasyon Faktörü Parametrik Formülasyonu	98
4.4. Yorulma Test Sonuçları ve Karşılaştırılması	112
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	157
6. KAYNAKLAR	165
EKLER	177

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 3.1. Kaynaklı bağlantı gerilme değerlendirme yaklaşımları	28
Şekil 3.2. Sıcak nokta gerilme değerlerinin tespit edilmesi (a) kalınlık yönünde doğrusallaştırılmış gerilme ile, (b) kalınlık yönünde düğümlerden alınan değerler ile (c) yüzey üzerinden konumlara göre (Niemi ve ark. 2018)	29
Şekil 3.3. Sıcak nokta gerilme yaklaşımı kaynak ucu gerilme tespiti (Niemi ve ark. 2018)	29
Şekil 3.4. Etkin çentik gerilme yaklaşımı kaynak modellemesi	30
Şekil 3.5. Nominal gerilme yaklaşımına göre önerilen FAT S-N eğrileri (Hobbacher 2016)	31
Şekil 3.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan simetrik çift T bağlantılı kaynaklı bağlantı nominal gerilme yaklaşımına göre FAT 36 kategorisi (Hobbacher 2016)	32
Şekil 3.7. Hazırlanan SHL ve SLD SEM kaynak modellemeleri	33
Şekil 3.8. SEM analizleri kabuk kaynak modelleme çeşitleri (Niemi ve ark. 2018) (Eriksson ve ark. 2003)	34
Şekil 3.9. Deney düzeneği için hazırlanan numunelerde gerinim ölçer sensör konumları	36
Şekil 3.10. Veri toplama Dewesoft arayüzü	36
Şekil 3.11. Deney düzeneği	37
Şekil 3.12. Kalıntı gerilmenin etkisinin incelenmesi için hazırlanan numune ölçüleri ..	38
Şekil 3.13. Kalıntı gerilmenin etkisinin incelenmesi için hazırlanan test düzeneği	38
Şekil 3.14. Termal analizler için kullanılan Goldak modeli	39
Şekil 3.15. S690 termoplastisite özellikleri (a) yoğunluk ve termal iletkenlik (b) Akma gerilimi ve özgül ısı-sıcaklık	40
Şekil 3.16. Kaynak parametreleri etkisi için hazırlanan numunenin ölçüleri ve çekiç vuruş noktaları	43
Şekil 3.17. Kaynak sonrası başlangıç, bitiş plakasının kesilmesi	44
Şekil 3.18. CMM ile numune tarama işlemi	44
Şekil 3.19. Kaynak parametrelerinin etkisi için hazırlanan test düzeneği	45
Şekil 3.20. CMM ile taranan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan lazer tarama modelleri	46
Şekil 3.21. Kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan diğer modelleme teknikleri	47
Şekil 3.22. Harmonik cevap analizlerinde hazırlanan önerilen kod parçacığı iş akış şeması	50
Şekil 3.23. Numunelerin geometrik ölçüleri	52
Şekil 3.24. Numunenin kaynak öncesi punta işlemi	52
Şekil 3.25. Robot ile MAG kaynağı	53
Şekil 3.26. Numunelerde kaynak nüfuziyetinin incelenmesi	53
Şekil 3.27. Yorulma test düzeneği	54
Şekil 3.28. Kaynak sonrası numunelerde gerçekleştirilen YFMD işlemi	55
Şekil 3.29. XID cihazı ile kalıntı gerilme değerlerinin ölçümü	56
Şekil 3.30. Yorulma testleri sonrası kullanılan taramalı elektron mikroskopu	57
Şekil 3.31. Yorulma test öncesi numune lazer tarama işlemi	57
Şekil 3.32. Lazer tarama ile elde edilen numunelerin katı modelleri	59
Şekil 3.33. SP-90-S960-HFMI-15 numunesine yapıştırılmış GS	60
Şekil 3.34. (a) Gaussian eğrisine göre olasılıksal dağılımlar (b) %(1-P) ve %P olasılık dağılım değerine göre eğriler (Harris 2003; Barbosa ve ark. 2019; Kufoin ve Susmel 2024)	62

Şekil 3.35. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan kaynaklı bağlantı numunesi	63
Şekil 3.36. Sonlu elemanlar analizinde çekme yükleme koşulu için oluşturulan çift T kaynaklı bağlantı.....	63
Şekil 3.37. Sonlu elemanlar analizinde moment yükleme koşulu için oluşturulan çift T kaynaklı bağlantı.....	64
Şekil 3.38. Latin hiper küp yöntemi ile dağıtılan parametre verileri (a) t1, (b) t2, (c) a/t1, (d) a/r, (e) l/t1, (f) Kaynak açısı, (g) g	65
Şekil 3.39. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan algoritmanın önerilen iş akış şeması	66
Şekil 3.40. SCF eğitimi için kullanılan yapay sinir ağının şematik yapısı.....	67
Şekil 3.41. Etkin çentik gerilme metodu gerilme senaryosu için arayüz	68
Şekil 3.42. Nominal gerilme metodu gerilme senaryosu için arayüz	69
Şekil 3.43. Sıcak nokta gerilme metodu gerilme senaryosu için arayüz	69
Şekil 3.44. Zamana bağlı veriler için yağmur akış metodu için arayüz	70
Şekil 3.45. Yapay sinir ağı girdi parametre arayüzü	70
Şekil 3.46. Yapay sinir ağı çıktı parametre arayüzü.....	71
Şekil 3.47. Termal analizler için geliştirilen arayüz.....	71
Şekil 4.1. Doğrusal ekstrapolasyona göre Numune 1 sonuçları	73
Şekil 4.2. Doğrusal ekstrapolasyona göre Numune 2 sonuçları	73
Şekil 4.3. Kuadratik ekstrapolasyona göre Numune 1 sonuçları.....	74
Şekil 4.4. Kuadratik ekstrapolasyona göre Numune 2 sonuçları.....	74
Şekil 4.5. Kırılma anı (a) SEM analizi (b) Deneysel çalışma.....	75
Şekil 4.6. Uygulanan kuvvet ve normal gerilme	76
Şekil 4.7. Uygulanan nümerik ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması (a) maksimum asal gerilme (b) hata oranı (c) gerilme büyütme faktörü (d) 500 MPa altı gerilme büyütme faktörleri.....	78
Şekil 4.8. Modal test FFT dönüşümü ile elde edilen sonuçlar	79
Şekil 4.9. 9 moda kadar modal analiz sonucu mod şekilleri	80
Şekil 4.10. Termal analiz sonuçları için sıcaklık-zaman dağılım grafiği	82
Şekil 4.11. Ana malzeme boyunca termal analiz sonucunda elde edilen maksimum ana kalıntı gerilme değerleri.....	82
Şekil 4.12. Fourier dönüşüm sonrasında elde edilen deneysel modal test sonuçları (a) 0-300 Hz (b) 3000-6000 Hz	85
Şekil 4.13. Harmonik cevap analiz sonuçları	85
Şekil 4.14. SEA modellemesinin doğal frekans hata oranlarının sonuçları (a) SP 1-3 (b) SP 4-6 (c) SP 7-9 (d) SP 10-13	89
Şekil 4.15. Parametrik denklem sonuçları (a) hedef-çıktı farklarının dağılımı (b) hedef-çıktı verileri.....	93
Şekil 4.16. a/r parametresine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	94
Şekil 4.17. Kaynak açısına göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri	94
Şekil 4.18. Kaynak penetrasyon etkilerine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri	95
Şekil 4.19. Kaynak kalınlığı, malzeme kalınlıkları ve yarıçap değerlerinin gerilme konsantrasyon faktörlerine etkileri	96
Şekil 4.20. Bağlı hataların olasılık değerlerinin normal dağılım grafiği.....	96
Şekil 4.21. Kutu grafikleri ile karşılaştırma	97
Şekil 4.22. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için verilerin kutu grafiği ile karşılaştırılması.....	100
Şekil 4.23. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için hata oranlarının kutu grafiği ile karşılaştırılması.....	101

Şekil 4.24. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için hata oranlarının normal dağılım ile karşılaştırılması.....	101
Şekil 4.25. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için verilerin normal dağılım ile karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.26. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için verilerin kutu grafiği ile karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.27. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için hata oranlarının kutu grafiği ile karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.28. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için verilerin normal dağılım ile karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.29. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için hata oranlarının normal dağılım ile karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.30. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için a/r parametresine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	106
Şekil 4.31. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için kaynak açısına göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	107
Şekil 4.32. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için kaynak penetrasyon etkilerine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	108
Şekil 4.33. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için kaynak kalınlığı, malzeme kalınlıkları ve yarıçap değerlerinin gerilme konsantrasyon faktörlerine etkileri.....	109
Şekil 4.34. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için a/r parametresine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	109
Şekil 4.35. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için kaynak açısına göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	110
Şekil 4.36. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için kaynak penetrasyon etkilerine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri.....	111
Şekil 4.37. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için kaynak kalınlığı, malzeme kalınlıkları ve yarıçap değerlerinin gerilme konsantrasyon faktörlerine etkileri.....	112
Şekil 4.38. Yorulma testleri öncesi GS bağlanarak gerilme değerlerinin elde edilmesi.....	114
Şekil 4.39. 30 Hz zorlayıcı frekansla gerçekleşen GS ölçüm verileri (a) 0-100s (b) 75-75.5s.....	115
Şekil 4.40. GS ölçümleri ve SEA harmonik cevap analizleri karşılaştırma.....	116
Şekil 4.41. Yorulma testleri sonrası hasar bölgeleri.....	117
Şekil 4.42. Yorulma testleri taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüler (a) 1 mm mesafeden (b) 10 mikron mesafeden yorulma hasar bölgesi (c) 10 mikron mesafeden ani darbe bölgesi.....	118
Şekil 4.43. Yorulma testleri neticesinde numunelerde oluşan çatlaklar.....	122
Şekil 4.44. 6 farklı modelleme türüne göre sonuçlanan SP-1-S1100-AW-1 numunesine ait analiz sonucu.....	122
Şekil 4.45. Nominal gerilme değerlerine göre m=3 için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi.....	127
Şekil 4.46. CMM KUG değerlerine göre m=3 için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi.....	128
Şekil 4.47. CMM DSG değerlerine göre m=3 için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi.....	130

Şekil 4.48. CMM KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	131
Şekil 4.49. SLD-1 EÇG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	133
Şekil 4.50. SLD-1 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	134
Şekil 4.51. SLD-1 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	136
Şekil 4.52. SLD-2 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	139
Şekil 4.53. SLD-2 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	141
Şekil 4.54. SLD-2 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	142
Şekil 4.55. SHL-1 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	144
Şekil 4.56. SHL-1 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	145
Şekil 4.57. SHL-1 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	146
Şekil 4.58. SHL-2 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	148
Şekil 4.59. SHL-2 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	149
Şekil 4.60. SHL-2 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	151
Şekil 4.61. SHL-3 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	152
Şekil 4.62. SHL-3 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	154
Şekil 4.63. SHL-3 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi	155
Şekil 4.64. Literatür, tez çalışması ve FAT 36 IIW önerilerinin karşılaştırılması	163

ÇİZELGELER TABLOSU

Çizelge 3.1. S960QL kimyasal bileşenleri	34
Çizelge 3.2. Aristorod89 kimyasal bileşenleri.....	35
Çizelge 3.3. Statik testlerde hazırlanan numunelerin kaynak parametreleri	35
Çizelge 3.4. S960QL mekanik özellikleri	35
Çizelge 3.5. Kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan kaynak numune ölçüleri ve sıcaklık işlemleri	41
Çizelge 3.6. Kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan kaynak parametreleri	42
Çizelge 3.7. S1100 kimyasal bileşenleri.....	51
Çizelge 3.8. S1100QL mekanik özellikleri	51
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarla öngörülmesiz SEA modelleme tekniklerinin (SHL-1,2,3, SLD-1,2, CMM) ortalama hata oranları	81
Çizelge 4.2. Deneysel çalışmalarla öngörülmesi SEA modelleme tekniklerinin (SHL-1,2,3, SLD-1,2, CMM) ortalama hata oranları	83
Çizelge 4.3. 13 farklı numuneye göre modal test sonuçları	86
Çizelge 4.4. 13 farklı numuneye göre modal test sonuçları	87
Çizelge 4.5. Deneysel ve SEA karşılaştırmaları ile elde edilen istatistiksel sonuçlar	90
Çizelge 4.6. Geometri ve kaynak parametrelerinin doğal frekansa etiklerinin karşılaştırılması.....	91
Çizelge 4.7. Yapay sinir ağı ile T kaynaklı bağlantı için belirlenen matris sonuçları	92
Çizelge 4.8. Yapay sinir ağı ile çift T kaynak bağlantılarda çekme zorlama durumu için belirlenen matris sonuçları.....	98
Çizelge 4.9. Yapay sinir ağı ile çift T kaynak bağlantılarda moment zorlama durumu için belirlenen matris sonuçları.....	99
Çizelge 4.10. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunede 1, 10 ve 25 mm'den ölçülen kalıntı gerilme değerleri.....	113
Çizelge 4.11. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış yapılmamış numunede 1, 10 ve 25 mm'den ölçülen kalıntı gerilme değerleri.....	113
Çizelge 4.12. Kaynak sonrası YFMD işlemi yapılmış numunede 1, 10 ve 25 mm'den ölçülen kalıntı gerilme değerleri	114
Çizelge 4.13. Deneysel olarak GS ile ölçülen farklı frekanslardaki gerilme değerleri	116
Çizelge 4.14. Yorulma testleri neticesinde elde edilen çevrim sayıları, maksimum yük değerleri ve CMM modelleri ile elde edilen maksimum normal gerilme değerleri	123
Çizelge 4.15. Yorulma testleri ve SEA neticesinde elde edilen SLD2, SHL1,2,3 modellemelerinde tespit edilen maksimum normal gerilme değerleri.....	136
Çizelge 4.16. Modelleme tekniklerine göre dağılım genişlik değerleri	156
Çizelge 4.17. Modelleme teknikleri ve kaynak sonrası işlemler için %95 olasılığa göre belirlenen FAT sınıf değerleri.....	162

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ_{nom}	: Nominal gerilme
F	: Kuvvet
A_{nom}	: Alan
k_m	: Gerilme büyütme faktörü
σ_m	: Çekme gerilmesi
σ_b	: Eğilme gerilmesi
σ_{hs}	: Sıcak nokta gerilmesi
$\sigma_{0.4t}$: 0.4t mesafedeki gerilme
$\Delta\sigma$: Gerilme aralığı
m	: Basquin eğimi
$Rp_{0.2}$: Akma dayanımı
Rm	: Çekme dayanımı
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
T_σ	: Gerilme dağılım genişliği
T_N	: Ömür dağılım genişliği
bi	: Bias
Wi	: Ağırlık matrisi

Kısaltmalar

ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
SEM	: Sonlu elemanlar metodu
IIV	: Uluslararası kaynak enstitüsü
FAT	: Yorulma sınıfı
SCF	: Gerilme konsantrasyon faktörü
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
EMA	: Deneysel modal analiz
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
S-N	: Gerilme-Ömür
YFMD	: Yüksek frekanslı mekanik dövme
FFT	: Hızlı Fourier dönüşümü
NDT	: Tahribatsız test
SLD	: Katı model
SHL	: Kabuk model
CMM	: Koordinat ölçüm makinesi
MAG	: Metal aktif gaz
FRF	: Frekans tepki fonksiyonu
SP	: Numune
XID	: X ışını difraksiyonu
AW	: Kaynaklı
BG	: Kaynak ucu taşlanmış

HFMI	: Yüksek frekanslı mekanik dövme
Stdv	: Standart sapma
RMSE	: Ortalama hataların karelerinin karekökü
YSA	: Yapay sinir ağı
KUG	: Kaynak ucu gerilme
GS	: Gerinim ölçer sensor
DSG	: Doğrusal sıcak nokta gerilme
KSG	: Kuadratik sıcak nokta gerilme
BDM	: Bilgisayar destekli mühendislik
BDT	: Bilgisayar destekli tasarım
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge



1. GİRİŞ

Kaynaklı bağlantılar, yapılar için genellikle en düşük yorulma ömrüne sahip bağlantılardır. Bu sebeple kaynaklı bağlantılar güvenilir bir tasarım ve dayanıklılık için önem arz etmektedir (Shahani ve Shakeri, 2019). Üretim esnasında kaynak banyosunda birçok süreksizlikler meydana gelmekle beraber penetrasyon testi, manyetik parçacık testi, ultrasonik muayene gibi tahribatsız testler ile kontrolleri yapılabilmektedir. Kaynak işlemi sırasında uygulanan tüm işlemler ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) bölgesinin mikroyapısını etkilemektedir. Bu bölgede oluşan yapı ve kaynak banyosunda oluşan süreksizlikler kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini etkilemektedir (W. Shin ve ark., 2021). Kaynaklı bağlantıların yorulma hesaplamaları yapılırken deneysel bir yöntem imkânı yoksa sonlu elemanlar metodu (SEM) analizleri gerçekleştirilmektedir. SEM analizleri ile kaynaklı bağlantıların kaynak ucu ve kökü incelenip değerlendirmeler yapılmaktadır (Campagnolo ve ark., 2022; Corigliano ve ark., 2021; Karabulut ve Rossi, 2021). Kaynak bağlantı modelleme tekniklerine göre sonuçlarda değişkenlik gösterebilmektedir (Heyraud ve ark., 2021).

Kaynaklı bağlantılar SEM analizlerinde incelenip değerlendirmeler yapılırken Eurocode 3, IIW, AWS ve SSAB gibi standart veya kurumların tavsiyeleri ile değerlendirmeler yapılmaktadır (“Eurocode 3: EN 1993-1:Design of steel structures,” 2005; Karthik ve Mahendramani, 2021; Kuoppa ve ark., 2012). Son zamanlarda yayınlanan literatür çalışmalarında özellikle IIW önerilerinin tutarlılığı sebebiyle bu tavsiyeler üzerine araştırmalar gerçekleştirilmektedir (Hultgren ve ark., 2023; Løvenskjold Larsen ve ark., 2022; Man ve ark., 2022). Çalışmalar neticesinde IIW önerilerinin genellikle konservatif sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca kaynak ucuna yapılan taşlama, TIG kaplama, yüksek frekanslı etki gibi işlemlerin yorulma ömrünü iyileştirdiği görülmektedir.

Kaynaklı bağlantılarda voltaj, akım, ilerleme hızı, koruyucu gaz, dolgu teli, ortam şartları, kaynak geometrisi gibi birçok parametre, ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını ve kaynak soğumasıyla beraber o bölgede oluşan fazı etkileyebilmektedir (Gáspár, 2019; Mičian ve ark., 2020; Moravec ve ark., 2019). Bu yüzden seçimi yapılan parametreler statik ve dinamik zorlayıcı yükler altında yapının emniyetini etkileyebilmektedir (Tsutsumi ve ark., 2022). Bu sebepten dolayı seçilen parametrelere göre tahribatlı testler yapılarak kaynaktaki mekanik özelliklerin incelenmesi önerilmektedir. Özellikle mobil vinç makineleri gibi ağır yük taşıma kapasitesine sahip

gerilmelerin çok yüksek ve tekrarlı olduğu yapılarda tahribatlı ve tahribatsız muayeneler hem kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini hem de süreksizliklerin takibi için önem arz etmektedir (Berg & Stranghöner, 2016). Mobil vinçlerde penetrasyon testi, manyetik parçacık testi, ultrasonik test, gözle muayene testi yapılarak EN 5817 standardındaki kalite seviyelerine göre kaynak kusurları kontrol edilmelidir (5817).

Kaynaklı birleştirmelerde sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan birçok modelleme tekniği bulunmaktadır. Uygulanan sonlu elemanlar modeline göre bulunan sonuçlar büyük değişikliklere sebep olabilmektedir. Uluslararası kaynak enstitüsü (IIW), kaynak bacak ucunda (welding toe) ve kaynak kökünde oluşan yapısal gerilmeler ve yorulma ömür değerleri için sıcak nokta gerilme metodu dâhil olmak üzere dört adet metot önermektedir (Niemi ve ark. 2018). Son yıllarda yapılan bazı bilimsel çalışmalar sıcak nokta gerilme metodunun yapılan testlere yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir (Iqbal ve ark. 2020). Sonlu elemanlar analizlerinde kaynaklı birleştirmelerde kaynak banyosunda oluşan süreksizliklerin ve sıcak nokta gerilme gerilmesinin hesap edilmesinde analitik formülasyonlar etkili olmamaktadır. Yapıların karmaşık olması durumunda ve bu formülasyon yetersizliğinden dolayı sonlu elemanlar analizi daha pratik ve doğruya en yakın sonuçları ortaya koymaktadır (Ali ve ark. 2020; Meyghani ve ark. 2019). Sıcak nokta gerilme hesabında ise farklı sonlu elemanlar modelleme teknikleri kullanılarak gerilmeler en ideal şekilde hesaplanmaktadır (Iqbal ve ark. 2020). Kaynak banyosunda oluşacak süreksizliklerin dâhil edilmesi durumunda bulunan gerilme değeri gerilme büyütme faktörü olan k_m katsayısı ile çarpılmalıdır (Hobbacher 2016).

Sıcak nokta gerilme metodu ile kaynak dikişinde statik ve dinamik yükler altında zorlamalar ile yorulma ömür hesapları da yapılabilmektedir. Yorulma ömrü için kaynatılacak iş parçası ve ana malzeme biçimine göre IIW dokümanlarından bulunan FAT tablolarına göre değerler belirlenmektedir (Shin ve ark. 2021; Dong ve ark. 2019). Sonlu elemanlar kaynak modellemesinde, kabuk modelleme ve katı modelleme olarak 2 farklı tipte yapılabilmektedir (Niemi ve ark. 2018). Kabuk ve katı modelleme için de farklı modelleme çeşitleri bulunmaktadır. Yapılan modele göre sonuçlarda değişiklik gösterebilmektedir (Kim ve ark. 2015; Yamamoto ve ark. 2020).

Gerinim ölçer sensörleri lokal bölgelerdeki gerinim değerlerini ölçmek amacıyla kullanılmakta olup hooke yasasına göre malzemenin elastikiyet modülü ile gerilme değerleri bulunmaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde kalıntı gerilmeleri ölçmek için, statik ve dinamik yüklemeler sonucunda lokal bölgelerdeki gerilmeleri ölçmek amacıyla kullanılmaktadır (Feng ve ark. 2020; Li ve ark. 2017). Farklı köprüleme tiplerine sahip

olup genellikle çalışmalarda Wheatstone köprüleme tipi ile gerinim ölçer sensör ile gerilme ölçüm çalışmaları yapılmaktadır (Güven ve Rende 2020).

SCF hesaplamaları, mühendislik tasarımı ve yapısal analiz alanında önemli bir etkidir. Yapısal bileşenler içindeki gerilmenin lokalize artışını inceleyen bu hesaplamalar, mühendislik sistemlerinin dayanıklılığı ve güvenliği için büyük önem taşımaktadır. SCF hesaplamaları deneysel çalışmalar, ampirik denklemler ve sonlu elemanlar yöntemi olarak 3 yöntemle tespit edilebilmektedir (Kolios ve ark. 2019). Uzun ömürlü güvenilirliği sağlamada çok önemli bir faktör olan SCF yapıların yorulma ömrüne ilişkin doğru kararlar verebilmeleri, SCF'nin anlaşılması ve doğru belirlenmesi yoluyla mümkündür (Hectors ve De Waele 2020). Çeşitli bileşenlerin ve sistemlerin yapısal bütünlüğü temel olarak SCF'nin doğru değerlendirilmesine bağlıdır (Wang ve ark. 2021). Yüksek SCF değerleri, yüksek stres konsantrasyonuna sahip alanları işaret edebilir ve bu da yapısal arızanın veya yorgunluğun neden olduğu hasarın habercisi olabilir. Bu nedenle araştırmacılar, sağlam ve dayanıklı yapılar oluşturma arayışlarında büyük ölçüde doğru SCF ve yorulma faktör hesaplamalarını incelerler (Fricke 2003). Yapısal güvenilirliğin sağlanmasındaki önemine ek olarak SCF, yorulma ömrü tahmininde etki eder (N'diaye ve ark. 2007). Kaynaklı bağlantıların önemli bir yönü olan yorulma ömrü tahmini, yorulma çatlaklarının başlatılmasını ve yayılmasını doğrudan etkilediği için SCF'nin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir (Schaumann ve Schürmann 2019). Bu değerlerin tespit edilmesi ile zaman kazancı ve maliyet açısından da önemlidir (Kiraz ve ark. 2023). Bu değerler kaynaklı bağlantının tasarımına göre değişkenlik gösterebilir. T kaynaklı bağlantılarla çift T kaynaklı bağlantılı yapılarda farklı konsantrasyon faktörleri olabilmektedir.

Modal test, bir yapının veya mekanik sistemin dinamik davranışını inceleyen ve ölçen bir tekniktir. Modal testin asıl amacı, sistemin doğal frekanslarını belirlemek olup ayrıca mod şekillerini de belirleyebilmektedir. Doğal frekanslar, bir sistemin belirli bir girdi ile ne kadar sık titreceğini gösterir. Modal testler sırasında, sisteme bilinen bir girdi verilir ve sistemin cevabı ölçülür (Husain, Snaylam, ve ark. 2009). Girdi olarak, geçici impuls, sinüzoidal uyarı veya beyaz gürültü gibi farklı formlar alabilir. Sistemin cevabı daha sonra sinyal işleme teknikleri kullanılarak analiz edilir ve doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri çıkarılır (Ewins 2009).

Modal testler, uzay, otomotiv, mekanik, inşaat gibi birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılır. Frekans tabanlı değerlendirmeler gerçekleştirilen alanlarda örneğin; köprüler, binalar, uçaklar, mobil vinçler gibi yapılar üzerinde

yapılabilir. Özellikle frekans düzleminde yorulma ömür tahminleri, rezonans durum için incelemeler yapılırken modal analiz veya test sonuçlarının doğruluğu önem kazanmaktadır (Pei ve ark. 2022). Modal test sonuçlarının doğruluğu ölçüm sisteminin kalitesi ve analistin uzmanlığına bağlıdır. Kaynaklı bağlantılarda süreksizlik, ısı şok, ortam şartları gibi durumlardan dolayı doğal frekansını etkileyebilecek birçok etken bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı kaynaklı bağlantıların modal testler ile doğrulanması önem kazanmaktadır (Shrivastava ve ark. 2023). SEM analizi, yapıların tasarımı, uygunluk ve güvenliği gibi birçok faktörü dikkate alarak, yapıların dayanıklılığını ve performansını doğru bir şekilde değerlendirmesine yardımcı olur (Ebrahimi ve ark. 2019). Bu yöntem, yapıların dayanımını ve performansını önceden tahmin etmeyi ve gerektiğinde müdahil etmeyi mümkün kılar. Kaynaklı bağlantılar için uluslararası kaynak enstitüsü (IIW) tarafından önerilen etkin çentik gerilme yaklaşımına göre modelleme tekniği kullanılabilir (Zhao ve ark. 2022; Korupoju ve ark. 2022). Bu modelleme tekniğinde kaynak ucu 1 mm yarıçap oluşturularak incelenmektedir (Hobbacher 2016). Ayrıca SEA yazılımlarında farklı kaynaklı bağlantı modelleme tekniği ile modal analizler gerçekleştirilerek yapının doğal frekans değerleri için sonuçlar verebilmektedir (Rotondella ve ark. 2017; Büyükbayram ve ark. 2015; Niemi ve ark. 2018; Yuan ve Zhu 2021; Fouzi ve ark. 2018). Modal test ve SEA doğrulaması, yapıların tasarımı, uygunluğu ve güvenliği gibi birçok faktörü dikkate alarak, yapıların titreşim ve dinamik davranışını doğru bir şekilde değerlendirmesine yardımcı olur (FF ve Lim 2020; Abdullah ve ark. 2022).

Sonlu elemanlar analizlerinde (SEA) yapısal hasarların tespiti için birçok farklı uygulamaları vardır. Yapısal hasarı etkileyen parametrelerden birisi de doğal frekans olarak adlandırılan rezonans frekansı ile zorlayıcı yük frekansının birbirine yakın olmasıdır. SEA gerçekleştirilirken fiziksel olarak olmayan fakat geometri olarak temsil eden bir yapının analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Bunun için fiziksel olarak üretilecek veya üretilen yapı ile aynı sonuçları vermesi istenir. Fiziksel yapıya en yakın sonuçları vermesi için seçilen SEA modelleme teknikleri önem kazanmaktadır (Sharma ve ark. 2021). Özellikler kaynaklı bağlantılarda yüksek ısı girdisi ile değişen malzeme özellikler SEA sonuçlarını değiştirebilmektedir. Genel yapı çeliklerine göre yorulma ömrü kaynaklı bağlantılarda daha düşüktür. Yorulma sınıfı (FAT) değerlerinin düşük olması kaynaklı bağlantıların SEA’de dikkatle incelenmesi için önem kazanmaktadır. Yapı hasarlarında önemli bir etkisi olan doğal frekanslarında özellikle kaynaklı bağlantılarda doğru değerlendirilmesi önem arz etmektedir. SEA titreşim analizlerinde

eğer modal analizler yanlış elde edilirse titreşim analiz sonuçları da yanlış çıkmaktadır. Bu nedenle SEA modellemelerinin doğru olarak güncellenmesi için gerçek olan fiziksel ortamda deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak en doğru yaklaşım tespit edilmelidir. Hesaplama tekniklerinin artması ile birlikte birçok alanda deneysel testler yerine SEA ile tahminler gerçekleştirilmektedir (Rotondella ve ark. 2017). Titreşim tabanlı modellemeler için testler gerçekleştirilirken cevap tabanlı ve modal tabanlı metotlar bulunmaktadır. Cevap tabanlı frekans cevap fonksiyonu verilerek değerlendirmeler yapılır fakat bu yöntem yüksek frekanslı yapılar için uygun görülmemektedir. Diğer modal tabanlı yöntemde doğal frekans ve mod şekilleri ile birlikte yüksek frekanslı değerler için tespitler yapılabilmektedir (Esfandiari ve ark. 2010). Mühendislik alanındaki tüm disiplinlerde, bir sistemin belirli bir giriş veya zorlama fonksiyonuna nasıl tepki verdiğini incelemek için deneysel yöntemler kullanılmaktadır. EMA yöntemleri, geleneksel temas tabanlı darbe çekici (Warren ve ark. 2011) veya titreşim cihazı uygulaması (Kalybek ve ark. 2021) ve ivmeölçer tepki ölçümü gibi yöntemlerden, temas olmayan hoparlör uygulaması (Hu ve ark. 2019) ve lazer titreşim ölçer (Xu ve ark. 2017), fotogrametri (Gwashavanhu ve ark. 2016) veya DIC tepki ölçümü gibi tekniklere kadar çeşitli evrimler geçirmiştir (Will ve Zhu 2023). Bu yöntemler, uyarım ve tepki ölçüm tekniklerinin farklı kombinasyonlarını içerebilmektedir.

Kaynaklı bağlantıların dinamik olarak zorlama koşullarında yorulma ömür tahminleri için uluslararası kaynak enstitüsü önerilerine göre yaklaşımları mevcuttur. Etkin çentik gerilme yaklaşımı kaynak ucu ve kaynak kökünü incelemektedir (Hobbacher 2016). Bu yaklaşımda SEA modellemeleri için kaynak ucuna 1 mm Radius oluşturularak modellenmesi önerilmekte ve yorulma sınıfı bu modellemeye göre 225 MPa seçilmektedir (Fricke 2012). Kaynaklı bağlantıların birçok modellenmesi mevcut olup deneysel çalışmalara göre sonuçları değişkenlik gösterebilmektedir (Büyükbayram ve ark. 2015). Kaynaklı bağlantıların yorulma ömrünün düşük olması sebebi ile modal analizler için gerçekleştirilen SEA modellemeleri doğru seçimi önemlidir.

1990'lı yıllardan beri özellikle dinamik zorlama durumları için SEA'de doğru modellemelerin metodolojisi ve korelasyon gelişimi için çalışmalar gerçekleştirilmeye devam etmektedir (Ren ve Chen 2010; Friswell ve Mottershead 1995; Baker 1992). Rotondella et al. (Rotondella ve ark. 2017) modal testler ve 2 farklı SEA modeli ile karşılaştırmalar yapmış ve hata oranlarını tespit etmiştir. Yakın zamanlarda da modal analizler ve modal testlerin karşılaştırılması ile birlikte SEA modelleme doğrulamaları için birçok çalışma bulunmaktadır (Ereiz ve ark. 2022). Bir çalışmada 6 adet farklı SEA

modelleme tekniğine göre modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır (de Arruda ve ark. 2023). Abdullah et al. (Abdullah ve ark. 2020) otomotiv sektöründe olan bir araç üzerinde SEA modellemeleri ve deneysel çalışmaları karşılaştırarak hata oranını azaltmak için modellemeyi güncellemiştir. Wen (Wen 2007) 2 farklı uygulamada SEA modellemeleri için modal testler ile doğrulama yapmıştır. Abdullah et al. (Abdullah ve ark. 2022) 4 farklı SEA modellemeleri ile nokta kaynağı ile numune hazırlanmış yapının modal test ile verilerini karşılaştırmış ve hata oranları tespit etmiştir. Kaynaklı bağlantıların SEA'da doğal frekansları karşılaştırılırken kompleks yapılarda veya küçük numunelerde birçok modelleme tekniği uygulanarak çalışmalar yapılmaktadır (Fouzi ve ark. 2018; Fouzi ve ark. 2019; Husain, Khodaparast, ve ark. 2009). Çalışmalar sadece dinamik karakteristiğini belirleme amaçlı değil ayrıca kaynak sonrası kalite kontrol amaçlı da gerçekleştirilebilmektedir (Rajaei ve ark. 2020; Shrivastava ve ark. 2023). Gharehbaghi et al. (Gharehbaghi ve ark. 2023) kalıntı gerilmenin doğal frekansa etkilerini deneysel ve SEA ile incelemiştir. Modal testler ile doğal frekansın tespiti için gerçekleştirilen çalışmalar dinamik yüklemının olduğu kanatlar, otomotiv, açık deniz (offshore) yapıları gibi birçok sektörde gerçekleştirilmekte ve yapısal hatanın azaltılması için önem arz etmektedir (Andika ve ark. 2023; Mirza ve ark. 2020; Will ve Zhu 2023). 3D yazıcıların parçalarda da modal testler gerçekleştirilebilmektedir (Foroozanfar ve ark. 2023). Chen et al. (Chen ve ark. 2023) bir rüzgâr türbini kanadı için 3D lazer tarayıcı ile taratarak modal test ve SEA sonuçlarının incelemiştir. Gülbahçe ve Çelik (Gülbahçe ve Çelik 2022) çekiç gezdirme işlemi gerçekleştirerek çelik bir plaka üzerinde modal testler gerçekleştirmiştir.

Bu tez çalışma kapsamında statik yüklemeler için gerilme büyütme faktörleri deneysel ve sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılarak elde edilmiştir. Doğal frekans içinde farklı kaynak parametrelerinde numuneler hazırlanmış olup bu parametrelerin etkileri incelenmiştir. Doğal frekansın doğru tespiti farklı frekanslarda dinamik zorlamalara karşı yapının doğru değerlendirilmesi için önem kazanmaktadır. Gerilme konsantrasyon faktörleri için ise çift T ve T kaynak bağlantılı yapılar için kod parçacığı hazırlanarak yapay sinir ağı ile yeni parametrik denklemler oluşturulmuştur. Böylelikle literatürdeki çalışmalara göre daha doğru ve daha hızlı sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan bu yazılımda metodolojik olarak yeni yaklaşımlar geliştirilmiş ve benzer çalışmalar için bu metot önerilmiştir.

Ayrıca 80 adet numune hazırlanarak yorulma testleri gerçekleştirilerek yorulma ömür tahminleri için yeni S-N eğrileri oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizlerinde

kaynak modelleme teknikleri ile yorulma test sonuçları elde edilerek modelleme tekniklerine göre yeni S-N eğrileri önerilmiştir. S-N eğri eğimi sabit 3 alınmış ve gerçekleştirilen çalışmalarda ayrıca kaynak sonrası yapılan kaynak ucu taşlama ve dövme işlemleri sonucunda elde edilen S-N eğrileri de karşılaştırılmış ve önerilmiştir. Yorulma testleri modelleme tekniklerinin farkları, malzeme farkları ve kaynak sonrası yapılan işlemler için karşılaştırmalar yapılmış ve yeni FAT değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca etkin çentik gerilme yaklaşımında önerilen modelleme tekniğinden farklı olarak 4 farklı daha modelleme tekniklerinde S-N eğrileri önerilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında literatürden birçok çalışma incelenmiştir. İncelenen çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda yeni bulgular ve yeni yaklaşımların geliştirilmesi için yorulma ömür tahminleri, gerilme konsantrasyon faktörü, doğal frekans alanında literatürdeki çalışmalar ayrı ayrı incelenmiştir.

Güven F. (Güven 2018), “Robot mekanizmaları tarafından yapılan kaynak dikişlerinin dinamik yüklere karşı olan dayanımlarının incelenmesi” başlıklı çalışmasında, ana malzeme ve iş parçası arasında kaynak işlemi gerçekleştirilmiş ve bu parçalar ile birçok numune hazırlanmıştır. Zamana bağlı belirli frekanslar ile dinamik test yapılacak deney düzeneği geliştirilmiştir. Sıcak nokta yaklaşımı ile (duyarlı gerilme yaklaşımı) ile gerinim ölçer (strain gauge) sensörleri bağlanarak, parçalar düşük çevrimler ile hasara uğrayana kadar testler gerçekleştirilmiş olup sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Dinamik yüklemeler altında yapılan bu testler ve analizler sonucunda tek taraflı kaynaklar için 0.27, çift taraflı kaynaklar için 0.34 düzeltme katsayısı ile bulunan gerilme değerleri için daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Bu gerilme düzeltme katsayıları daha doğru gerilme tespitleri için kullanılmakta olup bu çalışma da önerilmiştir.

Vieira Ávila ve ark. (Ávila ve ark. 2022), “Kaynaklı boru şeklindeki K bağlantılarına uygulanan sıcak nokta gerilimi konsepti hakkında sayısal analiz ve değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada, sıcak nokta gerilme yaklaşımının kompleks yapılarda nominal gerilme yaklaşımı metoduna göre daha uygun sonuçlar verdiği vurgulanmış ve sonlu elemanlar analizi ile sonuçlar değerlendirilmiştir. DNVGL ve IIW tavsiyelerine göre gerçekleştirilen kaynak modelleme yaklaşımlarına göre bir KT kaynak bağlantısına sahip yapıda karşılaştırmalar yapılmıştır. Abaqus SEM yazılımı ile Sıcak nokta gerilme yaklaşımı kullanılıp ekstrapolasyon yapılarak gerçekleştirilen çalışmada IIW yaklaşımının daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Dong Y. ve ark. (Dong ve ark. 2019), “Sıcak nokta stres yaklaşımına dayalı olarak hatalı hizalamalara sahip alın kaynaklı bağlantıların yorulma analizi” başlıklı çalışmada, doğru hizalanmamış kaynaklı yapı için SEA’de sıcak nokta gerilme yaklaşımı ve Monte Carlo yöntemi kullanılarak gerilme sonuçları incelenmiştir. Monte Carlo yöntemi gerilme belirsizliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Sıcak nokta gerilme yaklaşımı ile değerlendirilirken büyütme katsayıları uygulanmıştır. Distorsiyon gerçekleşmiş veya

açısal kaynatılmış yapılar için incelenen çalışmada SEM analizlerine göre ortalama gerilme konsantrasyon değeri 1.18 bulunmuş olup, distorsiyon değerine göre büyütme katsayı grafiği oluşturulmuştur.

Song W. ve ark. (Song ve ark. 2022), “Çelik çapraz kaynaklı bağlantıların yorulma kırılma davranışı üzerindeki yanlış hizalama etkisi” başlıklı çalışmada, simetrik T biçimindeki doğru hizalanmamış kaynaklı yapıda yük altında deplasmanların yorulma eğrisi (S-N) grafiğine etkilerini incelemiştir. IIW'nin nominal gerilme, sıcak nokta ve duyarlı çentik yaklaşımları ile SEA analizleri gerçekleştirilerek FAT sınıfı seçilerek deneysel çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda kaynak ucundaki gerinim enerji yoğunluğu-açısal bozukluk grafikleri çıkarılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde kaynak kalınlığının sac kalınlığına oranı 0.8 ve açısal bozukluk 5°'den fazla olursa, SEA kaynak ucu değerlendirmelerinde hataların olacağı tespit edilmiştir.

Larsen ve ark. (Larsen ve ark. 2021), “T boru bağlantı K-düğümünde kaynak bağlantısının sonlu elemanlar analizi kullanılarak yorulma ömrü tahmini” başlıklı çalışmada, denizlerde kullanılan rüzgâr türbinleri için borulardan oluşan K kaynak bağlantılı numuneler hazırlanmış olup gerinim ölçer sensörleri bağlanarak yorulma testleri gerçekleştirilmiş, IIW tavsiyelerinden olan FAT sınıfı ile sıcak nokta gerilme yöntemine göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. Numunelerin kaynak modellemesi için 3D tarayıcı ile katı model datası oluşturulup bu model SEA yazılımına aktarılmıştır. Ayrıca DNVGL kaynak modelleme yaklaşımı da dahil olmak üzere 6 farklı kaynak modellemesi ile SEA gerçekleştirilip karşılaştırmalar yapılmıştır. En doğru sonuç 3D tarama ile gerçekleştirilen kaynak modellemesinde çıkmıştır. Doğruluk oranı yüksek diğer kaynak modelleme ise DNVGL önerilerinden olan modellemede bulunmuştur.

Brunnhöfer ve ark. (Brunnhöfer, Buzzi, Pertoll, Rieger, ve ark. 2022), “Nominal ve etkin çentik gerilimi yaklaşımı ile kaynaklı ve YFMD ile işlenmiş durumdaki hafif ve yüksek dayanımlı çelik haç biçimli bağlantıların yorulma tasarımı” başlıklı çalışmada, simetrik T biçiminde numuneler ile yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. IIW tavsiyelerinden nominal gerilme ve duyarlı çentik gerilme yaklaşımı ile SEA gerçekleştirilip karşılaştırmalar yapılmıştır. Yorulma dayanımının malzemenin dayanımına etkisinin olmayacağını belirtmek için S355 ve yüksek mukavemetli S700 malzemeleriyle testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca IIW önerilerinden olan ve yorulma ömrünü iyileştiren kaynak sonrası işlemler için yüksek frekanslı mekanik darbe (YFMD) yöntemi seçilerek kaynak sonrası işlemlerin etkileri de incelenmiştir. YFMD işlemi için

S355 numunesinde 1.35 ve S700 numunesinde 1.59 kat yorulma ömründe artış olduğu tespit edilmiştir. Yorulma FAT sınıfı değerine göre kalınlık korelasyon faktörleri S355 için 1.23, YFMD işlemlili 1.15 ve S700 malzemesi için 1.32, YFMD işlemlili 1.20 olduğu tespit edilmiştir. FAT sınıfının ise YFMD işlemlili numuneler için tablolardan FAT 63 seçilmişken S355'te FAT 112'ye, S700 malzemesi için ise FAT 125'e yükseldiği tespit edilmiştir. Nominal gerilme yaklaşımıyla gerçekleştirilen SEA sonucunda daha konservatif sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Bibbo N.D. ve ark. (Bibbo ve ark. 2022), “Çok eksenli değişken genlik yüklemeli kaynaklı test numuneleri üzerinde kritik düzlem yorulma kriterlerinin karşılaştırmalı çalışması” başlıklı çalışmada, çok eksenli yorulma kriterlerinden olan Findley, MWCM, Mataka ve IIW'nin Gough-Pollard kriterlerine göre karşılaştırmak için yorulma test verilerine göre değerlendirmeler yapılmıştır. Karşılaştırılan kriterler S-N eğrileri için konservatif durumları ve ortalama değer hatalarına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre IIW yaklaşımının bu iki değerlendirme kriterine göre ideal olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte kritik düzlem yaklaşımlarının da doğru tahminler gerçekleştirdiği fakat çoklu eksenel gerilme faktörü (non-proportional) uygulanarak konservatif sonuçların olacağı tespit edilmiştir.

Baumgartner (Baumgartner 2017), “Referans yarıçapları kullanılarak kaynaklı bağlantıların yorulma değerlendirmesine ilişkin inceleme” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantı numuneleri hazırlanarak yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. IIW önerilerinden olan duyarlı çentik gerilme metodu ile SEA analizleri gerçekleştirerek çentik yarıçap sonuçlarını etkilediği çalışmada belirtilmiştir. IIW $r=1$ mm çentik yarıçap ve FAT 225 sınıfı önermekte olup bu çalışmada 1 mm'nin altındaki SEA için konservatif olmayan sonuçlar olduğu gösterilmiştir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada yarıçap değerine göre bağımsız bir FAT sınıfı seçilmesi önerilmektedir. Çentik yarıçap değeri önerilen 1 mm dışında 0.3 mm ve 0.05 mm ile SEA gerçekleştirilmiş çalışma neticesinde kalın saclar için 1 mm olması gerektiği tespit edilmiştir. İnce saclar için ise $r=0.3$ mm olursa FAT 340, $r=0.05$ mm olursa FAT 630 sınıfları seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Campagnolo ve ark. (Campagnolo ve ark. 2022), “Referans yarıçapları kullanılarak kaynaklı bağlantıların yorulma değerlendirmesine ilişkin inceleme ve değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada, kaynak sonrası yorulma dayanımı iyileştirme işlemlerinden olan YFMD yapılarak pik gerilme yöntemi (PSM) ilk kez bu işlem için bu çalışmada kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar literatürden alınmış olup ayrıca IIW önerilerinden olan sıcak nokta gerilme yaklaşımı ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Literatürdeki, R oranı -1, -0.43, 0.1 ve 0.5 değerlerine göre yorulma test çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışma neticesinde sıcak nokta gerilme yaklaşımı ile sadece kaynak işlemi için %91, YFMD işlemi için %93 ve PSM sadece kaynak işlemi için %100, YFMD işlemi için %96'sı güvenli bölgede olduğu tespit edilmiştir.

Steimbregger ve ark. (Steimbregger ve ark. 2022), “Kaynak işlemlerinin ultra yüksek mukavemetli çelikte alın kaynaklı bağlantıların yorulma davranışına etkisi” başlıklı çalışmada, termomekanik haddelenmiş S960MC ve ince taneli ıslah çeliği S960QL için yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı gerçekleştirilen testler ile kırılma mekaniği yaklaşımıyla karşılaştırmalar yapmaktır. R=0.1 oranıyla gerçekleştirilen testte çatlak ilerlemesi mikroyapılar ile birlikte incelenmiştir. Çalışmaların neticesi olarak FAT 300 sınıfı için S-N eğimi 3.5 ve FAT 300 sınıfı için eğim 5 alındığında daha doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Yamamoto ve ark. (Yamamoto ve ark. 2020), “B tipi sıcak nokta stresi üzerine bir çalışma” başlıklı çalışmada, IIW önerilerinde sıcak nokta gerilme yaklaşımı ile b tipi olan kalınlık yönündeki gerilmeleri incelemiştir. Kaynak modellemesi olarak kabuk ve katı modelleme yapılarak kaynak ucundaki gerilmeler karşılaştırılmıştır. Farklı kaynak geometri modellemelerine göre yapılan SEA çalışmalarında asal gerilmeler belirlenmiştir. Ana malzemeler 10 mm olup iş parçası için 10 mm, 20 mm ve 40 mm olarak 3 farklı durum ayrıca ana malzemelerin 20 mm olup iş parçalarının 10 mm, 20 mm ve 30 mm olduğu durumlar için toplamda 6 durum için SEA gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde kabul kaynak modellemesi için kaliteli ağ yapısı ile kuadratik ekstrapolasyon yapıldığında kaba ağ doğrusal ekstrapolasyonla aynı sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Eğer iş parçası ve ana malzeme kalınlığı aynıysa kabuk ve katı kaynak modellemelerinde aynı sonuçları verildiği fakat ana malzeme iş parçasından daha düşük kalınlıktaysa kabuk modellemenin daha düşük sıcak nokta gerilme değerleri verdiği tespit edilmiştir. Katı kaynak modellemesi ve kabuk kaynak modellemesi arasındaki fark sacların kalınlık oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sıcak nokta gerilme yaklaşımında b tipi için daha fazla araştırmaların yapılması gerektiği ve böylelikle daha uygun yorulma ömür sonuçları elde edileceği vurgulanmıştır.

Tanaka ve ark. (Tanaka ve ark. 2022), “Gelişmiş bir kabuk-katı sonlu eleman modellemesinde T-bağlantısı için bir çatlak ilerleme simülasyonu” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantı üzerinde çatlak ilerlemesini incelemiştir. Kaynak modellemelerini kabuk ve katı modelleme olarak 2 farklı modelleme gerçekleştirilmiş olup sıcak nokta gerilme yöntemi ile değerlendirmeler yapılmıştır. Çatlak ilerleme yönü ve oranı için sanal

çatlak kapatma-integral (VCCM) yöntemi kullanılarak gerilme yoğunluk faktörü (SIF) hesaplanmıştır. SEA’da çatlak ilerledikçe model yeniden oluşmaktadır ve kuadratik tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca yorulma testi yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde çatlak ilerlemesinde katı ve kabuk modellemenin de kullanılabilceği belirlenmiştir. Büyütme faktörleri uygulanarak SEA’da çatlak ilerlemesinin daha hızlı sonuçlar verdiği görülmüştür. SEA sonuçları testler ile karşılaştırıldığında daha konservatif sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Hectors ve ark. (Hectors ve De Waele 2021), “Kaynak geometrisinin boru şeklindeki bağlantılardaki gerilim konsantrasyon faktörü dağılımları üzerindeki etkisi” başlıklı çalışmada, AWS SEA kaynak geometri modelleme önerilerine göre boru numunesi incelenerek gerilme konsantrasyonları incelenmiştir. Yapılan çalışmada SEA incelenirken de SCF değerlerinin etkili olduğu vurgulanmıştır. SCF değerinin de yükleme tipine göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Katı, kabuk ve kaynaklı olarak modellemeler yapılan bu çalışmada katı modelleme önerilmektedir. SCF katsayılarının belirlenip yapıldığı ömür tahminleri için daha doğru sonuçlar alınacağı vurgulanmıştır. SEA ile belirlenen SCF değerleri için yazarlar ilgili standardın yetersiz olduğu ve daha kapsamlı rehber ihtiyacı olduğu vurgulanmıştır.

Braun ve ark. (Braun ve ark. 2022), “Yüksek mukavemetli çelikten yapılmış yüksek kaliteli alın kaynaklı bağlantılar için lokal yorulma değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımının malzemenin statik dayanımından bağımsız olduğunu belirtmekte olup kaynak sonrası işlem görmüş bağlantıların ve yüksek kaliteli bağlantıların bu durumdan bağımsız olduğunu belirtmektedir. Her ikisinin de sebebi keskin kaynak geçişlerinin olmamasıdır. Bu çalışmada yüksek mukavemetli S500 çeliği ile yüksek kaliteli kaynak bağlantısı için farklı lokal yorulma yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve doğruluğu araştırılmıştır. Nominal, hot-spot, 1 mm konsept, pik gerilme, ENS ve 4R değerlendirme yaklaşımları incelenmiştir. FAT sınıfları ilgili standartların önerileri ile sırasıyla FAT 90, FAT 100, FAT 100, FAT 156, FAT 225 ve FAT 288 belirlenmiştir. Çalışma neticesinde S500 HSS kaynak bağlantılarının tüm testlerinin ilgili FAT sınıflarının üstünde olduğu tespit edilmiştir. Tüm lokal değerlendirme yaklaşımlarının tahmin doğruluklarında büyük farklılıklar tespit edilmiştir. Tüm yaklaşımlarda konservatif sonuçlar vermiş ancak bazı yöntemlerde oldukça tutucu sonuçlar alınmıştır. Nominal ve hot-spot gerilmesi diğer değerlendirme yöntemlerine göre oldukça konservatif sonuçlar çıkarmıştır diğer yöntemler gerçekleştirilen testlere göre daha yakın sonuçlar vermiştir. En yüksek tahmin

doğruluğu duyarlı çentik gerilme yöntemi için gözlemlenmiştir. Diğer değerlendirme yöntemlerinde de benzer sonuçlar bulunmuştur.

Baumgartner ve ark. (Baumgartner ve ark. 2019), “TIG düzeltmesi ile kaynaklı çelik bağlantıların yerel yaklaşımlarla yorulma mukavemeti değerlendirmesi” başlıklı çalışmada, kaynak ucunda TIG kaplama işlemleri incelenmiştir. Çalışmada çeşitli akma dayanımları ve gerilme oranlarına sahip literatürdeki 17 adet test serisi sunulmuştur. Kritik mesafe yaklaşımı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan testlere göre kritik mesafe ölçüsüne göre kritik mesafe faktörleri belirlenmiştir. Kritik mesafe ise malzeme dayanımına göre değişkenlik göstermekte olup çalışmada incelenmiştir. Çalışma neticesinde kaynak ucunun konumu, yüzeyin 0.7 mm altında mesafeye göre gerilmeleri kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Bunların FAT 160 sınıfına göre kullanılabileceği belirlenmiştir. Maksimum gerilme konumunun ise yüzeyin 0.5 mm altında kullanılması gerektiği ve FAT 180 sınıfına ait olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada Denklem 4’e göre malzeme mukavemetinin dahil edilmesi durumunda değerlendirme güvenilirliğinde iyileşme olacağı tespit edilmiştir.

Nazzal ve ark. (Nazzal ve ark. 2021), “Kritik döngüsel yükleme koşullarına tabi kaynak sonrası işlemlerle iyileştirilen kaynaklı yüksek dayanımlı çelik detayların yorulma hasarı” başlıklı çalışmada, kaynak ucu yorulma iyileştirme işlemlerinden olan YFMD birçok yönden ispatlanmış fakat gerilme oranları, gerilme aralığı ve değişken genliklerde (VAL) yeterince ele alınmamış olup bu çalışmada kaynak uçlarına yönelik ömür tahminleri döngüsel yüklemeler için ele alınmıştır. Yanal bağlantılı köşe kaynağı, uzunluk yönünde köşe kaynağı ve alın kaynağı olarak 3 tip kaynaklı bağlantı üzerinde incelenmiştir. YFMD işlemi ile FAT sınıflarında artış olduğu görülmüştür. YFMD işlemi ile birlikte gerilme oranı (R) 1 için uzunluk yönünde köşe kaynağı için %86 oranında iyileşme, yanal bağlantılı köşe kaynağı için %73 ve alın kaynağı için %61 iyileşme görüldüğü tespit edilmiştir. Daha büyük yükler uygulandığında ise yorulma hasarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle YFMD iyileştirmesi, uzunluk yönünde ve yanal bağlantılı köşe kaynağı için %20 oranında, alın kaynağı için ise %14 azalmıştır. Çalışmanın neticesinde YFMD işleminin ümit verici olduğu ve önemi vurgulanmıştır.

Ono ve ark. (Ono ve ark. 2022), “YFMD ile İşlem Görmüş Yüksek Mukavemetli Çelik Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Çatlağı Başlangıç Bölgesinin Hasara Dayalı Değerlendirmesi” başlıklı çalışmada, yüksek mukavemetli bir çelikte çatlak başlangıcını incelemiş olup artık gerilmeleri iyileştirmesi de incelenmiştir. Malzemenin doğrusal olmayan (nonlinear) davranışı SEA malzeme modelinde tanımlanarak analiz

gerçekleştirilmiştir. S690QL çeliğinde kaynak ucuna YFMD işlemi yapılarak artık gerilme giderilmesi netleştirilmiş ve yorulma çatlakları incelenmiştir. Değerlendirmeler ise Smith Watson Topper parametresine göre incelenmiştir. Çalışma neticesinde YFMD oluğunda 0.5 mm derinlik, 0.3fy ile 0.76fy arasında yüksek gerilme bulunmuştur. Uygulanan farklı pik gerilme değerlerine göre kırılma yüzeyi, çatlak ilerlemesi, çatlak başlangıç bölgesi ve çatlak başlangıç tipi değişkenlik göstermiştir. Özellikle uygulanan pik gerilmesi 1fy'den 0.7fy'ye düşürüldüğünde çatlak başlangıç bölgesi beklenmedik bir şekilde YFMD oluğundan YFMD ile işlenmiş bölge ile kaynak metali arasındaki sınırın yakınında oluşmuştur.

Schubnell ve ark. (Schubnell ve ark. 2020), "Farklı kaynak türleri için yerel kaynak geometrisi parametrelerinin belirlenmesinde optik ölçüm tekniğinin ve değerlendirme yaklaşımının etkisi" başlıklı çalışmada, kaynak geometrisinin yorulma ömür tahmini üzerinde önemli etkisinin olduğunu belirtmiştir. Kaynak ucundaki geometri gerilme konsantrasyon katsayısına bağlı olarak yorulma ömür tahminleri üzerinde etkileri önem arz etmektedir. Bu çalışmada kaynak geometrisinin etkilerinden dolayı, 3B tarayıcı ile kaynak geometrisi numunede yapılan kaynak geometrisine göre geometri oluşturulmuştur ve bu geometrilere incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Heide ve ark. (Heide ve ark. 2022), "Otomatik geometri ölçümü ve alın kaynaklarında işleme" başlıklı çalışmada, gerilme konsantrasyonunun önemi vurgulanmakta olup haddelenmiş bir yapıdaki kaynaklı bağlantı bölgesi incelenmiştir. Optik lazer çizgi tarama kullanan yeni bir otomatik ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bu sistem kenar açıları ve kaynak uçlarının yarıçapları geometrisi oluşturulurken önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Sunulan araştırmalar derin haddelendirme işleminin gerilme konsantrasyonunu etkilediği göstermektedir. Haddelenmeden önce ve sonra haddelleyen merdanenin yarıçapları veya çentik gerilmeleri ile ilk kanat açısı arasındaki fark arasında bir korelasyon bulundu.

Fustar ve ark. (Fuštar ve ark. 2022), "Boyuna ve enine eklerle kaynaklı ve YFMD ile işlenmiş S355 malzemenin yorulma testleri" başlıklı çalışmada, yorulma ömrünü artıran YFMD işlemi kaynak uçlarına uygulanmıştır. Çatlak başlama ve ilerleme olarak 2 aşama YFMD iyileştirme parametrelerinde kullanılabilir. Bu parametrelerin belirlenmesi için yüksek çevrimli yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak geometrisi 3D tarama ile hazırlanmış olup kalite kontrol aşamalarında da kullanılabileceği belirtilmiştir. 0.47 mm YFMD derinliği ile gerçekleştirilen yorulma testlerinde YFMD işleminin yorulma ömrünü artırdığı tespit edilmiştir. Tüm numunelerde de yorulma

ömüründe artış göstermiş olup ilk numunede uzunluk yönündeki kaynaklı bağlantıda kaynaklı 172014 çevrim iken YFMD işlemi ile beraber 2593208 çevrim sayısına iyileştirdiği ve diğer numunelerinde artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Schiller ve ark. (Schiller ve ark. 2022), “Çeliklerin kısmi nüfuziyetli alın kaynaklarının yorulma dayanımı” başlıklı çalışmada, yetersiz nüfuziyete sahip S355 malzemeye sahip numunelerin yorulma ömürleri incelenmiştir. Tek taraflı ve çift taraflı Y kaynak dikişine sahip numunelere $h=4, 6, \text{ ve } 8$ mm boşluk bırakılmıştır. Plaka kalınlığı 20 mm olan bu numunelerde etkin çentik yöntemiyle değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde bu numuneler gibi yetersiz nüfuziyete sahip ve kaynak dikişinde boşluklar bulunabilen yapılarında değerlendirilebileceği tespit edilmiştir. $H<20t$ çift taraflı kaynak dikişleri için 63 MPa yorulma dayanımına, $h<10t$ olan tek taraflı Y dikişleri için 71 MPa yorulma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Brunnhofer ve ark. (Brunnhofer, Buzzi, Pertoll, Leitner, ve ark. 2022), “Nominal ve yerel yaklaşımlarla TIG ile işlenmiş yüksek dayanımlı çeliklerde T kaynak bağlantılarının yorulma dayanımı değerlendirmesi” başlıklı çalışmada, IIW önerilerine göre kaynaklı bağlantılarda yorulma mukavemeti malzemedan bağımsız olduğu vurgulanmakta olup kaynak sonrası işlemlerle yorulma dayanımının iyileştirilebileceği vurgulanmıştır. Bu çalışma da yüksek mukavemetli çelik S700 simetrik T biçimli numunede kaynak ucuna TIG kaplama (TIG dressing) uygulanarak testler gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerine göre FAT 90 olan numune için TIG kaplama ile test sonuçlarına göre FAT 182’ye yükseldiği tespit edilmiştir. Testler hem nominal gerilme yaklaşımı hem de diğer lokal gerilme yaklaşımları ile değerlendirilmiştir. Ayrıca $m=4$ iken $m=4.7$ ’lik eğime sahip olacağı tespit edilmiştir. Böylelikle kaynak ucuna yapılan işlemlerden olan TIG kaplaması ile oluşturulan yarıçapların yorulma ömrüne önemli seviyede etki ettiği vurgulanmıştır.

Braun ve ark. (Braun ve ark. 2021), “Kaynak profillemeye ile geliştirilmiş normal ve yüksek dayanımlı çelik bağlantılarının yorulma dayanımı” başlıklı çalışmada, bazı kaynak sonrası işlemlerinin kalıntı gerilme giderilmesi ile bazı işlemlerinde kaynak ucundaki düzgün geçiş ile yorulma ömür artırma çalışmaları yaptığı vurgulanmış olup S355’ten S900’e kadar dört farklı malzemede kaynak profili oluşturmanın etkisi araştırılmış olup YFMD ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde kaynak sonrası işlemler ile malzemenin mukavemetinin artmasıyla yorulma mukavemetinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir. Kaynak profillemeye ile yorulma mukavemeti iyileştirmelerinin YFMD’ye göre üzerinde olduğu belirlenmiş olup özellikle düşük

çevrimli yorulma rejimine doğru yorulma mukavemetinin kaynak profillemeye işlemlerinde daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Skriko ve ark. (Skriko ve ark. 2022), “Ultra yüksek dayanımlı çelikten yapılmış, lazerle işlenmiş, köşe kaynak bağlantılarının yorulma dayanımı” başlıklı çalışmada, lazer kaplama veya yeniden eritme işlemi gerçekleştirilmekte olup kaynak sonrası uygulanan işlemlerden birisidir ve TIG veya plazma kaplama yöntemine benzemektedir. Yeni bir yöntem olduğu için yorulma ömür artırma yöntemlerinde literatürde çalışmalar az bulunmaktadır. Çalışma da S960 malzemesinden simetrik T biçiminde numuneler hazırlanıp yorulma testleri ve SEA gerçekleştirilmiştir. Nominal, sıcak nokta, etkin çentik ve 4R yaklaşımları kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmalar neticesinde kaynak ucu işlemi olan lazer kaplama işlemi için FAT sınıfının TIG kaplama yöntemine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Fakat gerilme oranı düşük olduğunda ise TIG kaplamanın FAT değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Leitner ve Barsoum (Leitner ve Barsoum 2020), “Artan akma mukavemeti, R oranı ve plaka kalınlığının yüksek frekanslı mekanik darbe (YFMD) ile işlenmiş çelik bağlantıların yorulma direnci üzerindeki etkisi” başlıklı çalışmada, YFMD işleminin IIW’nin 2016 yılında yayınlamış olduğu önerilerde yer aldığı ve bu yıldan itibaren birçok çalışmada kullanıldığı vurgulanmıştır. Malzemenin akma dayanımının etkisi, yükleme ve kalınlık etkileri bu çalışmalarda yer almaktadır. Bu çalışmada literatürde bulunan 23 veri setinden YFMD işlemi gerçekleştirilmiş yapılarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde FAT sınıfının iyileştirildiği görülmüştür. Kalınlık düzeltme faktörünün uygulanabilirliği de konservatif bir yorulma değerlendirmesine yol açarak doğrulanmıştır.

Mecséri ve Kövesdi (Mecséri ve Kövesdi 2020), “Etkin çentik gerilimleri kullanılarak taşlama ile işleme yöntemlerinin değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada plaka kenar köşebent, uzunluk yönünde bağlantı ve T tipi bağlantı numunelerinin yorulma test sonuçları sayısal model ve matematiksel istatistiksel araçlar kullanılarak incelenmiştir. Kaynak ucundaki taşlamanın olumlu etkileri araştırmacılar tarafından yaygın olarak bilinmektedir. Bu çalışmada kaynak yapılmış ve sonrasında işlem yapılmış kaynak numuneleri duyarlı çentik gerilme yaklaşımı (ENS) kullanılarak etkileri araştırılmıştır. Değerlendirmeler yapılırken sayısal hesaplamalar ve yorulma ömür değerleri baz alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre sayısal model ve ENS yöntemiyle modifiye edilmiş kaynak geometrisi yüksek oranda tahmin ettiği tespit edilmiştir. Bu

çalışma neticesinde incelenen numune yorulma test sonuçları ve SEA sonuçları birbirlerine yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Ahola ve ark. (Antti ve ark. 2021) “4R yöntemi kullanılarak taşlanmış köşe kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemeti değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada, orta, yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çelikler için kaynak sonrası kaynak ucu işleme ve dövme işlemleri için literatür çalışmalarını kullanarak yorulma analizi gerçekleştirmiştir. 4R metodu malzeme mukavemeti, kalıntı gerilme, gerilme oranı ve kaynak ucu yarıçaplarını yeniden analiz yapmak için kullanıldı. Lokal yorulma mukavemeti değerlendirme yaklaşımları yerine 4R metodunun kullanılması kaynak sonrası bu işlemlerin doğru tahmin edilmesini sağlamıştır. Çalışma neticesinde ENS tabanlı değerlendirmelerde kullanılan varsayılan 1 mm yarıçap ve FAT 225 sınıfı kaynak ucu dövülmüş numuneler hariç benzer sonuçlar bulunmaktadır. 4R yönteminin kaynak sonrası kaynaklı bağlantılarda uygulanan işlemler için doğru tahminlerde bulunduğu ve uygulanabilirliği tespit edilmiştir.

Illes ve ark. (Illés ve Tudományok 2022), “Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynak bağlantılarının işleme I.: Kaynak geometrisinin iyileştirilmesi–Genel Bakış” başlıklı çalışmada, 2013 yılında IIW’nin 900 MPa akma dayanımına sahip çelikler için kaynak sonrası yorulma dayanım iyileştirme yöntemi önerdiğinden beri çalışmaları devam ettiği vurgulanmıştır. Bu çalışmanın amacı kaynak geometrisini iyileştiren son işlemleri sunmak ve bu işlemlerin yüksek mukavemetli çelikler için kullanımını dikkate almaktır. Bu çalışma neticesinde incelemelerin sonucunda ve IIW önerilerine dayanarak yüksek mukavemetli çelikler için de bu tür işlemlerin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Fadaei ve Betkhoodu (Abbas ve Annette 2018), “Taşlamanın çelik alın kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımına etkisi” başlıklı çalışmada, kaynak sonrası kaynak ucunun taşlamasıyla alakalı çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu yöntemin, kaynak ucu yarıçapını artırarak gerilme konsantrasyon faktörünü azalttığı vurgulanmış ve yorulma mukavemetini arttıran yöntemlerden biri olduğu belirtilmiştir. Abaqus SEA yazılımı kullanılarak SCF değerleri uygulanmıştır. Kaynak ucu işleme elektrikli taşlama ve farklı konik uçlara sahip taşlarla işlenerek numuneler hazırlanılmıştır. Daha iyi bir karşılaştırma için farklı yarıçaplara sahip frezeler incelenmiştir. Kaynak ucu taşlanan ve taşlanmayan olarak hazırlanan numuneler sabit genlikli yükleme altında yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde 3 mm konik uca sahip ve yorulma ömründe %50.61’lik artış sağlayan numune de belirlenmiştir. En az iyileşme ise %8.88 oranında iyileşme sağlayan 1 mm konik çapa sahip taşlama olduğu tespit edilmiştir.

Oswald ve ark. (Markus ve ark. 2022), “Sayısal analiz ve modellemeye dayalı olarak kaynaklı T-bağlantılar için çentik faktörlerinin belirlenmesi” başlıklı çalışmada, etkin çentik gerilimi yaklaşımı ile varsayılan kaynak geometrisinin kullanımı gerilim konsantrasyon faktörlerini gerektirdiği vurgulanmış olup T bağlantılı kaynaklı parçalar için gerilim konsantrasyon faktörü tahminleri yapmıştır. Polinom regresyona dayalı yüzey yanıtı yöntemi ve yapay sinir ağları ile meta modelleme olarak adlandırılan yeni bir yöntem sunmuşlardır. SEA sonuçları ile yapay sinir ağları için eğitimler gerçekleştirildi. Çalışma neticesinde sunulan yöntemlerin hızlı ve yeterli olduğu vurgulanmış ve sunulmuştur.

Remes ve ark. (Heikki ve ark. 2020), “Yüksek performanslı kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımı modellemesi” başlıklı çalışmada, yüksek performanslı kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımı modellemesini incelemiştir. Çalışma gerinim tabanlı, çentik gerilmesi, ortalama gerinim enerji yoğunluğu ve doğrusal elastik kırılma yaklaşımlarını içermektedir. Deneysel veriler ile karşılaştırılması yöntem seçimine göre farklı tahminlere sebep olabileceği tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde çeşitli kaynak geometrilerinin ve plaka kalınlıklarının yorulma ömrünü yalnızca mikro yapıya duyarlı gerinime dayalı yaklaşımın tahmin edebileceği vurgulanmıştır.

Gaikward ve Choudhari (Gaikwad ve Choudhari 2017), “Kaynak Geometrisinin Kaynaklı Plakaların Doğal Frekanslarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantıların endüstriyel alanlarda en çok kullanılan üretim yöntemlerinden birisi olduğunu ve günümüzde kaynaklı bağlantıların şekli, boyutu ve artık gerilme gibi konularla alakalı çalışmaların önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmada FFT dönüşümü kullanılarak farklı kaynak bağlantıların dinamik performansını bulmak için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı test çalışmaları SEA yazılımlarından olan Ansys kullanılarak analizler yapılmıştır. Çalışma doğal frekansların belirlenmesi için modal testler ve modal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tablo 1 ve 3'ten, kare plakalar için doğal frekansın, yumuşak çelik levhaların doğal frekansının %0.38, üç kaynaklı yumuşak çelik için %2.19 azaldığı görülebilir. Benzer şekilde ofset plakalar için doğal frekans iki kaynak için %8.76, üç kaynak için %8.70 azaldı.

Rajaei ve ark. (Majid ve ark. 2020), “Modal parametreler kullanılarak kaynak sonrası ısıtma işlem sürecinin kalite kontrolü için yeni bir yöntem” başlıklı çalışmada, kaynak sonrası oluşan kalıntı gerilmelerin giderilmesi için ısıtma işlem yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışma da düşük maliyetli cihazlarla yeni bir NDT yöntemi tanıtılmıştır. Bu yöntem doğal frekanslardaki değişim ve buna karşılık gelen mod şekillerine göre

uygulandığı belirtilmiştir. Bu yöntem ile kalıntı gerilmenin miktarı değerlendirilmektedir. Çalışmadaki deney numuneleri ısıtılma tabii tutulmuş (PWHT) numunelerdir. Kalıntı gerilim seviyesi, tanımlanan doğal frekanslar ve mod şekilleri incelenip karşılaştırılarak tespit edilebildiği belirtilmiştir. Bu yöntem ile endüstriyel uygulamalarda NDT teknisyenleri tarafından kolayca uygulanabileceği yenilik olarak belirtilmiştir.

Mirza ve ark. (Mirza ve ark. 2020), “Modal test verileri ışığında bir arabanın nokta kaynaklı ön uç modülünün sonlu eleman modeli ile incelenmesi” başlıklı çalışmada, kaynaklı bir yapının sonlu elemanlar modelini modal test uygulanarak SEA kontaklarını ilişkilendirmek için bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım bileşenleri monte etmek için kullanılan dokuz bileşenden 76 direnç nokta kaynaklı bağlantıdan oluşan arabanın ön parçası üzerinde test edilmiştir. SEA’de CWELD ve CELAS1 eleman bağlantıları kullanılmıştır. Bu yaklaşımın arabanın ön modülünde nokta kaynaklı modal parametrelerini tahmin etmek için başarıyla uygulandığı belirtilmiştir. Çalışma neticesinde SEA toplam hatası %27.13’ten %5.75’e düşürülmüştür. Bu çalışmanın bulguları ile nokta kaynakları gibi kaynakların dinamik davranışlarını araştırmak ve SEA bağlantılarını modellemek için potansiyeli olduğu belirtilmiştir.

Zahari ve ark. (Siti Norazila ve ark. 2017), “Titreşim analizi için sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) bağlantısının sonlu eleman modellemesi” başlıklı çalışmada, sürtünme kaynağının otomotiv, havacılık gibi birçok alanda kullanıldığı vurgulanmış olup bu kaynak bağlantılarının yapının davranışı, karmaşıklığı ve belirsizliği nedeniyle dinamik davranışlarını etkilediği bu nedenle sonlu elemanlar modelinin araştırılmasının önemi belirtilmiştir. Bu çalışma da sürtünme kaynağıyla oluşturulan sac levhaların çeşitli sonlu elemanlar tekniği sunulmuştur. Alüminyum AA7075 ve AA6061 malzemeleri sürtünme kaynağı uygulanarak 9 adet düz levha hazırlanmıştır. 9 adet numune çeşitli kaynak parametreleri kullanılarak imalatı gerçekleştirilmiştir. En uygun sürtünme kaynağı numunesini bulmak için eşdeğerlik tekniği kullanan SEA modeli geliştirildi ve model 9 numuneye modal analiz ve testler uygulanarak doğrulanmıştır. Bu çalışmada rijit eleman (RBE2), çubuk elemanı (CBAR) ve nokta kaynak eleman bağlantısı (CWELD) olarak üç modelleme uygulanmıştır. Çalışma neticesinde modal test ve sonlu elemanlar modal analiz sonuçlarına göre CBAR bağlantı tipinin sürtünme kaynağını modellemek için en uygun bağlantı tipi olduğu tespit edilmiştir.

Rani ve ark. (Muhamad Norhisham Abdul ve ark. 2016), “Lazer nokta kaynaklı bir yapının dinamik davranışı için sonlu eleman modellemesi ve modal tabanlı inceleme” başlıklı çalışmada, lazer nokta kaynaklı bir yapının dinamik davranışları için sonlu

elemanlar modelleme tekniklerini doğrulamak amacıyla uygulamalar yapmıştır. Sonlu elemanlar bağlantı tipleri için RBE2, ACM2 ve CWELD ELPAT olarak 3 farklı bağlantı tipi kullanılmıştır. 3 modelden elde edilen doğal frekansların ve mod şekillerinin doğruluğu modal test ile uygulanan parçalar ile karşılaştırılmıştır. Bu dinamik davranış çekiç ve gezici ivme ölçer kullanılarak elde edilmiştir. SEA olarak Nastran kullanılmış olup çalışma neticesinde lazer nokta kaynaklı yapının CWELD bağlantı tipiyle en doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Fouzi ve ark. (Fouzi ve ark. 2019), “Egzoz yapısının dinamik çalışması için kaynaklı bağlantının Sonlu Elemanlar Modellemesi ve incelenmesi” başlıklı çalışmada, bir aracın egzoz yapısı incelenmiş olup SEA ve modal testler gerçekleştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Egzozun titreşimden dolayı dinamik davranışının önemi vurgulanmakta olup SEA kaynaklı bağlantı modellemelerinin de önem arz ettiği vurgulanmıştır. RBE2, CBAR, CBEAM ve CELAS olmak üzere 4 farklı bağlantı tipi kullanılmıştır. Doğal frekans ve mod şekillerinin belirlenmesi için MSC Nastran kullanılmıştır. Çalışma neticesinde CBAR bağlantıları daha yakın sonuçlar vermiştir. CBAR modeli güncellenerek hassas parametreler tanımlanıp doğal frekansın toplam yüzde hatası %8.74’ten %3.45’e düşürülmüştür.

Rotendella ve ark. (Vincenzo ve ark. 2017), “Kaynaklı bağlantıların modellenmesine özellikle atıfta bulunan bir otomotiv arka alt şasisinin dinamik modal analizi” başlıklı çalışmada, bir otomotiv arka alt parçasının deneysel modal testleri ve SEA modal analizlerini karşılaştırmıştır. Polymax yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen çalışma da darbeli çekiç ile zorlama yapılarak veriler değerlendirilmiştir. Nokta kaynağı ile modellenen kaynaklı bağlantılar için yeni bir modelleme tekniği önerilmiştir. Çalışmalar 50 Hz’den 500 Hz’e kadar gerçekleşmiş olup doğal frekanslar, mod şekilleri ve frekans yanıt fonksiyonları değerlendirilmiştir. Çalışma neticesinde maksimum hata %3.076 olup 3. Modda bulunmuştur. Kaynaklı bağlantı modellemeleri için ise ACM2 yaklaşımı olarak adlandırılan yeni bir modelleme yaklaşımı önerilmiştir.

Abdullah ve ark. (Abdullah ve ark. 2022), “Nokta kaynaklı bağlantılar için sonlu elemanlar modelleme stratejileri ve deneysel verilerle modal analizi” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantıların sonlu elemanlar modellemesinin önemi konusunda vurgulama yapılmış olup deneysel modal testler ve SEA modal analizler karşılaştırılarak en doğru modelleme tekniği belirlenmiştir. Punta kaynağı için gerçekleştirilen bu çalışma da dört farklı kaynak modellemesi karşılaştırılmıştır. Tüm modellerde de güncellemeler yapılarak doğru parametreler ayarlanmıştır. Çalışma neticesinde basit modelleme

yaklaşımı olarak isimlendirilen modelleme en yüksek hatayı vermiştir. Katı eleman modellemesinin punta kaynağı için en doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiş olup bu modellemeyle ilgili SEA çalışmalarının araştırılması gerektiği önerilmiştir.

Śledziwski (Krzysztof 2018), “Yapısal çelik köprü bileşenlerinin seçilen bağlantıları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yorulma değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada, malzeme yorulmasının önemi vurgulanmış olup özellikle köprülerde bulunan kaynaklı bağlantıların yorulma ömür değerlendirmelerinde dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Yorulma ömrünün güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi, köprünün veya kaynaklı bağlantıya sahip yapının kalan hizmet ömrünün tahmini için belirleyici olduğu belirtilmiştir. Şimdiye kadar kaynaklı bağlantıların yorulma hesaplarında gerilme konsantrasyonunun dahil edilmediği belirtilmiştir. Çalışmada kaynaklı köprü yapıları için temsili uzunluk yönünde kaynaklı numuneler hazırlanarak test sonuçlarına göre değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Sıcak nokta gerilme yöntemi kullanılmış olup nominal gerilmeler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma neticesinde nominal gerilme yöntemine bağlı SEA ile test verilerinin tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Sıcak nokta gerilme yöntemi için FAT 100 sınıfı yerine FAT 90 sınıfı önerilmiştir. Sıcak nokta gerilme yaklaşımında doğrusal ve kuadratik ekstrapolasyon arasında farklılık çıkmadığı ve ihmal edilebileceği belirtilmiştir.

Li ve Choung (Chun Bao ve Joonmo 2021), “Azaltılmış eleman hassasiyetleri ile uzunlamasına bağlantılar için sıcak nokta gerilmelerini tahmin etmenin yeni bir yöntemi” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantıya sahip karmaşık yapılarda sıcak nokta gerilme yaklaşımlarının eleman topolojileri, boyutları ve entegrasyonunun eleman değişkenlerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada uzunluk yönünde kaynak numuneleri hazırlanarak üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. SEA kaynak modellemesi için katı ve kabuk modelleme olarak analizler gerçekleştirilmiş olup testler ile gerçekleştirilerek doğrulanmıştır. Bu çalışmada sıcak nokta gerilme yaklaşımları için; yüzey gerilme ekstrapolasyonuna bağlı ESM yöntemi, bir kaynak ucu boyunca düğüm kuvvetlerine bağlı Dong yöntemi ve önerilen yöntem olan bir kaynak ucunda hayali bir dikey düzleme dik kuvvetlerine dayalı yöntem olarak üç farklı yaklaşım değerlendirilmiştir. Gerilme konsantrasyon faktörüne bağlı olarak yapılan çalışma da bu faktör ve önerilen yöntem uyum sağladığı tespit edilmiştir.

Kristiansson ve Norberg (Robin ve Filip 2022), “İnce sac yapılar için alüminyum kaynaklarda yorulma ömrü tahmini” başlıklı çalışmada, kaynaklı bağlantıların yorulma ömür tahmine ile ilgili çalışmaların 5 mm ve üzerinde olan kalınlıklar için geçerli

olduğunu belirtmiş olup otomotiv sektöründe uygulanan çalışmalar içinde değerlendirmeler yapmıştır. Bu çalışmada analitik olarak hesaplanan nominal gerilme, Volvo metodu ve etkin çentik gerilme yaklaşımı ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Volvo metodunda çekme ve eğilme gerilmesine göre farklı sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Etkin çentik gerilme yaklaşımında FAT 225 sınıfına göre tek bir S-N eğrisi olduğu belirtilmiştir. Çalışma neticesinde Volvo metodu ve etkin çentik gerilme yaklaşımında çekme gerilmesine zorlanan durumlarda her iki metodunda yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Fakat eğilme gerilmesi ile zorlamalar olunca sapmalar artmaktadır. Volvo metodu ile elde edilen sonuçlar etkin çentik gerilme yaklaşımına göre farklı zorlanma tiplerine göre farklı sonuçlar ve sapmalar elde edildiği için Volvo metodu ile gerçekleştirilen çalışmalarda bu duruma dikkat edilmesi gerektiği önerilmektedir.

Tahir ve ark. (Tahir ve ark. 2018), “Alüminyum kaynaklarında yorulma: Tasarım kuralları” başlıklı çalışmasında, Volvo & nCode metodu ile yorulma ömür tahminleri için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda yorulma çatlağı kaynak kökü ve kaynak ucunda oluşmuştur. Bu çalışmada SeamWeld ile nCode yazılımında da çalışmalar gerçekleştirilmiş olup deneysel çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak ucunda oluşan doğrusal olmayan etkilerin SEM analizlerinde geometrik olarak modellemeden yaklaşımlarda önerilmiştir.

Júnior ve ark. (Rafael Kappaun Robinson João Jabuonski ve ark. 2021), “Tarım aletleri kaynaklı birleştirmelerde sayısal yorulma değerlendirmesi” başlıklı çalışmasında, tarım makinelerinde kaynaklı bağlantıların yorulma ömrü üzerinde durulmuştur. nCode yazılımı ile gerçekleştirilen analiz girdileri bir tarım makinesi üzerinden veriler alınarak gerçekleştirilmiştir. Tarım makinelerinde yapının ömrünü artırmak için boyutların değiştirilmesi, kalınlıkların artırılması gibi ağırlık artışına sebep olabilecek tasarımlar aracın fazla yakıt yakmasına sebep olabileceği belirtilmiştir. Bu sebepten dolayı da kaynaklı bağlantıların yorulma ömür tahminlerinin önemi vurgulanmıştır. Bu çalışma neticesinde elde edilen verilerin kompleks yapılarda Volvo metodu ile uygulanabileceği ve 250.2 saatlik sinyal verisinin yeterli olabileceği belirlenmiştir.

Hirohata ve ark. (Mikihito ve ark. 2022), “Köşe kaynağı işlemi için kabuk elemanları kullanılarak FEM simülasyonunun doğrulanması” başlıklı çalışmasında, çelik yapıların kaynaklı bağlantıları için bir FEM modeli önerilmiş ve doğrulanmıştır. T bağlantı şekli ile numuneler hazırlanıp aynı zamanda FEM analizleri için katı ve kabuk model olarak hazırlanmıştır. Kaynak dikişinden taban plakasına ısı transferini dikkate

alan kabuk elemanları için ısı girdisi yöntemi önerilmiştir. Kabuk tipinin simülasyon doğruluğu neredeyse katı tipinkine eşittir. Sonuç, ısı enerjisini uygulama yönteminin kabuk tipi için geçerli olduğunu göstermiştir. Kabuk tipi için hesaplama süresi, katı tipe kıyasla yaklaşık %42-83 oranında tasarruf edebilmektedir. Çalışma neticesinde önerilen kabuk modellemenin deneysel çalışmalar ile doğrulanarak hem zaman kazancı açısından hem de gerilme doğruluğu açısından uygun bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Ilyin ve ark. (Ilyin ve ark. 2022), “Düşük çevrimli yükleme altında yüksek mukavemetli çeliklerden yapılmış kaynaklı kabuk yapıların yorulma mukavemeti hesabı: hesaplama prosedürünün geliştirilmesi” başlıklı çalışmada, kaynaklı yapıların ömrünün hesaplanmasında rezerv katsayılarının seçimi de dahil olmak üzere, düşük çevrimli yük bölgesindeki yorulma dayanımının pratik olarak tahmin edilmesi için gerekli bilgileri sunmaktadır. Değerlendirilen veriler, çok geçişli bir şekilde kaynaklanmış büyük kalınlıktaki bağlantıların yorulma testlerinde elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Sunulan algoritma, görsel olarak tespit edilen çatlamanın matematiksel olarak beklenen momentine karşılık gelen döngü sayısının N_i ve daha fazla çatlak ilerlemesi adımıdaki döngü sayısı N_{c0} 'ın sınırlı dayanıklılık bölgesinde hesaplama prosedürlerini içerir. Bu prosedürün tahmin doğruluğu, imalat ve yapısal tasarımın farklı versiyonlarındaki kaynak bağlantılarının sertifikasyon ve araştırma testlerinde elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış ve önerilmiştir.

Muzaffer ve ark. (Shazia ve ark. 2022), “3D yorulma FEM analizi kullanılarak T boru kaynak bağlantı yapısının yorulma ömür değerlendirmesi” başlıklı çalışmada, rüzgâr türbinlerinin alt çelik konstrüksiyon yapısı incelenmiştir. Bu yapıda rüzgârdan, depremlerden veya farklı etkenlerden dolayı dinamik ve statik yüklere maruz kaldığı belirtilmiş olup kaynaklı bağlantıların yorulma ömrü değerlendirilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin yapısındaki hasarlar büyük çökmelere sebep olabileceği vurgulanmış olup kaynaklı bağlantı ömür tahmin değerlendirmelerinin önemi vurgulanmıştır. Bu çalışma da 3 boyutlu SEM analizi iki farklı adımda uygulamalar yapılmıştır. İlk olarak termal ve mekanik analizde kaynak deformasyonu ve kaynak kalıntı gerilimi hesaplanmıştır. İkinci olarak, yorulma ömrünü ve çatlak başlangıcını hesaplamak için döngüsel histeresis oluşturucu denkleme ve yorulma hasarı teorisine dayanan 3B yorulma çatlak analizi kullanılmıştır. Analizden elde edilen sonuçlar, sıcak nokta gerilme yöntemi ve Eurocode 3'ten elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Sonuçlardan, 3D-yorulma SEM'in, yorulma ömrünü ve çatlak başlangıcını tahmin etmek için yararlı bir yöntem olduğu kabul edilmiş ve önerilmiştir.

Hectors ve ark. (Kris ve ark. 2022), “Kırılma mekaniği ve sıcak nokta stresine dayalı yorulma ömrü hesaplaması: Bir vinç kirişi için örnek incelenmesi” başlıklı çalışmada, tavan vincinde bulunan kaynaklı bağlantılar için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri için tüm yapılar kabuk modelleme ile tanımlanıp gerilme değerlerinden değerler alınmış ve doğrulanmıştır. Ayrıca bazı bölgeler için alt modeller uygulanıp değerlendirilmiştir. Gerçek tavan vincinden veriler alınarak SEM analizlerinde sıcak nokta gerilme ve kırılma mekaniği yaklaşımı ile değerlendirmeler yapılmıştır. Kırılma mekaniği tabanlı yaklaşım için, küçük çatlakların hızla aynı en-boy oranına yakınsadığı gösterilmiştir. Bu nedenle, ilk çatlak en-boy oranı seçiminin önemsiz olduğu bulundu. Ancak, yorulma çatlak büyüme simülasyonları sırasında en-boy oranının sabit olduğu varsayılmamalıdır. Son olarak, çatlak bir alt modelden diğerine aktarıldığı boyutun, yorulma çatlak büyüme simülasyonlarının doğruluğu için kritik olduğu gösterilmiştir. Çalışma neticesinde doğrusal elastik kırılma yaklaşımının çok uzun süreler aldığı vurgulanmış genel olarak karşılaştırıldığı zaman sıcak nokta gerilme yaklaşımının kullanılmasının daha uygun olduğu tespit edilmiş ve önerilmiştir.

Yıldırım ve ark. (Halid Can ve ark. 2020), “Kaynaklı ve kaynak sonrası işlenmiş yüksek dayanımlı çelik bağlantıların yorulma özellikleri: Sabit ve değişken genlikli yüklerin etkisi” başlıklı çalışmada, yüksek mukavemetli çeliklerde YFMD işleminin kalıntı gerilme giderilerek yorulma artışıyla ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Literatürdeki çalışmaların sabit genlikli yükleme (CAL) ile çalışmalar gerçekleştirdiği ve bu çalışmalara göre faktörler belirlendiği belirtilmiş olup daha gerçekçi olan değişken genlikli yükleme (VAL) için sınırlı bilgilerin olduğu belirtilmiştir. Bu ihtiyaçtan dolayı bu çalışmada $R=-0.43$ gerilme oranında CAL ve VAL yükleme tiplerine göre çalışmalar gerçekleştirilmiş ve faktörler bulunmuştur. Çatlak başlangıcı ve sertlik değerleri için ise mikroyapılar da incelenmiştir. Ayrıca yorulma hasar toplamları literatürler karşılaştırılmıştır. Deney numuneleri S690 ve AH36 malzemelerinden hazırlanmıştır. Birçok deneyler gerçekleştirilmiş olup S690 çeliğinin AH36 çeliğinden yorulma ömrünün daha fazla çıktığı belirlenmiştir. YFMD işleminin ise yorulma ömrünü her iki malzeme de iyileştirdiği tespit edilmiştir. Wöhler S-N eğrisinden deney sonuçları incelendiğinde yeni bir S-N eğrisi önerilmiştir. Ayrıca gerilme büyütme faktörleri ile her iki malzeme içinde faktörler önerilmiştir.

Yıldırım ve ark. (Yıldırım ve ark. 2016), “Sabit ve değişken genlikli yükler altında S700 malzemesi kullanılarak yüksek frekanslı mekanik darbe (YFMD) ile yüksek mukavemetli çelik bağlantı değerlendirmesi” başlıklı çalışmada, kaynak sonrası

YFMD işlemleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiş S700 malzemesinde incelemeler gerçekleştirmiştir. YFMD işleminin kalıntı gerilme giderilmesi ve kaynak ucunda oluşan gerilme konsantrasyonlarını iyileştirdiği belirtilmiş ve önemi vurgulanmıştır. S700 malzemesi ile gerçekleştirilen bu çalışmada sabit genlikli yüklemeler altında gerçekleştirilmiş olup çekiçleme (hammering) ve bilyeli dövme (shot peening) gibi işlemlere göre çok daha fazla yorulma ömrünü iyileştirdiği tespit edilmiştir. Özellikle sabit genlikli yüklemelerde YFMD işleminin çok verimli olduğu belirlenmiştir. Değişken genlikli yüklemelerde YFMD işleminin yorulma ömrünü iyileştirdiği fakat özellikle büyük yük seviyelerinde sabit genlikli yüklemeler ile karşılaştırıldığında iyileştirme derecesinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde yeni S-N eğrileri oluşturulmuş, eğim ve gerilme büyütme faktörleri belirlenmiştir.

Literatürde kaynaklı bağlantıların yorulma testleri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır ve YFMD, kaynak ucu dövme işlemleriyle ilgili çalışmalarda bulunmaktadır. Fakat yük taşıyan çift T kaynak bağlantılı yapılarda oldukça az çalışmalar olup genel olarak FAT 36 sınıfı önerilmiştir. Ayrıca literatürde modelleme tekniklerine göre FAT sınıfları belirtilmemiş ve sonuçların modelleme tekniğinde göre değişebileceği için literatürde bu eksikliği gidermek için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yapıda kaynak sonrası işlemler için IIW önerilerinde net bir sınıf değeri belirtilmemiştir. Bu çalışma da ultra yüksek mukavemetli çeliklerde kaynak sonrası yapılan YFMD ve taşlama işlemlerinin FAT sınıflarına etkileri incelenmiş ve yeni S-N eğrileri tespit edilmiştir. Nominal, sıcak nokta ve etkin çentik gerilme yaklaşımlarıyla CMM ile taranan modelleme ve 5 farklı modelleme tekniğiyle sonuçlar elde edilmiştir. Toplam 114 adet yeni S-N eğrisi belirlenmiştir. Böylelikle yük taşıyan çift T kaynak bağlantılı yapılarda S1100 ve S960 malzemeler için kaynak sonrası işlemlerle ve işlemsiz durumları için bulgular önerilmektedir.

Kaynaklı bağlantıların dinamik davranışları değerlendirilirken yapının rezonansa uğramaması için doğal frekansın doğru tespit edilmesi güvenilirlik açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada kaynak parametrelerinin doğal frekansa etkilerinin incelenmesi için modal çekiç testi ile harmonik nümerik analizler karşılaştırılmıştır. Harmonik SEA sonuçları değerlendirilirken yazılım vasıtasıyla 8 farklı parametrede, 13 çeşit numunede toplamda 39 adet numuneden alınan sonuçlar karşılaştırılmış olup böylelikle bu parametrelerin etkisi dinamik zorlanma durumu için incelenerek yeni bulgular önerilmektedir.

Gerilme konsantrasyon faktörü içinde literatürde birçok farklı çalışmalar bulunmaktadır. Veriler elde edilirken SEA yazılımlarında tek tek analizlerin uygulanması oldukça vakit almakta ve bu yüzden daha az girdi verileri elde edilmektedir. Bu korelasyon katsayılarının daha düşük, hata oranlarının ise daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca regresyon analizleriyle oluşturulan parametrik denklemler ise daha yüksek hata oranlarına sebep olabilmektedir. Ayrıca hiçbir çalışma da ağ kalite kriteri değerlendirilmemiş olup buda yanlış sonuçlara sebep olabilmektedir. Bu tez kapsamında literatürdeki bu eksikliği gidermek için BDM ve BDT yazılımları geliştirilen yazılım vasıtası ile haberleştirilerek tasarım değişikliği ve analiz uygulamasının otomatik olması sağlanmıştır. Latin Hiperküp yaklaşımının oluşturduğu verilerle iteratif olarak analizler uygulanıp gerilme konsantrasyon faktör değerleri kaydedilmiştir. Her iterasyonda ağ kalite kriteri kontrol edilip uygun olmaz ise ağ boyutunu düşürüp uygun olana kadar analizler yapılmaktadır. Bu çıktı verileri neticesinde daha doğru veriler sağlanmış ve bu veriler yapay sinir ağı ile eğitilmiştir. Uygulanan bu metodoloji ile literatürdeki çalışmalar karşılaştırıldığında daha düşük hata oranlarına sebep olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu metodolojinin benzer çalışmalarda kullanılması için önerilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kaynaklı bağlantıların doğru değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda modal testler, yorulma testleri ve statik testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gerilme konsantrasyon faktör tespitleri için nümerik analizler gerçekleştirilerek yapay sinir ağıyla yeni parametrik denklemler oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalarda S1100 ve S960 malzemeler kullanılmıştır. Farklı kaynak parametrelerine, SEA modelleme tekniklerine göre veya kaynak sonrası işlemlere göre IIW önerilerinden olan konvansiyonel metotlara göre karşılaştırmalar yapılmıştır. S690, S960 ve S1100 malzemeleri ile nümerik analizler için gerçekleştirilen çalışmalar şöyledir:

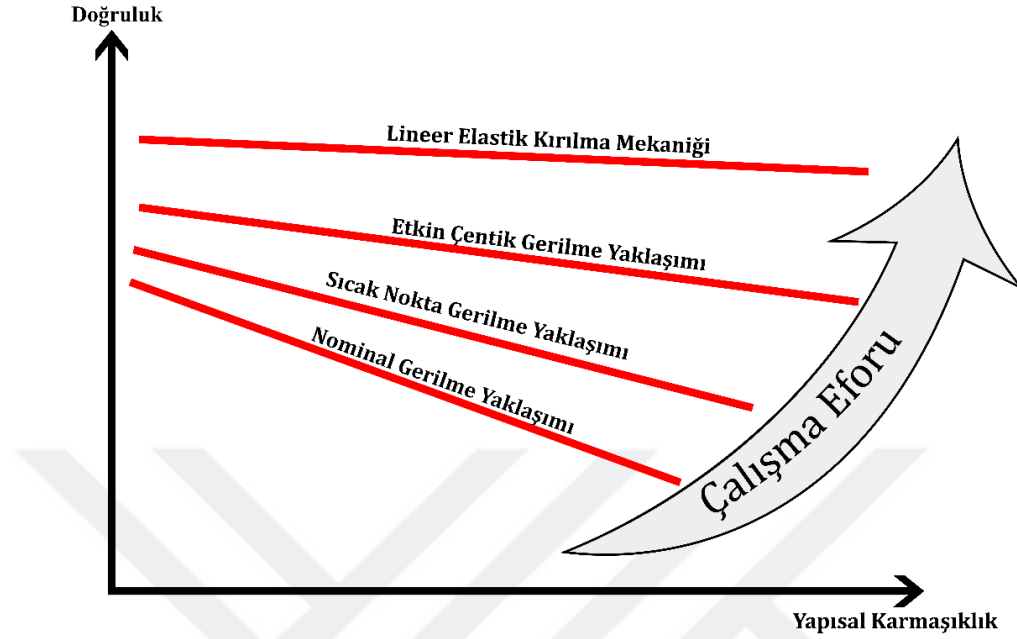
- Kaynaklı bağlantıların gerinim ölçer sensörüyle gerilme değerlerinin tespiti ve gerilme büyütme faktörlerinin tespiti
- Kaynaklı bağlantılarda dinamik zorlamalara karşı daha doğru değerlendirilmesi için kaynak parametrelerinin doğal frekansa etkilerinin incelenmesi
- Kaynak dikiş tasarımlarında gerilme konsantrasyon faktörlerinin tespiti için parametrik denklemlerin tespit edilmesi
- Kaynak sonrası YFMD, BG işlemlerinin ve işlemsiz durumlar için yorulma testleri gerçekleştirilerek yeni FAT sınıflarının nominal, sıcak nokta, etkin kaynak ucu gerilme metotlarına göre tespit edilmesi ve karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında bilgisayar destekli tasarım programlarından Solidworks, Spaceclaim kullanılmıştır. Bilgisayar destekli mühendislik paket programlarından Ansys yazılımı nümerik analizler için kullanılmıştır. Numunelerin lazer ile tarama işlemlerinden sonra modelleri iyileştirmek için Polyworks yazılımı kullanılmıştır. Yapay sinir ağı ile oluşturulan yazılım arayüzleri için grafiksel programlama dili olan Matlab yazılımı kullanılmıştır. Geliştirilen programlama dillerinden ise Vb.Net, Python, Fortran dilleri kullanılmıştır. Ayrıca karşılaştırmalar için istatistiksel paket programları kullanılmış olup alt başlıklarda gerçekleştirilen çalışmalara göre materyal ve metotlar belirtilmektedir.

3.1. Kaynaklı Bağlantıların Nümerik Analizlerinde Yorulma Ömür Tahmini

Kaynaklı bağlantılar değerlendirilirken IIW önerilerine göre nominal gerilme, sıcak nokta gerilme, etkin çentik gerilme ve doğrusal elastik kırılma mekaniği yaklaşımı olarak dört farklı değerlendirme yaklaşımı bulunmaktadır. Seçilen yaklaşıma göre özellikle yorulma ömür tahminleri değişkenlik gösterebilmektedir. Yapının

karmaşıklığına göre değişkenlik gösterebilmekte olup doğruluk oranları da değişebilmektedir. SEM analiz yazılımı olarak Ansys kullanılmakta olup Şekil 3.1’de yaklaşım doğruluk oranları ve yapı karmaşıklığına göre değerler gösterilmektedir.

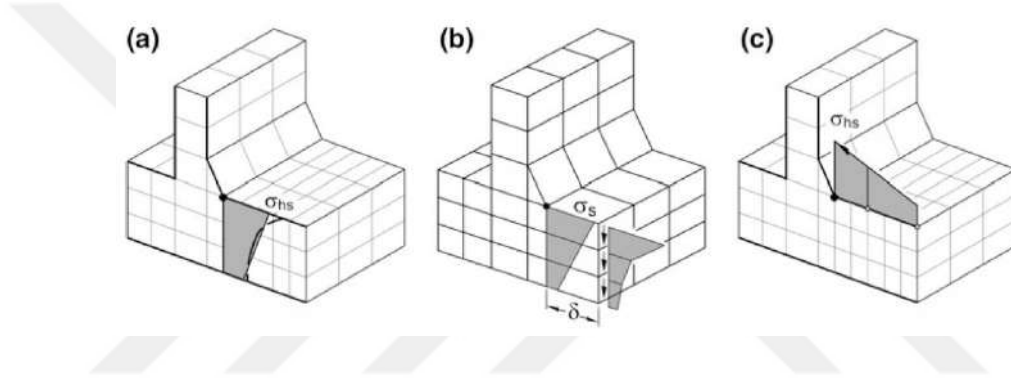


Şekil 3.1. Kaynaklı bağlantı gerilme değerlendirme yaklaşımları

Nominal gerilme yaklaşımı kaynaklı bağlantıda kaynak ucundan daha uzaktaki konumdaki gerilme değerlerini inceleyen klasik değerlendirme yöntemidir. Kabuk, katı, kiriş vb. SEM modellemeleri bu yöntemle hesaplanabilmektedir. Bu yöntemde kaynak ucundaki gerilme konsantrasyonları dahil edilmemektedir. Bu gerilme konsantrasyonları birçok numuneler ile doğrulanmış olan FAT sınıflarının seçimi ile yorulma ömür tahminleri yapılmaktadır. Çok sayıda FAT sınıflarının bulunması ve çok karmaşık yapılarda da kullanılması bu yaklaşımın tercih edilmesine sebep olmaktadır. Fakat doğruluk oranları diğer yaklaşımlara göre en az olan metottur. Bu yöntemin yorulma ömür tahminleri için eğer tablolardan uygun sınıflar seçilmesi durumunda oldukça güvenilir ve konservatif yorulma ömür tahminleri yapılabilmektedir. Kaynak uçlarının doğrusal olmayan etkilerinin dahil edilmesi istenirse diğer yaklaşımlar tercih edilmelidir. Sonlu elemanlar gibi numerik analiz yazılımları yerine analitik gerilme hesaplamaları yapılması için Denklem 3.1 kullanılmalıdır.

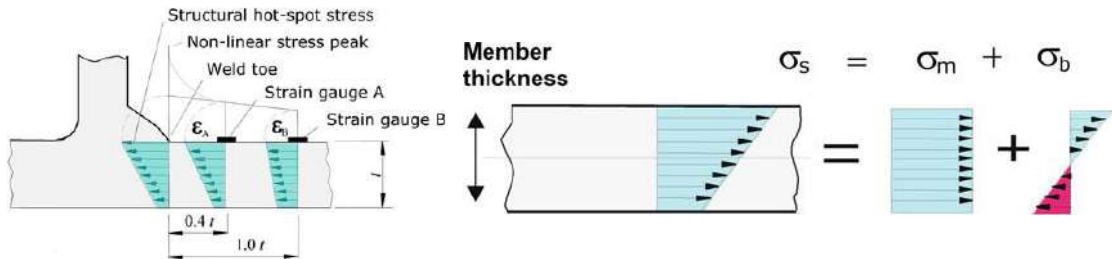
$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_{nom}} \quad (3.1)$$

Yapısal sıcak nokta gerilme yaklaşımı iki veya üç noktadan gerilme değerleri olarak kaynak ucundaki gerilmeyi ekstrapolasyon yapılarak hesaplamaktadır. Bu değerlendirme yaklaşımında FAT sınıflarına ait tabloda 9 adet sınıf yer almaktadır. Bu yaklaşımda kaynak kökünün gerilmesi incelenmemekte olup sadece kaynak ucuna göre değerlendirmeler yapılmaktadır. Nominal gerilme yaklaşımına göre daha doğru sonuçlar vermekte olup kompleks yapılarda kaynak modellemesi için daha çok efor sarf edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.2’de SEM analizlerinde sıcak nokta gerilmesini ölçen üç adet yöntem gösterilmektedir. (a) kalınlık yönünde gerilme değerleri doğrusallaştırılarak belirlenen yöntem, (b) kalınlık yönünde düğüm noktalarından alınarak belirlenen yöntem, (c) yüzey üzerindeki konumlardan gerilmeler alınarak kaynak ucundaki sıcak nokta gerilmesini hesaplayan yöntem gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Sıcak nokta gerilme değerlerinin tespit edilmesi (a) kalınlık yönünde doğrusallaştırılmış gerilme ile, (b) kalınlık yönünde düğümlerden alınan değerler ile (c) yüzey üzerinden konumlara göre (Niemi ve ark. 2018)

Statik analizler için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda gerinim ölçer konumları olarak $0.4t$ ve $1t$ mesafelerinde 2 adet gerinim ölçer yapıştırılarak kaynak ucunda sıcak nokta gerilmesi ölçülebilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde ise ince ağ yapısı (fine mesh) kullanılarak aynı gerilme değeri elde edilebilmektedir. Ansys doğrusallaştırılmış gerilme ile çekme ve eğilme gerilme toplamı belirlenmekte ve 2 farklı konum için kaynak ucuna (welding toe) doğrusal ekstrapolasyon yapılmaktadır. Şekil 3.3’te kaynak ucundaki gerilmeleri tespit etmek için yaklaşım gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Sıcak nokta gerilme yaklaşımı kaynak ucu gerilme tespiti (Niemi ve ark. 2018)

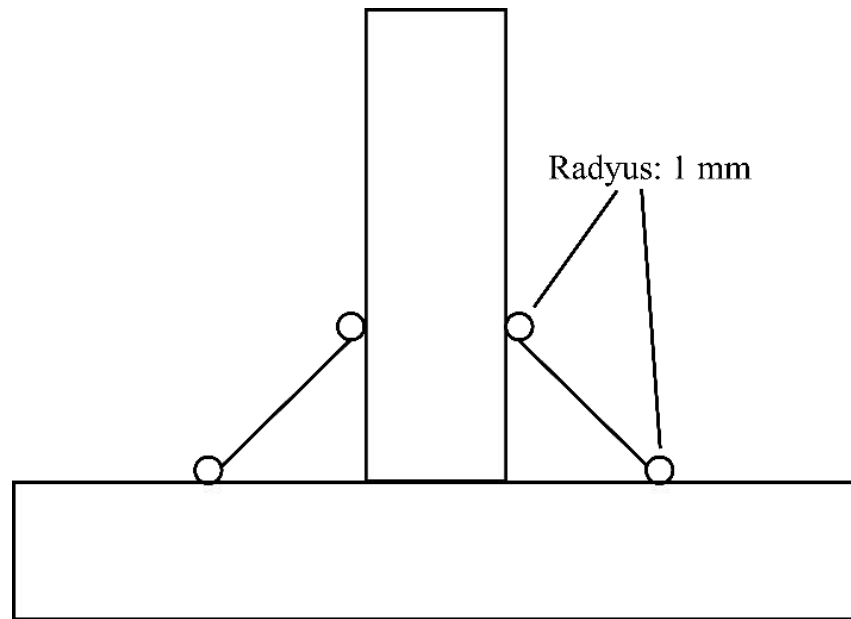
Test çalışmalarında A ve B konumlarından ve sonlu elemanlar yönteminde maksimum 0.4t ağ (mesh) eleman boyutunda doğrusal ekstrapolasyon alınarak sıcak nokta gerilmesi Denklem 3.2'e göre hesaplanılmaktadır (Niemi ve ark. 2018):

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1t} \quad (3.2)$$

Sonlu elemanlar yönteminde yüksek eğme gerilmelerinde kullanılan kuadratik ekstrapolasyona göre maksimum 0,4t mesh eleman boyutunda sıcak nokta gerilmesi Denklem 3.3'e göre hesaplanılmaktadır (Niemi ve ark. 2018):

$$\sigma_{hs} = 2.52\sigma_{0.4t} - 2.24\sigma_{0.9t} + 0.72\sigma_{1.4t} \quad (3.3)$$

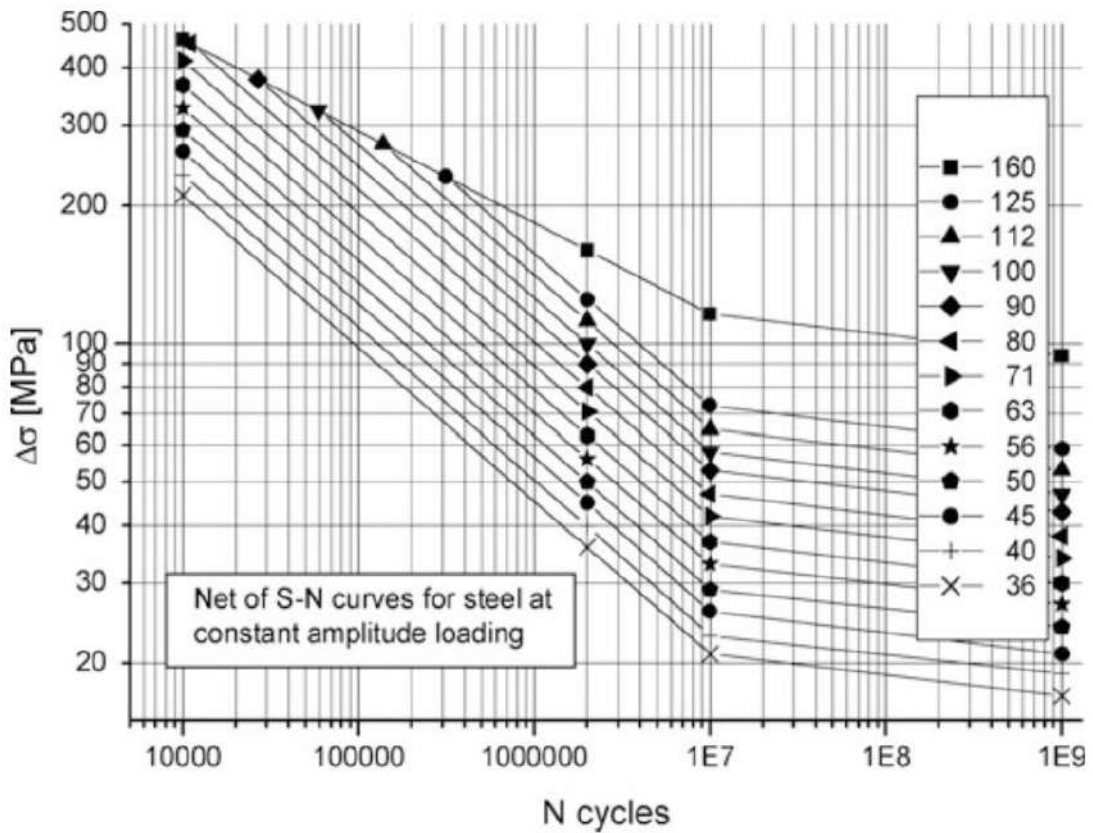
Etkin çentik gerilme yaklaşımında IIW önerilerine göre kaynak ucu 1 mm'lik yarıçap ile modellenerek değerlendirme yapılmaktadır. Nominal gerilme ve sıcak nokta gerilme yaklaşımlarında kabuk modellemeler ile tanımlamalar yapılabilmekte olup etkin çentik gerilme yaklaşımında katı modelleme yapılmaktadır. Bu sebepten dolayı bu yaklaşım yüksek efor ile gerçekleştirilmekte olup karmaşık yapılar için çok fazla süre harcanılmasından dolayı tercih edilmemektedir. Bu yaklaşımda sadece FAT 225 yorulma sınıfı yer almakta olup bu değere göre yorulma ömür tahminleri yapılmaktadır. Şekil 3.4'te etkin çentik metodu için kaynak modellemesi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Etkin çentik gerilme yaklaşımı kaynak modellemesi.

Doğrusal elastik kırılma mekaniği yaklaşımında kaynaklı bağlantıların çatlak oluşumu ve ilerlemesi sürecini incelemektedir. Gerilme konsantrasyon ve gerilme yoğunluk faktörlerine göre incelenen bu yaklaşım deneysel çalışmalarda numuneler için Paris yasası ile kırılma mekaniği yaklaşımları ile kullanılabilir. Bu yaklaşım özellikle karmaşık yapılarda uygulanması çok zor olup tercih edilmemektedir. Bu çalışmada doğrusal elastik kırılma mekaniği yaklaşımı dışındaki diğer yaklaşımlar değerlendirilmiştir.

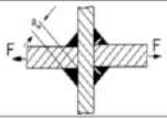
Nominal gerilme yaklaşımına göre birçok iki milyon çevrimde gerilme aralığına göre FAT kategorileri bulunmaktadır. Kaynak türü, yapısı, kontrol vb. özelliklerine göre FAT değerleri değişebilmektedir. Farklı gerilme aralıklarına göre çevrim sayılarının tespiti yapılırken Şekil 3.5'te gösterilen S-N eğrilerine göre Denklem 3.4 formülü ile hesaplanmaktadır. Uluslararası kaynak enstitüsü ve literatürde bulunan birçok çalışmalara göre S-N eğrisi eğimi sabit olup $m=3$ önerilmektedir. Sıcak nokta gerilme değerlerinde ise 9 adet FAT değeri önerilmektedir. Etkin çentik gerilme yaklaşımında ise katı modelleme ile gerçekleştirilen 1 mm yarıçap kök ve kaynak ucu geometrisine göre sabit 225 MPa FAT değeri önerilmektedir.



Şekil 3.5. Nominal gerilme yaklaşımına göre önerilen FAT S-N eğrileri (Hobbacher 2016)

$$FAT = \Delta\sigma \cdot \sqrt[m]{\frac{N}{2 \cdot 10^6}} \quad (3.4)$$

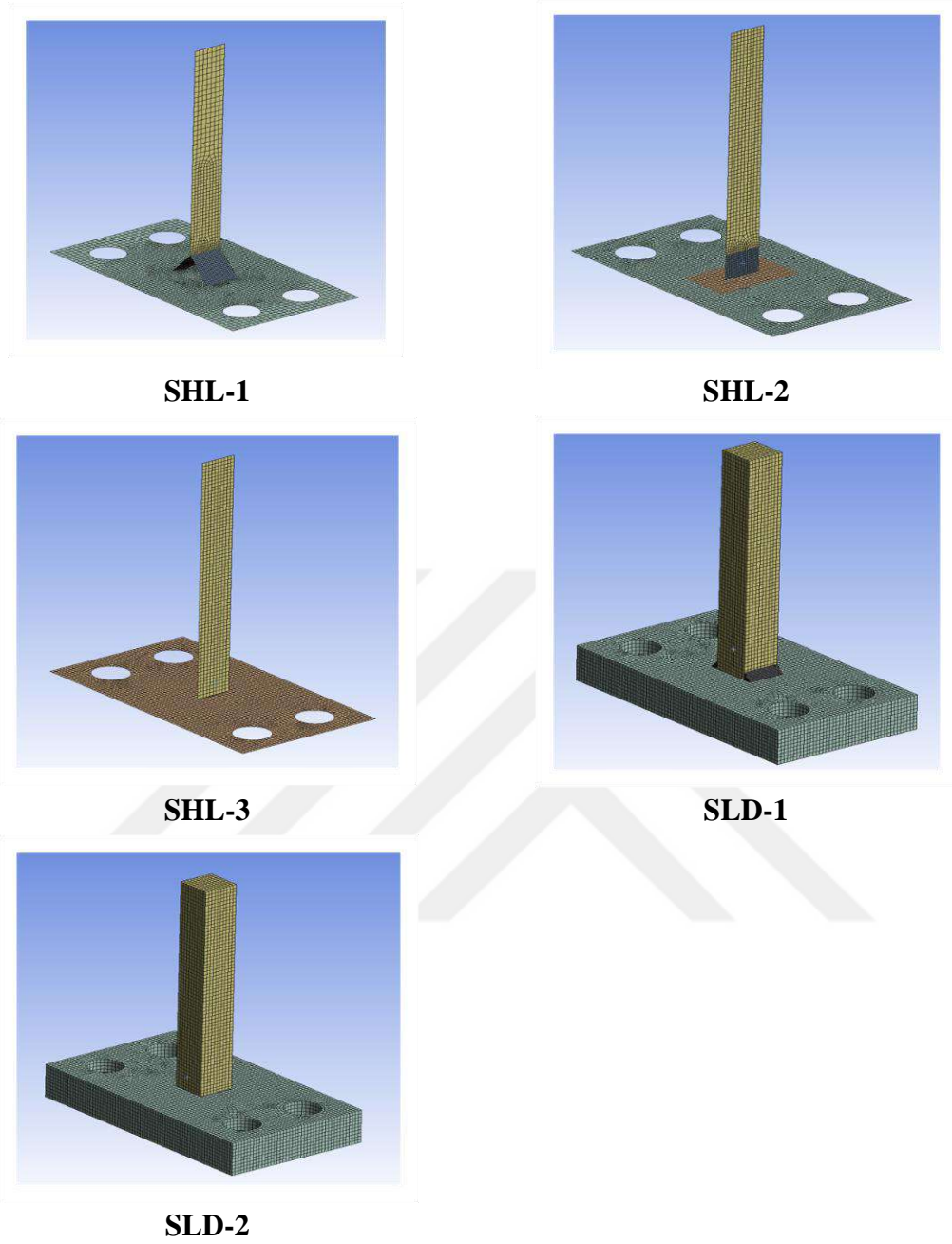
Bu çalışma kapsamında yeni FAT değerleri, deneysel çalışmalar ile SEA neticesinde elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan simetrik çift T kaynak bağlantılı numunelerin nominal gerilme yaklaşımına göre FAT değeri 36 olup Şekil 3.6’da gösterilmektedir.

414		Cruciform joint or T-joint, fillet welds or partial penetration K-butt welds including toe ground joints, potential failure from weld root For $a/t \leq 1/3$	36	12	Analysis based on stress in weld throat $\sigma_w = F / \sum (a_w \cdot l)$ l = length of weld, a_w = load carrying weld throat. Also to be assessed as 413
			40	14	

Şekil 3.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan simetrik çift T bağlantılı kaynaklı bağlantı nominal gerilme yaklaşımına göre FAT 36 kategorisi (Hobbacher 2016)

3.2. Kaynaklı Bağlantılarda Numerik Analizler için Kullanılan Modelleme Teknikleri

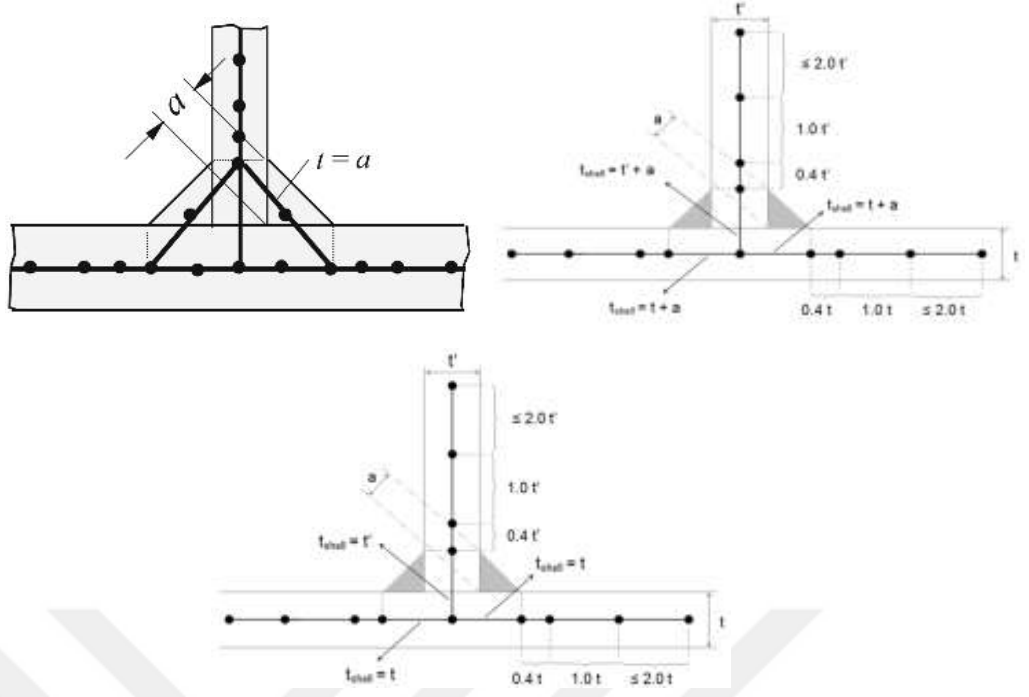
Deney çalışmaları ile SEM sonuçlarıyla karşılaştırabilmek amacıyla kaynak modelleme teknikleri kullanılmıştır. Kabuk modelleme ve katı modelleme olarak beş farklı model oluşturulmuştur. Paylaşım topolojisi (share topology) olarak adlandırılan bağlantı tipi ile tanımlamalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7’te bu çalışma da kullanılan kabuk ve katı modelleme teknikleri gösterilmiştir. Kaynaklı bağlantıların SEM analizlerinde kabuk, katı modelleme gibi modelleme teknikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada IIW tarafından önerilen etkin çentik gerilme yaklaşımında bulunan modelleme tekniği dahil olmak üzere beş adet modelleme, SEA yazılımı olan Ansys 2023R2’de hazırlanmıştır. Katı modellemeler katı (SLD) olarak, kabuk modellemeler kabuk (SHL) olarak adlandırılmıştır. Etkin çentik gerilme yaklaşımı için önerilen modelleme SLD-1 olarak adlandırılmıştır (Hobbacher 2016). SLD-2 modelinde ise yarıçap olmadan karşılaştırma için hazırlanmıştır. SHL-1, SHL-2 ve SHL-3 modellemeleri literatürde de sıklıkla kullanılıp karşılaştırılan modelleme teknikleridir (Rotondella ve ark. 2017; Niemi ve ark. 2018; Yuan ve Zhu 2021; Fouzi ve ark. 2018; Eriksson ve ark. 2003; Büyükbayram ve ark. 2015). Şekil 3.7’te SEA analizleri için hazırlanan kaynaklı bağlantı modelleri gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Hazırlanan SHL ve SLD SEM kaynak modellemeleri

Sonuçlar değerlendirilirken FEM analiz sonuçlarından Denklem 3.2 ve 3.3 kullanılarak sadece kopma noktaları için sonuçlar alınmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde kaynak kabuk modellemesi yapılırken çift taraflı, tek taraflı, tam nüfuziyet ve yarım nüfuziyet gibi durumlarda kaynak dikiş biçimine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 3.8’te kabuk modelleme teknikleri için yaklaşımlar gösterilmektedir.



Şekil 3.8. SEM analizleri kabuk kaynak modelleme çeşitleri (Niemi ve ark. 2018) (Eriksson ve ark. 2003)

Sonlu elemanlar yönteminde tekillik sonuçları değerlendirirken etkileyebilmektedir. Kaynak katı olarak modellenirken sıcak nokta gerilme ile sonuçlar alınırken bu durum göz önüne alınmaktadır.

3.3. Kaynaklı Statik Testler için Kullanılan Test Düzeneği ve Numuneler

Yapılan testlerde tüm malzemeler için S960QL çeliğine göre kaynaklı birleştirme işlemi uygulanmıştır. Numuneler karşılaştırma açısından 2 farklı kaynak uzunluğuna sahip parçalar için yapılmıştır. İki numunede tek pasoda yapılmakta olup karşılaştırılabilirliği açısından aynı kaynak parametrelerinde işlemler yapılmıştır. Çizelge 3.1’de statik testlerde kullanılan S960 malzemesinin kimyasal bileşenleri belirtilmektedir.

Çizelge 3.1. S960QL kimyasal bileşenleri

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	Ti %	Cu %
0.17	0.22	1.24	0.01	0.001	0.2	0.06	0.597	0.04	0.002	0.02

Kaynak işlemi için kullanılan dolgu malzemesi S960QL mekanik özelliklerini geçmeyecek şekilde tercih edilmiş ve Aristorod89 kaynak teli kullanılmıştır. Dolgu malzemesi akma dayanımı 920 MPa, kopma dayanımı ise 940 MPa’dır. Çizelge 3.2’de

testler için hazırlanan numunelerin kaynaklı bağlantılarında kullanılan Aristorod89 dolgu telinin kimyasal bileşenleri belirtilmektedir.

Çizelge 3.2. Aristorod89 kimyasal bileşenleri

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %
0.17	0.8	1.75	0.41	2.22	0.533

Kaynaklı birleştirmelerde boğaz kalınlığı kaynak parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan çalışmada belirtilen kaynak kalınlığına göre kaynak parametreleri belirlenmiştir. Koruyucu gaz olarak M20 (%80 Ar, %20 CO₂) gaz grubu seçilmiştir. Kaynak sonrasında kaynak dikişinde oluşabilecek süreksizliklerden dolayı gözle muayene, penetrasyon testi ve ultrasonik test yapılarak NDT en ideal kaynak dikişi numuneleri test için hazır hale getirilmiştir. Çizelge 3.3'te numunelerin kaynak parametreleri belirtilmektedir.

Çizelge 3.3. Statik testlerde hazırlanan numunelerin kaynak parametreleri

	Kaynak Uzunluğu [mm]	Kaynak Boğaz Kalınlığı [mm]	Ön Isıtma [°C]	Voltaj [V]	Akım [I]	Ark Boyu [mm]	Tel Sürme Hızı [m/dk]
Numune 1	20	3	100	20-25	200-210	5	8
Numune 2	30	3	100	20-25	200-210	5	8

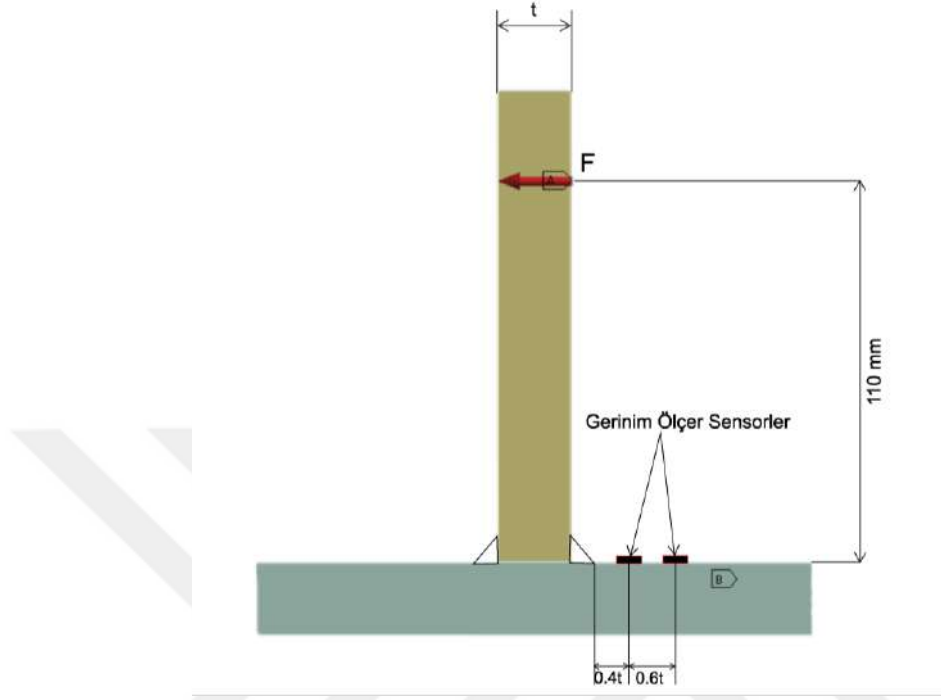
S960 malzemesi için çekme testi gerçekleştirilmiş ve mekanik özellikleri elde edilmiştir. S960 için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.4'te belirtilmektedir.

Çizelge 3.4. S960QL mekanik özellikleri

Parametre	Değer
Akma Dayanımı - R _{p0.2} - MPa	1027
Çekme Dayanımı - R _m - MPa	1066
Elastikiyet Modülü - E - GPa	203.4
Uzama - A ₅ - %	16
Poisson Oranı - ν	0.33

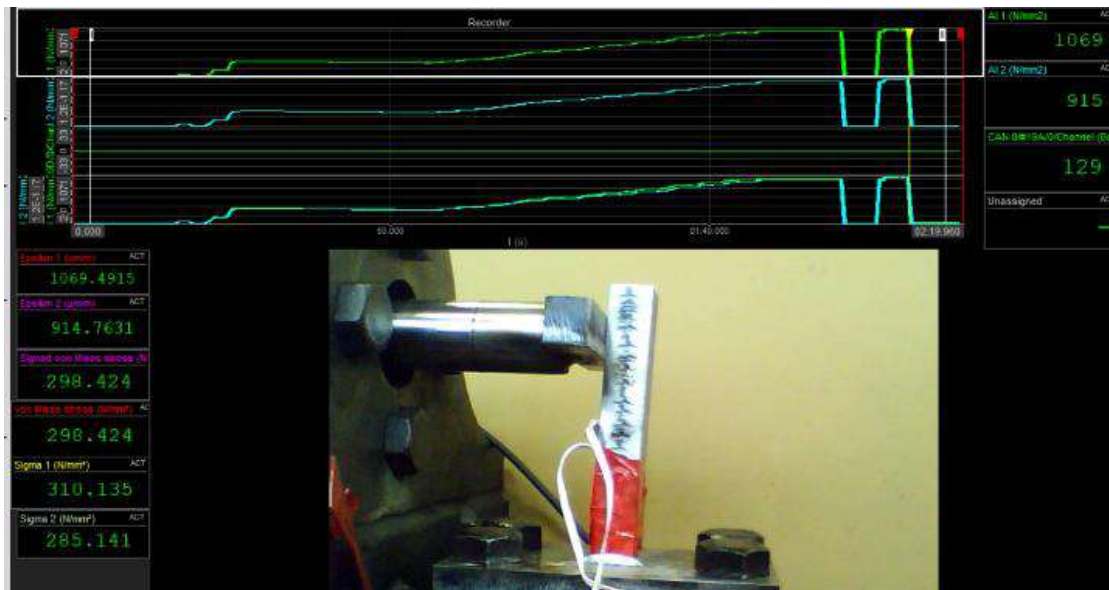
Yapılan deneylerde numune kalınlıkları 20 mm seçilip kaynak ucundan 0.4t ve 1t uzaklıklarda 2 adet gerinim ölçer bağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde maksimum 0.4t eleman boyutunda kabuk ve katı modellemeler hazırlanarak deneysel veriler ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Temas bölgeleri paylaşım topolojisi ve sürtünme

bağlantısı verilerek tanımlamalar yapılmıştır. Denklem 3.2 ve 3.3'e göre yol tanımlamaları yapıp gerilme değerleri yol noktaları üzerinden alınmıştır. Numune boyutları ve gerinim ölçer sensörün konumları Şekil 3.9'de gösterilmektedir.



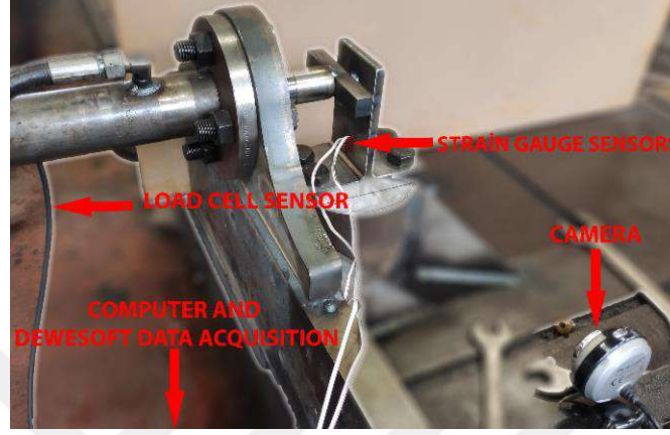
Şekil 3.9. Deney düzeneği için hazırlanan numunelerde gerinim ölçer sensör konumları

Deney düzeneğinde kaynak dikişini kırması için hidrolik silindirler kullanılmakta olup bağlanan basınç sensörleriyle kuvvet değerleri alınmıştır. Gerinim ölçer, basınç sensörleri verileri için Dewesoft yazılımı ve veri toplama kartı kullanılmıştır. Şekil 3.10'de numunenin test gerçekleştirirken Dewesoft yazılım arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Veri toplama Dewesoft arayüzü

Şekil 3.11’de statik testler için hazırlanan deney düzeneği gösterilmektedir. Deney düzeneğinde sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup maksimum kuvvete göre değerlendirmeler yapılmıştır. Test düzeneğinin sehim yapmaması için yüksek atalet momenti sağlanarak deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneği üretilmeden önce SEA gerçekleştirilerek sehim miktarı minimum değerlere ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 3.11. Deney düzeneği

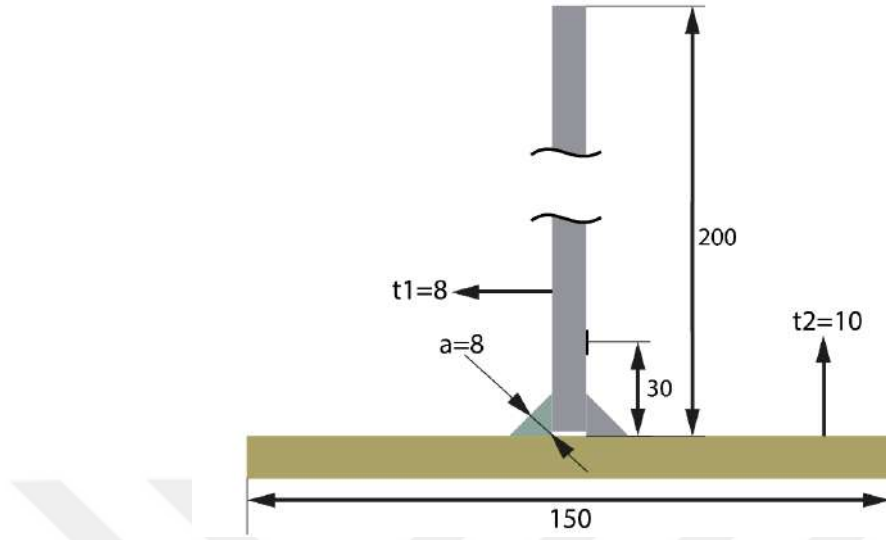
3.4. Kaynak Parametrelerinin Doğal Frekans Etkisinin İncelenmesi için Hazırlanan Test Düzeneği ve Numuneleri

Kaynaklı bağlantılarında kaynak parametrelerinin ve öngerilmelinin etkisini incelemek amacıyla modal çekiç testleri gerçekleştirilmiştir. Öngerilmeli ve öngerilmemiş doğal frekans karşılaştırmaların materyal ve metotları başlık 3.4.1’de, 39 numunede 13 farklı kaynak parametrenin doğal frekans karşılaştırmaları için kullanılan materyal ve metotlar başlık 3.4.2’de verilmektedir. Kaynak parametreleri olarak kaynak kalınlığı, paso sayısı, kaynak dikiş türü, iş parçası ve ana malzeme kalınlıkları, ön ısıtma sıcaklığı ve pasolararası sıcaklıklarının etkileri incelenmiş olup S690 malzemesi kullanılmıştır.

3.4.1. Kalıntı Gerilme Etkisinin İncelenmesi için Hazırlanan Test Düzeneği ve Numune

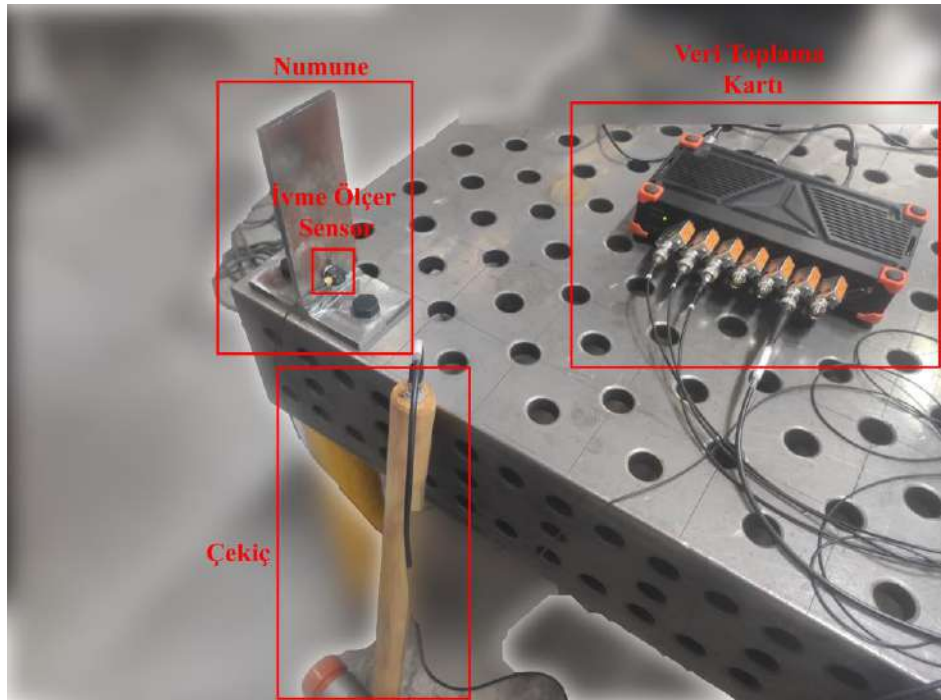
Doğal frekans tespiti için hazırlanan numunede S690QL yüksek mukavemetli çelik kullanılmış olup Aristorod69 dolgu teli kullanılarak kaynaklı bağlantı ile birleştirilmiştir. İş parçası 8 mm, ana malzeme ise 10 mm kullanılmış, kaynak boğaz kalınlığı 5 mm olacak şekilde kaynak parametreleri ayarlanmıştır. Modal test için ise bir

adet ivme ölçer sensör iş parçasına kaynak ucuna 30 mm mesafesinde merkezine yapıştırılmıştır. Şekil 3.12’de hazırlanan test numunesi gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Kalıntı gerilmenin etkisinin incelenmesi için hazırlanan numune ölçüleri

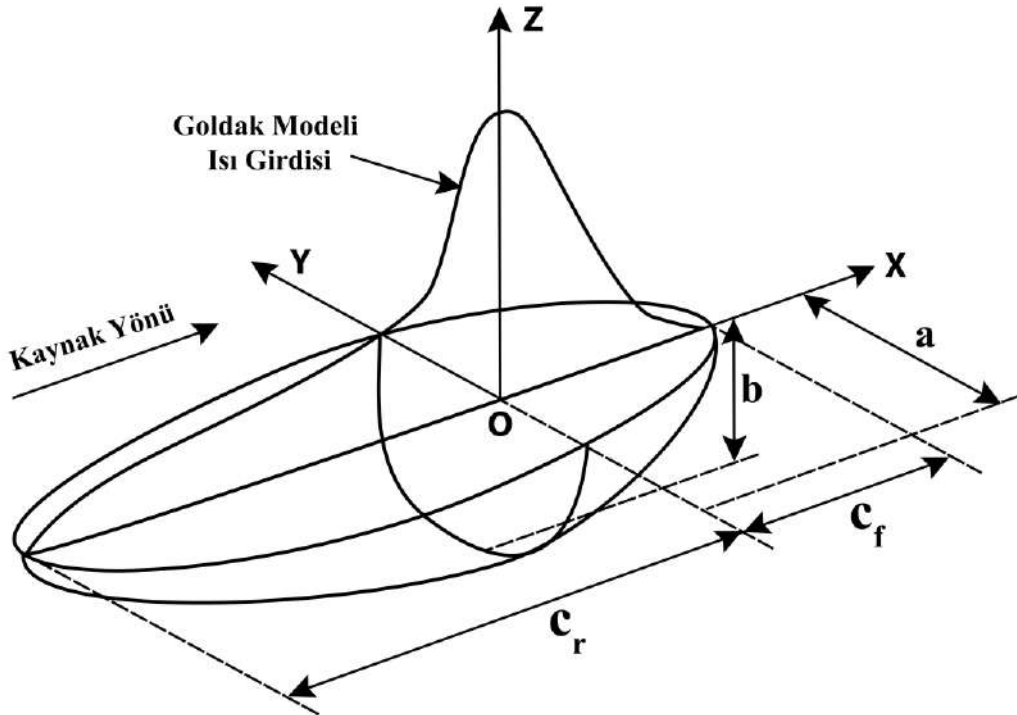
Gerçekleştirilen modal test verileri için Dewesoft veri toplama kartı ve yazılımı kullanılmıştır. Veri toplama kartı ile tahrik edilen numunede oluşan zamana bağlı ivme değerleri alınmıştır. Elde edilen veriler yazılıma aktarılıp FFT dönüşümü ile frekans düzlemine geçilerek doğal frekanslar tespit edilmiştir. Şekil 3.13’de kalıntı gerilmenin etkisini incelemek için hazırlanan test düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Kalıntı gerilmenin etkisinin incelenmesi için hazırlanan test düzeneği

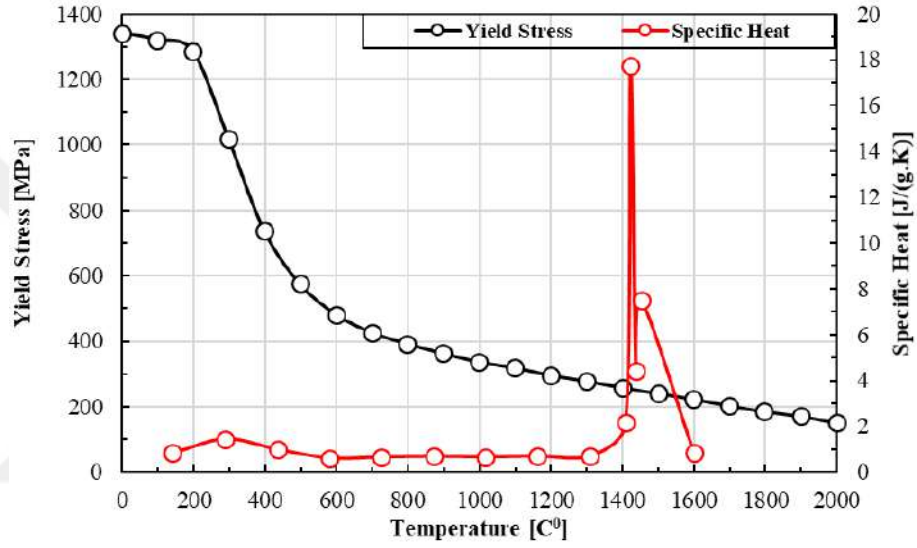
SEA modelinde tüm mesh tipleri kuadratik olan hegzagonal 8 düğüm olarak kullanılmıştır. Ağ boyutları, SLD-1 için düğüm sayısı 15897, eleman sayısı 2976, SLD-2 için düğüm sayısı 14757, eleman sayısı 2700, SHL-1 için düğüm sayısı 948, eleman sayısı 834, SHL-2 için düğüm sayısı 1103, eleman sayısı 1015 ve SHL-3 için düğüm sayısı 990, eleman sayısı 873 elde edilmiştir. Mesh kalitesi ortalama eleman kriterine göre minimum 0.8 sağlanacak iyileştirmeler yapılmış ve belirtilen düğüm ve eleman sayıları elde edilmiştir. SEA bu mesh tipi, kalite ve boyutlarına göre uygulanmıştır.

Kaynaklı eklemlerdeki kalıntı gerilmeler doğal frekansı da etkiler. Bunun için SEA ile termal analizler yapılabilir. Goldak modeli, bazı çalışmalarda ısı transferi, termal radyasyon ve konveksiyon gibi termal olayları simüle etmek için yaygın olarak kullanılan bir matematiksel modeldir. (Farahani ve ark. 2023; Baruah ve Singh 2023). Bu nedenle termal analizde önerilmeli doğal frekansı belirlemek için Şekil 3.14'te gösterilen Goldak modeli kullanılmıştır. Goldak modelinin geometrik parametreleri, alınan makro görüntüden ve CMM ile taranan modellemeden belirlenmiştir. Gerilim değeri 28V, akım değeri ise 285 amperdir. İleri hız 30 cm/dk olarak alınmıştır. Bu değerler numune kaynatılırken elde edilen değerlerdir. Termal analiz sonucunda yapılan doğrusal olmayan analizde bozulma ve kalıntı değerleri belirlenmiş olup sınır koşulları, modal deneyin yapıldığı sınır koşulları ile aynı olup bağlantı deliklerine sabitlenmiştir.

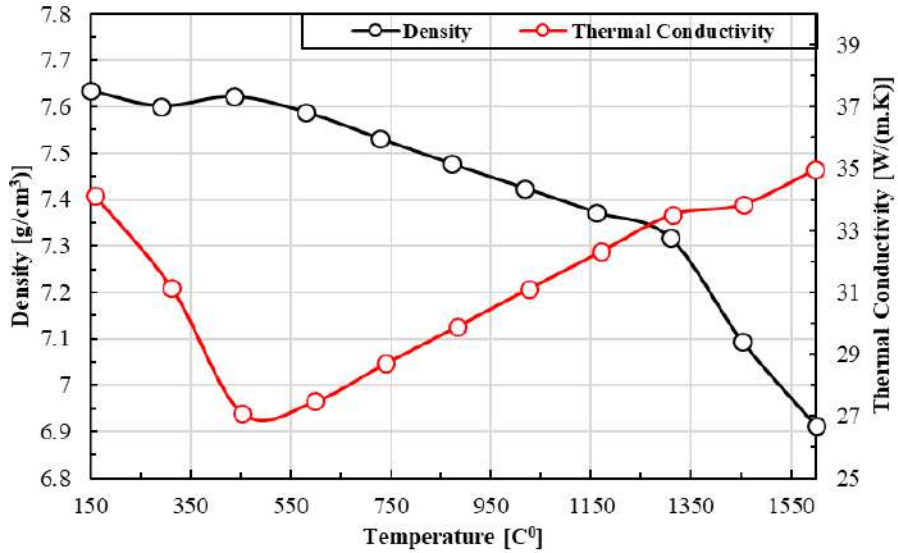


Şekil 3.14. Termal analizler için kullanılan Goldak modeli

Kullanılan S690 malzemesi, kalıntı gerilim tespiti için doğrusal olmayan malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Ek olarak, termal analizler için, termoplastik özellikler literatürde kullanılan çalışmalardaki değerlere göre tanımlanmıştır (Liu ve ark. 2023; Zamiri Akhlaghi ve ark. 2011; Adak ve Guedes Soares 2014). Şekil 3.15'te, S690 malzemesi için termal analizlerde kullanılan özelliklerde sıcaklığa göre değişimler gösterilmektedir. Termoplastisite özellikleri termal analizde tanımlandı ve termal analizler çift taraflı kaynak olarak Goldak modeli ile gerçekleştirildi. Kalıntı gerilmeler termal analizin çözümünü yapısal analize bağlayarak belirlendi.



(a)



(b)

Şekil 3.15. S690 termoplastisite özellikleri (a) yoğunluk ve termal iletkenlik (b) Akma gerilimi ve özgül ısı-sıcaklık

3.4.2. Kaynak Parametrelerinin Karşılaştırılması için Hazırlanan Test Düzenegi ve Numuneler

Numuneler ve SEA tasarımları için Spaceclaim ve Solidworks CAD yazılımları kullanılarak tasarlandı. SEA için Ansys 2023 R2 kullanıldı. 13 farklı kaynak parametresi belirlenmiş olup numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler lazer ile kesilmiştir. Numuneler S960QL ultra yüksek mukavemetli çelik olup kaynak dikişinde 1.2 mm dolgu teli kullanılmıştır. Dolgu teli malzemesi ise Aristorod 89 kullanılmıştır. Bu malzemelerde çekme testi yapılmış olup elastisite modülü 205 GPa alınmıştır. Dolgu teli ve numune malzemeleri arasında mekanik özellikleri birbirlerine yakındır. Numune ölçüleri belirlenirken literatürde bir çalışmadaki numunede kullanılan ölçülere yakın hazırlanmıştır (Güven ve Rende 2020). Fakat kaynak parametrelerin etkilerinin yanı sıra geometrik değişkenlerin etkisini görmek içinde iş parçası ve ana malzeme kalınlık, kaynak kalınlığı, uzunluk ve yüksek değerleri ön tasarımda değiştirilmiştir. Ayrıca çoklu pasonun, ön ısıtma ve pasolararası sıcaklık değerlerinin etkilerini görmek amacıyla farklı numuneler hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm kaynaklar robotik MAG kaynağı ile uygulanmıştır. Çizelge 4.7’te belirtildiği gibi, her bir numunede farklı parametreler uygulanmıştır. Tüm numuneler Şekil 3.16’de gösterildiği gibi T-bağlantı ile hazırlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri için lazer sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Voltaj ve akım değerleri kalibrasyonu gerçekleştirilmiş kaynak makinesi üzerinden tespit edilmiştir. Numunelerin tüm ölçüleri ise CMM lazer tarayıcı ile taratıldıktan sonra kontrol edilmiştir.

Çizelge 3.5. Kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan kaynak numune ölçüleri ve sıcaklık işlemleri

Numune İsmi	a [mm]	Paso Sayısı	Kaynak Dikiş Türü	t ₁ [mm]	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	t _{ön-ısıtma} [C°]	t _{pasolararası} [C°]
SP-1	6.8-7.2	1	Dış Bükey	8	100	80	0	0
SP-2	6.8-7.2	1	Dış Bükey	5	100	80	0	0
SP-3	6.8-7.2	1	Dış Bükey	8	100	150	0	0
SP-4	2.9-3.2	1	Dış Bükey	8	100	80	0	0
SP-5	6.8-7.2	3	Dış Bükey	8	100	80	0	0
SP-6	6.8-7.2	1	Dış Bükey	8	100	80	100	0
SP-7	6.8-7.2	1	Dış Bükey	8	100	80	300	0
SP-8	6.8-7.2	1	Dış Bükey	15	100	80	0	0
SP-9	6.8-7.2	3	Dış Bükey	8	100	80	0	150
SP-10	6.8-7.2	1	Düz	8	100	80	0	0
SP-11	6.8-7.2	1	İç Bükey	8	100	80	0	0
SP-12	6.8-7.2	4	Dış Bükey	8	100	80	0	150
SP-13	6.8-7.2	1	Dış Bükey	8	240	80	0	0

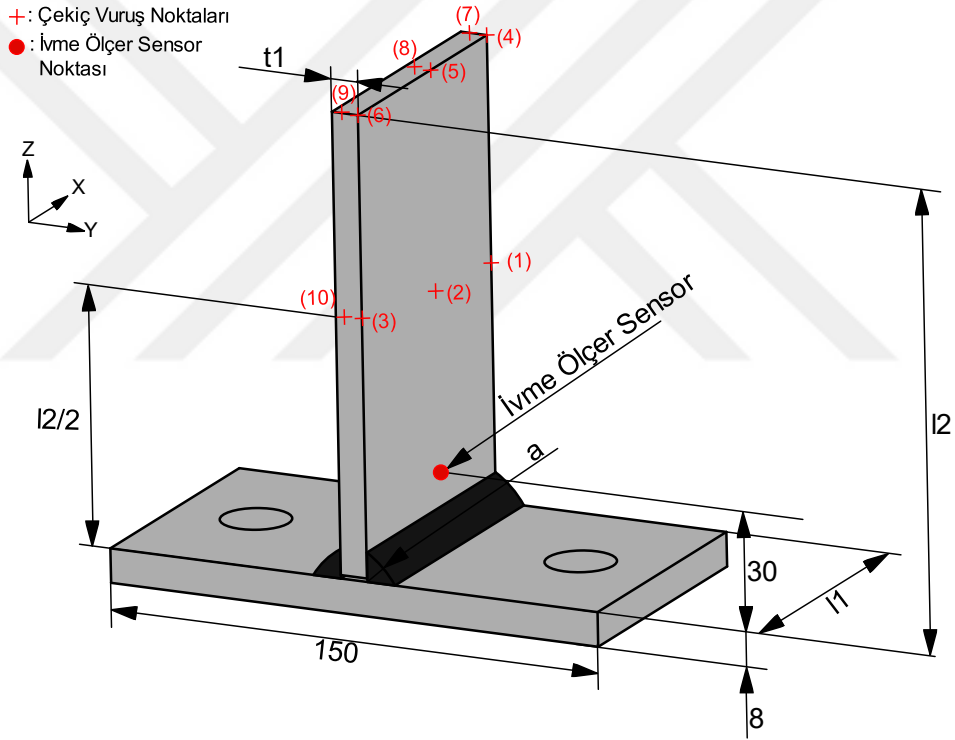
Numunelerin farklı kaynak dikişlerinde kaynak makinesinden Çizelge 3.6’de belirtildiği gibi voltaj ve akım değerleri alınmıştır. Kaynak boğaz kalınlığını elde edebilmek için farklı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Numune sıcaklığı oda sıcaklığına geldikten sonra bu plakalar kesilmiş ve numune elde edilmiştir. Kaynak boğaz kalınlığı numunelerde 6.8-7.2 mm ve 2.9-3.2 mm aralığında elde edilmiştir. Bu değerler CMM lazer tarayıcı sonrasında katı model incelenirken tespit edilmiştir. Kaynak boğaz kalınlıklarının bu aralıkta olma sebepleri arasında ortam şartları, kaynak makinesi voltaj ve akım değerlerinin dalgalanması gibi birçok parametresi vardır. Değerlendirmeler CMM ile taranan numunelerde de yapıldığı için ve bu durum gerçek hayatta da karşılaşılabileceği için SEA’da bunlar göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Belirtilen SP1-SP13 numunelerinden her birinden 3’er adet hazırlanmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken ortalama değerleri alınarak incelenmiştir. Çizelge 3.6’da hazırlanan numunelerin kaynak parametreleri belirtilmektedir.

Çizelge 3.6. Kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan kaynak parametreleri

Numune ismi	Voltaj [V]	Akım [I]	Kaynak İlerleme Hızı [cm/dk]	Dolgu Teli Hızı [m/dk]
SP-1	27-32	280-300	25	12
SP-2	27-32	280-300	25	12
SP-3	27-32	280-300	25	12
SP-4	20-25	105-120	30	4
SP-5	27-32	280-300	25	12
SP-6	27-32	280-300	25	12
SP-7	27-32	280-300	25	12
SP-8	27-32	280-300	25	12
SP-9	25-30	250-270	55	12
SP-10	27-32	280-300	25	12
SP-11	27-32	280-300	25	12
SP-12	25-30	250-270	55	12
SP-13	27-32	280-300	25	12

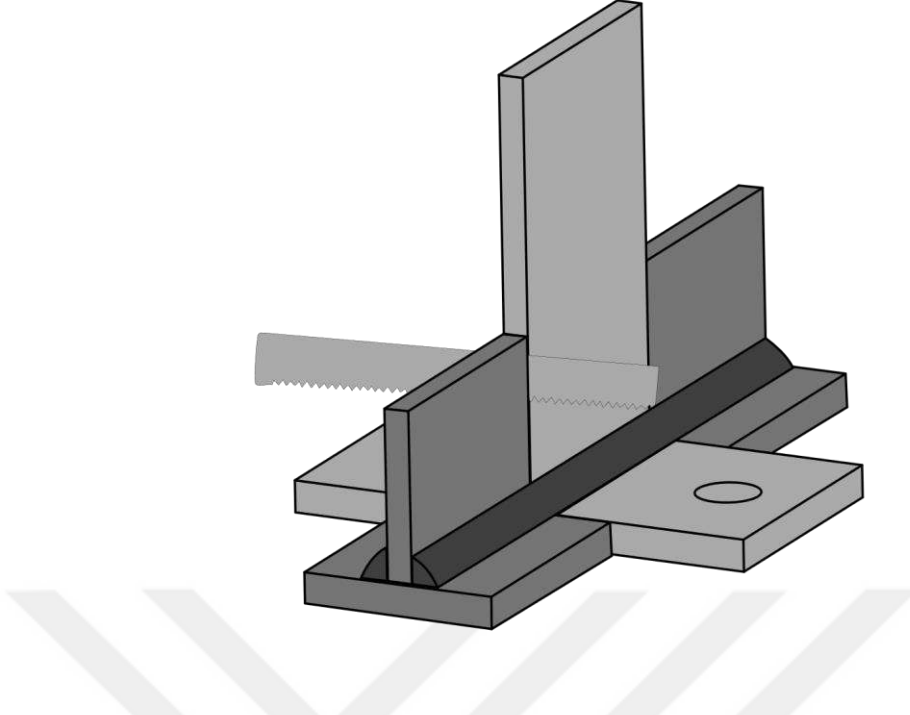
EMA çalışmalarında çekiç vuruşları için numunede 10 adet nokta belirlenmiştir. Şekil 3.16’de gösterilen 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı noktalarda -Y yönünde, 7 ve 8 numaralı noktalarda -Z yönünde, 9 numaralı noktada -Z ve +X yönünde, 10 numaralı noktada ise +X yönünde çekiç ile vuruşlar gerçekleştirilmiştir. Her noktada çift hit olmaması için en az 5 vuruş gerçekleştirilmiş olup bu vuruşların FFT’leri ile değerler alınırken ortalamaları alınmıştır. Eğer vuruş sırasında çift vuruş yani çekicinin birden çok teması gerçekleşirse o vuruş iptal edilmiştir. Böylelikle daha stabil veri elde edilmesi sağlanmıştır. Her numunede 11 adet vuruş yönünden 55 adet vuruş ile toplam 715 vuruş

gerçekleştirilmiştir. Her noktanın vuruşlarının ortalamaları alınarak FFT ile elde edilen sonuçlarda pik yapan frekans değerleri doğal frekans olarak tespit edilmiştir. Her numunede değişen bu doğal frekans değerlerine göre modları da belirlenmiştir. İvme ölçer sensörü ise ana malzemenin üst yüzeyinde 30 mm üstünde yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Numune deney düzeneğine bağlanırken ise M20 10.9 cıvata ile bağlanmıştır. Numune uzunluğu 150 mm ve ana malzeme kalınlık ölçüsü 8 mm sabit olup diğer geometrik ölçüler değiştirilmiştir. Ayrıca orta vuruş noktaları için ivme ölçer sensörüne yakın olmamasına stabil veri elde edilememeye ihtimalinden dolayı dikkat edilmiş ve iş parçası yüksekliğinin yarısı kadar merkezi noktadan vurulmuştur. Şekil 3.16’de kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan numune ölçüleri ve test gerçekleştirirken çekiç vuruş noktaları gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Kaynak parametreleri etkisi için hazırlanan numunenin ölçüleri ve çekiç vuruş noktaları

Numunelerin kaynatılması için MAG kaynağı ile yarı otomatize robotik kaynak kullanılmıştır. Kaynatılmadan önce başlangıç bitiş plakası eklenmiştir. Böylelikle daha stabil ve süreksizlik içermeyen kaynak dikişi elde edilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında başlangıç bitiş plakası kesilmiştir. Şekil 3.17’de kaynak sonrasında kesilen başlangıç bitiş plakası gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Kaynak sonrası başlangıç, bitiş plakasının kesilmesi

CMM lazer tarama için Faro Quantums Max kullanılmıştır. Polyworks yazılımı kullanılmış olup tarama ayarları hassas seçilip 0.05 mm hassasiyetinde geometriler elde edilmiştir. Numune taranırken alt yüzeyi Şekil 3.18’de gösterildiği gibi taranamadığı için numune tarandıktan sonra çevrilip alt yüzeyi de taranmıştır. Polyworks yazılımında alt yüzeyi ve diğer yüzeyleri birleştirilerek hatasız geometriler elde edilmiştir. Lazer ile tarama işlemi tamamlanması ile modal testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. CMM ile numune tarama işlemi

Modal testlerde veri toplama (DAQ) donanımı olarak Dewesoft Sirius kullanılmış olup ayrıca DewesoftX yazılımı arayüz için kullanılmıştır. Veriler filtrelenip FFT dönüşümü ile zamana bağlı data frekansa bağlı data dönüştürülmüştür. Kullanılan ivme ölçer sensörü hassasiyeti 0.01, çekiç hassasiyeti ise 0.01'dir. Veriler 6000 Hz'e kadar alınmıştır. Modal test için hazırlanan test düzeneği Şekil 3.19'te gösterilmektedir.

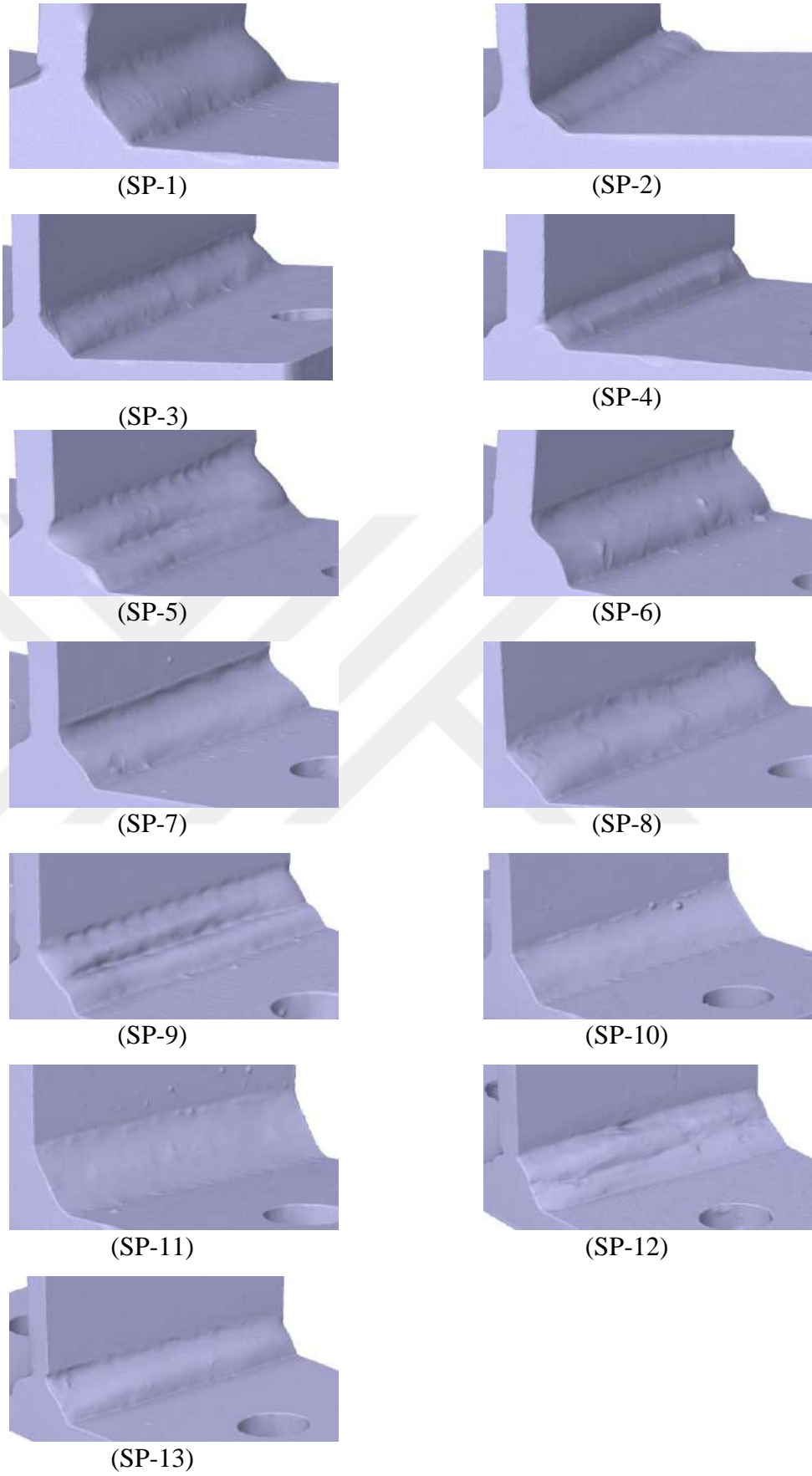


Şekil 3.19. Kaynak parametrelerinin etkisi için hazırlanan test düzeneği

Modal parametre tahmini, bir dizi frekans cevap fonksiyonu (FRF) ölçümü temel alınarak elde edilmektedir. FRF'de ifade edildiği üzere, bir yapı üzerindeki iki nokta arasındaki giriş-çıkış ilişkisini frekansın bir fonksiyonu olarak tanımlar. Gerçekleştirilen modal testte frekans cevap fonksiyonu ($H(\omega)$), çıktı kuvvetinin fourier dönüşümü ($Y(\omega)$), sistemin girdi cevabının fourier dönüşümü $X(\omega)$ ile bölünmesi ile elde edilmektedir (Schwarz ve Richardson 1999). FRF'nin temel formülü Denklem 3.5'de verilmiştir (Greenspon 2003):

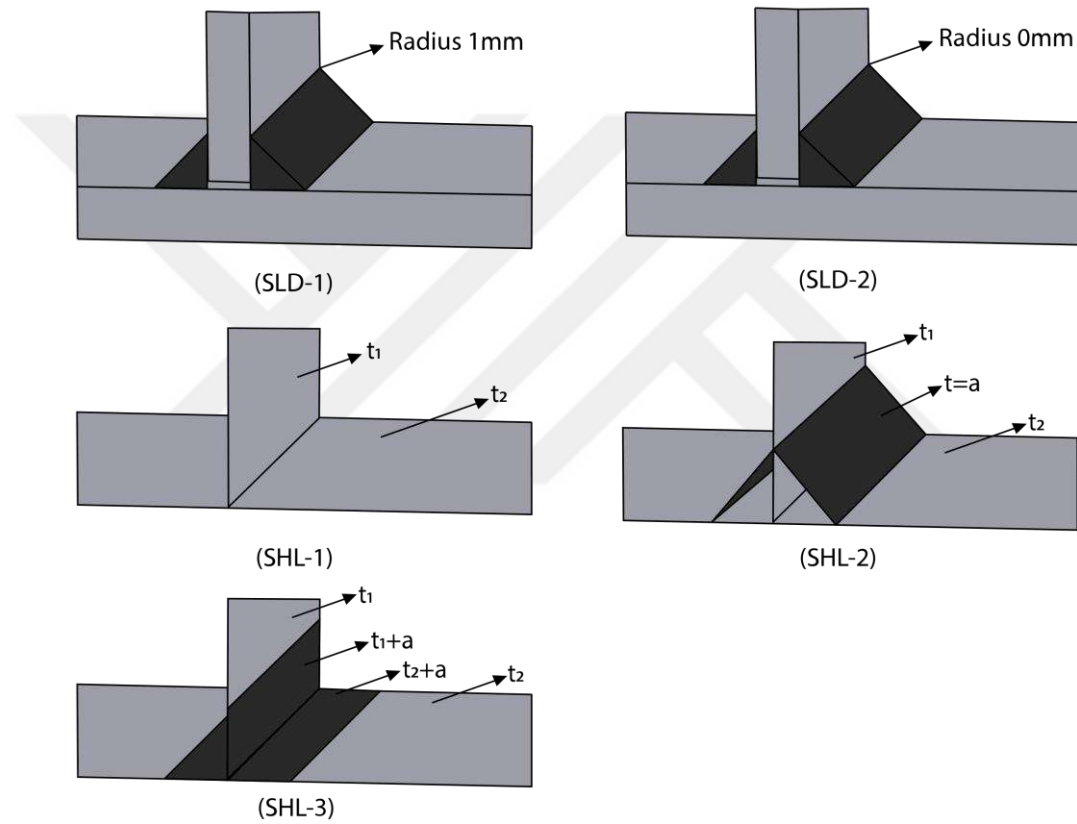
$$H_{ij}(\omega) = \frac{Y_j(\omega)}{X_i(\omega)} \quad (3.5)$$

Taranan geometrilerin katı modele çevrilmesi için Spaceclaim yazılımı kullanılmış olup 0.1 mm hassasiyetinde Shrinkwrap komutu olarak adlandırılan komut kullanılarak Şekil 3.20'da gösterildiği gibi katı modele çevrilmiştir. Kaynak öncesi ve sonrası temizliklere rağmen bazı bölgelerde kaynak cürufları gözükmemektedir. Testler bu cüruflar ile beraber gerçekleştiği için CMM geometrilerinde de değiştirilmemiştir.



Şekil 3.20. CMM ile taranan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan lazer tarama modelleri

Gerçek geometrilerle karşılaştırıldığında oldukça kusursuz geometriler elde edilmiş olup mesh işlemi Ansys Mechanical yazılımında gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişinde mesh size 0.1 mm girilmiş olup eleman kalite değeri 0.95'in altına, çarpıklık ise 0.15'in üstüne çıkmamıştır. Ağ ölçüsü, ağ yakınsama işlemi uygulandıktan sonra 0.1 mm belirlenmiştir. Ağ yakınsama uygulandıktan sonra 0.1 üzeri doğal frekanslar azalmakta olup altındaki değerlerde ise aynı değerler elde edilmiştir. Kaynak dikişinde tetragonal mesh, kaynak dikişi olmayan diğer bölgelerde ise hegzagonal mesh kullanılmıştır. Şekil 3.21'de gösterildiği gibi sonlu elemanlar analizlerinde modellemeler tanımlanmış ve sınır şartı olarak bağlantı delikleri tanımlanmıştır.



Şekil 3.21. Kaynak parametrelerinin etkisini incelemek için hazırlanan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan diğer modelleme teknikleri

Sonlu elemanlar analizlerinde Şekil 3.20'da gösterilen tarama modellemeleri CMM olarak tanımlanmıştır. SHL-1,2,3 kabuk modellemeleri ve SLD-1,2 katı modellemeleri olarak 5 adet modelleme uygulanmıştır. Her iki modelleme tipinde de paylaşım topolojisi olarak adlandırılan temas tanımlaması yapılmıştır. Bu modellemelerde de eleman kalite değeri 0.95'in altına, çarpıklık miktarı da 0.15'in üstüne çıkmamıştır. Tüm modellemelerde ağ yakınsaması uygulanmış olup stabil değerler elde edilene kadar ağ ölçülerinin değeri azaltılmıştır. SHL modellemelerinin hepsinde de

hekzagonal mesh kullanılmıştır. SLD modellemelerinde ise kaynak dikişinde tetragonal diğer bölgelerde ise hekzagonal mesh kullanılmıştır. Bunun sebebi katı modellerde hekzagonal mesh, kaynak dikişinde oldukça zor ve hatalarının olmasıdır. İş parçası t1, ana malzeme ise t2, kaynak kalınlığı a'dır. Bağlantı deliklerinde M20 civatanın yüzey alanına göre yüzey oluşturulup tüm eksenlerde hareketsiz tanımlaması yapılmıştır. Malzeme tanımlamasında izotropik ve homojen varsayılmıştır. Çalışma oda sıcaklığında ve S960QL malzemesi üzerinde gerçekleştiği için Young modülü sabit 205 GPa tanımlanmıştır. Bu değer çekme testi sonucunda elde edilmiştir. Poisson oranı sabit olup çeliklerde genel olarak kabul edilen 0.33 tanımlanmıştır (Sun ve ark. 2021; Heinze ve ark. 2012).

Kompleks bir yapının frekans cevapları için SEA pratik bir çözüm olarak kullanılabilir (Ewins 1984). Sonlu elemanlar analizlerinde çok serbestlik dereceli sistemlerde kullanılan genel hareket denklemi kullanılmaktadır. M kütle, C sönümlenme ve K direngenlik matrisidir. Modal analizler için u ve f deplasman ve kuvvetin Fourier dönüşümlerinin vektörleridir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan genel hareket denklemi Denklem 3.6'de belirtilmektedir (Khot ve Yelve 2011).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad (3.6)$$

Doğal frekans N dereceli sönümsüz ve doğrusal bir sistemde Denklem 3.7 ile belirlenebilir:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.7)$$

Harmonik cevap analizlerinde $x(t) = X(\omega)e^{i\omega t}$ açısal frekans ω cevap fonksiyon değeri $X(\omega)(N \times 1)$, olarak Denklem 3.8'deki gibi yazılabilir (Pei ve ark. 2022).

$$[-\omega^2 M + K]X(\omega)e^{i\omega t} = 0 \quad (3.8)$$

Doğal frekans değerinin tespiti için sonlu elemanlar analizlerinde Denklem 3.9 ile belirlenmiştir.

$$|-\omega^2 M + K| = 0 \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 n adet bağlantısı bulunan ikinci dereceden denklemlere yol açar. Bu durum için Denklem 3.10'de belirtilen öznelik sistemleri ile çözülebilmesi için öznelik değerleri çözülmektedir.

$$\lambda_r = \omega_r^2 \quad (3.10)$$

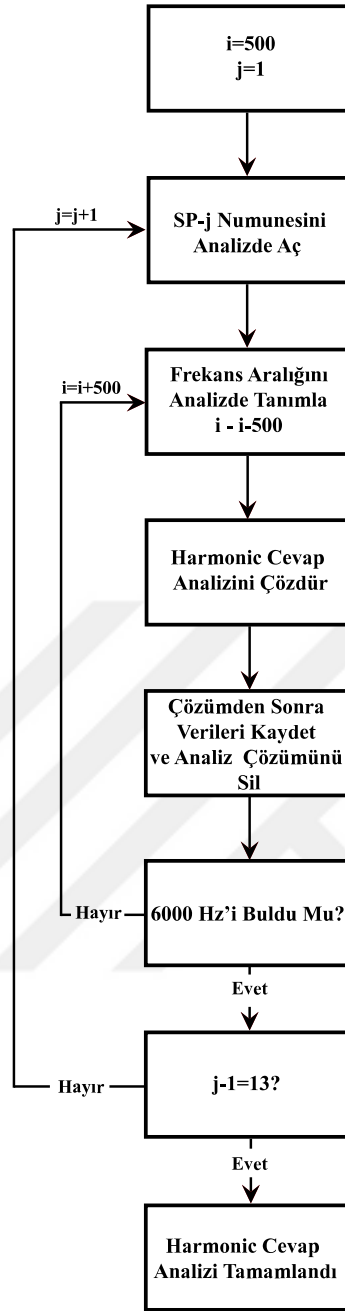
r mod sayılarıdır. Öznelik değerleri normalize edilmiş öznelik vektör (Φ) değerleridir. Serbestlik derecesi ile beraber mod sayısına göre öznelik vektör değerleri değişkenlik gösterir. Öznelik vektörler mod şekillerinin deplasmanı olarak da bilinmektedir. Harmonik cevap analizlerinde, Denklem 3.11'de belirtildiği gibi koordinat sisteminden $X(\omega)$, modal koordinat sistemine $q(\omega)$ (Nx1) dönüştürülür.

$$X(\omega) = \Phi q(\omega) \quad (3.11)$$

Doğrusal bir sistemde frekans düzleminde incelemeler yaparken harmonik cevap analizlerinde de Denklem 3.12 kullanılmakta olup sistemin cevabı hesaplanabilmektedir.

$$[-\omega^2 \Phi^T M \Phi + i\omega \Phi^T C \Phi + \Phi^T K \Phi] q(\omega) = \Phi^T F(\omega) \quad (3.12)$$

Harmonik cevap analizleri için sonlu elemanlar analiz yazılımlarında çok yüksek disk kapasitesi harcamaktadır. Eğer frekans hassasiyet değeri yüksek ayarlanırsa düşük disk kapasitesi gerekir fakat doğal frekansların zirve yaptığı gözükmebilir. Bu sorunu önlemek için Python programlama dili ile bir kod parçacığı hazırlandı. Bu kod parçacığı, Şekil 3.22'de gösterildiği gibi her 500 Hz'de bir sonuçları kaydedip çözümü kayıt altına almakta ve silmektedir. 13 adet olan numune sayısında her numune de harmonik cevap analiz için bu işlem uygulanmıştır. Döngüde numune sayısı j olup i ise frekans değeri olarak tanımlanmıştır. 6000 Hz'e kadar bu döngüde devam eder ve tamamlar. Bu akış şeması Ansys Workbench içinde bulunan kod parçacığı kod ile tanımlanmıştır. Analiz sistemleri j. sistem olarak açılır ve Mechanical modülünün içinde i ve i-500 frekansları arasını tanımlayıp analiz çözdürülmektedir. Böylelikle disk kapasitesinde alan kaplamayıp ve pratik olarak 0.1 frekans hassasiyetindeki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.22. Harmonik cevap analizlerinde hazırlanan önerilen kod parçacığı iş akış şeması

3.5. Yorulma Testlerinde Kullanılan Deney Düzenegi, Kaynak Sonrası İşlemler ve Numuneler

Yorulma testleri gerçekleştirilmeden önce S960QL ve S1100QL ultra yüksek mukavemetli çeliklerle hazırlanan kaynak bağlantılı numuneler planlanmıştır. Dolgu teli ise Aristorod 89 kullanılmıştır. Bunun sebebi iş ve ana malzemede kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine sahip dolgu teli olmasıdır. Numuneler hazırlanırken

literatürdeki birçok çalışmalar incelenmiş olup özellikle S1100 malzemelerle yorulma sonuçlarının oldukça az olmasıdır. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle S1100 gibi ultra yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı da artmakta ve yorulma ömürlerinin doğru tespitleri oldukça önem kazanmaktadır. Bu çalışmada çift T bağlantılı kaynak numunelerinde, malzeme farkının ve kaynak sonrası işlemlerin yorulma ömürlerine etkileri incelenmiştir. İş ve ana malzemelerde kullanılan, çekme testi ve spektrometre analizleriyle elde edilen S960QL malzemesinin kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.4’de verilmektedir. Yorulma testlerinde kullanılan S1100’ün kimyasal bileşenleri Çizelge 3.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7. S1100 kimyasal bileşenleri

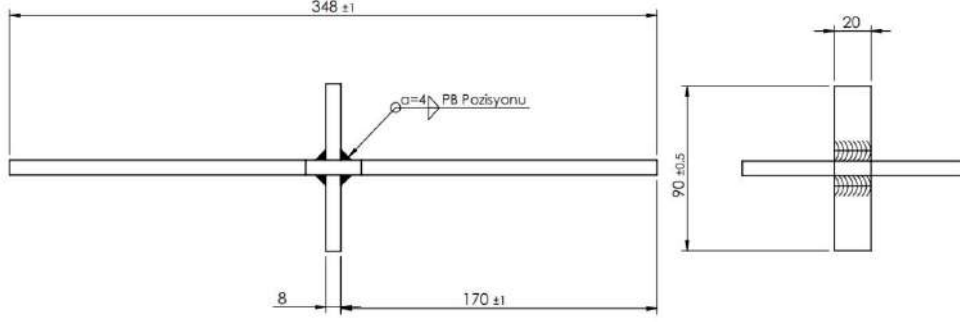
C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %
0.16	0.2	1.25	0.2	0.06	0.589

S1100 malzemesi için çekme testi gerçekleştirilmiş ve mekanik özellikleri elde edilmiştir. S1100 için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.8’te belirtilmektedir.

Çizelge 3.8. S1100QL mekanik özellikleri

Parametre	Değer
Akma Dayanımı - $R_{p0.2}$ - MPa	1206
Çekme Dayanımı - R_m - MPa	1405
Elastikiyet Modülü - E - GPa	203.8
Uzama - A5 - %	11
Poisson Oranı - ν	0.33

Numuneler hazırlanırken sabit geometri ölçüleri kullanılmıştır. Geometri ölçülerinin yorulma ömrüne etkileri bu çalışma da incelenmemiştir. Kaynak kalınlığı ve diğer numune ölçülerinin değerleri sabit tutulmuştur. Çift T bağlantılı şekilde tasarlanmış olup Şekil 3.23’de yorulma testlerinde kullanılan numunelerin ölçüleri gösterilmektedir. Bu ölçüler literatürdeki çalışmalardan farklı değerlerdedir. Genişlik 20 mm olup yorulma test cihazının maksimum yükleme 100 kN kapasitesinden dolayı gerilme değerinin daha yüksek olması sağlanmıştır. Ayrıca kaynak dikişinde süreksizliğin engellenmesi için başlangıç ve bitiş plakaları eklenmiştir. 50 mm uzunluğunda olan bu plakalar kaynak işlemi sonrasında kesilmiştir. Böylelikle stabil kaynak dikişi elde edilmiştir.



Şekil 3.23. Numunelerin geometrik ölçüleri

İş ve ana malzemenin tüm numunelerde sabit ölçülerde çıkması için kalıp yapılmıştır. Şekil 3.24’de gösterilen kalıp sayesinde başlangıç ve bitiş plakası ile birlikte toplam 5 adet parça kalıba yerleştirilerek puntalanmıştır. Böylelikle kaynak işlemi başlamadan önce numunelerin sabit ölçülerde olması sağlanmıştır.



Şekil 3.24. Numunenin kaynak öncesi punta işlemi

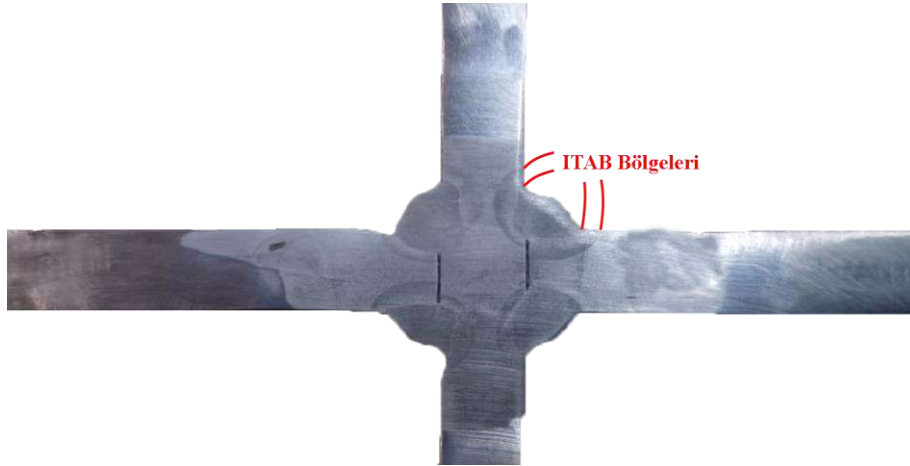
Puntalama işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.25’de gösterilen IGM marka kaynak robotu ile robotik MAG kaynağı ile kaynatılmıştır. Parçalar sabit tutulmuş olup termal analizlerde bu sınır şartlarına göre analizler gerçekleştirilmesi düşünülerek hassas bir şekilde incelenmiştir. Kaynak yapılırken %80 Ar ve %20 CO2 koruyucu karışım gazı kullanılmıştır. Bunun sebebi kaynak sonrası mekanik özelliklerde oldukça verimli olduğu için endüstride sıklıkla M20 gaz grubunun kullanılması olup CO2 aktif gazı nüfuziyette oldukça etkili olup fazla kullanılması durumunda etrafında cürufur bırakabilmektedir. Ar gazı ise pasif bir gaz olup elektrik ve ısı iletkenlikte oldukça etkilidir ve bu sayede elektriksel ark kararlılığı sağlamaktadır. Kaynak işlemi esnasında 23.3-23.5 V gerilim, 148-159 amper aralığında değişkenlik göstermiştir. Bu aralıkların sebebi ise cihazın kalibrasyonu yapılmasına rağmen anlık hava akımı, küçük süreksizlikler sebep olarak

gösterilebilir. Kaynaklama işlemi esnasında ortam şartları 24.6 C^0 ve $\%22.3\text{ RH}$ nem ölçülmüştür. Kaynak ilerleme hızı ise 25 cm/dk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.25. Robot ile MAG kaynağı

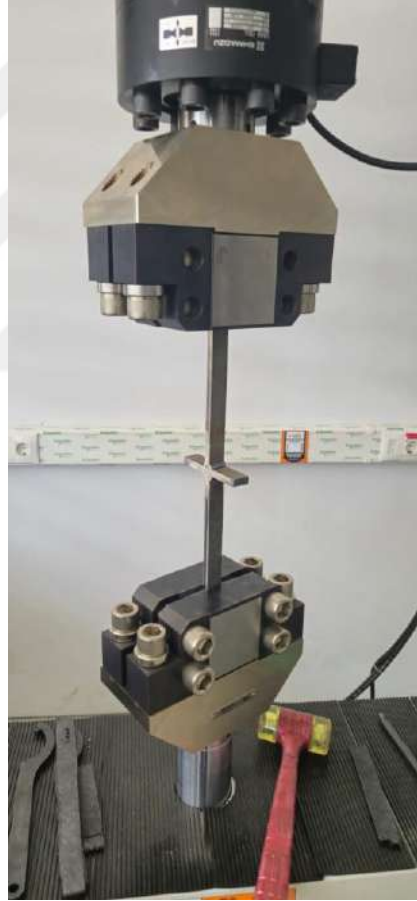
Kaynak sonrasında kesme ve parlatma işlemi gerçekleştirilerek nüfuziyet kontrolü sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde bunun etkisi modellenmeyecek olup parametrelerin penetre olmasının kontrolü yapılmıştır. Hazırlanan numunelerden 6 adet nüfuziyet kontrolü yapılmış olup robotik kaynağı yapıldığı için stabil nüfuziyet derinlikleri elde edilmiştir. Şekil 3.26'de parlatma işlemi sonrası dağlanan S1100 malzemesine ait penetrasyon gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Numunelerde kaynak nüfuziyetinin incelenmesi

Yorulma testleri için Shimadzu Servopulser yorulma test cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın yükleme kapasitesi 100 kN olup numunenin 20 mm 'lik genişliği kapasite kısıtından dolayı ayarlanmıştır. 50 Hz frekansa kadar çıkabilen bu cihazda sabit 30 Hz

yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Numune cihaza bağlanırken 50 mm mesafesinde çenelerden tutulmuş olup $4 \times 1000 \text{ mm}^2$ 'lik tutunma yüzey alanına sahip olmuştur. $4 \times 400 \text{ mm}^2$ 'lik tutunma yüzey alanında yapılan testlerde sıyırma problemi olmuştur. Bu sebeple sıyırma probleminin önüne geçmek için sınır şartı olarak 4000 mm^2 temas yüzey alanı belirlenmiştir. Yorulma test cihazında maksimum 51 kN yükleme koşulunda 35 Hz'de zorlama yapıldığında cihaz hata verip kendisini durdurmuştur. 30 Hz'de zorlama yapıldığında cihaz valfleri testleri uygun gerçekleşmiştir. Bu parametrelerin iteratif olarak testleri gerçekleştirildikten sonra yük değerleri, sınır şartları, frekans değerleri ve numune geometri ölçüleri bu denemeler neticesinde elde edilmiştir. Şekil 3.27'te kaynak sonrası işlem yapılmamış bir numunenin Shimadzu Servopulser yorulma test cihazına bağlanması sonrası test işlemi gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Yorulma test düzeneği

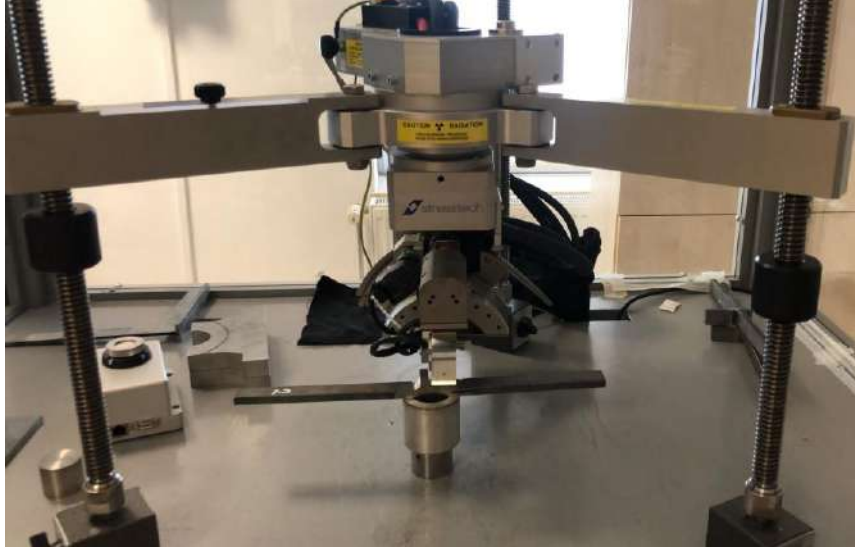
Yorulma testi için numuneler hazırlanırken kaynak sonrası yapılan işlemlerin etkilerini incelemek içinde çalışmalar yapılmıştır. S1100, S960 ultra yüksek mukavemetli çelik malzemelerinde kaynak sonrası kaynak ucu taşlama ve yüksek frekanslı mekanik dövme (YFMD) işlemleri gerçekleştirilmiştir. S1100 malzemelerde 15'er ve S960

malzemelerde 15'er YFMD işlemleri gerçekleştirilmiştir. Toplam 90 adet numune planlanmış olup 92 adet lazer kesim ile kesilmiştir. Numunelerden 2 adet numune yorulma testinde başarısız, 7 adet üretimde başarısız olmuş olup 3 adet ise GS için kullanılmıştır. Böylelikle 80 adet test sonucu elde edilmiştir. YFMD işlemi için HiFit 21R1 modeli kullanılmıştır. Bu işlem gerçekleşirken hava çalışma basıncı 8 bar olarak ayarlanmıştır. İlerleme hızı ise yaklaşık 3-5 mm/s olarak ayarlanmıştır. 3 mm yarıçap pim kullanılarak dövme işlemi gerçekleştirilmiştir. Derinliğin 0.15-0.2 mm arasında olması sağlanmıştır. Kaynak ucu taşlama işlemi gerçekleştirilirken de aynı sayıda numuneler hazırlanmış ve parametreler aynı ayarlanmıştır. Tüm işlemler gerçekleştikten sonra konsantrasyonun etkilerini incelemek amacıyla lazer tarayıcı ile taranmıştır. Bu çalışmada kalıntı gerilmenin etkisini azaltmak için ve kaynak ucunda oluşan konsantrasyonları azaltmak için kullanılan bu çalışmalar neticesinde yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Şekil 3.35'da bir numunede gerçekleştirilen YFMD işlemi gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Kaynak sonrası numunelerde gerçekleştirilen YFMD işlemi

Kaynak sonrası işlemler tamamlandıktan sonra kalıntı gerilme değerleri ölçümleri için çalışmalar yapılmıştır. Kaynak ucu işlemsiz, taşlanmış ve YFMD işlemi yapılmış 3 adet ölçüm yapılmıştır. X-ışını difraksiyonu (XID) yöntemi ile kalıntı gerilme değerleri ölçülmüştür. Stresstech XID cihazının Xstress G2R modeli kullanılmıştır. Bu cihaz tahribatsız bir şekilde ölçümler yapabilmekte olup 3 farklı açıda değerler alabilmektedir. XID yazılımı ise XTronic'dir. Maksimum ölçüm mesafesi ise 50 mm'dir. Bu çalışma da 3 adet numuneden kaynak ucundan 1, 10 ve 25 mm uzaklıktaki mesafelerden 0, 45 ve 90 derece açılarda ölçüm değerleri alınmıştır. Şekil 3.29'da kaynak ucu taşlanmış numune bağlanmış XID cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.29. XID cihazı ile kalıntı gerilme değerlerinin ölçümü

Şekil 3.30 taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görülmektedir. Bu SEM cihazı üç ana bölümden oluşmaktadır: Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi. Optik kolon bölümü, elektron demetinin kaynak noktası olan elektron tabancasıyla başlar. Burada, elektronların numuneye doğru hızlandırılması için yüksek voltaj uygulanan bir anot plakası bulunur. Ayrıca ince bir elektron demeti oluşturmayı sağlayan yoğunlaştırıcı mercekler ve demeti numune yüzeyinde odaklayan objektif mercek yer alır. Objektif merceğe bağlı farklı boyutlarda diyaframlar (apertürler) ve elektron demetinin yüzey üzerinde taranmasını sağlayan tarama bobinleride bu bölümde bulunur. Mercek sistemleri, elektron demetini elektromanyetik alan yardımıyla incelterek veya numune üzerine odaklayarak çalışır. Optik kolonun tamamı ve numune, yaklaşık 10^{-4} Pa düzeyinde bir vakum ortamında tutulur. Görüntüleme sistemi ise, elektron demetinin numuneye etkileşimi sonucu ortaya çıkan çeşitli elektron ve ışınımları algılayan detektörleri içerir. Bu detektörler, sinyal çoğaltıcılar ve elektron demetinin numune yüzeyinde senkronize taranmasını sağlayan manyetik bobinlerle birlikte çalışır. SEM’de sıvı içermeyen ve sıvı özellik taşımayan her türlü plastikler ve çeşitli partiküller (kum, polen, çakıl gibi) gibi numuneler analiz edilebilir. Yalıtkan numunelerin yüzeyi çok ince bir iletken malzeme tabakası ile kaplanarak analiz edilebilir hale getirilir (yaklaşık saniyede 3 Å kalınlığında). Ayrıca, biyolojik numuneler sıvı içerebildiğinden, bu tür örneklerin yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla “Critical Point Drier” cihazı ile yapısı bozulmadan kurutulularak mikroskopla incelenebilir hale getirilir. SEM yorulma testleri sonrası yorulma hasarı olan bölgeler ve ani darbe hasarı olan bölgelerde Şekil 3.30’da gösterilen Hitachi SU 1510 cihazı kullanarak görüntüler alınmıştır.



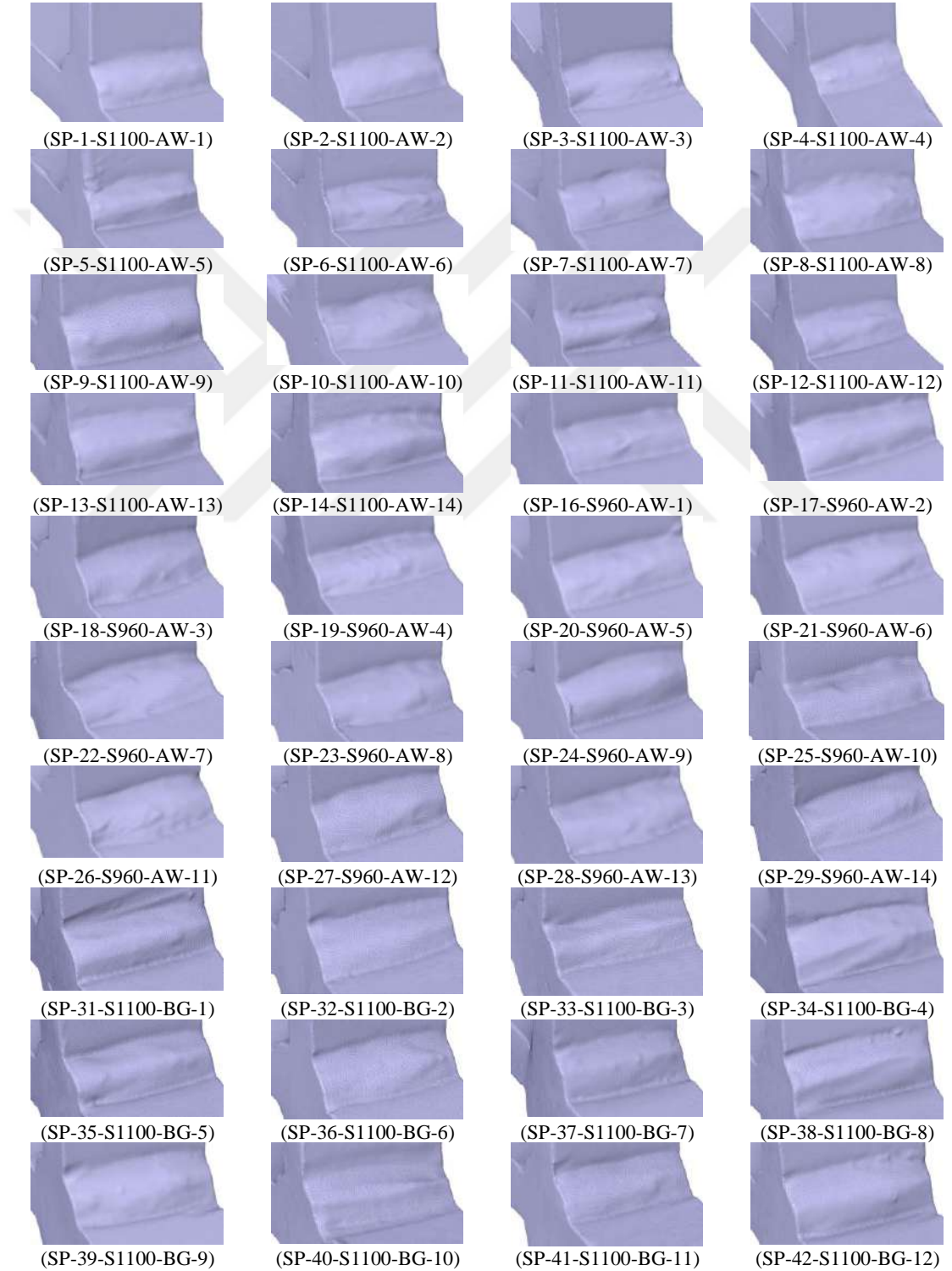
Şekil 3.30. Yorulma testleri sonrası kullanılan taramalı elektron mikroskobu

CMM lazer tarama için Faro Quantums Max cihazı kullanılmıştır. Polyworks yazılımı kullanılmış olup tarama ayarları hassas seçilip 0.05 mm hassasiyetinde geometriler elde edilmiştir. Numune taranırken alt yüzeyi Şekil 3.31’de gösterildiği gibi taranamadığı için numune tarandıktan sonra çevrilip alt yüzeyi de taranmıştır. Polyworks yazılımında alt yüzeyi ve diğer yüzeyleri birleştirilerek hatasız geometriler elde edilmiştir. Lazer ile tarama işlemi yorulma testlerinden önce gerçekleştirilmiştir. Kaynak öncesi ve sonrası işlemler için lazer ile tarama işlemi gerçekleştirilerek Polyworks yazılımında elde edilen stl uzantılı geometri Spaceclaim CAD yazılımında katı modele çevrilmiştir. Çevrilen katı model Ansys Mechanical yazılımına aktarılarak gerilme konsantrasyonları incelenmiştir.



Şekil 3.31. Yorulma test öncesi numune lazer tarama işlemi

Taranan numuneler Polyworks ve Spaceclaim yazılımlarına aktarılmıştır. Burada gereksiz geometriler silinmiştir. Spaceclaim yazılımında Ansys Mechanical modülüne aktarmak amacıyla katı modeller oluşturulmuştur. Lazer tarama ile hazırlanan toplam 92 adet geometri Şekil 3.32’de gösterilmektedir. Taranan bu modeller işlem tipine ve malzeme cinsi sırasına göre gösterilmektedir. Bu modellemeler analizlerde stabil olmayan kaynak dikişindeki maksimum gerilmenin tespiti için kullanılmıştır.





Şekil 3.32. Lazer tarama ile elde edilen numunelerin katı modelleri

Yorulma testleri gerçekleştirilmeden önce gerinim ölçer sensor (GS) kullanılarak SEA gerilme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sıcak nokta gerilme metodundaki konumlara, nominal gerilme için kaynak ucundan 80 mm uzaklığa ve aynı zamanda kaynak ucuna GS bağlanmıştır. 4 adet GS bağlı olarak Dewesoft veri toplama kartından alınan veriler zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Bu işlem 3 adet numunede gerçekleştirilmiştir. GS SP-90-S960-HFMI-15,16,17 numunelerine bağlanmıştır. Kyowa markalı model numarası KFGS-5-350-C1-11 L2M3R olan GS kullanılmıştır. Ölçüm faktörü 2.1 olup toleransı %1'dir. GS uzunluğu 5 mm, direnç değeri 350 ohm olup %0.7 toleransa sahiptir. Hassaslık oranı %0.1 olup %0.2 toleransı vardır. Kabul edilebilir genişleme katsayısı ise $11.7 \times 10^{-6} / ^\circ C$ 'dir. Testler gerçekleştirilirken oda sıcaklığında yaklaşık 23 C⁰'de gerçekleştirilmiştir. GS yapıştırılmaları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. GS özellikleri önce basit bir yapı da doğrulanmış sonra belirtilen numunelere yapıştırılmıştır. Kaynak ucundan 80, 3.2, 7.2 ve 11 mm uzaklıklara bağlanmıştır. GS yapıştırıldığı örnek bir numune Şekil 3.33'de gösterilmektedir.



Şekil 3.33. SP-90-S960-HFMI-15 numunesine yapıştırılmış GS

Yorulma testleri ve SEA sonuçları değerlendirildikten sonra yeni S-N eğrileri için regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.13'te belirtilen C katsayıları ortalama kare hatası minimize edilmiş optimizasyon gerçekleştirilerek 114 adet yeni S-N eğrisi tespit edilmiştir. Böylelikle yeni S-N eğrilerinin formülasyonu ve FAT değerleri elde edilmiştir.

$$\log N = C - m \cdot \log \Delta \sigma \quad (3.13)$$

Literatürde birçok çalışma da olasılıksal dağılım değerleri için farklı değerler olabilmektedir. S-N eğrisinde uluslararası kaynak enstitüsüne göre en az %95 olasılık değeri önerilmektedir (Hobbacher 2016). S-N eğri eğimi sabiti 3 alınması önerilmektedir. Bu çalışmada S-N eğri eğimi sabiti 3 alınmış olup yorulma test sonuçlarında farklı modellerdeki gerilme değerlerine göre C katsayıları tespit edilmiştir. FAT değerleri %95 olasılıksal dağılım doğrusundaki değerine göre belirlenmiştir. Karakteristik değer

olan k değeri numune adedine göre değişmekte olup değerleri Denklem 3.17 'e göre seçilmiştir. %50 olasılığa göre regresyon analizi yapıp C değeri tespit edildikten sonra $\log C$ 'ye karşılık gelen x_i , ortalama değer x_m , standart sapma $Stdv$ ve numune adedi n değerleri kullanılmıştır. Bu değerler ile Denklem 3.14, 3.15, 3.16'e göre %95 olasılık dağılımı için FAT değerleri ve doğruları belirlenmiştir.

$$x_m = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.14)$$

$$Stdv = \sqrt{\frac{\sum (x_m - x_i)^2}{n - 1}} \quad (3.15)$$

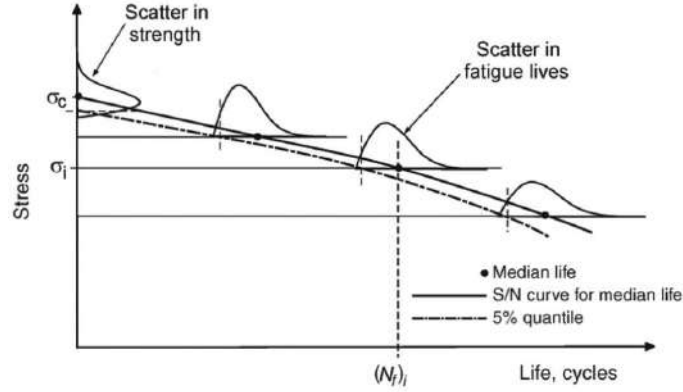
$$x_k = x_m - k \cdot Stdv \quad (3.16)$$

$$k = 1.645 \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right) \quad (3.17)$$

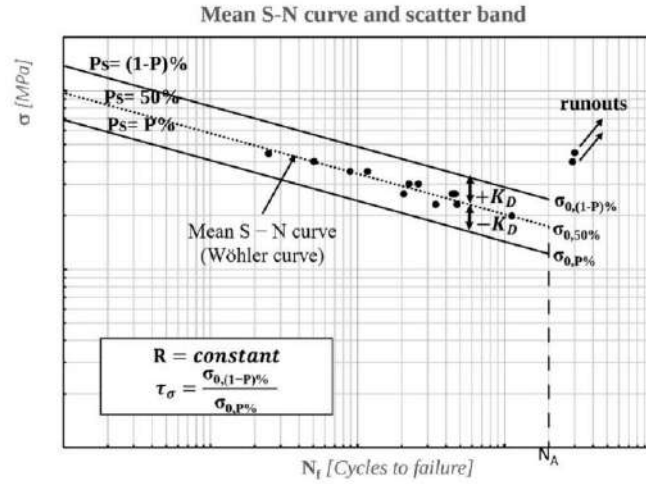
Deneysel ve SEA sonuçlarında eğri uydurma işlemleri yapılmış ve %95 olasılık dağılımlarına göre yeni eğriler oluşturulmuştur. FAT değerleri %95 olasılık değerine göre belirlenmiş olup ayrıca dağılım genişlik değerleri tespit edilmiştir. Literatürde gerilme ve çevrim sayısının dağılım genişlikleri 2 farklı formül ile elde edilerek karşılaştırılmaktadır. Şekil 3.34 (a)'da σ_c ile gösterilen dağılımda gerilme dağılım genişliği Denklem 3.18 ile hesaplanabilmektedir. Burada herhangi bir çevrim sayısından %5 ve %95 olasılık eğrisindeki gerilme değerleri oranlanarak gerilme dağılım genişlik değeri belirlenmektedir ve farklı çevrim değerlerinde de oranlar sabit olmaktadır. Şekil 3.34 (a)'da N_f ile gösterilen dağılımda ise ömür dağılım genişliği Denklem 3.19 ile hesaplanabilmektedir. Bu formüle göre de herhangi bir gerilme aralığı değerinde %5 ve %95 olasılık eğrisindeki çevrim sayıları oranlanarak ömür dağılım genişlik değeri belirlenmektedir. Ayrıca farklı gerilme değerlerinde de bu oranlar sabit olmaktadır (Heim ve Heim 2020).

$$T_\sigma = \frac{\sigma_{\%5}}{\sigma_{\%95}} \quad (3.18)$$

$$T_N = \frac{N_{0.5}}{N_{0.95}} \quad (3.19)$$



(a)



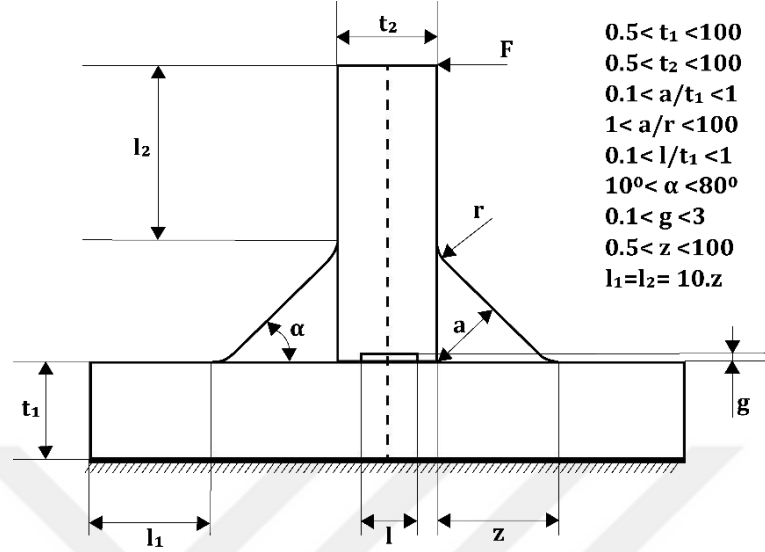
(b)

Şekil 3.34. (a) Gaussian eğrisine göre olasılıksal dağılımlar (b) $\%(1-P)$ ve $\%P$ olasılık dağılımı değerine göre eğriler (Harris 2003; Barbosa ve ark. 2019; Kufoin ve Susmel 2024)

3.6. Kaynaklı Bağlantıların Gerilme Konsantrasyon Faktörü Tahmini için Geliştirilen Yaklaşım

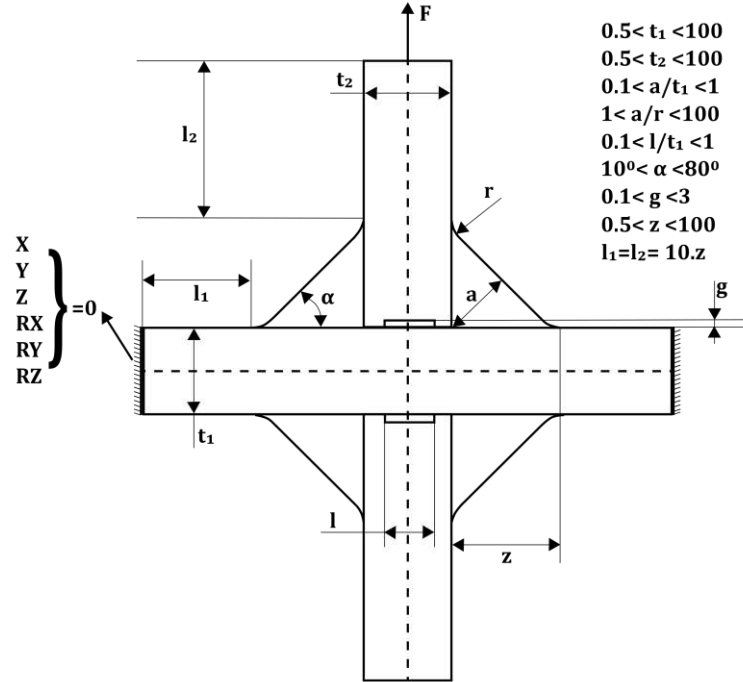
Nümerik analizler için Ansys 2023 R2 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Kaynak ucu gerilmelerini ve SCF değerlerini etkileyecek parametreler tespit edilmiştir. Belirlenen parametrelerin aralıkları tespit edilmiş olup Latin Hiperküp yöntemi olarak adlandırılan yöntem ile eşit veri dağılımı sağlanmıştır. Bu yöntem literatürde birçok çalışmada kullanılmaktadır (Neuhäusler ve Rother 2022). Belirlenen aralıklarla eşit olarak dağıtılan bu veriler girdi olarak bir dosyaya kaydedilmiştir. Latin Hiperküp Yöntemi ile veri hazırlanması için Matlab yazılımı kullanılmıştır. Bu yöntem ile belirlenen aralıklara göre 8500 adet veri dağılımı oluşturulmuştur. Bu veriler için belirlenen parametreler ve parametre aralıkları gösterilmiştir. T ve çift T bağlantılı

kaynaklı bağlantılar için eğilme ve çekme zorlamaları için SCF değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.35’de gösterilen T bağlantılı yapıda sadece eğilme zorlaması durumu için parametrik denklem oluşturulmuştur.

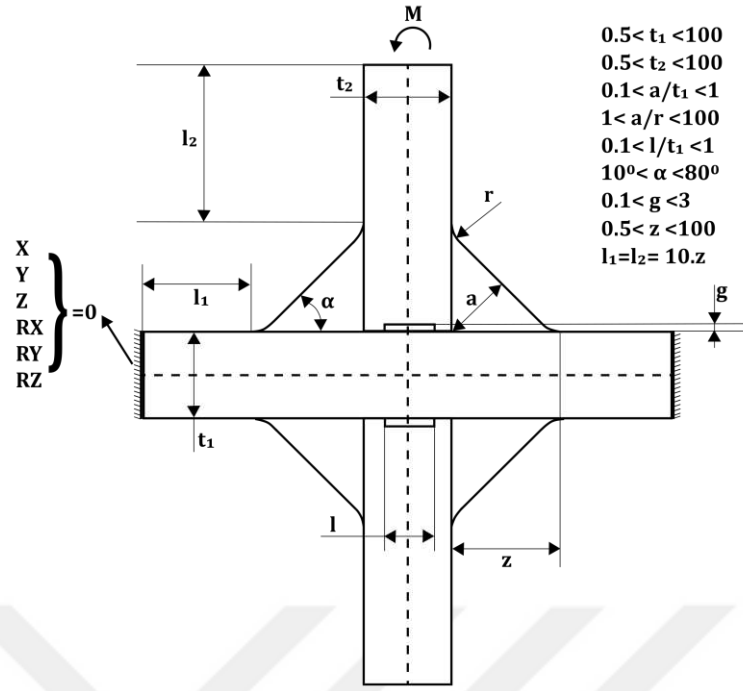


Şekil 3.35. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan kaynaklı bağlantı numunesi

Bu veriler için belirlenen parametreler ve parametre aralıkları Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de gösterilmiştir. Şekil 3.36’de sadece çekme zorlaması gösterilirken Şekil 3.37’de moment zorlaması gösterilmektedir. Her iki durum için de yeni parametrik denklemler tespit edilmiştir.

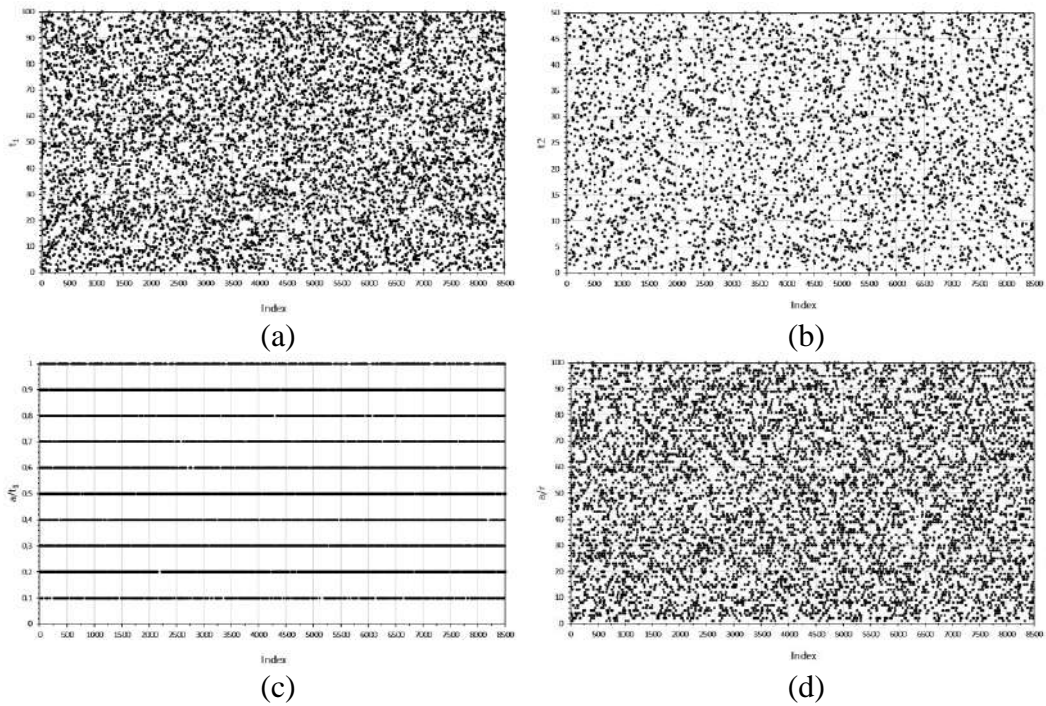


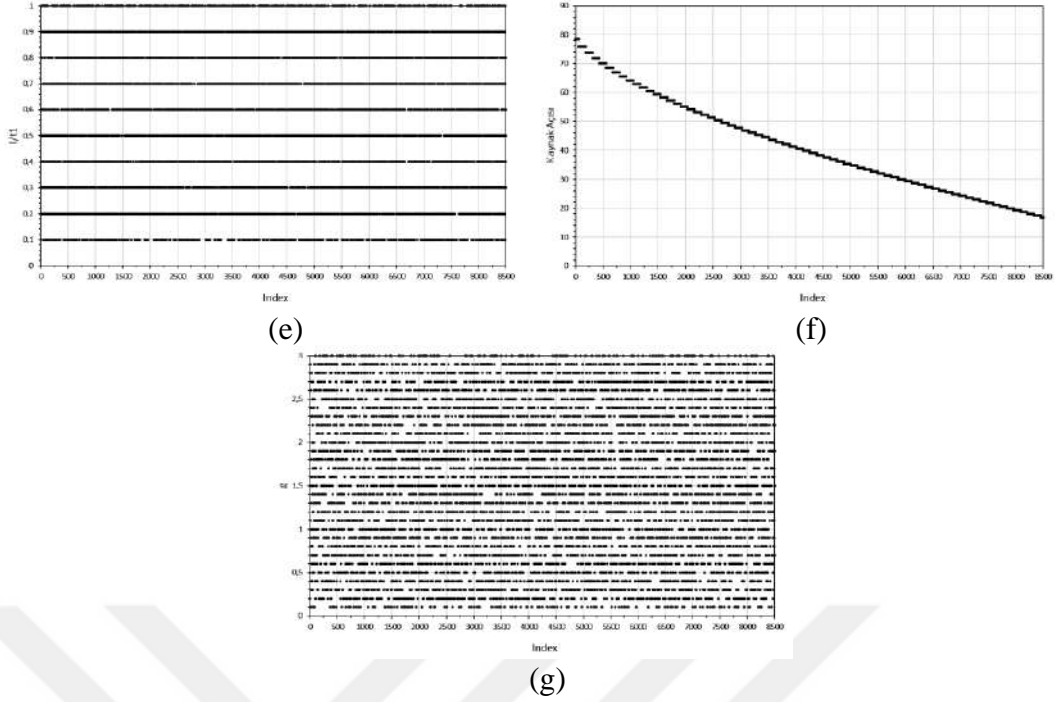
Şekil 3.36. Sonlu elemanlar analizinde çekme yükleme koşulu için oluşturulan çift T kaynaklı bağlantı



Şekil 3.37. Sonlu elemanlar analizinde moment yükleme koşulu için oluşturulan çift T kaynaklı bağlantı

Latin Hiperküp yöntemi kullanılarak geliştirilen kod parçacığı başlatılmadan önce belirlenen parametreler dağıtılmıştır. Şekil 3.44’de kod parçacığı başlatılmadan önce Latin Hiperküp yöntemi ile hazırlanan parametrelerin verileri gösterilmektedir. 8500 tane indeks kaynak açısına göre sıralanmıştır.





Şekil 3.38. Latin hiper küp yöntemi ile dağıtılan parametre verileri (a) $t1$, (b) $t2$, (c) $a/t1$, (d) a/r , (e) $l/t1$, (f) Kaynak açısı, (g) g

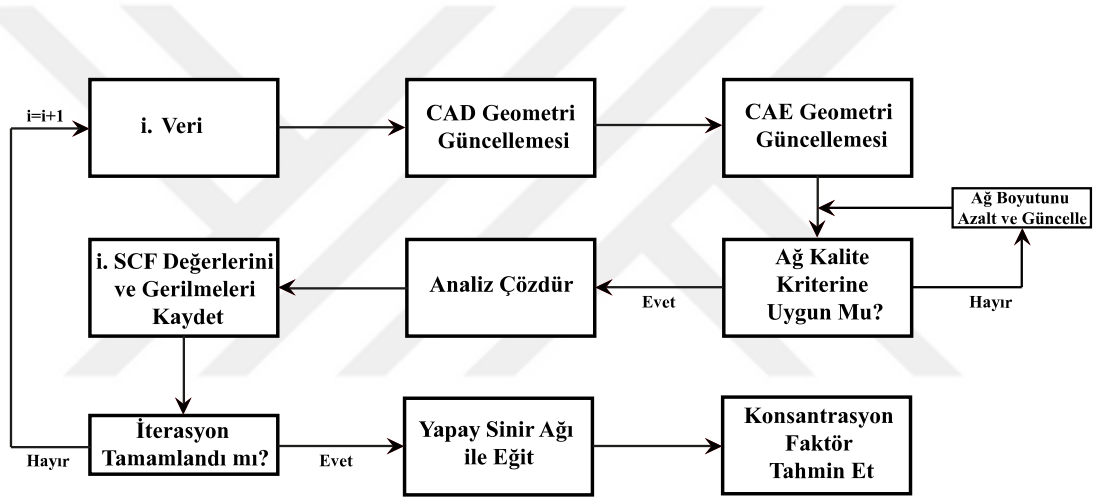
SCF değerleri tespit edilirken nominal gerilme ve maksimum gerilme bölgesi için kaynak ucundaki bölge referans alınmıştır. SCF değeri için Denklem 3.20 kullanılarak belirlenmiştir. Nominal gerilme değeri kaynak ucundan 80 mm ve 100 mm uzaklıktaki noktalara doğru çizilerek bulunmuştur. Bu noktalar parametrelerden minimum seviyede etkilenen noktalardır.

$$SCF = \frac{\sigma_{max,toe}}{\sigma_{nominal}} \quad (3.20)$$

Nümerik analizler için CAD ve CAE yazılımlarını haberleşiren kod parçacığı hazırlanmıştır. Bu kod parçacığı Python programlama dili kullanılarak hazırlanmış ve Ansys Workbench yazılımında bulunan komut penceresi ile yönetilmiştir. Bu komutta CAD ve CAE için hazırlanan yazılımların sırası ile işlem yapması sağlanmıştır. Bu haberleşme ile hazırlanan girdi verilerine göre geometriyi güncellemesi ve SEA'da analiz uygulanması sağlanmıştır. Girdi verileri .txt uzantılı dosya ile haberleştirilerek elde edilmiştir. Böylelikle çok sayıda verinin sırayla analiz yapılması sağlanmaktadır. Hazırlanan bu parametreler CAD yazılımı olan Spaceclaim'de kod parçacığı ile girdi olarak tanımlanmıştır. Geometri tanımlandıktan sonra CAE güncellenip ağ oluşturulmadan önce kriteri sağlamadıysa ağ boyut değerini otomatik azaltmaktadır. Ağ

kriteri eleman kalitesi olarak adlandırılan kritere göre 0.93 belirlenmiş olup bu kriteri sağlayana kadar ağ ölçü değerini 0.1 mm düşürmektedir. Girdi verilerine göre analizler yapılmadan önce ağ yakınsaması yapılmıştır. Ağ sayılarının fazla olduğu ve gerilmenin stabil hale geldiği değer varsayılan ağ olarak tanımlanmıştır. İterasyonlar başladıktan sonra kritere uymazsa bu varsayılan değer ağ boyutu düşürülerek değişmektedir. Ağ kriteri tanımlandıktan sonra nominal gerilme, sıcak nokta gerilme ve etkin çentik gerilme yaklaşımlarına göre kaynak ucu gerilmeler ve SCF değerleri çıktı verisi olarak kaydedilmiştir.

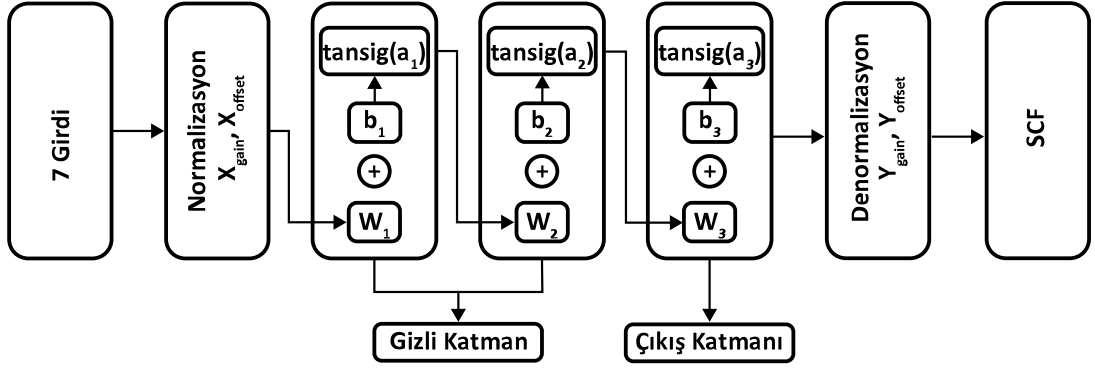
Tam otomatik olarak gerçekleştirilen ve önerilen bu metodun akış şeması Şekil 3.39'de gösterilmektedir. Burada iterasyonlar i olarak tanımlanmış olup son iterasyon, oluşturulan data'lara göre belirlenen i değeri 8500'tür.



Şekil 3.39. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan algoritmanın önerilen iş akış şeması

Girdi verileri 7 adet olup iterasyonların tamamlanması ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Çıktı değeri olarak ise kaynak ucu gerilmesi ile 80 ve 100 mm uzaklıktaki noktalara göre belirlenen nominal gerilme değeridir. Bu gerilmelere göre SCF değerleri tüm veriler için belirlenmiştir. Elde edilen veriler YSA ile eğitim için oluşturulmuştur.

YSA Levenberg-Marquart algoritmasına göre tanımlanmıştır. 7 adet girdi (t_1 , t_2 , l , g , r , a , α), 2 adet gizli katman ve 1 adet çıktı (SCF) tanımlanmıştır. Her gizli katmanda 5 adet nöron bulunmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu ise doğrusal olan Purelin fonksiyonuna göre tanımlanmıştır. Şekil 3.40'da yapay sinir ağında kullanılan katmanların şematik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.40. SCF eğitimi için kullanılan yapay sinir ağının şematik yapısı

Matlab yapay sinir ağı aracı ile gerçekleştirilen eğitim ileri beslemeli ve geri yayımlı olarak uygulanmıştır. Katman sayıları ve diğer parametreler birçok deneme neticesinde, daha düşük hata orana sahip olduğu için seçilmiştir. Tüm tanımlamalar eğitim tamamlandıktan sonra bias (b_i) ve ağırlık matrislerini (W_i) elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Girdi değerleri 1 ve -1 arasında normalize edilmiş olup çıktı tahmin edilirken denormalize edilmektedir. Ayrıca normalize ve denormalize işlemi için X_{gain} , X_{offset} , Y_{gain} ve Y_{offset} matrisleri tespit edilmiştir. Böylelikle YSA eğitimi ile yeni bir SCF parametrik formül amaçlanmıştır. Tüm eğitimler tamamlandıktan ve belirtilen matrisler elde edildikten sonra SCF tahmini için kullanılan formül Denklem 3.21-3.24'te verilmektedir.

$$a_1 = b_1 + w_1 \cdot (\text{input} \cdot X_{gain} + X_{offset}) \quad (3.21)$$

$$a_2 = b_2 + w_2 \cdot \text{tansig}(a_1) \quad (3.22)$$

$$a_3 = b_3 + w_3 \cdot \text{tansig}(a_2) \quad (3.23)$$

$$SCF = \text{purelin}(a_3) \cdot Y_{gain} + Y_{offset} \quad (3.24)$$

Tüm veriler için YSA eğitim neticesinde tespit edilen parametrik formüle göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar için elde edilen ortalama hata oranı Denklem 3.25'de verilen denkleme göre bulunmuştur. Ayrıca istatistiksel verilerin karşılaştırılması için ortalama hataların karelerinin kökü (RMSE) Denklem 3.26'de, korelasyon katsayıları ise Denklem 3.27'de verilmiştir.

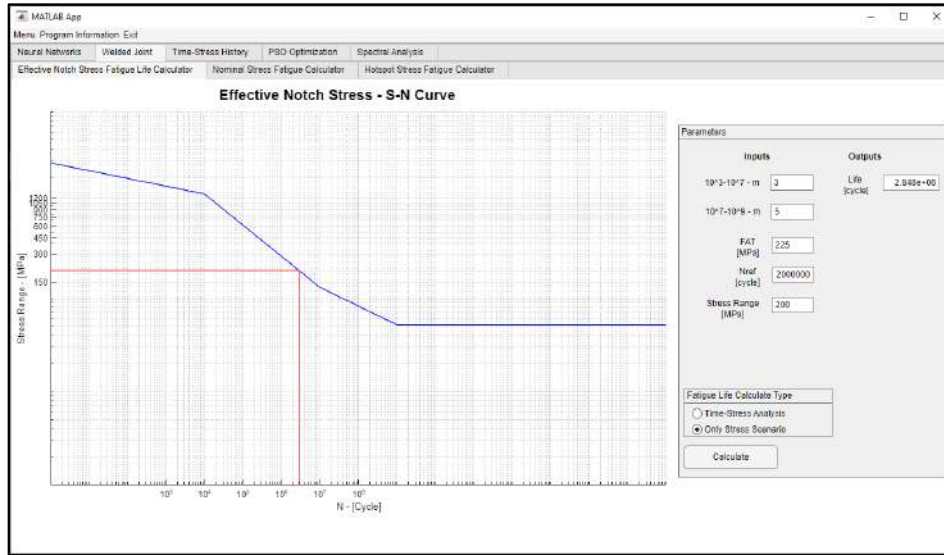
$$error_{rate} = \frac{SCF_{estimation} - SCF_{FEA}}{SCF_{FEA}} \quad (3.25)$$

$$RMSE = \left((1/p) \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad (3.26)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2} \right) \quad (3.27)$$

3.7. Yorulma Ömür Tahmini, Yapay Sinir Ağı ve Termal Analizler için Geliştirilen Yazılım Arayüzleri

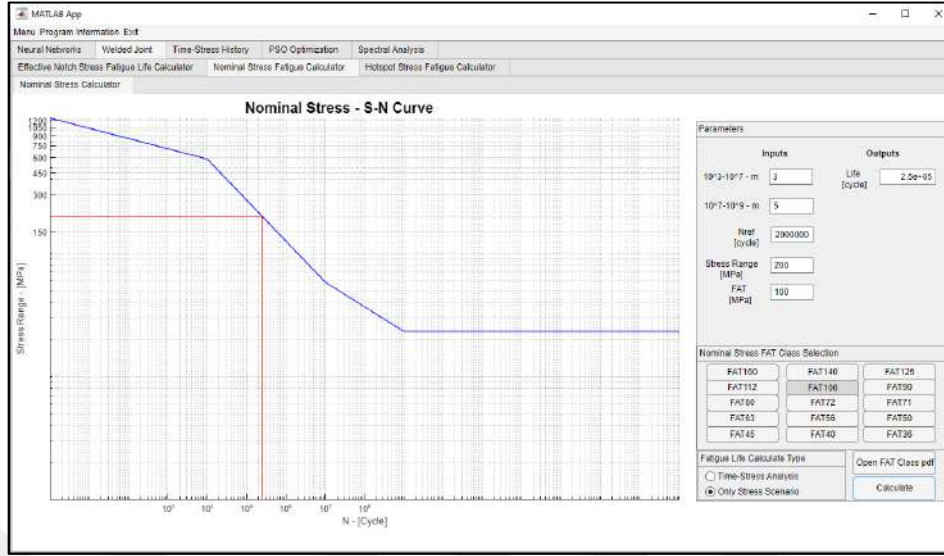
Kaynaklı bağlantıların yorulma ömür tahminleri için etkin çentik, sıcak nokta ve nominal gerilme metotlarına göre yazılım arayüzleri hazırlanmıştır. Bu yazılım arayüzlerinde zamana bağlı ve gerilme tabanlı yorulma ömür tahminleri yapılabilmektedir. Ayrıca zamana bağlı veriler yazılım arayüzü vasıtasıyla için yağmur akış metoduna göre çevrim sayıları tespit edilebilmektedir. Şekil 3.41’de etkin çentik gerilme yaklaşımı için hazırlanan yazılım arayüzü gösterilmektedir. Bu yazılım arayüzü ile SEA gerilme değerlerinin sonuçları girilerek yorulma ömür tahmini yapılabilmektedir.



Şekil 3.41. Etkin çentik gerilme metodu gerilme senaryosu için arayüz

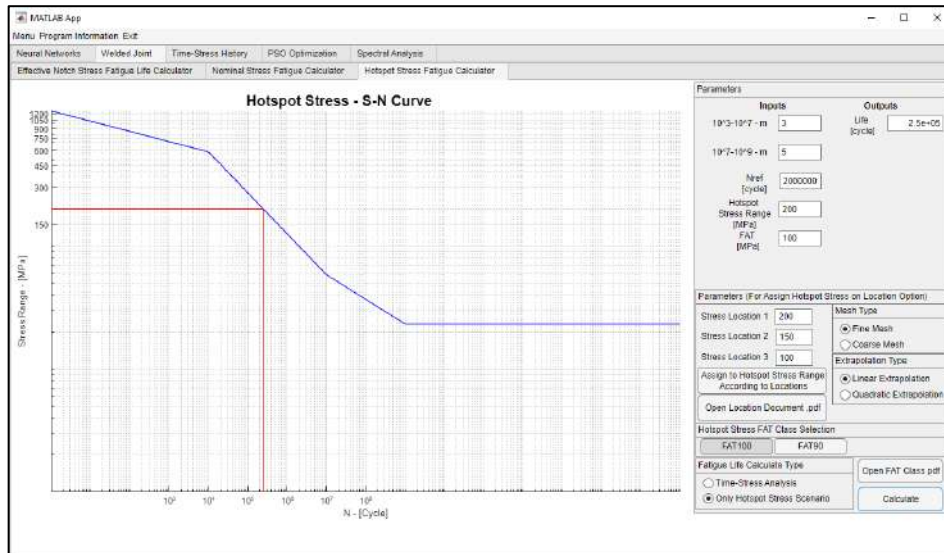
Yazılım arayüzünde FAT değeri 225 olarak tanımlanmış olup arayüzde değişken hale getirilmiştir. Bu yaklaşımda numerik analizlerde 1 mm kaynak ucu modellenerek elde edilen kaynak ucu gerilmeleri arayüzde girilerek pratik olarak yorulma ömür

tahminleri elde edilmektedir. Şekil 3.42’de nominal gerilme yaklaşımı için hazırlanan yazılım arayüzü gösterilmektedir.



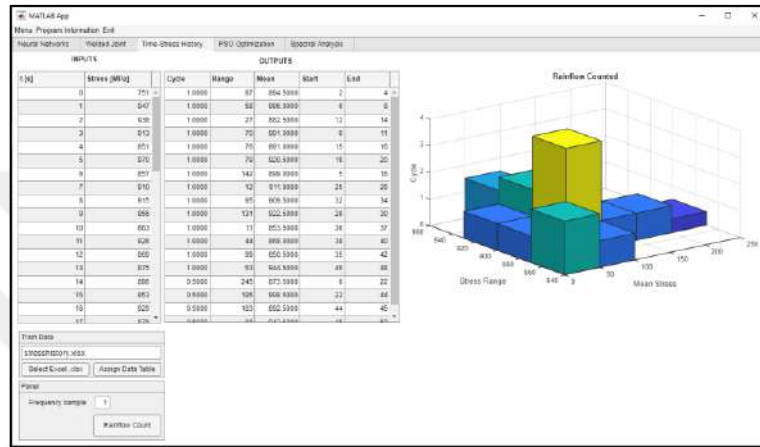
Şekil 3.42. Nominal gerilme metodu gerilme senaryosu için arayüz

Nominal gerilme yaklaşımı için hazırlanan yazılım arayüzünde 15 adet FAT değeri tanımlanmıştır. Kaynak türü, biçimi, tasarımı ve işlemlerine göre doküman eklenerek kullanıcının seçim yapması sağlanmış ve nominal gerilme yaklaşımına göre yorulma ömür tahminleri pratik olarak elde edilmektedir. Şekil 3.43’de sıcak nokta gerilme yaklaşımına göre hazırlanan yazılım arayüzü gösterilmektedir.



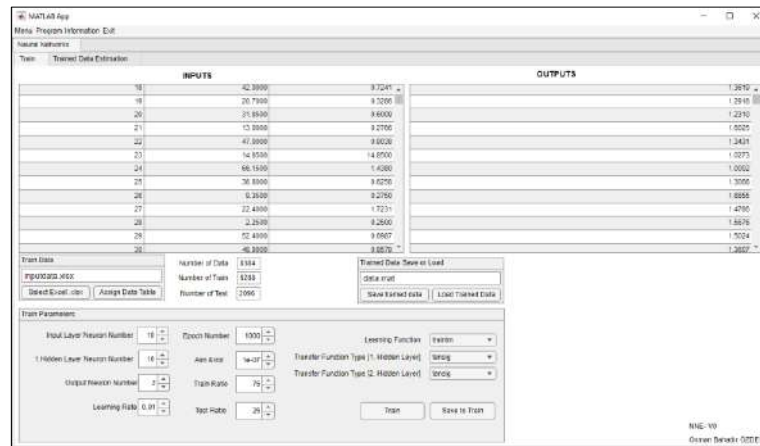
Şekil 3.43. Sıcak nokta gerilme metodu gerilme senaryosu için arayüz

Sıcak nokta gerilme yaklaşımına göre hazırlanan arayüzde FAT 100 ve FAT 90 yorulma sınıflarına göre seçimler yapılabilmektedir. Doğrusal ve kuadratik ekstrapolasyon seçenekleri eklenmiş ve numerik analiz çıktılarından yorulma ömürleri pratik olarak elde edilmektedir. Tüm yazılım arayüzlerinde zamana bağlı elde edilen verilere göre de tanımlamalar yapılmıştır. Değişken zorlamalar altında elde edilen veriler olduğu zaman Miner kuralı ve Yağmur damlacığı kuralına göre ortalama gerilme, gerilme aralığı ve çevrimleri elde edilebilmektedir. Şekil 3.44'de değişken zorlamalar için hazırlanan yazılım arayüzü gösterilmektedir.



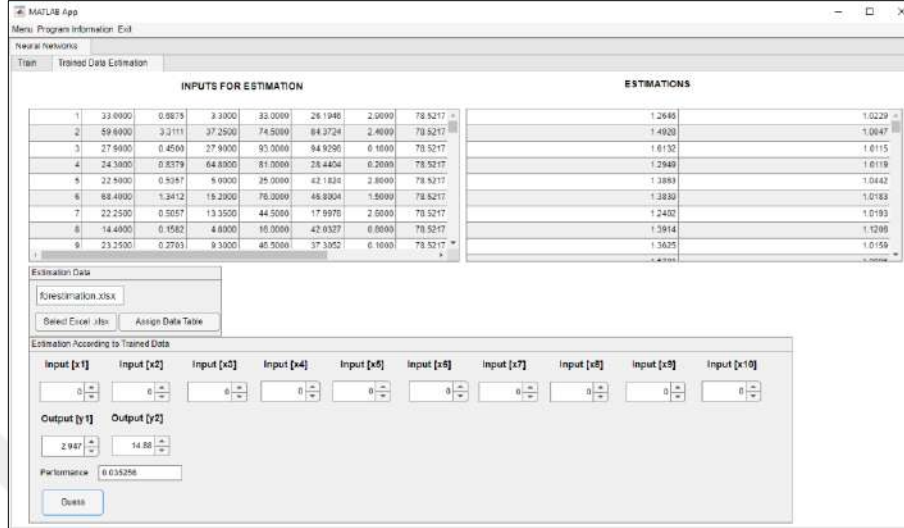
Şekil 3.44. Zamana bağlı veriler için yağmur akış metodu için arayüz

Gerilme konsantrasyon faktörü için girdi ve çıktı parametrelerinin tanımlandığı bir yapay sinir ağı yazılım arayüzü hazırlanmıştır. Bu arayüzde girdi, gizli, çıktı katman sayıları tanımlanabilmektedir. Amaç fonksiyonu değişken tanımlanmış ve gerilme konsantrasyon faktör eğitimleri için Purelin amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 3.45'de yapay sinir ağına eğitmeden önce hazırlanan yazılım arayüzünde gösterilmektedir.



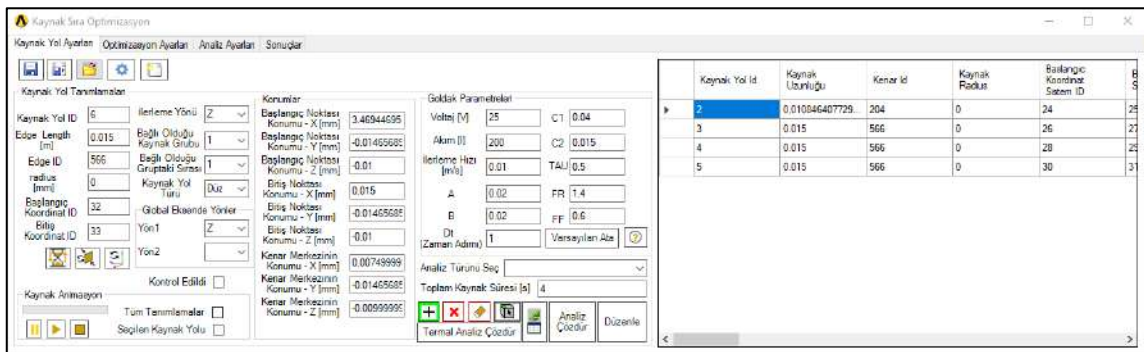
Şekil 3.45. Yapay sinir ağı girdi parametre arayüzü

Yapay sinir ağı eğitildikten sonra çıktılarının değerlendirilebilmesi için de bir yazılım arayüzü hazırlanmıştır. Burada bias ve ağırlık matrislerine göre elde edilen parametrik denklemlerin çıktıları gösterilmektedir. Şekil 3.46'de yapay sinir ağı çıktıları için hazırlanan yazılım arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.46. Yapay sinir ağı çıktı parametre arayüzü

Numerik analizlerde termal analizler için arayüz hazırlanmıştır. Bu arayüzde kaynak yolları veri tabanına eklenebilmekte ve farklı uzantıda kaydedilip açılabilir. Bu yazılım arayüzünde kalıntı gerilme değerlerinin tespiti için pratik bir şekilde Goldak modeli kullanılarak analizler gerçekleştirmek için hazırlanmıştır. Şekil 3.47'te termal analizler için hazırlanan yazılım arayüzü gösterilmektedir. Vb.Net programlama dili ile Python kütüphanesi ve APDL kodları kullanılarak hazırlanmıştır. Goldak modeli APDL kodları ile tanımlanmaktadır. Program veri tabanında belirlenen kaynak yol sıralarına göre Ansys Mechanical programında APDL kodu oluşturmaktadır.



Şekil 3.47. Termal analizler için geliştirilen arayüz

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

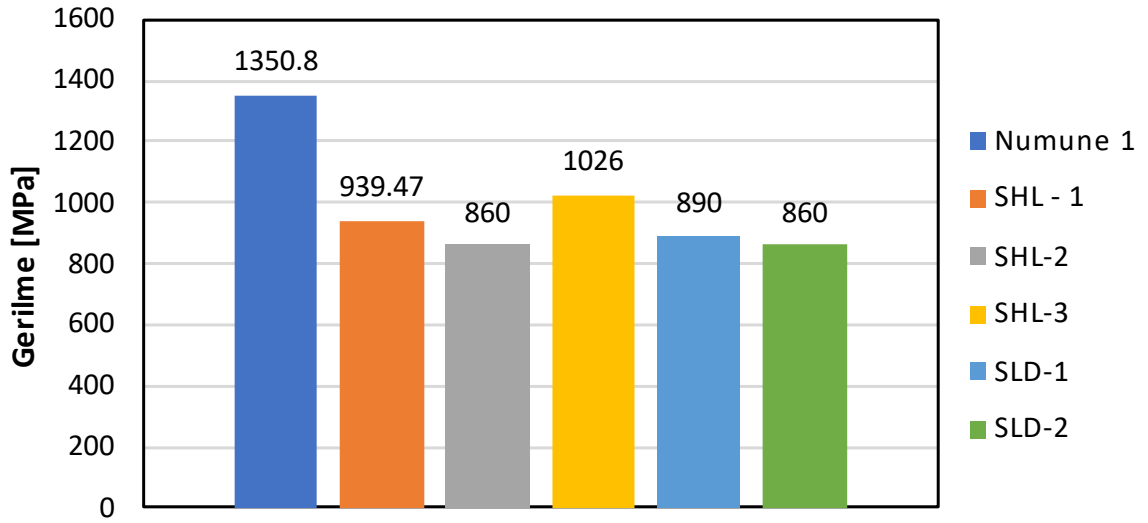
Kaynaklı bağlantıların gerilme büyütme faktörleri ve sıcak nokta gerilme metodu için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar 4.1 başlığı altında verilmektedir. Bu çalışmada zamana bağlı olarak veriler alınmış fakat incelemeler anlık olarak gerçekleştirilmiştir. Doğal frekansın, öngerilmenin ve farklı kaynak parametrelerin etkisini incelemek için modal testler ve nümerik analizler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Gerilme konsantrasyon faktörleri için ise 3 farklı yapıda, 2 farklı zorlama türünde yapay sinir ağı ile belirlenen parametrik denklem sonuçları başlı 4.3'te verilmiştir. Yorulma testleri neticesinde elde edilen 36 farklı S-N eğrisinin sonuçları da başlık 4.4 altında verilmektedir.

4.1. Statik Testlerin ve Nümerik Analizlerin Sonuçları

Anlık gerinim ölçer sensörü verileri ile nümerik analiz modelleme teknikleri karşılaştırılmıştır. Sıcak nokta gerilme yöntemi kullanılarak modelleme tekniklerinin doğruluk oranları belirlenmiştir. Bu yöntem çerçevesinde, doğrusal ekstrapolasyon ve kuadratik ekstrapolasyon formülasyonları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı gerilme değerlerine göre gerilme büyütme faktörlerinin sonuçları elde edilmiştir.

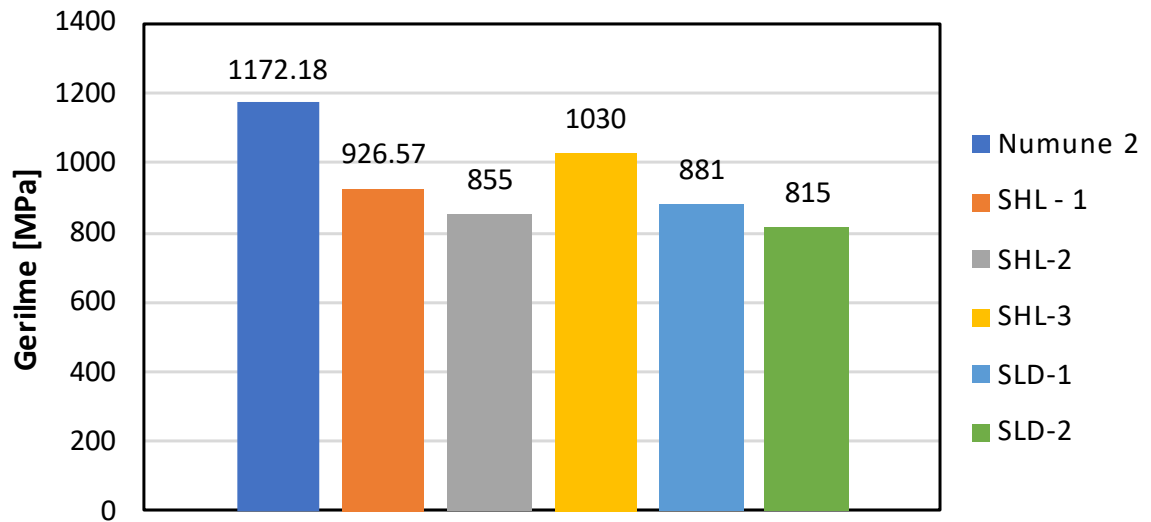
4.1.1. Doğrusal Ekstrapolasyona Göre Sonuçlar

Yapılan deneyler neticesinde kaynak kopması numune 1'de 11138 N, numune 2'de 16516 N kuvvet değerlerinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.1'de Denklem 3.2 için numune 1'e göre en yakın sonuçları SHL-3 ve SHL-1 modellemeleri olmuştur. SHL-3 için doğruluk oranı %68.34, SHL-1 için ise %56.22 bulunmuştur.



Şekil 4.1. Doğrusal ekstrapolasyona göre Numune 1 sonuçları

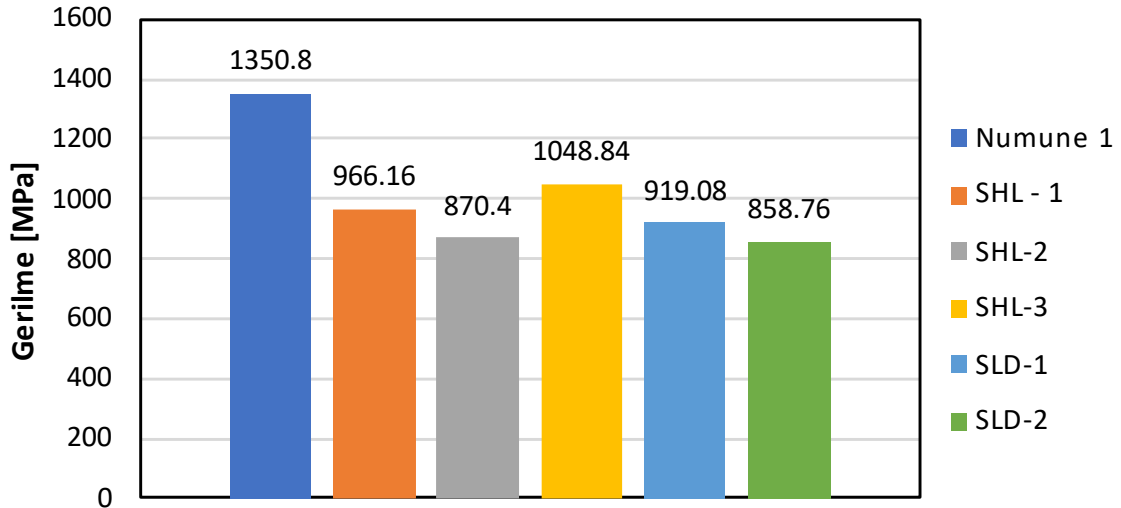
Şekil 4.2’de Denklem 3.2 için numune 2’e göre en yakın sonuçları SHL-3 ve SHL-1 modellemelerinin olduğu görülmektedir. SHL-3 için doğruluk oranı %86.20, SHL-1 için ise %73.49 bulunmuştur.



Şekil 4.2. Doğrusal ekstrapolasyona göre Numune 2 sonuçları

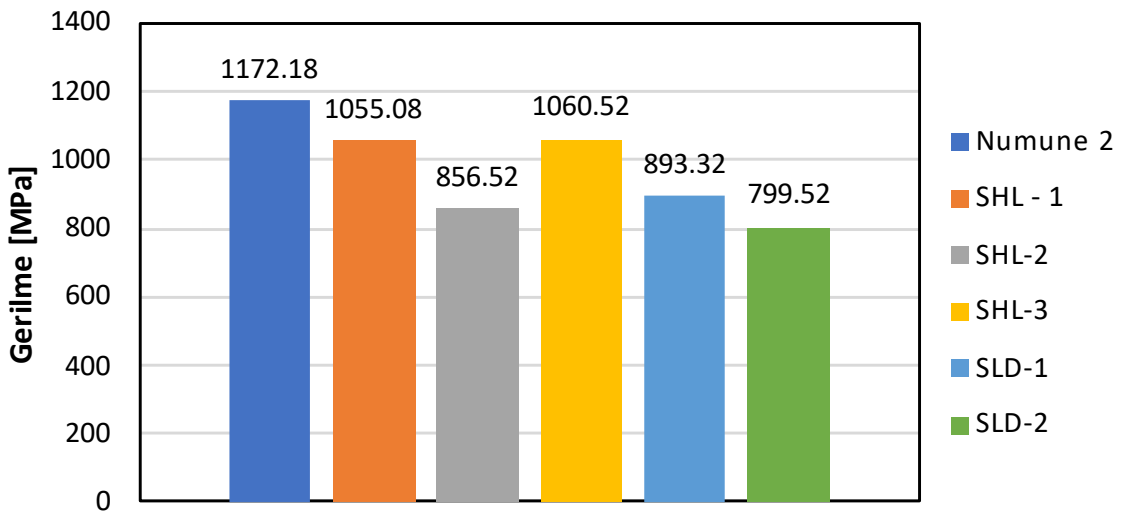
4.1.2. Kuadratik Ekstrapolasyona Göre Sonuçlar

Şekil 4.3’te Denklem 3.3 için numune 1’e göre en yakın sonuçları SHL-3 ve SHL-1 modellemelerinin olduğu görülmektedir. SHL-3 için doğruluk oranı %71.21, SHL-1 için ise %60.19 bulunmuştur.



Şekil 4.3. Kuadratik ekstrapolasyona göre Numune 1 sonuçları

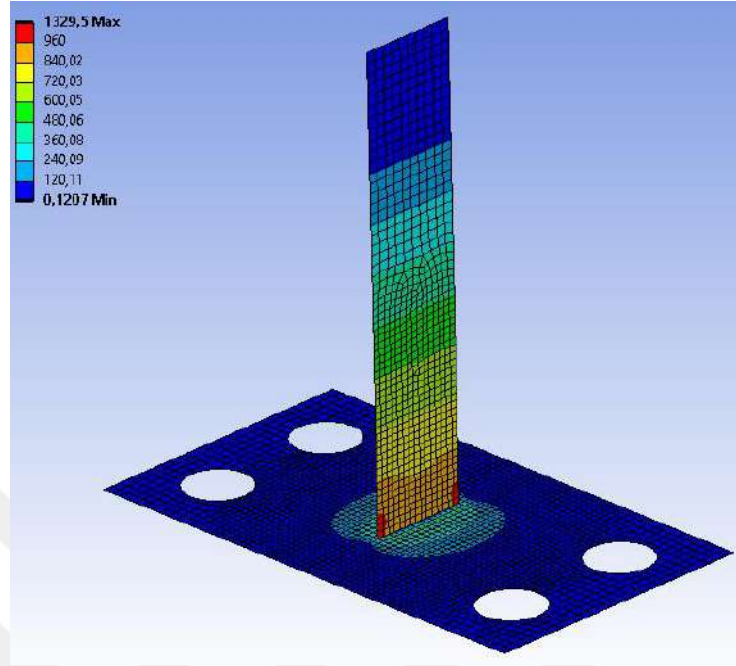
Şekil 4.4'te Denklem 3.3 için numune 2'ye göre en yakın sonuçları SHL-3 ve SHL-1 modellemeleri olmaktadır. SHL-3 için doğruluk oranı %89.47, SHL-1 için ise %88.90 bulunmuştur.



Şekil 4.4. Kuadratik ekstrapolasyona göre Numune 2 sonuçları

Uygulanan tahribatlı test sonuçlarına göre çekme dayanımlarının 1172 MPa'nın üzerinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.5 (a) SHL-3 FEM kaynaklı birleştirme modelleme yaklaşımına ve Şekil 4.5 (b) test sonuçlarına göre %89.47 doğrulukla 2. numune için kırılma anı ve test numunesi Şekil 4.5'da gösterilmektedir. Literatürde dinamik analiz olarak yapılan bir çalışmada (Büyükbayram vd., 2015) SHL-2 modelinin yaklaşık %88 doğruluk oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada SHL-3, kaynak modellemede paylaşım topolojisi adı verilen bir bağ ile iş parçasının kenarından ana

malzemenin yüzeyine birleştirilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmaya göre farkın dinamik yükleme ve bağ türünden kaynaklandığı düşünülmektedir.



(a)



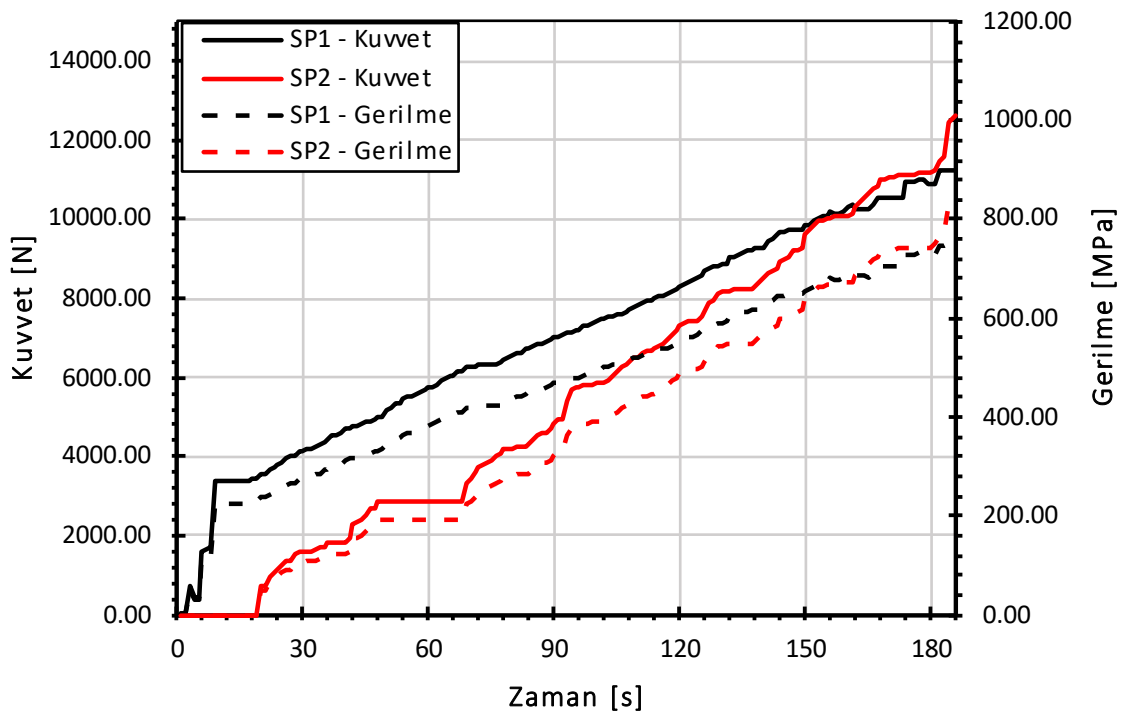
(b)

Şekil 4.5. Kırılma anı (a) SEM analizi (b) Deneysel çalışma

Yüksek moment ve aksenal yüklere sahip yapıların FEM analizlerinde, yapısal güvenliğin sağlanması için kaynaklı birleştirme modelleme tipinin seçimine özellikle dikkat edilmelidir. Bu çalışma sonucunda, statik analizler için kuadratik ekstrapolasyon gerçekleştirilen SHL-3 modellemesi önerilmiştir.

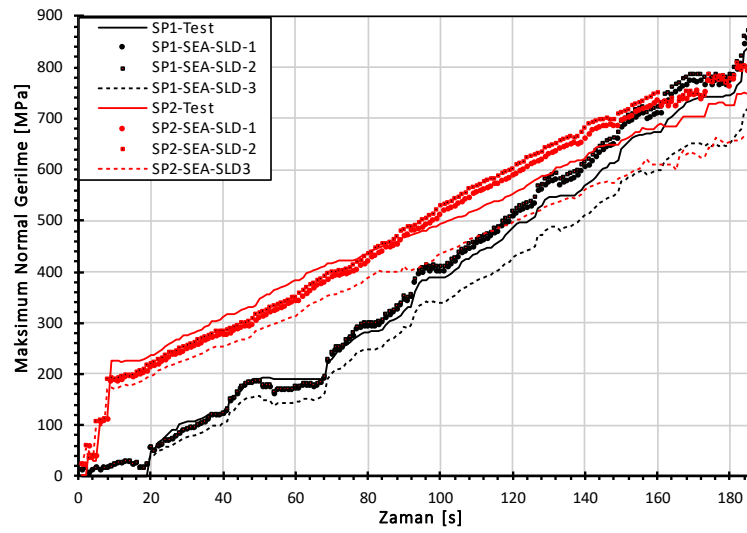
4.1.3. Statik Durum için Elde Edilen Gerilme Büyütme Faktörünün Değişimi

Deney düzeneğine SP1 ve SP2 numuneleri bağlanmış hidrolik silindir ile kuvvet uygulanmıştır. Numuneler kırılana kadar kuvvet artırılmıştır. Gerinim ölçer ve yük hücre sensor verileri zamana bağlı olarak alınmıştır. SP1’de maksimum kuvvet 11225.24 N, SP2’de 12620.48 N kuvvet değerlerinde parça hasara uğramıştır. Gerinim ölçer sensörüne göre alınan verilere göre maksimum normal gerilme SP1’de 748.35 MPa, SP2’de 841.37 MPa elde edilmiştir. Şekil 4.6’de hasara uğrayana kadar gerçekleştirilen deneysel çalışmanın kuvvet ve normal gerilme sonuçları gösterilmektedir.

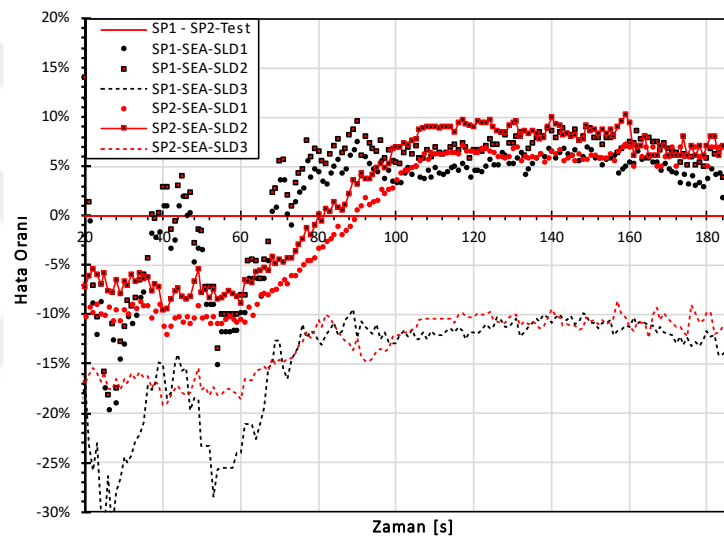


Şekil 4.6. Uygulanan kuvvet ve normal gerilme

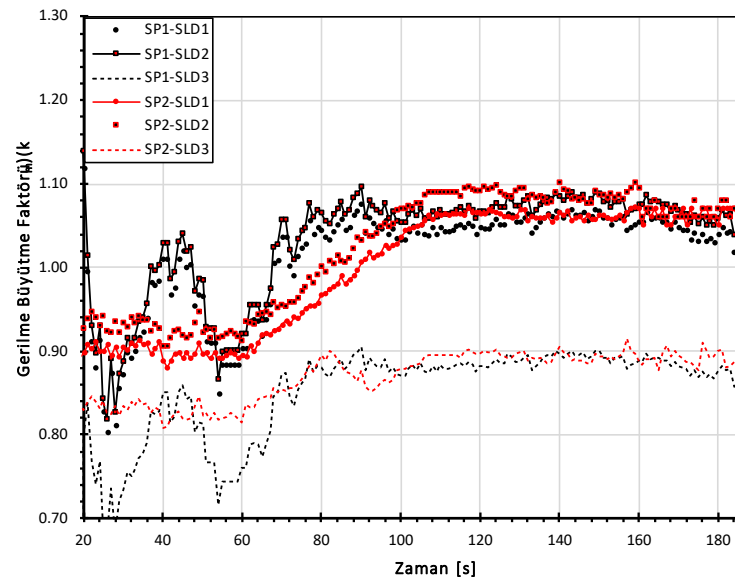
DeneySEL çalışmalar tamamlandıktan sonra elde edilen zamana bağlı kuvvet verileri SEA kuvvet girdisi olarak tanımlanmıştır. SP1 ve SP2 için ayrı geometriler hazırlanmış ve her iki numune içinde SLD-1, SLD-2 ve SLD-3 olarak modellemeler gerçekleştirilerek SP1 ve SP2’ye ait olan kuvvet değerleri tanımlanmıştır. Şekil 4.7 (a)’da SEA analizleri sonucunda deneysel çalışmalar ile zamana bağlı maksimum normal gerilme değerleri karşılaştırılmaktadır. Şekil 4.7 (b), (c), (d)’de ise hata oranları ve gerilme büyütme faktörleri gösterilmektedir.



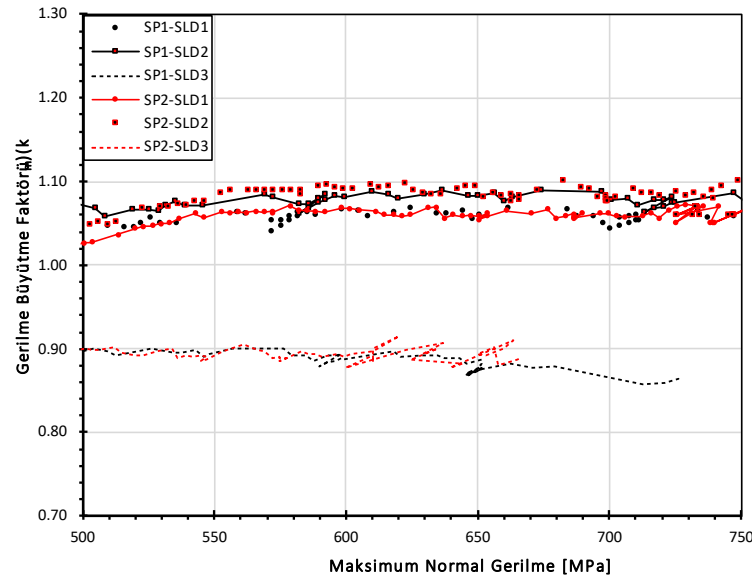
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.7. Uygulanan nümerik ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması (a) maksimum asal gerilme (b) hata oranı (c) gerilme büyütme faktörü (d) 500 MPa altı gerilme büyütme faktörleri

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, 500 MPa'nın üzerindeki gerilmeler için gerilme büyütme katsayıları; SLD-1 modelinde SP1 için 1.05, SP2 için 1.05, SLD-2 modelinde ise SP1 için 1.07 ve SP2 için 1.09 olarak belirlenmiştir. 500 MPa altındaki gerilmeler için değişkenlik göstermekte ve stabil sonuçlar oluşmamaktadır. Bu nedenle ultra yüksek mukavemetli çeliklerin dinamik olarak zorlama durumu incelenirken 500 MPa altındaki gerilmeler dikkatlice incelenmelidir. Bu durumda SLD-1 modeli için 0.9 ve 1.10 arasında gerilme büyütme katsayıları tercih edilebilir. SLD-2 modeli için ise tekil gerilmelerinden dolayı belirsizlikler olabilmektedir. Kaynak ucuna yarıçap oluşturularak incelenmesi tekil gerilmelerini azaltarak ve gerilme büyütme katsayıları kullanılarak daha doğru sonuç vermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde SLD-3 modelinin deneysel çalışmaların sonuçlarına yakın olmadığı görülmektedir. SLD-3 modeli kullanılması durumunda Şekil 4.7 belirtilen gerilme büyütme katsayıları kullanılabilir fakat bu model önerilmemektedir.

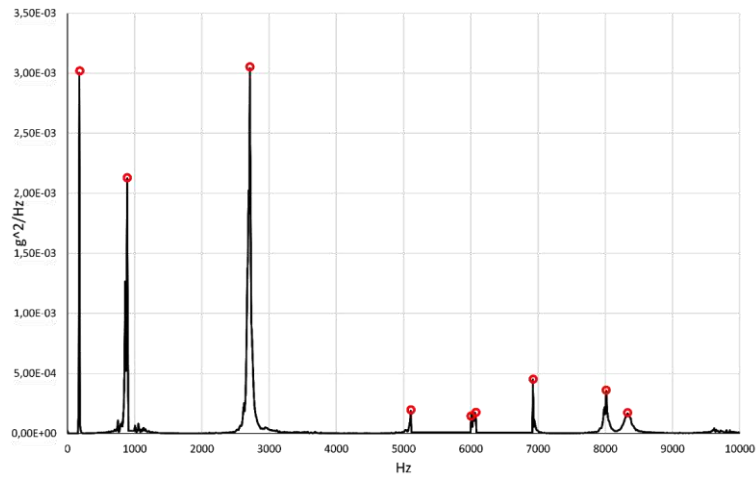
4.2. Kaynak Parametrelerinin Doğal Frekansa Etkileri için Gerçekleştirilen Testlerin ve Nümerik Analizlerin Sonuçları

Kaynaklı bağlantıların öngerilmeli ve öngerilmemiş durumlarındaki davranış farklılıkları, 3 farklı test gerçekleştirilerek nümerik analizlerle karşılaştırılmıştır. Kaynak parametrelerinin doğal frekans üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla ise 39 adet

numune hazırlanmış ve 13 farklı kaynak parametresi kullanılarak bu numuneler üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

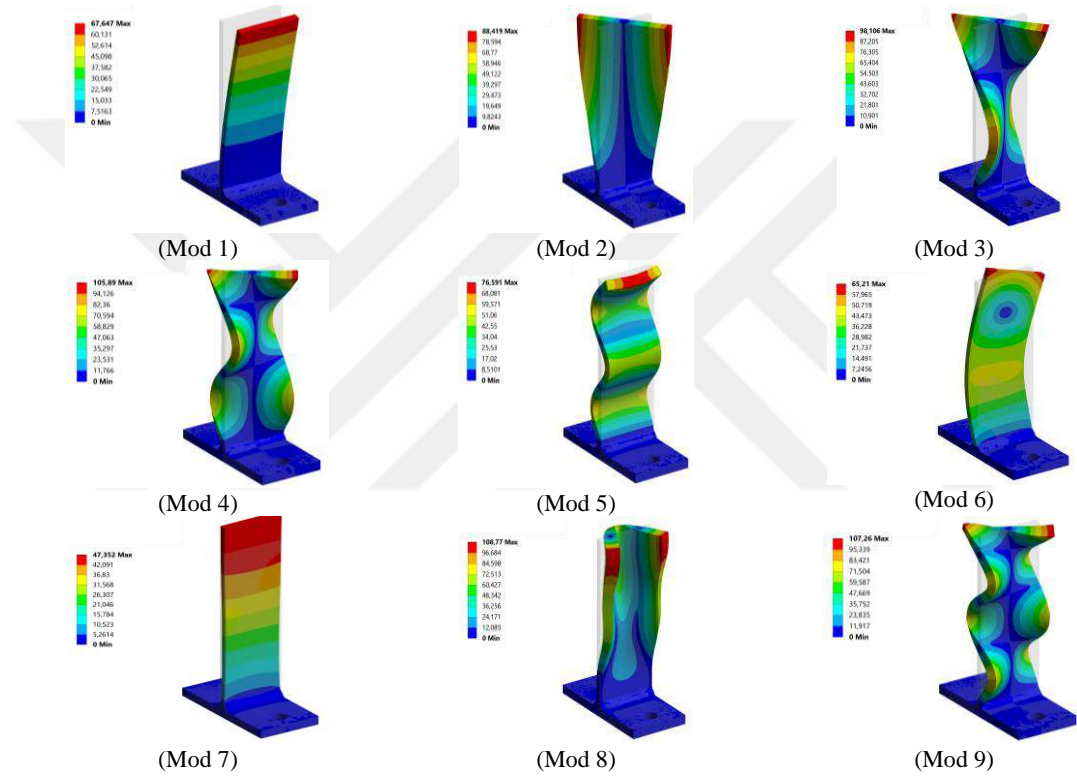
4.2.1. Kalıntı Gerilme Etkisinin İncelenmesi için Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Modal test çalışmalarında çekiç ile numunenin modları tahrik edilmiş olup ivme değerleri veri toplama kartı ile alınarak yazılıma aktarılmıştır. Yazılımda FFT dönüşümü yapılarak pik yapan frekans değerleri tespit edilmiştir. Rezonans frekansı olarak adlandırılan bu frekans değerleri zorlayıcı frekans değerleri o değere yaklaşıncaya ivme genlikleri pik yapmaktadır. Modal test çalışmalarında, numunenin modları çekiçle çakılmış ve ivme değerleri veri toplama kartı ile alınarak yazılıma aktarılmıştır. Yazılımda FFT dönüşümü yapılarak tepe frekans değerleri belirlenmiştir. Rezonans frekansları olarak da adlandırılan bu frekans değerleri, zorlama frekans değerleri o değere yaklaştığında tepe yapmaktadır. 3 numune ve 27 vuruşla yapılan modal testler sonucunda her numune için ortalama grafikler elde edilmiştir. Çekiç darbesiyle elde edilen değerler arasında saçılmaların olduğu görülmektedir. Bu saçılmaların nedeni, vuruşun farklı kuvvetler, çevre koşulları vb. nedeniyle oluşmasıdır. Ancak saçılma oluşsa bile doğal frekans değerleri birbirine çok yakındır. 3 numuneyle yapılan modal test sonucunda FFT dönüşümü ile elde edilen FRF sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Modal testler uygulandıktan sonra belirtilen modelleme teknikleri kullanılarak SEA yapılmıştır. Deneysel ve SEA çalışmaları tamamlandıktan sonra karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda her mod için farklı doğruluk oranları elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Modal test FFT dönüşümü ile elde edilen sonuçlar

Her modda farklı doğal frekans değerleri ve mod şekilleri meydana gelir. Şekil 4.9, sonlu elemanlar analiz ile CMM modelinin 9 moda kadar mod şekillerini göstermektedir. Deformasyon miktarları ölçeklenmiş olup bu çalışma da sadece doğal frekans değerleri incelenmiştir. Modlarda, 3 eksende dönme eksenleriyle birlikte 6 serbestlik derecesine kadar şekiller görülmektedir. Tüm modelleme tekniklerinde de aynı mod şekilleri tespit edilmekte yalnızca deformasyon miktarları farklıdır. Ancak, tüm modellerde, her moddaki doğal frekans değerleri farklıdır. Bu yüzden sadece doğal frekans değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.9. 9 moda kadar modal analiz sonucu mod şekilleri

Modal testler uygulandıktan sonra belirtilen modelleme teknikleri kullanılarak SEA gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve SEA çalışmaları tamamlandıktan sonra karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma neticesinde her mod için farklı doğruluk oranları elde edilmiştir. 1. mod için hata oranı %1.05 ile SLD-1 modeli, 2.mod için %1.85 ile SLD-1 modeli, 3. mod için %1.48 hata oranı ile SHL-3 modeli, 4.mod için hata oranı %0.03 ile SLD-1 modeli, 5.mod için hata oranı %0.39 ile SHL-3 modeli, 6.mod için hata oranı %1.1 ile SHL-3 modeli, 7.mod için hata oranı %1.46 ile SHL-2 modeli, 8.mod için hata oranı %0.62 ile SHL-3 modeli ve 9.mod için hata oranı %1.31 ile SHL-3

modellerinin daha doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de 9 moda kadar olan SEA ve deneysel çalışmalar karşılaştırılarak hata oranları verilmektedir.

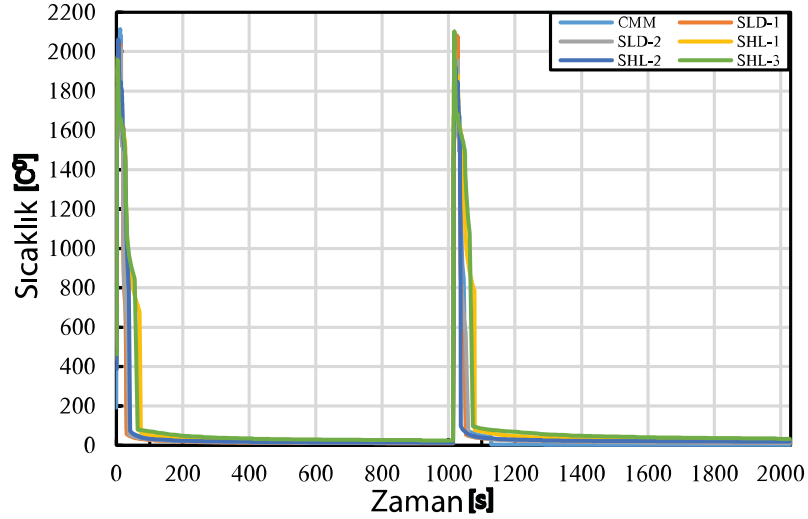
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarla öngerilmemiş SEA modelleme tekniklerinin (SHL-1,2,3, SLD-1,2, CMM) ortalama hata oranları

Mod	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	Ortalama Hata [%]
Test. [Hz]	175.78	888.67	2714.84	5107.42	6005.86	6074.42	6923.83	8007.81	8349.61	0
SLD 1 [Hz]	177.65	872.53	2772.40	5106.00	6144.60	6230.70	6756.60	8062.10	8190.30	
Hata oranı [%]	-1.05	1.85	-2.08	0.03	-2.26	-2.51	2.48	-0.67	1.95	1.652
SLD 2 [Hz]	177.64	872.49	2772.30	5105.70	6144.60	6231.30	6756.50	8061.60	8190.10	
Hata oranı [%]	-1.05	1.85	-2.07	0.03	-2.26	-2.52	2.48	-0.67	1.95	1.653
SHL 1 [Hz]	158.04	819.34	2595.30	4752.40	6034.00	6179.00	6771.00	7471.10	8065.20	
Hata oranı [%]	11.23	8.46	4.61	7.47	-0.47	-1.69	2.26	7.18	3.53	5.210
SHL 2 [Hz]	177.95	874.61	2781.50	5131.10	6188.10	6208.40	6823.90	8123.90	8277.80	
Hata oranı [%]	-1.22	1.61	-2.40	-0.46	-2.95	-2.16	1.46	-1.43	0.87	1.617
SHL 3 [Hz]	177.77	868.37	2755.50	5060.90	5982.50	6008.10	6806.40	7958.60	8241.60	
Hata oranı [%]	-1.12	2.34	-1.48	0.92	0.39	1.10	1.73	0.62	1.31	1.222
CMM [%]	175.87	878.80	2744.68	5054.94	6083.15	6168.39	6689.03	7981.48	8108.40	
Hata oranı [%]	-0.05	1.12	-1.09	1.04	-1.27	-1.52	3.51	0.33	2.97	1.435

Elde edilen karşılaştırmalar sonucunda beklendiği gibi CMM modelinin modal teste en yakın sonucu verdiği tespit edilmiştir. SLD-1 modelinin düşük frekans modları için daha doğru sonuçlar verdiği, SHL-3 modellemesinin ise 5107.42 Hz üzeri frekans değerleri için daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

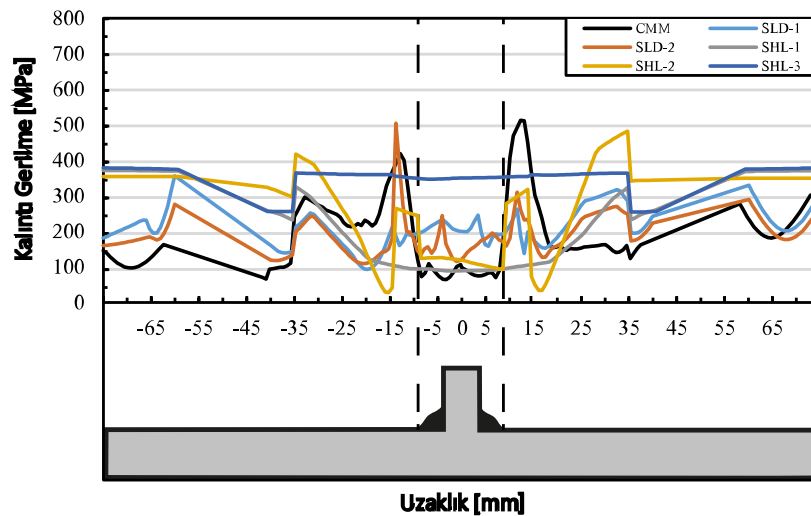
Öngerilmeli doğal frekans analizleri için Goldak modeli kullanılarak termal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler, Ansys APDL komutlarıyla tanımlanmış ve kaynaklı birleştirmelerin etkileri incelenmiştir. Doğrusal olmayan tanımlamayla yapılan analizde toplam süre 2028 saniye olarak hesaplanmıştır. Her bir çift taraflı kaynak işlemi 14 saniye sürmüştür, toplam kaynak süresi 28 saniye ve soğutma süresi 1000 saniye olarak belirlenmiştir. Soğutma işlemi, oda sıcaklığına yakın değerlere ulaşana kadar devam etmiştir. 6 farklı modelleme modeli üzerinde termal analizler yapılmış ve zaman içindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Deneysel çalışmada, kaynak işlemi sırasında kullanılan parametreler modellemeye uygulanmış ve maksimum sıcaklık 2000 °C ile 2200 °C aralığında değişmiştir.

Termal analiz tamamlandıktan sonra sonuçlar transient adı verilen analiz modülüne aktarılmıştır. Doğrusal olmayan malzeme tanımı ile birlikte plastik bölgedeki sonuçlara göre analizler yapılmış ve kaynak işleminin tamamlanması üzerine incelenen deformasyon değerinin maksimum 0.1 mm olduğu görülmüştür. Çift taraflı kaynak ile 0 mm'ye yakın deformasyon değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Termal analiz sonuçları için sıcaklık-zaman dağılım grafiği

Kalıntı gerilmeler 6 farklı modelleme modelinde incelenmiş olup Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Bu gerilme değerleri maksimum asal gerilme değerlerine göre belirlenmektedir. Kalıntı gerilmelerin kaynaklı birleştirme bölgesinde ve bağlantı deliklerine yakın lokasyonlarda farklı olduğu gözlemlenmektedir. SHL-1 ve SHL-3 modellerindeki kaynak geometrisi sadece kalınlık tanımları olduğundan ve geometrisi olmadığından diğer modellere göre farklı bir dağılım elde edilmektedir. CMM modelinde maksimum kalıntı gerilme değeri belirlenmiş ve 512.12 MPa'lık kalıntı gerilme değeri belirlenmiştir. Diğer modellemelerde de benzer değerler elde edilmiş öngerilmeli modal analiz girdisi olarak tanımlanmıştır. Özellikle kaynak uçlarında kalıntı gerilme değerleri yüksek çıkmaktadır.



Şekil 4.11. Ana malzeme boyunca termal analiz sonucunda elde edilen maksimum ana kalıntı gerilme değerleri

Kalıntı gerilmeler ve bozulmaların tespiti ile sonuçlar modal analiz için öngörülmesi olarak tanımlanmıştır. Yapılan modal analiz sonucunda öngörülmesi doğal frekans sonuçları belirlenmiştir. Sonuçlara göre, doğal frekans sonuçlarının Çizelge 4.2'de belirtildiği gibi, katı ve kabuk modellemede ortalama hata oranlarının arttığı görülmektedir. Ancak CMM modelinde, %1.19'luk ortalama hata oranı ile deneysel çalışma sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Öngörülmesiz sonuçlarda olduğu gibi, CMM haricindeki ortalama hata oranının %1.85 değeriyle SLD 1 ve %1.72 değeriyle SHL 2 olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. Deneysel çalışmalarla öngörülmesi SEA modelleme tekniklerinin (SHL-1,2,3, SLD-1,2, CMM) ortalama hata oranları

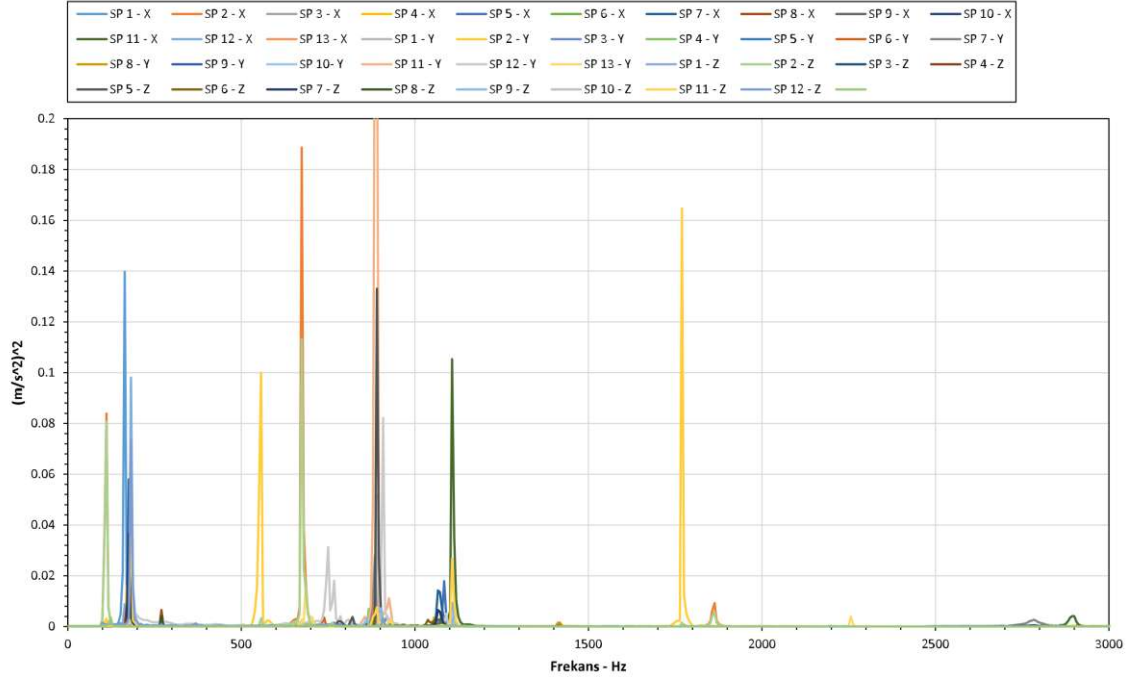
Mode	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	Ortalama Hata Oranı [%]
Test [Hz]	175.78	888.67	2714.84	5107.42	6005.86	6074.42	6923.83	8007.81	8349.61	0
SLD 1 [Hz]	179.04	878.88	2796.50	5154.30	6178.90	6277.80	6845.10	8142.00	8289.30	
Hata oranı [%]	1.85	-1.10	3.01	0.92	2.88	3.35	-1.14	1.68	-0.72	1.85
SLD 2 [Hz]	179.68	880.70	2800.90	5161.00	6197.00	6297.20	6846.10	8152.10	8295.20	
Hata oranı [%]	2.22	-0.90	3.17	1.05	3.18	3.67	-1.12	1.80	-0.65	1.97
SHL 1 [Hz]	151.71	789.91	2546.80	4668.20	5826.20	5963.50	6786.10	7340.10	7944.40	
Hata oranı [%]	-13.69	-11.11	-6.19	-8.60	-2.99	-1.83	-1.99	-8.34	-4.85	6.62
SHL 2 [Hz]	175.80	867.40	2779.20	5131.90	6246.50	6308.40	6899.10	8127.20	8307.50	
Hata oranı [%]	0.01	-2.39	2.37	0.48	4.01	3.85	-0.36	1.49	-0.50	1.72
SHL 3 [Hz]	169.43	823.69	2665.50	4906.10	5929.40	6046.00	6701.10	7738.20	7990.60	
Hata oranı [%]	-3.61	-7.31	-1.82	-3.94	-1.27	-0.47	-3.22	-3.37	-4.30	3.26
CMM [%]	175.76	886.94	2788.55	5170.42	6075.72	6168.19	6854.16	8214.10	8323.61	
Hata oranı [%]	-0.01	-0.19	2.72	1.23	1.16	1.54	-1.01	2.58	-0.31	1.19

Elde edilen karşılaştırmalar neticesinde düşük frekansa sahip modlar için SLD-1 modelinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca 5107.42 Hz'in üstündeki frekans değerleri için SHL-3 modellemesinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Genel ortalama hata oranları ise en doğru modelin SHL-3 modeli olduğunu göstermektedir. Literatürde bulunan bazı çalışmalarında frekans düzleminde yorulma testleri sonuçlarına göre SHL-3 modelleme tekniğinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir (Büyükbayram ve ark. 2015). Bunun nedeni, modelin doğal frekansının daha doğru olmasıdır. Bu durum, yorulma analizlerinde de daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bir çalışmada SLD-2 modelinin daha uygun sonuçlar verdiği sunulmakta fakat katı modeller arasında SLD-1 modeli bu çalışma sonucunda daha doğru sonuçlar vermektedir (Chcc 2007). Fakat bu değerlendirme kriterine göre değişiklik gösterebilmektedir. 5107.42 Hz'in altında düşük frekans bölgesi inceleniyorsa SLD-1 modeli önerilmektedir. Ortalama hata oranı en düşük olan model ise SHL-1'dir. bazı

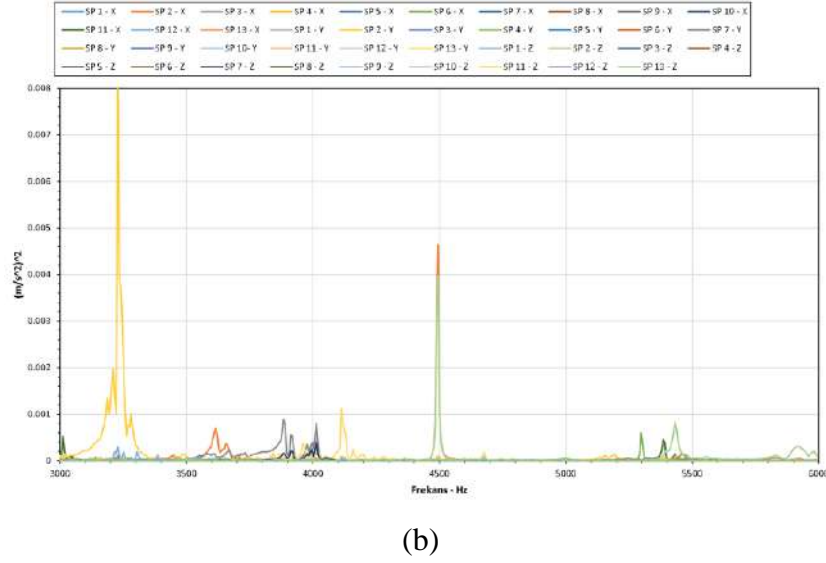
literatür çalışmalarında önerilse bile (Eriksson ve ark. 2003) frekans düzleminde incelemeler yapılırken bu çalışma sonuçlarına göre önerilmemektedir.

4.2.2. Kaynak Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi için Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Modal testler kapsamında, ivmeölçer sensöründen alınan verilerle zamana bağlı veriler elde edilmiştir. Frekans düzlemi, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılarak analiz edilmiş ve pik frekansları belirlenmiştir. Doğal frekanslar tespit edildikten sonra, aynı örnek üzerinde öngerilmesiz SEA gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, deneysel olarak elde edilen verilerin FFT dönüşümü ile frekans değerleri belirlenmiştir. Parseval teoremi kullanılarak sinyalin güç kararlılığı ve güç spektral yoğunluğu (PSD) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, gürültü giderilip filtre uygulandıktan sonra X, Y ve Z eksenlerinden ölçülen değerlerdir. Tepe doğal frekans değerlerini belirlemek amacıyla, bu deneysel çalışmanın sonuçları üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Şekil 4.12 (a) ve (b)'de farklı modlara göre ivme şiddetleri farklı olduğu görülmektedir. Frekans değerleri arttıkça ivme değerlerinin pik yaptığı değerlerin azaldığı gözlemlenmektedir.

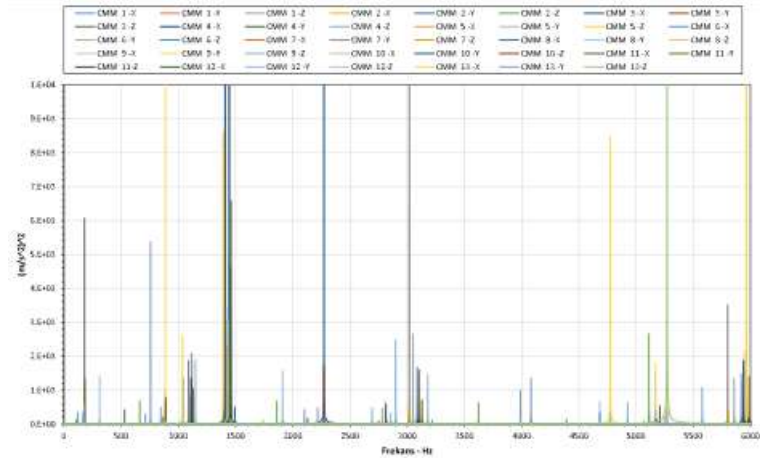


(a)



Şekil 4.12. Fourier dönüşüm sonrasında elde edilen deneysel modal test sonuçları (a) 0-300 Hz (b) 3000-6000 Hz

Analiz modeli için birçok modelleme tipi hazırlanmıştır. CMM olarak adlandırılan modelleme tipi lazer tarayıcı ile oluşturulan modellemelerdir. Bu modellemeler harmonik cevap analizlerinde kullanılmıştır. 13 adet numune için bir kod parçacığı hazırlanmış ve bu kod parçacığı içerisinde CMM numuneleri döngü içerisinde analiz edilmiştir. Her bir numunenin analizinde her 500 Hz’de bir veri kaydedilerek analiz çözümleri silinmiştir. Böylece diskte yer kaplamayan 0.1 Hz hassasiyette veri elde edilmiştir. X, Y ve Z ekseninde yükleme koşulu olarak yer çekimi uygulanmış ve böylece tüm eksenlerdeki mod şekilleri ve frekans spektrumları elde edilmiştir. Şekil 4.13’de CMM modellemesi için X, Y ve Z eksenleri için harmonik tepki analiz sonuçları gösterilmektedir. Bu kod parçacığı diğer tüm modelleme tipleri için de uygulanmıştır. Modelleme tiplerinin doğal frekansları Çizelge 4.3’de verilmektedir.



Şekil 4.13. Harmonik cevap analiz sonuçları

SEA modelleme tipleri için, katı ve kabuk modelleriyle birlikte SLD ve SHL olarak adlandırılan 5 model hazırlanmıştır. Her modellemede modal analiz yapılmış ve modal analiz sonucunda, her numunenin doğal frekansı belirlenmiştir. EMA sonuçlarından elde edilen doğal frekans değerleri Çizelge 4.3'de verilmektedir. Sonlu eleman analizlerinde, 7 moda kadar sayısal analiz yapılmış ve 6000 Hz'e kadar maksimum doğal frekansları belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. 13 farklı numuneye göre modal test sonuçları

	Mod 1 [Hz]	Mod 2 [Hz]	Mod 3 [Hz]	Mod 4 [Hz]	Mod 5 [Hz]	Mod 6 [Hz]	Mod 7 [Hz]
SP 1	169.92	890.63	1130.86	1417.97	2859.38	3111.33	5203.13
SP 2	111.33	556.64	673.83	1400.39	1769.53	1863.28	3228.52
SP 3	175.78	521.48	1048.83	1916.02	2197.27	2273.44	3064.45
SP 4	169.92	867.19	1054.69	1429.69	2748.05	2912.11	4992.19
SP 5	181.64	890.63	1083.98	1429.69	2876.95	3152.34	5326.17
SP 6	175.78	884.77	1066.41	1517.58	2900.39	3146.48	5296.88
SP 7	175.74	884.71	1065.42	1517.58	2724.61	2835.94	4013.67
SP 8	304.69	1417.97	1564.45	1863.28	4687.5	4910.2	
SP 9	181.64	902.34	1113.28	1511.72	2906.11	3240.23	5320.31
SP 10	175.78	878.91	1078.13	1450.1	2812.5	3017.58	5261.76
SP 11	181.64	884.77	1107.42	1435.55	2894.53	3011.72	5390.63
SP 12	181.62	908.2	1106.41	1488.21	2830.07	3228.57	5367.2
SP 13	123.05	685.55	767.58	1019.53	2156.25	2255.86	3966.8

Çizelge 4.4'da modal analiz sonucunda elde edilen veriler gösterilmektedir. SP-9'da sadece 6 moda kadar alındığı, 7. mod 6000 Hz değerini aştığı için değerlendirilmemektedir. 7. moddaki maksimum frekans 5417.60 Hz olup SP-10 numunesinde bulunmuştur. 8. mod frekansları tüm numunelerde 6000 Hz'i aşmış olup ve 7 mod deneysel çalışmalarla karşılaştırılmak üzere değerlendirilmiştir. Her numunede ve her modda farklı doğal frekans değerleri ortaya çıkmaktadır.

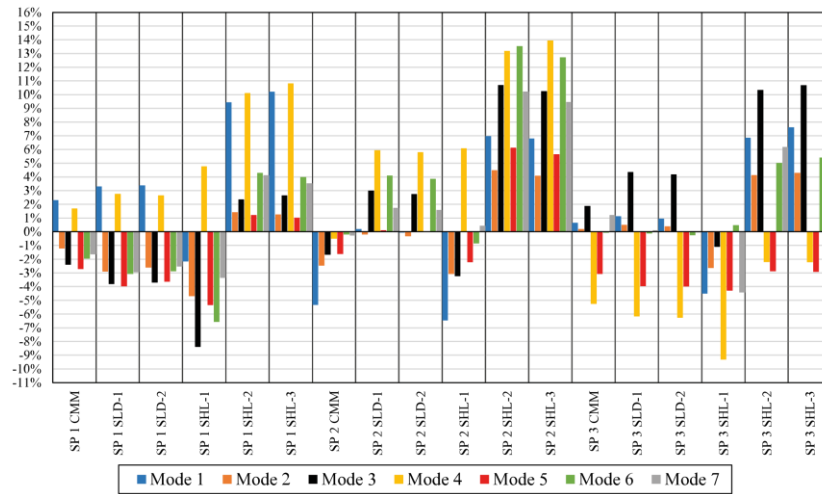
İş parçası ve ana malzeme kalınlıkları ve yüksekliklerinin değiştiği SP-2, 3, 8, 13 numunelerinde, sertlik matrisine olan etkisinden dolayı diğer numunelere göre farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar her modu etkilemiştir. Diğer numunelerde ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklıkların etkisinden dolayı doğal frekanslarda daha az farklılık tespit edilmiş ve her modda farklı sonuçlar tespit edilmiştir. Bu verilerle numuneler hazırlanırken belirlenen her parametrenin bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.4. 13 farklı numuneye göre modal test sonuçları

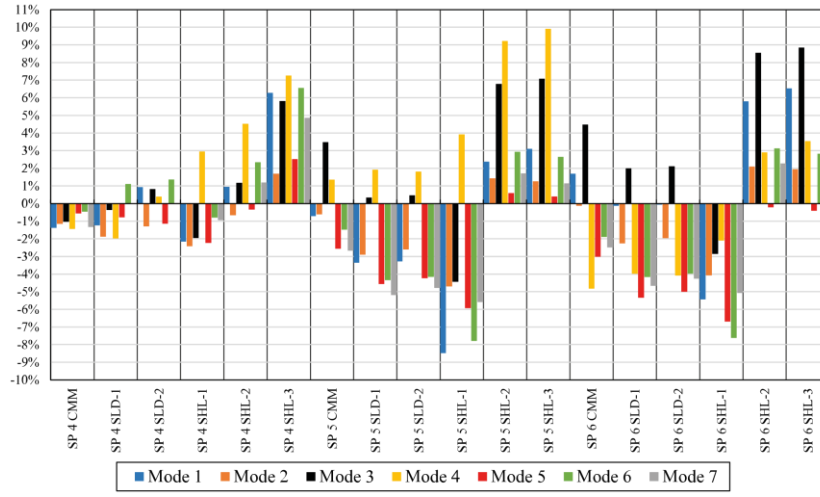
	Mod 1 [Hz]	Mod 2 [Hz]	Mod 3 [Hz]	Mod 4 [Hz]	Mod 5 [Hz]	Mod 6 [Hz]	Mod 7 [Hz]
SP 1 CMM	169.92	890.63	1130.86	1417.97	2859.38	3111.33	5203.13
SP 1 SLD-1	173.84	879.8	1103.6	1442.1	2781.7	3050.2	5117.4
SP 1 SLD-2	175.54	864.81	1087.7	1457.2	2745.6	3015.4	5049.7
SP 1 SHL-1	175.67	867.4	1089	1455.6	2755.2	3021.4	5071.5
SP 1 SHL-2	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	5028.5
SP 1 SHL-3	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	5417.6
SP 2 CMM	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	5387.1
SP 2 SLD-1	111.33	556.64	673.83	1400.39	1769.53	1863.28	3228.52
SP 2 SLD-2	105.39	542.93	662.59	1393.3	1740.9	1859.4	3219.4
SP 2 SHL-1	111.55	555.52	694.1	1483.7	1771.6	1939.7	3284.6
SP 2 SHL-2	111.26	554.82	692.41	1481.6	1769.2	1935.3	3279.9
SP 2 SHL-3	104.13	539.5	651.98	1485.7	1730.2	1847.3	3242.8
SP 3 CMM	119.1	581.65	745.94	1585.2	1878.1	2115.4	3558.4
SP 3 SLD-1	118.91	579.37	742.98	1595.7	1869.6	2100.4	3534.1
SP 3 SLD-2	175.78	521.48	1048.83	1916.02	2197.27	2273.44	3064.45
SP 3 SHL-1	176.93	522.55	1068.62	1815.3	2129.5	2271.7	3101.9
SP 3 SHL-2	177.79	524.07	1094.5	1797.8	2110	2270.5	3067.7
SP 3 SHL-3	177.47	523.56	1092.7	1795.9	2109.6	2267.6	3063.2
SP 4 CMM	167.85	507.74	1037.3	1737.4	2102.8	2284.6	2929
SP 4 SLD-1	187.85	543.04	1157.3	1873.7	2133.9	2387.7	3254
SP 4 SLD-2	189.17	543.86	1160.9	1873.5	2133	2396.5	3248.4
SP 4 SHL-1	169.92	867.19	1054.69	1429.69	2748.05	2912.11	4992.19
SP 4 SHL-2	167.57	857.21	1043.8	1409.1	2732.8	2898.9	4925.9
SP 4 SHL-3	167.82	850.94	1050.8	1401.5	2726.6	2944.7	4991.1
SP 5 CMM	171.5	855.96	1063.4	1435.3	2716.5	2951.9	4993.2
SP 5 SLD-1	166.25	846.21	1034.1	1471.8	2686.8	2888.9	4945.2
SP 5 SLD-2	171.54	861.48	1067.1	1494.3	2738.5	2980.3	5051.7
SP 5 SHL-1	180.59	881.86	1116.1	1533.4	2817.3	3103.1	5235.3
SP 5 SHL-2	181.64	890.63	1083.98	1429.69	2876.95	3152.34	5326.17
SP 5 SHL-3	180.36	885.24	1121.8	1449.1	2803.1	3105.6	5183.5
SP 6 CMM	175.54	864.81	1087.7	1457.2	2745.6	3015.4	5049.7
SP 6 SLD-1	175.67	867.4	1089	1455.6	2755.2	3021.4	5071.5
SP 6 SLD-2	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	5028.5
SP 6 SHL-1	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	5417.6
SP 6 SHL-2	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	5387.1
SP 6 SHL-3	175.78	884.77	1066.41	1517.58	2900.39	3146.48	5296.88
SP 7 CMM	178.75	883.6	1114.2	1444.3	2812.7	3086.9	5165.5
SP 7 SLD-1	175.54	864.81	1087.7	1457.2	2745.6	3015.4	5049.7
SP 7 SLD-2	175.67	867.4	1089	1455.6	2755.2	3021.4	5071.5
SP 7 SHL-1	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	5028.5
SP 7 SHL-2	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	5417.6
SP 7 SHL-3	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	5387.1
SP 8 CMM	175.74	884.71	1065.42	1517.58	2724.61	2835.94	4013.67
SP 8 SLD-1	175.38	867.11	1088.1	1430.4	2750.2	3017.9	4068.6
SP 8 SLD-2	175.54	864.81	1087.7	1457.2	2745.6	3015.4	4049.7
SP 8 SHL-1	175.67	867.4	1089	1455.6	2755.2	3021.4	4071.5
SP 8 SHL-2	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	4028.5
SP 8 SHL-3	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	4417.6
SP 9 CMM	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	4387.1
SP 9 SLD-1	304.69	1417.97	1564.45	1863.28	4687.5	4910.2	
SP 9 SLD-2	312.74	1413.3	1492.7	1911.4	4683.4	5166.5	
SP 9 SHL-1	319.31	1425	1519	1947.1	4755.8	5253.1	
SP 9 SHL-2	318.65	1423.9	1517.7	1943.6	4751.7	5245	
SP 9 SHL-3	309.87	1485.9	1507.9	1895.8	4734.1	5163.3	
SP 10 CMM	328.43	1534.7	1563.3	2010.9	4918.8	5479.1	

SP 10 SLD-1	341.92	1548.2	1579.7	2070.4	4965.4	5568.6	
SP 10 SLD-2	181.64	902.34	1113.28	1511.72	2906.11	3240.23	5320.31
SP 10 SHL-1	181.28	886.83	1122.8	1455.8	2807.1	3102.4	5168.8
SP 10 SHL-2	175.54	864.81	1087.7	1457.2	2745.6	3015.4	5049.7
SP 10 SHL-3	175.67	867.4	1089	1455.6	2755.2	3021.4	5071.5
SP 11 CMM	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	5028.5
SP 11 SLD-1	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	5417.6
SP 11 SLD-2	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	5387.1
SP 11 SHL-1	175.78	878.91	1078.13	1450.1	2812.5	3017.58	5261.76
SP 11 SHL-2	178.37	877.7	1115.3	1430.4	2815.4	3099.9	5276.4
SP 11 SHL-3	175.54	864.81	1087.7	1457.2	2745.6	3015.4	5049.7
SP 12 CMM	175.67	867.4	1089	1455.6	2755.2	3021.4	5071.5
SP 12 SLD-1	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	5028.5
SP 12 SLD-2	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	5417.6
SP 12 SHL-1	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	5387.1
SP 12 SHL-2	181.64	884.77	1107.42	1435.55	2894.53	3011.72	5390.63
SP 12 SHL-3	182.11	889.96	1131.2	1453.3	2830.4	3128.5	5206.5
SP 13 CMM	176.38	880.13	1120.2	1446.2	2802.5	3050.4	5355.6
SP 13 SLD-1	179.47	876.94	1111.4	1473.7	2787	3080.4	5134.6
SP 13 SLD-2	166.24	848.76	1035.9	1485.7	2706.4	2906.7	5028.5
SP 13 SHL-1	185.97	903.32	1157.6	1561.5	2894.2	3245	5417.6
SP 13 SHL-2	187.27	901.95	1160.8	1571.4	2888.5	3235.6	5387.1
SP 13 SHL-3	181.62	908.2	1106.41	1488.21	2830.07	3228.57	5367.2

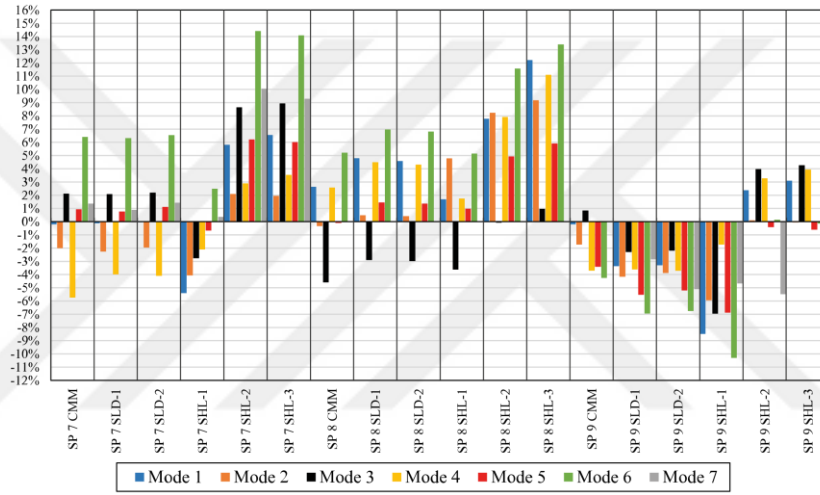
Şekil 4.14’de görüldüğü gibi her bir numunenin deneysel çalışmaları ve CMM, SLD ve SHL modellemeleri karşılaştırılmış ve hata oranları belirlenmiştir. Her bir modelleme tipinde her bir örnekte farklı hata oranlarının olduğu görülmektedir. SHL-2 ve SHL-3 modelleme tiplerinde diğer modelleme tiplerine göre daha yüksek hata oranları tespit edilmiştir. Özellikle ilerleme yönünde olan 4. modda hata oranlarının daha geniş aralıkta olduğu görülmektedir. 2. modda hata oranı ve genişlik aralıkları daha azdır. Ayrıca 5. modda hata oranı aralıkları oldukça düşüktür ve 2. mod ile benzer mod şekline sahiptir. Mod şekilleri incelendiğinde burulma modları olan 2. ve 5. modlar için oldukça doğru sonuçlar ortaya çıktığı görülmektedir.



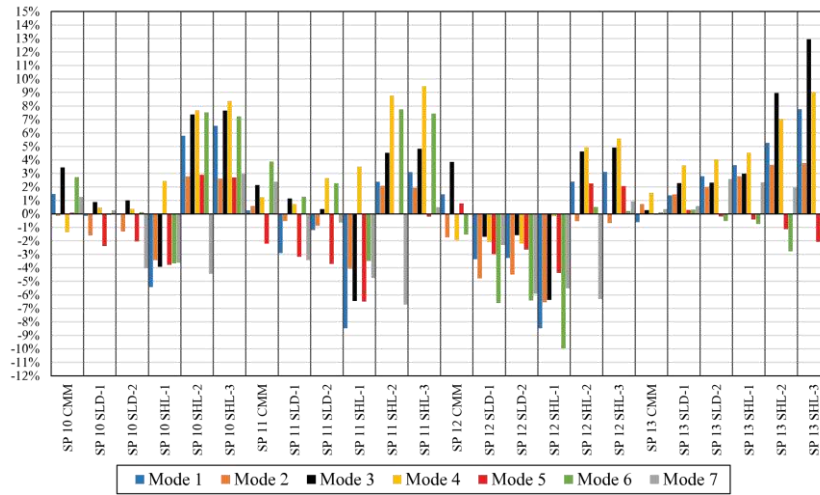
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.14. SEA modellemesinin doğal frekans hata oranlarının sonuçları (a) SP 1-3 (b) SP 4-6 (c) SP 7-9 (d) SP 10-13

Doğal frekansların karşılaştırılması sonucunda belirlenen istatistiksel sonuçlar Çizelge 4.5’de yer almaktadır. Her modelleme türü tüm numunelerin ortalamasına bakılarak elde edilmiştir. Tüm numuneler üzerinde yapılan analizlerde ortalamalara göre en düşük hata oranlarına sahip modelleme türleri SLD-1 ve SHL-1 modelleridir. Ancak mutlak değerlere bakıldığında SHL-1 modeli SLD modellerine göre daha yüksek hata oranıyla sonuçlar vermektedir. Katı modelleme olan SLD modellemesi, kabuk modelleme türü olan SHL modelleme türlerine göre daha düşük mutlak ortalama değerlere sahiptir. SHL modelleme türleri için SHL-1 modelleme hata oranları en düşük sonuçları verilmektedir.

Çizelge 4.5. Deneysel ve SEA karşılaştırmaları ile elde edilen istatistiksel sonuçlar

	Ortalama Hata Oranı	Mutlak Ortalama Hata Oranı	Ortalama Hata Oranlarının Standart Sapması	RMSE
Modal Test	%0.00	%0.00	%0.00	0.00
CMM	-%0.39	%1.86	%1.19	6.25
SLD-1	-%0.88	%2.58	%10.62	9.89
SLD-2	-%0.74	%2.56	%8.63	12.93
SHL-1	-%2.90	%4.17	%7.32	15.09
SHL-2	%4.25	%4.49	%10.56	147.79
SHL-3	%4.75	%5.05	%10.43	163.75

Literatürde bazı çalışmalarda, SEA ve deneysel çalışmalarla frekans düzleminde karşılaştırılan kaynaklı bağlantılar, yalnızca bir parametreye göre incelenmiştir (Shrivastava ve ark. 2023). Bazı çalışmalarda ise karmaşık yapılar incelenmiştir (Andika ve ark. 2023). Alın kaynağında yalnızca tek bir parametre için ısı girişinin doğal frekansa etkisini inceleyen çalışmalarda mevcuttur (Rajaei ve ark. 2020). Alın kaynağı için kabuk ve katı modellemeyi içeren karşılaştırmalar yapılmış ancak CMM modellemesi yapılmamış fakat katı modelleme daha doğru sonuçlar vermiştir (de Arruda ve ark. 2023). Bu çalışmada T-Bağlantı için 13 kaynağın ve geometrik parametrelerin etkileri incelenmiş ve SEA analizleri ile karşılaştırılmıştır. En düşük hata oranına sahip sonuçlar CMM modeli ile elde edilmiştir. Katı modelleme sonuçlarının kabuk modellemesine göre daha düşük hata oranlarına sahip olduğu bulunmuştur. Katı modellerin çözüm süresi daha uzun ve model hazırlama çabası daha fazladır ve Kabuk modellemesi tercih edilirse SHL-1 modelinin frekans düzleminde ortalama %4.17 hata oranına sahip olduğu görülmektedir. Ancak parametrelerin etkileri de dikkate alınmalıdır. 13 parametreden sadece biri seçilirse, çalışma sonucunda elde edilen hata oranları mutlaka dikkate alınmalıdır. Çalışmalar sonucunda, tercih edilen modelleme türünün 13 parametreye göre hata oranlarına neden olabileceği ve buna göre değerlendirilmesi gerektiği

önerilmektedir. Geometri ve kaynak parametrelerinin doğal frekansa etkileri ise Çizelge 4.6'da belirtilmektedir.

Çizelge 4.6. Geometri ve kaynak parametrelerinin doğal frekansa etkilerinin karşılaştırılması

Karşılaştırılan Numune	Numune İsmi	Değişken-Değer	Mod 1-Değişim Oranı [%]	Mod 2-Değişim Oranı [%]	Mod 3-Değişim Oranı [%]	Mod 4-Değişim Oranı [%]	Mod 5-Değişim Oranı [%]	Mod 6-Değişim Oranı [%]	Mod 7-Değişim Oranı [%]	Ortalama Değişim Oranı [%]
-	SP-1	-	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SP-1	SP-2	t1-5 mm	-34.48%	-37.50%	-40.41%	-1.24%	-38.11%	-40.11%	-37.95%	32.83%
SP-1	SP-3	l1-150 mm	3.45%	-41.45%	-7.25%	35.12%	-23.16%	-26.93%	-41.10%	25.49%
SP-1	SP-4	a-3 mm	0.00%	-2.63%	-6.74%	0.83%	-3.89%	-6.40%	-4.05%	3.51%
SP-1	SP-5	Paso sayısı-3	6.90%	0.00%	-4.15%	0.83%	0.61%	1.32%	2.36%	2.31%
SP-1	SP-6	ön ısıtma-100 C ⁰	3.45%	-0.66%	-5.70%	7.02%	1.43%	1.13%	1.80%	3.03%
SP-1	SP-7	ön ısıtma-300 C ⁰	3.43%	-0.66%	-5.79%	7.02%	-4.71%	-8.85%	-22.86%	7.62%
SP-1	SP-8	t1-15 mm	79.31%	59.21%	38.34%	31.40%	63.93%	57.82%	-3.90%	47.70%
SP-5	SP-9	tpasolararası-150 C ⁰	0.00%	1.31%	2.70%	5.74%	1.01%	2.79%	-0.11%	1.95%
SP-1	SP-10	Düz	3.45%	-1.32%	-4.66%	2.27%	-1.64%	-3.01%	1.13%	2.50%
SP-1	SP-11	İç Bükey	6.90%	-0.66%	-2.07%	1.24%	1.23%	-3.20%	3.60%	2.70%
SP-9	SP-12	Paso sayısı-4	-0.01%	0.65%	-0.62%	-1.56%	-2.62%	-0.36%	0.88%	0.96%
SP-1	SP-13	l2-240 mm	-27.58%	-23.03%	-32.12%	-28.10%	-24.59%	-27.50%	-23.76%	26.67%

Parametrelerin doğal frekansa etkileri incelendiğinde ise geometrik ölçülerin daha çok etki ettiği görülmektedir. En çok iş parçası kalınlığı artırıldığında %47.7'e kadar etki etmiştir. Düz ve iç bükey olması durumunda yaklaşık %2.6 lık bir değişim oranı belirlenmiştir. Sadece ön ısıtma sıcaklığı değiştirildiğinde %7.62'ye kadar önemli bir artış olduğu görülmektedir. 3 paso yapıp pasolararası sıcaklık 150 derece yapıldığında %1.95 değişim oranı ile oldukça az değişim oranı tespit edilmiştir. Paso sayısının 3 ve 4 olması durumunda ise %0.96'lık bir değişim olduğu gözlemlenmiştir.

4.3. Gerilme Konsantrasyon Faktörü Tespiti için Geliştirilen Yeni Yaklaşımın Tahminlerinin Sonuçları ve Karşılaştırılması

Kaynaklı bağlantıların gerilme konsantrasyon faktör tespiti için T bağlantılı ve simetrik çift T kaynak bağlantılı geometrilerde belirlenmiştir. 2 farklı geometri de ise eğme ve çekme zorlama tiplerine göre farklı parametrik denklemler tespit edilip sonuçları literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. T Kaynak Bağlantılı Bir Yapıda Gerilme Konsantrasyon Faktörü Parametrik Formülasyonu

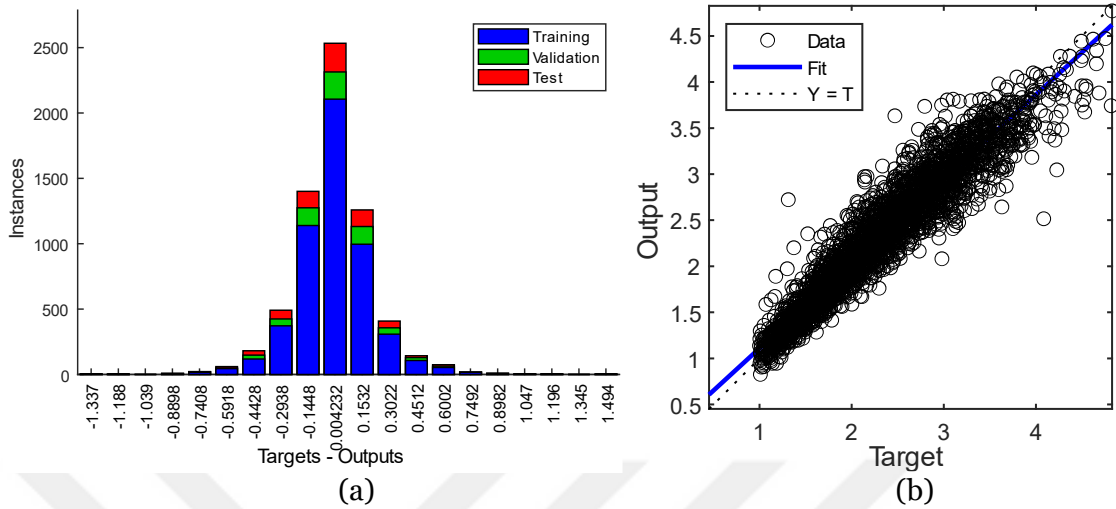
Belirlenen parametre aralıkları ile Latin Hiperküp metodu ile 8500 adet eşit şekilde veri dağılımı sağlanmıştır. Kod parçacığı otomatik olarak çalıştırılması ile %1.72'i yani 116 adet hata oluşmuştur. Bu hataların temel sebebi geometrik düzensizliklerdir. Sonuç olarak 8384 adet nümerik analiz verisi elde edilmiştir. Bu geometrik düzensizlik öyle bir geometrinin gerçek hayatta elde edilemeyeceği anlamına gelmektedir. Ayrıca nominal, etkin çentik ve sıcak nokta gerilme değerleri de kayıt altına alınmıştır. Böylelikle kaynak ucu gerilmesi baz alınarak SCF değerleri elde edilmiştir. YSA 1,200,000 adet iterasyon sayısı ile eğitilmiştir. Eğitim neticesinde yeni bir parametrik formül elde edebilmek için bias ve ağırlık matrisleri belirlenmiştir. Tespit edilen bias ve ağırlık matrisler Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Yapay sinir ağı ile T kaynaklı bağlantı için belirlenen matris sonuçları

$$\begin{aligned}
 X_{offset} &= \begin{bmatrix} -1.01309 \\ -1.00205 \\ -1.01112 \\ -1.08333 \\ -1.01566 \\ -1.06897 \\ -1.28480 \end{bmatrix} & X_{gain} &= \begin{bmatrix} 0.02013 \\ 0.02053 \\ 0.02021 \\ 0.02083 \\ 0.02016 \\ 0.68966 \\ 0.02910 \end{bmatrix} & Y_{offset} &= [8.41733] & Y_{gain} &= [8.88501] \\
 b_1 &= \begin{bmatrix} 1.95870 \\ -7.22786 \\ -5.78728 \\ -1.61206 \\ -2.51554 \end{bmatrix} & b_2 &= \begin{bmatrix} -4.82921 \\ -5.42331 \\ -92.51923 \\ -4.97471 \\ -11.90807 \end{bmatrix} & b_3 &= [-1.69977] \\
 W_1 &= \begin{bmatrix} 0.00386 & 0.72168 & 0.01963 & 0.01267 & 0.76857 & -0.00598 & -0.12925 \\ -1.61657 & -4.61120 & -1.53535 & -0.06825 & 1.27604 & 0.05470 & -0.15247 \\ -0.04695 & -4.46091 & -0.00404 & 0.00736 & 0.21790 & -0.00018 & -0.03177 \\ -0.11896 & 0.10904 & -0.02632 & -0.03339 & -0.49323 & 0.00537 & 0.38689 \\ -0.34998 & -0.58323 & -0.03092 & -0.02323 & -0.53235 & 0.01533 & 0.14065 \end{bmatrix} \\
 W_2 &= \begin{bmatrix} -0.51306 & 0.17963 & -7.77940 & -1.13517 & 0.73916 \\ 0.12723 & 0.18191 & -7.50701 & 0.49374 & -0.14122 \\ -53.84110 & 6.34260 & -10.18365 & 47.77993 & -195.90499 \\ -0.07537 & 0.17265 & -7.30731 & 0.00660 & 0.11947 \\ 4.97945 & -4.51778 & 1.30333 & 22.72586 & -38.48509 \end{bmatrix} \\
 W_3 &= [59.16282 \quad 20.80761 \quad -38.74768 \quad -54.42614 \quad 13.86126]
 \end{aligned}$$

Çizelge 4.7'de verilen YSA eğitimi sonucunda elde edilen matrisler Denklem 3.21-3.24'te verilen denklemler ve kaynak ucundaki SCF değerleri elde edilmektedir. Böylelikle SCF parametrik formül elde edilmiştir. Parametrik formül ile Denklem 3.25'deki denklem ile hata oranları belirlenmiştir. Ayrıca istatistiksel karşılaştırmalar, Denklem 3.25- 3.26 arasında verilen denklemler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.15 (a)' da hedef ve çıktı değerlerinin farklarının dağılımları gösterilmektedir. Şekil 4.15 (b)'de YSA

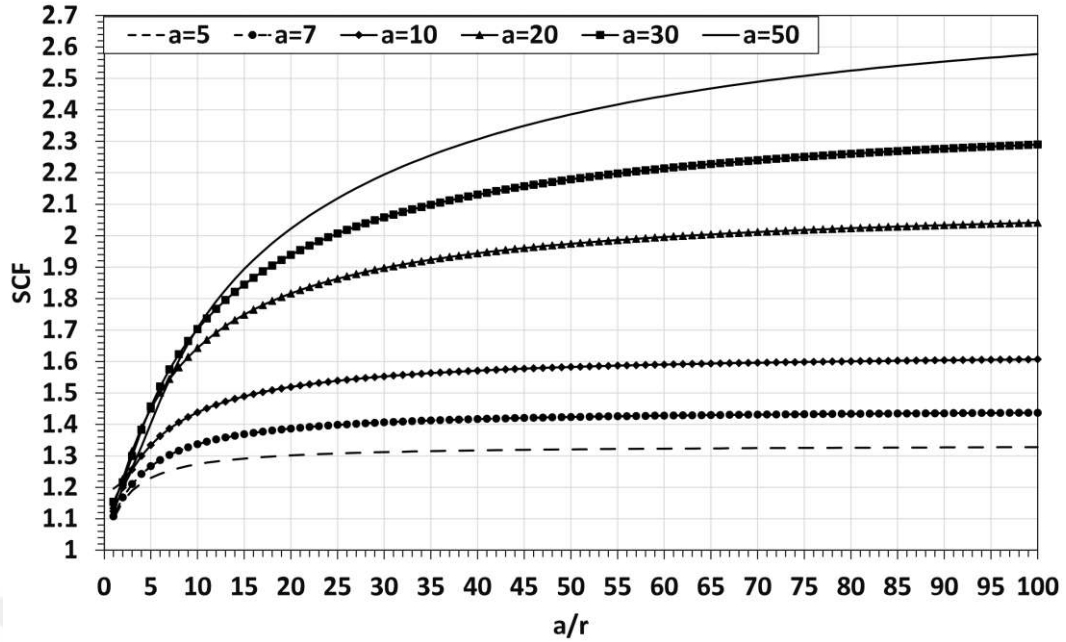
eğitimi neticesinde yeni parametrik denklemin SCF değeri (çıktı) ile SEA sonucu (hedef) karşılaştırmaları gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Parametrik denklem sonuçları (a) hedef-çıktı farklarının dağılımı (b) hedef-çıktı verileri

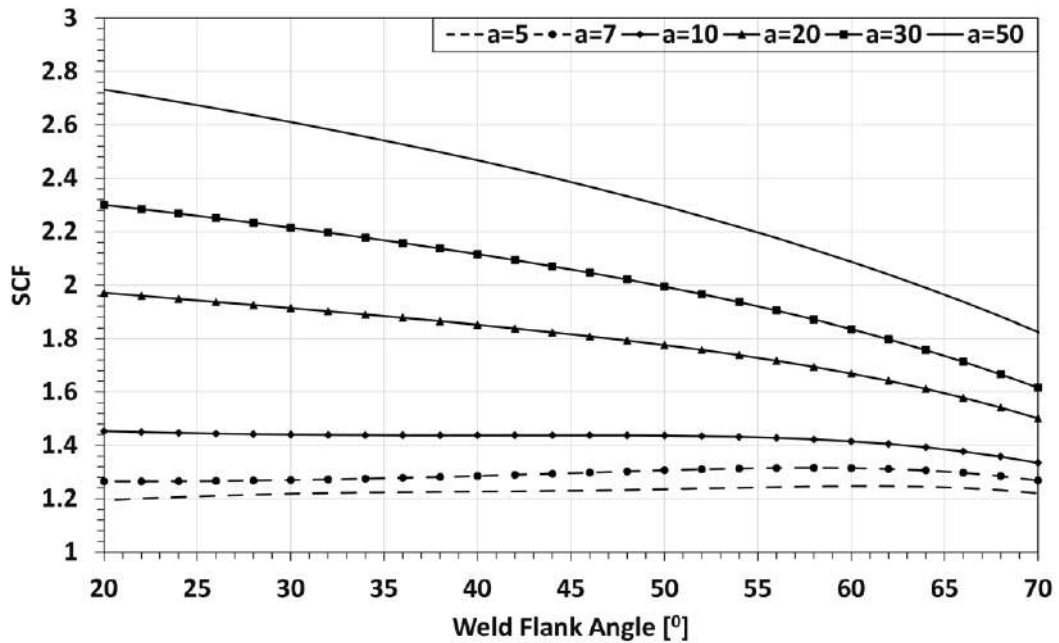
Maksimum SCF değeri 4.95 tespit edilmiştir. Minimum SCF değeri ise 1.001 olarak tespit edilmiştir. Bu eğitim neticesinde elde edilen sonuçlara göre tüm veriler karşılaştırılmıştır. İstatistiksel veriler Denklem 3.25-3.27'deki denklemler ile tespit edilmektedir. YSA eğitim neticesinde yeni oluşturulan parametrik SCF denklemine göre ortalama hata değeri Denklem 3.25'te verilen denkleme göre tespit edilerek %4.95 bulunmuştur. RMSE değeri %24.57, korelasyon katsayı değeri ise %95.72 tespit edilmiştir.

SCF değerlerinde 7 farklı parametrenin her biri etkilidir. Özellikle kaynak ucundaki yarıçap değeri kaynak sonrasında da değişebilmektedir. Kaynak boğaz kalınlığına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Şekil 4.16'da gösterilen YSA ile eğitimlen önerilen parametrik denkleme göre a/r parametreleri baz alınarak SCF değerleri verilmektedir. $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$, ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak boyun kalınlığı (a) 5, 7, 10, 20, 30 ve 50 mm'de incelenmiştir. a/r 1 ile 100 arasında 1 hassasiyetle incelenmiştir. Bu sonuçlara göre a/r parametresine göre doğrusal olmayan bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Kaynak boğaz kalınlığı arttıkça SCF'nin arttığı, kaynak ucundaki yarıçap arttıkça SCF'nin azaldığı belirlenmiştir. İncelenen bu parametrelerin özellikle kaynak sonrası oluşabilecek farklı yarıçap ve boğaz kalınlıklarında oldukça etkili olduğu görülmektedir.



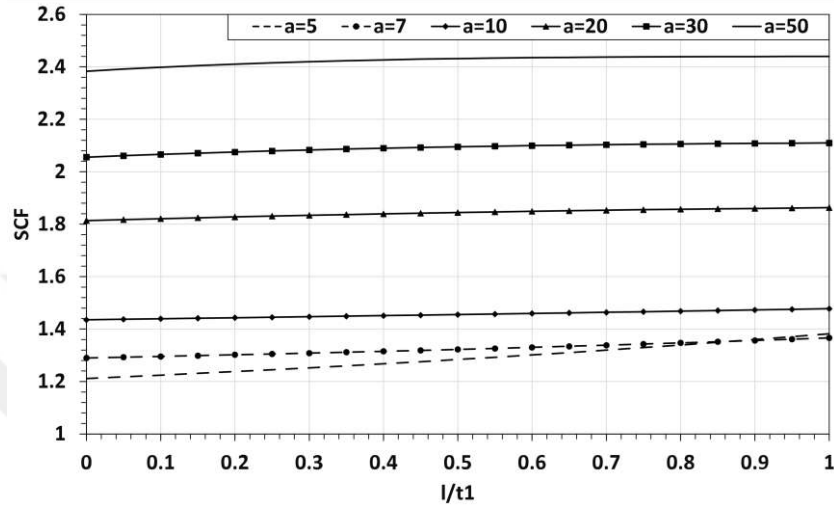
Şekil 4.16. a/r parametresine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Kaynak açısının etkisini ve kalınlığa göre değişimini belirlemek için önerilen grafik Şekil 4.17'de gösterilmektedir. $l=1$, $g=2$, $t_1=t_2$, $r=1$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak açısı arttıkça SCF değerlerinin kaynak boğaz kalınlığına göre değiştiği gözlemlenmektedir. Kaynak açısının etkisinin boğaz kalınlığı arttıkça arttığı görülmektedir. SCF değişim oranı $a=5$ mm'de %7.39 iken $a=50$ mm'de %47.50 olarak bulunmuştur.



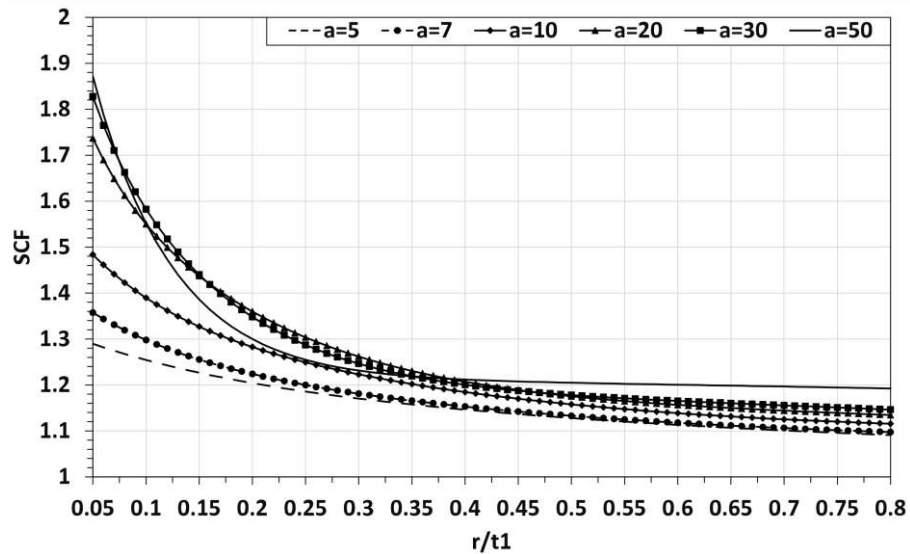
Şekil 4.17. Kaynak açısına göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Kaynak penetrasyon etkileri Şekil 4.18'de gösterilmektedir. $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$, $r=1$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak penetrasyonu arttıkça SCF değerinin azaldığı, ancak etkisinin kaynak boğaz kalınlığına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. 0-1 l/t_1 oranı arasında alınan verilere göre SCF değişiminin 5 mm boğaz kalınlığında %14.09, 50 mm boğaz kalınlığında ise %2.35 olduğu belirlenmiştir. Kaynak kalınlığı arttıkça kaynak penetrasyon etkisinin azaldığı görülmektedir.

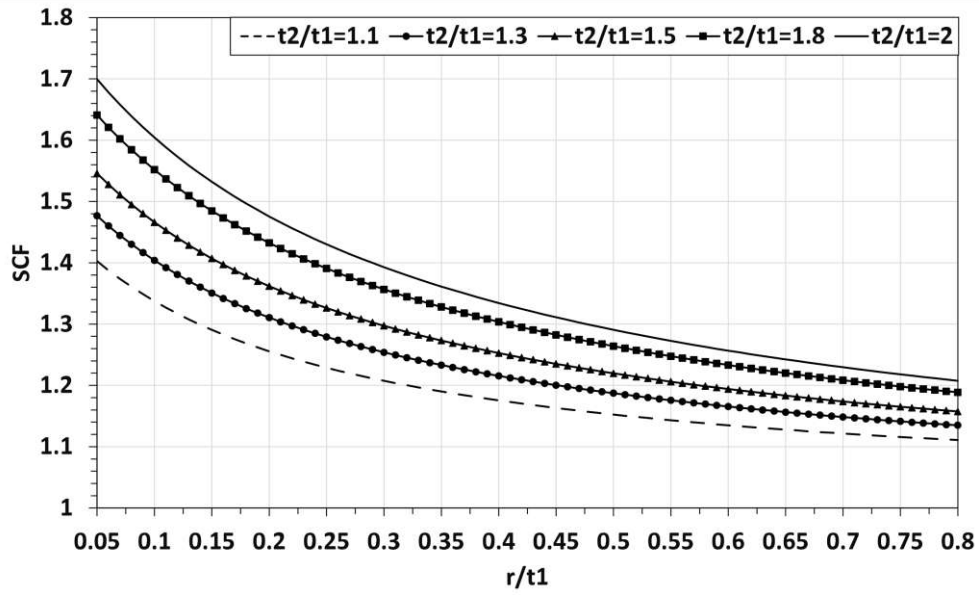


Şekil 4.18. Kaynak penetrasyon etkilerine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Şekil 4.19'da kaynak ucundaki yarıçap değerlerinin etkilerine ait r/t_1 oranı 0.05 ile 0.8 arasındaki değişimlere göre gösterilmiştir. Şekil 4.19 (a) kaynak boğaz kalınlığını ve Şekil 4.19 (b) t_2/t_1 'e göre etkilerini göstermektedir. Şekil 4.19 (a), $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$ ve $t_1=1.4a$ ve Şekil 4.19 (b), $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=10$ ve $t_1=1.4a$ denklemlere göre hazırlanmıştır.



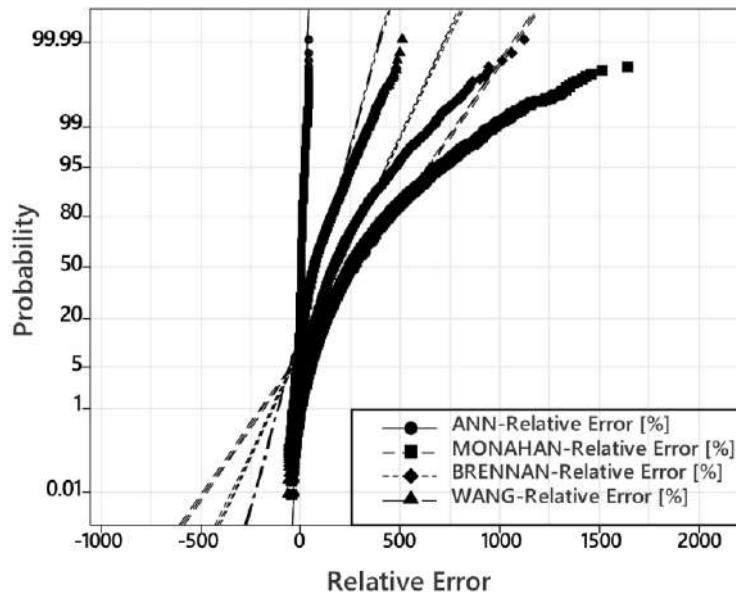
(a)



(b)

Şekil 4.19. Kaynak kalınlığı, malzeme kalınlıkları ve yarıçap değerlerinin gerilme konsantrasyon faktörlerine etkileri

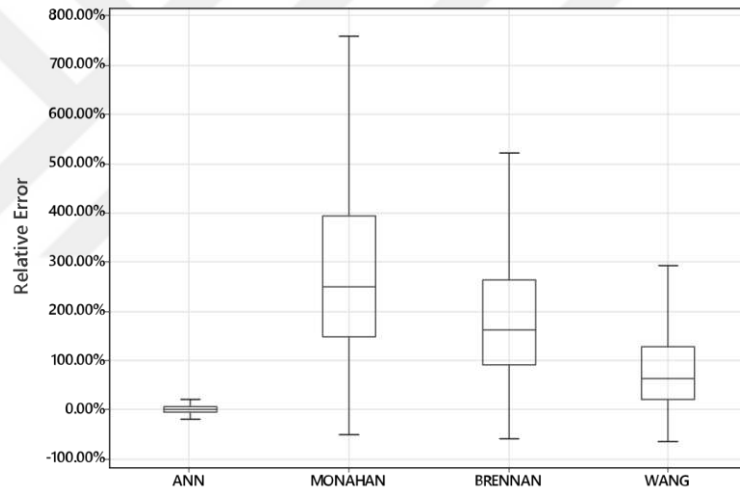
SCF değerinin iş parçası ile ana malzeme arasındaki kalınlık artış oranı arttıkça arttığı görülmektedir. Değerler birbirine yakın olduğunda SCF değeri daha azdır. Ayrıca bu kalınlık oranlarına göre kaynak ucu yarıçapı değerinin artırılmasıyla SCF değerinin de azaldığı görülmektedir. Kaynak boğaz kalınlığı değişimlerinde doğrusal olmayan bir davranış görülmektedir. Düşük boğaz kalınlığı SCF üzerinde daha az etki yaratırken kalınlık arttıkça etkileri artmaktadır.



Şekil 4.20. Bağlı hataların olasılık değerlerinin normal dağılım grafiği

SCF normal dağılımı için YSA tahminleri ve olasılık sonuçları Şekil 4.20'da gösterildiği gibi literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Monahan 1995; Brennan ve ark. 2000; Wang ve ark. 2020). Yapay sinir ağında standart sapma 0.09 olarak belirlenmiştir. Wang'ın önerdiği parametrik formüle göre 0.841'lik bir standart sapma değeri belirlenmiş olup en yakın sonuçlar bu çalışmadadır. Monahan formülünde standart sapma değeri 2.095, Brennan formülünde ise 1.431 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.21'de YSA, Monahan, Brennan ve Wang parametrik formülleri ile yapılan karşılaştırmalar kutu grafiği olarak gösterilmiştir. Medyan değerler YSA'da 0.002, Monahan'da 2.491, Brennan'da 1.623 ve Wang'da 0.627 olarak belirlenmiştir. Ayrıca alt çeyrek (Q1) ve üst çeyrek (Q3) değerleri kutu grafiğinde gösterildiği gibi belirlenmiştir. Q1 değerleri YSA'da -0.046, Monahan'da 1.487, Brennan'da 0.906 ve Wang'da 0.200 olarak belirlenmiştir. Q3 değerleri YSA'da 0.052, Monahan'da 3.930, Brennan'da 2.631 ve Wang'da 1.291 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.21. Kutu grafikleri ile karşılaştırma

Brennan ve Monahan'ın parametrik formüllerinde diğer çalışmalara göre daha yüksek farklılıklar vardır. Bu, sınır koşullarındaki farklılıktan veya az sayıda veriden kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, bu çalışmada parametreler çok daha geniş aralıklarla tanımlanmış ve betiğe ağ ölçütleri eklenmiştir. Bu nedenle, sonuçların karşılaştırılmasında farklılıklar olabilir. Giriş verileri, Latin hiperküp yöntemi ile eşit olarak dağıtılmadan önce diğer çalışmalara kıyasla daha geniş aralıklarla tanımlanmıştır. 8384 adet veri oluşturulmuş ve literatürdeki birçok çalışmadan (Neuhäusler ve Rother 2022; Monahan 1995; Brennan ve ark. 2000) daha fazla veri sağlanmıştır. Dolayısıyla oluşturulan yeni parametrik denklem daha doğru sonuçlar vermektedir. Çalışmanın gerçekleştirildiği sınır koşulları ve eğilme kuvveti bu çalışmanın özgünlüğüdür. Farklı

sınır koşulları nedeniyle gerilme konsantrasyon faktörü değerleri diğer çalışmalara (Molski ve Tarasiuk 2021; Molski ve ark. 2020; Oswald ve ark. 2022) göre farklıdır. Oluşturulan yeni denklem bu koşullar için geçerlidir. Ayrıca bazı çalışmalarda veriler tam penetrasyon tanımlarıyla dağıtılırken, bu çalışmada veriler penetrasyon oranına göre tanımlanmıştır. Böylece yeni oluşturulan parametrik denklemde yeni sınır koşullarına göre daha kapsamlı bir denklem elde edilmiştir.

Senaryolar, literatürdeki diğer çalışmalardan (Molski ve Tarasiuk 2021; Neuhäusler ve Rother 2022) farklı ve yeni olan, Şekil 3.39'da akış şemasında belirtilen algoritmaya göre hazırlanmıştır. SEA'de her analizde mesh kriterlerini kontrol ederken, Latin Hiperküp yöntemi ile belirlenen parametreleri bir kod parçacığı ile analiz eder. Mesh düğümü ve eleman sayısı arttıkça gerilme belirli bir değere kadar artar. Bu yazılımda, mesh kriteri sayesinde pik gerilme değerleri daha doğru bir şekilde tespit edilmiştir. Bu kalite değerleri literatürdeki diğer çalışmalarda ihmal edilmiştir. Bunun nedeni, kod parçacığı ile kontrol etmeden SEA yazılımını uygulamalarıdır. Bu çalışmada kriter kod parçacığı ile kontrol edilmiştir. Bu şekilde daha doğru ve çok miktarda veri elde edilmiştir.

4.3.2. Çift T Kaynak Bağlantılı Bir Yapıda Gerilme Konsantrasyon Faktörü Parametrik Formülasyonu

Belirlenen parametre aralıkları ile T bağlantıda olduğu gibi simetrik çift T kaynak bağlantılı yapıda da Latin hiper küp metodu ile 8500 adet eşit şekilde veri dağılımı sağlanmıştır. Aynı verilerle girdi değerleri oluşturularak kod parçacığı uygulanmıştır. 1,200,000 iterasyonla yapay sinir ağı eğitimi gerçekleştirilmiş ve parametrik denklem oluşturulmuştur. Eğitim neticesinde yeni bir parametrik formül elde edebilmek için bias ve ağırlık matrisleri tespit edilmiştir. Bu işlemler çekme ve eğilme zorlama durumları için de ayrı ayrı yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde çekme zorlama durumu için tespit edilen bias ve ağırlık matrisler Çizelge 4.8'te verilmektedir.

Çizelge 4.8. Yapay sinir ağı ile çift T kaynak bağlantılarda çekme zorlama durumu için belirlenen matris sonuçları

$$X_{offset} = \begin{bmatrix} -1.0253 \\ -1.0023 \\ -1.0153 \\ -1.1622 \\ -1.0152 \\ -1.0690 \\ -1.4198 \end{bmatrix} \quad X_{gain} = \begin{bmatrix} 0.0203 \\ 0.0228 \\ 0.0204 \\ 0.0432 \\ 0.0202 \\ 0.6897 \\ 2.4691 \end{bmatrix} \quad Y_{offset} = [40.1785] \quad Y_{gain} = [39.4210]$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} -0.1546 \\ 0.4658 \\ 0.6736 \\ 6.0321 \\ -2.4219 \end{bmatrix} \quad b_2 = \begin{bmatrix} -5.4409 \\ -7.1155 \\ -4.7614 \\ 1.5204 \\ 7.4001 \end{bmatrix} \quad b_3 = [10.8205]$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} -1.6873 & -0.3703 & 0.0342 & -0.1182 & 0.3483 & -0.0158 & -0.5809 \\ -1.0131 & -2.2942 & -0.8511 & -0.0678 & 3.5944 & -0.4090 & 0.2374 \\ -0.3418 & 1.9819 & -0.1102 & -0.0368 & 0.0041 & -0.0082 & 0.0179 \\ 0.5676 & 5.4497 & 4.0010 & -0.2551 & -3.0488 & -0.1500 & 0.9373 \\ -5.3840 & 4.3683 & 0.8961 & 0.1394 & -0.7429 & 0.4462 & -0.5756 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -0.5835 & 23.9060 & 3.2428 & 0.1725 & 12.2036 \\ 4.2430 & 4.6548 & -1.8897 & 0.1997 & 5.4505 \\ 6.1164 & 4.8940 & -1.3513 & -1.8929 & 10.1380 \\ 1.0016 & 0.4622 & -14.7995 & -0.1805 & 14.8438 \\ 4.5449 & -5.2963 & 3.9875 & -7.0185 & -0.5240 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = [0.0002 \quad 12.2485 \quad -0.5265 \quad 0.0790 \quad -0.0028]$$

Eğilme zorlama durumu için ise bias ve ağırlık matrisleri Çizelge 4.9'de verilmektedir.

Çizelge 4.9. Yapay sinir ağı ile çift T kaynak bağlantılarda moment zorlama durumu için belirlenen matris sonuçları

$$X_{offset} = \begin{bmatrix} -1.0254 \\ -1.0021 \\ -1.0163 \\ -1.1622 \\ -1.0199 \\ -1.0690 \\ -1.4198 \end{bmatrix} \quad X_{gain} = \begin{bmatrix} 0.0204 \\ 0.205 \\ 0.204 \\ 0.0432 \\ 0.0202 \\ 0.6897 \\ 2.4691 \end{bmatrix} \quad Y_{offset} = [5.4232] \quad Y_{gain} = [4.4146]$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} -0.7838 \\ 1.9604 \\ 16.2694 \\ 1.6434 \\ -1.5892 \end{bmatrix} \quad b_2 = \begin{bmatrix} 1.6887 \\ -0.6087 \\ -2.1997 \\ 16.0981 \\ 2.1271 \end{bmatrix} \quad b_3 = [-6.5770]$$

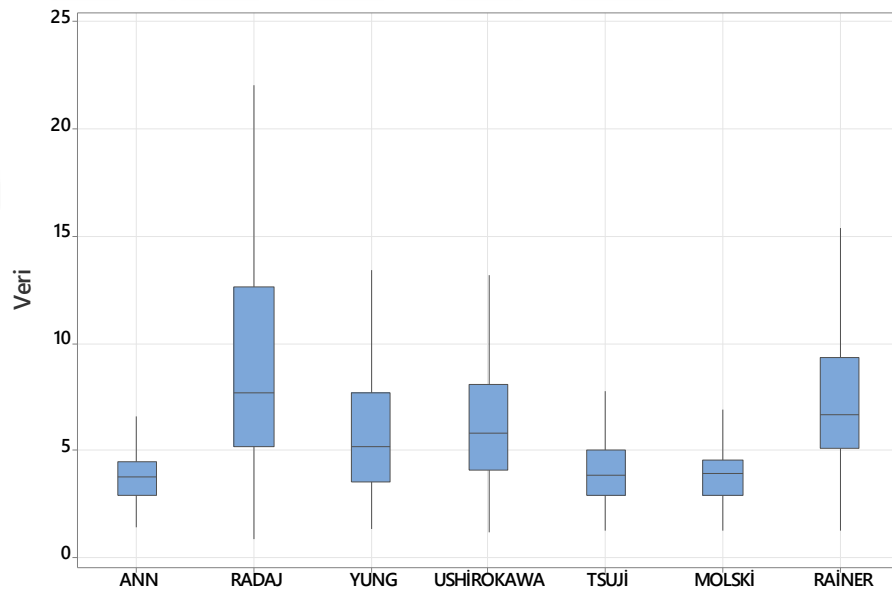
$$W_1 = \begin{bmatrix} 1.0414 & -0.8548 & 0.0776 & 0.1234 & -0.4936 & -0.0211 & -0.222 \\ -0.0747 & 1.6069 & 0.0222 & -0.0059 & 0.1342 & -0.0054 & 0.5396 \\ -0.0883 & 16.8858 & -0.1288 & -0.0475 & 0.0727 & 0.0212 & -0.6906 \\ -0.2640 & 1.4861 & -0.0249 & -0.0392 & 0.2032 & 0.0006 & 0.3948 \\ 0.0917 & -1.1995 & -0.0218 & 0.0106 & -0.2116 & 0.0046 & -0.6047 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -0.0296 & 10.0979 & 1.0778 & -1.2251 & 6.8205 \\ -3.0212 & 66.8266 & 11.6246 & -20.6030 & 34.2873 \\ -0.6384 & 46.4195 & -0.5378 & -2.1134 & 39.9894 \\ 34.7770 & -97.2764 & 1.3040 & 86.1564 & -33.6184 \\ -1.4482 & 3.2598 & 1.1689 & -8.8152 & -4.6136 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = [-10.7290 \quad 0.3637 \quad -0.1332 \quad -0.4840 \quad 16.6474]$$

Parametrik denklemler oluşturulduktan sonra literatürdeki çalışmalar ile SCF değerleri karşılaştırılmıştır. Çekme zorlama durumu için elde edilen sonuçlar Radaj (Oswald ve ark. 2019; Radaj 1986; Radaj ve Zhang 1990, 1991), Yung (Yung ve Lawrence 1985), Ushirokawa (Ushirokawa ve Nakayama 1983; Molski ve ark. 2020), Tsuji (TSUJI 1990), Molski (Molski ve ark. 2020), Rainer (Oswald ve ark. 2019; Rainer 1978; Rainer 1983) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların hepsi literatürdeki

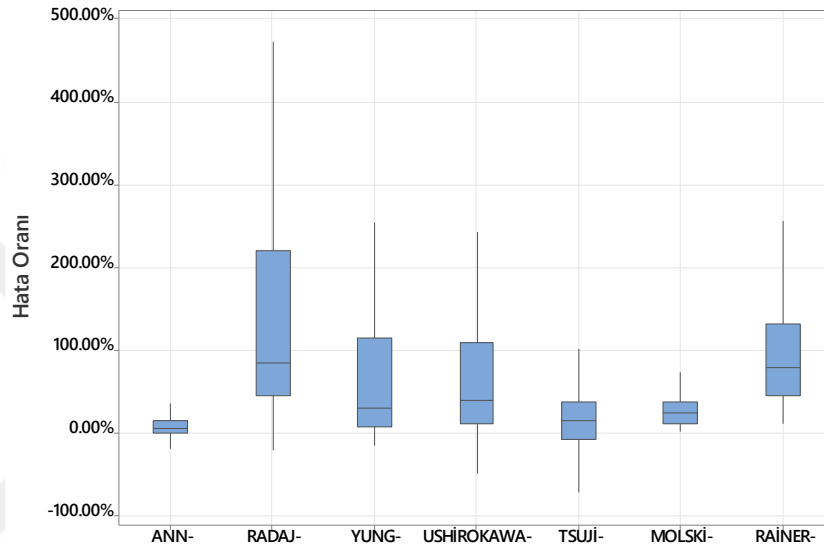
çalışmalara uygun olabilmesi için kaynak açısı 45 derecede gerçekleştirilmiştir. Verilerin karşılaştırmaları kutu grafikleri olarak Şekil 4.22’de gösterilmektedir. Bu şekle göre karşılaştırmalarda veri dağılımlarında bazı çalışmalarda oldukça geniş olarak dağıldığı görülmektedir. ANN, Tsuji ve Molski karşılaştırmalarında birbirlerine yakın dağılımlar elde edilmektedir. YSA modelinde SCF veri değerlerinin dağılımı minimum 1.88, maksimum 6.91, Q1 değeri 3.29, Q3 değeri 4.93, medyan değeri ise 4.14 elde edilmiştir. Bu değerlere en uzak Radaj denklemi olup SCF veri değerlerinin dağılımında minimum 1.41, maksimum 22.04, Q1 değeri 5.59, Q3 değeri 12.83, medyan değeri ise 8.04 belirlenmiştir. Tsuji denklemine göre SCF veri değerlerinin dağılımında minimum 1.79, maksimum 8.04, Q1 değeri 3.38, Q3 değeri 5.40, medyan değeri ise 4.23 belirlenmiştir. Molski denklemine göre ise SCF veri değerlerinin dağılımında minimum 1.79, maksimum 7.19, Q1 değeri 3.29, Q3 değeri 4.89, medyan değeri ise 4.28 belirlenmiştir. Bu değerlere göre veri dağılımı açısından Molski oldukça yakın olup Q3 değerinde Tsuji denklemine daha yüksek olduğu görülmektedir.



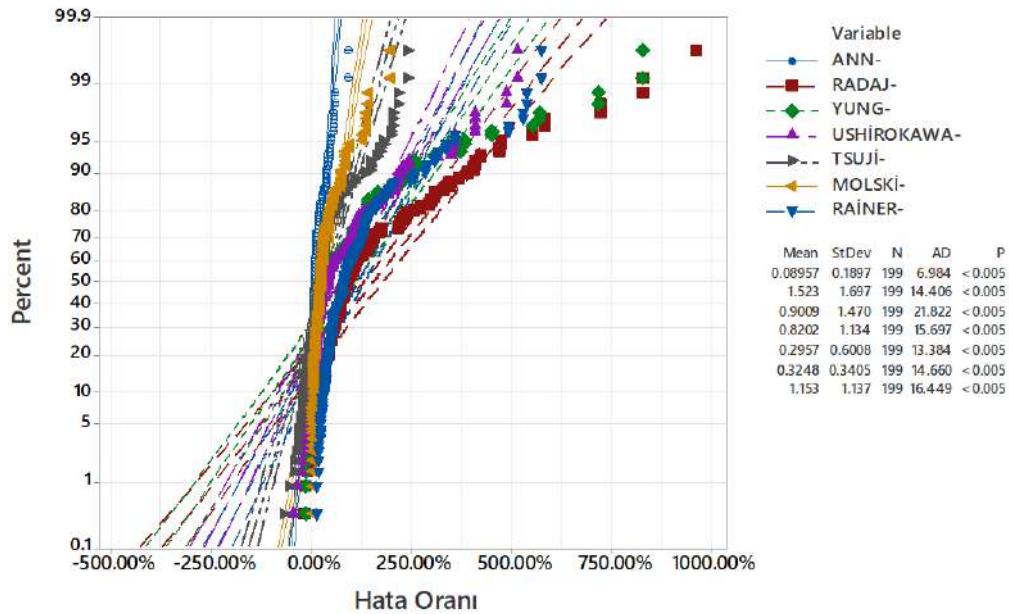
Şekil 4.22. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için verilerin kutu grafiği ile karşılaştırılması

Karşılaştırılma sadece verilere göre değil hata oranlarına göre de yapılmıştır. Şekil 4.23’te literatürdeki çalışmaların hata oranlarının kutu grafiği ile karşılaştırması gösterilmektedir. Karşılaştırmalara göre oluşturulan ANN parametrik denklemi ile diğer çalışmalardan daha az hata oranları elde edilmektedir. YSA modelinde SCF hata oranı minimum -%8.57, maksimum %42.19, Q1 değeri %8.32, Q3 değeri %22.99, medyan değeri ise %13.96 elde edilmiştir. Bu değerlere en uzak Radaj denklemi olup SCF hata oranı minimum -%10.66, maksimum %470.92, Q1 değeri %52.47, Q3 değeri %225.03,

medyan değeri ise %91.94 belirlenmiştir. Tsuji denklemine göre SCF hata oranı minimum %59.80, maksimum %107.11, Q1 değeri %1.07, Q3 değeri %46.18, medyan değeri ise %23.63 belirlenmiştir. Molski denklemine göre ise SCF hata oranı minimum %12.53, maksimum %79.08, Q1 değeri %20.40, Q3 değeri %46.35, medyan değeri ise %33.94 belirlenmiştir. Bu değerlere göre hata oranı açısından Molski denklemindeki sonuçlar daha dar aralıkta hatalar vermiş fakat Tsuji denklemindeki medyan değerleri daha az değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 4.23'te gösterildiği gibi tüm parametrelerde en olumlu sonucun YSA parametrik denkleminde olduğu görülmektedir.



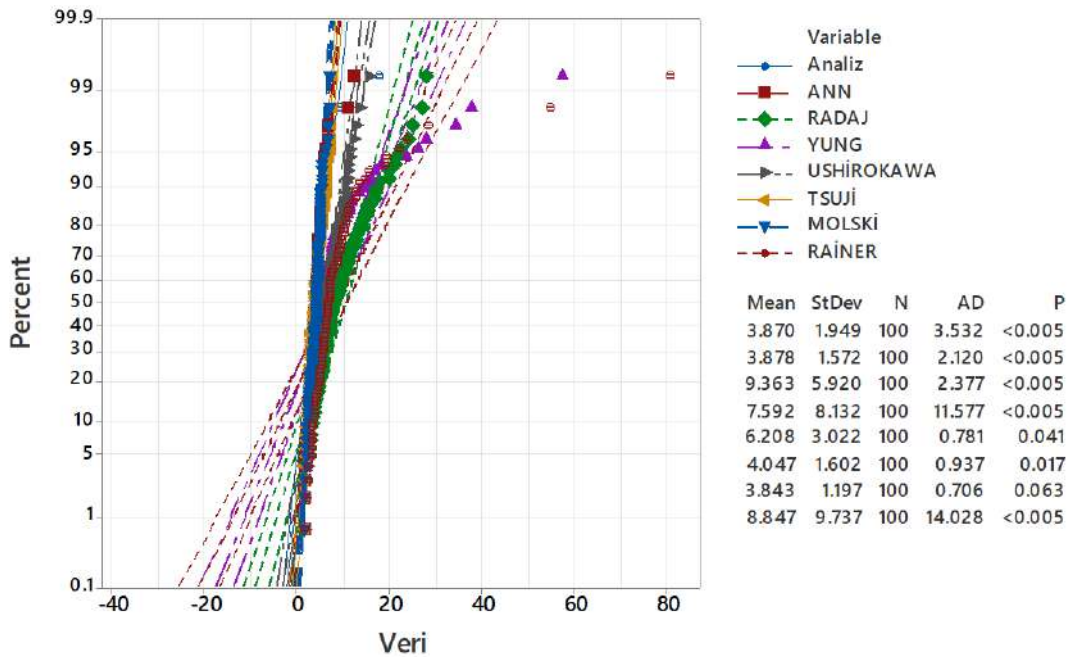
Şekil 4.23. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için hata oranlarının kutu grafiği ile karşılaştırılması



Şekil 4.24. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için hata oranlarının normal dağılım ile karşılaştırılması

Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlama durumu için hata oranlarının olasılıksal normal dağılım grafiği Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Hata oranlarının olasılıksal olarak dağılımlarına bakıldığında Radaj, Yung, Ushirokawa ve Yung çok yüksek hata oranları ile dağılım sağladığı görülmektedir. En olumlu sonuçlar YSA'da olup Molski ve Tsuji karşılaştırıldığında medyan değeri Tsuji denkleminde daha düşük olmasına rağmen daha yüksek hata oranı belirleme olasılığı daha fazladır. Molski denklemine göre şekilde gösterildiği gibi hata oran genişlikleri daha azdır. Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlama durumu için YSA parametrik denkleminin istatistiksel verilere göre daha olumlu sonuç verdiği görülmektedir.

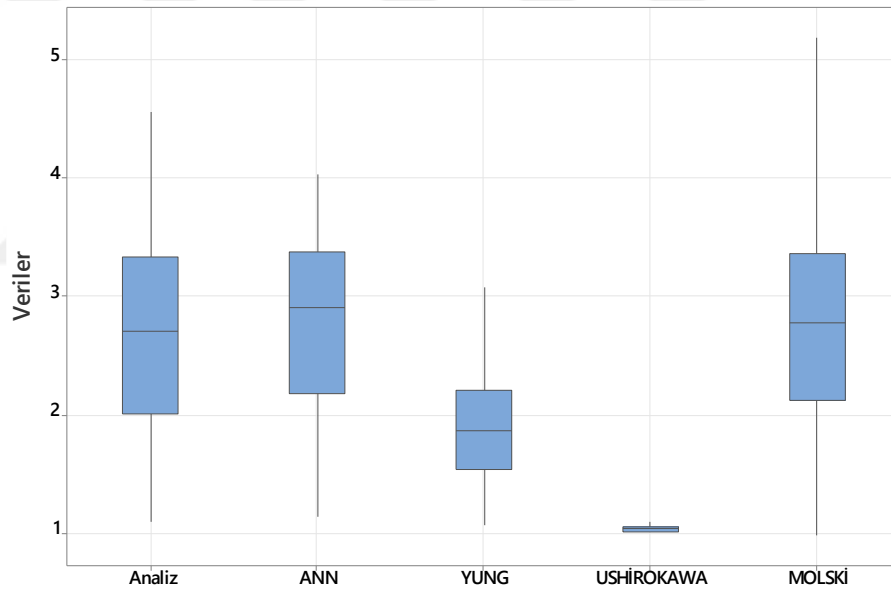
Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlama durumu için verilerin olasılıksal normal dağılım grafiği Şekil 4.25'de gösterilmektedir. Verilerin olasılıksal olarak dağılımlarına bakıldığında Radaj, Yung, Ushirokawa ve Yung çok daha geniş veri dağılım sağladığı görülmektedir. En dar aralıktaki sonuçlar YSA ve Molski denklemlerinde olup Tsuji daha düşük daha yüksek ortalamaya sahiptir. Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlama durumu için YSA parametrik denkleminin istatistiksel verilere göre veri dağılımında da en yakın sonuçları verdiği görülmektedir.



Şekil 4.25. Çift T kaynaklı bağlantı çekme zorlama için verilerin normal dağılım ile karşılaştırılması

Çift T kaynaklı bağlantıda sadece çekme zorlaması değil eğilme zorlaması için moment de uygulanmıştır. Latin hiper küpte dağıtılan girdi verileri moment ile zorlanan yapıda da kullanılmıştır. Kod parçacığı çalıştırılarak SCF değerleri elde edilmiş sonuçları yapay sinir ağı ile eğitilmiştir. Moment zorlama durumu içinde literatürdeki çalışmalar

ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Eğilme zorlama durumu için verilerin kutu grafiği ile karşılaştırılması Şekil 4.26'te gösterilmektedir. SEA sonuçlarına göre SCF veri değerlerin dağılımı minimum 1.11, maksimum 4.55, Q1 değeri 2.02, Q3 değeri 3.34, medyan değeri ise 2.71 elde edilmiştir. YSA modelinde SCF verilerinin dağılımında minimum 1.15, maksimum 4.03, Q1 değeri 2.18, Q3 değeri 3.38, medyan değeri ise 2.90 elde edilmiştir. Bu değerlere en uzak Molski denklemi olup SCF veri değeri minimum 1, maksimum 5.18, Q1 değeri 2.12, Q3 değeri 3.37, medyan değeri ise 2.78 belirlenmiştir. Yung denklemine göre SCF veri değerlerinin dağılımı minimum 1.08, maksimum 3.07, Q1 değeri 1.54, Q3 değeri 2.21, medyan değeri ise 1.86 belirlenmiştir. Bu değerlere göre veri dağılımı açısından Yung ve Molski denklemlerinin daha yakın dağılım elde ettiği görülmektedir. Molski denkleminin sonuçları daha geniş aralıklarda olduğu fakat medyan değerinin daha yakın olduğu görülmektedir. YSA ile elde edilen parametrik denklem sonuçlarına göre en yakın sonuçların bu denkleme ait olduğu görülmektedir.

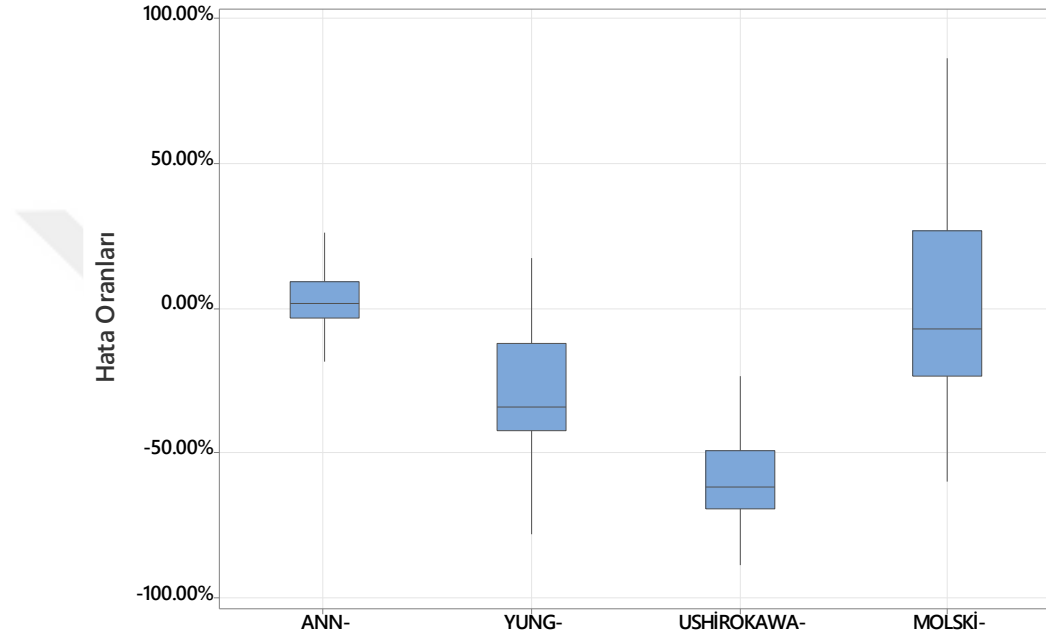


Şekil 4.26. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için verilerin kutu grafiği ile karşılaştırılması

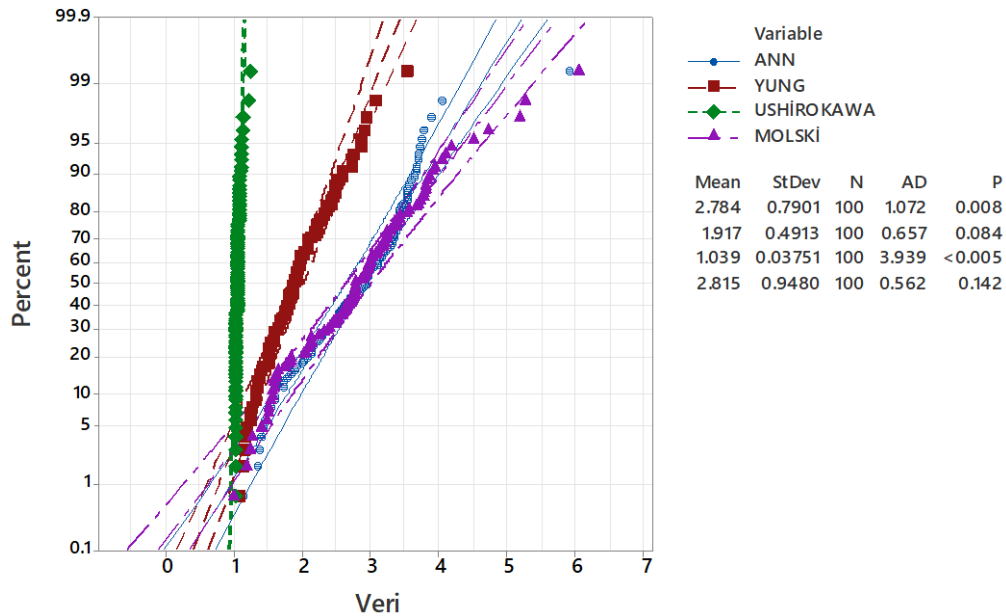
Literatürde eğilme zorlaması için bulunan Yung (Yung ve Lawrence 1985), Ushirokawa (Ushirokawa ve Nakayama 1983; Molski ve ark. 2020), Molski (Molski ve ark. 2020), Rainer (Oswald ve ark. 2019; Rainer 1978; Rainer 1983) parametrik formülleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Eğilme zorlama durumu için hata oranlarının karşılaştırılması Şekil 4.27'de gösterilmektedir.

YSA modelinde SCF hata oranı dağılımı minimum -%18.01, maksimum %25.67, Q1 değeri -%3.45, Q3 değeri %8.81, medyan değeri ise %1.53 elde edilmiştir. Bu değerlere en uzak Ushirokawa denklemi belirlenmiştir. Molski denklemine göre SCF hata

oranı dağılımı minimum $-%59.77$, maksimum $%85.82$, Q1 değeri $-%23.75$, Q3 değeri $%26.44$, medyan değeri ise $-%7.28$ belirlenmiştir. Yung denklemine göre SCF hata oranı dağılımı minimum $-%77.78$, maksimum $%16.86$, Q1 değeri $-%42.53$, Q3 değeri $-%12.64$, medyan değeri ise $-%34.10$ belirlenmiştir. Bu değerlere göre hata oranı açısından Molski denklemindeki sonuçlar daha geniş aralıkta hatalar vermiş ve medyan değerlerinin daha az değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 4.27 gösterildiği gibi tüm parametrelerde en olumlu sonucun YSA parametrik denkleminde olduğu görülmektedir.



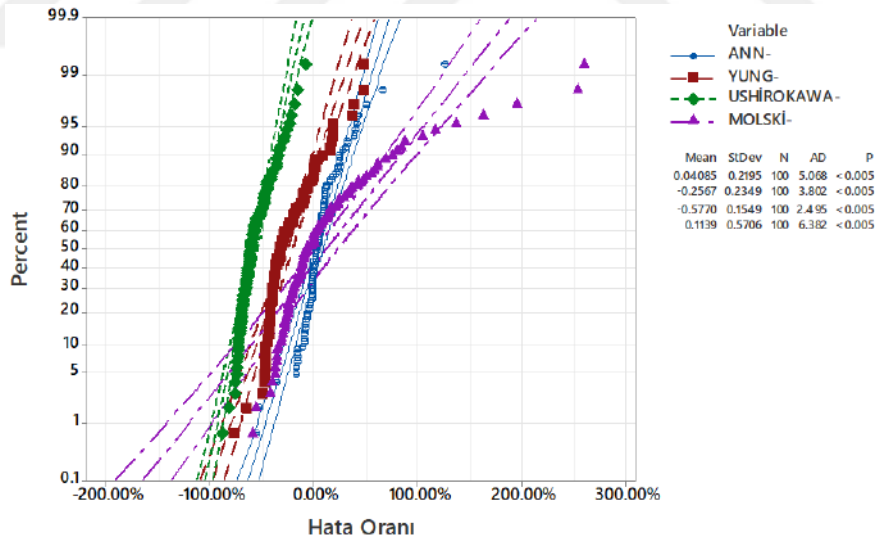
Şekil 4.27. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için hata oranlarının kutu grafiği ile karşılaştırılması



Şekil 4.28. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için verilerin normal dağılım ile karşılaştırılması

Verilerin olasılıksal normal dağılımı ile karşılaştırılması Şekil 4.28'te gösterilmektedir. Verilerin olasılıksal olarak dağılımlarına bakıldığında YSA ve Molski çok daha geniş ve yüksek değerlerde dağılım sağladığı görülmektedir. En dar aralıktaki sonuçlar Ushirokawa ve Yung denklemlerinde olduğu belirlenmiştir. Ushirokawa denkleminde çok düşük değerlerde SCF değerleri belirlenmiştir. Çift T kaynaklı bağlantıda eğilme zorlama durumu için YSA parametrik denkleminin istatistiksel verilere göre veri dağılımında da en yakın sonuçları verdiği görülmektedir. YSA denkleminde sonra Molski denkleminde daha yakın veri dağılımı sağlanmaktadır.

Hata oranlarının olasılıksal normal dağılımı ile karşılaştırılması Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Hata oranlarının olasılıksal olarak dağılımlarına bakıldığında Molski çok yüksek ve geniş aralıklı hata oranları ile dağılım sağladığı görülmektedir. En olumlu sonuçlar YSA'da olup Yung denkleminin hata oranı genişlik yoğunluğunun daha az olduğu görülmektedir. Yung ve Molski denklemleri karşılaştırıldığında Molski denkleminin medyan değeri daha düşük olmasına rağmen daha yüksek hata oranı olasılığı olduğu görülmektedir. Yung denklemine göre şekilde gösterildiği gibi hata oran genişlikleri daha azdır. Çift T kaynaklı bağlantıda eğilme zorlama durumu için YSA parametrik denkleminin istatistiksel verilere göre daha olumlu sonuç verdiği görülmektedir.

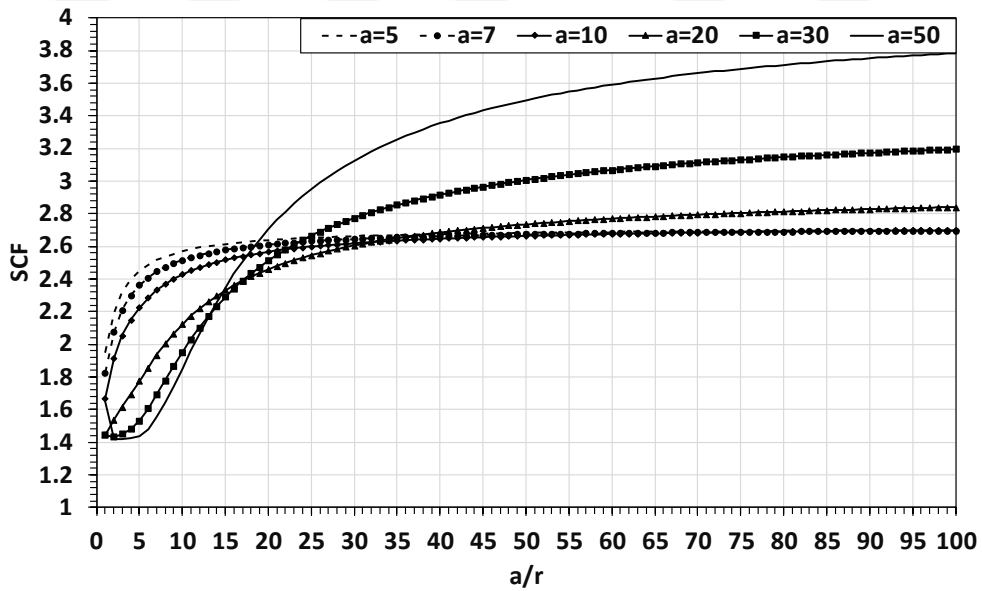


Şekil 4.29. Çift T kaynaklı bağlantı eğilme zorlama için hata oranlarının normal dağılım ile karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlar çalışmalar ile kullanılarak ortalama hata oranları en düşük bu çalışmada hazırlanan yapay sinir ağı eğitimi elde edilen parametrik formül ile tespit edilmiştir. Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlama durumu için YSA'da %4.80, Radaj denkleminde %84.50, Yung denkleminde %29.73, Ushirokawa denkleminde %38.59,

Tsuji denkleminde %13.64, Molski denkleminde %22.97, Rainer denkleminde %77.53 ortalama hata oranları tespit edilmiştir. Çekme zorlama durumu için Q1 hata oranları değerleri YSA'da %0.19, Radaj denkleminde %45.26, Yung denkleminde %7.30, Ushirokawa denkleminde %10.48, Tsuji denkleminde -%7.48, Molski denkleminde %11.37, Rainer denkleminde %45.20 olarak tespit edilmiştir. Çekme zorlama durumu için Q3 hata oranları değerleri YSA'da %14.84, Radaj denkleminde %219.57, Yung denkleminde %114.57, Ushirokawa denkleminde %109.09, Tsuji denkleminde %36.16, Molski denkleminde %36.94, Rainer denkleminde %131.26 olarak tespit edilmiştir.

Çift T kaynaklı bağlantıda eğilme zorlama durumu için YSA'da %1.29, Yung denkleminde -%33.88, Ushirokawa denkleminde -%62.04, Molski denkleminde -%7.48 ortalama hata oranları tespit edilmiştir. Eğilme zorlama durumu için Q1 hata oranları değerleri YSA'da -%3.73, Yung denkleminde -%42.15, Ushirokawa denkleminde -%69.37, Molski denkleminde -%23.72 olarak tespit edilmiştir. Eğilme zorlama durumu için Q3 hata oranları değerleri YSA'da %8.81, Yung denkleminde -%12.49, Ushirokawa denkleminde -%49.40, Molski denkleminde %26.71 olduğu görülmektedir. Karşılaştırmalar neticesinde bu çalışmada hazırlanan parametrik formül ile gerilme konsantrasyon faktörü belirlenmesinde daha doğru sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

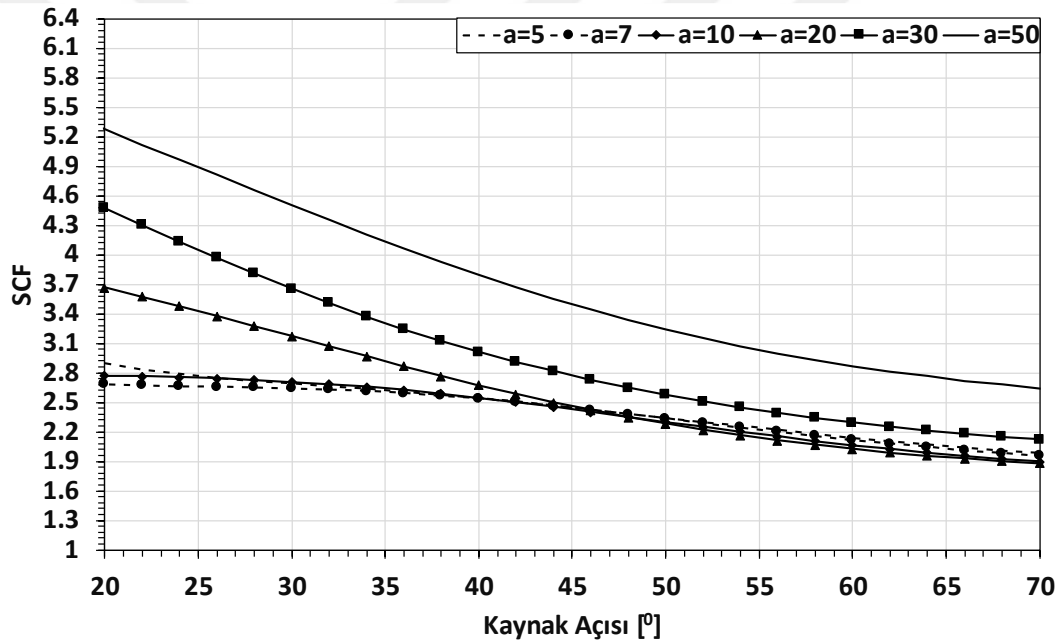


Şekil 4.30. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için a/r parametresine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlaması için Şekil 4.30'da gösterilen YSA ile eğitilen önerilen parametrik denkleme göre a/r parametreleri baz alınarak SCF değerleri verilmiştir. $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$, ve $t_1=1.4a$ denkleminde göre hazırlanmıştır. Kaynak

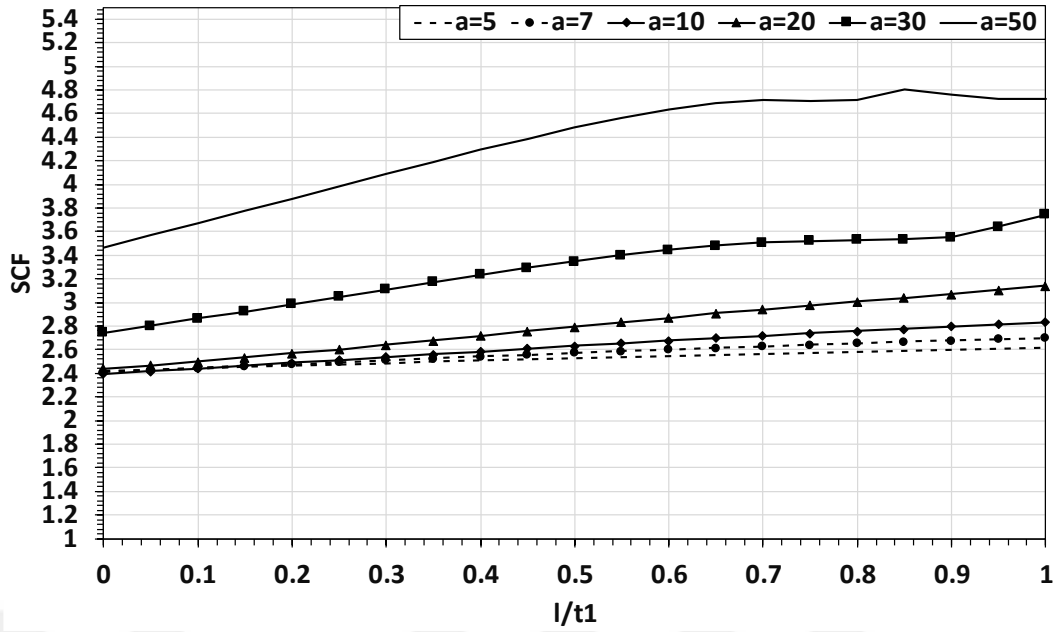
boyunu (a) 5, 7, 10, 20, 30 ve 50 mm'de incelenmiştir. a/r 1 ile 100 arasında 1 hassasiyetle incelenmiştir. Bu sonuçlara göre a/r parametresine göre doğrusal olmayan bir davranış sergilediği belirlenmiştir.

Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlaması için kaynak açısının etkisini ve kalınlığa göre değişimini belirlemek için önerilen grafik Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Bu grafik $l=1$, $g=2$, $t_1=t_2$, $r=1$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak açısı arttıkça SCF değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Kaynak kalınlığı arttıkça da SCF değerleri artmaktadır. Fakat değişimler doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. 45 dereceye yaklaştıkça küçük kaynak kalınlıklarında doğrusal olmayan sonuçlar oluşmaktadır. SCF değişim oranı $a=5$ mm'de %43.25 iken $a=50$ mm'de %58.41 olarak bulunmuştur.



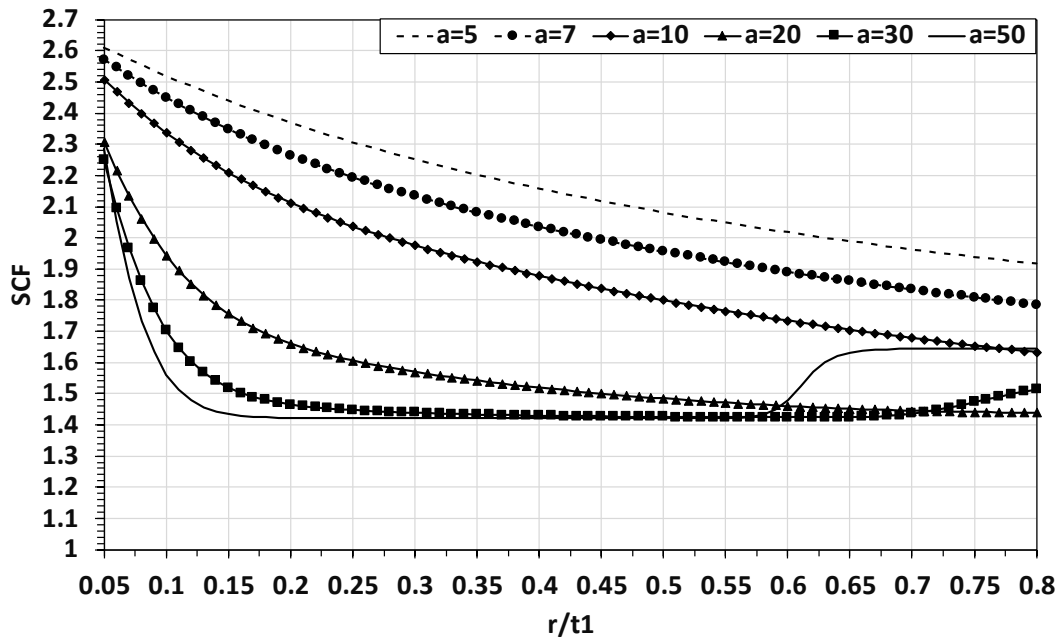
Şekil 4.31. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için kaynak açısına göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlaması için kaynak penetrasyonu etkileri Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Penetrasyon etkilerinin grafiği $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$, $r=1$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak penetrasyonu arttıkça SCF değerinin arttığı, ancak etkisinin kaynak boğaz kalınlığına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. 0 ile 1 arasında l/t_1 oranı için alınan verilere göre SCF değişiminin 5 mm boğaz kalınlığında %8.31, 50 mm boğaz kalınlığında ise %36.17 olduğu belirlenmiştir. Kaynak kalınlığı arttıkça SCF değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

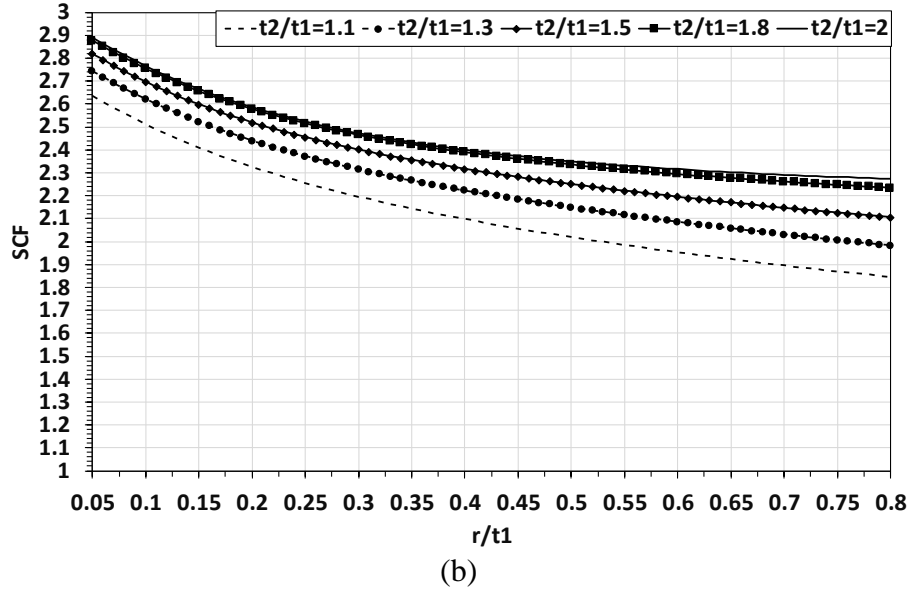


Şekil 4.32. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için kaynak penetrasyon etkilerine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlaması için Şekil 4.33'da kaynak ucundaki yarıçap değerlerinin etkilerine ait r/t_1 oranı, 0.05 ile 0.8 arasındaki değişimlere göre gösterilmiştir. Şekil 4.33 (a) kaynak boğaz kalınlığını ve Şekil 4.33 (b) t_2/t_1 'e göre etkilerini göstermektedir. Şekil 4.33 (a) verilen grafik $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$ ve $t_1=1.4a$ ve Şekil 4.33 (b)'de verilen grafik ise $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=10$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır.



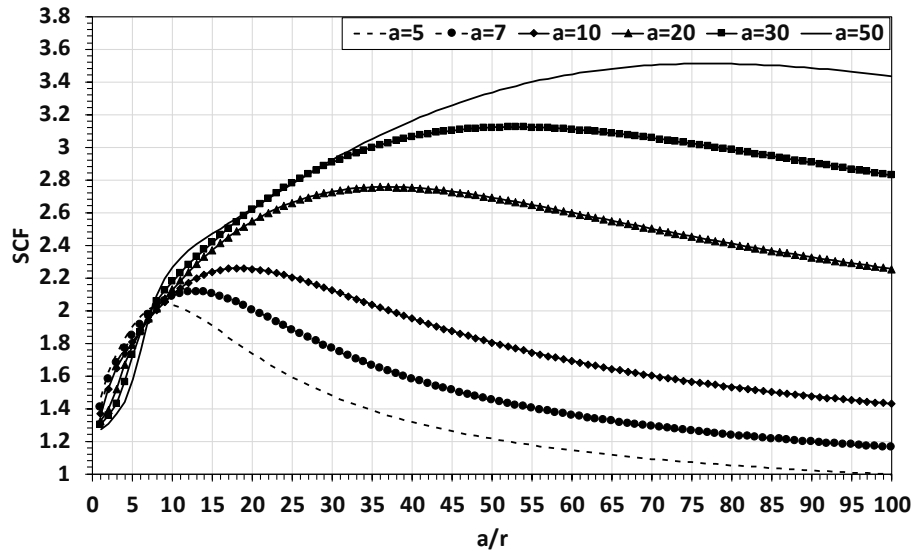
(a)



Şekil 4.33. Çift T bağlantılı yapıda çekme zorlaması için kaynak kalınlığı, malzeme kalınlıkları ve yarıçap değerlerinin gerilme konsantrasyon faktörlerine etkileri

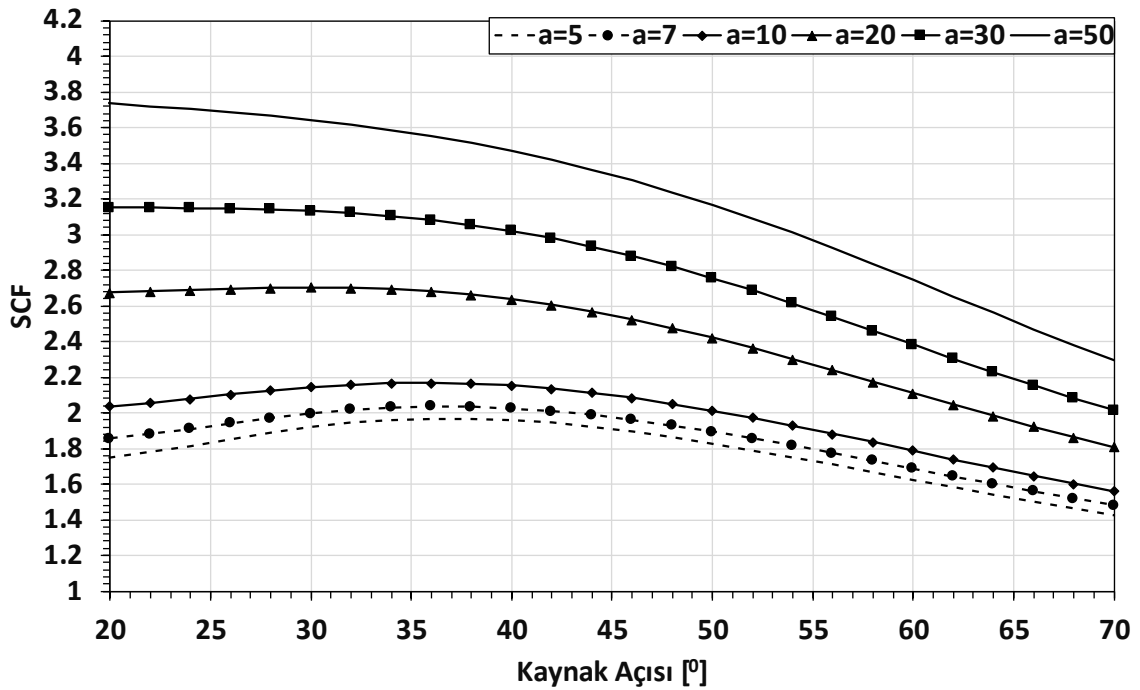
SCF değerinin iş parçası ile ana malzeme arasındaki kalınlık artış oranı arttıkça T bağlantılarda elde edilen sonuçlardan farklı olarak azaldığı görülmektedir.

Çift T kaynaklı bağlantıda çekme zorlaması için Şekil 4.34'da gösterilen YSA ile eğitilmiş önerilen denkleme göre a/r parametreleri baz alınarak SCF değerleri verilmiştir. Şekilde verilen grafik $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$, ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak boynu (a) 5, 7, 10, 20, 30 ve 50 mm'de incelenmiştir. a/r 1 ile 100 arasında 1 hassasiyetle incelenmektedir. Bu sonuçlara göre a/r parametresine göre doğrusal olmayan bir davranış sergilediği görülmüştür.



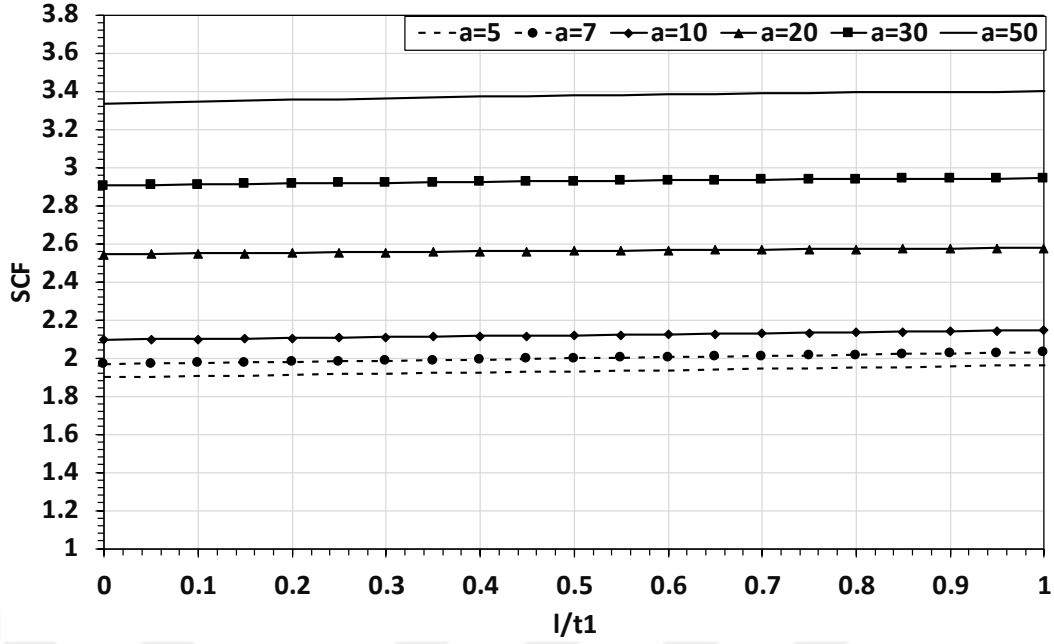
Şekil 4.34. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için a/r parametresine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Çift T kaynaklı bağlantıda eğilme zorlaması için kaynak açısının etkisini ve kalınlığa göre değişimini belirlemek için önerilen grafik Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Şekilde verilen grafik $l=1$, $g=2$, $t_1=t_2$, $r=1$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır. Kaynak açısı arttıkça SCF değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Kaynak kalınlığı arttıkça da SCF değerleri artmaktadır. Fakat değişimler doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. 45 dereceye yaklaştıkça küçük kaynak kalınlıklarında doğrusal olmayan sonuçlar oluşmakta ve SCF değişim oranı $a=5$ mm'de %34.59 iken $a=50$ mm'de %49.46 olarak bulunmuştur.



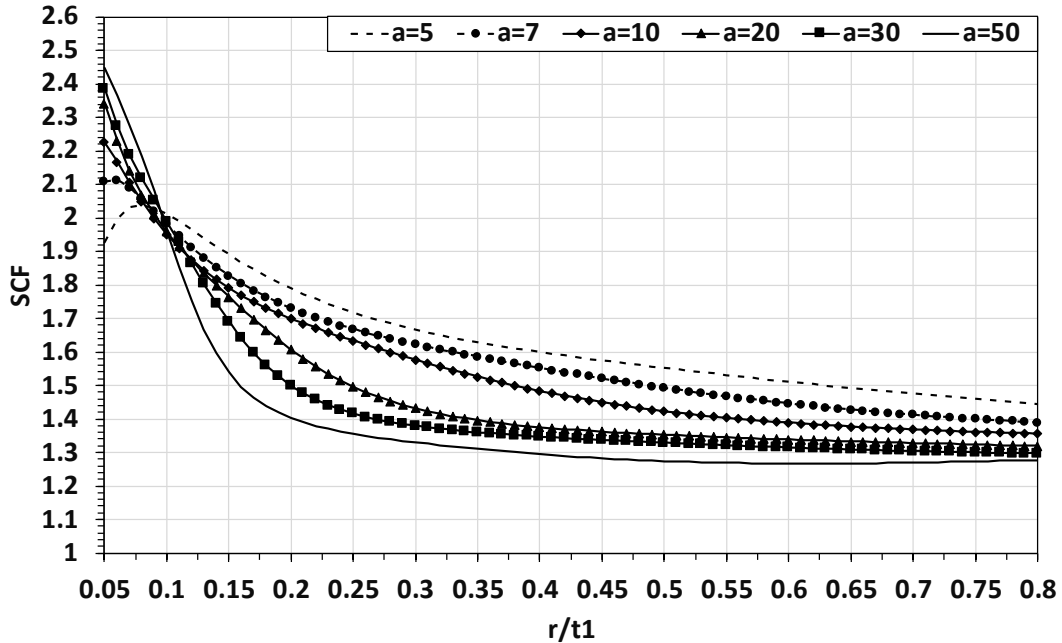
Şekil 4.35. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için kaynak açısına göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Çift T kaynaklı bağlantıda eğilme zorlaması için kaynak penetrasyon etkileri Şekil 4.36'de gösterilmiştir. $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$, $r=1$ ve $t_1=1.4a$ denkleminde göre hazırlanmıştır. Kaynak penetrasyon arttıkça SCF değerlerine oldukça düşük değişim oranları oluşmuştur. 0 ile 1 arasında l/t_1 oranı için alınan verilere göre SCF değişim oranları 5 mm boğaz kalınlığında %3.31, 50 mm boğaz kalınlığında ise %1.94 olduğu belirlenmiştir. Fakat kaynak kalınlığı arttıkça SCF değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

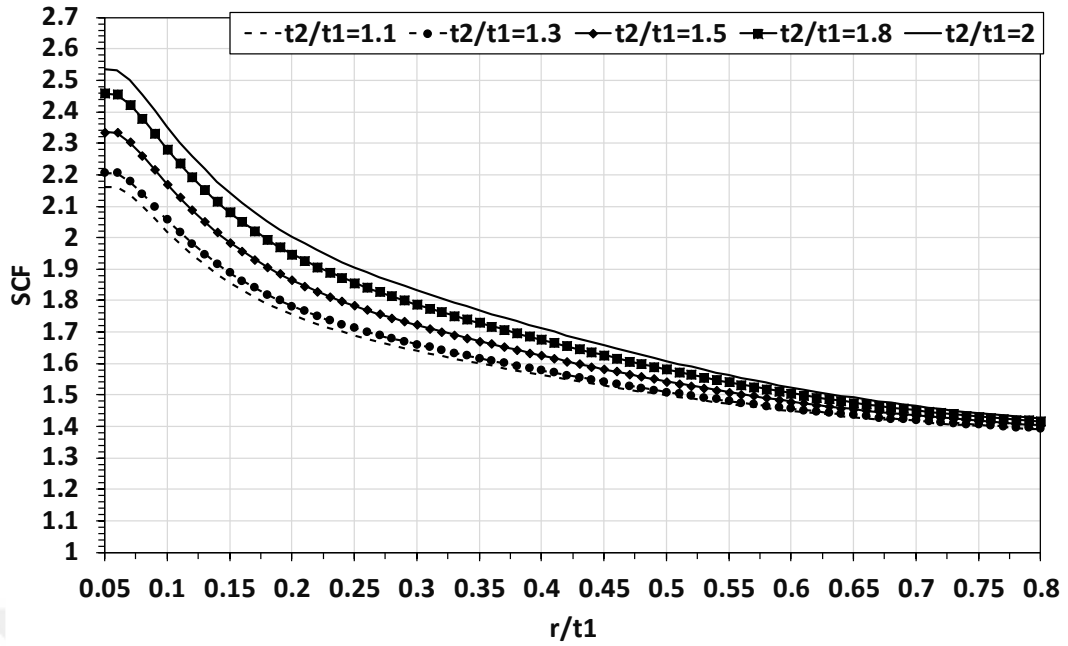


Şekil 4.36. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için kaynak penetrasyon etkilerine göre gerilim konsantrasyon faktörü değerleri

Çift T kaynaklı bağlantıda eğilme zorlaması için Şekil 4.37'de kaynak ucundaki yarıçap değerlerinin etkilerine ait r/t_1 oranı 0.05 ile 0.8 arasındaki değişimlere göre gösterilmiştir. Şekil 4.37 (a) kaynak boğaz kalınlığını ve Şekil 4.37 (b) t_2/t_1 'e göre etkilerini göstermektedir. Şekil 4.37 (a)'da verilen grafik $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=t_2$ ve $t_1=1.4a$ ve Şekil 4.37 (b)'de verilen grafik $l=1$, $g=2$, $\alpha=45$, $t_1=10$ ve $t_1=1.4a$ değerlerine göre hazırlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.37. Çift T bağlantılı yapıda eğilme zorlaması için kaynak kalınlığı, malzeme kalınlıkları ve yarıçap değerlerinin gerilme konsantrasyon faktörlerine etkileri

T ve çift T kaynak bağlantı yapılarında çekme ve eğilme zorlama durumları incelenmiş ve her zorlama tipinde ve yapısında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Çift T kaynaklı yapıda eğilme zorlamasında doğrusal olmayan sonuçların daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışmalar neticesinde literatürle de karşılaştırmalar yapılmış ve bu çalışma da kullanılan YSA ile elde edilen parametrik formüllerin daha az hata oranları verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle eğilme zorlamalarında doğrusal olmayan özellikler arttığı için SCF'nin daha doğru parametrelerle değerlendirilmesi için YSA modeli önerilmiştir.

4.4. Yorulma Test Sonuçları ve Karşılaştırılması

S960, S1100 iş parçası ve ana malzemeleri ile kaynak ucu taşlama, dövme ve kaynak sonrası işlemsiz olarak 92 adet numune hazırlanmıştır. Taşlama ve YFMD işlemleri gerçekleştirilirken 0.15-0.2 mm derinliğe sahip olacak şekilde işlemler gerçekleştirilmiştir. Bu değerler CMM ile taranarak doğrulanmıştır. Bu değerlerin gerilme konsantrasyonlarını değiştirme sebebi ile SEA modellemeleri CMM ile taranan modellemelerden gerçekleştirilmiştir. Böylelikle doğru normal gerilme tespitleri sağlanmıştır. Numunelere kaynak sonrası işlemler gerçekleştirildikten sonra XRD yöntemi ile 3 numuneden 0, 45, 90 derece farklı açıda ve 9 noktadan kalıntı gerilme

ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm konumları olarak ise 1, 10 ve 25 mm'den ölçüm değerleri alınmıştır. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunenin sonuçlarına göre kalıntı gerilme değerleri Çizelge 4.10'te belirtilmektedir. 1 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 40.7 MPa, 45 derecede ∓ 21.3 MPa ve 90 derecede ∓ 42 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir. 10 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 13 MPa, 45 derecede ∓ 17 MPa ve 90 derecede ∓ 9 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir. 25 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 18.9 MPa, 45 derecede ∓ 24.5 MPa ve 90 derecede ∓ 15.3 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunede 1, 10 ve 25 mm'den ölçülen kalıntı gerilme değerleri

	1 mm	10 mm	25 mm
0 ⁰	-244	-92	-71.1
45 ⁰	-223.7	-54.7	-76.9
90 ⁰	-226	-55.3	-112.6

Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunenin sonuçlarına göre kalıntı gerilme değerleri Çizelge 4.11'de verilmektedir. 1 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 36.5 MPa, 45 derecede ∓ 46.2 MPa ve 90 derecede ∓ 30.6 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir. 10 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 18.9 MPa, 45 derecede ∓ 21.4 MPa ve 90 derecede ∓ 7.8 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir. 25 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 20.8 MPa, 45 derecede ∓ 13.8 MPa ve 90 derecede ∓ 16.3 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.11. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış yapılmamış numunede 1, 10 ve 25 mm'den ölçülen kalıntı gerilme değerleri

	1 mm	10 mm	25 mm
0 ⁰	-71.5	-161.5	-36.1
45 ⁰	-148.5	-145.4	-73.7
90 ⁰	-113.5	-153.3	-35.4

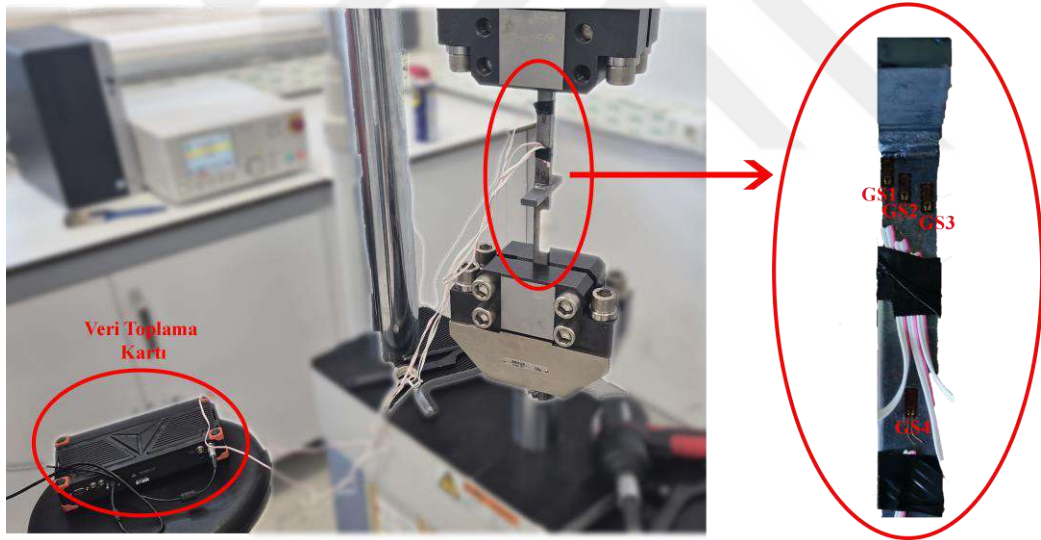
Kaynak sonrası YFMD işlemi yapılan numunenin sonuçlarına göre kalıntı gerilme değerleri Çizelge 4.12'de belirtilmektedir. 1 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 46.4 MPa, 45 derecede ∓ 26.2 MPa ve 90 derecede ∓ 30.8 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir. 10 mm ölçümlerde, 0 derecede ∓ 15.4 MPa, 45 derecede ∓ 25.5 MPa ve 90 derecede ∓ 9.8 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir. 25 mm

ölçümlerde, 0 derecede ∓ 17.9 MPa, 45 derecede ∓ 22.3 MPa ve 90 derecede ∓ 21 MPa kalıntı gerilmelerde tolerans değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.12. Kaynak sonrası YFMD işlemi yapılmış numunede 1, 10 ve 25 mm'den ölçülen kalıntı gerilme değerleri

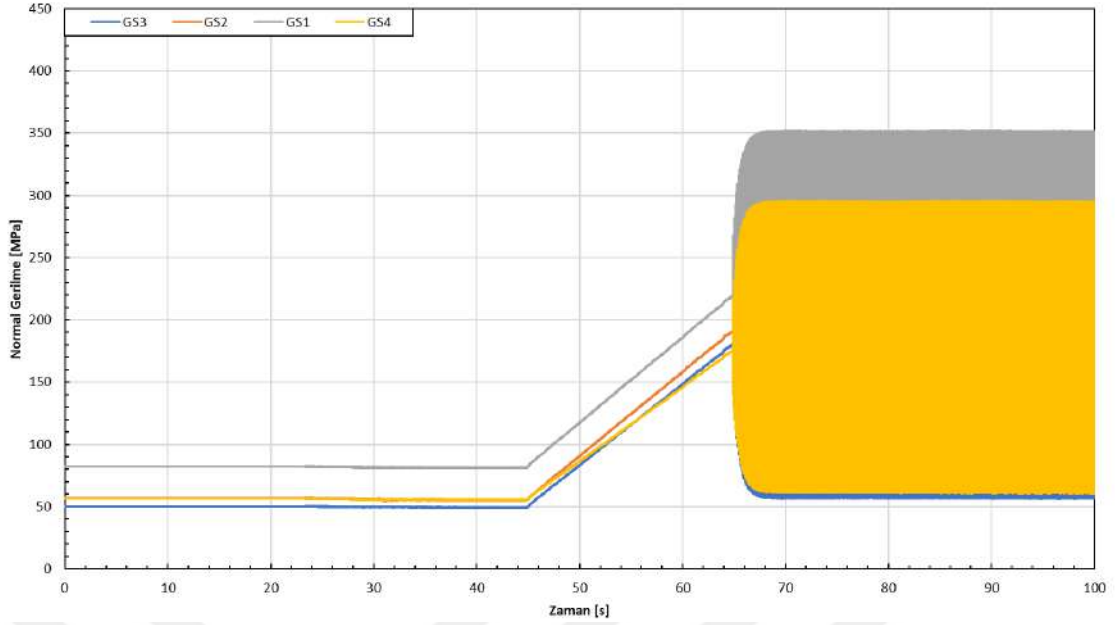
	1 mm	10 mm	25 mm
0 ⁰	-63.4	-31.2	-14.4
45 ⁰	-73.4	-45.9	-52.1
90 ⁰	-36.2	-74.8	41.4

Kalıntı gerilme ölçümleri tamamlandıktan sonra numuneler yorulma testlerine hazır hale getirilmiştir. Yorulma testlerine başlamadan önce gerinim ölçer sensörler (GS) ile 3 adet numuneye 4'er adet sensor bağlanarak normal gerilme ölçümleri alınmıştır. Sensor konumları sıcak nokta gerilme noktaları, nominal gerilme noktası ve kaynak ucuna yapıştırılarak ölçüm değerleri alınmıştır. Şekil 4.38'da GS sensörleri numuneden verileri toplanırken test düzeneği ve GS bağlanma yerleri gösterilmiştir.

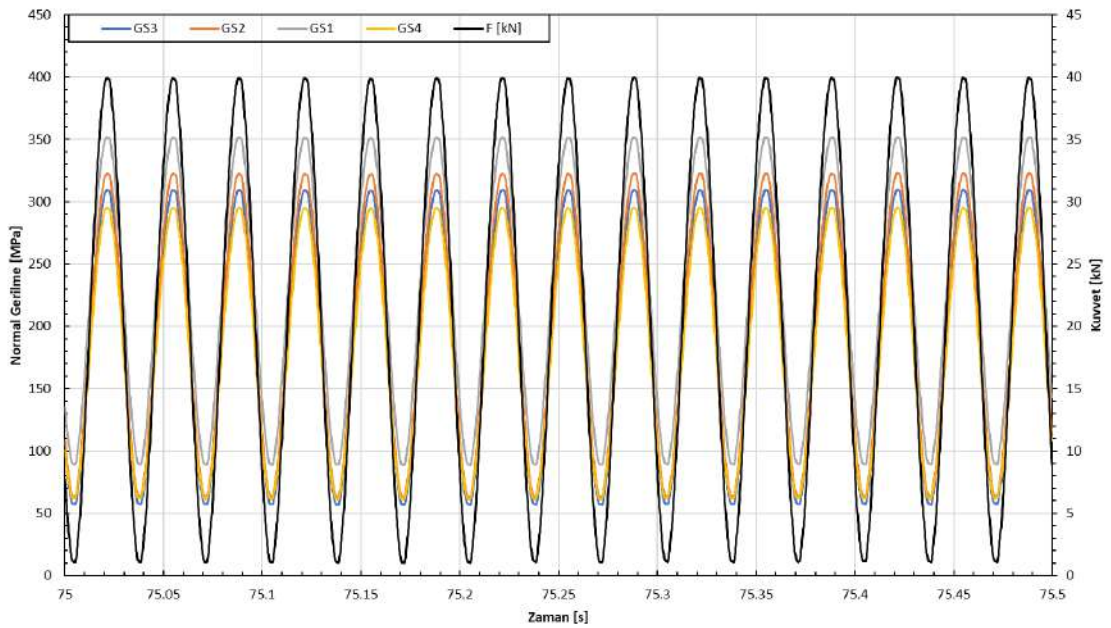


Şekil 4.38. Yorulma testleri öncesi GS bağlanarak gerilme değerlerinin elde edilmesi

Testlerdeki yük değerlerinden ziyade maksimum 40 kN ve minimum 1 kN ile sinüzoidal zorlamalar yapılarak gerilme değerleri kaydedilmiştir. Numunelere 1, 5, 10, 20 ve 30 Hz değerlerinde zorlamalar yapılmış olup bu değerler kayıt altına alınmıştır. Yorulma testlerinin hepsi 30 Hz zorlayıcı frekans ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.39'de 100s boyunca ölçülen veriler ve 75-75.5s arasında ölçülen normal gerilme değerleri gösterilmektedir.



(a)

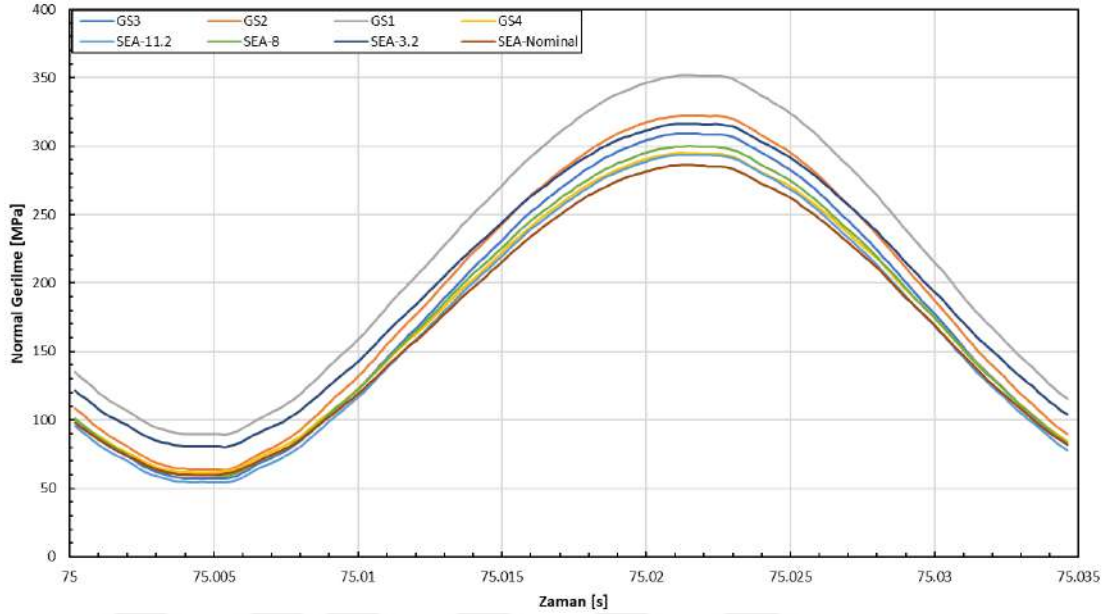


(b)

Şekil 4.39. 30 Hz zorlayıcı frekansla gerçekleşen GS ölçüm verileri (a) 0-100s (b) 75-75.5s

SEA ile deneysel olarak GS ile ölçülen veriler taranan CMM modellemeleri ile karşılaştırılmıştır. 3 numuneye bağlanan GS verileri ve SEA sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Şekil 4.40'da deneysel ve SEA ile karşılaştırmalar gösterilmektedir. SEA harmonik cevap analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. GS4 ve nominal gerilme karşılaştırmalarında ortalama -%2.8 hata oranı tespit edilmiştir. SEA'de ölçülen değerler genellikle daha düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. GS1 ile

karşılaştırıldığında -9.63% hata oranı, GS2 ile -7.54% , GS3 ile -4.48% ortalama hata oranları tespit edilmiştir.



Şekil 4.40. GS ölçümleri ve SEA harmonik cevap analizleri karşılaştırma

GS ve SEA karşılaştırma neticesinde 30 Hz zorlama yapılmasına karar verilmiştir. Böylelikle testlerin düşük frekanslı olanlara göre kısa süreli olması sağlanmıştır. Doğal frekanstan oldukça uzak olması sebebiyle karşılaştırmalar yapıldığında oldukça düşük farklar tespit edilmiştir. 1 ve 30 Hz arasında maksimum 0.33% fark, ortalama ise 0.22% fark olduğu tespit edilmiştir. Doğal frekans değeri CMM modal analizler neticesinde 1.mod'da 115.85 Hz tespit edilmiş olup zorlayıcı frekans değerinden oldukça uzak olduğu fark oranları neticesinde gözlemlenmiştir. GS ile ölçülen bu değerler Çizelge 4.13'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.13. Deneysel olarak GS ile ölçülen farklı frekanslardaki gerilme değerleri

	GS1- Maksimum	GS1- Minimum	GS2- Maksimum	GS2- Minimum	GS3- Maksimum	GS3- Minimum	GS4- Maksimum	GS4- Minimum
1 Hz	351.4457	86.41095	322.6162	61.16298	309.5091	55.04632	294.7453	49.59585
5 Hz	351.7271	86.45418	322.8099	61.16909	309.571	55.06284	294.9813	49.60081
10 Hz	351.8678	86.5234	323.133	61.20582	309.6639	55.10141	295.2175	49.64549
20 Hz	351.903	86.60134	323.1977	61.24869	309.8498	55.12346	295.4243	49.68027
30 Hz	352.22	86.61	323.23	61.31	310.16	55.14	295.72	49.73

Yorulma testlerinin hepsi bu karşılaştırmalar neticesinde 30 Hz zorlayıcı frekans ile yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Tüm zorlamalar sinüzoidal zorlamalar şeklinde gerçekleştirilmiş ve minimum kuvvet 0 kN olacak şekilde tanımlanmıştır. Gerilme oranı 0 belirlenmiş ve maksimum yükleme değişiklik göstermiştir. Yeni S-N eğrileri

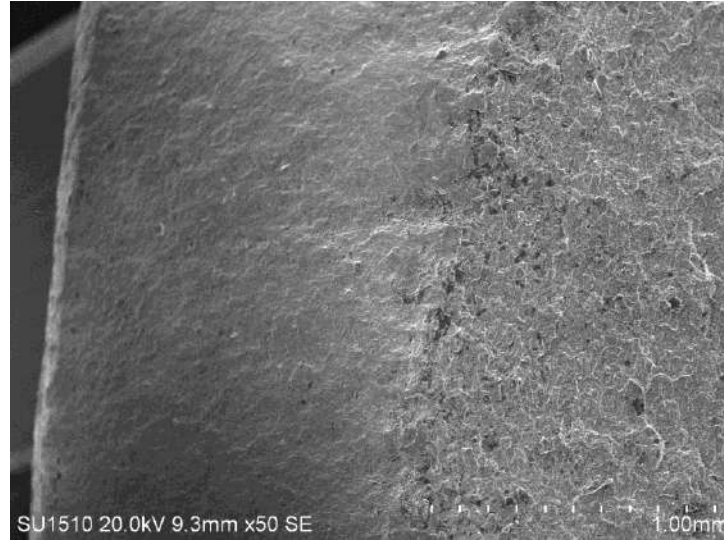
oluşturabilmek için en az 10 test yapılması gerekirken bir değişkende en az 14 test yapılarak S-N eğrileri oluşturulmuştur. Numunelerin hepsi ön görüldüğü gibi kaynak kökünden hasar görmüştür. Hasar gören farklı 4 numuneye ait kırılma bölgelerinden yorulma ve ani darbe hasar bölgeleri Şekil 4.41’de gösterilmektedir. Yorulma hasar bölgelerinin pürüzsüz ve parlak yüzey olduğu ani darbe bölgelerinin daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Ayrıca yorulma çatlak başlangıçlarının kaynak kökünden başladığı ve ilerlediği gözlemlenmiştir.



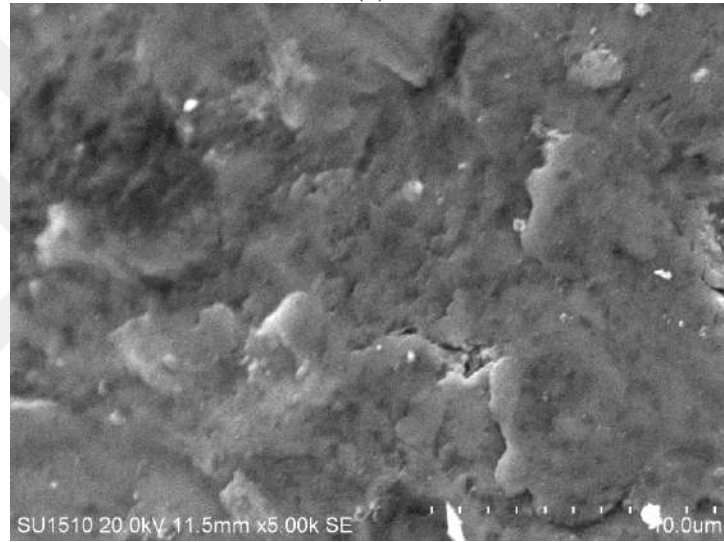
Şekil 4.41. Yorulma testleri sonrası hasar bölgeleri

Şekil 4.42 (a)’da 50 büyütme faktöründe prob 1 mm yükseklikte iken 9.3 mm uzaklık mesafesinde elektron gönderilerek elde edilen görüntüler gösterilmektedir. Burada pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin ayırt edilebilmektedir. Daha pürüzsüz olan yüzeyler yorulma hasar bölgesi, pürüzlü yüzeyler ise ani darbeden dolayı oluşan bölgelerdir. Bu bölgelerden yorulma hasar noktasından alınan görüntü Şekil 4.42 (b)’de, ani darbe hasar bölgesinden alınan görüntü ise Şekil 4.42 (c)’de gösterilmektedir. Bu görüntüler 10 mikronluk ölçekte alınmış olup, 5000 büyütme faktörü ile elde edilmiştir. Uzaklığı ise yorulma hasar görüntüsünde 11mm, ani darbe alınan hasar görüntüsünde 7.8mm mesafelerden elde edilmiştir.

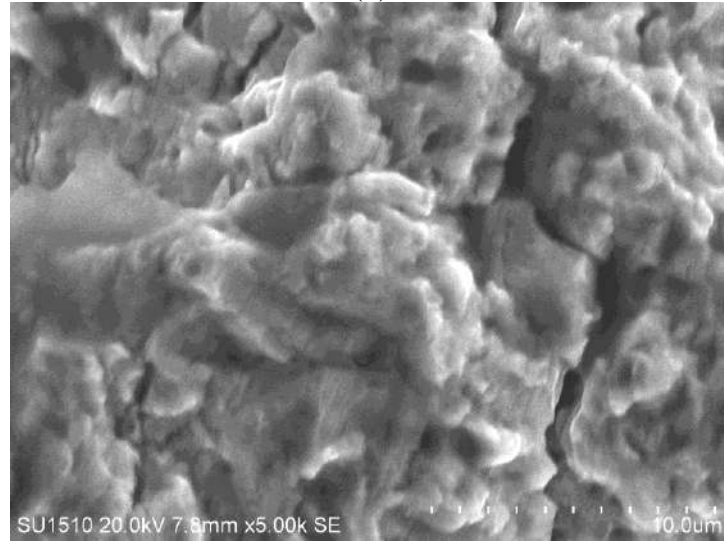
Hasar bölgelerinin yanı sıra çatlak başlangıç ve ilerleme yönleri de incelenmiştir. Numunelerinin hepsinde de beklenildiği gibi kaynak kökünde çatlak başlangıcı oluşmuştur. Fakat çatlak ilerlemesinin yönlerinde değişiklikler oluşmaktadır. Gerilme konsantrasyonuna göre ilerlemesi değişiklik göstermektedir. Şekil 4.43’te yorulma testi gerçekleştirilen tüm numunelerde hasardan sonra oluşan çatlaklar gösterilmektedir. Görüntüler hasardan yaklaşık 30 gün sonra elde edildiği için bazı bölgeler çatlak görüntü kalitesi açısından taşlanmıştır.



(a)

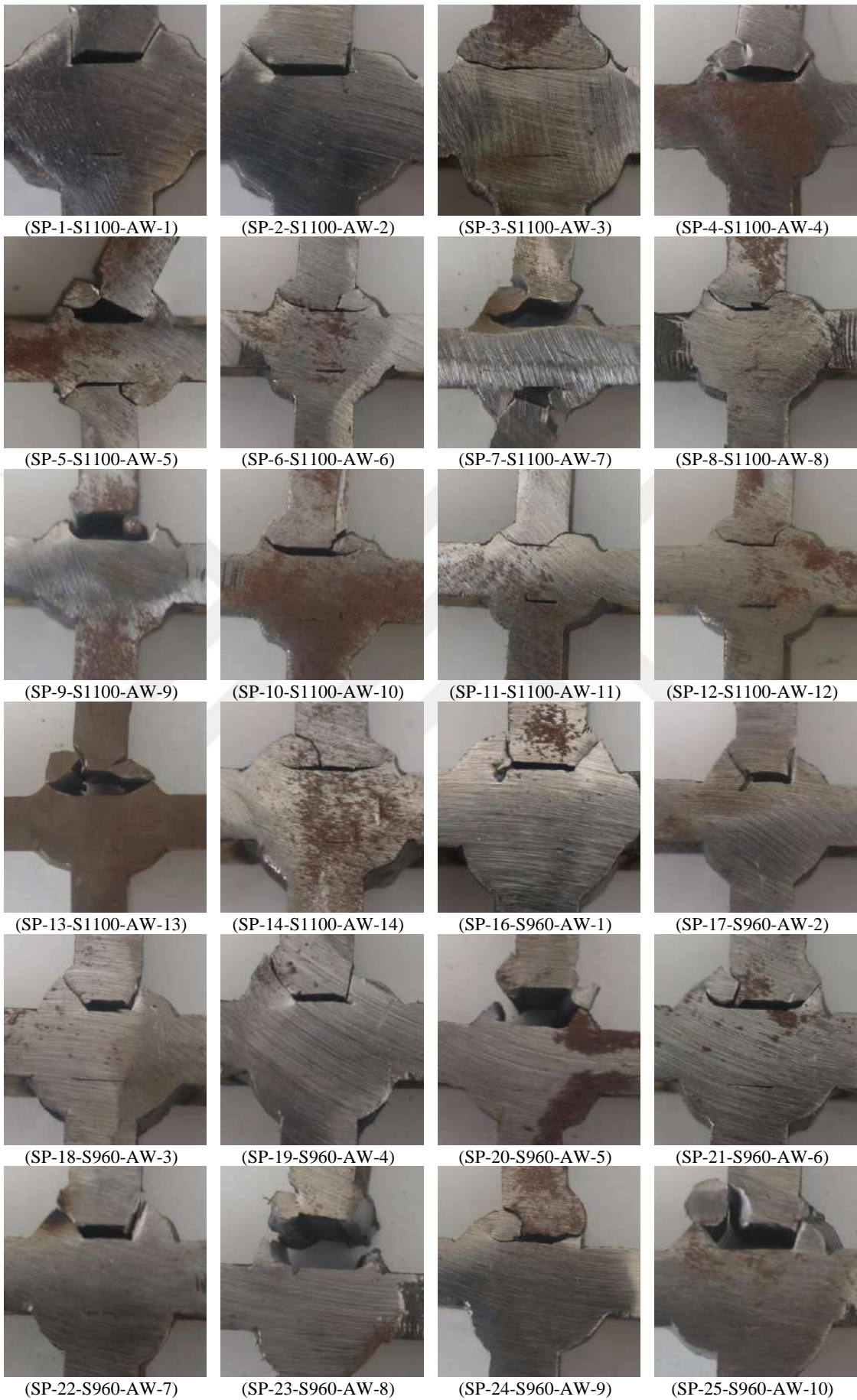


(b)



(c)

Şekil 4.42. Yorulma testleri taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüler (a) 1 mm mesafeden (b) 10 mikron mesafeden yorulma hasar bölgesi (c) 10 mikron mesafeden ani darbe bölgesi





(SP-26-S960-AW-11)



(SP-27-S960-AW-12)



(SP-28-S960-AW-13)



(SP-29-S960-AW-14)



(SP-31-S1100-BG-1)



(Başarısız)

(SP-32-S1100-BG-2)



(SP-33-S1100-BG-3)



(SP-34-S1100-BG-4)



(SP-35-S1100-BG-5)



(SP-36-S1100-BG-6)



(SP-37-S1100-BG-7)



(SP-38-S1100-BG-8)



(SP-39-S1100-BG-9)



(SP-40-S1100-BG-10)



(SP-41-S1100-BG-11)



(SP-42-S1100-BG-12)



(SP-43-S1100-BG-13)



(SP-46-S960-BG-1)



(SP-47-S960-BG-2)



(SP-48-S960-BG-3)



(SP-49-S960-BG-4)



(SP-50-S960-BG-5)



(SP-51-S960-BG-6)



(SP-52-S960-BG-7)



(SP-53-S960-BG-8)



(SP-54-S960-BG-9)



(SP-55-S960-BG-10)

(Başarısız)

(SP-56-S960-BG-11)



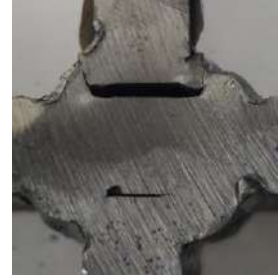
(SP-57-S960-BG-12)



(SP-58-S960-BG-13)



(SP-59-S960-BG-14)



(SP-61-S1100-HFMI-1)



(SP-62-S1100-HFMI-2)



(SP-63-S1100-HFMI-3)



(SP-64-S1100-HFMI-4)



(SP-65-S1100-HFMI-5)



(SP-66-S1100-HFMI-6)



(SP-67-S1100-HFMI-7)



(SP-68-S1100-HFMI-8)



(SP-69-S1100-HFMI-9)



(SP-70-S1100-HFMI-10)



(SP-71-S1100-HFMI-11)



(SP-72-S1100-HFMI-12)



(SP-73-S1100-HFMI-13)



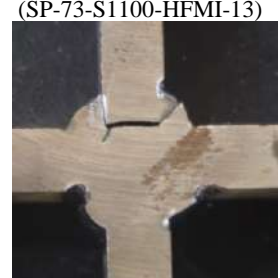
(SP-74-S1100-HFMI-14)



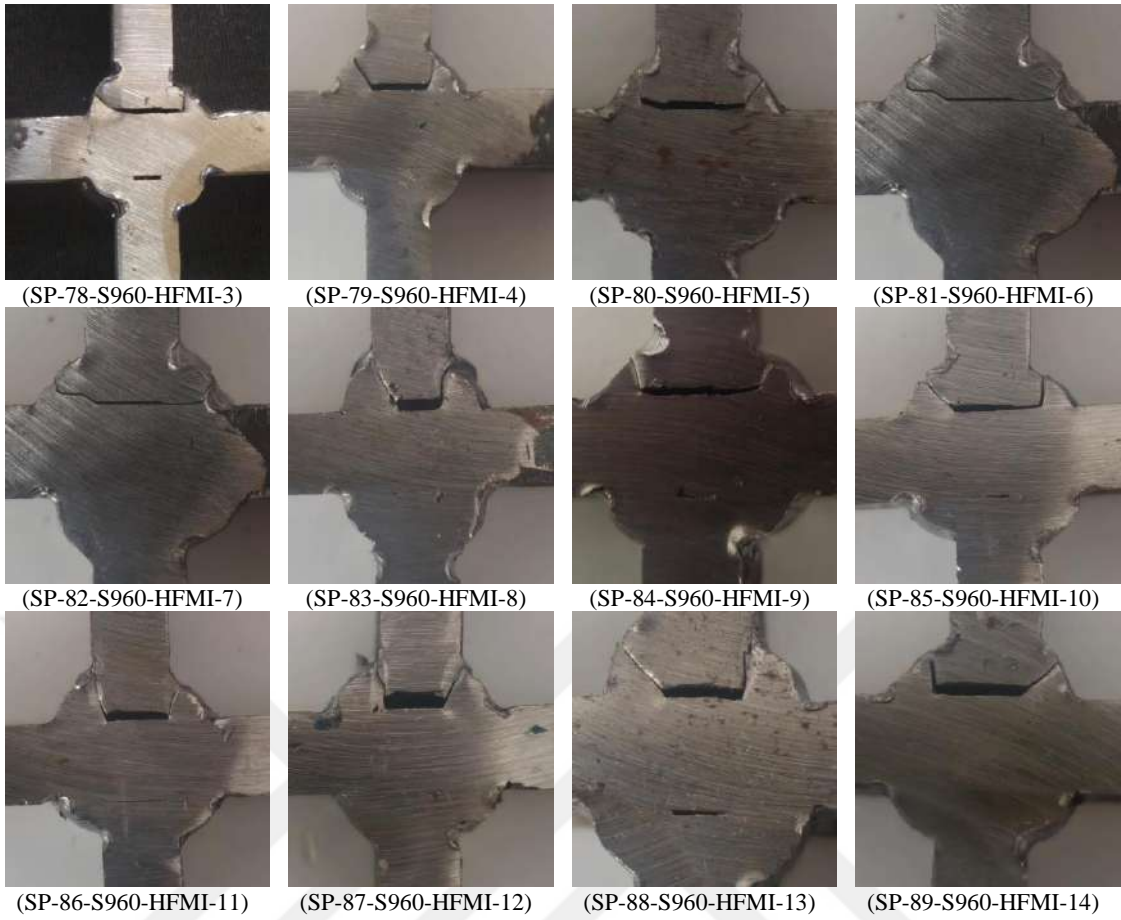
(SP-75-S1100-HFMI-15)



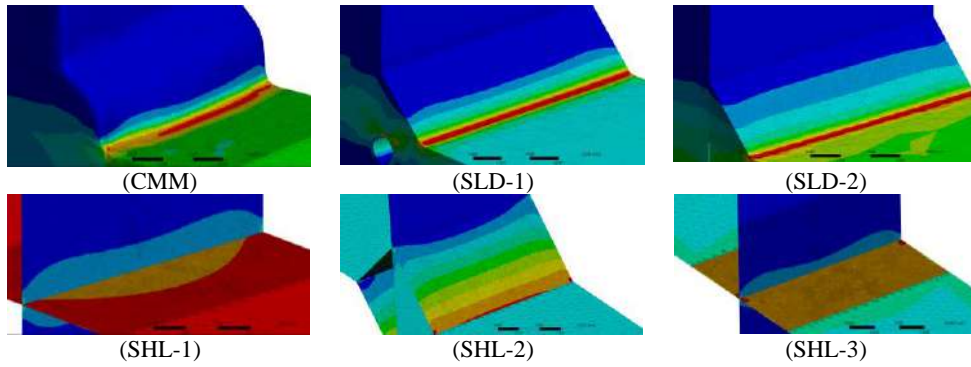
(SP-76-S960-HFMI-1)



(SP-77-S960-HFMI-2)



Şekil 4.43. Yorulma testleri neticesinde numunelerde oluşan çatlaklar



Şekil 4.44. 6 farklı modelleme türüne göre sonuçlanan SP-1-S1100-AW-1 numunesine ait analiz sonucu

CMM, SLD ve SHL modellemeleri SP-1-S1100-AW-1 numunesinde zorlanan 47 kN yükleme ile SEA'de tüm modellemelerin sonuçları Şekil 4.44'te gösterilmektedir. Diğer numunelerde bu numunedeki gibi analiz sonuçları maksimum normal gerilme değerlerine göre değerlendirilmiştir. CMM modelinde düğüm sayısı 1,262,958, eleman sayısı 749,194, SLD-1 modelinde düğüm sayısı 694,266, eleman sayısı 411,450, SLD-2 modelinde düğüm sayısı 625,044, eleman sayısı 366,992, SHL-1 modelinde düğüm sayısı 76,393, eleman sayısı 152,181, SHL-2 modelinde düğüm sayısı 102,616, eleman sayısı

205,287, SHL-3 modelinde düğüm sayısı 76,393, eleman sayısı 152,181 adet olmuştur. Düğüm ve eleman sayısı ağ yakınsamaları sonucu olan sayılardır. Ağ kalite değerleri ise eleman kalite kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Ortalama eleman kalite değerleri CMM modelinde 0.71, SLD-1 modelinde 0.72, SLD-2 modelinde 0.71, SHL-1,2,3'te 0.95 tespit edilmiştir.

Kesilen 92 adet numuneden 2 adet numune yorulma testinde başarısız, 7 adet üretimde başarısız olmuş olup 3 adet ise GS için kullanılmıştır. Böylelikle 80 adet deneysel numunesi ve sonucu elde edilmiştir. Yorulma testinde başarısız olunmasının sebebi yorulma test düzeneği ile numune arasındaki sürtünme kuvveti yetersiz gelip sıyırmıştır. Sıyırma olan 2 adet numune belirli çevrimden sonra sıyırdığı için tekrar testlerde kullanılmamış ve başarısız olarak değerlendirilmiştir. Yük, çevrim sayılarına göre SEA gerçekleştirilerek CMM ve SLD1 modellemeleri için kaynak ucu gerilme (KUG), doğrusal sıcak nokta gerilme (DSG), kuadratik sıcak nokta gerilme (KSG) ve nominal gerilme değerleri belirlenmiştir. Sıyırma olmayan numunelerin hepsinde yorulma testi gerçekleştirilmiş olup Çizelge 4.14'da sonuçları belirtilmektedir.

Çizelge 4.14. Yorulma testleri neticesinde elde edilen çevrim sayıları, maksimum yük değerleri ve CMM modelleri ile elde edilen maksimum normal gerilme değerleri

Numune İsmi	Yük [kN]	ÇEVİRİM SAYISI	CMM KUG [MPa]	CMM DSG [MPa]	CMM KSG [MPa]	Nominal Gerilme [MPa]	SLD-1-EÇG [MPa]	SLD-1-DSG [MPa]	SLD-1-KSG [MPa]
SP-1-S1100-AW-1	47	3395	970.08	430.22	471.52	293.75	1378.45	294.05	297.05
SP-2-S1100-AW-2	45	3462	960.06	429.29	469.03	281.25	1319.80	281.54	284.41
SP-3-S1100-AW-3	40	31534	692.58	406.24	402.01	250.00	1173.16	250.26	252.81
SP-4-S1100-AW-4	40	10734	761.86	387.63	394.29	250.00	1173.16	250.26	252.81
SP-5-S1100-AW-5	30	25268	513.16	219.51	226.55	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-6-S1100-AW-6	30	33113	653.30	281.52	295.90	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-7-S1100-AW-7	25	41241	514.93	220.18	229.16	156.25	733.22	156.42	158.01
SP-8-S1100-AW-8	25	51485	537.63	236.32	209.26	156.25	733.22	156.42	158.01
SP-9-S1100-AW-9	35	10022	703.85	324.65	345.15	218.75	1026.52	218.99	221.22
SP-10-S1100-AW-10	35	18735	667.20	299.16	303.27	218.75	1026.52	218.99	221.22
SP-11-S1100-AW-11	17	165800	275.44	114.40	114.77	106.25	498.59	106.37	107.45
SP-12-S1100-AW-12	25	123090	414.74	221.72	224.93	156.25	733.22	156.42	158.01
SP-13-S1100-AW-13	23	30308	431.80	221.88	237.03	143.75	674.57	143.91	145.38
SP-14-S1100-AW-14	23	48130	423.57	184.42	195.04	143.75	674.57	143.91	145.38
SP-16-S960-AW-1	52	3074	1042.18	434.01	447.21	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-17-S960-AW-2	52	10295	952.55	467.55	482.36	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-18-S960-AW-3	52	4807	1021.59	412.55	412.07	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-19-S960-AW-4	52	2106	1291.00	571.95	582.09	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-20-S960-AW-5	52	6450	828.90	397.61	400.20	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-21-S960-AW-6	49	7882	955.88	388.51	390.84	306.25	1437.12	306.57	309.68

SP-22-S960-AW-7	47	9088	955.25	455.32	488.09	293.75	1378.45	294.05	297.05
SP-23-S960-AW-8	43	17373	905.63	356.84	366.95	268.75	1261.15	269.03	271.76
SP-24-S960-AW-9	36	10922	932.41	402.31	417.80	225.00	1055.84	225.24	227.54
SP-25-S960-AW-10	30	16324	717.03	331.10	360.43	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-26-S960-AW-11	25	62771	490.32	182.75	192.24	156.25	733.22	156.42	158.01
SP-27-S960-AW-12	20	207285	389.82	172.12	174.79	125.00	586.58	125.14	126.40
SP-28-S960-AW-13	24	80043	493.97	209.17	210.63	150.00	703.88	150.16	151.69
SP-29-S960-AW-14	23	36537	529.61	228.17	229.26	143.75	674.57	143.91	145.38
SP-31-S1100-BG-1	42	9915	1032.95	309.29	314.55	262.50	1231.81	262.77	265.44
SP-33-S1100-BG-3	29	184468	554.76	252.57	261.86	181.25	850.54	181.45	183.31
SP-34-S1100-BG-4	50	402	1259.39	409.17	427.35	312.50	1466.44	312.83	316.00
SP-35-S1100-BG-5	45	5231	1085.87	399.75	409.61	281.25	1319.80	281.54	284.41
SP-36-S1100-BG-6	40	37587	841.48	335.93	336.61	250.00	1173.16	250.26	252.81
SP-39-S1100-BG-9	32	20444	713.28	217.11	218.70	200.00	938.53	200.22	202.26
SP-40-S1100-BG-10	30	44883	653.88	257.42	254.08	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-41-S1100-BG-11	38	14659	1061.59	307.04	307.81	237.50	1114.51	237.74	240.17
SP-42-S1100-BG-12	16	245498	395.09	135.07	141.36	100.00	469.26	100.11	101.13
SP-43-S1100-BG-13	24	153727	525.12	201.57	214.35	150.00	703.88	150.16	151.69
SP-46-S960-BG-1	42	14633	913.70	941.92	1229.21	262.50	1231.81	262.77	265.44
SP-47-S960-BG-2	42	7498	940.91	313.23	313.23	262.50	1231.81	262.77	265.44
SP-48-S960-BG-3	36	16532	735.89	274.93	290.44	225.00	1055.84	225.24	227.54
SP-49-S960-BG-4	32	40873	700.40	275.28	279.75	200.00	938.53	200.22	202.26
SP-50-S960-BG-5	33	43791	686.21	253.66	256.39	206.25	967.85	206.47	208.58
SP-51-S960-BG-6	36	18889	877.39	316.22	330.32	225.00	1055.84	225.24	227.54
SP-52-S960-BG-7	34	55640	686.50	292.69	305.51	212.50	997.18	212.73	214.90
SP-53-S960-BG-8	31	14048	831.16	433.41	532.36	193.75	909.20	193.96	195.95
SP-54-S960-BG-9	31	35954	756.94	254.60	266.74	193.75	909.20	193.96	195.95
SP-55-S960-BG-10	28	69280	669.78	248.24	255.87	175.00	821.21	175.19	176.97
SP-57-S960-BG-12	22	65768	541.29	189.91	200.52	137.50	645.23	137.65	139.06
SP-58-S960-BG-13	30	70983	567.37	223.22	214.53	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-59-S960-BG-14	30	45475	585.05	143.08	102.02	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-61-S1100-HFMI-1	36	18281	685.50	275.11	279.41	225.00	1055.84	225.24	227.54
SP-62-S1100-HFMI-2	36	24294	878.76	405.62	408.75	225.00	1055.84	225.24	227.54
SP-63-S1100-HFMI-3	38	13840	810.36	323.07	344.22	237.50	1114.51	237.74	240.17
SP-64-S1100-HFMI-4	52	4175	992.99	403.66	395.07	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-65-S1100-HFMI-5	32	34187	673.62	291.96	291.58	200.00	938.53	200.22	202.26
SP-66-S1100-HFMI-6	32	22043	556.00	238.00	230.43	200.00	938.53	200.22	202.26
SP-67-S1100-HFMI-7	30	28591	657.22	255.89	258.50	187.50	879.86	187.70	189.63
SP-68-S1100-HFMI-8	26	47224	539.14	248.48	252.13	162.50	762.56	162.68	164.33
SP-69-S1100-HFMI-9	24	57246	440.08	178.25	176.62	150.00	703.88	150.16	151.69
SP-70-S1100-HFMI-10	23	106285	401.31	199.57	199.43	143.75	674.57	143.91	145.38
SP-71-S1100-HFMI-11	24	60487	462.31	226.02	233.62	150.00	703.88	150.16	151.69
SP-72-S1100-HFMI-12	16	134354	302.45	142.58	144.51	100.00	469.26	100.11	101.13
SP-73-S1100-HFMI-13	22	53892	454.52	185.08	185.57	137.50	645.23	137.65	139.06
SP-74-S1100-HFMI-14	22	49337	441.54	187.74	190.05	137.50	645.23	137.65	139.06
SP-75-S1100-HFMI-15	20	82987	421.62	182.94	192.23	125.00	586.58	125.14	126.40
SP-76-S960-HFMI-1	36	36808	610.93	262.25	262.66	225.00	1055.84	225.24	227.54
SP-77-S960-HFMI-2	36	30244	643.75	321.47	323.53	225.00	1055.84	225.24	227.54

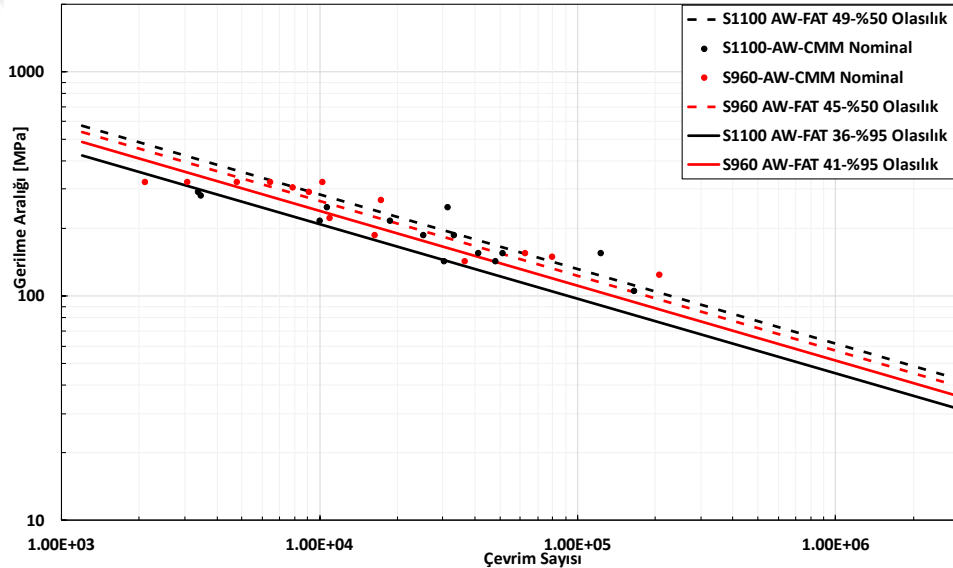
SP-78-S960-HFMI-3	22	176286	428.40	179.77	182.96	137.50	645.23	137.65	139.06
SP-79-S960-HFMI-4	34	35825	562.89	223.18	229.37	212.50	997.18	212.73	214.90
SP-80-S960-HFMI-5	34	38258	598.81	155.42	97.93	212.50	997.18	212.73	214.90
SP-81-S960-HFMI-6	34	26390	607.21	265.77	266.97	212.50	997.18	212.73	214.90
SP-82-S960-HFMI-7	26	42108	536.88	187.59	192.20	162.50	762.56	162.68	164.33
SP-83-S960-HFMI-8	22	203866	468.76	189.18	193.10	137.50	645.23	137.65	139.06
SP-84-S960-HFMI-9	20	110516	414.14	172.15	172.94	125.00	586.58	125.14	126.40
SP-85-S960-HFMI-10	24	64795	465.64	192.93	196.56	150.00	703.88	150.16	151.69
SP-86-S960-HFMI-11	40	18999	725.70	358.74	357.46	250.00	1173.16	250.26	252.81
SP-87-S960-HFMI-12	42	15790	797.06	274.57	264.29	262.50	1231.81	262.77	265.44
SP-88-S960-HFMI-13	52	10118	898.59	391.93	381.20	325.00	1525.11	325.34	328.64
SP-89-S960-HFMI-14	19	150470	417.51	142.57	142.47	118.75	557.24	118.88	120.09

Tüm numunelerde CMM ile tarama neticesinde maksimum normal gerilme değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca CMM geometrileri dışında SLD-1, SLD-2, SHL-1, SHL-2 ve SHL-3 modellemelerinde nominal, sıcak nokta gerilme ve etkin çentik gerilme değerleri tespit edilmiştir. SEA çalışmalarında her modellemede de ağ yakınsaması yapılmıştır. Yakınsamalar neticesinde ağ boyutları tespit edilip en yüksek gerilmeyi veren ağ yakınsaması değerlendirilerek CMM modeli için nominal, sıcak nokta ve etkin çentik gerilmelerine göre S-N eğrileri oluşturulmuştur. SLD-1 modeli için ise kaynak kök kısmındaki gerilme değerleri alınarak etkin çentik gerilme değeri ve sıcak nokta gerilme değerlerine göre S-N eğrisi belirlenmiştir. Diğer modellemelerde ise istatistiksel parametreler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar S1100 ve S960 malzemelerinde kaynak sonrası yapılan YFMD, taşlama ve işlemsiz durumlarının etkilerini görmek için ayrı ayrı uygulanmıştır. Tüm SEA modellemelerine ait maksimum normal gerilme değerleri tespit edilmiş olup SHL ve SLD-2 modellemelerinde hata oranları tespit edilmiştir. CMM ve SLD-1 modellemelerinde ise yeni S-N eğrileri önerilmiştir.

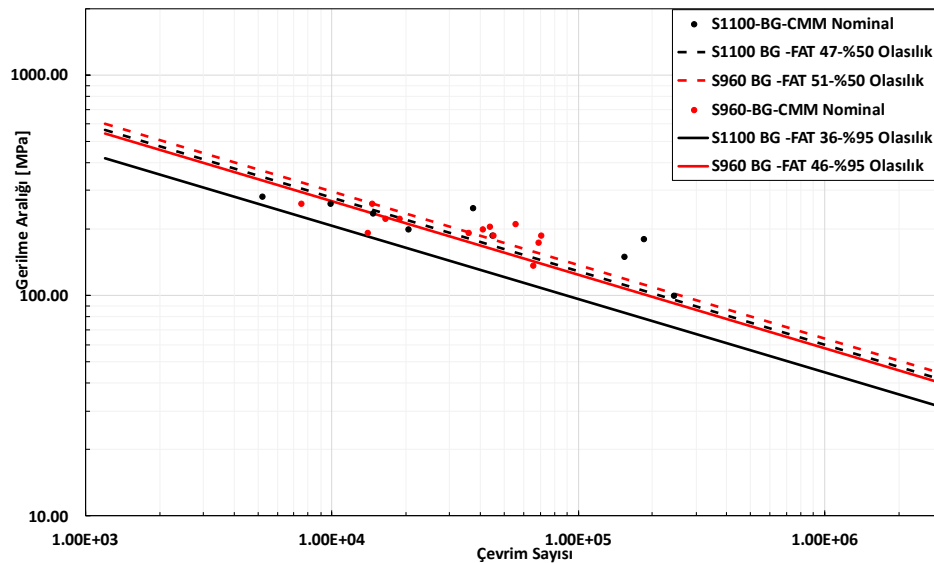
SEA sonuçları neticesinde S-N eğrisi için verilerde doğrusal olmayan regresyon analizleri yapılmıştır. %50 ve %95 olasılık dağılımlarına göre S-N eğrisi oluşturulmuştur. Basquin eğimi (m), IIW önerilerinde sabit 3 alınmaktadır. Bu çalışmada 3 ve değişken olacak şekilde doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilerek S-N eğrileri elde edilmiştir.

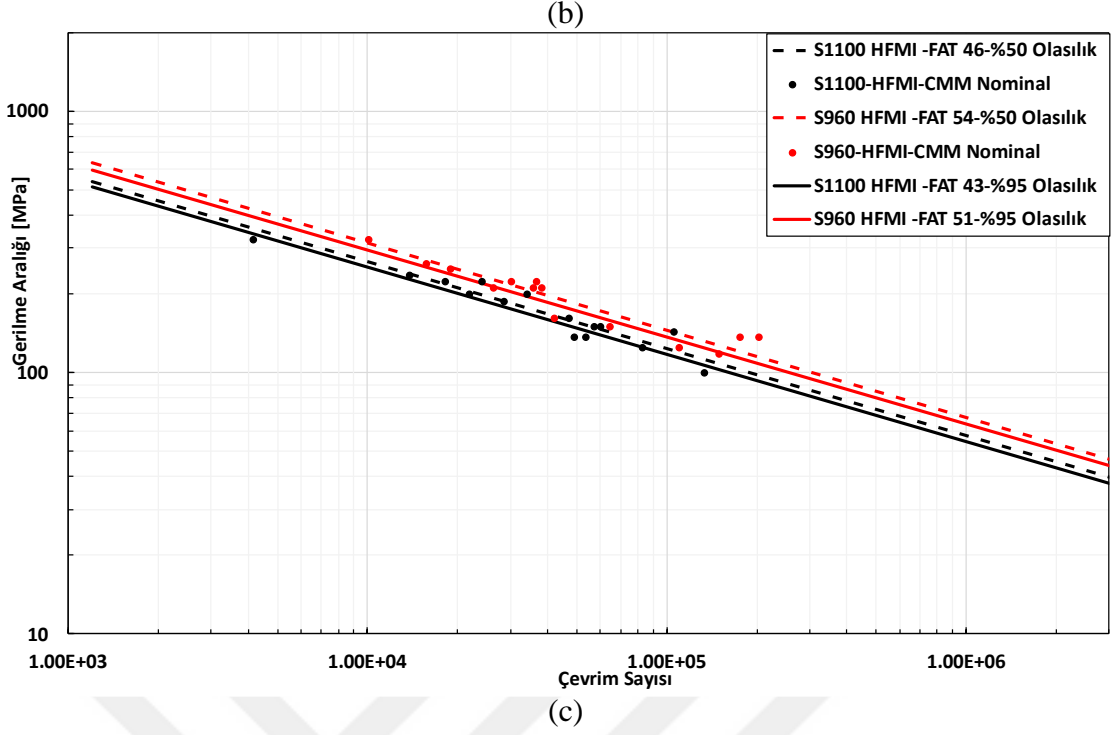
Nominal gerilme değerleri tüm modellemelerde eşit çıkmıştır. Modelleme farklılığı olsa dahi nominal gerilme değeri değişmemektedir. Malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.45'de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 10.9638 - 3 * \log \sigma$,

S960 malzemelerde $\log N = 11.1396 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 41 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 10.953 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.2854 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 46 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2107 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4122 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 43, S960 malzemelerde ise FAT 51 değerleri elde edilmiştir.



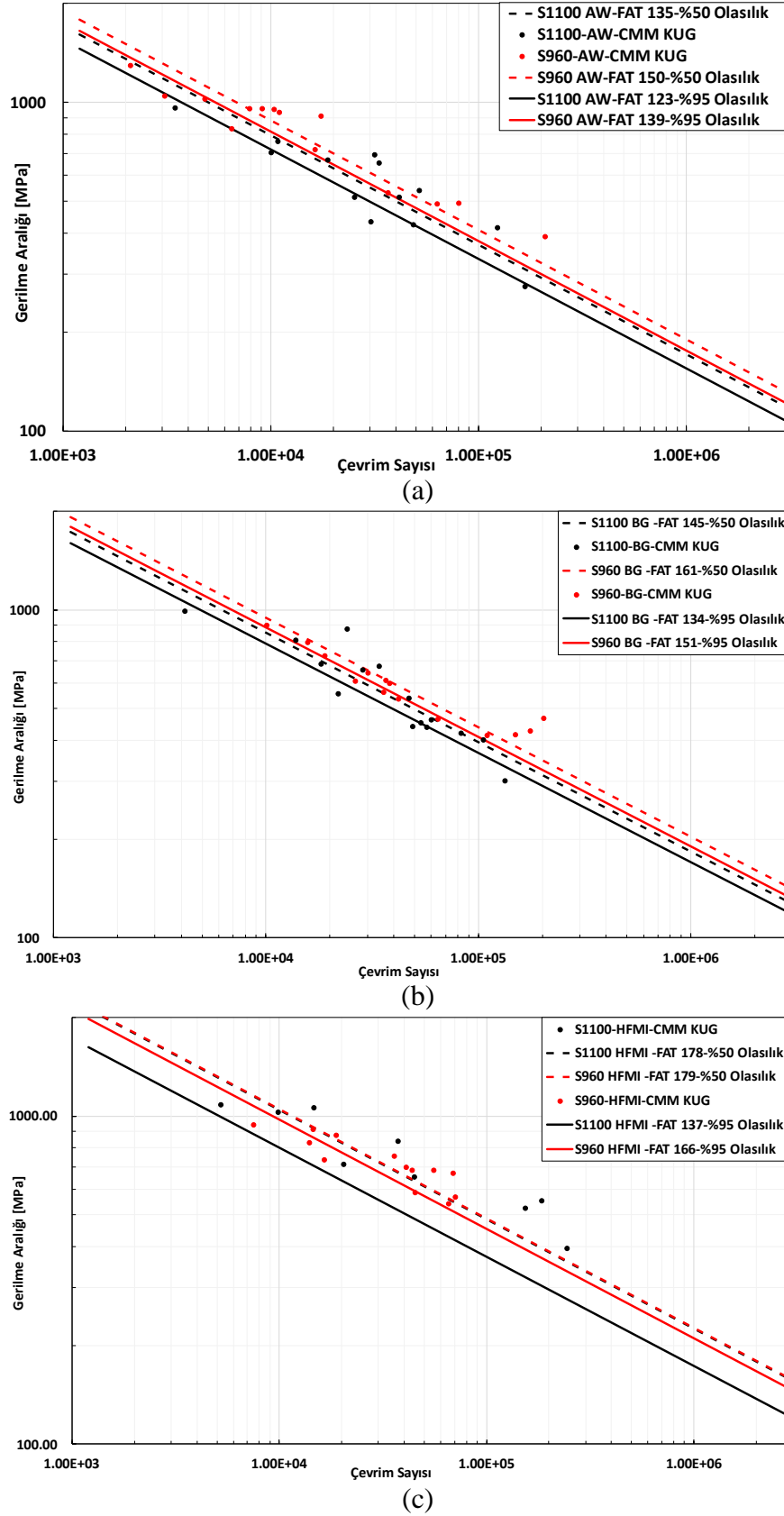
(a)





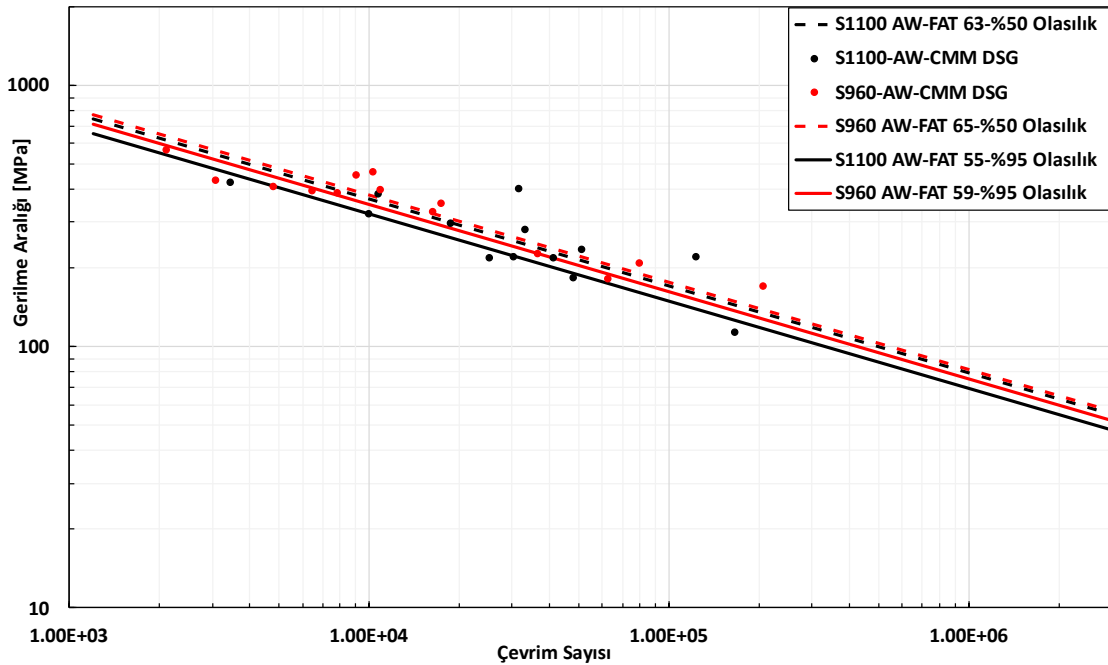
Şekil 4.45. Nominal gerilme değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

CMM modelinde KUG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.46'da gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 12.5711 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.7308 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 123, S960 malzemelerde ise FAT 139 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.6919 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.841 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 134, S960 malzemelerde ise FAT 151 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.7133 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.9672 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 137, S960 malzemelerde ise FAT 166 değerleri elde edilmiştir.

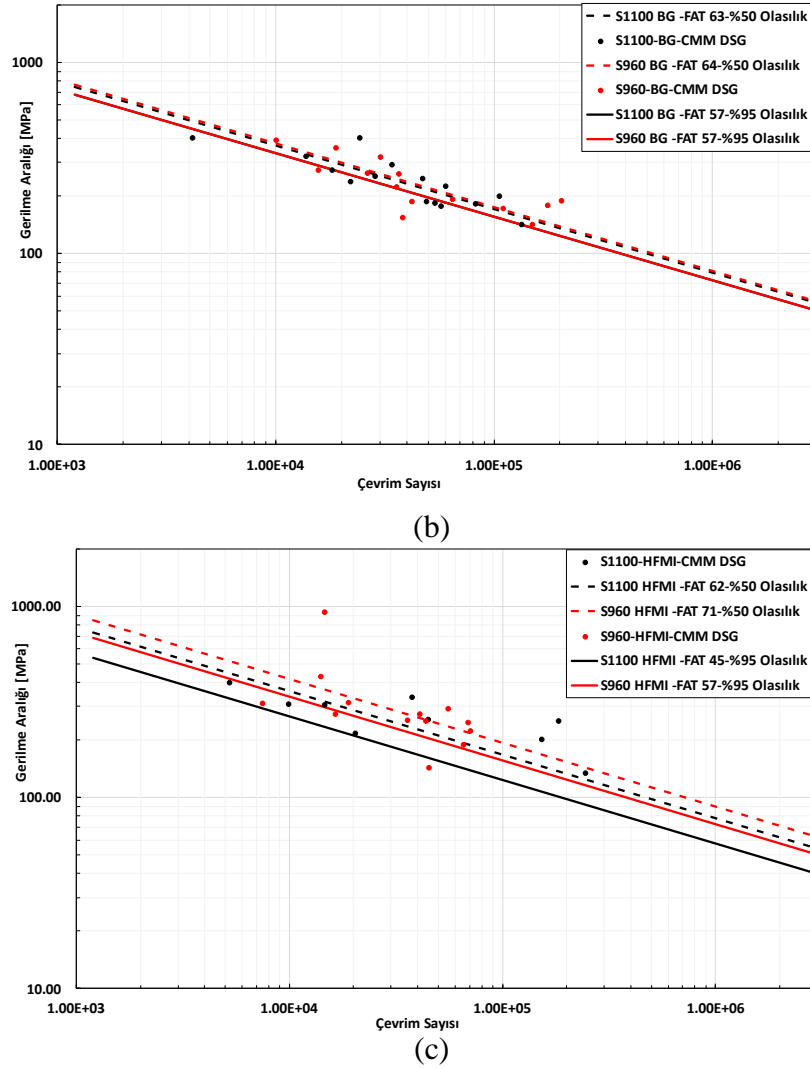


Şekil 4.46. CMM KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

CMM modelinde DSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.47’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.5266 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.6295 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 55, S960 malzemelerde ise FAT 59 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.5779 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.5776 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 57, S960 malzemelerde ise FAT 57 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2767 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.5815 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 45, S960 malzemelerde ise FAT 57 değerleri elde edilmiştir.



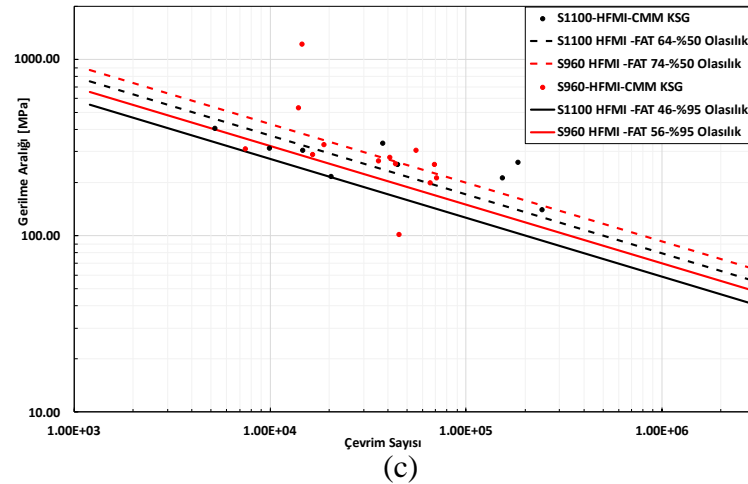
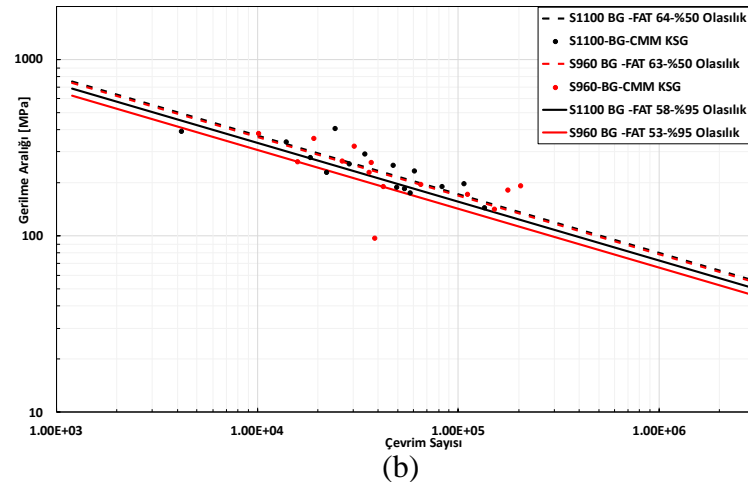
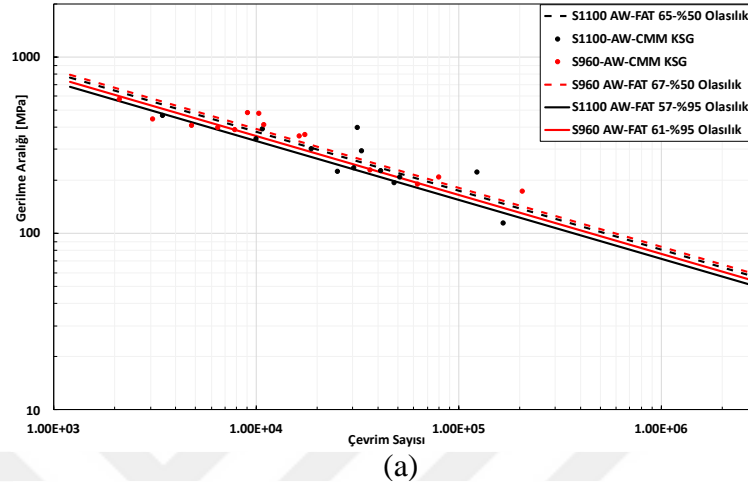
(a)



Şekil 4.47. CMM DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

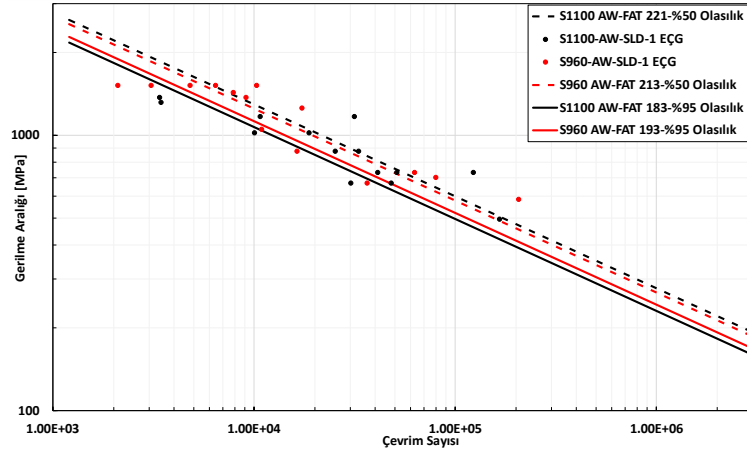
CMM modelinde KSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.48’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.5707 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.6593 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 57, S960 malzemelerde ise FAT 61 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.5862 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4665 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 58, S960 malzemelerde ise FAT 53 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri

neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.3068 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.5306 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 46, S960 malzemelerde ise FAT 56 değerleri elde edilmiştir.

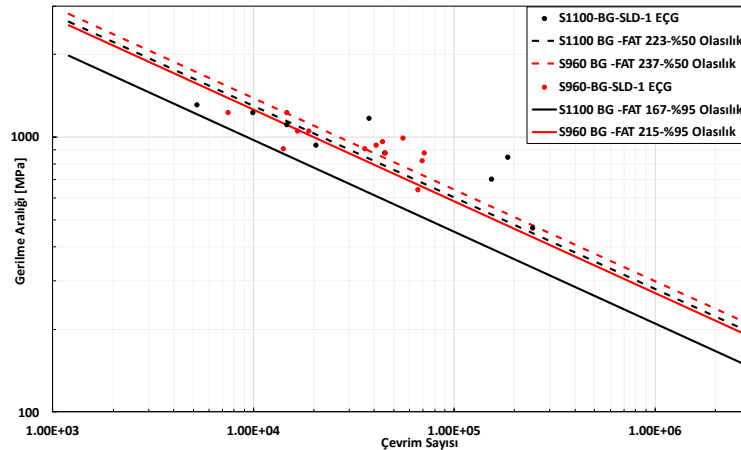


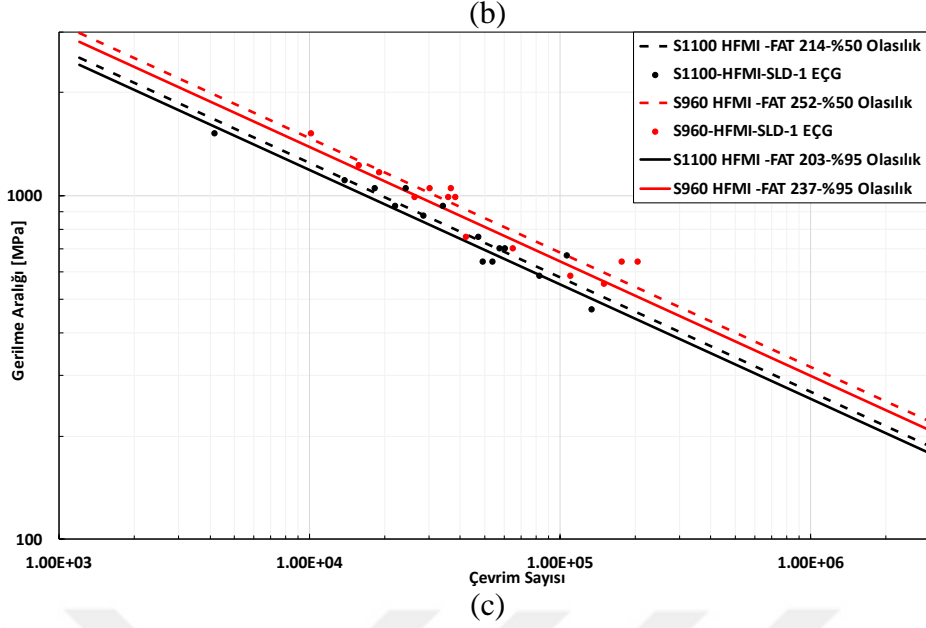
Şekil 4.48. CMM KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

SLD-1 modelinde EÇG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.49'da gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 13.0875 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 13.1538 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 183, S960 malzemelerde ise FAT 193 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.9673 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 13.2996 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 167, S960 malzemelerde ise FAT 215 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 13.225 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 13.4264 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 203, S960 malzemelerde ise FAT 237 değerleri elde edilmiştir.



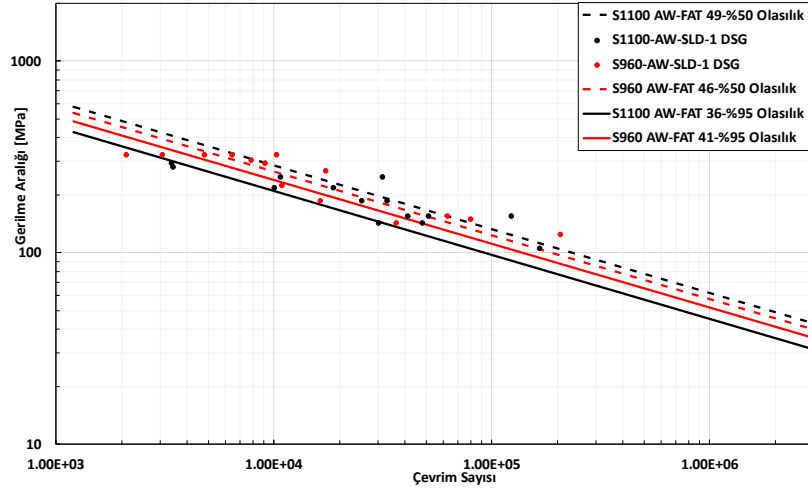
(a)



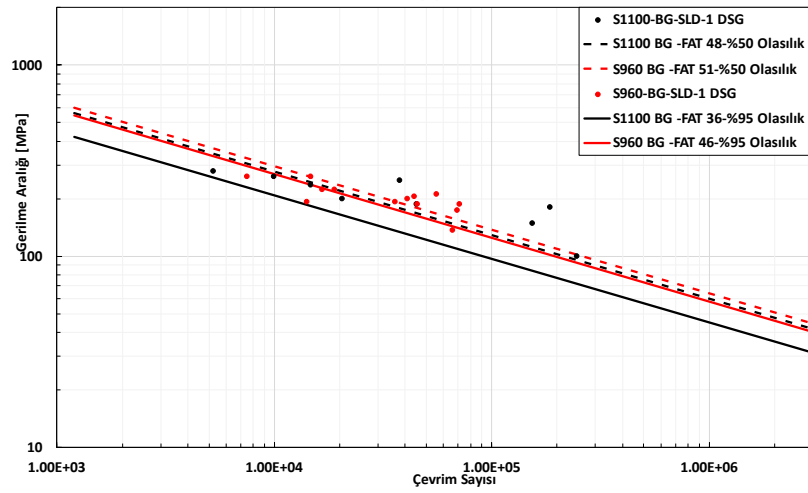


Şekil 4.49. SLD-1 EÇG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

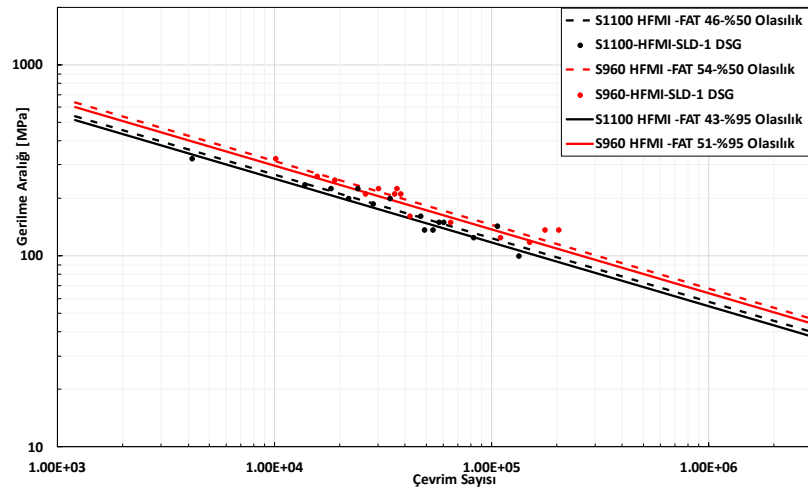
SLD-1 modelinde DSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.50’da gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 10.9652 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.141 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 41 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 10.9544 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.2868 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 46 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2121 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4136 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 43, S960 malzemelerde ise FAT 51 değerleri elde edilmiştir.



(a)



(b)

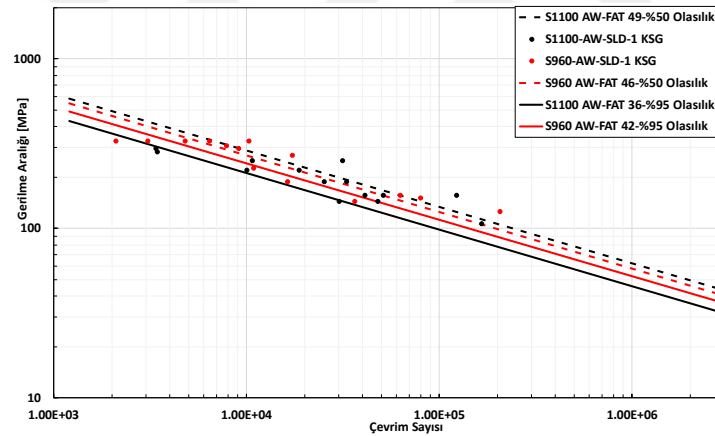


(c)

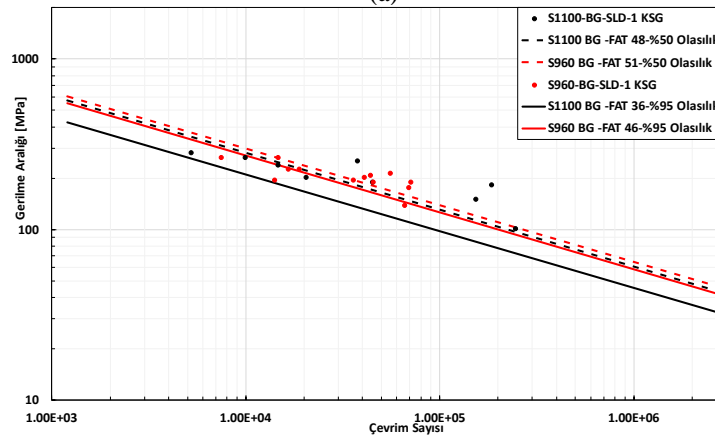
Şekil 4.50. SLD-1 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

SLD-1 modelinde KSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.51'de gösterilmektedir.

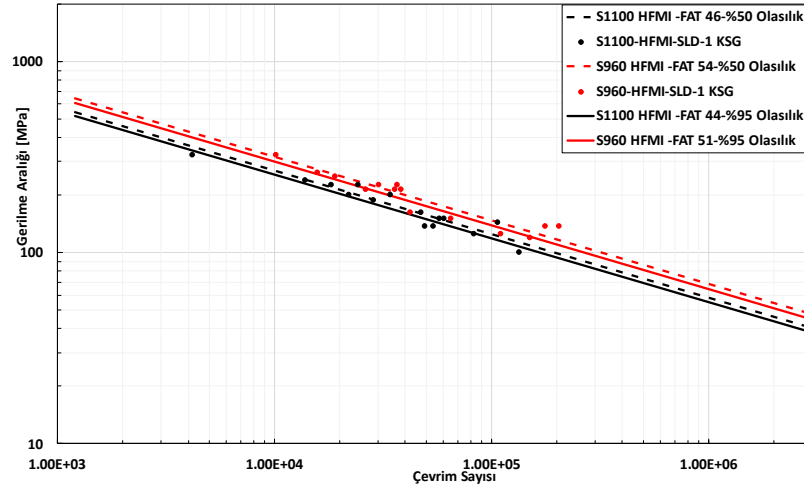
Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 10.9784 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.1542 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 42 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 10.9676 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.3 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 46 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2253 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4268 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 44, S960 malzemelerde ise FAT 51 değerleri elde edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.51. SLD-1 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

Gerçekleştirilen 80 adet yorulma testinde SLD-2, SHL-1,2,3 modelleme tekniklerine ait KUG, DSG, KSG ve KUG gerilme değerleri Çizelge 4.15'te verilmektedir. SEA analizleri neticesinde elde edilen bu değerler yeni S-N eğrilerindeki FAT sınıflarını tespit etmek amacıyla belirlenmiştir. Böylelikle modelleme tekniklerine ve kullanılan metoda göre yeni S-N eğrileri oluşturulmuştur. En yüksek gerilme yarıçap olmadan SLD ve SHL'de olarak modellenen KUG metodunda belirlenmiştir. En düşük gerilme nominal gerilme değeri olup tüm modellemelerde aynı gerilme değerindedir. KSG değerleri ise DSG değerlerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir.

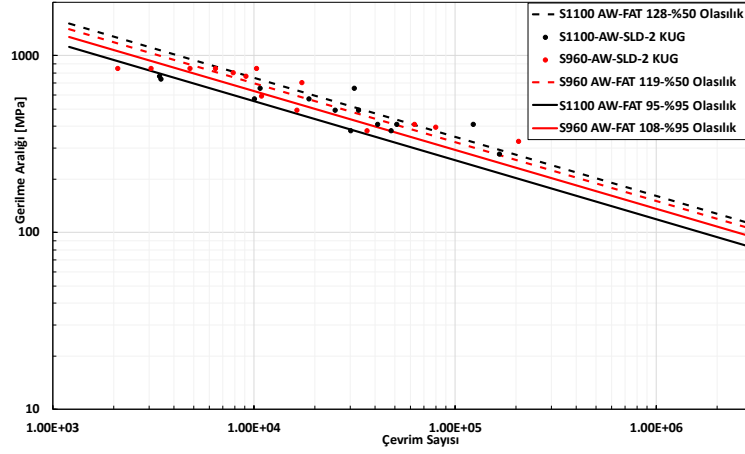
Çizelge 4.15. Yorulma testleri ve SEA neticesinde elde edilen SLD2, SHL1,2,3 modellemelerinde tespit edilen maksimum normal gerilme değerleri

No	SLD2-KUG [MPa]	SLD2-DSG [MPa]	SLD2-KSG [MPa]	SHL1-KUG [MPa]	SHL1-DSG [MPa]	SHL1-KSG [MPa]	SHL2-KUG [MPa]	SHL2-DSG [MPa]	SHL2-KSG [MPa]	SHL3-KUG [MPa]	SHL3-DSG [MPa]	SHL3-KSG [MPa]
1	772.32	300.57	311.05	376.97	273.01	266.80	931.49	307.20	311.94	963.97	775.83	454.86
2	739.45	287.78	297.81	360.93	261.39	255.45	891.85	294.14	298.68	922.95	742.82	435.51
3	657.29	255.81	264.73	320.83	232.35	227.06	792.76	261.46	265.50	820.40	660.28	387.10
4	657.29	255.81	264.73	320.83	232.35	227.06	792.76	261.46	265.50	820.40	660.28	387.10
5	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
6	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
7	410.81	159.87	165.44	200.52	145.23	141.92	495.47	163.41	165.95	512.75	412.67	241.95
8	410.81	159.87	165.44	200.52	145.23	141.92	495.47	163.41	165.95	512.75	412.67	241.95
9	575.13	223.82	231.63	280.73	203.30	198.68	693.66	228.78	232.31	717.85	577.75	338.73
10	575.13	223.82	231.63	280.73	203.30	198.68	693.66	228.78	232.31	717.85	577.75	338.73
11	279.35	108.72	112.51	136.35	98.74	96.50	336.92	111.11	112.82	348.67	280.63	164.53
12	410.81	159.87	165.44	200.52	145.23	141.92	495.47	163.41	165.95	512.75	412.67	241.95
13	377.94	147.09	152.22	184.48	133.61	130.59	455.84	150.33	152.64	471.73	379.67	222.60

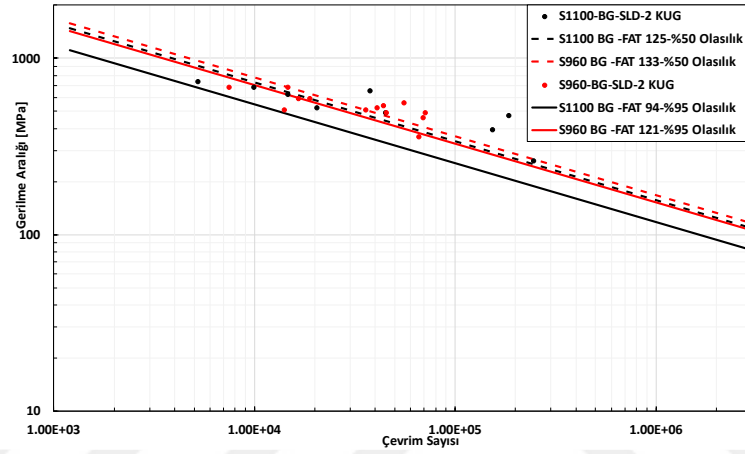
14	377.94	147.09	152.22	184.48	133.61	130.59	455.84	150.33	152.64	471.73	379.67	222.60
15	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
16	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
17	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
18	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
19	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
20	805.18	313.35	324.28	393.02	284.62	278.15	971.13	320.29	325.25	1005.00	808.84	474.20
21	772.32	300.57	311.05	376.97	273.01	266.80	931.49	307.20	311.94	963.97	775.83	454.86
22	706.59	274.98	284.56	344.89	249.78	244.10	852.22	281.06	285.39	881.93	709.80	416.13
23	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
24	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
25	410.81	159.87	165.44	200.52	145.23	141.92	495.47	163.41	165.95	512.75	412.67	241.95
26	328.65	127.90	132.36	160.41	116.17	113.53	396.38	130.73	132.75	410.20	330.15	193.56
27	394.38	153.48	158.83	192.50	139.42	136.24	475.65	156.88	159.30	492.24	396.17	232.25
28	377.94	147.09	152.22	184.48	133.61	130.59	455.84	150.33	152.64	471.73	379.67	222.60
29	690.16	268.59	277.95	336.87	243.97	238.42	832.40	274.53	278.77	861.42	693.30	406.48
30	476.54	185.45	191.91	232.60	168.46	164.62	574.75	189.56	192.49	594.79	478.71	280.65
31	821.62	319.75	330.88	401.04	290.43	283.82	990.95	326.82	331.87	1025.50	825.35	483.88
32	739.45	287.78	297.81	360.93	261.39	255.45	891.85	294.14	298.68	922.95	742.82	435.51
33	657.29	255.81	264.73	320.83	232.35	227.06	792.76	261.46	265.50	820.40	660.28	387.10
34	525.83	204.63	211.77	256.66	185.88	181.65	634.21	209.16	212.38	656.32	528.23	309.68
35	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
36	624.43	243.01	251.48	304.79	220.74	215.73	753.12	248.37	252.22	779.38	627.27	367.75
37	262.92	102.33	105.90	128.33	92.94	90.83	317.10	104.58	106.19	328.16	264.11	154.85
38	394.38	153.48	158.83	192.50	139.42	136.24	475.65	156.88	159.30	492.24	396.17	232.25
39	690.16	268.59	277.95	336.87	243.97	238.42	832.40	274.53	278.77	861.42	693.30	406.48
40	690.16	268.59	277.95	336.87	243.97	238.42	832.40	274.53	278.77	861.42	693.30	406.48
41	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
42	525.83	204.63	211.77	256.66	185.88	181.65	634.21	209.16	212.38	656.32	528.23	309.68
43	542.27	211.04	218.40	264.68	191.69	187.33	654.03	215.69	219.02	676.83	544.74	319.38
44	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
45	558.70	217.43	225.01	272.70	197.50	193.00	673.84	222.24	225.67	697.34	561.24	329.03
46	509.40	198.24	205.16	248.64	180.07	175.97	614.39	202.63	205.76	635.81	511.72	300.01
47	509.40	198.24	205.16	248.64	180.07	175.97	614.39	202.63	205.76	635.81	511.72	300.01
48	460.11	179.06	185.30	224.58	162.65	158.94	554.93	183.01	185.83	574.28	462.19	270.98
49	361.51	140.68	145.58	176.46	127.80	124.91	436.02	143.79	146.01	451.22	363.15	212.90
50	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
51	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
52	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
53	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
54	624.43	243.01	251.48	304.79	220.74	215.73	753.12	248.37	252.22	779.38	627.27	367.75
55	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
56	525.83	204.63	211.77	256.66	185.88	181.65	634.21	209.16	212.38	656.32	528.23	309.68
57	525.83	204.63	211.77	256.66	185.88	181.65	634.21	209.16	212.38	656.32	528.23	309.68
58	492.97	191.86	198.54	240.62	174.26	170.30	594.57	196.09	199.12	615.30	495.22	290.35
59	427.24	166.28	172.08	208.54	151.03	147.59	515.29	169.95	172.57	533.26	429.19	251.63
60	394.38	153.48	158.83	192.50	139.42	136.24	475.65	156.88	159.30	492.24	396.17	232.25
61	377.94	147.09	152.22	184.48	133.61	130.59	455.84	150.33	152.64	471.73	379.67	222.60

62	394.38	153.48	158.83	192.50	139.42	136.24	475.65	156.88	159.30	492.24	396.17	232.25
63	262.92	102.33	105.90	128.33	92.94	90.83	317.10	104.58	106.19	328.16	264.11	154.85
64	361.51	140.68	145.58	176.46	127.80	124.91	436.02	143.79	146.01	451.22	363.15	212.90
65	361.51	140.68	145.58	176.46	127.80	124.91	436.02	143.79	146.01	451.22	363.15	212.90
66	328.65	127.90	132.36	160.41	116.17	113.53	396.38	130.73	132.75	410.20	330.15	193.56
67	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
68	591.56	230.21	238.23	288.75	209.11	204.36	713.48	235.31	238.95	738.36	594.26	348.40
69	361.51	140.68	145.58	176.46	127.80	124.91	436.02	143.79	146.01	451.22	363.15	212.90
70	558.70	217.43	225.01	272.70	197.50	193.00	673.84	222.24	225.67	697.34	561.24	329.03
71	558.70	217.43	225.01	272.70	197.50	193.00	673.84	222.24	225.67	697.34	561.24	329.03
72	558.70	217.43	225.01	272.70	197.50	193.00	673.84	222.24	225.67	697.34	561.24	329.03
73	427.24	166.28	172.08	208.54	151.03	147.59	515.29	169.95	172.57	533.26	429.19	251.63
74	361.51	140.68	145.58	176.46	127.80	124.91	436.02	143.79	146.01	451.22	363.15	212.90
75	328.65	127.90	132.36	160.41	116.17	113.53	396.38	130.73	132.75	410.20	330.15	193.56
76	394.38	153.48	158.83	192.50	139.42	136.24	475.65	156.88	159.30	492.24	396.17	232.25
77	657.29	255.81	264.73	320.83	232.35	227.06	792.76	261.46	265.50	820.40	660.28	387.10
78	690.16	268.59	277.95	336.87	243.97	238.42	832.40	274.53	278.77	861.42	693.30	406.48
79	854.48	332.54	344.13	417.08	302.07	295.21	1030.60	339.89	345.13	1066.50	858.38	503.25
80	312.21	121.50	125.73	152.39	110.36	107.85	376.56	124.20	126.11	389.69	313.63	183.88

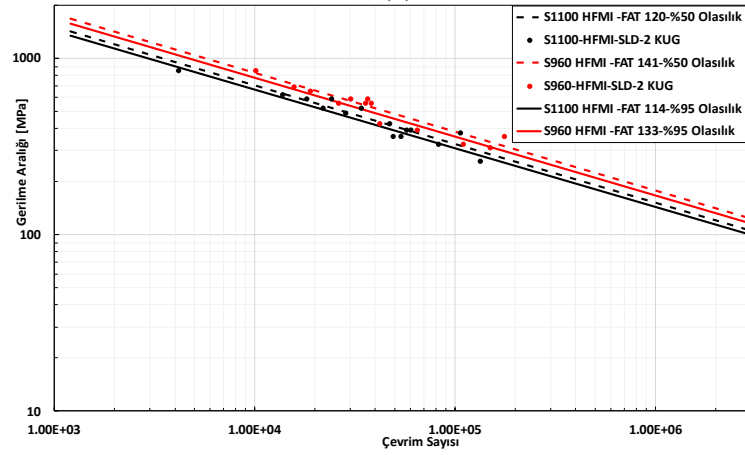
SLD-2 modelinde KUG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.52’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 12.2233 - 3.\log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.399 - 3.\log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 95, S960 malzemelerde ise FAT 108 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.2125 - 3.\log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.5448 - 3.\log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 94, S960 malzemelerde ise FAT 121 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.4702 - 3.\log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.6716 - 3.\log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 114, S960 malzemelerde ise FAT 133 değerleri elde edilmiştir.



(a)



(b)

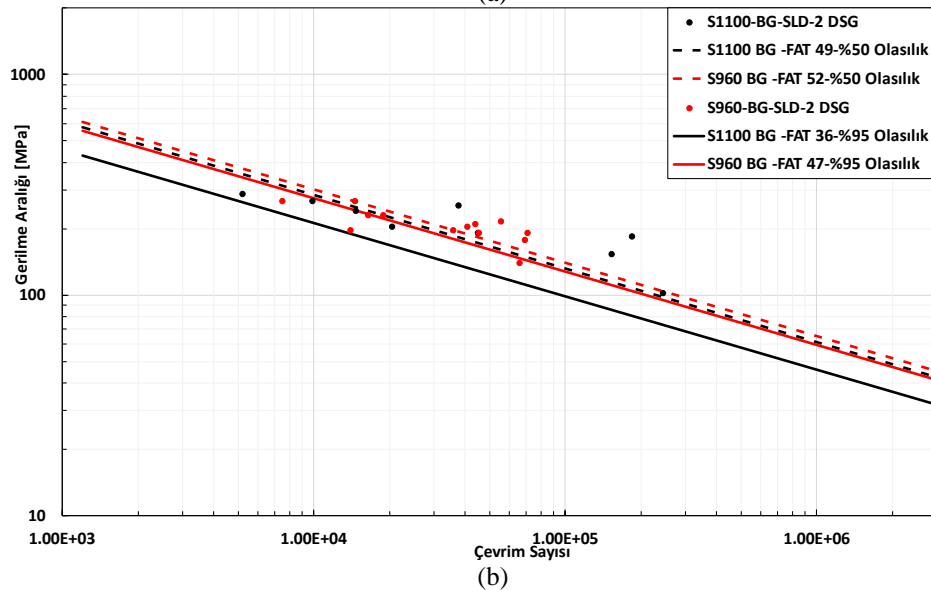
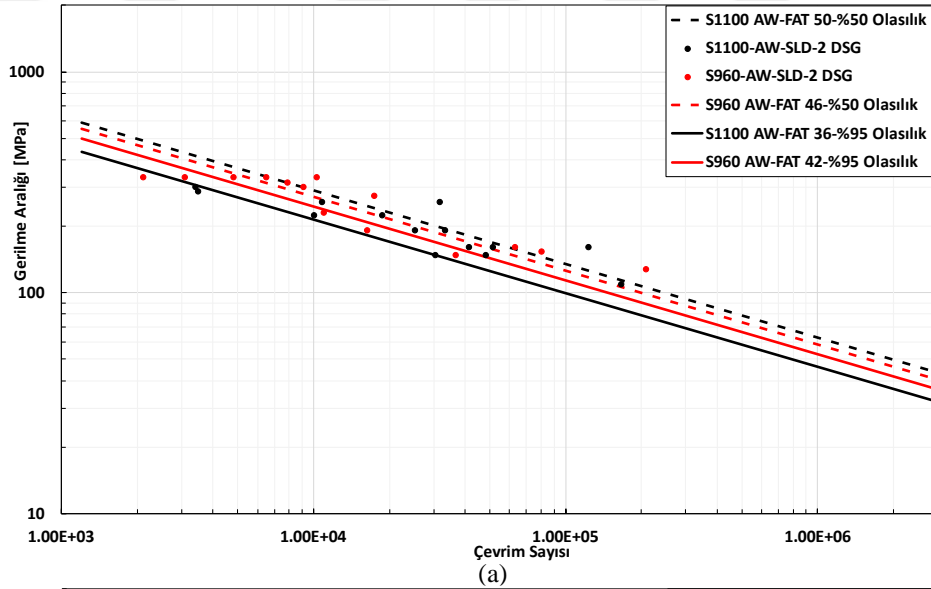


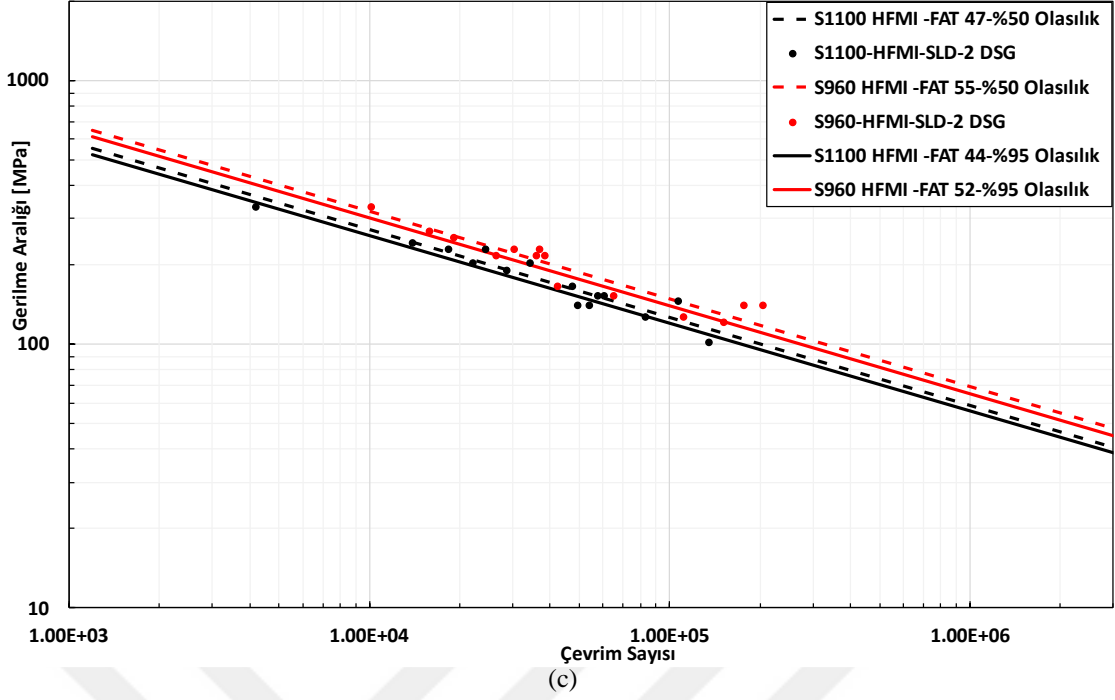
(c)

Şekil 4.52. SLD-2 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

SLD-2 modelinde DSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.53'te gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 10.9937 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.1695 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir.

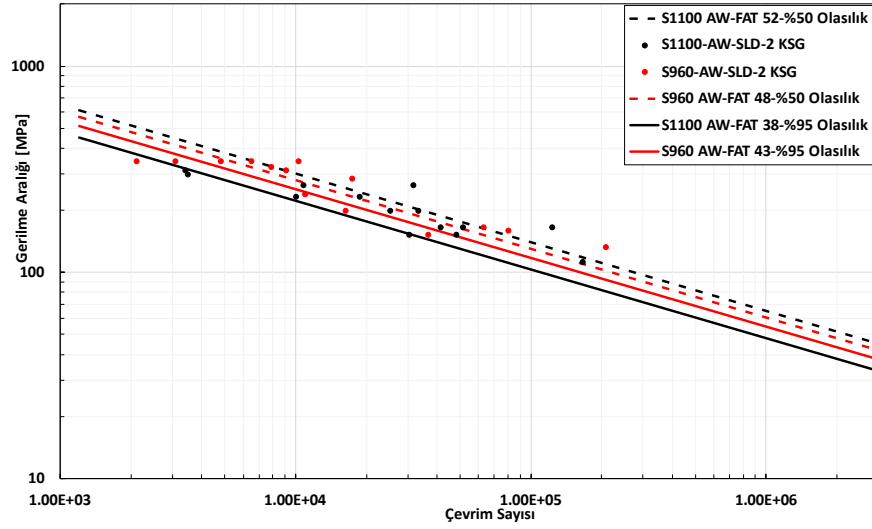
Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 42 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 10.9829 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.3152 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 36, S960 malzemelerde ise FAT 47 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2406 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4421 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 44, S960 malzemelerde ise FAT 52 değerleri elde edilmiştir.



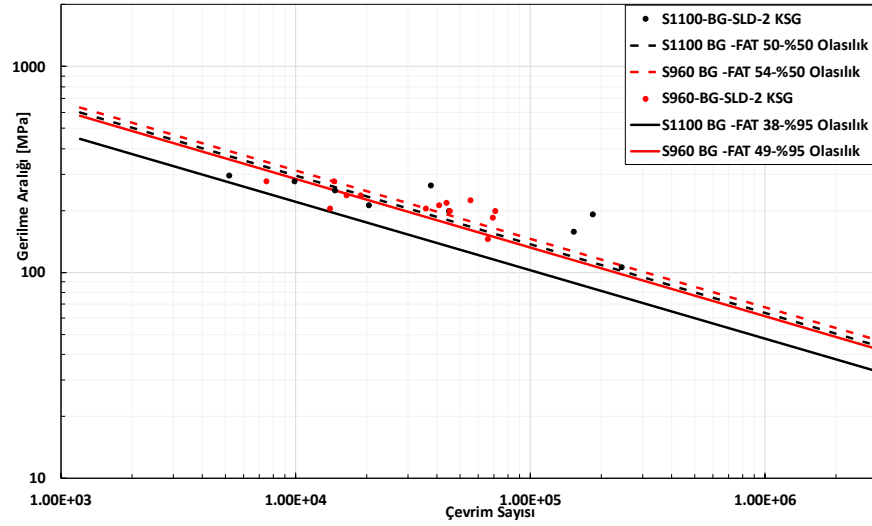


Şekil 4.53. SLD-2 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

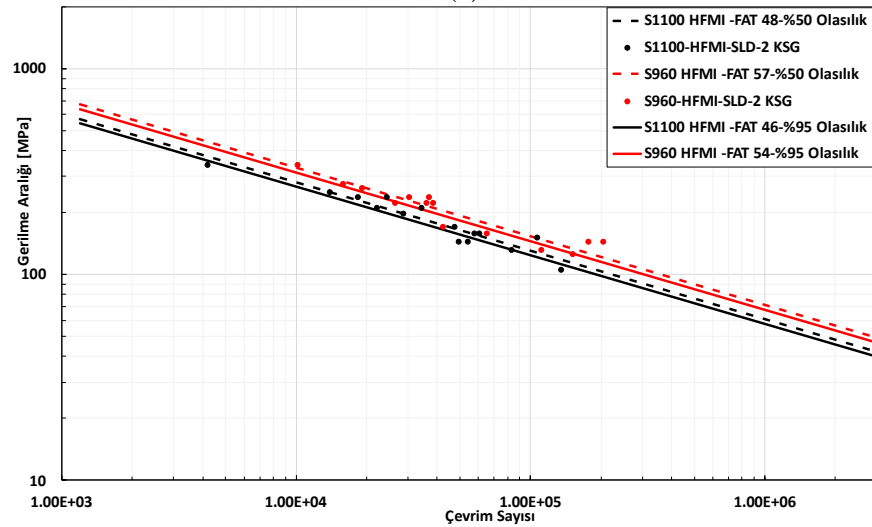
SLD-2 modelinde KSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.54’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.0384 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.2141 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 38, S960 malzemelerde ise FAT 43 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.0275 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.3599 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 38, S960 malzemelerde ise FAT 49 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2852 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4867 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 46, S960 malzemelerde ise FAT 54 değerleri elde edilmiştir.



(a)



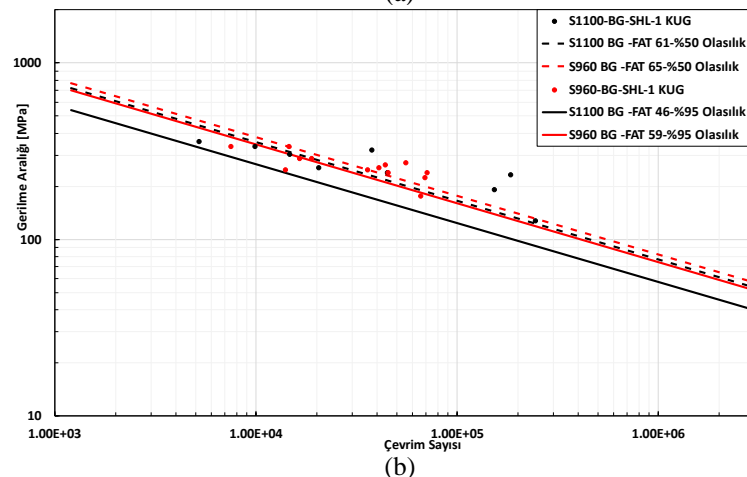
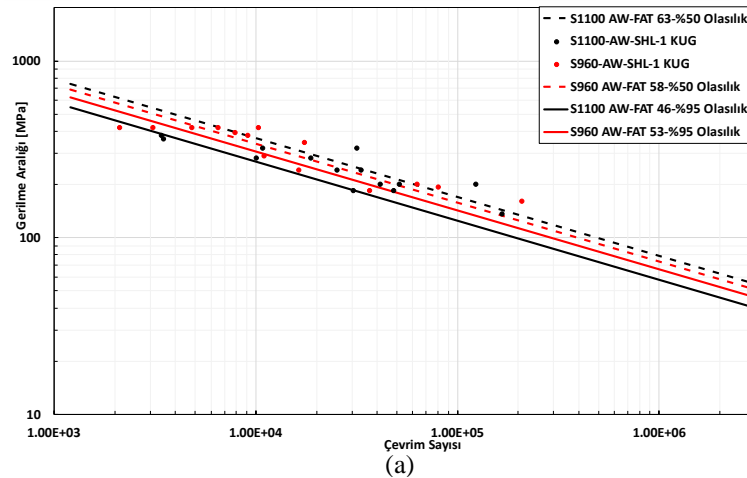
(b)

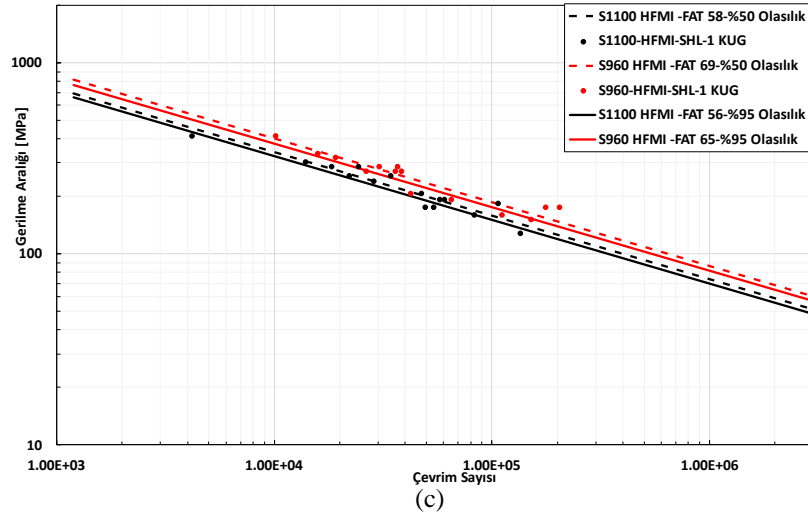


(c)

Şekil 4.54. SLD-2 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

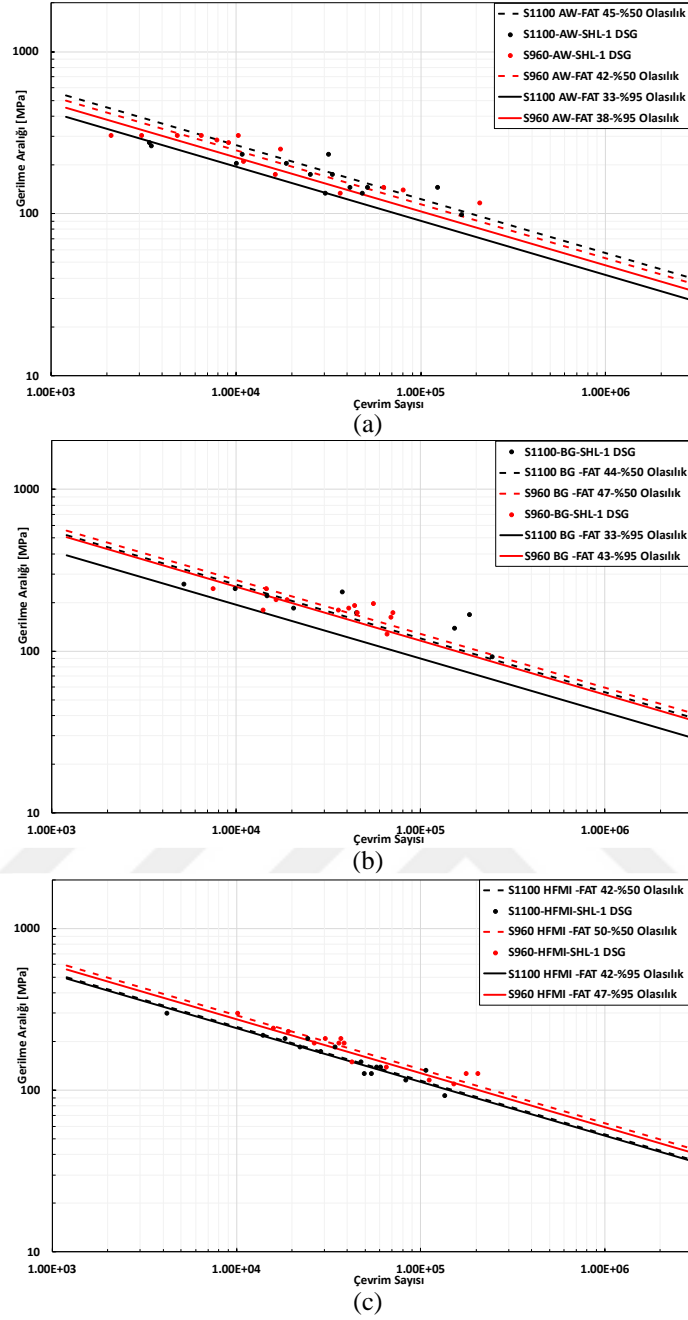
SHL-1 modelinde KUG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.55'te gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.2888 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4646 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 46, S960 malzemelerde ise FAT 53 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.278 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.6104 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 46, S960 malzemelerde ise FAT 59 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.5357 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.7372 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 56, S960 malzemelerde ise FAT 65 değerleri elde edilmiştir.





Şekil 4.55. SHL-1 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

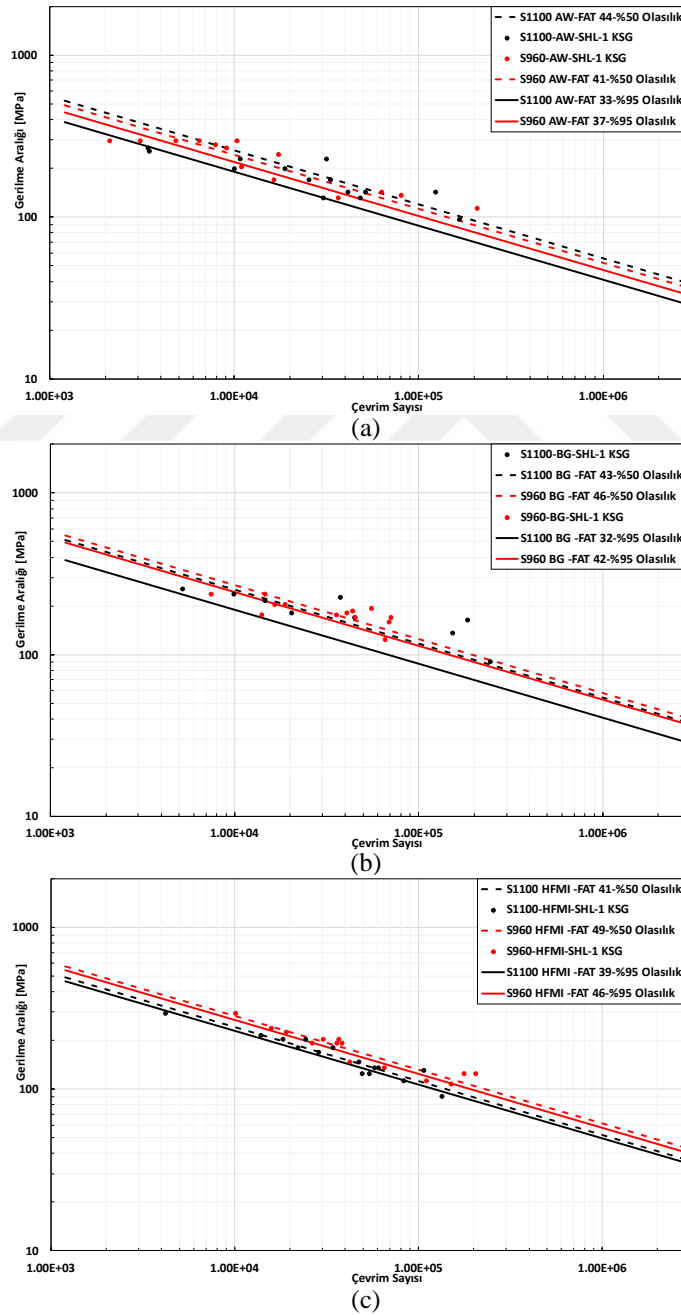
SHL-1 modelinde DSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.56'da gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 10.8684 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.0442 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 33, S960 malzemelerde ise FAT 38 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 10.8576 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.19 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 33, S960 malzemelerde ise FAT 43 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.1553 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.3168 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 42, S960 malzemelerde ise FAT 47 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.56. SHL-1 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

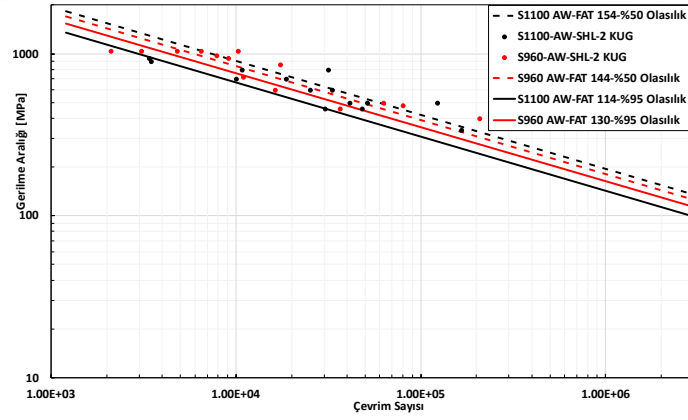
SHL-1 modelinde KSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.57’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 10.8384 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.0143 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 33, S960 malzemelerde ise FAT 37 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N =$

$10.8276 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.16 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 32, S960 malzemelerde ise FAT 42 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.0854 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.2868 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 39, S960 malzemelerde ise FAT 46 değerleri elde edilmiştir.

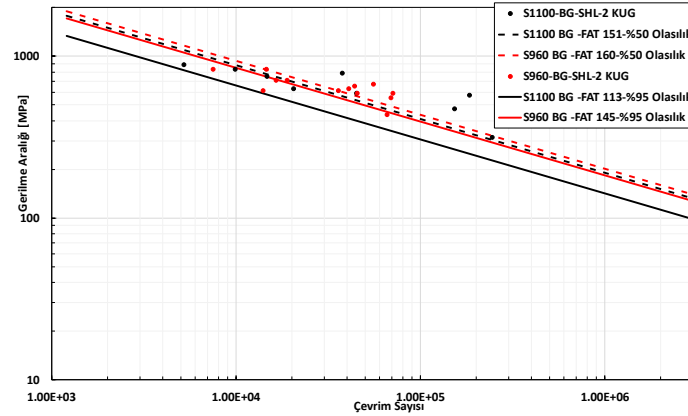


Şekil 4.57. SHL-1 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

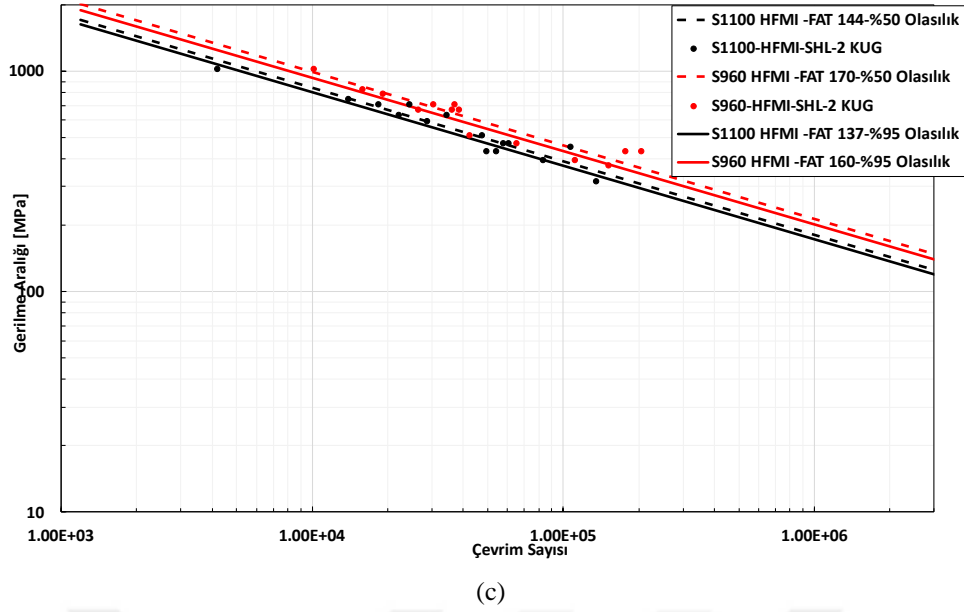
SHL-2 modelinde KUG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.58'de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 12.4674 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.6432 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 114, S960 malzemelerde ise FAT 130 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.4566 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.789 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 113, S960 malzemelerde ise FAT 145 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.7143 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.9158 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 137, S960 malzemelerde ise FAT 160 değerleri elde edilmiştir.



(a)

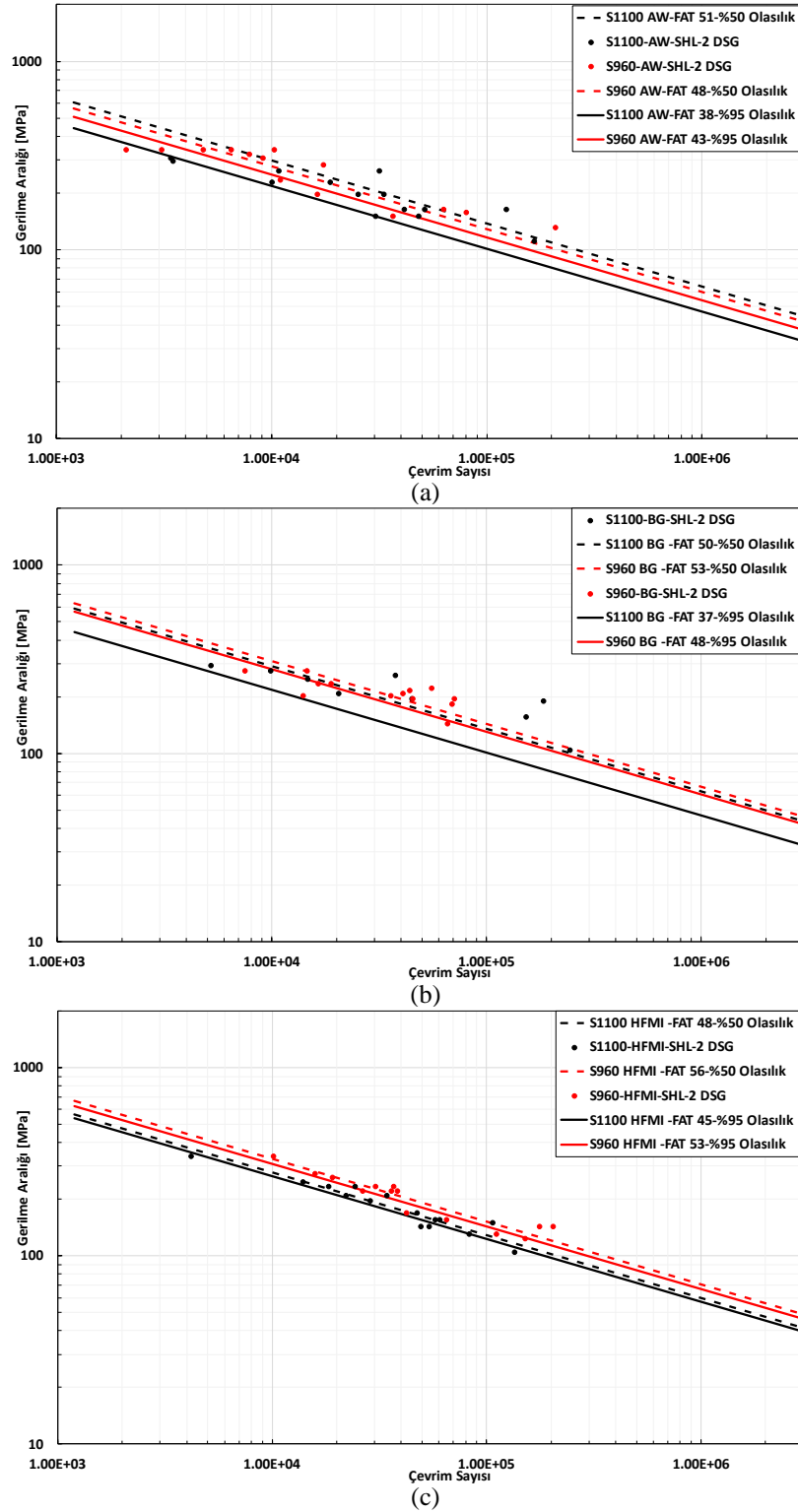


(b)



Şekil 4.58. SHL-2 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

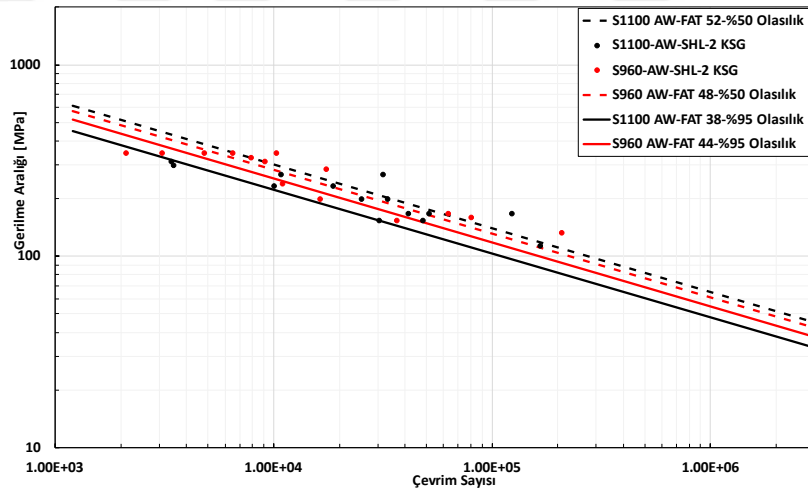
SHL-2 modelinde DSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.59’da gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.0222 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.1979 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 38, S960 malzemelerde ise FAT 43 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.0114 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.3437 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 37, S960 malzemelerde ise FAT 48 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.2691 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4706 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 45, S960 malzemelerde ise FAT 53 değerleri elde edilmiştir.



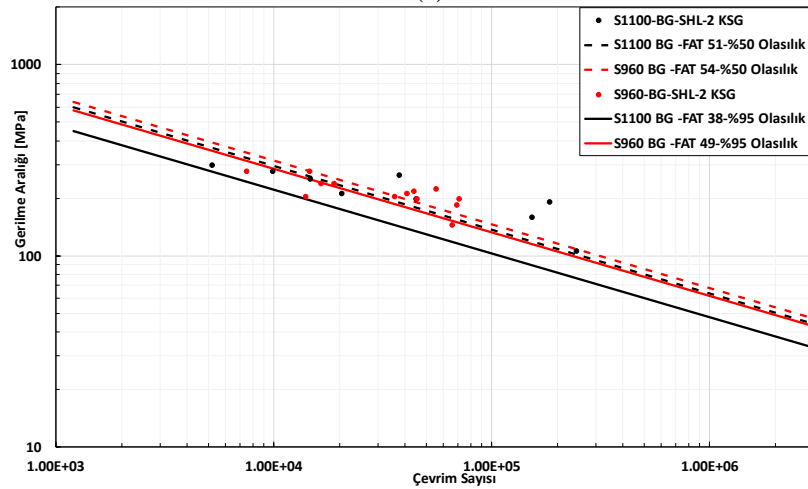
Şekil 4.59. SHL-2 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

SHL-2 modelinde KSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.60'de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.0421 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde

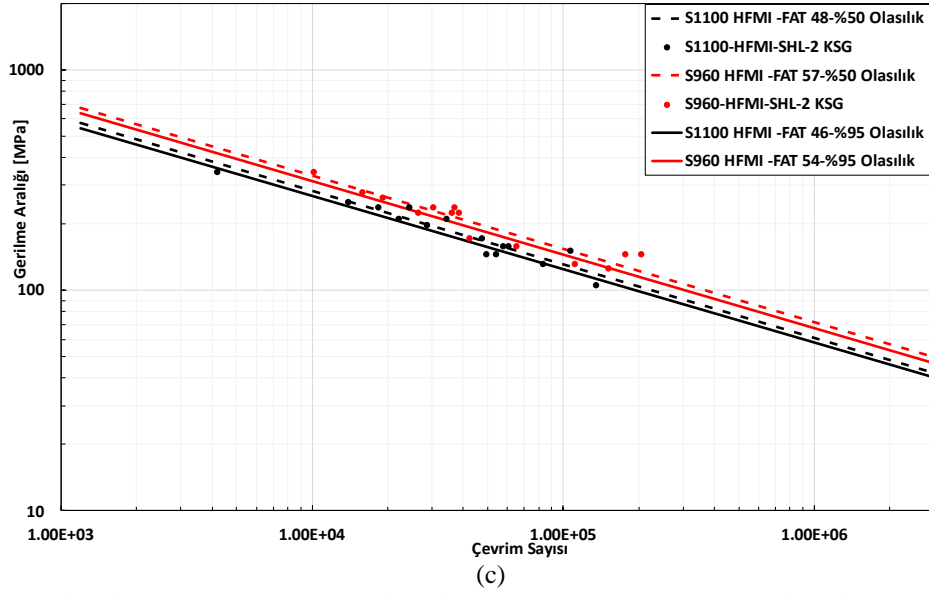
$\log N = 11.2179 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 38, S960 malzemelerde ise FAT 44 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.0313 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.3637 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 38, S960 malzemelerde ise FAT 49 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.289 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.4905 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 46, S960 malzemelerde ise FAT 54 değerleri elde edilmiştir.



(a)

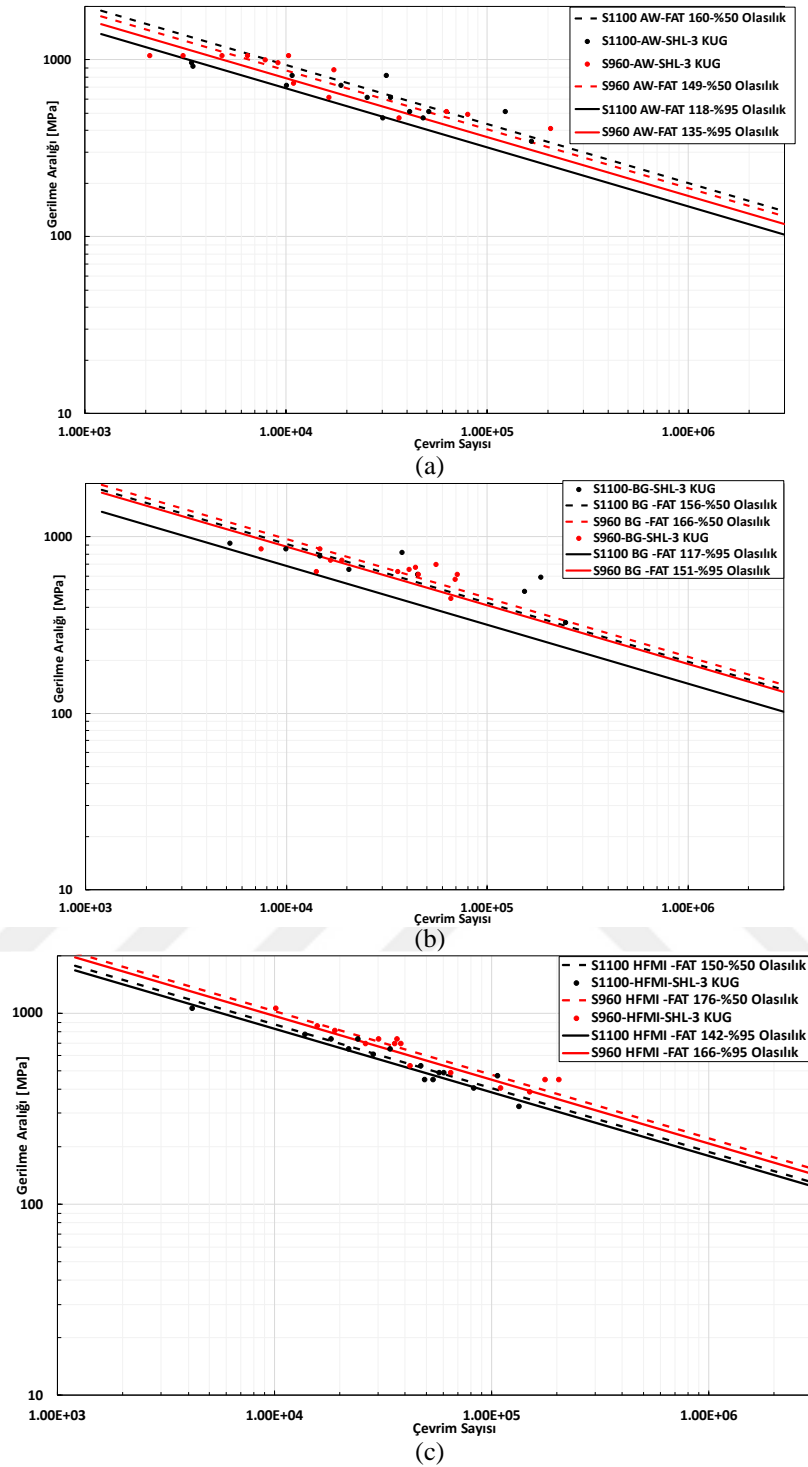


(b)



Şekil 4.60. SHL-2 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

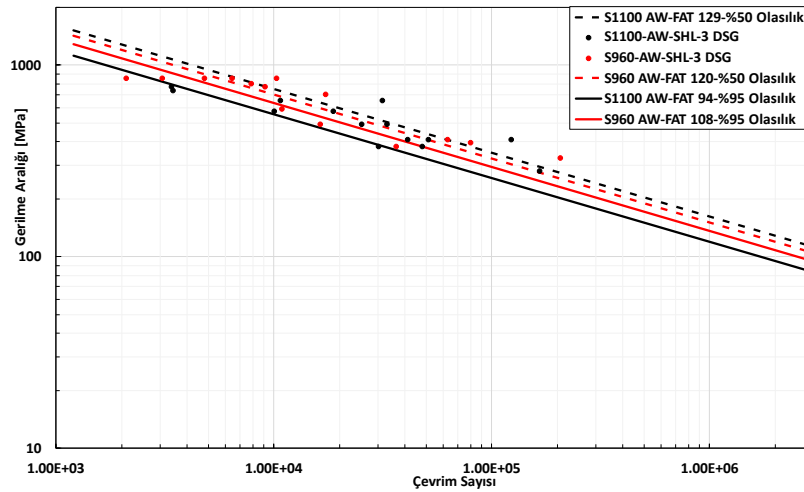
SHL-3 modelinde KUG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.61’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 12.5121 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.6878 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 118, S960 malzemelerde ise FAT 135 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.5013 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.8336 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 117, S960 malzemelerde ise FAT 151 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.759 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.9604 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 142, S960 malzemelerde ise FAT 166 değerleri elde edilmiştir.



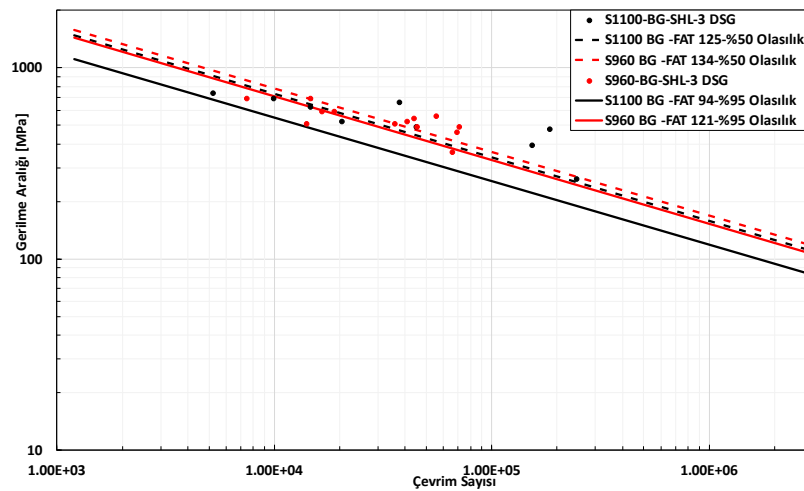
Şekil 4.61. SHL-3 KUG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

SHL-3 modelinde DSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.62’de gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 12.2292 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.405 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir.

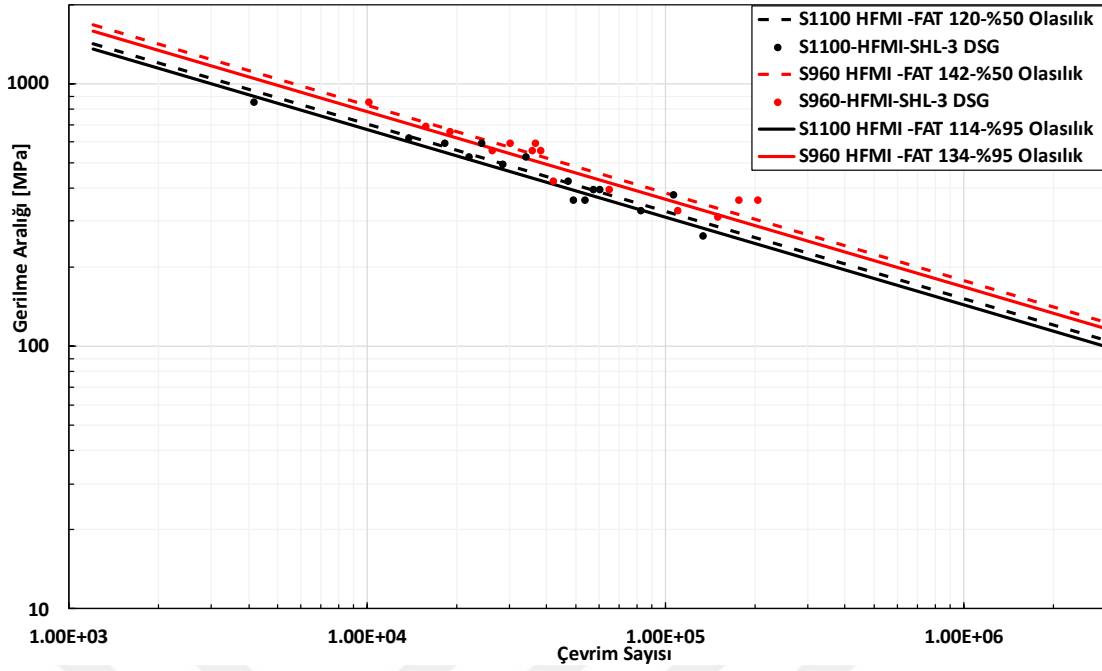
Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 94, S960 malzemelerde ise FAT 108 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.2184 - 3 \cdot \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.5507 - 3 \cdot \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 94, S960 malzemelerde ise FAT 121 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 12.4761 - 3 \cdot \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 12.6776 - 3 \cdot \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 114, S960 malzemelerde ise FAT 134 değerleri elde edilmiştir.



(a)



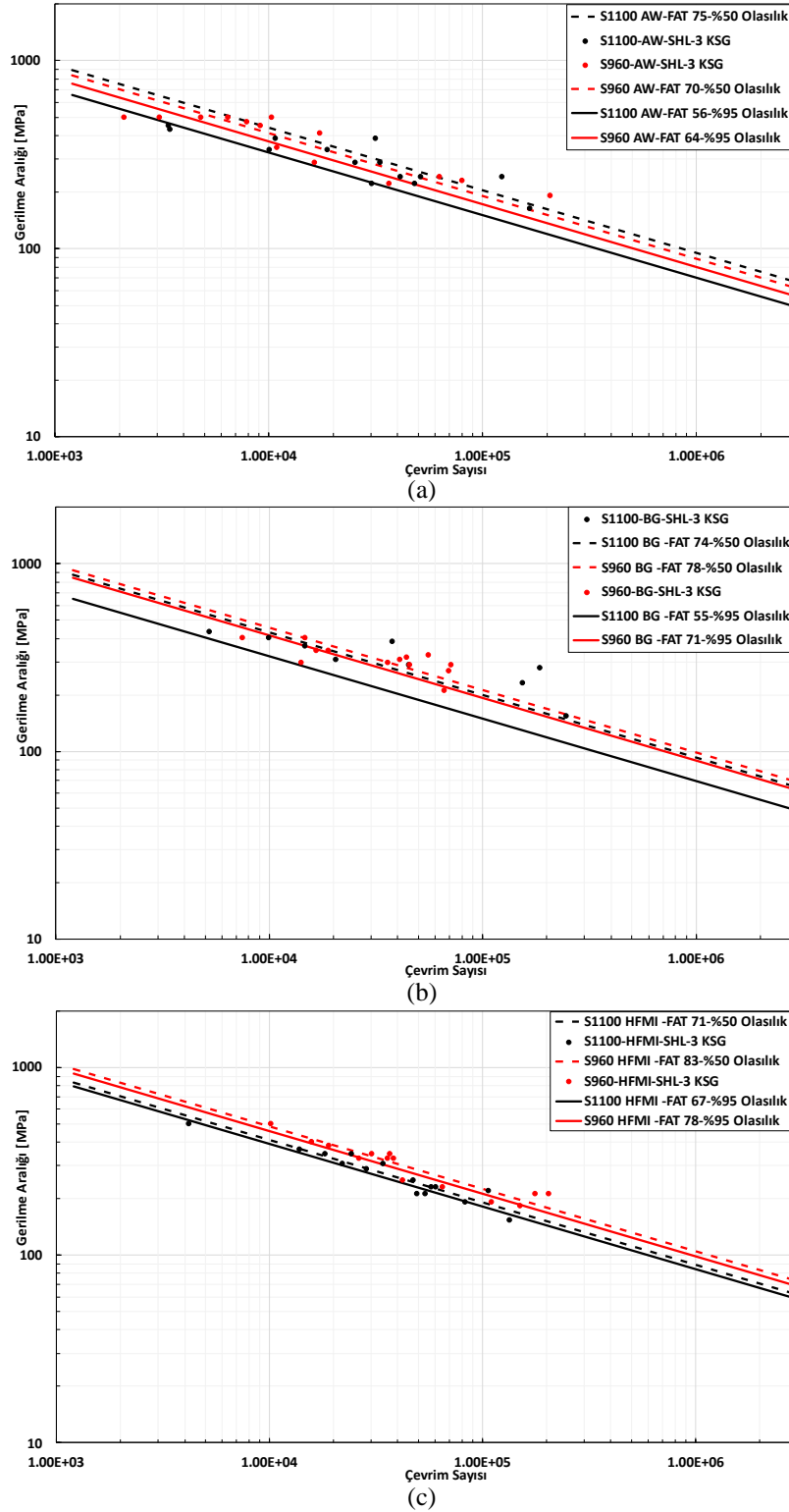
(b)



(c)

Şekil 4.62. SHL-3 DSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

SHL-3 modelinde KSG değerlerinde malzeme ve kaynak sonrası yapılan işlemler ile ilgili $m=3$ olduğu durum için önerilen S-N eğrileri Şekil 4.63'te gösterilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde kaynak sonrası işlem yapılmamış numuneler için S1100 malzemelerde $\log N = 11.5335 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.7093 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası işlem yapılmamış numunelerde S1100 malzeme için FAT 56, S960 malzemelerde ise FAT 64 değerleri elde edilmiştir. Kaynak ucu taşlanmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.5227 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.8551 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 55, S960 malzemelerde ise FAT 71 değerleri elde edilmiştir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde doğrusal olmayan regresyon analizleri neticesinde S1100 malzemelerde $\log N = 11.7804 - 3 * \log \sigma$, S960 malzemelerde $\log N = 11.9819 - 3 * \log \sigma$ denklemleri elde edilerek FAT değerleri elde edilmiştir. Kaynak sonrası YFMD işlemi uygulanmış numunelerde S1100 malzeme için FAT 67, S960 malzemelerde ise FAT 78 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.63. SHL-3 KSG değerlerine göre $m=3$ için elde edilen S-N eğrisi (a) Kaynak sonrası işlem yapılmamış (b) Kaynak sonrası kaynak ucu taşlanmış (c) Kaynak sonrası YFMD işlemi

S-N eğrileri oluşturulurken %95 ve %5 olasılık dağılımlarına göre dağılım genişlik değerleri de hesaplanmıştır. Bu SLD-1 EÇG ve CMM modellemelerinde farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Diğer modelleme tekniklerinde oldukça yakın olduğu

görülmektedir. Malzeme ve işlemler karşılaştırıldığında ise YFMD işleminin oldukça düşük değerler verdiği görülmekte olup standart sapma değerleri daha düşüktür. BG ve işlemsiz numunelerde daha yüksek değerler çıkmış olup standart sapması ve dağılımları daha geniş olduğu için %5 ve %95 arasındaki ömür ve gerilme oranları daha yüksek çıkmıştır. S960 malzemelerde ise daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Malzemelerde S960 ve işlemlerde YFMD işlemi S-N eğri eğimine oldukça yakın olduğu gözlenmektedir. Dağılım genişlik değerlerinin malzeme, modelleme ve kaynak sonrası yapılan işlemlere göre değerleri Çizelge 4.16'te belirtilmektedir.

Çizelge 4.16. Modelleme tekniklerine göre dağılım genişlik değerleri

		S1100-AW	S960-AW	S1100-BG	S960-BG	S1100-YFMD	S960-YFMD
CMM KUG	T_{σ}	1.21	1.17	1.64	1.16	1.16	1.14
	T_N	1.78	1.61	4.42	1.56	1.57	1.49
CMM DSG	T_{σ}	1.30	1.19	1.85	1.54	1.20	1.26
	T_N	2.21	1.68	6.32	3.66	1.74	1.99
CMM KSG	T_{σ}	1.28	1.20	1.85	1.77	1.21	1.41
	T_N	2.08	1.73	6.31	5.55	1.78	2.78
Nominal Gerilme	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SLD1-EÇG	T_{σ}	1.46	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	3.14	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SLD1-DSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SLD1-KSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SLD2-KUG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SLD2-DSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SLD2-KSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL1-KUG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL1-DSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL1-KSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL2-KUG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL2-DSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL2-KSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL3-KUG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL3-DSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43
SHL3-KSG	T_{σ}	1.85	1.23	1.78	1.22	1.11	1.13
	T_N	6.29	1.85	5.68	1.80	1.35	1.43

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında kaynaklı bağlantıların sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen nümerik analizleri ile deneysel çalışmalarda karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca nümerik analizler neticesinde gerilme konsantrasyon faktörü parametrik denklemi için çalışmalar yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların nümerik ve deneysel analizlerle, doğal frekansı, anlık gerilme değerleri, yorulma ömür tahminleri karşılaştırılarak nominal, sıcak nokta ve etkin çentik gerilme yaklaşımları karşılaştırılarak doğrulamalar yapılmıştır.

Gerilmelerin nümerik analizlerle karşılaştırılabilmesi için gerinim ölçer sensörler kullanılarak doğrulamalar yapılmıştır. Frekans düzleminde ve anlık olarak gerinim ölçer sensor ve nümerik analizler arasında incelemeler yapılmış olup frekans düzleminde 5, 10, 20, 30 Hz değerlerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Anlık incelenen çalışmalar da ise T köşe kaynak bağlantılı numunelerde deneysel çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Zamana ve gerilme değerlerine bağlı olarak anlık olarak incelenen çalışmada modelleme tekniklerinin doğruluk oranları ve gerilme büyütme faktörleri belirlenmiştir. Statik olarak incelenen çalışmalarda doğrusal ve kuadratik ekstrapolasyon sıcak nokta gerilme değerlerine göre karşılaştırılmıştır. 2 farklı kaynak uzunluğuna bağlı olarak gerçekleştirilen çalışmada sıcak nokta gerilme metodu doğrusal ve kuadratik ekstrapolasyona göre Numune-1 ve Numune-2’de SHL-3 modeli doğruluk oranının en yüksek olduğu modelleme tekniği olarak belirlenmiştir. Sıcak nokta gerilme metodunda doğrusal ekstrapolasyon SHL-3 modeli için Numune-1’de %68.34, Numune-2’de %86.20 doğruluk oranı olduğu belirlenmiştir. Sıcak nokta gerilme metodunda kuadratik ekstrapolasyon denkleminde göre SHL-3 modeli Numune-1’de %71.21, Numune-2’de ise %89.47 doğruluk oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma neticesinde daha doğru gerilme tespiti için SHL-3 modeli önerilmektedir. Gerilme büyütme faktörleri için ise sadece katı modellemeler incelenmiş olup SLD-1 modelinin daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiş olup 0.9 ile 1.1 arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Her iki numunede de ortalama 1.05 gerilme büyütme faktör değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Doğal frekans değerleri 13 farklı kaynak parametresine göre incelenmiş toplamda 39 numuneye modal testler gerçekleştirilerek FFT dönüşümleri ile doğal frekans değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Ayrıca 3 adet numune de öngerilmeli ve öngerilmemiş olarak karşılaştırma yapmak için modal testler yapılmıştır. Bu çalışmada ayrıca lazer tarayıcı ile taramalar gerçekleştirilmiş olup SLD, SHL ve CMM modelleme tekniklerine göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalıntı gerilmenin etkisini karşılaştırma amacıyla

yapılan testler neticesinde öngörülmesiz sonuçlara göre SLD-1 %1.65, öngörülmesi sonuçlara göre ise %1.85 hata oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Kaynak parametrelerin etkilerini incelemek amacıyla yapılan testler neticesinde ise 6000 Hz değerine kadar 7 mod değerine kadar ölçümler yapılmıştır. CMM modelleme tekniğine göre -%0.39, SLD-1'e göre -%0.88 , SLD-1'e göre -%0.74 ortalama hata oranları belirlenmiştir.

Gerilme konsantrasyon faktörlerinin tespiti için yorulma testlerinde kullanılan çift T kaynak bağlantılı ve T kaynak bağlantılı 2 farklı geometri kullanılmıştır. Çekme ve eğme zorlaması ile gerçekleştirilen çalışmada her bir formülasyon için 7 farklı parametre ile 8500 adet latin hiperküp yöntemi ile veriler dağıtılmıştır. Python kodu ile hazırlanan bir yazılım vasıtası ile SEA gerçekleştirilmiş ve gerilme konsantrasyon faktörleri belirlenmiştir. Dağıtılan 7 farklı girdi ve SEA gerilme konsantrasyon faktörünün çıktı verileri yapay sinir ağı ile eğitimi gerçekleştirilmiş ve yeni parametrik denklem elde edilmiştir. Literatürdeki parametrik denklemler karşılaştırıldığında en fazla veri ile eğitilmiş daha doğru sonuçların olduğu belirlenmiştir. Yapay sinir ağı ile oluşturulan denklemlerin ortalama hata oranlarının daha düşük olduğu görülmüş ve oluşturulan parametrik denklemler önerilmektedir.

Yorulma testlerinde ise simetrik çift T kaynak bağlantılı numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerde kaynak sonrası taşlama, YFMD ve işlemsiz durumlarında S960 ve S1100 malzemeler için S-N eğrilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Hazırlanan numunelerin hepsinde lazer tarama gerçekleştirilmiş ve katı model oluşturulmuştur. 3 adet numune de kalıntı gerilme değerleri XRD yöntemi ile ölçülmüştür. 3 farklı açıda gerçekleştirilen ölçümlerde beklenildiği gibi en yüksek kalıntı gerilme değeri, işlemsiz numunede -244 MPa, kaynak sonrası taşlamada -71.5 MPa ve YFMD işleminde -63.4 MPa basma gerilmeleri olduğu belirlenmiştir. Yorulma testleri gerçekleştirilmeden önce gerinim ölçer sensor ile modelleme teknikleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. 80 adet numune de başarılı bir şekilde testler gerçekleştirilmiş olup modelleme teknikleri, malzeme ve işlem tipine göre sabit 3 eğri eğiminde, FAT değerleri, S-N eğrileri ve sabit C katsayıları belirlenmiştir. FAT değerleri S1100 ve S960 malzemeleri arasında karşılaştırıldığında S1100 malzemenin FAT değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İşlemler karşılaştırıldığında ise YFMD işlemlerinde daha yüksek FAT değerleri belirlenmiştir. alışmalar neticesinde 114 adet farklı S-N eğrileri oluşturulmuş olup simetrik çift T bağlantılı yapılar için önerilmektedir.

S-N eğrileri oluşturulduktan sonra %5 ve %95 gerilme ve çevrim sayı oranlarına göre dağılım genişlikleri belirlenmiştir. Bu değerler gerilme dağılım genişliklerine göre

minimum 1.11, maksimum 1.85 belirlenmiştir. Çevrim sayılarına göre dağılım genişlik oranlarına göre ise minimum 1.35, maksimum 6.29 belirlenmiştir.

Uluslararası kaynak enstitüsü ve literatürdeki çalışmalara göre simetrik çift T bağlantılı numuneler için FAT 36 yorulma sınıfları önerilmektedir. Bu çalışmada S1100, S960 malzemeleri ile kaynak ucu taşlanmış, YFMD işlemi yapılmış ve kaynak sonrası işlemsiz olarak gerçekleştirilen yorulma testlerine göre FAT değerleri farklı belirlenmiştir. Yorulma testlerinde 80 adet başarılı yorulma testleri gerçekleştirilmiş olup farklı kuvvetlerde zorlanan testlerde SEA gerçekleştirilerek farklı modelleme tekniklerine göre S-N eğrileri oluşturulmuştur. CMM, SLD-1, SLD-2, SHL-1, SHL-2, SHL-3 modelleme teknikleri, S960, S1100 malzemeleri, kaynak sonrası işlemsiz, taşlanmış ve YFMD işlemi yapılmış işlemleri, etkin çentik gerilme, doğrusal sıcak nokta, kuadratik sıcak nokta ve nominal gerilme yaklaşımları olarak her değişken için toplamda 114 adet 3 eğime göre S-N eğrileri ve FAT değerleri önerilmektedir. Nominal gerilme değerleri tüm numunelerde eşit çıkmıştır.

Nominal gerilme yaklaşımına göre kaynak sonrası işlemsiz S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 36, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 41 yorulma sınıfı önerilmektedir. Kaynak sonrası taşlanmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 36, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 46 yorulma sınıfı önerilmektedir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 43, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 51 yorulma sınıfı önerilmektedir. Böylelikle kaynak sonrası YFMD ve taşlama işlemlerinin nominal gerilme yaklaşımına göre yorulma ömrünü artırdığı için önerilmektedir.

Etkin çentik gerilme yaklaşımına ve SLD-1 modelleme tekniğine göre kaynak sonrası işlemsiz S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 183, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 193 yorulma sınıfı önerilmektedir. Kaynak sonrası taşlanmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 167, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 215 yorulma sınıfı önerilmektedir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 203, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 237 yorulma sınıfı önerilmektedir. Literatürde FAT 225 yorulma sınıfı önerilmiş olup malzemelere ve yapılan işlemlere göre farklı FAT sınıfları önerilmektedir.

Kaynak dikişinde oluşan maksimum gerilme ve CMM modelleme tekniğine göre kaynak sonrası işlemsiz S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 123, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 139 yorulma sınıfı önerilmektedir. Kaynak

sonrası taşlanmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 134, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 151 yorulma sınıfı önerilmektedir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 137, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 166 yorulma sınıfı önerilmektedir.

Doğrusal sıcak nokta gerilme yaklaşımına ve CMM modelleme tekniğine göre kaynak sonrası işlemsiz S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 55, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 59 yorulma sınıfı önerilmektedir. Kaynak sonrası taşlanmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 57, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 57 yorulma sınıfı önerilmektedir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 45, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 57 yorulma sınıfı önerilmektedir. Literatürde FAT 90 sınıfı önerilmekte olup bu çalışma neticesinde daha düşük FAT sınıfları ile malzemelere ve yapılan işlemlere göre önerilmektedir.

Kuadratik sıcak nokta gerilme yaklaşımına ve CMM modelleme tekniğine göre kaynak sonrası işlemsiz S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 57, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 61 yorulma sınıfı önerilmektedir. Kaynak sonrası taşlanmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 58, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 53 yorulma sınıfı önerilmektedir. YFMD işlemi yapılmış numunelerde S1100 malzemeye sahip numuneler için FAT 46, S960 malzemelere sahip numuneler için FAT 56 yorulma sınıfı önerilmektedir. Literatürde FAT 90 sınıfı önerilmekte olup bu çalışma neticesinde daha düşük FAT sınıfları ile malzemelere ve yapılan işlemlere göre önerilmektedir.

Diğer modelleme tekniklerine, malzeme ve yapılan işlemlere göre 114 adet FAT sınıfları önerilmiş olup kaynak sonrası yapılan işlemlere göre YFMD ve taşlama işlemlerinin yorulma ömrünü artırdığı belirlenmiştir. Malzemelere göre ise S1100 malzemelerin S960 malzemelere göre genel olarak daha düşük FAT sınıflarına sahip olduğu tespit edilmiş ve bu durumun göz önünde bulundurulması önerilmektedir. S1100 malzemeler için günümüzde 890 MPa akma dayanımına kadar üretilebildiği için iş parçası ve ana malzemedan daha düşük dolgu teli kullanımına sahiptir. Yorulma ömrünün bu sebeple daha düşük olduğu yorumlanmıştır. S960 malzemelerde ise dolgu teli iş parçası ve ana malzemenin mekanik özelliklerine yakın olup yorulma ömrü daha fazla olduğu belirlenmiştir. Tüm FAT sınıfları yük taşıyan simetrik çift T kaynak bağlantılı yapılar için önerilmekte olup dolgu telinin farklı seçilmesi ve malzeme seçimlerinin farklı

olması durumunda farklı FAT değerlerine sebep olabileceği bu sebeple belirlenen bu parametrelere göre FAT sınıflarının kullanılması önerilmektedir.

Literatürde kaynaklı bağlantıların yorulma testleri ve YFMD (yüksek frekanslı mekanik dövme) işlemleri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, yük taşıyan çift T kaynak bağlantılı yapılara yönelik araştırmalar sınırlı olup genellikle FAT 36 sınıfı önerilmektedir. Bu yapı türlerinde kaynak sonrası işlemler için IIW tarafından net bir sınıf değeri belirtilmemiştir. Ayrıca literatürde modelleme tekniklerine göre FAT sınıfları belirtilmemiş ve sonuçların modelleme tekniğinde göre değişebileceği için literatürde bu eksikliği gidermek için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, ultra yüksek mukavemetli çeliklerde uygulanan YFMD ve taşlama işlemlerinin yorulma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu etkiler yeni S-N eğrileriyle somutlaştırılmıştır. Nominal, sıcak nokta ve etkin çentik gerilme yaklaşımları kullanılarak, CMM taraması ve beş farklı modelleme tekniği ile toplam 114 adet S-N eğrisi elde edilmiştir. Bu kapsamda, S1100 ve S960 malzemelerinden üretilen yük taşıyan çift T kaynak bağlantılı yapılarda kaynak sonrası işlem uygulanmış ve uygulanmamış durumlar için yeni bulgular sunulmuştur. Kaynaklı yapıların dinamik performansları değerlendirilirken, rezonansa bağlı olası riskleri en aza indirmek için doğal frekansın doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Çalışmada, kaynak parametrelerinin doğal frekansa etkileri modal çekiç testi ve harmonik nümerik analizler ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu değerlendirme sırasında, yazılım desteğiyle 8 farklı parametre ve 13 çeşit numuneden elde edilen toplam 39 sonuç analiz edilmiştir. Böylelikle, bu parametrelerin dinamik zorlanma durumuna etkileri incelenmiş ve konuya ilişkin yeni bulgular literatüre kazandırılmıştır. Gerilme konsantrasyon faktörlerine ilişkin literatürde farklı çalışmalar bulunsa da, SEA yazılımlarında yapılan bireysel analizler oldukça zaman alıcıdır ve bu durum, daha az veri girişi yapılmasına yol açarak korelasyon katsayılarının düşmesine ve hata oranlarının yükselmesine neden olmaktadır. Regresyon analizleriyle oluşturulan parametrik denklemlerde de benzer şekilde yüksek hata oranları görülmektedir. Ayrıca, literatürde ağ kalite kriterlerinin dikkate alınmadığı tespit edilmiş, bu durumun yanlış sonuçlara yol açabileceği vurgulanmıştır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu tezde BDM ve BDT yazılımları entegre bir sistemle haberleştirilmiş ve tasarım değişikliği ile analiz uygulamalarının otomatikleştirilmesi sağlanmıştır. Latin Hiperküp yaklaşımı kullanılarak iteratif analizler gerçekleştirilmiş, her iterasyonda ağ kalite kriteri kontrol edilerek uygun olmayan ağ yapılarının düzeltilmesi sağlanmıştır. Bu süreç sonunda daha doğru veriler elde edilmiş ve bu veriler yapay sinir ağı ile eğitilmiştir. Geliştirilen bu metodoloji,

literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında daha düşük hata oranlarına ulaşmış ve yöntemin benzer çalışmalarda kullanılabilmesi önerilmektedir.

80 adet gerçekleştirilen yorulma testleri boyunca tüm çalışmalar sonucunda %50 ve %95 olasılıkla FAT sınıfları tespit edilmiştir. 6 farklı malzeme ve işlem farklılığında 19 farklı modelleme tekniği ve metot ile toplamda 114 adet FAT sınıfı belirlenmiştir. %95 olasılık değerine göre belirlenen FAT sınıfı değerleri Çizelge 4.17’de verilmektedir.

Çizelge 4.17. Modelleme teknikleri ve kaynak sonrası işlemler için %95 olasılığa göre belirlenen FAT sınıf değerleri

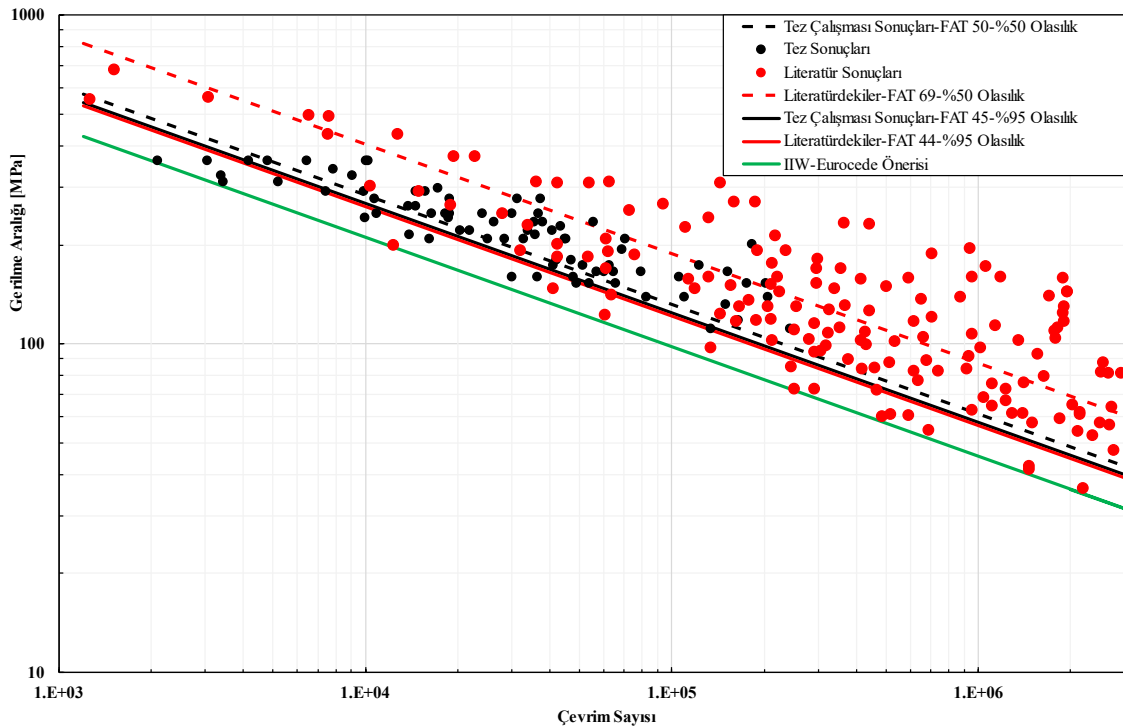
	S1100-AW	S960-AW	S1100-BG	S960-BG	S1100-YFMD	S960-YFMD
CMM KUG	123	139	134	151	137	166
CMM DSG	55	59	57	57	45	57
CMM KSG	57	61	58	53	46	56
Nominal Gerilme	36	41	36	46	43	51
SLD1-EÇG	183	193	167	215	203	237
SLD1-DSG	36	41	36	46	43	51
SLD1-KSG	36	42	36	46	44	51
SLD2-KUG	95	108	94	121	114	133
SLD2-DSG	36	42	36	47	44	52
SLD2-KSG	38	43	38	49	46	54
SHL1-KUG	46	53	46	59	56	65
SHL1-DSG	33	38	33	43	42	47
SHL1-KSG	33	37	32	42	39	46
SHL2-KUG	114	130	113	145	137	160
SHL2-DSG	38	43	37	48	45	53
SHL2-KSG	38	44	38	49	46	54
SHL3-KUG	118	135	117	151	142	166
SHL3-DSG	94	108	94	121	114	134
SHL3-KSG	56	64	55	71	67	78

Literatürde bulunan çalışmalarda FAT sınıfları nominal gerilme metodu için FAT 36, sıcak nokta gerilme değeri için FAT 90, etkin çentik gerilme metodu için ise FAT 225 sınıfı önerilmektedir. Bu çalışma sonucunda belirlenen FAT sınıflarına göre önerilen FAT sınıflarından farklı olduğu görülmektedir. Nominal gerilme metodunda FAT 36 önerilirken bu işlemler neticesinde FAT 36 veya daha yüksek değerler olduğu tespit edilmiştir. Kaynak sonrası işlemler için ise S960 malzemede kaynak ucu taşlanmış yapılarda FAT 41’den FAT 46’ya çıktığı, S1100 malzemelerde ise FAT 36 sınıfı olup değişiklik olmadığı görülmektedir. YFMD işleminde ise S1100 malzemede de S960 malzemede de olumlu etkileri olduğu görülmekte olup S960 malzeme de FAT 41’den FAT 51’e arttığı, S1100 malzemelerde ise FAT 36’dan FAT 43’e arttığı görülmektedir.

EÇG metodu için FAT 225 sınıfı önerilmekte olup testler neticesinde modelleme tekniğine göre oldukça az çıktığı belirlenmiştir. EÇG metoduna göre tüm sonuçlar SLD-1 modelleme tekniğine göre belirlenmiştir. S1100 malzeme de FAT 183, S960 malzeme de FAT 193 belirlenmiştir. Kaynak sonrası işlemler için taşlanmış numunelerden S1100

malzemelerde FAT 167, S960 malzeme de FAT 215 olduğu belirlenmiştir. Kaynak ucu taşlama işleminde ise S1100 malzeme de FAT 203, S960 malzemede FAT 237 olduğu belirlenmiştir. EÇG metoduna göre de YFMD işleminin yorulma ömrünü en çok iyileştiren işlem olduğu görülmektedir. Fakat kaynak ucu taşlama işlemi için S1100 malzemelerde daha olumsuz olduğu S960 malzemelerde ise daha olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

Sıcak nokta gerilme metotlarından olan DSG ve KSG metotları incelendiğinde FAT sınıflarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Genel olarak karşılaştırıldığında EÇG metodunun en yüksek FAT sınıf değerlerine sahip olduğu nominal gerilmenin ise en düşük FAT sınıflarına sahip olduğu görülmektedir. Sıcak nokta gerilme metoduna göre belirlenen FAT sınıfları genel olarak daha yüksek değerlerde belirlenmiştir. Tez, literatür (Song ve ark. 2018; Singh ve ark. 2003; Jakubczak ve Glinka 1986; Sørensen ve ark. 2006; Ahola, Björk, ve ark. 2019; Anami ve ark. 2008; Hanji ve ark. 2019; Braun ve ark. 2020; Zong ve ark. 2017; Hanji ve ark. 2012; Saiprasertkit ve ark. 2012; Vishnuvardhan ve ark. 2016; Frank 1972; Kainuma ve Kim 2005; Ahola, Skriko, ve ark. 2019; Kainuma ve Mori 2006, 2008; Ahola ve ark. 2022) ve IIW önerileri (Niemi ve ark. 2018; Hobbacher 2016) yorulma test sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.64’de gösterilmektedir.



Şekil 4.64. Literatür, tez çalışması ve FAT 36 IIW önerilerinin karşılaştırılması

Yorulma testleri neticesinde elde edilen FAT sınıf değerleri malzeme, modelleme tekniği ve kaynak sonrası yapılan işlemlere göre belirlenmiştir. Şekil 4.64’de gösterilen karşılaştırmalarda tez çalışmasının tüm sonuçları regresyon analizi yapılarak elde edilmiştir. Tez çalışması yorulma test sonuçlarında regresyon analizi neticesinde %95 olasılık dağılımına göre $\log N = 11.2781 - 3 * \log \sigma$, %50 olasılık dağılımına göre $\log N = 11.36 - 3 * \log \sigma$, %5 olasılık dağılımına göre ise $\log N = 11.4395 - 3 * \log \sigma$ elde edilmiştir. Literatür çalışmaları sonuçlarının regresyon analizi neticesinde %95 olasılık dağılımına göre $\log N = 11.25 - 3 * \log \sigma$, %50 olasılık dağılımına göre $\log N = 11.8235 - 3 * \log \sigma$, %5 olasılık dağılımına göre ise $\log N = 11.8915 - 3 * \log \sigma$ elde edilmiştir. Gerilme bant genişliği değeri ise tez çalışmasında 1.13, literatür çalışmalarında 1.64 elde edilmiştir. FAT sınıfları ise tez çalışma neticesinde FAT 45, literatür çalışmalarında ise FAT 44 elde edilmiştir. Nominal gerilme yaklaşımına göre karşılaştırmalar yapıldığında IIW önerilerine göre ise FAT 36 sınıfı önerilmektedir. Malzeme, modelleme tekniği ve kaynak sonrası işlemlerin etkileri incelenmeden karşılaştırıldığında FAT sınıfının tez çalışma neticesinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Abbas, F., and Annette, B., 2018, Effect of Burr Grinding on Fatigue Strength of Steel Butt-Welded Connections, *ADMT Journal*, 11, 15-25 , publisher = Islamic Azad University Isfahan Branch.
- Abdullah, N., Asri, M., and Sani, M. S. M., 2022, Strategies of Finite Element Modeling for Spot Welded Joints and its Modal Correlation with Experimental Data, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 19, 9543-50.
- Abdullah, N., Fouzi, M., and Sani, M. M., 2020, Computational modal analysis on finite element model of body-in-white structure and its correlation with experimental data, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17, 7915-26.
- Abdullah, N. A. Z., Asri, M. N. A. M., and Sani, M. S. M., 2022, Strategies of Finite Element Modeling for Spot Welded Joints and its Modal Correlation with Experimental Data, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 19, 9543-50 , publisher = Universiti Malaysia Pahang.
- Adak, M., and Guedes Soares, C., 2014, Effects of different restraints on the weld-induced residual deformations and stresses in a steel plate, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 699-710.
- Ahola, A., Björk, T., and Barsoum, Z., 2019, Fatigue strength capacity of load-carrying fillet welds on ultra-high-strength steel plates subjected to out-of-plane bending, *Engineering Structures*, 196, 109282.
- Ahola, A., Hamidreza, R. R., Björk, T., and Kukkonen, O., 2022, On the interaction of axial and bending loads in the weld root fatigue strength assessment of load-carrying cruciform joints, *Welding in the World*, 66, 731-44.
- Ahola, A., Skriko, T., and Björk, T., 2019, Experimental investigation on the fatigue strength assessment of welded joints made of S1100 ultra-high-strength steel in as-welded and post-weld treated condition, *Number of 1254-59*.
- Ali, D., Abbas, H., and Abdullah, T., 2020, Numerical Analysis of Stress Distribution During Tunneling in Clay Stone Rock, *International Journal of Engineering*, 33, 1472-78.
- Anami, K., Yokota, H., and Takao, R., 2008, Evaluation of fatigue strength of load-carrying cruciform welded joint under combination of axial loading and out-of-plane bending, *Int J Steel Struct*, 8, 183-88.
- Andika, M. G., Moelyadi, M. A., Sasongko, R. A., and Hadi, B. K., 2023, Pretest Planning Approach for Optimal Modal Testing on High Aspect Ratio Wing Structure, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 47, 1109-20.

- Antti, A., Arttu, M., Moritz, B., and Timo, B., 2021, Fatigue strength assessment of ground fillet-welded joints using 4R method, *International Journal of Fatigue*, 142, 105916, publisher = Elsevier.
- Ávila, B. V., Correia, J., Carvalho, H., Fantuzzi, N., De Jesus, A., and Berto, F., 2022, Numerical analysis and discussion on the hot-spot stress concept applied to welded tubular KT joints, *Engineering Failure Analysis*, 135, 106092.
- Baker, M., 1992, Review of test/analysis correlation methods and criteria for validation of finite element models for dynamic analysis, 10th International Modal Analysis Conference, 2, 985-91.
- Barbosa, J. F., Correia, J. A., Freire Júnior, R., Zhu, S.-P., and De Jesus, A. M., 2019, Probabilistic SN fields based on statistical distributions applied to metallic and composite materials: State of the art, *Advances in Mechanical Engineering*, 11, 1687814019870395.
- Baruah, S., and Singh, I. V., 2023, A framework based on nonlinear FE simulations and artificial neural networks for estimating the thermal profile in arc welding, *Finite Elements in Analysis and Design*, 226, 104024.
- Baumgartner, J., 2017, Review and considerations on the fatigue assessment of welded joints using reference radii, *International Journal of Fatigue*, 101, 459-68.
- Baumgartner, J., Yildirim, H. C., and Barsoum, Z., 2019, Fatigue strength assessment of TIG-dressed welded steel joints by local approaches, *International Journal of Fatigue*, 126, 72-78.
- Bibbo, N. D., Baumgartner, J., and Arora, V., 2022, Comparative study of critical plane fatigue criteria on multiaxial variable amplitude loaded welded test specimens, *International Journal of Fatigue*, 158, 106670.
- Braun, M., Ahola, A., Milaković, A.-S., and Ehlers, S., 2022, Comparison of local fatigue assessment methods for high-quality butt-welded joints made of high-strength steel, *Forces in Mechanics*, 6, 100056.
- Braun, M., Hensel, J., Song, S., and Ehlers, S., 2021, Fatigue strength of normal and high strength steel joints improved by weld profiling, *Engineering Structures*, 246, 113030.
- Braun, M., Scheffer, R., Fricke, W., and Ehlers, S., 2020, Fatigue strength of fillet-welded joints at subzero temperatures, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43, 403-16.
- Brennan, F., Peleties, P., and Hellier, A., 2000, Predicting weld toe stress concentration factors for T and skewed T-joint plate connections, *International Journal of Fatigue*, 22, 573-84.
- Brunnhofer, P., Buzzi, C., Pertoll, T., Leitner, M., and Mössler, W., 2022, Fatigue strength assessment of TIG-dressed high-strength steel cruciform joints by nominal and local approaches, *Welding in the World*, 66, 2585-94.

- Brunnhofer, P., Buzzi, C., Pertoll, T., Rieger, M., and Leitner, M., 2022, Fatigue design of mild and high-strength steel cruciform joints in as-welded and HFMI-treated condition by nominal and effective notch stress approach, *Procedia Structural Integrity*, 38, 477-89.
- Büyükbayram, C., Koç, B., Tekin, G., and Salihoğlu, B., 2015, Fatigue Strength Evaluation Approach of Welded Joints for More Reliable and Lighter Military Ground Vehicles, *Procedia Engineering*, 133, 485-500.
- Campagnolo, A., Belluzzo, F., Yıldırım, H. C., and Meneghetti, G., 2022, Fatigue strength assessment of as-welded and HFMI treated welded joints according to structural and local approaches, *International Journal of Fatigue*, 155, 106584.
- Chcc, N. C., 2007, Finite element modeling of arc welded joints, *Jurnal Mekanikal*.
- Chen, Y., Escalera Mendoza, A., and Griffith, D., 2023, Experimental dynamic characterization of both surfaces of structures using 3d scanning laser doppler vibrometer, *Experimental Techniques*, 47, 989-1006.
- Chun Bao, L., and Joonmo, C., 2021, A new method of predicting hotspot stresses for longitudinal attachments with reduced element sensitivities, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 379-95 , publisher = Elsevier.
- de Arruda, M. V., Correa, E. O., and Macanhan, V. B. d. P., 2023, Optimization of FEM models for welding residual stress analysis using the modal method, *Welding in the World*, 67, 2361-72.
- Dong, Y., Teixeira, A., and Soares, C. G., 2019, Fatigue reliability analysis of butt welded joints with misalignments based on hotspot stress approach, *Marine Structures*, 65, 215-28.
- Ebrahimi, S., Farahani, M., and Akbari, D., 2019, The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 2147-58.
- Ereiz, S., Duvnjak, I., and Jiménez-Alonso, J. F., 2022, Review of finite element model updating methods for structural applications, *Structures*, 41, 684-723.
- Eriksson, Å., Lignell, A.-M., Olsson, C., and Spennare, H., 2003, Weld evaluation using FEM: a guide to fatigue-loaded structures, Number of.
- Esfandiari, A., Bakhtiari-Nejad, F., Sanayei, M., and Rahai, A., 2010, Structural finite element model updating using transfer function data, *Computers & structures*, 88, 54-64.
- Ewins, D., 1984, *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press, Series Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Pressof
- Ewins, D. J., 2009, *Modal testing: theory, practice and application*, Number of.

- Farahani, E., Sarhadi, A., Alizadeh-Sh, M., Fæster, S., Danielsen, H., and Eder, M., 2023, Thermomechanical modeling and experimental study of a multi-layer cast iron repair welding for weld-induced crack prediction, *Journal of Manufacturing Processes*, 104, 443-59.
- Feng, R., Tang, C., Roy, K., Chen, Z., Chen, B., and Lim, J. B., 2020, An experimental study on stress concentration factors of stainless steel hybrid tubular K-joints, *Thin-Walled Structures*, 157, 107064.
- FF, A. M., and Lim, M., 2020, Dynamic Responses of Crack Welded Pipe Based on Frequency Response Function (FRF) for Fault Detection, *Jurnal Mekanikal*.
- Foroozanfar, A., Afridi, M., Fayazbakhsh, K., and Hashemi, S., 2023, Experimental and Computational Analysis of Elastic Modulus of 3D Printed Parts Using Impulse Excitation Technique (IET), *Experimental Techniques*, 47, 787-95.
- Fouzi, M., Jelani, K., Nazri, N., and Sani, M. S. M., 2018, Finite element modelling and updating of welded thin-walled beam, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15, 5874-89.
- Fouzi, M., Sani, M., and Muchlis, Y., 2019, Finite Element Modelling and updating of welded joint for dynamic study of exhaust structure, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 469, 012099.
- Fouzi, M. S. M., Sani, M. S. M., and Muchlis, Y., 2019, Finite Element Modelling and updating of welded joint for dynamic study of exhaust structure, *International Postgraduate Conference on Mechanical Engineering*.
- Frank, K. H., 1972, The fatigue strength of fillet welded connections, Number of.
- Fricke, W., 2003, Fatigue analysis of welded joints: state of development, *Marine structures*, 16, 185-200.
- Fricke, W., 2012, IIW recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis: IIW-2006-09, Number of.
- Friswell, M., and Mottershead, J. E., 1995, Finite element model updating in structural dynamics, 38, Number of.
- Fuštar, B., Lukačević, I., Skejić, D., and Gašparović, M., 2022, Fatigue tests of as-welded and HFMI treated S355 details with longitudinal and transverse attachments, *Welding in the World*, 66, 2549-61.
- Gaikwad, N. C., and Choudhari, V. B., 2017, An Experimental Investigation of Effect of Weld Geometry on Natural Frequencies of Welded Plates, *International Journal of Engineering Technology Science and Research*.
- Gharehbaghi, H., Hosseini, S., and Hosseini, R., 2023, Investigation of the Effect of Welding Residual Stress on Natural Frequencies, *Experimental and Numerical Study, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 47, 1777-85.

- Greenspon, J. E., 2003, Acoustics, linear, Number of 129-67.
- Gülbağçe, E., and Çelik, M., 2022, Experimental modal analysis for the plate structures with roving inertial shaker method approach, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 41, 27-40.
- Güven, F., 2018, Robot mekanizmaları tarafından yapılan kaynak dikişlerinin dinamik yüklere karşı olan dayanımlarının incelenmesi.
- Güven, F., and Rende, H., 2020, An analysis of endurance limit-modifying factors depending on bead shape and thickness in load-carrying welded T-joints, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 1-8.
- Gwashavanhu, B., Oberholster, A. J., and Heyns, P. S., 2016, Rotating blade vibration analysis using photogrammetry and tracking laser Doppler vibrometry, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76, 174-86.
- Halid Can, Y., Heikki, R., and Alain, N., 2020, Fatigue properties of as-welded and post-weld-treated high-strength steel joints: The influence of constant and variable amplitude loads, *International Journal of Fatigue*, 138, 105687 , publisher = Elsevier.
- Hanji, T., Miki, C., and Saiprasertkit, K., 2012, Low-and high-cycle fatigue behaviour of load-carrying cruciform joints containing incomplete penetration and strength mismatch, *Welding in the World*, 56, 133-46.
- Hanji, T., Tateishi, K., Shimizu, M., Uchida, D., Asano, K., and Kimura, R., 2019, Fatigue strength of cruciform joints and longitudinal joints with laser-arc hybrid welding, *Welding in the World*, 63, 1379-90.
- Harris, B., 2003, Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics, Number of.
- Hectors, K., and De Waele, W., 2020, A numerical framework for determination of stress concentration factor distributions in tubular joints, *International Journal of Mechanical Sciences*, 174, 105511.
- Hectors, K., and De Waele, W., 2021, Influence of weld geometry on stress concentration factor distributions in tubular joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106376.
- Heide, K. M., Heikebrügge, S., Dänekas, C., Breidenstein, B., and Schaumann, P., 2022, Automated geometry measurement and deep rolling of butt welds, *Welding in the World*, 66, 2533-47.
- Heikki, R., Pasquale, G., Jasmin, J., Jani, R., and Pauli, L., 2020, Fatigue strength modelling of high-performing welded joints, *International Journal of Fatigue*, 135, 105555 , publisher = Elsevier.
- Heim, R., and Heim, R., 2020, Influencing Factors for Fatigue Strength, *Structural Durability: Methods and Concepts: Enabling Cost and Mass Efficient Products*, 67-107.

- Heinze, C., Schwenk, C., and Rethmeier, M., 2012, Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding, *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 12-19.
- Hobbacher, A., 2016, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, 47, Number of.
- Hu, Y., Guo, W., Zhu, W., and Xu, Y., 2019, Local damage detection of membranes based on Bayesian operational modal analysis and three-dimensional digital image correlation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 131, 633-48.
- Husain, N. A., Khodaparast, H. H., Snaylam, A., James, S., Sharp, M., Dearden, G., and Ouyang, H., 2009, Modal testing and finite element model updating of laser spot welds, *Journal of Physics: Conference Series*, 181, 012024.
- Husain, N. A., Snaylam, A., Khodaparast, H. H., James, S., Dearden, G., and Ouyang, H. J., 2009, FE model updating for damage detection—application to a welded structure, *Key Engineering Materials*, 413, 393-400.
- Illés, S., and Tudományok, L. J., 2022, Post-treatment of welding joints of high strength steels I: Improving weld geometry—Overview, *ojs.uni-miskolc.hu*, 13-27.
- Ilyin, A. V., Sadkin, K. E., and Zabavichev, N. S., 2022, On the Fatigue Strength Calculation of Welded Shell Structures Made of High-Strength Steels under Low-Cycle Loading: Part 2. Development of the Calculation Procedure, *Inorganic Materials: Applied Research* 2022 13:6, 13, 1683-702 , publisher = Springer.
- Iqbal, N., Fang, H., Naseem, A., Kashif, M., and De Backer, H., 2020, A Numerical Evaluation of Structural Hot-Spot Stress Methods in Rib-To-Deck Joint of Orthotropic Steel Deck, *Applied Sciences*, 10, 6924.
- Jakubczak, H., and Glinka, G., 1986, Fatigue analysis of manufacturing defects in weldments, *International Journal of Fatigue*, 8, 51-57.
- Kainuma, S., and Kim, I.-T., 2005, Fatigue strength evaluation of load-carrying cruciform fillet-welded joints made with mild steel plates of different thickness, *International Journal of Fatigue*, 27, 810-16.
- Kainuma, S., and Mori, T., 2006, A fatigue strength evaluation method for load-carrying fillet welded cruciform joints, *International Journal of Fatigue*, 28, 864-72.
- Kainuma, S., and Mori, T., 2008, A study on fatigue crack initiation point of load-carrying fillet welded cruciform joints, *International Journal of Fatigue*, 30, 1669-77.
- Kalybek, M., Bocian, M., Pakos, W., Grosel, J., and Nikitas, N., 2021, Performance of camera-based vibration monitoring systems in input-output modal identification using shaker excitation, *Remote Sensing*, 13, 3471.
- Khot, S., and Yelve, N. P., 2011, Modeling and response analysis of dynamic systems by using ANSYS© and MATLAB©, *Journal of Vibration and Control*, 17, 953-58.

- Kim, Y., Oh, J.-S., and Jeon, S.-H., 2015, Novel hot spot stress calculations for welded joints using 3D solid finite elements, *Marine Structures*, 44, 1-18.
- Kiraz, A., Erkan, E. F., Canpolat, O., and Kökümer, O., 2023, Prediction of stress concentration factor in butt welding joints using artificial neural networks, *International journal of research in industrial engineering*, 12, 43-52.
- Kolios, A., Wang, L., Mehmanparast, A., and Brennan, F., 2019, Determination of stress concentration factors in offshore wind welded structures through a hybrid experimental and numerical approach, *Ocean Engineering*, 178, 38-47.
- Korupoju, A. K., Vilwathilakam, A. S., and Samanta, A., 2022, Effect of Weld Parameters on Effective Notch Stress at Weld Root and Toe of Load Carrying Cruciform Joints, *Journal of Marine Science and Application*, 21, 67-77.
- Kris, H., Somsubhro, C., and Wim, De W., 2022, Fracture mechanics and hot spot stress-based fatigue life calculation: Case study for a crane runway girder, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45, 2662-75 , publisher = John Wiley & Sons, Ltd.
- Krzysztof, Ś., 2018, Fatigue assessment for selected connections of structural steel bridge components using the finite elements method, *AIP Conference*, 1922, 20007 , publisher = American Institute of Physics Inc.
- Kufoin, E., and Susmel, L., 2024, Quantitative review of probabilistic approaches to fatigue design in the medium cycle fatigue regime, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 103589.
- Larsen, M. L., Arora, V., Lützen, M., Pedersen, R. R., and Putnam, E., 2021, Fatigue life estimation of the weld joint in K-node of the offshore jacket structure using stochastic finite element analysis, *Marine Structures*, 78, 103020.
- Leitner, M., and Barsoum, Z., 2020, Effect of increased yield strength, R-ratio, and plate thickness on the fatigue resistance of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated steel joints, *Welding in the World*, 64, 1245-59.
- Li, S., Ren, S., Zhang, Y., Deng, D., and Murakawa, H., 2017, Numerical investigation of formation mechanism of welding residual stress in P92 steel multi-pass joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 240-52.
- Liu, S., Wu, Z., Liu, H., Zhou, H., Deng, K., Wang, C., Liu, L., and Li, E., 2023, Optimization of welding parameters on welding distortion and stress in S690 high-strength steel thin-plate structures, *Journal of Materials Research and Technology*.
- Majid, R., Elahi, S. H., and Mashhadgarme, M., 2020, A novel method for quality control of post weld heat treatment process using modal parameters, *NDT & E International*, 111, 102216 , publisher = Elsevier.
- Markus, O., Josef, N., Moritz, F., and Klemens, R., 2022, Determination of notch factors for welded T-joints based on numerical analysis and metamodeling, *Welding in the World*, 66, 2609-24 , publisher = Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

- Mecséri, B. J., and Kövesdi, B., 2020, Assessment of grinding weld treatment methods using effective notch stresses, *Welding in the World*, 64, 1033-46 , publisher = Springer.
- Meyghani, B., Awang, M., and Wu, C., 2019, Thermal analysis of friction stir welding with a complex curved welding seam, *International Journal of Engineering*, 32, 1480-84.
- Mikihito, H., Shuhei, N., and Yujiro, T., 2022, Verification of FEM simulation by using shell elements for fillet welding process, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16, 1601-13 , publisher = Springer-Verlag Italia s.r.l.
- Mirza, W. I. I. W. I., Rani, M. N. A., Yunus, M. A., Athikary, B., and Sani, M. S. M., 2020, Correlating Finite Element Model of a Car Spot-welded Front-End Module in the Light of Modal Testing Data, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17, 7974-84 , publisher = Universiti Malaysia Pahang.
- Mirza, W. W. I., Rani, M. A., Yunus, M., Athikary, B., and Sani, M., 2020, Correlating finite element model of a car spot-welded front-end module in the light of modal testing data, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17, 7974-84.
- Molski, K. L., and Tarasiuk, P., 2021, Stress concentration factors for welded plate T-Joints subjected to tensile, bending and shearing Loads, *Materials*, 14, 546.
- Molski, K. L., Tarasiuk, P., and Glinka, G., 2020, Stress concentration at cruciform welded joints under axial and bending loading modes, *Welding in the World*, 64, 1867-76.
- Monahan, C. C., 1995, Early fatigue crack growth at welds, Number of.
- Muhamad Norhisham Abdul, R., Salmiah, K., Mohd Hakimi, O., Mohd Azmi, Y., and Wan Imaan Izhan Wan Iskandar, M., 2016, Finite element modelling and modal based updating for the dynamic behaviour of a laser spot welded structure, *International Congress on Sound&Vibration*.
- N'diaye, A., Hariri, S., Pluvinage, G., and Azari, Z., 2007, Stress concentration factor analysis for notched welded tubular T-joints, *International Journal of Fatigue*, 29, 1554-70.
- Nazzal, S. S., Mikkola, E., and Yıldırım, H. C., 2021, Fatigue damage of welded high-strength steel details improved by post-weld treatment subjected to critical cyclic loading conditions, *Engineering Structures*, 237, 111928.
- Neuhäusler, J., and Rother, K., 2022, Determination of notch factors for transverse non-load carrying stiffeners based on numerical analysis and metamodeling, *Welding in the World*, 66, 753-66.
- Niemi, E., Fricke, W., and Maddox, S. J., 2018, The structural hot-spot stress approach to fatigue analysis, Number of 5-12.

- Niemi, E., Fricke, W., and Maddox, S. J., 2018, Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components, IIW doc, 13, 1800-19.
- Ono, Y., Yıldırım, H. C., Kinoshita, K., and Nussbaumer, A., 2022, Damage-based assessment of the fatigue crack initiation site in high-strength steel welded joints treated by HFMI, *Metals*, 12, 145.
- Oswald, M., Mayr, C., and Rother, K., 2019, Determination of notch factors for welded cruciform joints based on numerical analysis and metamodeling, *Welding in the World*, 63, 1339-54.
- Oswald, M., Neuhäusler, J., Frey, M., and Rother, K., 2022, Determination of notch factors for welded T-joints based on numerical analysis and metamodeling, *Welding in the World*, 66, 2609-24.
- Pei, X., Ravi, S. K., Dong, P., Li, X., and Zhou, X., 2022, A multi-axial vibration fatigue evaluation procedure for welded structures in frequency domain, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, 108516.
- Radaj, D., 1986, Zur vereinfachten Darstellung der mehrparametrischen Formzahlabhängigkeit, *Konstruktion*, 38, 193-97.
- Radaj, D., and Zhang, S., 1990, Mehrparametrische Strukturoptimierung hinsichtlich Spannungserhöhungen, *Konstruktion*, 42, 289-92.
- Radaj, D., and Zhang, S., 1991, Multiparameter design optimisation in respect of stress concentrations, *Engineering Optimization in Design Processes: Proceedings of the International Conference Karlsruhe Nuclear Research Center, Germany September 3-4, 1990*, 181-89.
- Rafael Kappaun Robinson João Jabuonski, J., Rafael, V., and Agenor Dias de Meira, J., 2021, Numerical Fatigue Evaluation in Agricultural Equipment Welded Unions, *AEA – Brazilian Society of Automotive Engineering*, 78-85, publisher = Editora Edgard Blucher, Ltda.
- Rainer, G., 1978, Errechnen von spannungen in schweißverbindungen mit der methode der finiten elemente, *Series Errechnen von spannungen in schweißverbindungen mit der methode der finiten elemente*, Number of.
- Rainer, G., 1983, Parameterstudien mit finiten Elementen, Berechnung der Bauteilfestigkeit von Schweißverbindungen unter äußeren Beanspruchungen, *Konstruktion*, 37, 45-52.
- Rajaei, M., Elahi, S. H., and Mashhadgarme, M., 2020, A novel method for quality control of post weld heat treatment process using modal parameters, *NDT & E International*, 111, 102216.
- Ren, W.-X., and Chen, H.-B., 2010, Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method, *Engineering structures*, 32, 2455-65.
- Robin, K., and Filip, N., 2022, Fatigue Life Prediction in Aluminium Welds for Thin-sheet Structures.

- Rotondella, V., Merulla, A., Baldini, A., and Mantovani, S., 2017, Dynamic modal correlation of an automotive rear subframe, with particular reference to the modelling of welded joints, *Advances in Acoustics and Vibration*, 2017.
- Saiprasertkit, K., Hanji, T., and Miki, C., 2012, Fatigue strength assessment of load-carrying cruciform joints with material mismatching in low-and high-cycle fatigue regions based on the effective notch concept, *International Journal of Fatigue*, 40, 120-28.
- Schaumann, P., and Schürmann, K., 2019, New proposal to express notch stress approach results by equivalent SCFs, *International Journal of Fatigue*, 119, 11-19.
- Schiller, R., Oswald, M., Neuhäusler, J., Rother, K., and Engelhardt, I., 2022, Fatigue strength of partial penetration butt welds of mild steel, *Welding in the World*, 66, 2563-84.
- Schubnell, J., Jung, M., Le, C. H., Farajian, M., Braun, M., Ehlers, S., Fricke, W., Garcia, M., Nussbaumer, A., and Baumgartner, J., 2020, Influence of the optical measurement technique and evaluation approach on the determination of local weld geometry parameters for different weld types, *Welding in the World*, 64, 301-16.
- Schwarz, B. J., and Richardson, M. H., 1999, Experimental modal analysis, *CSI Reliability week*, 35, 1-12.
- Sharma, A., Bagha, A. K., Shukla, D. K., and Bahl, S., 2021, Finite element model updating of metallic and composite structures--A state of the art review, *AIMS Materials Science*, 8.
- Shazia, M., Kyong Ho, C., and Wang Sub, S., 2022, Fatigue Life Evaluation of Tripod Offshore Structure Using 3D Fatigue FE Analysis, *International Journal of Steel Structures*, 22, 1634-44 , publisher = Korean Society of Steel Construction.
- Shin, W., Chang, K.-H., and Muzaffer, S., 2021, Fatigue analysis of cruciform welded joint with weld penetration defects, *Engineering Failure Analysis*, 120, 105111.
- Shrivastava, K., Vijayan, K., and Arora, V., 2023, Experimental identification of dynamic characteristics of welded stiffened structures based on model updating, *Thin-Walled Structures*, 184, 110485.
- Singh, P. J., Achar, D., Guha, B., and Nordberg, H., 2003, Fatigue life prediction of gas tungsten arc welded AISI 304L cruciform joints with different LOP sizes, *International Journal of Fatigue*, 25, 1-7.
- Siti Norazila, Z., Mohd Shahrir Mohd, S., and Mahadzir, I., 2017, Finite element modelling and updating of friction stir welding (FSW) joint for vibration analysis, *MATEC Web of Conferences*, 90, 01021 , publisher = EDP Sciences.
- Skriko, T., Ahola, A., Poutiainen, I., and Björk, T., 2022, Fatigue strength of laser-dressed non-load-carrying fillet weld joints made of ultra-high-strength steel, *Procedia Structural Integrity*, 38, 393-400.

- Song, W., Liu, X., and Razavi, N., 2018, Fatigue assessment of steel load-carrying cruciform welded joints by means of local approaches, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41, 2598-613.
- Song, W., Man, Z., Xu, J., Wei, S., Cui, M., and Berto, F., 2022, Misalignment effect on the fatigue failure behaviour of steel cruciform welded joints, *Procedia Structural Integrity*, 39, 214-21.
- Sørensen, J. D., Tychsen, J., Andersen, J. U., and Brandstrup, R. D., 2006, Fatigue analysis of load-carrying fillet welds.
- Steimbregger, C., Gubelj, N., Vuherer, T., Enzinger, N., Ernst, W., and Chapetti, M., 2022, Effect of welding processes on the fatigue behaviour of ultra-high strength steel butt-welded joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 275, 108845.
- Sun, J., Nitschke-Pagel, T., and Dilger, K., 2021, Influence of temperature-and phase-dependent yield strength on residual stresses in ultra-high strength steel S960 weldments, *Journal of materials research and technology*, 15, 1854-72.
- Tahir, Z., Aso, R., Yates, T., Bell, M., and Muse, A., 2018, Aluminium weld fatigue: From characterisation to design rules, *Procedia Engineering*, 213, 549-70 , publisher = No longer published by Elsevier.
- Tanaka, S., Maeda, K., Takahashi, H., Okada, H., Yagi, K., and Osawa, N., 2022, A crack propagation simulation for a steel CHS T-joint employing an advanced shell-solid finite element modeling, *Journal of Marine Science and Technology*, 27, 1-15.
- TSUJI, I., 1990, Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joints, *Journal of the West-Japan Society of Naval Architects*, 80, 241-51.
- Ushirokawa, O., and Nakayama, E., 1983, Stress concentration factor at welded joints, *Ishikawajima-Harima Eng. Rev*, 23, 351-55.
- Vincenzo, R., Andrea, M., Andrea, B., and Sara, M., 2017, Dynamic modal correlation of an automotive rear subframe, with particular reference to the modelling of welded joints, *Advances in Acoustics and Vibration* , publisher = Hindawi Limited, 2017.
- Vishnuvardhan, S., Raghava, G., Saravanan, M., and Gandhi, P., 2016, Fatigue life evaluation of fillet welded cruciform joints with load-carrying welds, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69, 585-89.
- Wang, Y., Luo, Y., Kotani, Y., and Tsutsumi, S., 2021, Generalized SCF formula of out-of-plane gusset welded joints and assessment of fatigue life extension by additional weld, *Materials*, 14, 1249.
- Wang, Y., Luo, Y., and Tsutsumi, S., 2020, Parametric formula for stress concentration factor of fillet weld joints with spline bead profile, *Materials*, 13, 4639.
- Warren, C., Niezrecki, C., Avitabile, P., and Pingle, P., 2011, Comparison of FRF measurements and mode shapes determined using optically image based, laser, and

- accelerometer measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, 2191-202.
- Wen, J. H., 2007, FEA Modeling verification and validation: correlating model with test data by optimization analysis, *Series FEA Modeling verification and validation: correlating model with test data by optimization analysis*
- Will, D. T., and Zhu, W., 2023, Experimental Modal Analysis and Operational Deflection Shape Analysis of a Cantilever Plate in a Wind Tunnel with Finite Element Model Verification, *Experimental Techniques*, 1-20.
- Xu, Y., Chen, D.-M., and Zhu, W., 2017, Damage identification of beam structures using free response shapes obtained by use of a continuously scanning laser Doppler vibrometer system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 92, 226-47.
- Yamamoto, N., Sugimoto, T., Ishibashi, K., and Tanaka, S., 2020, A study on the type-b hot spot stress, *Welding in the World*, 64, 1833-42.
- Yıldırım, H. C., Marquis, G., and Sonsino, C. M., 2016, Lightweight design with welded high-frequency mechanical impact (HFMI) treated high-strength steel joints from S700 under constant and variable amplitude loadings, *International Journal of Fatigue*, 91, 466-74 , publisher = Elsevier.
- Yuan, K., and Zhu, W., 2021, Modeling of welded joints in a pyramidal truss sandwich panel using beam and shell finite elements, *Journal of Vibration and Acoustics*, 143.
- Yung, J. Y., and Lawrence, F., 1985, Analytical and graphical aids for the fatigue design of weldments, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 8, 223-41.
- Zamiri Akhlaghi, F., Acevedo, C., Nussbaumer, A., and Krummenacker, J., 2011, Investigation of technological size effects of welding on the residual stresses and fatigue life of tubular joints made of structural steels S355 and S690, *Series Investigation of technological size effects of welding on the residual stresses and fatigue life of tubular joints made of structural steels S355 and S690*
- Zhao, X., Xie, S., Zhang, Y., Li, Q., Wang, W., and Wang, B., 2022, Fatigue reliability analysis of metro bogie frame based on effective notch stress method, *Engineering Failure Analysis*, 131, 105811.
- Zong, L., Shi, G., Wang, Y.-Q., Yan, J.-B., and Ding, Y., 2017, Investigation on fatigue behaviour of load-carrying fillet welded joints based on mix-mode crack propagation analysis, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 677-86.

EKLER

EK-1 Ansys Termal Analizlerde vb.Net dili ile hazırlanmış Fortran dili ile APDL Kodu Oluşturan Kodlar

```

Imports System.IO
Public Class APDLkodolusturucu
Public Shared APDL As String = ""
Public Shared kaynakgrupsayisi As Integer = 4
Public Shared APDLkodu As String = ""
Shared kaynakverilertxt As String = Form1.kaynakverilertxt
Shared tumozelliklersutunsayisi = Form1.tumozelliklersutunsayisi
Shared tumozelliklersatirsayisi = Form1.tumozelliklersatirsayisi
Public Shared tumozellikler(tumozelliklersatirsayisi - 1, tumozelliklersutunsayisi - 1)
As Object
Public Shared Sub düzkenaricin(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu,
KenarId, KaynakRadius, BaslangicKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID,
İlerlemeYönü, BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü,
BaşlangıçNoktasıKonumuX, BaşlangıçNoktasıKonumuY, BaşlangıçNoktasıKonumuZ,
BitişNoktasıKonumuX, BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ,
MerkezNoktasıKonumuX, MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ,
GoldakVoltajV, GoldakAkıml, İlerlemeHızıms, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Fm,
Ffm)
APDLkodu = "
CMSEL, ALL
*GET,EMAX,ELEM,,NUM,MAX !Retrieves a value and stores it as a scalar
parameter or part of an array parameter, Name of parameter=EMAX, Entity=Element
*GET,EMIN,ELEM,,NUM,MIN !Retrieves a value and stores it as a scalar
parameter or part of an array parameter, Name of parameter=EMIN, Entity=Element
ALLSEL
!Welding Time
DT=" + Dt.ToString() + "!Time increment
r=" + KaynakRadius.ToString() + " !m
A=" + Am.ToString() + "
!AF=0.02 !Front lenght
!AR=0.04 !Rear lenght
B=" + Bm.ToString() + " !width
C1=" + C1m.ToString() + "!Front lenght
C2=" + C2m.ToString() + "!Rear length
TAU=" + TAUm.ToString() + "
FF=" + Ffm.ToString() + "!portion of the heat deposited near the front
FR=" + Fm.ToString() + " !portion of the heat deposited near the rear
Q=" + (GoldakVoltajV * GoldakAkıml).ToString() + " !Power input
VEL=" + İlerlemeHızıms.ToString() + " !Welding Speed (m/s)
Ledge=" + KaynakUzunluğu.ToString() + " !m
TIME_WELD=(Ledge/VEL) !s
NPT=TIME_WELD/" + Dt.ToString() + " !Step Count
NROPT,FULL !Specifies Newton-Raphson option
*DO,i,1,NPT,1 !First loop, for the time steps; For(i=1,NPT,1)

```

```

" + Anlıkzaman + "=" + Dt.ToString() + "
TIME,0" + Toplamzaman + "
HCENTER=VEL*" + Anlıkzaman + "           !Defines the moving centre of the double
ellipsoid heat source
*DO,j,EMIN,EMAX,1           !Inner loop for the heat load, This selects the centroid for
every element
CSYS," + BaslangicKoordinatSistemID.ToString() + "
*GET,X,ELEM,j,CENT,X
*GET,Y,ELEM,j,CENT,Y
*GET,Z,ELEM,j,CENT,Z
*IF," + İlerlemeYönü + ",GT,HCENTER,THEN           !if(Z >= HCENTER)
C=C1           !Front lenght
F=FF           !Front portion of the heat source
*ELSE
C=C2           !Rear lenght
F=FR           !Rear portion of the heat source
*ENDIF
!CSIZ=Z-r*SIN(teta)
CSIZ=Z+VEL*(DT-" + Anlıkzaman + ")           !=(z-v*t) , for Goldak Equation, MOVING
COORDINATE Z
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(A*B*C*3.14*(3.14**0.5))           !first factor of
Goldak-Equation
PART2=(exp(-3*(X/A)**2))*(exp(-3*(Y/B)**2))*(exp(-3*(CSIZ/C)**2))           !sec
factor of Goldak-Equation
QF=PART1*PART2           !Final Goldak Heat Equation
BFE,j,HGEN,,QF           !Define body force load, Element j ; HGEN=Thermal heat
generation rate ; QF=Goldak Heat Source-Equation

*ENDDO
SOLVE
*ENDDO
"

End Sub
Public Shared Sub cembericin(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, KenarId,
KaynakRadius, BaslangicKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaşlangıçNoktasıKonumuX,
BaşlangıçNoktasıKonumuY, BaşlangıçNoktasıKonumuZ, BitişNoktasıKonumuX,
BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ, MerkezNoktasıKonumuX,
MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ, GoldakVoltajV, GoldakAkıml,
İlerlemeHızıms, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Frm, Ffm)
APDLkodu = "
CMSEL, ALL
*GET,EMAX,ELEM,,NUM,MAX           !Retrieves a value and stores it as a scalar
parameter or part of an array parameter, Name of parameter=EMAX, Entity=Element
*GET,EMIN,ELEM,,NUM,MIN           !Retrieves a value and stores it as a scalar
parameter or part of an array parameter, Name of parameter=EMIN, Entity=Element
ALLSEL
!Welding Time
DT=" + Dt.ToString() + "!Time increment
r=" + KaynakRadius.ToString() + "           !m

```

```

A=" + Am.ToString() + "
!AF=0.02                !Front lenght
!AR=0.04                !Rear lenght
B=" + Bm.ToString() + "    !width
C1=" + C1m.ToString() + "!Front lenght
C2=" + C2m.ToString() + "!Rear length
TAU=" + TAUm.ToString() + "
FF=" + Ffm.ToString() + "!portion of the heat deposited near the front
FR=" + Frm.ToString() + "                !portion of the heat deposited near the rear
Q=" + (GoldakVoltajV * GoldakAkıml).ToString() + "                !Power input
VEL=" + İlerlemeHızıms.ToString() + "                !Welding Speed (m/s)
Ledge=" + KaynakUzunluğu.ToString() + "                !m
TIME_WELD=(Ledge/VEL)                !s
NPT=TIME_WELD/" + Dt.ToString() + "                !Step Count
NROPT,FULL                !Specifies Newton-Raphson option
*DO,i,1,NPT,1                !First loop, for the time steps; For(i=1,NPT,1)
" + Anlıkzaman + "(i)" + Dt.ToString() + "
TIME,0" + Toplamzaman + "
HCENTER=VEL*" + Anlıkzaman + "                !Defines the moving centre of the double
ellipsoid heat source
*DO,j,EMIN,EMAX,1                !Inner loop for the heat load, This selects the centroid for
every element
CSYS," + BaslangıckoordinatSistemID.ToString() + "
*GET,X,ELEM,j,CENT,X
*GET,Y,ELEM,j,CENT,Y
*GET,Z,ELEM,j,CENT,Z
*IF," + İlerlemeYönü + ",GT,HCENTER,THEN                !if(Z >= HCENTER)
C=C1                !Front lenght
F=FF                !Front portion of the heat source
*ELSE
C=C2                !Rear lenght
F=FR                !Rear portion of the heat source
*ENDIF
d=VEL*(DT+" + Anlıkzaman + ")
teta=d/r    !rad
CSIX=X+r*(1-cos(teta))
CSIZ=Z-r*SIN(teta)
ICSI=Z+VEL*(TAU-WTIME)                !=(z-v*t) , for Goldak Equation, MOVING
COORDINATE Z
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(A*B*C*3.14*(3.14**0.5))                !first factor of
Goldak-Equation
PART2=(exp(-3*(CSIX/A)**2))*(exp(-3*(Y/B)**2))*(exp(-3*(CSIZ/C)**2))
second factor of Goldak-Equation
QF=PART1*PART2                !Final Goldak Heat Equation
BFE,j,HGEN,,QF                !Define body force load, Element j ; HGEN=Thermal heat
generation rate ; QF=Goldak Heat Source-Equation
*ENDDO
SOLVE
*ENDDO
"

```

```

End Sub
Public Shared Sub elipsicin(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, KenarId,
KaynakRadius, BaslangicKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaşlangıçNoktasıKonumuX,
BaşlangıçNoktasıKonumuY, BaşlangıçNoktasıKonumuZ,
BitişNoktasıKonumuX, BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ,
MerkezNoktasıKonumuX, MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ,
GoldakVoltajV, GoldakAkıml, İlerlemeHızıms, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Ffm,
Ffm, CSIZ1, CSIZ2, CSIY1, CSIY2)
APDLkodu = "
CMSEL, ALL
*GET,EMAX,ELEM,,NUM,MAX                !Retrieves a value and stores it as a scalar
parameter or part of an array parameter, Name of parameter=EMAX, Entity=Element
*GET,EMIN,ELEM,,NUM,MIN                !Retrieves a value and stores it as a scalar
parameter or part of an array parameter, Name of parameter=EMIN, Entity=Element
ALLSEL
!Welding Time
DT=" + Dt.ToString() + "!Time increment
r=" + KaynakRadius.ToString() + "          !m
A=" + Am.ToString() + "
!AF=0.02                                !Front lenght
!AR=0.04                                !Rear lenght
B=" + Bm.ToString() + "                !width
C1=" + C1m.ToString() + "!Front lenght
C2=" + C2m.ToString() + "!Rear length
TAU=" + TAUm.ToString() + "
FF=" + Ffm.ToString() + "!portion of the heat deposited near the front
FR=" + Ffm.ToString() + "                !portion of the heat deposited near the rear
Q=" + (GoldakVoltajV * GoldakAkıml).ToString() + "          !Power input
VEL=" + İlerlemeHızıms.ToString() + "          !Welding Speed (m/s)
Ledge=" + KaynakUzunluğu.ToString() + "          !m
TIME_WELD=(Ledge/VEL)                  !s
NPT=TIME_WELD/" + Dt.ToString() + "          !Step Count
NROPT,FULL                            !Specifies Newton-Raphson option
*DO,i,1,NPT,1                          !First loop, for the time steps; For(i=1,NPT,1)
" + Anlıkzaman + "(i)" + Dt.ToString() + "
TIME,0" + Toplamzaman + "
HCENTER=VEL*" + Anlıkzaman + "          !Defines the moving centre of the double
ellipsoid heat source
*DO,j,EMIN,EMAX,1                      !Inner loop for the heat load, This selects the centroid for
every element
CSYS," + BaslangicKoordinatSistemID.ToString() + "
*GET,X,ELEM,j,CENT,X
*GET,Y,ELEM,j,CENT,Y
*GET,Z,ELEM,j,CENT,Z
*IF," + İlerlemeYönü + ",GT,HCENTER,THEN          !if(Z >= HCENTER)
C=C1                !Front lenght
F=FF                !Front portion of the heat source
*ELSE
C=C2                !Rear lenght

```

```

F=FR          !Rear portion of the heat source
*ENDIF
!CSIZ=Z-r*SIN(teta)
!CSIZ=Z+VEL*(DT-" + Anlıkzaman + ")          !=(z-v*t) , for Goldak Equation, MOVING
COORDINATE Z
" + CSIZ1 + "
" + CSIZ2 + "
" + CSIY1 + "
" + CSIY2 + "
CSIZ=Z-CSIZ1-CSIZ2
CSIY=Y-CSIY1-CSIY2
PART1=(6*(3**0.5)*F*Q)/(A*B*C*3.14*(3.14**0.5))          !first factor of
Goldak-Equation
PART2=(exp(-3*(X/A)**2))*(exp(-3*(CSIY/B)**2))*(exp(-3*(CSIZ/C)**2))
second factor of Goldak-Equation
QF=PART1*PART2          !Final Goldak Heat Equation
BFE,j,HGEN,,QF          !Define body force load, Element j ; HGEN=Thermal heat
generation rate ; QF=Goldak Heat Source-Equation
*ENDDO
SOLVE
*ENDDO
"

End Sub
Public Shared Sub APDLolustur()
tumuzelliklericin()
Dim Toplamzaman As String = ""
For i As Integer = 0 To tumozelliklersatirsayisi - 1 Step 1
Dim KaynakYolld As Integer = tumozellikler(i, 0)
Dim KaynakUzunluğu As Integer = tumozellikler(i, 1)
Dim Kenarld As Integer = tumozellikler(i, 2)
Dim KaynakRadius As Integer = tumozellikler(i, 3)
Dim BaslangicKoordinatSistemID As Integer = tumozellikler(i, 4)
Dim BitisKoordinatSistemID As Integer = tumozellikler(i, 5)
Dim İlerlemeYönü As String = tumozellikler(i, 6)
Dim BağlıOlduğuGrup As Integer = tumozellikler(i, 7)
Dim GruptakiSırası As Integer = tumozellikler(i, 8)
Dim KaynakYolTürü As String = tumozellikler(i, 9)
Dim BaşlangıçNoktasıKonumuX As Integer = tumozellikler(i, 10)
Dim BaşlangıçNoktasıKonumuY As Integer = tumozellikler(i, 11)
Dim BaşlangıçNoktasıKonumuZ As Integer = tumozellikler(i, 12)
Dim BitişNoktasıKonumuX As Integer = tumozellikler(i, 13)
Dim BitişNoktasıKonumuY As Integer = tumozellikler(i, 14)
Dim BitişNoktasıKonumuZ As Integer = tumozellikler(i, 15)
Dim MerkezNoktasıKonumuX As Integer = tumozellikler(i, 16)
Dim MerkezNoktasıKonumuY As Integer = tumozellikler(i, 17)
Dim MerkezNoktasıKonumuZ As Integer = tumozellikler(i, 18)
Dim GoldakVoltaJV As Integer = tumozellikler(i, 19)
Dim GoldakAkıml As Integer = tumozellikler(i, 20)
Dim İlerlemeHızıms As Integer = tumozellikler(i, 21)
Dim Am As Integer = tumozellikler(i, 22)

```

```

Dim Bm As Integer = tumozellikler(i, 23)
Dim Dt As Integer = tumozellikler(i, 24)
Dim C1m As Integer = tumozellikler(i, 25)
Dim C2m As Integer = tumozellikler(i, 26)
Dim TAUm As Integer = tumozellikler(i, 27)
Dim Frm As Integer = tumozellikler(i, 28)
Dim Ffm As Integer = tumozellikler(i, 29)
Dim yoldenklemi = tumozellikler(i, 33)
Dim Anlıkzaman As String = "WTIME" + i.ToString()
Dim Zaman1 As String = "+" + "WTIME" + i.ToString()
Toplamzaman = Toplamzaman + Zaman1
If KaynakYolTürü = "Düz" Then
    düzenaricin(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, KenarId, KaynakRadius,
    BaslangicKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
    BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaşlangıçNoktasıKonumuX,
    BaşlangıçNoktasıKonumuY, BaşlangıçNoktasıKonumuZ, BitişNoktasıKonumuX,
    BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ, MerkezNoktasıKonumuX,
    MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ, GoldakVoltajV, GoldakAkıml,
    İlerlemeHızıms, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Frm, Ffm)
    APDL = APDL + APDLkodu
Elseif KaynakYolTürü = "Cember" Then
Else
    düzenaricin(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, KenarId, KaynakRadius,
    BaslangicKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
    BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaşlangıçNoktasıKonumuX,
    BaşlangıçNoktasıKonumuY, BaşlangıçNoktasıKonumuZ, BitişNoktasıKonumuX,
    BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ, MerkezNoktasıKonumuX,
    MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ, GoldakVoltajV, GoldakAkıml,
    İlerlemeHızıms, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Frm, Ffm)
    APDL = APDL + APDLkodu
End If
Next i
End Sub
Public Shared Sub tumozelliklericin()
Dim lines() As String
Dim vals() As String
lines = File.ReadAllLines(kaynakverilertxt)
For i As Integer = 0 To tumozelliklersatirsayisi - 1
vals = lines(i).ToString().Split(" ")
Dim row(vals.Length - 1) As String
For j As Integer = 0 To tumozelliklersutunsayisi - 1 Step +1
row(j) = vals(j).Trim()
tumozellikler(i, j) = row(j)
Next j
Next i
End Sub
Public Shared Sub APDLkaynakoduolusturucu()
APDL = ""
APDLkodu = ""
Dim Toplamzaman As String = ""

```

```

Dim zamanhesabiicin As Double = 0
For i As Integer = 0 To Form1.SiralanmisKaynaklar.Count - 1
Dim KaynakYolld As Integer = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).KaynakYolld
Dim KaynakUzunluğu As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).KaynakUzunluğu
Dim Kenarld As Integer = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Kenarld
Dim KaynakRadius As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).KaynakRadius
Dim BaslangıcKoordinatSistemID As Integer =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BaslangıcKoordinatSistemID
Dim BitisKoordinatSistemID As Integer =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BitisKoordinatSistemID
Dim İlerlemeYönü As String = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).İlerlemeYönü
Dim BağlıOlduğuGrup As Integer = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BağlıOlduğuGrup
Dim GruptakiSırası As Integer = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).GruptakiSırası
Dim KaynakYolTürü As String = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).KaynakYolTürü
Dim BaşlangıçNoktasıKonumuX As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BaşlangıçNoktasıKonumuX
Dim BaşlangıçNoktasıKonumuY As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BaşlangıçNoktasıKonumuY
Dim BaşlangıçNoktasıKonumuZ As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BaşlangıçNoktasıKonumuZ
Dim BitişNoktasıKonumuX As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BitişNoktasıKonumuX
Dim BitişNoktasıKonumuY As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BitişNoktasıKonumuY
Dim BitişNoktasıKonumuZ As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).BitişNoktasıKonumuZ
Dim MerkezNoktasıKonumuX As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).MerkezNoktasıKonumuX
Dim MerkezNoktasıKonumuY As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).MerkezNoktasıKonumuY
Dim MerkezNoktasıKonumuZ As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).MerkezNoktasıKonumuZ
Dim GoldakVoltajV As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).GoldakVoltajV
Dim GoldakAkıml As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).GoldakAkıml
Dim İlerlemeHızıms As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).İlerlemeHızıms
Dim Am As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Am
Dim Bm As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Bm
Dim Dt As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Dt
Dim C1m As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).C1m
Dim C2m As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).C2m
Dim TAUm As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).TAUm
Dim Frm As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Frm
Dim Ffm As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Ffm
Dim Kaynaksüresi As Double = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).Kaynaksüresi
Dim yoldenklemistr As String = Form1.SiralanmisKaynaklar(i).yoldenklemi
Dim lokalbitisZmesafesi As Double =
Form1.SiralanmisKaynaklar(i).lokalbitisZmesafesi
Dim Anlıkzaman As String = "WTIME" + i.ToString()
Dim Zaman1 As String = "+" + "WTIME" + i.ToString()
Toplamzaman = (zamanhesabiicin).ToString() + Zaman1

```

```

zamanhesabıcın = CInt(Math.Floor((KaynakUzunluğu / İlerlemeHızım) / Dt)) * Dt +
zamanhesabıcın
If KaynakYolTürü = "Düz" Then
düzenarıcın(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, Kenarld, KaynakRadius,
BaslangıcKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaslangıçNoktasıKonumuX,
BaslangıçNoktasıKonumuY, BaslangıçNoktasıKonumuZ, BitişNoktasıKonumuX,
BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ, MerkezNoktasıKonumuX,
MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ, GoldakVoltajV, GoldakAkıml,
İlerlemeHızım, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Frm, Ffm)
APDL = APDL + APDLkodu
ElseIf KaynakYolTürü = "Cember" Then
cembericın(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, Kenarld, KaynakRadius,
BaslangıcKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaslangıçNoktasıKonumuX,
BaslangıçNoktasıKonumuY, BaslangıçNoktasıKonumuZ, BitişNoktasıKonumuX,
BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ, MerkezNoktasıKonumuX,
MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ, GoldakVoltajV, GoldakAkıml,
İlerlemeHızım, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Frm, Ffm)
APDL = APDL + APDLkodu
ElseIf KaynakYolTürü = "Eğri" Then
Dim cozunurluk As Integer = 1000
Dim ciktilar As List(Of Double()) = yoldenklemiicinnoktalarolustur(yoldenklemistr,
KaynakUzunluğu, Kaynaksüresi, Dt, lokalbitisZmesafesi, cozunurluk)
'interplasyon duzgün calısmadı sonra tekrar kontrol edilecek
*****
'Dim Hedefler = interplasyongerçeklestir(Kaynaksüresi, Dt, KaynakUzunluğu,
cozunurluk, ciktilar)
'Dim HedefX() As Double = Hedefler.Item1
'Dim HedefY() As Double = Hedefler.Item2
'Dim Mesafeler() As Double = Hedefler.Item3
'Dim Zaman() As Double = Hedefler.Item4
Dim HedefX() As Double = ciktilar(0)
Dim HedefY() As Double = ciktilar(1)
Dim Mesafeler() As Double = ciktilar(2)
Dim Zaman(cozunurluk - 1) As Double
For I = 0 To cozunurluk - 1
Zaman(I) = (Kaynaksüresi / cozunurluk) * I
Next I
'Interplasyon duzgün calısmayınca buraya kadar duzenlendi
*****
'Zamana bağlı Z ve Y denklemleri olustur.HedefX Z eksenini baz alınacak
Dim Zamanabaglıdenklemler As List(Of String) = New List(Of String)
Zamanabaglıdenklemler = ZamanabaglıXYdenklemlerolustur(HedefX, HedefY,
Zaman, Kaynaksüresi, Dt, Anlıkzaman, cozunurluk)
Dim CSIZ1 As String = Zamanabaglıdenklemler(0)
Dim CSIZ2 As String = Zamanabaglıdenklemler(1)
Dim CSIY1 As String = Zamanabaglıdenklemler(2)
Dim CSIY2 As String = Zamanabaglıdenklemler(3)
'noktalar1.HedefX(1)

```

```

elipsicin(Toplamzaman, Anlıkzaman, KaynakUzunluğu, KenarId, KaynakRadius,
BaslangicKoordinatSistemID, BitisKoordinatSistemID, İlerlemeYönü,
BağlıOlduğuGrup, GruptakiSırası, KaynakYolTürü, BaşlangıçNoktasıKonumuX,
BaşlangıçNoktasıKonumuY, BaşlangıçNoktasıKonumuZ, BitişNoktasıKonumuX,
BitişNoktasıKonumuY, BitişNoktasıKonumuZ, MerkezNoktasıKonumuX,
MerkezNoktasıKonumuY, MerkezNoktasıKonumuZ, GoldakVoltajV, GoldakAkıml,
İlerlemeHızıms, Am, Bm, Dt, C1m, C2m, TAUm, Frm, Ffm, CSIZ1, CSIZ2, CSİY1,
CSIY2)
APDL = APDL + APDLkodu
Else
MsgBox("Kenar Seçim Tipi Bulunamadı")
End If
Next i
End Sub
Public Shared Function yoldenklemiicinnoktalariolustur(ByVal yoldenklemistr As
String, ByVal toplamuzunluk As Double, ByVal Kaynaksüresi As Double, ByVal Dt
As Double,
                                lokalbitisZmesafesi As Double, cozunurluk As Integer)
Dim regresyondenklemler As String() = yoldenklemistr.Split("|")
Dim regresyonkatsayıları(10) As Double
Dim LokalXkonumları(cozunurluk - 1), LokalYkonumları(cozunurluk - 1),
Mesafeler(cozunurluk - 1) As Double
Dim ciktiler As List(Of Double()) = New List(Of Double())
For i = 0 To 10
regresyonkatsayıları(i) = Double.Parse(regresyondenklemler(i))
Next i
Dim ilerlemeadimmesafesi As Double = (lokalbitisZmesafesi) / cozunurluk
For k = 0 To cozunurluk - 1
LokalXkonumları(k) = ilerlemeadimmesafesi * k
Dim x As Double = LokalXkonumları(k)
LokalYkonumları(k) = regresyonkatsayıları(0) + regresyonkatsayıları(1) * x +
regresyonkatsayıları(2) * x ^ 2 + regresyonkatsayıları(3) * x ^ 3 +
regresyonkatsayıları(4) * x ^ 4 + regresyonkatsayıları(5) * x ^ 5 +
regresyonkatsayıları(6) * x ^ 6 + regresyonkatsayıları(7) * x ^ 7 +
regresyonkatsayıları(8) * x ^ 8 + regresyonkatsayıları(9) * x ^ 9 +
regresyonkatsayıları(10) * x ^ 10
Mesafeler(k) = (LokalXkonumları(k) ^ 2 + LokalYkonumları(k) ^ 2) ^ 0.5
Next k
ciktiler.Add(LokalXkonumları)
ciktiler.Add(LokalYkonumları)
ciktiler.Add(Mesafeler)
Return ciktiler
End Function
Public Shared Function interplasyongerçeklestir(ByVal Kaynaksüresi As Double,
ByVal Dt As Double, ByVal Kaynakuzunlugu As Double,
ByVal cozunurluk As Integer, ByVal ciktiler As List(Of Double())) As (Double(),
Double(), Double(), Double())
Dim adimsayisi As Integer = CInt(Math.Floor(Kaynaksüresi / Dt))
Dim adimmesafesi As Double = Kaynakuzunlugu / adimsayisi
Dim cozunurlukmesafeleri(), cozunurlukYler(), cozunurlukXler() As Double

```

```

cozunurlukmesafeleri = ciktilar(2)
cozunurlukYler = ciktilar(1)
cozunurlukXler = ciktilar(0)
Dim yol(adimsayisi - 1) As Double
Dim HedefX(adimsayisi - 1), HedefY(adimsayisi - 1), Mesafeler(adimsayisi - 1),
Zaman(adimsayisi - 1) As Double
HedefX(0) = 0
HedefY(0) = 0
Mesafeler(0) = 0
Dim i As Integer = 1
Dim k As Integer = 1
While i < cozunurluk - 1
While k < adimsayisi
If cozunurlukmesafeleri(i) > adimmesafesi * (k) Then
Dim İD1, SD1, AD1, İD2X, SD2X, İD2Y, SD2Y As Double
İD1 = cozunurlukmesafeleri(i - 1)
SD1 = cozunurlukmesafeleri(i)
AD1 = adimmesafesi * (k + 1)
İD2X = cozunurlukXler(i - 1)
SD2X = cozunurlukXler(i)
İD2Y = cozunurlukYler(i - 1)
SD2Y = cozunurlukYler(i)
HedefX(k) = interpolasyon(İD1, SD1, AD1, İD2X, SD2X)
HedefY(k) = interpolasyon(İD1, SD1, AD1, İD2Y, SD2Y)
Mesafeler(k) = adimmesafesi * (k + 1)
Zaman(k) = (Kaynaksüresi / adimsayisi) * (k)
k = k + 1
Else
i = i + 1
If i = 999 Then
Exit While
End If
End If
End While
i = i + 1
End While
Return (HedefX, HedefY, Mesafeler, Zaman)
'Return New Noktalar() With {
' .HedefX = HedefX,
' .HedefY = .HedefY,
' .Mesafeler = Mesafeler
' }
End Function
Public Shared Function interpolasyon(ByVal İD1 As Double, SD1 As Double, AD1 As
Double, İD2 As Double, SD2 As Double)
Dim X As Double = (((İD2 - SD2) * (AD1 - SD1)) / (İD1 - SD1)) + SD2
Return X
End Function
Public Shared Function ZamanabagliXYdenklemleriolustur(ByVal Xkonumlar As
Double(), ByVal Ykonumlar As Double(), ByVal Zaman As Double(),

```

```

ByVal Kaynaksüresi As Double, ByVal Dt As Double, ByVal Anlıkzaman As String,
ByVal cozunurluk As Integer) As List(Of String)
Dim adimsayisi As Integer = CInt(Math.Floor(Kaynaksüresi / Dt))
Dim Xregresyonagonderileceklste, Yregresyonagonderileceklste As New List(Of
PointF)
Dim Xkonumlarpoints, Ykonumlarpoints, Zamanpoints As New PointF
***** Alt taraf Pasifleştirildi interplasyonsuz işlem için
"Zaman-X ve Zaman-Y          X'ler Z Ekseni
'For i = 0 To adimsayisi - 1
'  Xkonumlarpoints = New PointF(Zaman(i), Xkonumlar(i))
'  Ykonumlarpoints = New PointF(Zaman(i), Ykonumlar(i))
'
'  Xregresyonagonderileceklste.Add(Xkonumlarpoints)
'  Yregresyonagonderileceklste.Add(Ykonumlarpoints)
'Next i
'Dim Xdenklemler As List(Of Double) = New List(Of Double)
'Dim Ydenklemler As List(Of Double) = New List(Of Double)
*****
'Interplasyon çalışmayınca eklendi
For i = 0 To cozunurluk - 1
Xkonumlarpoints = New PointF(Zaman(i), Xkonumlar(i))
Ykonumlarpoints = New PointF(Zaman(i), Ykonumlar(i))
Xregresyonagonderileceklste.Add(Xkonumlarpoints)
Yregresyonagonderileceklste.Add(Ykonumlarpoints)
Next i
Dim Xdenklemler As List(Of Double) = New List(Of Double)
Dim Ydenklemler As List(Of Double) = New List(Of Double)
*****
Xdenklemler =
regressionpath.FindPolynomialleastsquaresfit(Xregresyonagonderileceklste)
Ydenklemler =
regressionpath.FindPolynomialleastsquaresfit(Yregresyonagonderileceklste)
Dim CSIX1stringdenklem As String = ""
Dim CSIY1Ystringdenklem As String = ""
Dim CSIX2stringdenklem As String = ""
Dim CSIY2Ystringdenklem As String = ""
For k = 0 To 5
CSIX1stringdenklem = CSIX1stringdenklem + "(" + Xdenklemler(k).ToString() + "" +
"(" + Anlıkzaman + "" + k.ToString() + ")")" + "+"
CSIY1Ystringdenklem = CSIY1Ystringdenklem + "(" + Ydenklemler(k).ToString() +
"" + "(" + Anlıkzaman + "" + k.ToString() + ")")" + "+"
Next k
For l = 6 To Xdenklemler.Count - 1
CSIX2stringdenklem = CSIX2stringdenklem + "(" + Xdenklemler(l).ToString() + "" +
"(" + Anlıkzaman + "" + l.ToString() + ")")" + "+"
CSIY2Ystringdenklem = CSIY2Ystringdenklem + "(" + Ydenklemler(l).ToString() +
"" + "(" + Anlıkzaman + "" + l.ToString() + ")")" + "+"
Next l
CSIX1stringdenklem = "CSIZ1=" + CSIX1stringdenklem + "0"
CSIX2stringdenklem = "CSIZ2=" + CSIX2stringdenklem + "0"

```

```
CSIY1Ystringdenklem = "CSIY1=" + CSIY1Ystringdenklem + "0"  
CSIY2Ystringdenklem = "CSIY2=" + CSIY2Ystringdenklem + "0"  
Dim denklemler As List(Of String) = New List(Of String)  
denklemler.Add(CSIX1stringdenklem)  
denklemler.Add(CSIX2stringdenklem)  
denklemler.Add(CSIY1Ystringdenklem)  
denklemler.Add(CSIY2Ystringdenklem)  
Return denklemler  
End Function  
End Class
```

EK-2 Etkin Çentik Gerilme Yaklaşımının Matlab Kodları

```

function EffectiveNotchFatigueCalculateButton2(app, event)
global rainflowcycle
global rainflowrange
app.MinerValueEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.MinerValueEditField.Visible = 'on';
app.MinerValueEditFieldLabel_2.Visible = 'on';
app.MinerValueEditField_2.Visible = 'on';
app.LifecycleEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.LifecycleEditField.Visible = 'on';
app.EldeEdilenDataIarnGnSaysLabel.Visible = 'on';
app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField.Visible = 'on';
fatiguecalculatetype=get(app.OnlyStressScenarioButton,'Value');
if (fatiguecalculatetype==1)
%S-N Eğrisi
x = logspace(4,7);
FAT=str2double(app.FATMPaEditField.Value);
egim=str2double(app.mEditField.Value);
Nref=str2double(app.NrefcycleEditField.Value);
y=FAT./((x/(2*10^6)).^(1/egim));
egim2=str2double(app.mEditField_2.Value);
FAT2=FAT./(((10^7)/(2*10^6)).^(1/egim));
x2=logspace(7,9);
y2=FAT2./((x2/(10^7)).^(1/egim2));
xg3=logspace(9,16);
FAT3=FAT2./(((10^9)/(10^7)).^(1/egim2));
yg3=xg3*0+FAT3;
xg1=logspace(0,4);
FAT4=FAT./((10000/(2*10^6)).^(1/egim));
yg1=FAT4./((xg1/(10000)).^(1/12));
loglog(app.UIAxes,x,y,'b-',x2,y2,'b-',xg3,yg3,'b',xg1,yg1,'b');
%Ömür Hesabı İçin
SR=str2double(app.StressRangeMPaEditField.Value);
SL=(((FAT/SR).^egim)*Nref);
StressrangexekseniL1=0:1:SL;
L1=0*StressrangexekseniL1+SR;
a=0:1:SR;
SL=a*0+SL;
hold(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,StressrangexekseniL1,L1,'r-',SL,a,'r-')
%Life Cycle
cycle=(((FAT/SR).^egim)*Nref);
app.LifecycleEditField.Value=cycle;
app.MinerValueEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField.Visible = 'off';
app.MinerValueEditFieldLabel_2.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_2.Visible = 'off';
app.EldeEdilenDataIarnGnSaysLabel.Visible = 'off';
app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField.Visible = 'off';

```

```

else
FAT=str2double(app.FATMPaEditField.Value);
egim=str2double(app.mEditField.Value);
Nref=str2double(app.NrefcycleEditField.Value);
rainflowcyclefatigue=table2array(rainflowcycle(:,1));
rainflowrangefatigue=table2array(rainflowrange(:,1));
N=0;
cla(app.UIAxes);
for i=1:length(rainflowcyclefatigue(:,1))
cycle=((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref;
N=N+(rainflowcyclefatigue(i))/(cycle);
app.LifecycleEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.LifecycleEditField.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField.Value=N;
%S-N Eğrisi
x = logspace(4,7);
y=FAT./((x/(2*10^6)).^(1/egim));
egim2=str2double(app.mEditField_2.Value);
FAT2=FAT./(((10^7)/(2*10^6)).^(1/egim));
x2=logspace(7,9);
y2=FAT2./((x2/(10^7)).^(1/egim2));
xg3=logspace(9,16);
FAT3=FAT2./((10^9/(10^7)).^(1/egim2));
yg3=xg3*0+FAT3;
xg1=logspace(0,4);
FAT4=FAT./((10000/(2*10^6)).^(1/egim));
yg1=FAT4./((xg1/(10000)).^(1/12));
for k=1:length(rainflowcyclefatigue(:,1))
if (((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref<10^7 &&
((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref>10^4)
x3(i,k)=(((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
if (((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7<10^9) &&
((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7>10^4)
x3(i,k)=(((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
if (((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7>10^9)
x3(i,k)=(rainflowrangefatigue(i)*0+10^9);
y3(i,k)=(FAT3);
end
if (((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref<10^4)
x3(i,k)=(((FAT4/rainflowrangefatigue(i)).^12)*10^4);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
end
end
end
x3=x3(:,1);
y3=y3(:,1);

```

```
hold(app.UIAxes)
loglog(app.UIAxes,x,y,'b-',x2,y2,'b-',xg3,yg3,'b',xg1,yg1,'b',x3,y3,'or');
remaininglife=(1/
N)*(str2double(app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField.Value));
app.MinerValueEditField_2.Value=remaininglife;
end
```

EK-3 Sıcak Nokta Gerilme Yaklaşımının Matlab Kodları

```

function HotspotCreateSNCurveButtonPushed(app, event)
global rainflowcycle
global rainflowrange
app.MinerValueEditFieldLabel_5.Visible = 'on';
app.MinerValueEditField_5.Visible = 'on';
app.MinerValueEditFieldLabel_6.Visible = 'on';
app.MinerValueEditField_6.Visible = 'on';
app.EldeEdilenDatalarnGnSaysLabel_3.Visible = 'on';
app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField_3.Visible = 'on';
app.LifecycleEditField_2Label_2.Visible = 'on';
app.LifecycleEditField_3.Visible = 'on';
%FAT SEÇİMİ
secim100=get(app.FAT100Button_2,'value');
secim90=get(app.FAT90Button_2,'value');
if (secim100==1)
app.FATMPaEditField_3.Value=100;
end
if (secim90==1)
app.FATMPaEditField_3.Value=90;
end
FAT=(app.FATMPaEditField_3.Value);
egim=str2double(app.mEditField_5.Value);
Nref=str2double(app.NrefcycleEditField_3.Value);
egim2=str2double(app.mEditField_6.Value);
SR=str2double(app.HotspotStressRangeMPaEditField.Value);
fatiguecalculatetype=get(app.OnlyHotspotStressScenarioButton,'Value');
if (fatiguecalculatetype==1)
%S-N Eğrisi
x = logspace(4,7);
y=FAT./((x/(2*10^6)).^(1/egim));
FAT2=FAT./(((10^7)/(2*10^6)).^(1/egim));
x2=logspace(7,9);
y2=FAT2./((x2/(10^7)).^(1/egim2));
xg3=logspace(9,16);
FAT3=FAT2./(((10^9)/(10^7)).^(1/egim2));
yg3=xg3*0+FAT3;
xg1=logspace(0,4);
FAT4=FAT./(((10000)/(2*10^6)).^(1/egim));
yg1=FAT4./((xg1/(10000)).^(1/12));
loglog(app.UIAxes_3,x,y,'b-',x2,y2,'b-',xg3,yg3,'b',xg1,yg1,'b');
%Ömür Hesabı İçin
SL=((FAT/SR).^egim)*Nref;
StressrangexekseniL1=0:1:SL;
L1=0*StressrangexekseniL1+SR;
a=0:1:SR;
SL=a*0+SL;
hold(app.UIAxes_3)
plot(app.UIAxes_3,StressrangexekseniL1,L1,'r-',SL,a,'r-')

```

```

%Life Cycle
cycle=(((FAT/SR).^egim)*Nref);
app.LifecycleEditField_3.Value=cycle;
app.MinerValueEditFieldLabel_5.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_5.Visible = 'off';
app.MinerValueEditFieldLabel_6.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_6.Visible = 'off';
app.EldeEdilenDatalarnGnSaysLabel_3.Visible = 'off';
app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField_3.Visible = 'off';
else
rainflowcyclefatigue=table2array(rainflowcycle(:,1));
rainflowrangefatigue=table2array(rainflowrange(:,1));
N=0;
cla(app.UIAxes_3);
for i=1:length(rainflowcyclefatigue(:,1))
cycle=(((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref);
N=N+(rainflowcyclefatigue(i))/(cycle);
app.LifecycleEditField_2Label_2.Visible = 'off';
app.LifecycleEditField_3.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_5.Value=N;
%S-N Eğrisi
x = logspace(4,7);
y=FAT./((x/(2*10^6)).^(1/egim));
FAT2=FAT./(((10^7)/(2*10^6)).^(1/egim));
x2=logspace(7,9);
y2=FAT2./((x2/(10^7)).^(1/egim2));
xg3=logspace(9,16);
FAT3=FAT2./(((10^9)/(10^7)).^(1/egim2));
yg3=xg3*0+FAT3;
xg1=logspace(0,4);
FAT4=FAT./(((10000)/(2*10^6)).^(1/egim));
yg1=FAT4./((xg1/(10000)).^(1/12));
for k=1:length(rainflowcyclefatigue(:,1))
if (((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref<10^7 &&
((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref>10^4)
x3(i,k)=(((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
if (((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7<10^9) &&
((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7>10^4)
x3(i,k)=(((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
if (((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7>10^9)
x3(i,k)=(rainflowrangefatigue(i)*0+10^9);
y3(i,k)=(FAT3);
end
if (((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref<10^4)
x3(i,k)=(((FAT4/rainflowrangefatigue(i)).^12)*10^4);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);

```

```
end
end
end
x3=(x3(:,1));
y3=(y3(:,1));
hold(app.UIAxes_3)
loglog(app.UIAxes_3,x,y,'b-',x2,y2,'b-',xg3,yg3,'b',xg1,yg1,'b',x3,y3,'or');
remaininglife=(1/
N)*(str2double(app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField_3.Value));
app.MinerValueEditField_6.Value=remaininglife;
end
end
```

EK-4 Nominal Gerilme Yaklaşımının Matlab Kodları

```

function NominalCreateSNCurveButtonPushed2(app, event)
global rainflowcycle
global rainflowrange
app.MinerValueEditFieldLabel_3.Visible = 'on';
app.MinerValueEditField_3.Visible = 'on';
app.MinerValueEditFieldLabel_4.Visible = 'on';
app.MinerValueEditField_4.Visible = 'on';
app.EldeEdilenDatalarnGnSaysLabel_2.Visible = 'on';
app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField_2.Visible = 'on';
app.LifecycleEditField_2Label.Visible = 'on';
app.LifecycleEditField_2.Visible = 'on';
%FAT SEÇİMİ
secim160=get(app.FAT160Button_2,'value');
secim100=get(app.FAT100Button,'value');
secim112=get(app.FAT112Button,'value');
secim80=get(app.FAT80Button,'value');
secim140=get(app.FAT140Button,'value');
secim72=get(app.FAT72Button,'value');
secim125=get(app.FAT125Button,'value');
secim90=get(app.FAT90Button,'value');
secim71=get(app.FAT71Button,'value');
secim63=get(app.FAT63Button,'value');
secim56=get(app.FAT56Button,'value');
secim50=get(app.FAT50Button,'value');
secim45=get(app.FAT45Button,'value');
secim40=get(app.FAT40Button,'value');
secim36=get(app.FAT36Button,'value');
if (secim100==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=100;
end
if (secim160==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=160;
end
if (secim112==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=112;
end
if (secim80==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=80;
end
if (secim140==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=140;
end
if (secim72==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=72;
end
if (secim125==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=125;
end
end

```

```

if (secim90==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=90;
end
if (secim71==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=71;
end
if (secim63==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=63;
end
if (secim56==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=56;
end
if (secim50==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=50;
end
if (secim45==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=45;
end
if (secim40==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=40;
end
if (secim36==1)
app.FATMPaEditField_2.Value=36;
end
fatiguecalculatetype=get(app.OnlyStressScenarioButton_2,'Value');
if (fatiguecalculatetype==1)
%S-N Eğrisi
FAT=(app.FATMPaEditField_2.Value);
egim=str2double(app.mEditField_3.Value);
Nref=str2double(app.NrefcycleEditField_2.Value);
egim2=str2double(app.mEditField_4.Value);
SR=str2double(app.StressRangeMPaEditField_2.Value);
x = logspace(4,7);
y=FAT./((x/(2*10^6)).^(1/egim));
FAT2=FAT./(((10^7)/(2*10^6)).^(1/egim));
x2=logspace(7,9);
y2=FAT2./((x2/(10^7)).^(1/egim2));
xg3=logspace(9,16);
FAT3=FAT2./((10^9/(10^7)).^(1/egim2));
yg3=xg3*0+FAT3;
xg1=logspace(0,4);
FAT4=FAT./((10000/(2*10^6)).^(1/egim));
yg1=FAT4./((xg1/(10000)).^(1/12));
loglog(app.UIAxes_2,x,y,'b-',x2,y2,'b-',xg3,yg3,'b',xg1,yg1,'b');
%Ömür Hesabı İçin
SL=((FAT/SR).^egim)*Nref;
StressrangexekseniL1=0:1:SL;
L1=0*StressrangexekseniL1+SR;
a=0:1:SR;
SL=a*0+SL;

```

```

hold(app.UIAxes_2)
plot(app.UIAxes_2,StressrangexekseniL1,L1,'r-',SL,a,'r-')
%Life Cycle
cycle=(((FAT/SR).^egim)*Nref);
app.LifecycleEditField_2.Value=cycle;
app.MinerValueEditFieldLabel_3.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_3.Visible = 'off';
app.MinerValueEditFieldLabel_4.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_4.Visible = 'off';
app.EldeEdilenDatalarnGnSaysLabel_2.Visible = 'off';
app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField_2.Visible = 'off';
else
FAT=(app.FATMPaEditField_2.Value);
egim=str2double(app.mEditField_3.Value);
Nref=str2double(app.NrefcycleEditField_2.Value);
egim2=str2double(app.mEditField_4.Value);
rainflowcyclefatigue=table2array(rainflowcycle(:,1));
rainflowrangefatigue=table2array(rainflowrange(:,1));
N=0;
cla(app.UIAxes_2);
for i=1:length(rainflowcyclefatigue(:,1))
cycle=(((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref);
N=N+(rainflowcyclefatigue(i))/(cycle);
app.LifecycleEditField_2Label.Visible = 'off';
app.LifecycleEditField_2.Visible = 'off';
app.MinerValueEditField_3.Value=N;
%S-N Eğrisi
x = logspace(4,7);
y=FAT./((x/(2*10^6)).^(1/egim));
FAT2=FAT./(((10^7)/(2*10^6)).^(1/egim));
x2=logspace(7,9);
y2=FAT2./((x2/(10^7)).^(1/egim2));
xg3=logspace(9,16);
FAT3=FAT2./(((10^9)/(10^7)).^(1/egim2));
yg3=xg3*0+FAT3;
xg1=logspace(0,4);
FAT4=FAT./(((10000)/(2*10^6)).^(1/egim));
yg1=FAT4./((xg1/(10000)).^(1/12));
for k=1:length(rainflowcyclefatigue(:,1))
if (((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref<10^7 &&
((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref>10^4)
x3(i,k)=(((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
if (((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7<10^9) &&
((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7>10^7)
x3(i,k)=(((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
if (((FAT2/rainflowrangefatigue(i)).^egim2)*10^7>10^9)

```

```
x3(i,k)=(rainflowrangefatigue(i)*0+10^9);
y3(i,k)=(FAT3);
end
if (((FAT/rainflowrangefatigue(i)).^egim)*Nref<10^4)
x3(i,k)=(((FAT4/rainflowrangefatigue(i)).^12)*10^4);
y3(i,k)=rainflowrangefatigue(i);
end
end
end
end
x3=(x3(:,1));
y3=(y3(:,1));
hold(app.UIAxes_2)
loglog(app.UIAxes_2,x,y,'b-',x2,y2,'b-',xg3,yg3,'b',xg1,yg1,'b',x3,y3,'or');
remaininglife=(1/
N*(str2double(app.NumberofDaysofObtainedDataDayEditField_2.Value));
app.MinerValueEditField_4.Value=remaininglife;
end
end
```