

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**KAYNAK ARTIK GERİLMELERİNİN TESTLER VE
ANALİZLERLE BELİRLENEREK HERMETİK
TRANSFORMATÖR KAZANI SİMÜLASYON
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NIHAT ÇELİK

Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. İlker EREN (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Mehmet EROĞLU
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz GÜR

BALIKESİR, NİSAN-2016

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KAYNAK ARTIK GERİLMELERİNİN TESTLER VE
ANALİZLERLE BELİRLENEREK HERMETİK
TRANSFORMATÖR KAZANI SİMÜLASYON
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NIHAT ÇELİK

BALIKESİR, NİSAN - 2016

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KAYNAK ARTIK GERİLMELERİNİN TESTLER VE
ANALİZLERLE BELİRLENEREK HERMETİK
TRANSFORMATÖR KAZANI SİMÜLASYON
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NIHAT ÇELİK

BALIKESİR, NİSAN - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Nihat ÇELİK tarafından hazırlanan “KAYNAK ARTIK GERİLMELERİNİN TESTLER VE ANALİZLERLE BELİRLENEREK HERMETİK TRANSFORMATÖR KAZANI SİMÜLASYON PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 15.04.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. İlker EREN
Üye
Prof. Dr. Mehmet EROĞLU
Üye
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz GÜR



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**KAYNAK ARTIK GERİLMELERİNİN TESTLER VE ANALİZLERLE
BELİRLENEREK HERMETİK TRANSFORMATÖR KAZANI
SİMÜLASYON PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
NİHAT ÇELİK
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. İLKER EREN)
BALIKESİR, NİSAN 2016**

Yağlı tip transformatörlerde gerilim dönüşümü yaparken iletkenlerde FARADAY yasasına göre indüklenen kayıplar ve OHM yasasına göre oluşan kayıpların doğurduğu ısının ortamdan uzaklaştırılması için özel yağlar kullanılır. Aktif kısım, oluşan ısıyı atmosfere atabilmek amacıyla “radyatör / dalga duvar ” diye tanımlanan ısı transfer yüzeyleri ile çevrilidir. Isınan ve soğuyan yağın hacimsel genleşme ve büzüşme isteği ısı atma yüzeylerinin genleşmesi ve büzülmesi ile kompanse edilir. Bu durum, uzun süreli çalışmalarda radyatörlerin ana yapıya ergitme kaynağı ile birleştirilmiş bağlantılarında yorulma çatlağına sebep olduğu bilinmektedir.

Kaynaklı bağlantılarda oluşacak olan çatlağın sebep olacağı hataların tasarım, malzeme ve kaynak yöntemi iyileştirmeleri ile en aza indirilmesi bu çalışmanın hedeflerindedir. Bu tez kapsamında ilk olarak transformatör kazanı üzerindeki kaynak tipleri incelenmiş ve kaynaklı bağlantılarda kullanılan malzemelerin ve kaynak bölgelerinin mekanik ve metalürjik özellikleri belirlenmiştir. Çekme ve eğme testleri ile analizlerde ihtiyaç duyulan Young Modülü değerleri deneysel belirlenmiştir. Böylece bir trafo kazanı için Geçişli Termal, İç Gerilme ve Deformasyon Analiz’ lerinde kullanılacak malzeme parametreleri tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:

Hermetik, transformatör, kaynak, yorulma, artık gerilme, sonlu elemanlar yöntemi, (FEM)

ABSTRACT

DEFINING OF SIMULATION PARAMETERS FOR HERMETICALLY SEALED DISTRIBUTION TRANSFORMER TANKS VIA SIMULATIONS, MECHANICAL AND POST WELDING RESIDUAL STRESS TESTS

MSC THESIS

NIHAT ÇELİK

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. İLKER EREN)

BALIKESİR, APRIL 2016

Power losses occur due to conductor resistance while voltage transformation is performed on transformers. Transformer oil is a conductor for heat transfer via surface of tanks equipped as ‘radiators’. In hermetically sealed type transformers in which a vacuum profile settled in bottom to cover, expansion and contraction of the oil can be compensated via expansion and contraction of radiators. Vacuum inside the transformer tank also compensates the pressures and the cyclic loadings, generated by the thermal expansion of the oil, effecting on the radiator’s corrugated wall’s welded joints. Owing to the nature of the design, expansions and contractions that occurred from thermal differences expose transformer tank welded connections to cyclic loads. These dynamic loads gradually cause crack formations and crack propagations in welded connections and in base metal due to cyclic type loading.

The scope of this thesis involved firstly, samples exemplifying the weld types used in hermetically sealed transformers have been examined, mechanical and metallurgical properties of the samples have been determined. Metallographic properties of the weld types have been also determined. Base material and welding zone metallic parameters that were utilized as input parameters during simulations of welding types for Transient Thermal and Structural Analyses. Thus, actual parameters can be used in mechanical design for biggest ever producible hermetically transformer tank at subsequent stages of thesis.

KEYWORDS:

Hermetically Sealed Transformers, Weld, Fatigue, Residual Stress, Transformer Design, FEA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	x
1.GİRİŞ	1
2.MALZEME ÇALIŞMALARI	9
2.1 Ana Malzeme Tipleri:	9
2.2 Kaynaklı Birleştirme Tip Numuneleri ve Kodları.....	12
2.3 Kaynak İlave Metali Kodlamaları	16
2.4 Numune Oluşturma Çalışmaları.....	17
2.5 Testler, İncelemeler ve Sonuçları.....	20
2.5.1 Çekme Deneyleri.....	20
2.5.2 Eğme (Katlama) Deneyleri.....	29
2.5.3 Sertlik Ölçümleri	31
2.5.4 Kalıntı Gerilme Ölçümleri	33
2.5.5 Kaynak Makroskobik Muayeneler	35
2.5.6 Kaynaklı Bölge Mikro Yapı İncelemeleri.....	44
2.5.7 Kırılma Yüzeylerinin SEM İncelenmesi	47
2.5.8 Spektrometrik Analizler	51
3.KAYNAKLI BAĞLANTI TİPLERİNİN SİMULASYONLARI	53
3.1 Öncül Analizler	54
3.1.1 (XRD-1) (A1-A1) (DD1100-DD1100) Bağlantısı Simülasyonları.....	55
3.1.2 (XRD-2) (A2-A2) (DD1300-DD1300) Bağlantı Simülasyonları	59
3.1.3 (XRD-3) (A2-A3) (DD1300-T6) Bağlantı Simülasyonları.....	63
3.1.4 (XRD-4) (A1-A4) (DD1100-NPL80) Bağlantı Simülasyonları.....	67
3.2 Tümüleşik Yapı Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi	70
4.SONUÇ ve ÖNERİLER	72
5.KAYNAKLAR	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Genleşme depolu tip dağıtım transformatörü.....	2
Şekil 1.2	: Hermetik tip dağıtım transformatörü.....	2
Şekil 1.3	: Hermetik transformatör kazanı görünümü.....	6
Şekil 1.4	: Hermetik transformatör kazanı iç görünümü.....	6
Şekil 1.5	: Transformatör kazanının çerçeve ve dalga duvar kaynaklı birleşimi.....	7
Şekil 1.6	: Dalga duvarların kaynak öncesi görünümü.....	7
Şekil 1.7	: Hermetik transformatörler, üretimi bitmiş, sevke hazır halde.....	7
Şekil 2.1	: (A1) kodlu malzemedan elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.....	10
Şekil 2.2	: A2 (DD1300) Malzemedan elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.....	10
Şekil 2.3	: A3 (T6) Malzemedan elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.....	11
Şekil 2.4	: A4 (NPL80) Malzemedan elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.....	12
Şekil 2.5	: (A1-A1) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart (N9K) ve standart dışı (N9D) çekme numuneleri.....	13
Şekil 2.6	: (A2-A2) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart (N10K) ve standart dışı (N10D) çekme numuneleri.....	13
Şekil 2.7	: (A4-A1) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N11) çekme numuneleri.....	14
Şekil 2.8	: (A4-A2) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N12) çekme numuneleri.....	14
Şekil 2.9	: (A3-A1) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N13) çekme numuneleri.....	15
Şekil 2.10	: (A3-A2) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N14) çekme numuneleri.....	15
Şekil 2.11	: (A1-A1) Eğme Katlama Deney Numuneleri (N15).	16
Şekil 2.12	: (A2-A2) Eğme Katlama Deney Numuneleri (N16).	16
Şekil 2.13	: (K1) (K2) (K3) Kaynak Bölgesi Çubuk Numuneleri, kaynak ilave metalinin kendisinden oluşturulmuşlardır.....	17
Şekil 2.14	: N9 Çekme numunelerinin kaynaklı birleşim çalışması.....	18
Şekil 2.15	: Çekme deney kırılmaları, (a) Standart dışı çekme deney numuneleri, (b) N9K, (c) N10K numuneleri.....	23
Şekil 2.16	: A1 numune tipinin 4 nolu numunesine ait yük-uzama grafiği.....	28
Şekil 2.17	: A2 numune tipinin 4 nolu numunesine ait yük-uzama grafiği.....	28
Şekil 2.18	: A3 numune tipinin 4 nolu numunesine ait yük-uzama grafiği.....	28
Şekil 2.19	: A4 numune tipinin 4 nolu numunesine ait yük-uzama grafiği.....	28
Şekil 2.20	: K1 numunesine ait yük-uzama grafiği.....	29
Şekil 2.21	: Mandrel üzerine eğme (katlama) deneyi	29
Şekil 2.22	: N16-5 numunesine ait yük-eğilme grafiği	30

Şekil 2.23	: N15-5 numunesine ait yük-eğilme grafiği.	30
Şekil 2.24	: Kaynaklı bölgelerde kaynak boyunca yapılan sertlik taramaları.	31
Şekil 2.25	: XRD numuneleri toplu halde gösterimi.	33
Şekil 2.26	: XRD-1 numunesi kalıntı gerilme ölçme bölgesi.	34
Şekil 2.27	: XRD-2 numunesi kalıntı gerilme ölçme bölgesi.	34
Şekil 2.28	: XRD-3 numunesi kalıntı gerilme ölçme bölgesi.	34
Şekil 2.29	: XRD-4 numunelerinde ölçüm hedeflenen bölgelerin gösterimi.	34
Şekil 2.30	: 2000 kVA transformatör kazanı modeli.	36
Şekil 2.31	: 2500 kVA transformatör kazanı modeli.	36
Şekil 2.32	: Kendisinden kaynaklı birleşim tiplerine ait Makro İnceleme Numuneleri çıkarılan prototip 2000 kVA transformatör kazanı.	36
Şekil 2.33	: (A1-A1) Köşe kaynağı birleşimi.	38
Şekil 2.34	: Çeşitli kaynaklı bağlantı tiplerinin Mikroskopik inceleme sonuçları ..	43
Şekil 2.35	: N9 ve N10 kaynaklı birleşim bölgesi Mikro-yapı taraması.	44
Şekil 2.36	: N11 ve N12 kaynaklı birleşim bölgesi Mikro-yapı taraması.	45
Şekil 2.37	: N13 ve N14 kaynaklı birleşim bölgesi Mikro-yapı taraması.	46
Şekil 2.38	: (A1-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri ..	47
Şekil 2.39	: (A1-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri.	47
Şekil 2.40	: (A2-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri ..	48
Şekil 2.41	: (A2-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri ..	48
Şekil 2.42	: (A3-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri ..	48
Şekil 2.43	: (A3-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri ..	48
Şekil 2.44	: (A4-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri.	48
Şekil 2.45	: (A4-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri.	49
Şekil 2.46	: K1 numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri.	49
Şekil 2.47	: K1 numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri.	49
Şekil 2.48	: K2 numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri.	49
Şekil 2.49	: K2 numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri.	49
Şekil 2.50	: K3 numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri.	50
Şekil 2.51	: K3 numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri.	50
Şekil 2.52	: (N9K-3) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri.	50
Şekil 2.53	: (N9K-3) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri ..	50
Şekil 2.54	: (N10K-3) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri.	50
Şekil 2.55	: (N10K-3) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri.	51
Şekil 3.1	: (A1-A1) (DD1100-DD1100) (XRD-1) Kaynaklı birleşimine ait numune geometrisi.	55
Şekil 3.2	: (XRD-1) Numunesi MESH detayı: Düğüm sayısı= 22119.	55
Şekil 3.3	: (XRD-1) Numunesi MESH detayı: İlave katı modelin gösterimi.	55
Şekil 3.4	: (XRD-1) Numunesini termal analiz sınır koşullarının gösterimi.	56
Şekil 3.5	: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi.	56
Şekil 3.6	: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yan görünüm, kaynak anı (1,55 sn).	56
Şekil 3.7	: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, üst görünüm, kaynak anı (1,55 sn.).	57
Şekil 3.8	: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yan görünüm, (10.65 sn. sonrası).	57
Şekil 3.9	: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, üst görünüm, (10.65 sn. sonrası).	57
Şekil 3.10	: (XRD-1) Numunesi yapısal analiz sınır koşulları (soğuma sonrası).	58

Şekil 3.11 : (XRD-1) Numunesi yapısal analiz, (y) eksenini boyunca deformasyon..	58
Şekil 3.12 : (XRD-1) Numunesi yapısal analiz, eşdeğer gerilme dağılımı, yan kesit görünümü.....	58
Şekil 3.13 : (XRD-1) Numunesi yapısal analiz, eşdeğer gerilme dağılımı, üst kesit görünümü.	59
Şekil 3.14 : (A2-A2) / (DD1300-DD1300) / (XRD-2) Kaynaklı birleşimine ait numune geometrisi.	59
Şekil 3.15 : (XRD-2) Numunesi 3 boyutlu modeli.	59
Şekil 3.16 : (XRD-2) Numunesi mehleme detayı:	60
Şekil 3.17 : (XRD-2) Numunesinin termal analiz sınır koşullarının gösterimi.....	60
Şekil 3.18 : (XRD-2) numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi.....	60
Şekil 3.19 : (XRD-2) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yan görünüm, (1,2 sn. sonrası).	61
Şekil 3.20 : (XRD-2) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yan görünüm, (60 sn. sonrası).	61
Şekil 3.21 : (XRD-2) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, üst görünüm, (60 sn. sonrası).	61
Şekil 3.22 : (XRD-2) Numunesi yapısal analiz sınır koşulları, soğuma sonrası.	62
Şekil 3.23 : (XRD-2) Numunesi yapısal analiz, deformasyon verisi.	62
Şekil 3.24 : (XRD-2) Numunesi yapısal analiz, eşdeğer gerilme dağılımı.	62
Şekil 3.25 : (A2-A3) (DD1300-T6) (XRD-3) Kaynaklı birleşimine ait numune geometrisi.	63
Şekil 3.26 : (XRD-3) Numunesi MESH detayı:	63
Şekil 3.27 : (XRD-3) Numunesi MESH detayı: İlave katı modelin gösterimi.....	63
Şekil 3.28 : (XRD-3) Numunesinin termal analiz sınır koşullarının gösterimi.....	64
Şekil 3.29 : (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (0,95 sn. sonrası).....	64
Şekil 3.30 : (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (2,035 sn. sonrası).....	64
Şekil 3.31 : (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (11,55 sn. sonrası).....	65
Şekil 3.32 : (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (60 sn. sonrası).....	65
Şekil 3.33 : (XRD-3) Numunesi yapısal analiz sınır koşulları (A: Fix Support, B: Loosen Support).....	65
Şekil 3.34 : (XRD-3) Numunesi yapısal analiz deformasyon miktarları.....	66
Şekil 3.35 : (XRD-3) Numunesi yapısal analiz eşdeğer gerilme dağılımı.	66
Şekil 3.36 : (XRD-4) (A1-A4) (DD1100-NPL80) Numunesi geometrisi.	67
Şekil 3.37 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Numunesi MESH detayı.	67
Şekil 3.38 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sınır koşulları.....	67
Şekil 3.39 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sıcaklık dağılımı, Kaynak Anı.	68
Şekil 3.40 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sıcaklık dağılımı, 11. saniye.	68
Şekil 3.41 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sıcaklık dağılımı, 60. saniye.	68
Şekil 3.42 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Yapısal analiz sınır koşulları	69
Şekil 3.43 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Yapısal analiz deformasyon.....	69
Şekil 3.44 : (XRD-4) (DD1100-NPL80) Yapısal analiz eşdeğer gerilme.....	69

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1	: Transformatör kazanı imalatında kullanılan malzemeler, ilgili standartlar, kullanım yerleri ve tanımlayıcı kodları özet tablosu.....	9
Tablo 2.2	: Numuneler için yapılan kaynaklara ait tanımlama kodları.....	17
Tablo 2.3	: Test numuneleri kaynak parametreleri	19
Tablo 2.4	: Mekanik ve metalografik testler için numune planlaması özeti.	21
Tablo 2.5	: Çekme deneyleri sonuçlarının özet gösterimi.....	22
Tablo 2.6	: Tüm ana malzeme ve kaynaklı numunelerin çekme deneylerinin kapsamlı sonuçları.....	24
Tablo 2.7	: Eğme testinden elde edilen mekanik parametreler.	30
Tablo 2.8	: Kaynaklı birleşim bölgeleri mikro-sertlik ölçüm sonuçları (HV0,1). .	32
Tablo 2.9	: Kaynaklı birleşim merkezlerinden ölçülen kalıntı gerilme değerleri. .	35
Tablo 2.10	: GYTE 'de yapılan esas metal Spektrometrik Analiz sonuçları.	51
Tablo 2.11	: Transformatör imalatlarında kullandığımız malzemelerin tedarikçilerden aldığımız sertifika ve katalog değerleri.....	52
Tablo 3.1	: Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri	70
Tablo 3.2	: Prototip kazanların kaynaklı imalat parametreleri.....	71

SEMBOL LİSTESİ

- DT : Dağıtım Transformatörü (Güç Aralığı 50-6300 kVA)
- Kazan / Tank : Transformatörün çelikten imal kapalı hacminin genel adı
- RD : Kazanın yan duvarlarını oluşturan çelikten imal çoklu dilimli ısı transfer elemanı, radyatör
- DD : Kazanın yan duvarlarını oluşturan çelikten imal, katlanmış sac formulu ısı transfer elemanı
- EM : Kaynaklı bağlantıda ana metal bölgesi
- KÇ : Kaynaklı bağlantıda kaynak çekirdeği bölgesi
- ITAB : Kaynaklı bağlantıda Isı Tesiri Altında Kalan Bölge.
- A1/(DD1100) : Trafo kazanı ana malzeme kodu, DIN EN (10130-2006) DC01 veya ERDEMİR (6112) CCR Sürekli tavlama yapılmış L=1100 mm' lik rulo çelik sac.
- A2/(DD1300) : Trafo kazanı ana malzeme kodu, DIN EN (10130-2006) DC01 veya ERDEMİR (6112) CCR Sürekli tavlama yapılmış 1300 mm' lik rulo çelik sac.
- A3/(T6) : Trafo kazanı ana malzeme kodu, DIN EN (10025-P2-2004) veya S235JR veya (ERDEMİR 3237) TRKK, temperlenmiş kenarları kesilmiş rulodan açma levha çelik sac.
- A4/(NPL80) : Trafo kazanı ana malzeme kodu, S235JR kalite haddehane ürünü, (NPL80) Köşebent olarak piyasadan bulunur.
- M1 : A1 kodlu ana malzemeden ısıtılma işlemi olmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numunenin kodu.
- M2 : A2 kodlu ana malzemeden ısıtılma işlemi olmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numunenin kodu.
- M3 : A3 kodlu ana malzemeden ısıtılma işlemi olmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numunenin kodu.
- M4 : A4 kodlu ana malzemeden ısıtılma işlemi olmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numunenin kodu.
- K1, K2, K3 : Kaynak ilave metalinden oluşturulan test numunelerinin kodları.
- N9 : A1 malzemesinin A1 malzemesine (A1-A1) kaynatılarak elde edilen numunenin genel kodu.
- N9K : A1 malzemesinin A1 malzemesine (A1-A1) kaynatılarak elde edilen numuneden çıkarılan kaşık numunesi kodu.
- N9D : A1 malzemesinin A1 malzemesine (A1-A1) kaynatılarak elde edilen standart dışı numunenin kodu.
- N10 : A2 malzemesinin A2 malzemesine (A2-A2) kaynatılarak elde edilen numunenin genel kodu.
- N10K : A2 malzemesinin A2 malzemesine (A2-A2) kaynatılarak elde edilen numuneden çıkarılan kaşık numunesi kodu.

N10D	: A2 malzemesinin A2 malzemesine (A2-A2) kaynatılarak elde edilen standart dışı numunenin kodu.
N11	: A4 ve A1 ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numunenin kodu.
N12	: A4 ve A2 ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numunenin kodu.
N13	: A3 ve A1 ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numunenin kodu.
N14	: A3 ve A2 ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numunenin kodu.
N15	: A1 malzemesinin kendisine kaynaklı birleştirmesinden elde edilen eğme testi numunesi.
N16	: A2 malzemesinin kendisine kaynaklı birleştirmesinden elde edilen eğme testi numunesi.
Δl_e	: Çekme numunelerinde elastik Uzama (%)
W	: Çekme numunelerinde genişlik (mm)
T	: Çekme numunelerinde kalınlık (mm)
L_0	: Çekme numunelerinde ilk boy (mm)
A_0	: Çekme numunelerinde ilk kesit alanı (mm^2)
PA	: Çekme numunelerinde akma yükü (N)
$\bar{\sigma}_A$: Çekme numunelerinde akma gerilmesi (MPa)
PÇ	: Çekme numunelerinde çekme dayanımı Yükü (N)
$\bar{\sigma}_\text{Ç}$: Çekme numunelerinde çekme gerilmesi (MPa)
W_S	: Çekme numunelerinde kopma anında genişlik (mm)
T_S	: Çekme numunelerinde kopma anında kalınlık (mm)
A_S	: Çekme numunelerinde kopma anında kesit (mm^2)
L_S	: Kopma anında kesit (mm^2)
$H_{V0,5}$: VICKERS biriminde sertlik değeri, test yükü 0,5 kg
$H_{V0,1}$: VICKERS biriminde sertlik değeri, test yükü 0,1 kg
HR_B	: BRINELL biriminde sertlik değeri
λ	: PANalytical X'Pert Pro MPD XRD cihazı Cu X-Işını Dalga Boyu (Angstrom)
XRD-1	: (A1-A1) kaynaklı birleşimine ait XRD test numunesi kodu.
XRD-2	: (A2-A2) kaynaklı birleşimine ait XRD test numunesi kodu.
XRD-3	: (A2-A3) kaynaklı birleşimine ait XRD test numunesi kodu.
XRD-4	: (A1-A4) kaynaklı birleşimine ait XRD test numunesi kodu.
IKY	: İlave katı yapı.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması BALIKESİR ELEKTROMEKANİK SANAYİ TESİSLERİ A.Ş. bünyesinde üretilen Dağıtım Tipi transformatörlerde yaşanan gelen gerçek bir problem üzerine kurgulanmıştır. Transformatör kazanlarındaki kaynaklı bağlantılarda ortaya çıkan yorulma çatlaklarının analiz edilebilmesi ve yorulma performansı arttırılmış tasarımlara geçilebilmesi için öncelikle kaynaklı birleştirme tiplerinde malzeme araştırması yapılmış ve yorulma ile ilgili analizlerde kullanılacak malzeme parametreleri mekanik testler ile imalat süreçlerinde kullanılan malzemeler üzerinden tespit edilmiştir. Tezin kapsamı malzeme araştırmaları ve ANSYS programından istifade edilerek riskli kaynaklı bağlantı tipleri için Geçişli Termal Analizler ve yapıda kalan kalıcı gerilmelerin tespiti için Yapısal Analizlerdir.

Tez çalışmasını devamında, deneysel yöntemlerle belirlenmiş malzeme parametreleri ve deneysel olarak belirlenmiş ısıl koşullarında, kompleks bir yapıya sahip transformatör kazanlarında ANSYS analizleri ile kaynak sonrasında kaynaklı bağlantılarda ve etki çevresinde oluşan kalıcı gerilmeleri analiz etmek, bu analizleri doğrulayacak saha testleri gerçekleştirmek, yorulma çatlakları açısından yapıdaki riskli bölgeleri tespit etmek, öngörülen risklere karşı tasarımsal tedbirler öngörmek olacaktır.

Bu uzun soluklu çalışmada öncelikle değerli Hocam ve danışmanım Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyesi Sn. Yrd. Doç. Dr. İlker EREN'e, titizliği ve derin öngörülleri ile malzeme araştırmalarında tez çalışmasına çok değerli katkılar sunan Sn. Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ' a, tez fikrinin sahibi, olgunlaşmasında yürütülmesinde değerli katkısı olan BEST A.Ş. Ar-Ge Merkezi Müdür'ü Sn. Dr. Gökhan KALKAN'a, bu tezin bir SAN-TEZ konseptinde hazırlanarak T.C. Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı tarafından desteklenmesinde çok büyük emeği olan Çukurova Üniversitesinde görevli Sn. Prof. Dr. Mehmet TÜMAY' a, BEST Ar-Ge Merkezi bünyesinde yaptığım çalışmalarda maddi ve manevi desteğini aldığım değerli mesai arkadaşım BEST A.Ş. Ar-Ge Müdürlüğü Sorumlu Mühendisi Yük. End. Müh. Abdullah CİCİBAŞ' a, FEM analizlerinde kendisinden destek aldığım Mak. Müh. Ahmet KUŞÇUOĞLU' na ve son olarak maddi-manevi sürekli desteğini hissettiğim değerli hayat arkadaşım, eşim Ayşegül ÇELİK' e ve kızlarım Raife İrem ve Elif'e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

1. GİRİŞ

Hermetik tip dağıtım transformatörü, ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri patent ofisi tarafından Thomas H. Keogh'a 21 Ekim 1969 tarihinde patent edilmiştir [1]. Hermetik tip sızdırmaz Dağıtım Transformatörü (DT) ; işletme esnasında oluşan iç basınç değişimlerinin sebep olduğu genişleme ve büzüşmelere reaksiyon gösteren kaynaklı birleştirme yöntemleri ile imal edilmiş kapalı hacim bir kazan / tanktır. Kazan merkezinde transformatör manyetik çekirdeği ve bobinleri bulunmaktadır. Kazan ile bobinler arasında vakum altında yalıtkan bir soğutma yağı bulunur. İşletme koşullarında yağ, iletkenler ve ferro-manyetik çekirdek tam kapalı ve vakumlu olarak kazan içinde bulunur. Bu metal kap ısı transferini sağlayabilmek amacıyla “Radyatör (RD) veya Dalga Duvar (DD) ” olarak tanımlanan ısı transfer yüzeyleri ile çevrilidir.

Dağıtım tip transformatörlerde işletme koşullarında ısınan ve soğuyan yağın genişleme ve büzüşme isteği transformatör teknolojisinde iki farklı yöntemle kompanse edilebilmektedir:

a) Geleneksel tip olarak adlandırılan, genişleme depolu ve yağın atmosfer koşullarına maruz kaldığı açık sistem,

b) Hermetik tip olarak adlandırılan yağın atmosfer koşulları ile temasının önlendiği kapalı sistem.

Geleneksel tip genişleme depolu sistemde gece-gündüz, yaz-kış ve işletme anında çekilen akım değişkenliklerinden dolayı oluşan ısıl farklar sebebi ile oluşan yağ genişmesi, genişleme tankı tarafından kompanse edilir. Genleşme tankının atmosfere açılan bağlantısı sayesinde transformatör kazanına etki eden basınç değeri yaklaşık olarak aynı tutulur. Fakat bu işletme tarzında, atmosferden yağ içerisine nüfuz edebilecek nem, kirlilik, havadaki asılı parçacıklar nedeni ile yağın izolasyon karakterinde kısa zamanda bozulmalar yaşanabilir. Bu durum işletmedeki bir transformatör için işletme maliyeti, yağ değişimi maliyeti ya da duruş maliyeti gibi

olumsuzluklara sebep olur. Hatta yüksek gerilim altında çalışan transformatör bileşenleri arasında gerilim deşarjlarına sebep olarak ve transformatörü devre dışı bırakabilir. Bunun yanında genleşme deposunun bir üretim ve genleşme deposundaki yağın satın alma maliyeti vardır.



Şekil 1.1: Genleşme depolu tip dağıtım transformatörü.

Hermetik tip trafo kazanlarında, yapıda bir genleşme deposu yoktur. Tam sızdırmazlığı sağlanmış kazan, tabanındaki tahliye vanası açılarak ve üst kısmından hava alması engellenerek tank içerisinde tank yüksekliği boyunca bir vakum profili oluşturulur. Oluşan profil basitçe; tank tabanında sıfırlanmış bir hidrostatik yağ basıncı ve hemen kapak altında en büyük değerine ulaşmış vakum değeri şeklindedir. Bu vakum profilinin işletme ömrü boyunca kazan sızdırmazlığı (hermetikliği) sağlanarak kalması kritik bir işletme parametresidir. Bu sayede, izolasyon yağının hava ile teması önlediği için işletme ömrü genleşme depolu sisteme göre daha uzundur ve işletme bakım maliyetleri daha azdır.



Şekil 1.2: Hermetik tip dağıtım transformatörü.

Tank içerisinde oluşturulan vakum, ısıl genleşmeler dolayısıyla ile oluşacak tank duvarlarına ve kaynaklı birleştirme bölgelerine etki edecek basınç ve tekrarlı yükleri

büyük oranda tolere eder. Atmosfere açık olmayan yapı sebebi ile ısı farklarından doğan genleşme ve büzüşmeler kazanın dış duvarlarını sürekli tekrarlı (dinamik) yüklere maruz bırakır. Bu dinamik yükler zamanla kaynaklı bağlantılarda ve ana metalde yorulma kaynaklı çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemelerine sebep olur. Kaynaklı bağlantılarda herhangi noktada oluşabilecek çatlakın sebep olacağı yağ kaçağı transformatörün hermetikliğini bozacağından kazan içerisindeki yağ seviyesi düşer ve iletkenler açıkta kalarak yağın izolasyon etkilerinden faydalanılamaz hale gelir ve tank içinde bulunan yüksek potansiyellerin gerilim boşalmalarına (ark, kıvılcım) dönmesine neden olur.

Hermetik tip dağıtım transformatörlerinde gerek ortam sıcaklığındaki değişimler sonucu gerekse de gece ve gündüz yükleme farklılıklarından dolayı içerisinde elektriksel izolasyon ve soğutma vazifesi gören özel transformatör yağı genleşir veya büzüşür. Bu ısıl genleşme ve büzülme hareketi hermetik transformatörlerin kaynaklı bağlantı noktalarına tekrarlı yükler uygular. Bu sebeple IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) 2005 yılında bir alt komite kurarak transformatör tanklarında kaynak bölgeleri ve civarında oluşan yırtılma olaylarını incelemiştir [2]. Bu alt komite hem hermetik transformatörlerde oluşan tekrarlı yükler hem de elektriksel boşalma sonucu oluşan ani basınç yükselmelerinin transformatör tankı üzerine etkilerini belirlemiş ve alternatif dizayn önerilerinde bulunmuştur [3]-[5]. Yorulma yükü altında hermetik transformatör kazan duvarı – dalga duvar (radyatör) kaynaklı birleşim yerlerine gelen yük ve bu yükün oluşturduğu mekanik gerilmeler basit matematiksel modeller ve idealleştirilmiş koşullar kullanılarak verilmiştir. Bu modelde dalga duvarlar 2 ucu ankastre bir giriş olarak modellenerek statik yük altındaki gerilmeler hesaplanmaya çalışılmıştır. [6]. Bunun yanında aynı şekilde dinamik yük altında oluşan yorulma gerilmeleri de basit matematiksel ifadelerle tanımlanmaya çalışılmış ve hermetik bir transformatörün standartlarda öngörülen ömür ve sıcaklık değişimlerine göre maruz kalacağı değişken yük çevrim sayısı hesabı verilmiştir. Kaynak bölgelerinde çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve gerilme seviyeleri ile ilgili herhangi bir bilgi bu çalışmada verilmemiş ve herhangi bir kaynak metodu tavsiye edilmemiştir. Artık gerilmelerin oluşturabileceği etkiler de göz ardı edilmiştir.

Hermetik transformatörlerde oluşan kaynak çatlakları yağ seviyesinde ani düşmelere yol açabileceği için yüksek gerilim taşıyan ara bağlantı elemanları hava ile temas edecek ve iletkenler arasında elektriksel boşalmalar yaşanacaktır [7]-[9]. Değişik üreticilerin dağıtım hatlarına monte edilmiş hermetik transformatörlerde yaşanan arızaların en büyük sebeplerinden birinin imalat kaynak hatalarından oluşan yağ kaçaqları olduğu belirlenmiş ve istatistiksel metotlar kullanılarak oluşan hataların dağılımı incelenmiştir.

Krishnadev tarafından, işletme esnasında arızalanmış ve kaynak bölgeleri zarar görmüş büyük güç transformatörlerinden kesilen numuneler metalografik muayeneye tabi tutularak kaynak bölgelerinin çatlak oluşumu, ilerlemesi ve tokluk bakımından en zayıf halka olduğu belirtilmiştir. [10]. Numuneler üzerinde yapılan incelemelerde keskin mikro çatlaklar gözlemlenmiş ve kırılma yolunun düzgün olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile bu bölgelerin gevrek kırıldığı sonucuna varılmıştır. Ancak bu çalışmalar yüksek pik değere sahip kısa süreli dinamik yükler altında gerçekleştirilmiş, çalışmada yalnızca kırılmış yüzeyler üzerinde incelemelerde bulunulmuştur. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile ilgili herhangi bir simülasyon veya analitik çalışma verilmemiştir. Explicit dinamik simülasyon yöntemleri kullanılarak depolu tip transformatörler içerisinde elektriksel boşalmalar sonucu oluşabilecek dinamik yüklere kazan ve soğutma elemanlarının tepkisi Lagrangian-Eulerian çözüm ağı eşleşmelerini ile civatalı bağlantı noktaları için incelenmiştir.[11] Bu çalışmada kaynak bölgeleri incelenmemiş ve kaynak bölgeleri düğüm noktalarının birbirlerine bağlanması yolu ile modellenmiştir. Dolayısı ile bu noktalarda malzeme özelliklerinde kaynak operasyonu sonucu oluşabilecek değişiklikler göz ardı edilmiş ve çatlak oluşumuna ve ilerlemesine izin verilmemiştir. Benson ve arkadaşları tarafından yapılan 2 boyutlu asimetric FEM simülasyonu çalışmalarında, nükleer enerji sektöründe kullanılan kaynaklı imalat yöntemi ile imal edilen yüksek basınçlı nozullar için, belirli bir sıcaklık girişine karşılık olarak zaman ve uzayda sıcaklık değişimi hikâyesi ve bu hikayeden ortaya çıkan kalıcı gerilmeler modellenmeye çalışılmıştır. Modellemede belirsizlik kaynağı olarak, seçimi yapılan ısı giriş modelinden kaynaklanan belirsizlikler, gerilme-sertleşme ilişkisi seçimleri, süreç sıralaması, malzeme özellikleri gibi belirsizlikler olduğu belirtilmiştir. [12]

Literatürde hermetik tip dağıtım transformatörleri ömür hesapları yorulma yükü altında basit matematiksel ifadelerle verilmiş, çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile ilgili çalışmalar arızalı transformatörlerden kesilen parçaların incelenmesi ile sınırlı kalmıştır. Değişik kaynak operasyonlarının uygulanması esnasında oluşabilecek artık gerilmeler göz ardı edilerek statik ve tekrarlı yüklerin uygulanması durumunda artık gerilmelerden doğabilecek negatif etkiler hesaplara dahil edilmemiştir. Ömür hesaplarında simülasyon tekniklerinin kullanılmasına yer verilmemiştir. Kaynak bölgelerinin uluslararası standartlara[13]-[14] göre teste tabi tutularak malzeme özelliklerinin, çatlak oluşum ve ilerleme parametrelerinin çıkartılması ve geçişli termal analiz teknikleri ile çok daha güvenilir hesaplamalar yapmak bu projede hedeflenmiştir. Test kazanı geliştirilerek ve tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak yükleme koşullarında meydana gelen çatlak oluşumları izlenecek ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Bu projenin hermetik tip dağıtım transformatörlerinde yorulma yükü altında oluşan çatlak oluşumu ve ilerlemesi olayına yeni bir bakış açısı ve anlayış getirmesi proje ortaklarının en önemli beklentisidir.

Tez konusu olan dalga duvarlı kazanlar dağıtım transformatörlerinin kazan üretiminde kullanılmakta olup, genel amacı trafo içi izolasyon ve soğutma işleminde kullanılan yağın soğutulmasında yüzey alanını artırmak suretiyle yağın daha etkili bir şekilde soğumasını sağlamaktır. Dalga duvarlar “DIN EN (10130-2006) DC01 / (ERDEMİR 6112) CCR sürekli tavlama yapılmış rulo / DKP 6112 A/1” kalite ve 1,20–1,50 mm kalınlıkta soğuk haddelenmiş çelik sacdan tek parça olarak otomatik dalga duvar bükme makinası ile üretilmekte ve katlama noktalarında kaynak edilmektedir. Boyutları transformatör güç ve kapasitelerine göre değişiklik göstermektedir. Kaynak esnasında gösterilen işçilik ve teknoloji kullanımı, kazanda olabilecek delinme, sızıntı ve kaçak problemlerinin hem oluşmasında hem de önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Transformatör kazanları ve kapakları düşük/orta sertlikteki çelikten imal edilirler. Tankın tava kısmı ise “DIN EN (10025-P2-2004) / S235JR (ERDEMİR 3237) TRKK” kalite düşük karbonlu çelikten imal edilir. Kazanın kapağının ana gövdeye bağlantısı civatalı bağlantı ile çerçeveye yapılır. Çerçeve malzemesi “DIN

EN (10025-P2-2004) / S235JR -NPL80-köşebent profil” malzemedir ve kaynaklı bağlantı ile DD’ lara birleştirilirler.

Kazan ölçülerine uygun olarak ilk önce yağ tavaşı, köşebentler, dalga duvarlar ve kazan kapağı hazırlanır. Sonraki aşamada dalga duvarlar çatılarak yağ tavaşı ve köşebentler ile birlikte birbirine kaynakla birleştirilmesi yapılır. Kaynak işlemi tamamlanan kazanlar uygun normlara göre sızdırmazlık testlerine tabi tutularak kapak ile birlikte hazır hale getirilir. Hermetik tip transformatör, dalga duvar ve kazanlara ait örnek resimler Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.3: Hermetik transformatör kazanı görünümü.



Şekil 1.4: Hermetik transformatör kazanı iç görünümü.



Şekil 1.5: Transformatör kazanının çerçeve ve dalga duvar kaynaklı birleşimi.



Şekil 1.6: Dalga duvarların kaynak öncesi görünümü.



Şekil 1.7 : Hermetik transformatörler, üretimi bitmiş, sevke hazır halde.

Bu çalışmanın kapsamı trafo kazanı kaynaklı bağlantılarda herhangi noktada oluşacak olan bir yorulma çatlaklarının sebep olacağı olumsuz durumun önceden tespit edilip konsükrüsyon ve kaynak yöntemi iyileştirmeleri ile en aza indirilmesi ve gerçekleştirilecek olan test ve simülasyon çalışmaları sonucu imal edilebilecek maksimum güçteki hermetik transformatör kazanının mekanik tasarım kriterlerinin geliştirilmesidir. Bu amaçla temel olarak aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir:

- Hermetik tip transformatör kazanını oluşturan malzeme tipleri ve kaynaklı birleştirme tipleri incelendi.

- Kaynaklı bağlantılarda kullanılan malzemelerin mekanik ve metalürjik özellikleri belirlendi.
- Kaynaklı bağlantı tiplerinin metalografik özellikleri incelendi.
- Geçişli termal analizler ve yapısal analizler de kullanılacak malzeme mekanik parametreleri belirlendi.
- Kaynaklı bağlantı tipleri 3 boyutlu modellenerek literatüre uygun eşdeğer ısı yükleri uygulanarak sonlu elemanlar (FEM) yöntemi ile geçişli termal analizler ve yapısal analizler yapıldı.
- Standart olarak üretimi yapılan 2000 ve 2500 kVA transformatör kazanlarının kaynaklı üretim süreçleri kayıt altına alınarak tüm yapıya uygulanacak geçişli termal analizler ve yapısal analizler için ısı girişi koşulları belirlendi.
- Kaynaklı bağlantı tiplerinde kalıntı gerilme ölçümleri yapıldı ve ölçümler analizlerle eşleştirilerek analizlerin güvenilirlikleri geliştirildi.

2. MALZEME ÇALIŞMALARI

2.1 Ana Malzeme Tipleri:

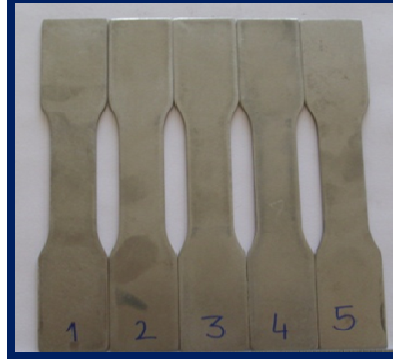
Dağıtım transformatör kazan konstrüksiyonunda kullanılan çelik malzemeler için oluşturulan tanımlama kodları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Transformatör kazanı imalatında kullanılan çelik malzemeler, ilgili standartlar, kullanım yerleri ve tanımlayıcı kodları özet tablosu.

Malzeme adı, Tanımı	Kodu
ERDEMİR 6112 kalite dalga duvar sacı h=1100 mm (DIN EN 10130-2006 DC01 (ERDEMİR 6112) (CCR, Sürekli tavlama yapılmış rulo)	A1 (DD1100)
ERDEMİR 6112 kalite dalga duvar sacı h=1300 mm (DIN EN 10130-2006 DC01 (ERDEMİR 6112) (CCR Sürekli tavlama yapılmış rulo)	A2 (DD1300)
ERDEMİR 3237_S235JR_6 mm taban ve tekne imalatında kullanılır. (DIN EN 10025-P2-2004 S235JR (ERDEMİR 3237) (TRKK Temperlenmiş kenarları kesilmiş rulodan açma levha)	A3 (T6)
S235JR kalite -NPL80-Köşebent-Kazan üst çerçeve imalatında kullanılır.	A4 (NPL80)

A1 veya (DD1100): DIN EN (10130-2006) DC01 veya ERDEMİR (6112) CCR sürekli tavlama yapılmış rulo olarak piyasadan temin edilen çelik sac levha malzemesidir. Transformatör yan duvarı olarak yüksekliği 1100 mm olan DD kullanımı nedeni ile kimi yerde **DD1100** olarak da tanımlanmaktadır. Prototip ve test numunesi çıkarmak için yapılan 2000 kVA gücündeki transformatör kazanında yan duvarlarda bu malzeme kullanılmıştır. Ana malzeme kodu **A1**’ dir. Bundan sonra tüm tablolarda A1 olarak veya DD1100 olarak anılacaktır.

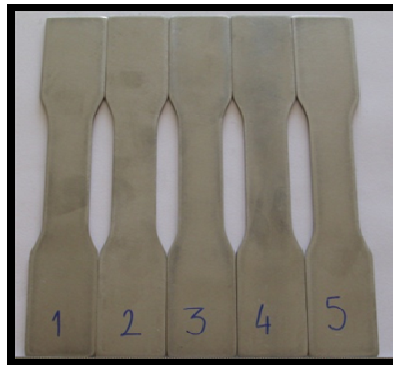
M1: A1 kodlu ana malzemeden ısıtılmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numuneye verilen kod numarasıdır.



Şekil 2.1: (A1) kodlu (DD1100) Malzemeden elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.

A2 veya (DD1300): DIN EN (10130-2006) DC01 veya ERDEMİR (6112) CCR sürekli tavlama yapılmış rulo olarak piyasadan temin edilen çelik sac levha malzemesidir. Transformatör yan duvarı olarak yüksekliği 1300 mm olan DD kullanımını nedeni ile kimi yerde DD1300 olarak da tanımlanmaktadır. Prototip ve test numunesi çıkarmak için yapılan 2500 kVA gücündeki transformatör kazanında yan duvarlarda bu malzeme kullanılmıştır. Ana malzeme kodu A2' dir. Bundan sonra tüm tablolarda A2 olarak veya DD1300 olarak anılacaktır.

M2: A2 kodlu ana malzemeden ısıtılmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numunesine verilen kod numarasıdır.



Şekil 2.2: A2 (DD1300) Malzemeden elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.

A3 veya (T6): DIN EN (10025-P2-2004) veya S235JR veya (ERDEMİR 3237) TRKK temperlenmiş kenarları kesilmiş rulodan açma levha sac olarak piyasadan temin edilen çelik malzemedir. Kalınlığının 6 mm olması nedeni ile T6 olarak tanımlanmaktadır. Her iki trafo tankında (bundan sonra KAZAN olarak anılacaktır) taban ve tekne imalatında kullanılmaktadır. Ana malzeme kodu A3' dür. Bundan sonra tüm tablolarda ve gösterimlerde A3 olarak anılacaktır.

M3: A3 kodlu ana malzemeden ısıtılmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış (30X30) mm boyutlarında numunesine verilen kod numarası M3' dir.



Şekil 2.3: A3 (T6) Malzemeden elde edilen standart çekme testi Kaşık Numuneleri.

A4 veya (NPL80): S235JR KALİTE haddehane ürünü (NPL80) köşebent olarak piyasadan temin edilen standart bir çelik malzemedir. Standart ön profil verilmiş çelik (DIN St 37) kalite çelik malzeme olarak piyasadan kolayca temin edilen bir malzemedir. Her 2 tip trafo kazanında üst çerçeve imalatında kullanılmaktadır. Ana malzeme kodu A4' dir. Bundan sonra tüm tablolarda ve gösterimlerde A4 olarak anılacaktır.

M4: A4 kodlu ana malzemeden ısıtılmaksızın Spektrometrik Analiz için çıkarılmış 30X30 mm boyutlarında numunesine verilen kod numarası M4' dir.

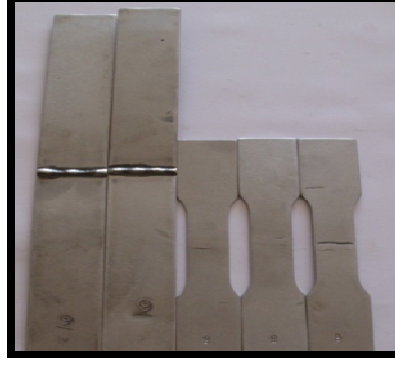


Şekil 2.4: A4 (NPL80) Malzemedan elde edilen standart çekme testi kaşık numuneleri.

2.2 Kaynaklı Birleştirme Tip Numuneleri ve Kodları

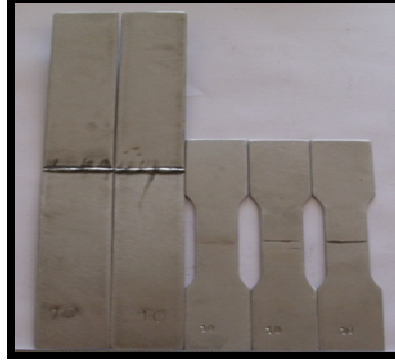
Tezin ilk aşamalarında transformatör kazanı üretiminde kullanılan kaynaklı bağlantı yöntemleri ile numuneler üretilmiştir. Bu numuneler dört ana malzemenin gerçek bir transformatör kazanında nasıl oluyorsa aynı şekilde yapılan kaynaklı birleştirme örneklerinden oluşmaktadır. Tüm numunelerin oluşturulduğu kaynak şartları kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan numunelerin tanımlamaları aşağıda verilmektedir.

N9: A1 (DD1100) Kazan yan duvarlarının birbirlerine kaynatılmasını temsil edecek şekilde yapılmış, A1 (DD1100) levha sac malzemesinin A1(DD1100) levha malzemesine (**A1-A1**) kaynatılarak elde edilen elde edilen numuneden çıkarılan kaşık numunesidir. Çekme numunesi olarak hazırlanmış üç adet test numunesine (N9K) kodu, standart dışı hazırlanmış 2 adet çekme numunesine (N9D) kodu verilmiştir.



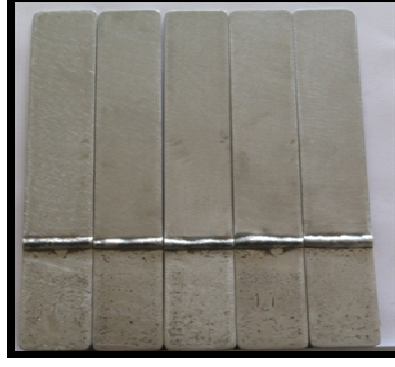
Şekil 2.5: (A1-A1) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart (N9K) ve standart dışı (N9D) çekme numuneleri.

N10: A2 (DD1300) Kazan yan duvarlarının birbirlerine kaynatılmasını temsil edecek şekilde yapılmış, A2 (DD1300) levha sac malzemesinin A2 (DD1300) levha malzemesine (A2-A2) kaynatarak elde edilen elde edilen numuneden çıkarılan kaşık numunesidir. Çekme numunesi olarak hazırlanmış üç adet test numunesine (N10K) kodu, standart dışı hazırlanmış iki adet çekme numunesine (N10D) kodu verilmiştir.



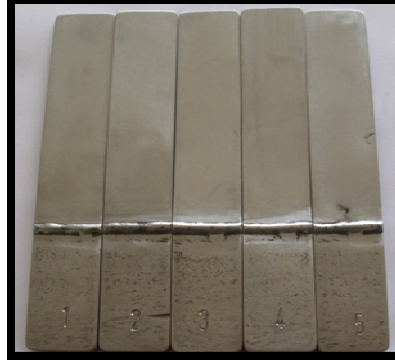
Şekil 2.6: (A2-A2) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart (N10K) ve standart dışı (N10D) çekme numuneleri.

N11: A4 (NPL 80) ve A1 (DD1100) ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numuneleridir. Kazan teknesini oluşturan 6 mm kalınlığındaki A4 levha sac ile yan duvarları oluşturan 1,5 mm kalınlığındaki A1 malzemesinin kaynaklı birleşimlerinden elde edilen standart dışı çekme test numuneleridir. Tümü standart dışı çekme testi numunesi olarak 5 adet oluşturulmuştur.



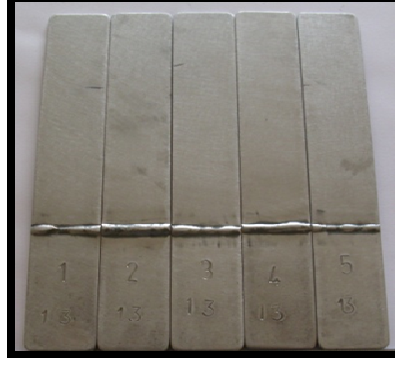
Şekil 2.7: (A4-A1) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N11) çekme numuneleri.

N12: A4 (NPL(80) ve A2 (DD1300) ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numuneleridir. Kazan teknesini oluşturan 6 mm kalınlığındaki A4 levha saç ile yan duvarları oluşturan 1,5 mm kalınlığındaki A2 malzemesinin kaynaklı birleşimlerinden elde edilen standart dışı çekme test numuneleridir çekme testi numunesi olarak 5 adet oluşturulmuştur.



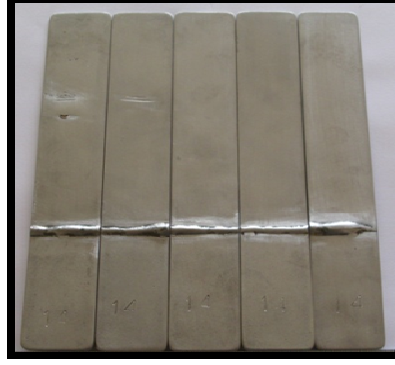
Şekil 2.8: (A4-A2) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N12) çekme numuneleri.

N13: A3 (T6) ve A1 (DD1100) ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numuneleridir. Çekme test numunesi olarak fakat standart dışı numune olarak hazırlanmıştır.



Şekil 2.9: (A3-A1) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N13) çekme numuneleri.

N14: A3 (T6) ve A2 (DD1300) ana malzemelerinin birbirlerine ait kaynaklarına ait numuneleridir. Çekme test numunesi olarak fakat standart dışı numune olarak hazırlanmıştır.



Şekil 2.10: (A3-A2) Kaynaklı birleştirmesinden elde edilen standart dışı (N14) çekme numuneleri.

N15: A1 (DD1100) malzemesinin kendisine kaynaklı birleştirmesinden elde edilmiştir. 2000 kVA trafo kazanındaki yan duvarların birbirlerine kaynaklarının temsil eder. Eğme testi numunesidir.



Şekil 2.11: (A1-A1) Eğme Katlama Deney Numuneleri (N15).

N16: A2 (DD1300) malzemesinin kendisine kaynaklı birleştirmesinden elde edilmiştir. 2500 kVA trafo kazanındaki yan duvarların birbirlerine kaynaklarının temsil eder. Eğme testi numunesidir.



Şekil 2.12: (A2-A2) Eğme Katlama Deney Numuneleri (N16).

2.3 Kaynak İlave Metali Kodlamaları

Ana malzemelerin birbirlerine kaynaklı birleştirmelerinde kullanılan kaynak ilave metali TS EN ISO 14341-A G3 Si1 normuna uygun kalitede GEKA veya ASKAYNAK ürünü SG2 (1.00 mm) çapında gaz altı kaynak telidir. Tez çalışmaları kapsamında tüm kaynaklı birleştirmeler için yapılacak Sonlu Elemanlar Analizlerinde kullanılacak kaynak bölgesi parametrelerini (Elastite Modülü, Akma Sınırı ve Poisson Oranı) belirlemek amacıyla, sadece kaynak ilave metalinden oluşturulan 3 adet test numunesine K1, K2 ve K3 kodları verilmiştir.



Şekil 2.13: (K1) (K2) (K3) Kaynak Bölgesi Çubuk Numuneleri, kaynak ilave metalinin kendisinden oluşturulmuşlardır.

Aşağıdaki tabloda oluşturulan numunelere ait kodlamaların özeti yer almaktadır.

Tablo 2.2: Numuneler için yapılan kaynaklara ait tanımlama kodları.

Malzeme-Malzeme birleşimi	Kodu
DD1100-DD1100 kaynağı (A1-A1 kaynağı)	N9
DD1300-DD1300 kaynağı (A2-A2 kaynağı)	N10
NPL80-DD1100 kaynağı (A1-A4 kaynağı)	N11
NPL80-DD1300 kaynağı (A2-A4 kaynağı)	N12
T6-DD1100 kaynağı (A1-A3 kaynağı)	N13
T6-DD1300 kaynağı (A2-A3 kaynağı)	N14
DD1100-DD1100 kaynağı (A1-A1 kaynağı)-Eğme numuneleri	N15
DD1300-DD1300 kaynağı (A2-A2 kaynağı)-Eğme numuneleri	N16
Kaynak doğrultusundaki kaynak ilave metali dolgulu numuneler	K1, K2 ve K3

2.4 Numune Oluşturma Çalışmaları

Çelik malzemelerin kaynaklı birleştirilmeleri Fronius TS 5000 marka kaynak makinası ile 9 lt/dk debili Linde Corgon 5S2 (%93 Ar+%5 CO₂+%2 O₂) koruyucu gaz altında ve 1,00 mm çapında GEKA SG2 tip kaynak teli katkısı ile

gerçekleştirilmiştir. Yapılan kaynaklara ait oluşturulan kaynak kodları Tablo 2.2’de ve numuneler oluşturulurken kayıt altına alınan kaynak parametreleri Tablo 2.3’te verilmiştir.

K1, K2 ve K3 numuneleri kaynak metalografisinde HAZ bölgelerinin arasında kalan başkalaşmış fazın mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, akma dayanımı, elastisite modülü vb.) belirleyebilmek amacıyla üretilmiştir. Bu amaçla 20 mm kalınlıkta ve 45° (V) formunda kaynak ağzı açılmış 2 adet levha daha önceden tanımlana kaynak ilave teli ile birbirine kaynatılarak katılaştırılan ve başkalaşan kaynak havuzundan dikiş boyunca (kaynak doğrultusunda) 10 mm çapında silindirik çekme numuneleri oluşturulmuştur.



Şekil 2.14: N9 Çekme numunelerinin kaynaklı birleşim çalışması.

Kaynak hattı boyunca hatalı bölgeler ıskartaya ayrıldı. Test numuneleri oluşturulurken kayıt altına alınan kaynak parametreleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.3: Test numuneleri kaynak parametreleri

Kaynak kodu	Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak Boyu (mm)	Tel hızı (mm/s)	Kaynak Süresi (s)	İlerleme hızı (mm/s)	Kaynak Tipi
N9	74	16,6	460	19,6	96	4,8	Alın
N10	74	16,6	497	18,0	86	5,8	Alın
N11	181	19,4	480	36,1	77	6,2	Alın
N12	181	19,4	495	36,1	84	5,9	Alın
N13	175	19,2	485	33,7	76	6,4	Alın
N14	175	19,2	500	33,7	77	6,5	Alın
N15	74	16,4	480	19,2	116	4,1	Alın
N16	74	16,4	494	19,6	120	4,1	Alın
K1	232	27,2	1200	62,3	420	2,9	45° V 20 mm 6 pas
K2	225	26,2	1400	61,8	347	4,0	45° V 20 mm 7 pas
K3	232	27,2	1400	62,2	374	3,7	45° V 20 mm 7 pas

Elde edilen numuneler aşağıdaki test ve incelemeler yapılacak şekilde hazırlanmış ve gruplanmışlardır:

- Standart ve standart olmayan numuneler için çekme testleri
- Eğme katlama deneyleri
- Çekme ve eğme katlama deneylerinde kırılan yüzeylerin sem incelenmesi ve dijital fotoğraflanması
- Makro sertlik ölçümleri ve kaynak bölgesinde mikro sertlik taraması
- Esas malzemede ve kaynak bölgesinde faz yapısı, tane boyutu dağılımı incelemeleri
- Yarı kantitatif element analizleri
- Kaynak bölgeleri makro incelemeleri

2.5 Testler, İncelemeler ve Sonuçları

Yapılan kaynaklı birleştirmelere ait kantitatif ve kalitatif özelliklerin belirlenebilmesi amacıyla Tablo 2.3' de yer alan planlamaya uygun olarak bir seri test ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri, kaynak doğrultusuna dik yönde çıkarılan numunelere 2 ve 3 mm/dk'lık çekme hızlarında İTÜ (İstanbul Teknik Üniversitesi) Malzeme Laboratuvar' ında ve GYTE (Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü) Malzeme Laboratuvar' larında uygulandı. 3 nokta eğme deneyleri, (100) ve (500) gr yük altında VICKERS ucu ile mikro-sertlik ölçümleri GYTE' de yapıldı. Kaynak makro incelemeleri (GTM) Gedik Test Merkezi' nde, kaynaklı bölge mikro yapı incelemeleri RÖNTGENSAN 'da, kalıntı gerilme ölçümleri TÜBİTAK MAM' da ve çekme deneyi sonucu kırılan yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskopik (SEM) incelemesi de GYTE de yapıldı.

Mekanik ve metalografik test, deney ve muayenelerden alınan sonuçları devam eden bölümlerde özetlenmiştir.

2.5.1 Çekme Deneyleri

Tüm kaynaklı bağlantı tiplerinden ve ana malzeme örneklerinden hazırlanmış beşer adet numunenin üçer adetlerine TS EN ISO 4136:2011 standardına göre [15] çekme testi yapılmıştır. Test öncesi ve sonrası ölçülen boyutlar kayıt altına alınmıştır.

Aşağıda bazı çekme testlerine ait YÜK-UZAMA grafikleri yer almaktadır. 4 tip ana malzemeye, iki tip kaynaklı bağlantı ve üç adet kaynak ilave metal çekme numunesinin toplam 21 adet çekme testi yapılmıştır. Elde edilen Akma Mukavemeti, Çekme Mukavemeti, Elastik Uzama Miktarı, Kopma Uzaması, Kopma Kesit Daralması, Sertlik ve Çekme Kırılma Mesafeleri değerlerini kapsayan ve tüm verileri içeren Tablo 2.6 ve sonuçların kolayca değerlendirilmesini sağlayan özet tablosu Tablo 2.5' de sunulmaktadır.

Tablo 2.4: Mekanik ve metalografik testler için numune planlaması özeti.

			A1	A2	A3	A4	N9K	N10K	N11	N12	N13	N14	N15	N16	K1	K2	K3	TOP. ADT
1. TEST PAKETİ	ÇEKME TESTİ	MİKTAR (ADET)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			1	1	1	45
	MAKRO SERTLİK	MİKTAR (ADET)	1	1	1	1									1	1	1	7
2. TEST PAKETİ	SEM İNCELEME VE DİJİTAL FOTOĞRAF.	MİKTAR (ADET)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
3. TEST PAKETİ	NUMUNE HAZIR. VE SERTLİK TARA.	MİKTAR (ADET)					1	1	1	1	1	1	1	1				8
4. TEST PAKETİ	MİKRO YAPI İCEL. VE DİJİTAL RESİM.	MİKTAR (ADET)					1	1	1	1	1	1	1	1				10
5. TEST PAKETİ	MALZEMEDE TANE DAĞILIMI İNCEL.	MİKTAR (ADET)					1	1	1	1	1	1	1	1				8
6. TEST PAKETİ	EĞME KATLAMA	MİKTAR (ADET)											5	5				10
7. TEST PAKETİ	YARI KANTİTATİF ELEMENT ANALİZİ	MİKTAR (ADET)	1	1	1	1												4

Tablo 2.5: Çekme deneyleri sonuçlarının özet gösterimi.

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı ve Yoğunluk (kg/l)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Kesit Daralması (%)	Sertlik	Kırılma Mesafesi (mm)
A1 (DD1100)	211,32	0,30 7,685	255 (max. 280)	353 (270-410)	35 (min. 28)	49	160 H _{V0,5} (≈81,5HR _B)	---
A2 (DD1300)	210,895	0,30 7,610	256 (max. 280)	355 (270-410)	35 (min. 28)	49	160 H _{V0,5} (≈81,5HR _B)	---
A3 (T6)	205,31	0,30 7,670	264 (max. 300)	371 (360-510)	35,32 (41)	60	183 H _{V0,5} (≈88HR _B)	---
A4 (NPL80)	208,73	0,30 7,745	302 (max. 336)	457 (478)	31 (34)	56	228 H _{V0,5} (≈96HR _B)	---
K1,K2 ve K3	218,356	0,30 7,766	392 (420-tel)	481 (500-640-tel)	33,4 (22-tel)	55	241 H _{V0,5} (≈98HR _B)	---
N9K (A1-A1)	---	---	275 (0.2)	334	19	43	---	≈6,0
N10K (A2-A2)	---	---	273 (0.2)	334	19	44	---	≈8,5
N11 (A1-A4)	---	---	---	P _{MAX} 16734 N	---	---	---	---
N12 (A2-A4)	---	---	---	P _{MAX} 17101 N	---	---	---	---
N13 (A1-A3)	---	---	---	P _{MAX} 16702 N	---	---	---	---
N14 (A2-A3)	---	---	---	P _{MAX} 17216 N	---	---	---	---

Çekme deney sonuçları özet tablosu değerlendirildiğinde (Tablo 2.5) esas metal (A1, A2, A3 ve A4) mekanik özelliklerinin çelik üreticilerinin/tedarikçilerinin garanti etmiş olduğu değerler arasında olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı bölge özelliklerinin tespiti için hazırlanan K1,K2 ve K3 çekme numunelerinin akma (392 MPa) ve çekme (481 MPa) dayanımları en yüksek çıktığı görülmektedir. N9K ve N10K kodlu numunelerin akma ve çekme dayanımları ile uzama (%) değerleri aynı çıkmıştır. N9 ve N10 kaynaklı çekme numune dayanımları; 273-275 MPa'lık 0.2 akma değerleri ile esas metal akma değerlerinden (255-256 MPa) fazla çıktığı görülmektedir. Çekme dayanımları 334 MPa değeri ile 353-355 MPa'lık esas metal çekme dayanımlarına %94 oranında yaklaştığı görülmektedir. Yüzde uzama değerlerinde en düşük uzama miktarları kaynaklı (N9K ve N10K) numunelerde (% 43 ve 44 olarak) elde edilmiştir.

Standart olmayan çekme numuneleri için maksimum çekme kuvvetleri (3 deney ortalaması) incelendiğinde deney sırasında alınan maksimum çekme kuvvetlerinin

16702 N ile 17216 N arasında değişim gösterdiği, en yüksek çekme kuvvetinin N14 kodlu kaynaklı numunede 17216 N olarak elde edildiği görülmüştür.

Çekme deneyi neticesinde meydana gelen kırılma resimleri Şekil 2.15 'de verilmiştir. Resim incelendiğinde standart dışı çekme numunelerinin tümünde kırılma bölgeleri ince A1 (DD1100) ve A2 (DD1300) malzeme bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir. Bu kaynaklı numunelerde kırılmalar kaynak merkezlerinde ve/veya hemen yakınında meydana gelmemiştir. Bu durum, kaynak bölgelerinde kusur (süreksizlik) odaklı kırılma olmadığı şeklinde ifade edilebilir. Standart boyutlardaki kaynaklı çekme numunelerin kırılma bölgelerinin kaynak merkezlerinden 6,0-8,5 mm mesafelerde ve Isı Tesiri Altında kalan Bölge (HAZ) ile esas metal geçiş bölgelerinde gerçekleşmiş olabileceği söylenebilir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 2.15: Çekme deney kırılmaları, (a) Standart dışı çekme deney numuneleri, (b) N9K, (c) N10K numuneleri.

Çekme deneyinde elde edilen yük-uzama verilerini grafiğe döktüğümüzde elde edilen bazı grafikler Şekil 2.16 ve Şekil 2.20 arasında verilmiştir.

Tablo 2.6: Tüm ana malzeme ve kaynaklı numunelerin çekme deneylerinin kapsamlı sonuçları.

Malzeme Kodu, Adı ve Açıklaması	Test Numunesi Kodu	Test Numunesi Boyutları (Minimum)	Test Numunesi Boyutları (Ortalama)	Elastik Uzama (mm)	Akma Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Çekme Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Kopma boyu ve % Uzama	Kopma kesiti ve % Kesit Daralması	Sertlik Hv _{0,5} (500 gr)	Ort. Sertlik	Çekme Kırılma Mesafesi, (mm)
A1 DD1100-Esas Malzeme ÇEKME NUMUNELERİ- KAŞIK L ₀ =50 mm	A1-4 2 mm/dak	W=19,55 T=1,45 L ₀ =50 A ₀ =28,3475	W=19,936 T=1,483 L ₀ =50 A ₀ =29,565	ΔL _e =0,5245	P _A =7387,7 N σ _A =250,73	P _Ç =10230,86 N σ _Ç =360,908 MPa σ _Ç =346,046 MPa	L _S =66,30 hesaplanan %32,6	W _S =12,48 T _S =1,19 A _S =14,8512	148 166 157 Ort=157	157	---
	A1-3 2 mm/dak	W=19,70 T=1,43 L ₀ =50 A ₀ =28,171	W=19,84 T=1,487 L ₀ =50 A ₀ =29,502	ΔL _e =0,4228	P _A =7342,2 N σ _A =248,87	P _Ç =10242,93 N σ _Ç =363,598 MPa σ _Ç =347,194 MPa	L _S =67,90 hesaplanan %35,80	W _S =12,31 T _S =1,10 A _S =13,541	157 165 159 Ort=160		---
	A1-5 2 mm/dak	W=19,80 T=1,50 L ₀ =50 A ₀ =29,700	W=19,903 T=1,486 L ₀ =50 A ₀ =29,575	ΔL _e =0,4318	P _A =6497,77 N σ _A =219,70	P _Ç =9926,72 N σ _Ç =334,232 MPa σ _Ç =335,645 MPa	L _S =69,05 hesaplanan %38,10	W _S =11,67 T _S =0,95 A _S =11,0865	154 146 164 Ort=155		---
A2 DD1300-Esas Malzeme ÇEKME NUMUNELERİ- KAŞIK L ₀ =50 mm	A2-3 2 mm/dak	W=19,70 T=1,47 L ₀ =50 A ₀ =28,959	W=19,863 T=1,482 L ₀ =50 A ₀ =29,436	ΔL _e =0,4858	P _A =7371,79 N σ _A =250,43	P _Ç =10306,41 N σ _Ç =355,896 MPa σ _Ç =350,129 MPa	L _S =66,27 hesaplanan %32,54	W _S =13,45 T _S =1,14 A _S =15,333	154 151 170 171 154 Ort=160	164	---
	A2-5 2 mm/dak	W=19,80 T=1,46 L ₀ =50 A ₀ =28,908	W=19,84 T=1,473 L ₀ =50 A ₀ =29,224	ΔL _e =0,4874	P _A =7482,19 N σ _A =256,03	P _Ç =10343,59 N σ _Ç =357,810 MPa σ _Ç =353,942 MPa	L _S =64,68 hesaplanan %29,36	W _S =13,43 T _S =1,18 A _S =15,8474	161 160 158 Ort=160		---
	A2-4 2 mm/dak	W=19,78 T=1,49 L ₀ =50 A ₀ =29,4722	W=19,863 T=1,481 L ₀ =50 A ₀ =29,4171	ΔL _e =0,5253	P _A =7622,88 N σ _A =259,13	P _Ç =10346,64 N σ _Ç =351,064 MPa σ _Ç =351,721 MPa	L _S =64,71 hesaplanan %29,42	W _S =11,96 T _S =1,05 A _S =12,558	180 172 178 Ort=177		---

Tablo 2.6 (Devam)

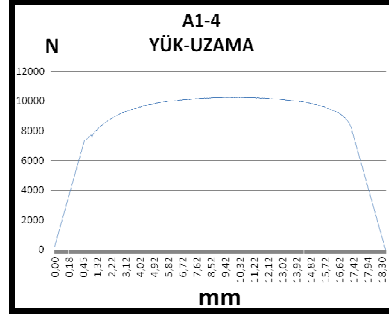
Malzeme Kodu, Adı ve Açıklaması	Test Numunesi Kodu	Test Numunesi Boyutları (Minimum)	Test Numunesi Boyutları (Ortalama)	Elastik Uzama (mm)	Akma Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Çekme Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Kopma boyu ve % Uzama	Kopma kesiti ve % Kesit Daralması	Sertlik Hv0,5 (500 gr)	Ort. Sertlik	Çekme Kırılma Mesafesi, (mm)
A3 T6-6 mm lik sac- Esas Malzeme ÇEKME NUMUNELERİ- KAŞIK L ₀ =80 mm	A3-3 3 mm/dak	W=20,05 T=5,96 L ₀ =80 A ₀ =119,498	W=20,09 T=6,012 L ₀ =80 A ₀ =120,781	$\Delta L_e=2,67$	P _A =29778,43 N $\sigma_A=246,54$	P _Ç =44198,43 N $\sigma_Ç=369,867$ MPa $\sigma_Ç=365,938$ MPa	L _S =108,69 hesaplanan %35,86	W _S =12,95 T _S =3,63 A _S =47,0085	<u>A3-1</u> 203 191 187 Ort=194	183	---
	A3-4 3 mm/dak	W=20,07 T=5,92 L ₀ =80 A ₀ =118,8144	W=20,094 T=5,988 L ₀ =80 A ₀ =120,322	$\Delta L_e=2,82$	P _A =32021,54 N $\sigma_A=266,13$	P _Ç =44701,99 N $\sigma_Ç=376,233$ MPa $\sigma_Ç=371,519$ MPa	L _S =105,7 hesaplanan %32,125	W _S =12,84 T _S =3,81 A _S =48,9204	<u>A3-2</u> 176 173 166 Ort=172		--
	A3-5 3 mm/dak	W=19,95 T=5,94 L ₀ =80 A ₀ =118,503	W=20,14 T=6,039 L ₀ =80 A ₀ =121,625	$\Delta L_e=2,54$	P _A =30671,10 N $\sigma_A=252,17$	P _Ç =43603,32 N $\sigma_Ç=367,951$ MPa $\sigma_Ç=358,506$ MPa	L _S =110,4 hesaplanan %38	W _S =12,74 T _S =3,45 A _S =43,953	-- -- --	---	
A4 NPL80-8 mm lik köşebent Esas Malzeme ÇEKME NUMUNELERİ- KAŞIK L ₀ =100	A4-3 3 mm/dak		W=25,353 T=8,137 L ₀ =100 A ₀ =206,297	$\Delta L_e=3,31$	P _A =62944,42 N $\sigma_A=305,11$	P _Ç =94187,75 N $\sigma_Ç=456,563$ MPa	L _S =130,09 hesaplanan %30,09	W _S =17,48 T _S =5,16 A _S =90,1968	<u>A4-1</u> 239 238 279 Ort=252	231	---
	A4-4 3 mm/dak		W=25,321 T=8,159 L ₀ =100 A ₀ =206,594	$\Delta L_e=2,88$	P _A =62166,20 N $\sigma_A=300,91$	P _Ç =94988,86 N $\sigma_Ç=459,785$ MPa	L _S =130,41 hesaplanan %30,41	W _S =17,71 T _S =5,18 A _S =91,7378	<u>A4-2</u> 223 195 210 Ort=209		---
	A4-5 2 mm/dak		W=25,043 T=8,023 L ₀ =100 A ₀ =200,919	$\Delta L_e=2,12$	P _A =60541,09 N $\sigma_A=301,32$	P _Ç =91532,64 N $\sigma_Ç=455,569$ MPa	L _S =131,23 hesaplanan %31,23	W _S =17,45 T _S =5,01 A _S =87,4245	-- -- --	---	

Tablo 2.6: (Devam)

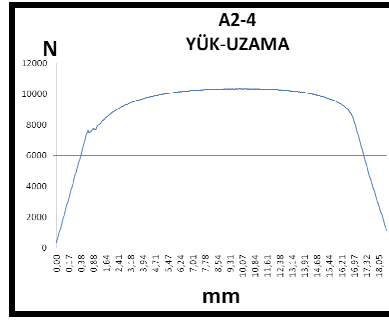
Malzeme Kodu, Adı ve Açıklaması	Test Numunesi Kodu	Test Numunesi Boyutları (Minimum)	Test Numunesi Boyutları (Ortalama)	Elastik Uzama (mm)	Akma Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Çekme Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Kopma boyu ve % Uzama	Kopma kesiti ve % Kesit Daralması	Sertlik Hv0,5 (500 gr)	Ort. Sertlik	Çekme Kırılma Mesafesi, (mm)
K1 Kaynak dikiş boyu numunesi-1 L ₀ =40, ÇEKME NUMUNESİ-SİLİNDİRİK (t=20 mm' lik katılaşmış ergiyikten alınma)	K1 3 mm/dak	d ₀ =8 d ₀ =7,65	A ₀ =50,265 A ₀ =45,963	ΔL _e =3,93	P _A =17870,31 σ _A =388,79	P _Ç =24393,75 N σ _Ç =485,302 MPa σ _Ç =530,725 MPa	L _S =53,48 hesaplanan %33,70	d ₁ =5,18 hesaplanan %54,150	223, 221 209, 221 216 Ort=218	233	--
K2 Kaynak dikiş boyu numunesi-2 L ₀ =40, ÇEKME NUMUNESİ-SİLİNDİRİK (t=20 mm' lik katılaşmış ergiyikten alınma)	K2 3 mm/dak	d ₀ =8 d ₀ =7,76	A ₀ =50,265 A ₀ =47,295	ΔL _e =3,68	P _A =18001,56 σ _A =380,62	P _Ç =24393,75 N σ _Ç =485,302 MPa σ _Ç =515,778 MPa	L _S =52,72 hesaplanan %31,80	d _K =5,20 hesaplanan %55,096	236, 219, 241, 241 245 Ort=236		---
K3 Kaynak dikiş boyu numunesi-3 L ₀ =40, ÇEKME NUMUNESİ-SİLİNDİRİK (t=20 mm' lik katılaşmış ergiyikten alınma)	K3 3 mm/dak	d ₀ =8 d ₀ =7,67	A ₀ =50,265 A ₀ =46,204	ΔL _e =3,69	P _A =17945,31 σ _A =388,39	P _Ç =23750,00 N σ _Ç =472,495 MPa σ _Ç =514,024 MPa	L _S =53,88 hesaplanan %34,70	d _K =4,25 hesaplanan %69,29	236, 234 254, 266 238 Ort=246		---

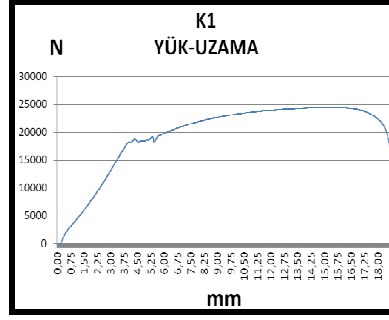
Tablo 2.6: (Devam)

Malzeme Kodu, Adı ve Açıklaması	Test Numunesi Kodu	Test Numunesi Boyutları (Minimum)	Test Numunesi Boyutları (Ortalama)	Elastik Uzama (mm)	Akma Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Çekme Yüğü ve Dayanımı (MPa)	Kopma boyu ve % Uzama	Kopma kesiti ve % Kesit Daralması	Sertlik Hv0,5 (500 gr)	Ort. Sertlik	Çekme Kırılma Mesafesi, (mm)
N9 DD1100-DD1100 kaynaklı şart ÇEKME NUMUNELERİ- KAŞIK L ₀ =50 mm	N9-K1 2 mm/dak	W=19,70 T=1,40 L ₀ =50 A ₀ =27,580	W=19,77 T=1,337 L ₀ =50 A ₀ =26,432	ΔL _c 0,64	P _A =8147,39 σ _A =308,24	P _Ç =9258,92 N σ _Ç =335,7 MPa σ _Ç =350,2 MPa	L _S =52,1	W _S =15,31 T _S =1,01 A _S =15,4631	--		5,65
	N9-K2 2 mm/dak	W=19,75 T=1,50 L ₀ =50 A ₀ =29,625	W=19,73 T=1,43 L ₀ =50 A ₀ =28,2139	ΔL _c 0,56	P _A =8053,51 σ _A =285,44	P _Ç =9911,48 N σ _Ç =334,5 MPa σ _Ç =351,3 MPa	L _S =59,89 hesaplanan %9,89	W _S =14,21 T _S =1,09 A _S =15,4889	--		---
	N9-K3 2 mm/dak	W=19,75 T=1,40 L ₀ =50 A ₀ =27,650	W=19,74 T=1,39 L ₀ =50 A ₀ =27,4386	ΔL _c 0,61	P _A =8437,00 σ _A =307,48	P _Ç =9907,67 N σ _Ç =358,3 MPa σ _Ç =361,1 MPa	L _S =58,99 hesaplanan %8,99	W _S =13,93 T _S =1,02 A _S =14,2086	--		---
N10 DD1300-DD1300 kaynaklı şart ÇEKME NUMUNELERİ- KAŞIK L ₀ =50 mm	N10-K1 2 mm/dak	W=19,70 T=1,40 L ₀ =50 A ₀ =27,580	W=19,76 T=1,38 L ₀ =50 A ₀ =27,2688	ΔL _c 0,70	P _A =8692,47 σ _A =318,77	P _Ç =10047,46 N σ _Ç =364,3 MPa σ _Ç =368,4 MPa	L _S =62,43 hesaplanan %24,86	W _S =14,48 T _S =1,02 A _S =14,7696	--		8,58
	N10-K2 2 mm/dak	W=19,75 T=1,45 L ₀ =50 A ₀ =28,6375	W=19,76 T=1,35 L ₀ =50 A ₀ =26,676	ΔL _c 0,69	P _A =8796,63 σ _A =329,76	P _Ç =10012,57 N σ _Ç =349,6 MPa σ _Ç =375,3 MPa	L _S =59,73 hesaplanan %19,46	W _S =15,13 T _S =1,06 A _S =16,0378	--		---
	N10-K3 2 mm/dak	W=19,72 T=1,43 L ₀ =50 A ₀ =28,1996	W=19,74 T=1,34 L ₀ =50 A ₀ =26,4516	ΔL _c 0,68	P _A =8981,83 σ _A =339,55	P _Ç =9715,40 N σ _Ç =344,5 MPa σ _Ç =367,2 MPa	L _S =59,56 hesaplanan %19,12	W _S =14,58 T _S =0,90 A _S =13,122	--		---



Şekil 2.16: A1 numune tipinin 4 nolu numunesine ait yük-uzama grafiği.

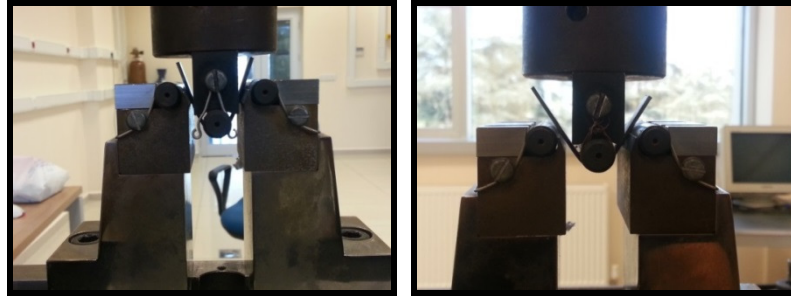




Şekil 2.20: K1 numunesine ait yük-uzama grafiği.

2.5.2 Eğme (Katlama) Deneyleri

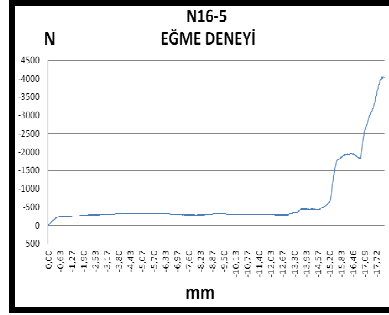
N15 ve N16 kaynaklı numunelerin 5 adetlik partisine TS EN ISO 5173 standardına [16] göre eğme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuç grafiklerinden 2 adet örnek aşağıda verilmektedir. Kaynak dikiş dipleri çeki gerilmesine maruz bırakılmayacak şekilde mandrel üzerine 180° katlama deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kaynak dikişlerinde ve/veya ısı tesiri altında kalan bölgelerde herhangi bir hasarın, çatlak oluşmadığı gözlemlenmiştir. Aşağıda test anına ait resimler Şekil 2.21 (a) ve (b) olarak verilmiştir. Örnek yük eğilme grafikleri N15 ve N16 numunesi için Şekil 2.22 ve 2.23' e verilmiştir. Tüm eğme numuneleri için eğme-yük testlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.7' de özetlenmiştir.



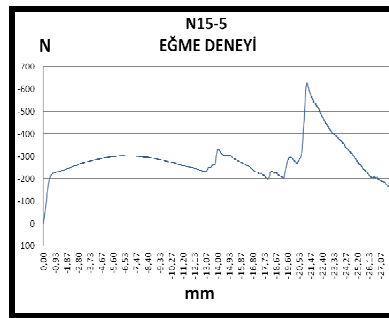
(a)

(b)

Şekil 2.21: Mandrel üzerine eğme (katlama) deneyi



Şekil 2.22: N16-5 numunesine ait yük-eğilme grafiği



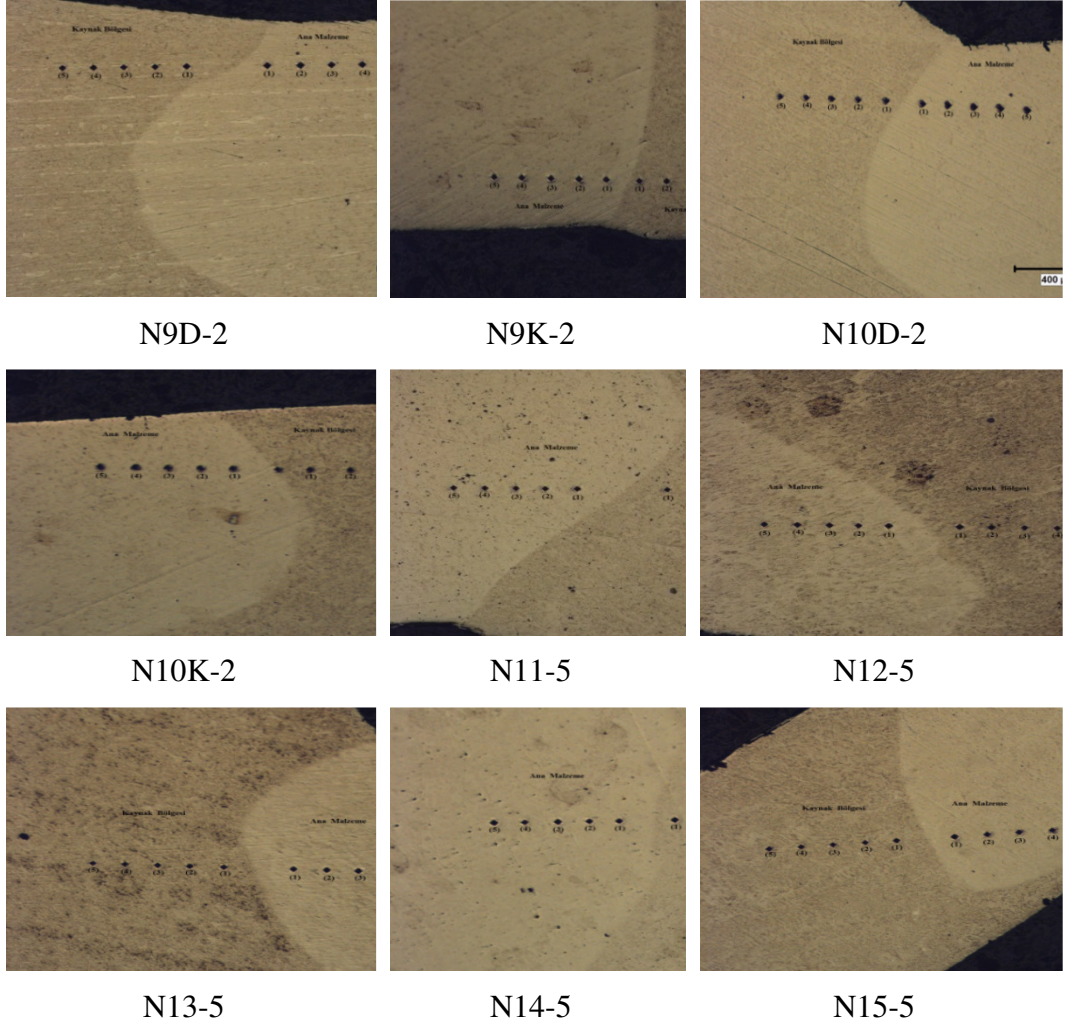
Şekil 2.23: N15-5 numunesine ait yük-eğilme grafiği.

Tablo 2.7: Eğme testinden elde edilen mekanik parametreler.

Malzeme Kodu, Adı ve Açıklaması	Test Numunesi Kodu	Test Numunesi Boyutları (Minimum)	Maks. Yük (N)	Elastik Eğilme (mm)	Elastik Eğilme Yükü (N)
N15 (DD1100-DD1100) kaynaklı Eğme numuneleri	N15-1	--	1202,0	0,53	209,20
	N15-2	--	816,3	0,50	190,83
	N15-3	--	1178,5	0,43	178,43
	N15-4	--	668,2	0,73	22,20
	N15-5	--	626,6	0,57	211,76
N16 (DD1300-DD1300) Kaynaklı eğme numuneleri	N16-1	--	641,3	--	--
	N16-2	--	631,8	--	--
	N16-3	--	385,2	--	--
	N16-4	L=10 W=1,47 S=14,70	1377,5	0,63	220,07
	N16-5	L=10 W=1,506 S=15,06	4064,8	0,47	217,82

2.5.3 Sertlik Ölçümleri

Kaynaklı bölgelerden kaynak doğrultusuna dik yönde çıkarılan numuneler üzerinden alınan mikro-sertlik tarama ölçüm izleri Şekil 2.24’ de, sonuçları ise Tablo 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.24: Kaynaklı bölgelerde kaynak boyunca yapılan sertlik taramaları.

Tablo 2.8: Kaynaklı birleşim bölgeleri mikro-sertlik ölçüm sonuçları (HV_{0,1}).

N9_K2 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
185,4	187	187	188	183	182	221	194	208	224	215	212,4
N10K-2 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
199,8	201	192	197	201	208	237	240	254	250	254	247
N9D-2 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
173,8	171	173	185	168	172	193	213	223	199	210	207,6
N10D-2 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
180	171	179	168	195	187	208	233	224	243	238	229,2
N11-5 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
215,2	214	227	227	210	198	235	250	237	254	240	243,2
N12-5 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
199	202	201	210	203	179	195	220	240	238	247	228
N13-5 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
199	210	192	194	198	201	232	233	237	249	245	239,2
N14-5 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
187,4	168	204	174	197	194	193	218	221	206	207	209
N15-5 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
208,4	237	220	211	198	176	206	242	242	229	232	230,2
N16-2 kodlu kaynaklı numune üzerinden ölçülen sertlik değerleri(HV_{0,1})											
←←←←←Esas Metal Bölgesi						Kaynak Bölgesi→→→→→					
Ortalama	5.ölçüm	4.ölçüm	3.ölçüm	2.ölçüm	1.ölçüm	1.ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	4.ölçüm	5.ölçüm	Ortalama
199,8	207	201	198	192	201	233	211	238	245	227	230,8

Sertlik ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde genel olarak kaynak bölgesi (kaynak havuzu) sertlik değerlerinin esas metal sertlik değerlerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kaynak bölgeleri(kaynak havuzları) sertlik taramalarında en yüksek sertlik değerleri 254 $H_{V0,1}$ olarak N10K-2 ve N11-5 kodlu kaynaklı numunelerde, en düşük sertlik değerleri ise 193 $H_{V0,1}$ olarak N14-5 kodlu numunede ölçülmüştür.

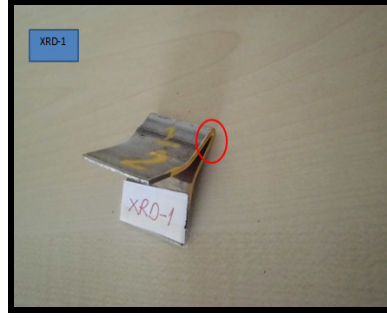
2.5.4 Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Transformatör kazanından kesilerek çıkartılan toplamda 4 farklı kaynak geometrisindeki bölgeler için TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Malzeme Enstitüsünde; PANalytical X'Pert Pro MPD model XRD cihazı ile Cu X-Işını tüpü ($\lambda=1.5405$ Angstrom) kullanılarak yapılan analiz sonucunda kaynaklı numunelerden elde edilen kalıntı gerilme değerleri Tablo 2.9'da verilmiştir. Öncelikle XRD testleri için kazanlarda kalıntı gerilme analizi yapılacak bağlantı tipleri için numune oluşturma çalışması gerçekleştirildi. Prototip olarak üretilen 2000 kVA ve 2500 kVA kazanlardan tüm kaynaklı bağlantı tipleri temsil edecek 20 cm uzunluğunda numuneler kesme taş yardımı ile çıkarıldı.

Daha sonra hedeflenen kaynak yüzeylerine ulaşabilmek için hassas tel erozyon kesim tezgâhında ısı girişi olmaksızın sürekli soğutma altına ölçüm yapılacak kaynaklı birleştirme kesiti elde edildi. Aşağıdaki resimlerde numunelerin hassas kesim işlemi sonrası halleri Şekil 2.25' de toplu olarak Şekil 2.26 ve 2.30 arasında tekil olarak verilmiştir.



Şekil 2.25: XRD numuneleri toplu halde gösterimi.



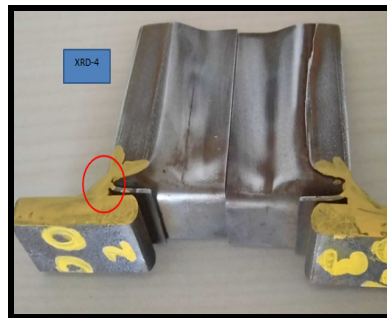
Şekil 2.26: XRD-1 numunesi kalıntı gerilmesi ölçme bölgesi.



Şekil 2.27: XRD-2 numunesi kalıntı gerilmesi ölçme bölgesi.



Şekil 2.28: XRD-3 numunesi kalıntı gerilmesi ölçme bölgesi.



Şekil 2.29: XRD-4 numunelerinde ölçüm hedeflenen bölgelerin gösterimi.

Kalıntı gerilme ölçümleri kaynaklı bölgelerden alınan numunelerde kaynak merkezlerinde ve noktasal olarak gerçekleştirilmiştir. Deney cihazına set edilen elastisite modülleri için aşağıdaki iki alternatif kullanılmıştır:

i- Her bağlantı tipi için TABLO-05’de verilen kaynak dolgusuna (K1, K2,K3) ait Young Modülü değerlerinin ortalaması (ORT: 218 GPa)

ii- her bir bağlantı tipindeki en küçük Young Modülü değeri hangisi ise o değer alınarak XRD deneylerinde kullanılması sağlandı. Alınan sonuçlar Tablo 2.9’ da gösterilmektedir.

Tablo 2.9: Kaynaklı birleşim merkezlerinden ölçülen kalıntı gerilme değerleri.

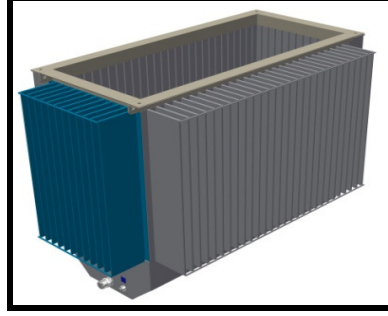
Numune Kodu	Açıklama	Elastisite Modülü, E (GPa)	Poisson Oranı, μ	Kalıntı Gerilmesi, (MPa)
XRD1	A1-A1 kaynağı (DD1100-DD1100)-(2000-9)	218	0,30	-122,3±39,3
		210	0,30	-117,8±37,9
XRD2	A2-A2 kaynağı (DD1300-DD1300)-(2500-5)	218	0,30	-331,7±29,7
		208,3	0,30	-316,9±28,4
XRD3	A2-A3 kaynağı (DD1300-T6)-(2500-5)	218	0,30	-112,4±16,8
		205	0,30	-105,7±15,8
XRD4	A1-A4 kaynağı (DD1100-NPL80)-(2000-3)	218	0,30	-329,1±22,7
		206,3	0,30	-311,4±21,5

Kazanlardan ısı tesiri altında kalınmadan kesim yoluyla ve farklı bölgelerden alınan numunelerin kaynak merkezlerinden yapılan noktasal XRD analizleri neticesinde; kaynak merkezlerinde en büyüğü 331,7±29,7 MPa ve en küçüğü 105,7±15,8 MPa’lık bası yönünde kalıntı gerilmelerinin varlığı tespit edilmiştir. Kalıntı gerilme ölçümlerinden kritik olduğu değerlendirilen bağlantı tiplerinde kaynak merkezlerinde bası yönde kalıntı gerilmelerin olduğu saptanmıştır.

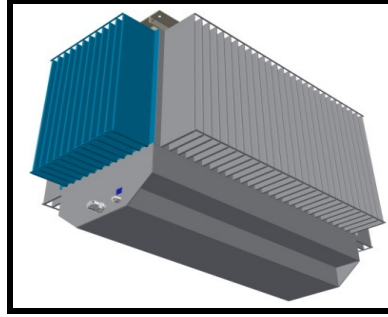
2.5.5 Kaynak Makroskobik Muayeneler

Kaynaklı bağlantı tip numunelerini oluşturmak için, tez kapsamında 2000 kVA ve 2500 kVA olmak üzere 2 adet transformatör kazanı yapıldı. Kazanlar rutin imalatlarda nasıl yapılıyorsa aynı şekilde yapılmış, herhangi bir özel veya kontrollü imalat koşulu uygulanmamıştır. Amacımız kazanların üzerinden kaynaklı birleşim numuneleri almaktır. Özellikle yorulma yükleri altında performans sıkıntısı olduğu tecrübe edilen bölgelerden ve tüm kaynaklı bağlantıları temsil eden bölgelerden ısı girişi olmadan yapılan kesme işlemleri ile numuneler oluşturuldu. Numunelerin

çıkarıldığı 2000 ve 2500 kVA gücündeki iki kazanın 3 boyutlu modelleri Şekil 2.30 ve Şekil 2.31 'de verilmiştir.



Şekil 2.30: 2000 kVA transformatör kazanı modeli.



Şekil 2.31: 2500 kVA transformatör kazanı modeli.



Şekil 2.32: Kendisinden kaynaklı birleşim tiplerine ait Makro İnceleme Numuneleri çıkarılan prototip 2000 kVA transformatör kazanı.

Prototip kazanlar üzerinden çıkarılan birleşin numunelerinin listesi aşağıdadır:

2000 kVA Prototip kazandan elde edilen numuneler:

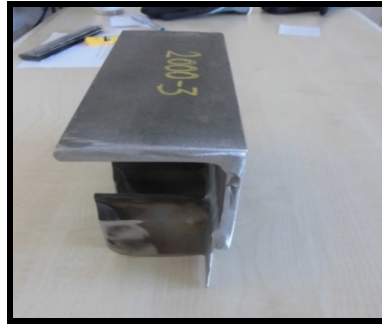
- 1- (2000-1) : (A4+A1+A1) Köşe Birleşimi
- 2- (2000-2) : (A4+A1+ A1) Köşe Birleşimi
- 3- (2000-3) : (A4+A1) Bindirmeli Köşe Kaynağı (XRD-4)
- 4- (2000-4) : (A4+A1) Bindirmeli Köşe Kaynağı
- 5- (2000-5) : (A3+A1) Bindirmeli Köşe Kaynağı

- 6- (2000-6) : (A3+A1) Bindirmeli Köşe Kaynağı
- 7- (2000-7) : (A3+ A1+A1) Köşe Birleşimi
- 8- (2000-8) : (A3+ A1+A1) Köşe Birleşimi
- 9- (2000-9) : (A1+A1) Köşe Birleşimi (XRD-2)
- 10- (2000-10): (A1+A1) Köşe Birleşimi

2500 kVA Prototip kazandan elde edilen numuneler:

- 11- (2500-1) : (A4+A2+A2) Köşe Birleşimi
- 12- (2500-2) : (A4+A2+ A2) Köşe Birleşimi
- 13- (2500-3) : (A4+A2) Bindirmeli Köşe Kaynağı
- 14- (2500-4) : (A4+A2) Bindirmeli Köşe Kaynağı
- 15- (2500-5): (A3+A2) Bindirmeli Köşe Kaynağı (XRD-3)
- 16- (2500-6) : (A3+A2) Bindirmeli Köşe Kaynağı
- 17- (2500-7) : (A3+ A2+A2) Köşe Birleşimi
- 18- (2500-8): (A3+ A2+A2) Köşe Birleşimi
- 19- (2500-9) : (A2+A2) Köşe Birleşimi (XRD-1 NUMUNESİDİR)
- 20- (2500-10) : (A2+A2) Köşe Birleşimi

Yukarıdaki numunelerden bazılarının fotoğrafları aşağıda verilmiştir:



Şekil 2.33.a: (2000-3) (A4+A1) Köşe kaynağı



Şekil 2.33.b: (A3+A1) Bindirmeli köşe kaynağı.



Şekil 2.33.c: (A3+A1+A1) Köşe birleşimi



Şekil 2.33.d: (A4+A1+A1) Köşe birleşimi.

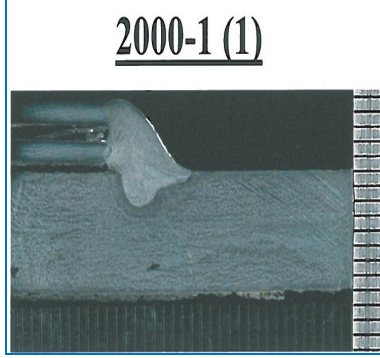


Şekil 2.33.e: (A1-A1) Köşe kaynağı birleşimi.

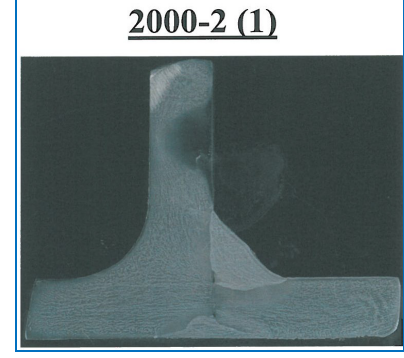


Şekil 2.33.f: (A2-A2) Kaynak birleşimi.

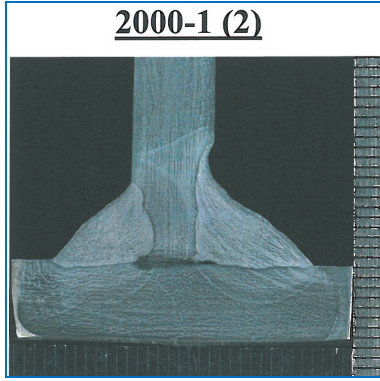
Ortaya çıkan kaynak makro raporundaki en önemli bulgular aşağıda Şekil 2.34’ de verilmiştir. Kaynak birleşimleri % 5’lik nital ile dağlanmış. Muayeneler ve değerlendirmeler uzmanları tarafından ilgili standartlara göre yapılmıştır [17,18].



(a) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetizlik gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



(ç) TS EN ISO 6520-1’e göre süreksizlikler mevcut. 401: Ergime Noksanlığı.



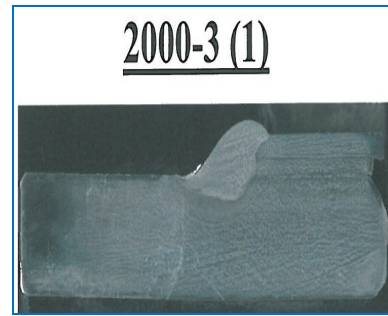
(c) TS EN ISO 6520-1 ‘e göre süreksizlikler mevcut. 401:Ergime Noksanlığı, 501: Yanma Oluğu.



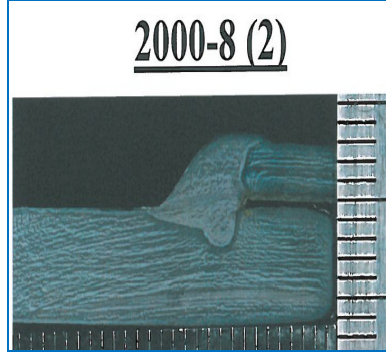
(d) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetizlik gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



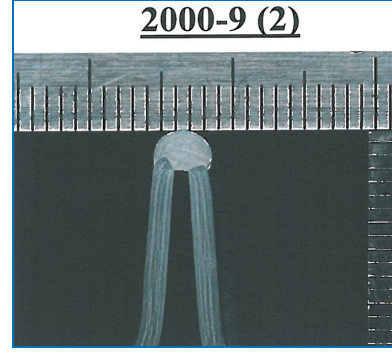
(b) 2000-3(2) : Kaynak bölgesi homojendir.



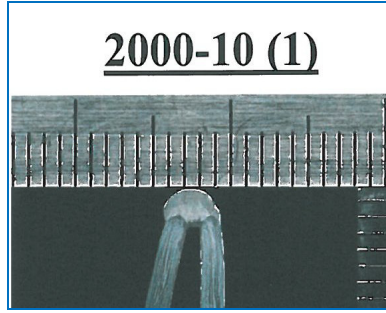
(f) 2000-3(1) : Kaynak bölgesi homojendir.



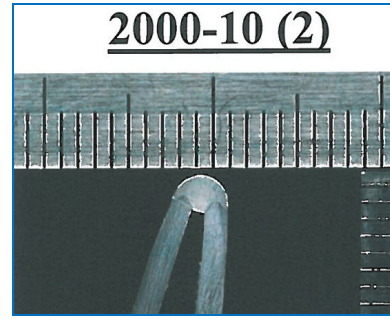
(ğ) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



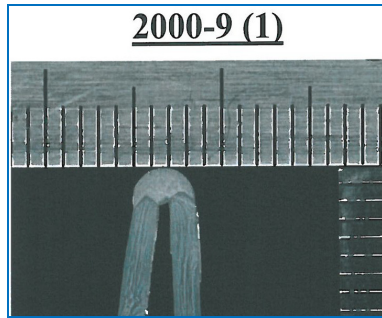
(h) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



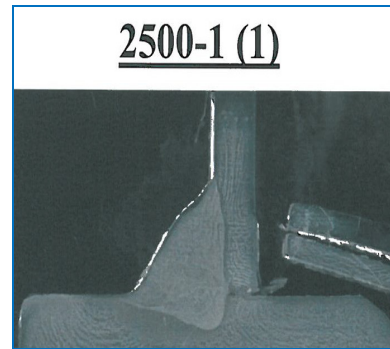
(e) 2000-10(1): Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik yok. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir



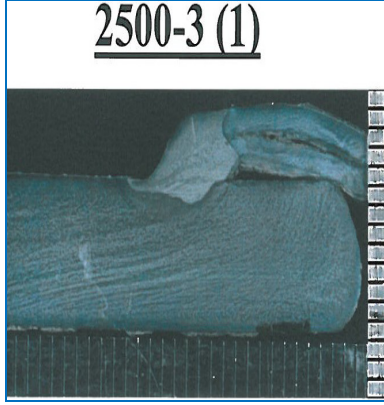
(ı) 2000-10 (2) : Kaynak bölgesi homojendir.



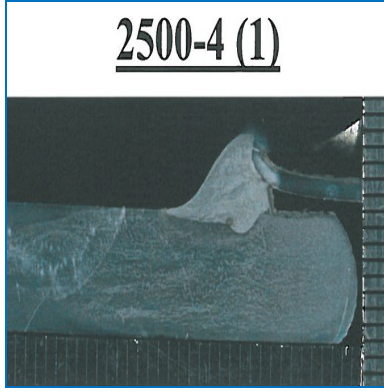
(g) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi.



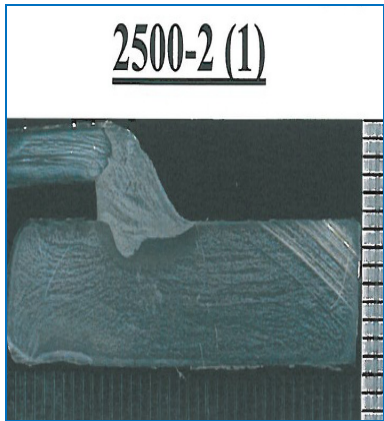
(j) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime yok.



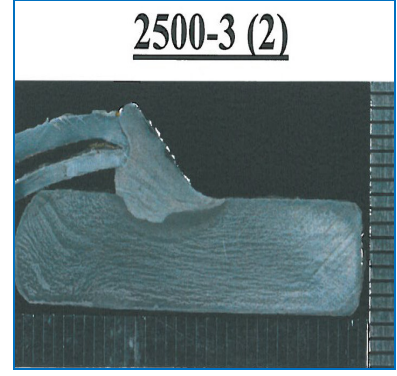
(l) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime yok.



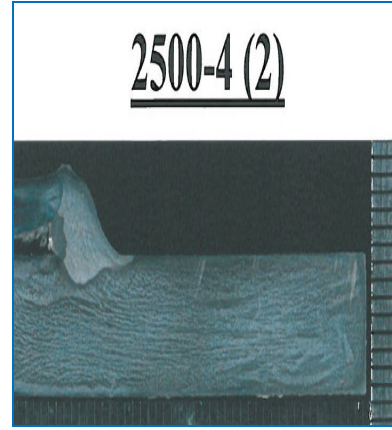
(i) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime yok.



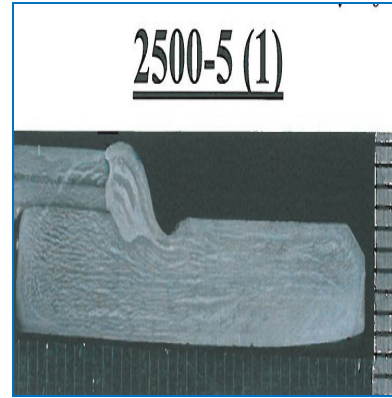
(k) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi.



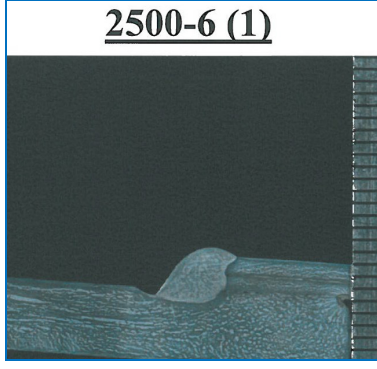
(m) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi.



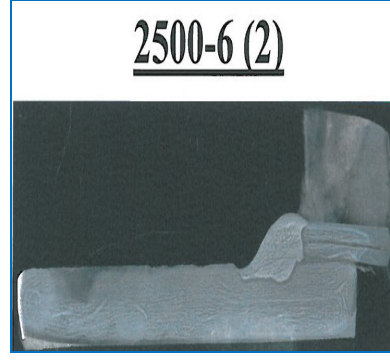
(n) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime yok. Kaynak bölgesi homojendir.



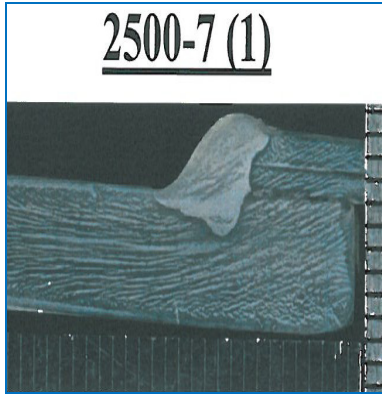
(ö) TS EN ISO 6520-1'e göre süreksizlikler mevcut. 501: Yanma Oluğu



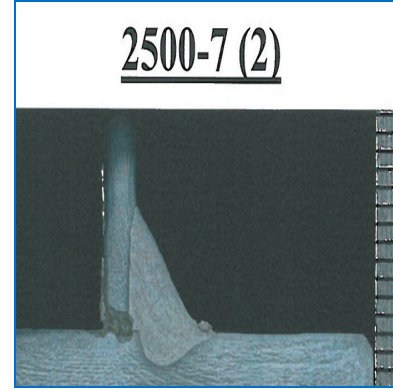
(r) TS EN ISO 6520-1'e göre yanma oluğu hatası.



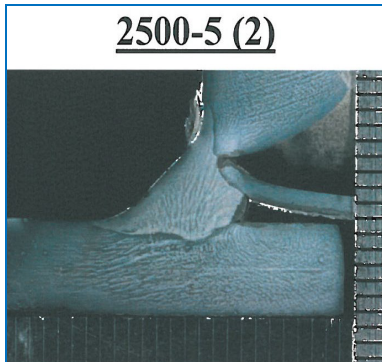
(s) TS EN ISO 6520-1'e göre belirsizlikler, yanma oluğu



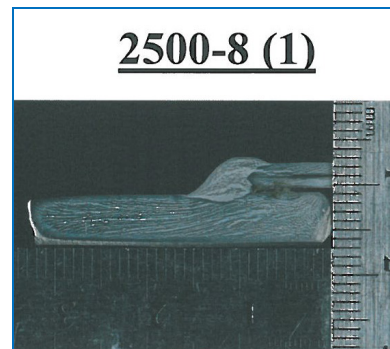
(o) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik yok. Kaynak bölgesi homojendir.



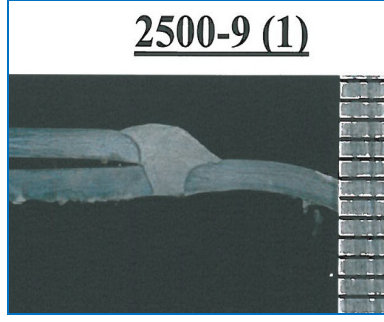
(ş) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



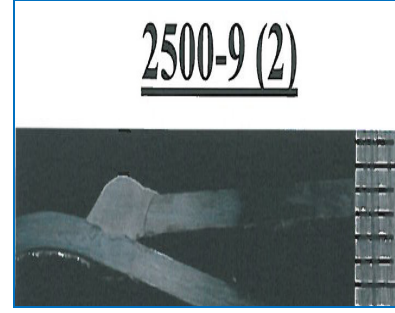
(p) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



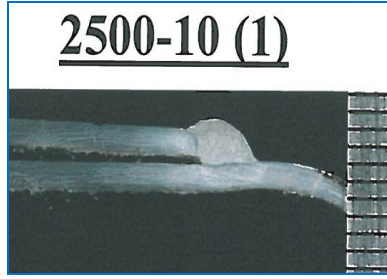
(u) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir



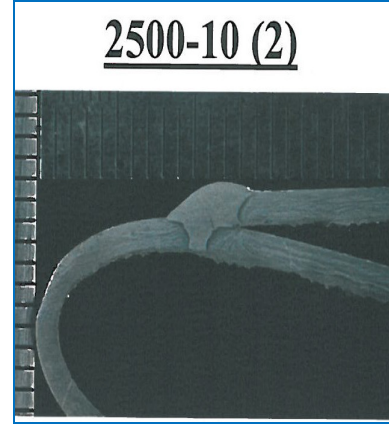
(v) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



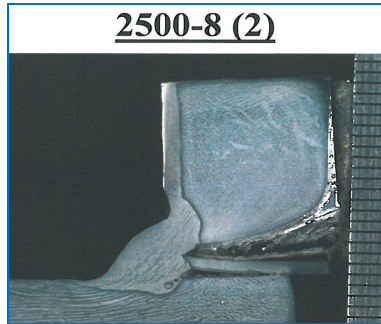
(y) TS EN ISO 6520-1'e göre süreksizlikler mevcut. 401: Ergime Noksanlığı



(t) TS EN ISO 6520-1'e göre süreksizlikler, 401: Ergime Noksanlığı



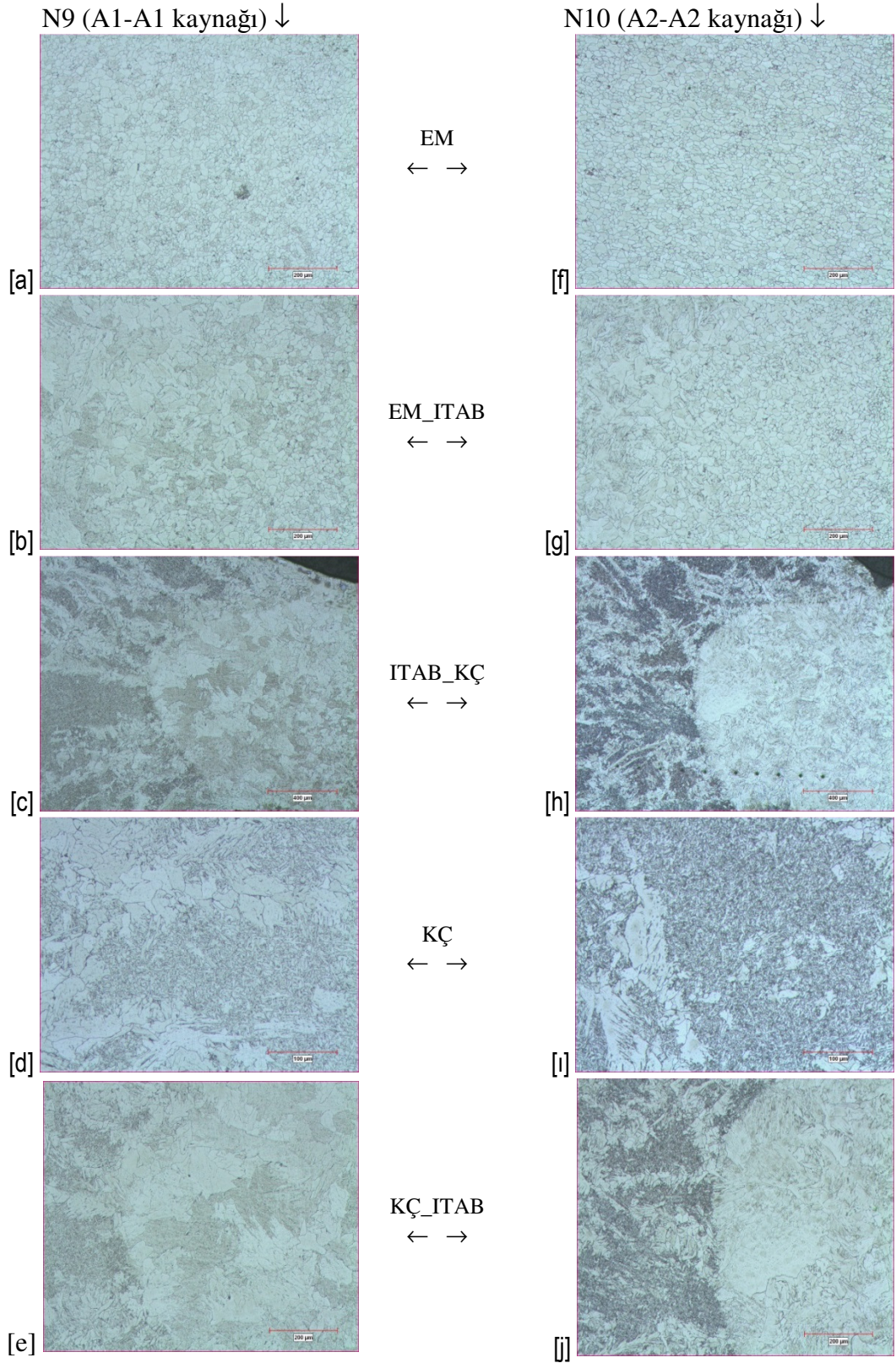
(z) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime ve nüfuziyetesizlik gözlenmedi. Kaynak bölgesi metalürjik olarak homojendir.



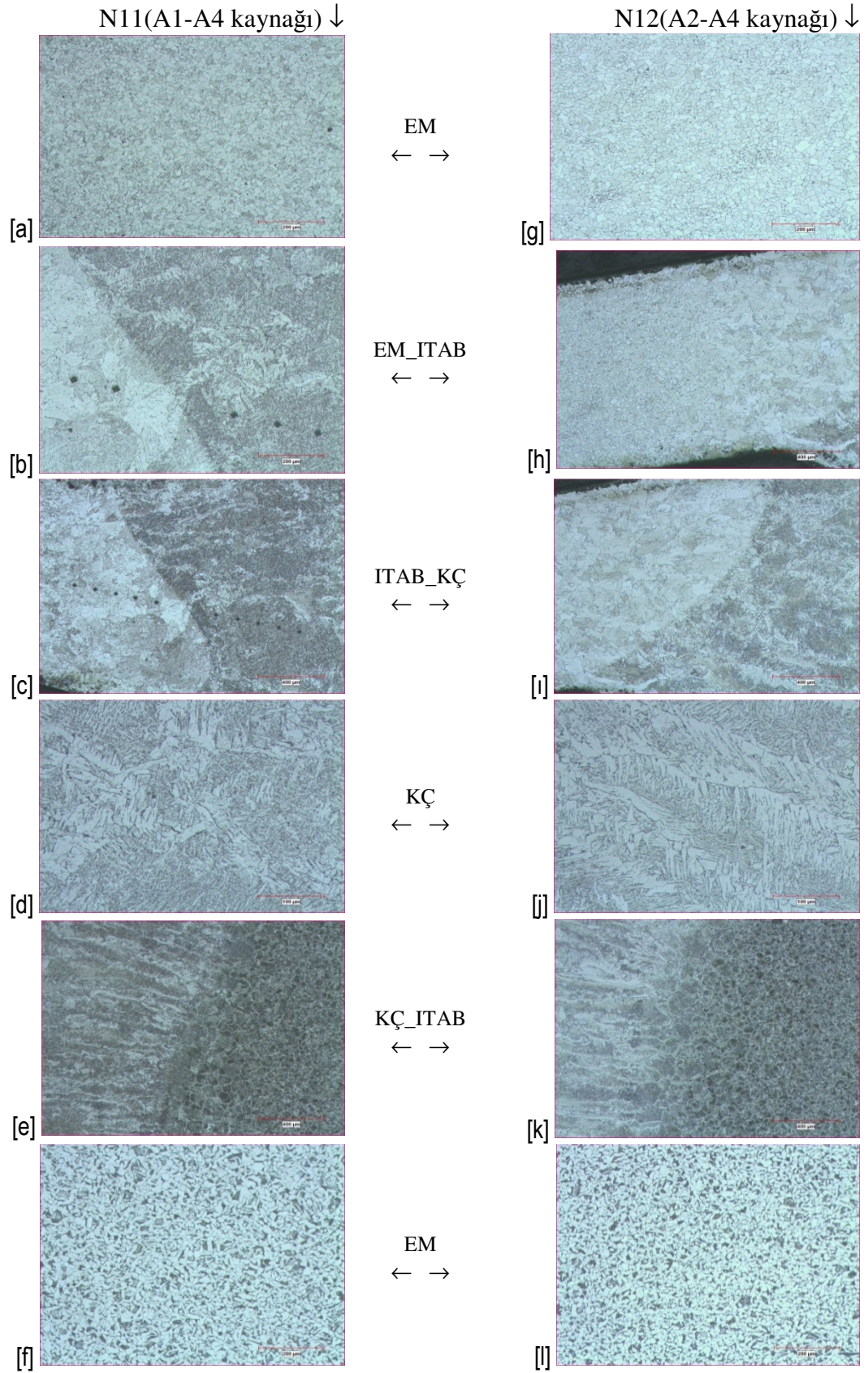
(ü) Kaynak bölgesinde yetersiz ergime gözlenmedi. Kaynak bölgesi homojendir.

Şekil 2.34 [a-z]: Çeşitli kaynaklı bağlantı tiplerinin Mikroskobik inceleme sonuçları

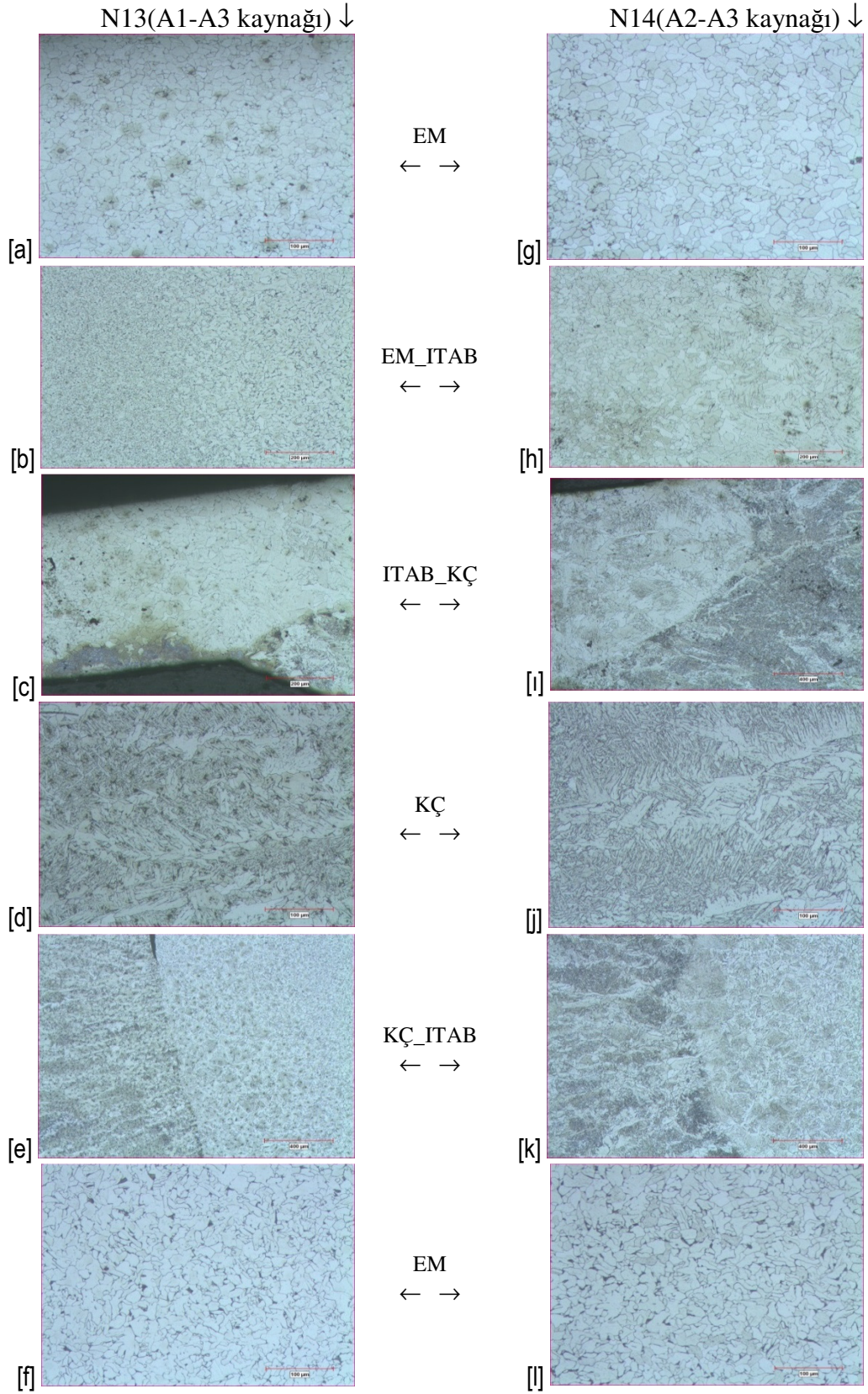
2.5.6 Kaynaklı Bölgesi Mikro Yapı İncelemeleri



Şekil 2.35 [a-j]: N9 ve N10 kaynaklı birleşim bölgesi Mikro-yapı taraması.



Şekil 2.36[a-l]: N11 ve N12 kaynaklı birleşim bölgesi Mikro-yapı taraması.

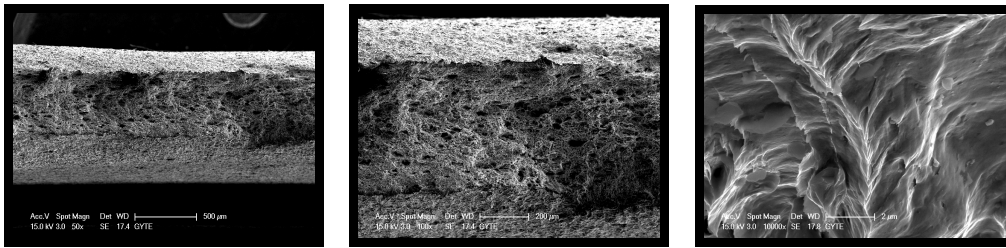


Şekil 2.37[a-l]: N13 ve N14 kaynaklı birleşim bölgesi Mikro-yapı taraması.

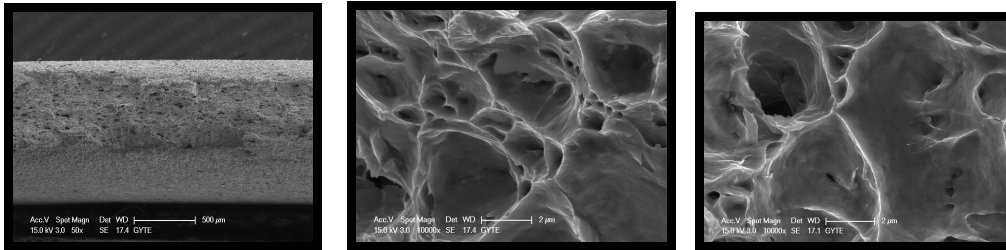
Kaynaklı birleştirmelere ait elde edilen mikro yapı resimleri Şekil 2.35 [a-j], Şekil 2.36 [a-l] ve Şekil 2.37 [a-l] 'de gösterilmiştir. Mikro yapılar incelendiğinde görülen, esas metal malzemelerden; A1 (DD1100) ve A2 (DD1300) malzemenin hemen hemen tam ferritik faz yapısına ve üniform tane dağılımına sahip olduğu görülmüştür. A3(T6) malzemenin ferritik/çok az perlitik faz yapısına ve üniform tane dağılımına, A4(NPL80) malzemenin ferritik/az perlitik faz yapısına ve üniform tane dağılımına sahip olduğu söylenebilir. Esas metal-ısı tesiri altındaki bölge (EM-ITAB) geçişlerinde tane boyutlarında büyümelerin olduğu görülebilmektedir.

2.5.7 Kırılma yüzeylerinin SEM incelenmesi

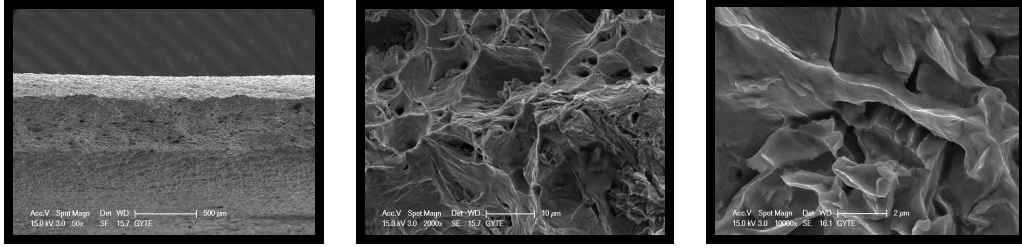
Ana malzemelerin çekme / kopma yüzeylerinden yapılan SEM incelemelere ait örnek fotoğraflar aşağıda verilmiştir. Kırılma yüzeyleri (A tarafı ve B tarafı olarak) 2 yönlü resimlenmiştir. Kırılma morfolojileri açısından değerlendirildiğinde gerek esas metallerin kırılma yüzeylerinde gerekse kaynaklı yüzeylerin kırılma yüzeylerinde sünek ve sünek-gevrek geçişlerin olduğu gözlenebilmektedir. Düşük karbon oranlı malzeme olmaları kırılma modunu sünek tipte gerçekleşmesine olanak vermiştir.



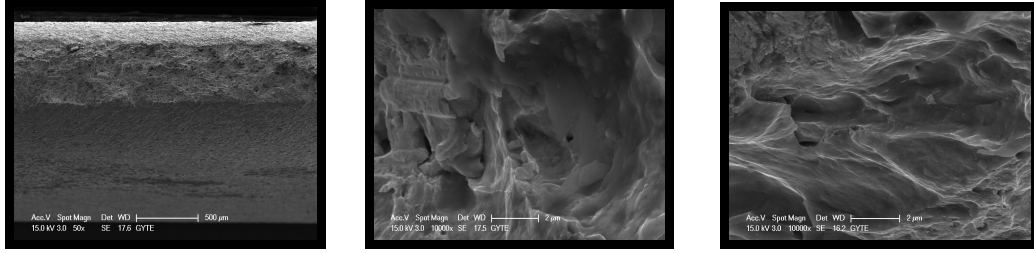
Şekil 2.38: (A1-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 100X, 10000X).



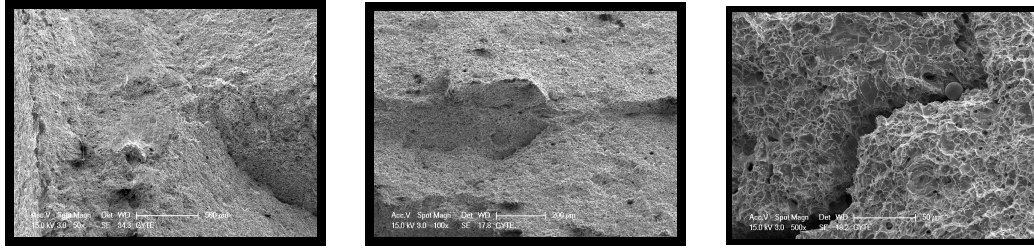
Şekil 2.39: (A1-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 1000X, 10000X).



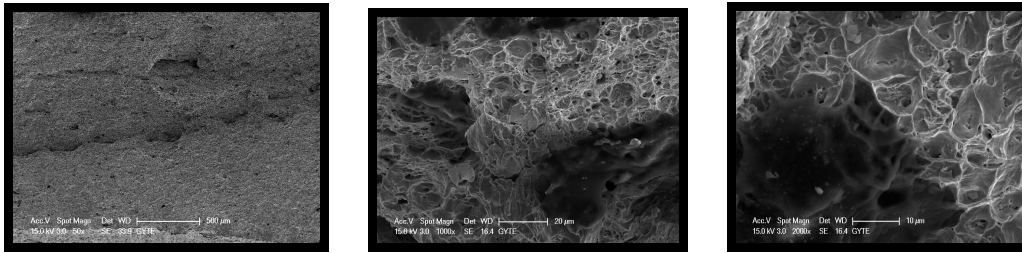
Şekil 2.40: (A2-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 2000X, 10000X).



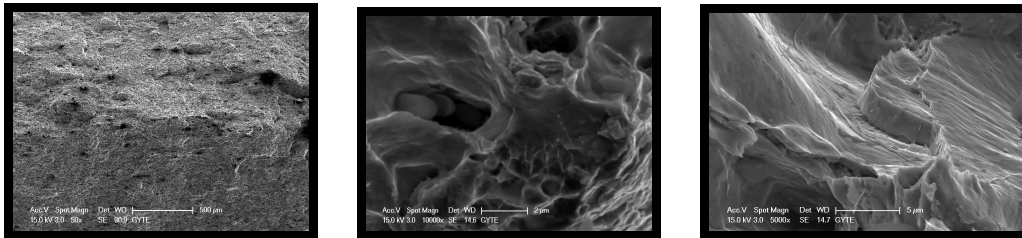
Şekil 2.41: (A2-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 1000X, 10000X).



Şekil 2.42: (A3-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 1000X, 10000X).



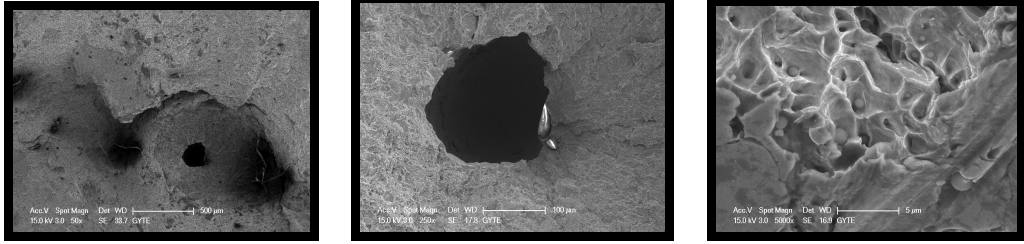
Şekil 2.43: (A3-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 1000X, 2000X).



Şekil 2.44: (A4-5) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 1000X, 5000X).



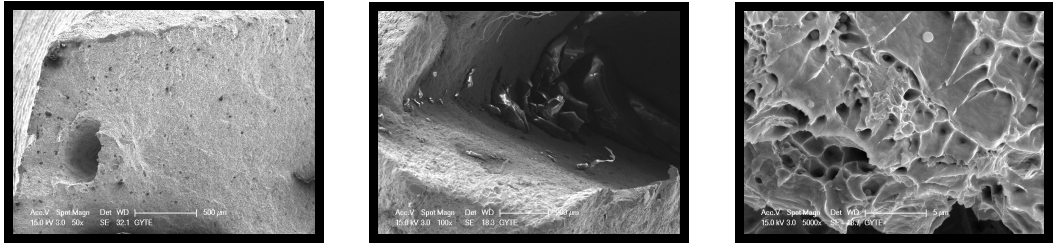
Şekil 2.45: (A4-5) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 5000X, 10000X).



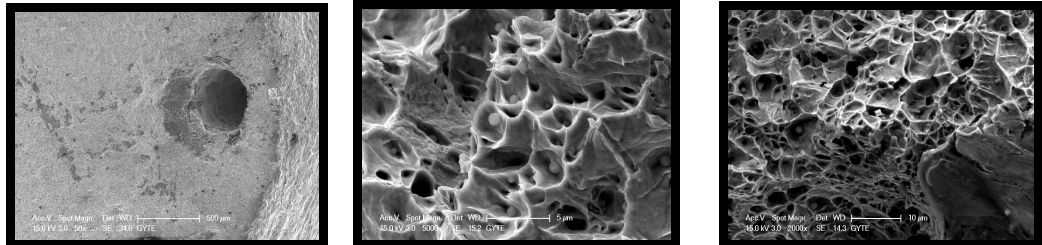
Şekil 2.46: K1 numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 250X, 5000X).



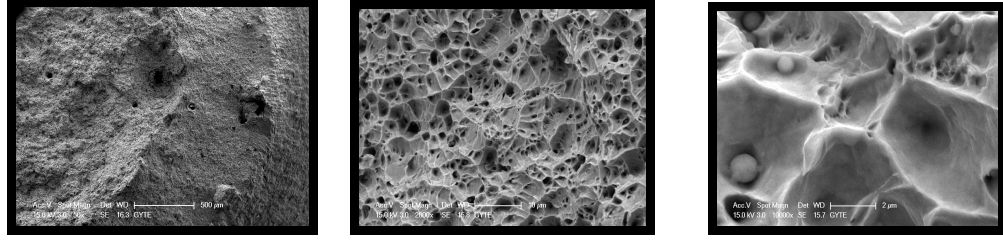
Şekil 2.47: K1 numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 100X, 2000X).



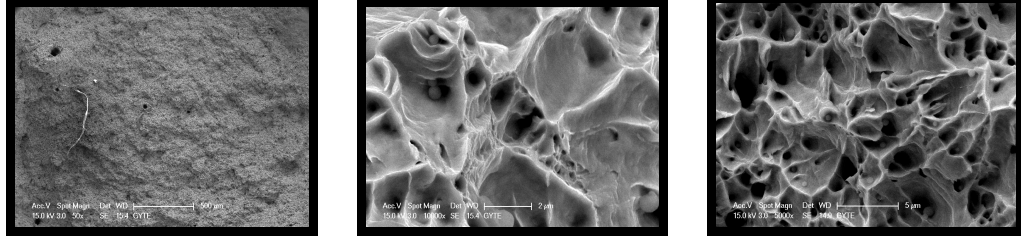
Şekil 2.48: K2 numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 100X, 5000X).



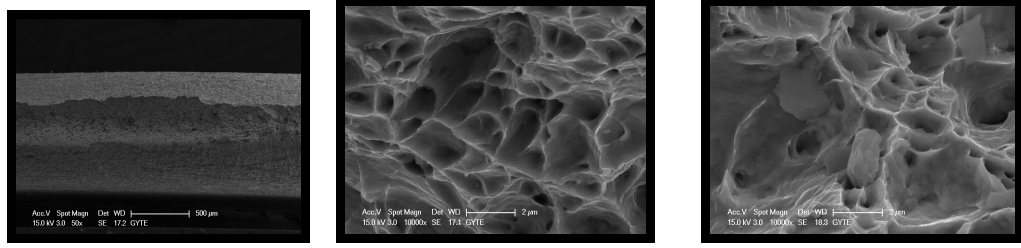
Şekil 2.49: K2 numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 5000X, 2000X).



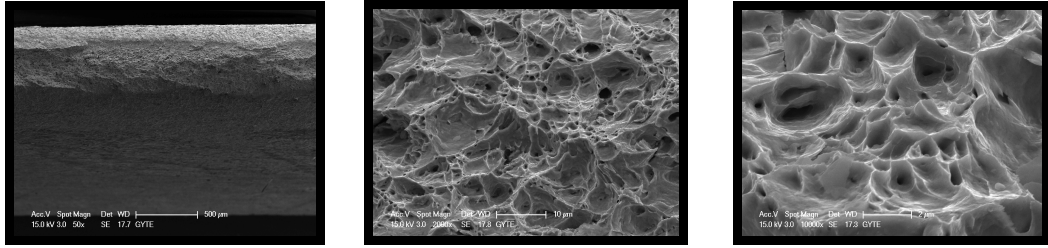
Şekil 2.50: K3 numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 2000X, 10000X).



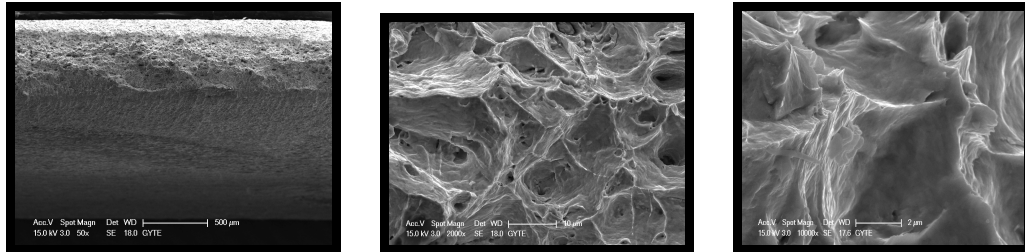
Şekil 2.51: K3 numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 100X, 5000X).



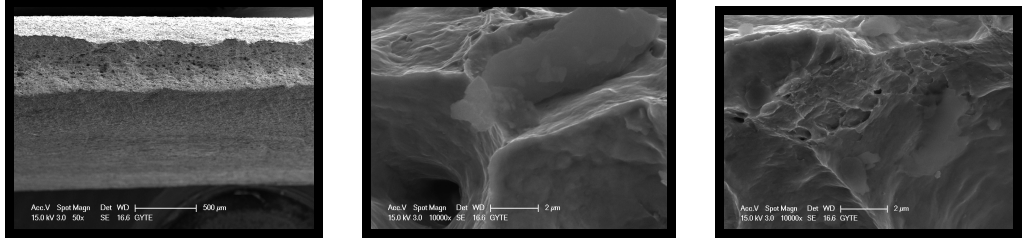
Şekil 2.52: (N9K-3) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 10000X, 10000X).



Şekil 2.53: (N9K-3) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 2000X, 10000X).



Şekil 2.54: (N10K-3) numunesi (A) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 2000X, 10000X).



Şekil 2.55: (N10K-3) numunesi (B) tarafı kırılma yüzeyleri (50X, 10000X, 10000X).

2.5.8 Spektrometrik Analizler

Projede kullanılan ana malzeme tiplerine Gebze İleri teknoloji Enstitüsü 'nde (GYTE) yapılan **Spektrometrik Analiz** sonuçları aşağıdaki Tablo 2.10' da verilmiştir. Ölçümler her bir malzeme için yapılan 3 yakma sonucunun ortalaması şeklindedir. Spektrometrik Analiz sonuçlarının genelde katalog ve sertifika değerleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kazan imalatlarında kullanılan ana malzemeler ve kaynak ilave metaline ait katalog ve sertifika değerleri Tablo 2.11' da gösterilmektedir.

Tablo 2.10: GYTE 'de yapılan esas metal Spektrometrik Analiz sonuçları.

NUMUNE	NUMUNE TANIMI	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %
M1 (ORT)	A1 (DD1100)	0,0307	0,0062	0,1697	0,0070	0,0072	0,0460	0,0329
M2 (ORT)	A2 (DD1300)	0,0360	0,0110	0,1633	0,0076	0,0070	0,0380	0,0320
M3 (ORT)	A3 (T6)	0,0893	0,0110	0,1633	0,0076	0,0070	0,0380	0,0320
M4(ORT)	A4 (NPL80)	0,1840	0,4977	0,5500	0,0067	0,0120	0,0029	0,2800

Tablo 2.11: Transformatör imalatlarında kullandığımız malzemelerin tedarikçilerden aldığımız sertifika ve katalog değerleri.

NUMUNE	TA RİH	TEST YERİ	NUMUNE TANIMI	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %
DIN EN 10130-2006 DC01 (Erdemir 6112) CCR Sürekli tavlama yapılmış rulo sertifika değerleri (Rapor no: 2006368Y)	19.01.12	ERDEMİR	DD1500 (A1, A2)	0,030	0,001	0,185	0,007	0,011	0,046	
Soğuk haddelenmiş yassı çelik rulo DIN EN 10130:2006 DC01(Erdemir 6112) Katalog değerleri	01.01.12	ERDEMİR	Rulo sac (A1, A2)	max. 0,12		0,600	0,045	0,045		
DIN EN 10025-P2-2004 S235JR (Erdemir 3237) TRKK Temperlenmiş, kenarları kesilmiş rulo sertifika değerleri (Rapor no:1081799Y)	05.09.11	ERDEMİR	Levha sac T6 (A3)	0,092	0,172	0,683	0,021	0,016	0,059	0,084
Sıcak haddelenmiş alaşımsız yapı çeliği DIN EN 10025-2 (St37-2) (S235JR) (Erdemir 3237) Katalog değeri	01.01.12	ERDEMİR	Levha sac T6 (A3)	max. 0,17		1,400	0,035	0,035		0,550
S235 JR Hadde ürünü köşebent sertifika değerleri	23.05.12	KOCAER	NPL80 (A4)	0,170	0,210	0,680	0,016	0,024		0,260
Kaynak teli sertifika değerleri	07.06.12	ASKAYNAK	Kaynak teli (K1, K2, K3)	0,650	0,890	1,550	0,005	0,006	0,002	0,080
Sıcak haddelenmiş alaşımsız yapı çeliği DIN EN 10025-2 (St37-2) (S235JR) (Erdemir 3237) Katalog değeri	01.01.13	GEKA	Kaynak teli (K1, K2, K3)	0,080	0,850	1,450				

3. KAYNAKLI BAĞLANTI TİPLERİNİN SİMULASYONLARI

Transformatör kazanı imalatı esnasında, ana yapıyı oluşturan A1, A2, A3, A4 (dalga duvarlar, köşebent çerçeve, alt tekne sacı) gibi ana metal segmentlerinin kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra ortaya çıkan (K1, K2, K3) dönüşmüş fazlarda ve HAZ çevresinde oluşan etkileşim ve kalıcı iç gerilmeler Dai H. tarafından şematize edilmeye çalışılmıştır. [19] Bu görece karmaşık etkileşim şemasında da belirtilen kaynak sonrası kalıcı iç gerilmeler, işletmedeki trafoda sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan iç basınç değişimleri (ve bunun doğal sonucu olarak ortaya çıkan yorulma yükleri ve deplasmanları) ile birleşerek, kaynaklı bağlantı düğüm noktalarında yorulma çatlak başlangıcına neden olmaktadır. Bu çatlak başlangıcı kısa sürede trafonun servis ömrünü sonlandırmaktadır. Dean D. tarafından yapılan çalışmada ise belirli bir düşük karbonlu çelik tipi için katı hal faz dönüşümünü de hesaba katarak kaynak sonrası oluşan kalıcı gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin etmeye çalışan bir yaklaşım geliştirmiştir [20]. Tez danışmanının bir çalışmasında, tır şasesi gibi yüksek gerilmeler altında çalışan araç ekipmanlarının kritik kaynaklı bağlantılarında kaynak sonrası kalıcı gerilmelerin etkisini anlamaya çalışan termal ve yapısal 3 boyutlu FEM analizleri gerçekleştirilmiştir [21].

Tezin bu aşamasında ANSYS programının sayesinde, kaynak bölgelerine kaynak işlem sıcaklığı uygulanarak ısıl analiz (TRANSIENT THERMAL ANALYSIS) yapılacaktır. Bu sayede kaynak işleminin birleşme hatlarında bıraktığı kalıcı gerilmelerin yorulmaya etkisi değerlendirilecektir. Yorulma konusunu kaynak kalıcı gerilmelerini dikkate almadan incelemek doğru sonuç vermeyecektir. Kalıntı gerilmelerin ampirik olarak ölçüldüğü (2.5.4) nolu bölümde, kaynak çekirdeği civarında basınç yönünde kalıntı gerilmelerinin varlığı tespit edilmişti. (Bakınız. Tablo 2.9) Bu sonuçlar simülasyonlarla da teyit edilmeye çalışılacaktır.

İleriki aşamada komple trafo kazanı üzerinde simülasyon çalışmaya başlamadan önce, temel ve en riskli değerlendirilen kaynaklı bağlantı tipleri için ergitme notasına kadar ısıtılmış çelikler için kabul edilebilecek kaynak ısı girdisi ve malzeme

sınır koşullarında (akma mukavemeti ve elastisite) **TRANSIENT THERMAL** ve **YAPISAL ANALİZ** simülasyonu uygulanacaktır. Bu sayede ANSYS' de kaynak işleminin simülasyon imkânı da sorgulanmış olacaktır. Bu kapsamda XRD testleri için kullanılan kaynaklı birleştirme / bağlantı tip numuneleri için;

i- Analizin birinci aşamasında, zamana bağlı geçişli analiz uygulandı. Kaynak bölgesine, kaynak ilave metaline temsil eden katı bir yapı ilave edildi. Bu katı boyunca kaynak sıcaklığı uygulanarak ısının parça üzerinde dağılması hesaplandı. Devamında da geçişli analizin özelliği gereği soğuyana kadar beklendi. Bu aşamanın sonucunda parça üzerindeki düğüm noktalarında kaynak sonrası gerilmelere sebep olacak iç gerilmeler tespit edildi.

ii- Analizin ikinci **YAPISAL ANALİZ** aşamasında ise, bu gerilmeler düğüm noktalarına dış yük olarak uygulandı ve sınır şartlarına bağlı olarak parçada çarpılma (distorsion) ve iç gerilmeler oluşturuldu. Parçadaki iç enerjinin çarpılmaya mı yoksa iç gerilmelere mi sebep olacağı sınır şartlarına (fix) göre değişir. Bu sebeple sınır şartlarının en gerçekçi şekilde belirlenmesi çok önemlidir.

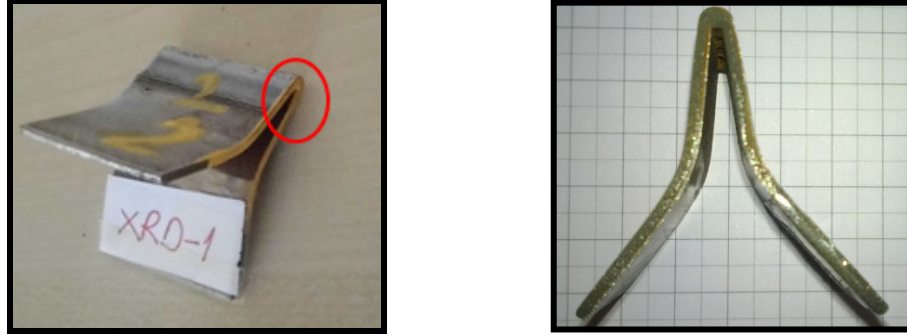
Tez aşamasında yapılan öncül analizlerde trafo kazanından kesilen parçaların kesildiği hat boyunca kazana bağlı (fix) olduğunu varsayarak bu bölgelere sınır koşulları tanımlaması yapıldı. Kaynak bölgelerine ergime koşullarını sağlayacak asgari ısı flux girişi uygulandı.

3.1 Öncül Analizler

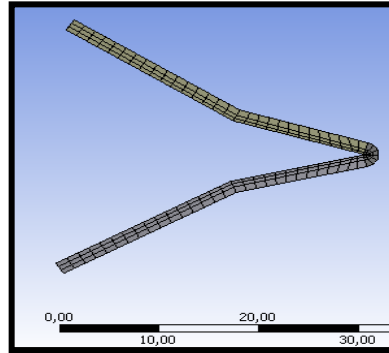
Öncül analizlerde kazan gövdesinde belirlenen lokal bölgelerde kaynak etkisi ile oluşan gerilmeleri görmek amacıyla **Zamana Bağlı Termal Analiz** ve termal analiz sonuçları kullanılarak **Zamana Bağlı Yapısal Analizler** gerçekleştirilmiştir. Isı girişi değeri olarak kaynak nüfuziyetinin gerçekleştiği bölgelerde sıcaklık değerinin 1500⁰C 'lik ergime bölgesi üzerine çıktığı öngörüldü. Bu ısı yüklemesi koşulundaki kriterimiz dış enerji değerinin şiddetini, beklediğimiz nüfuziyet bölgesindeki sıcaklık değerini ergime sıcaklığına çıkarma büyüklüğü olmuştur. Daha sonra soğumaya bırakılan parçada **Düğüm Noktaları'** nın arasındaki iç enerjilerin hesaplanması

sağlanmıştır. Program otomatik olarak bu enerjilerin doğurduğu artık gerilmeleri yön ve şiddetleri ile hesaplamıştır. Aşağıda örneklerde XRD-1, XRD-2, XRD-3ve XRD-4 kaynaklı bağlantı tipleri için simülasyonlar sunulmuştur.

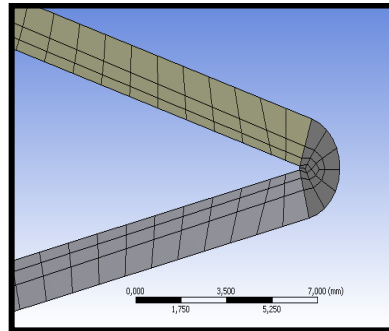
3.1.1 (XRD-1) (A1-A1) (DD1100-DD1100) Bağlantısı Simülasyonları



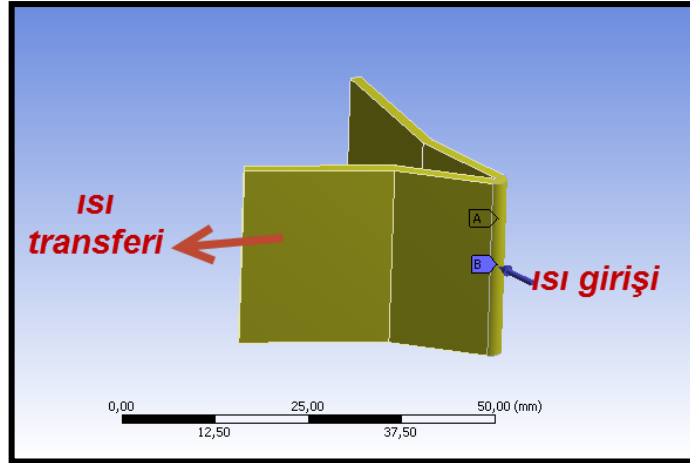
Şekil 3.1: (A1-A1) (DD1100-DD1100) (XRD-1) Kaynaklı birleşimine ait numune geometrisi.



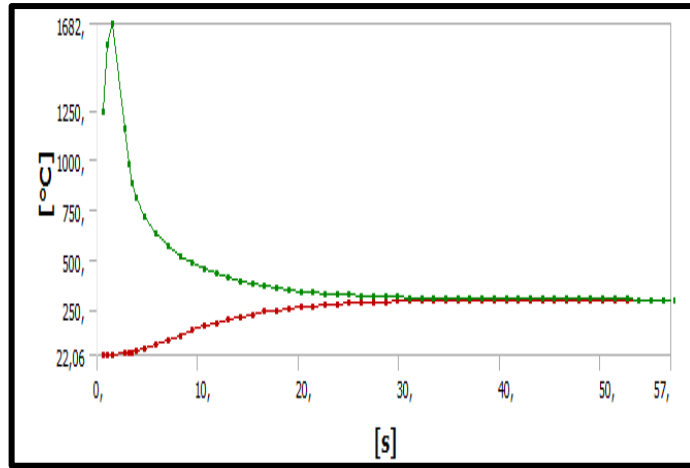
Şekil 3.2: (XRD-1) Numunesi MESH detayı: Düğüm sayısı= 22119
Eleman sayısı=4268.



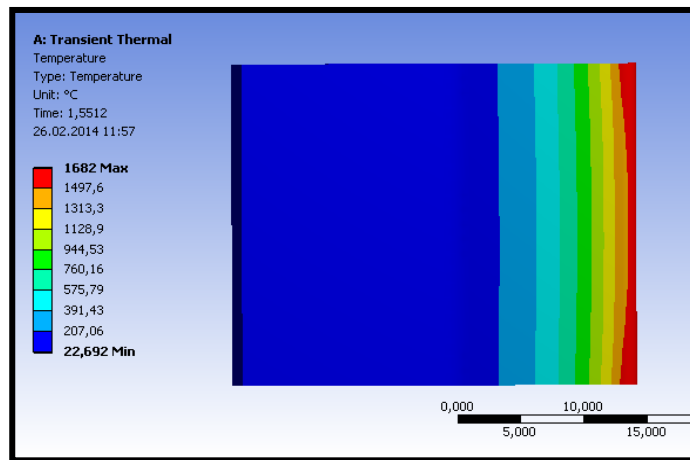
Şekil 3.3: (XRD-1) Numunesi MESH detayı: İlave katı modelin gösterimi.



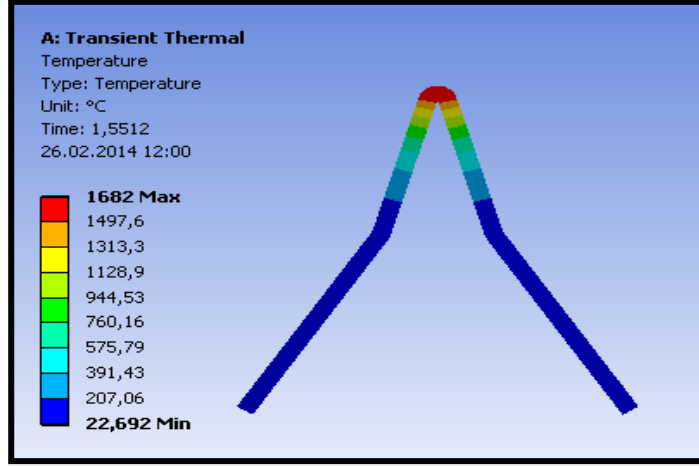
şekil 3.4: (XRD-1) Numunesini termal analiz sınır koşullarının gösterimi.



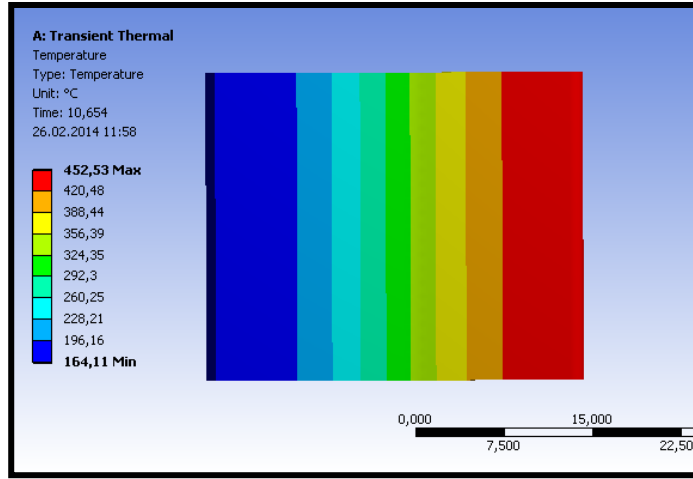
şekil 3.5: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi.



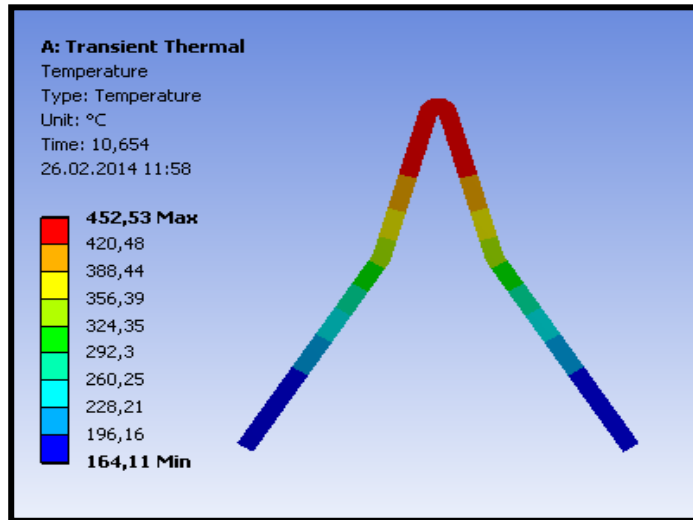
şekil 3.6: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi. yan görünüm, kaynak anı (1,55 sn).



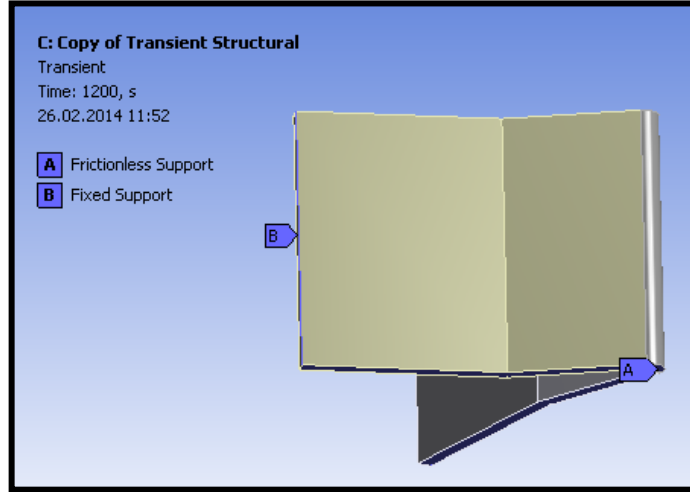
Şekil 3.7: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, üst görünüm, kaynak anı (1,55 sn.).



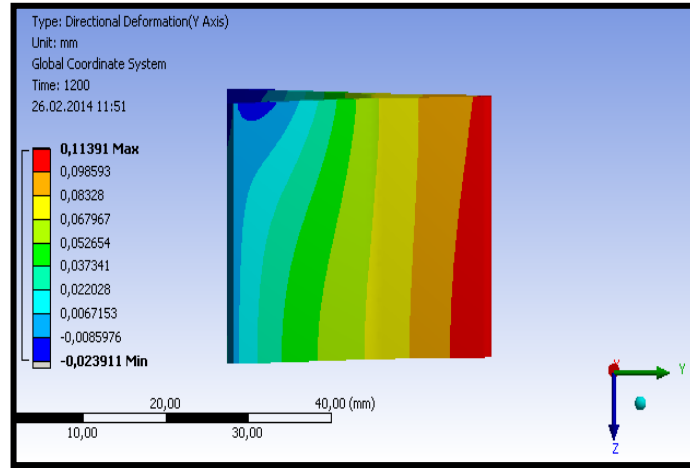
Şekil 3.8: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yan görünüm, (10.65 sn. sonrası).



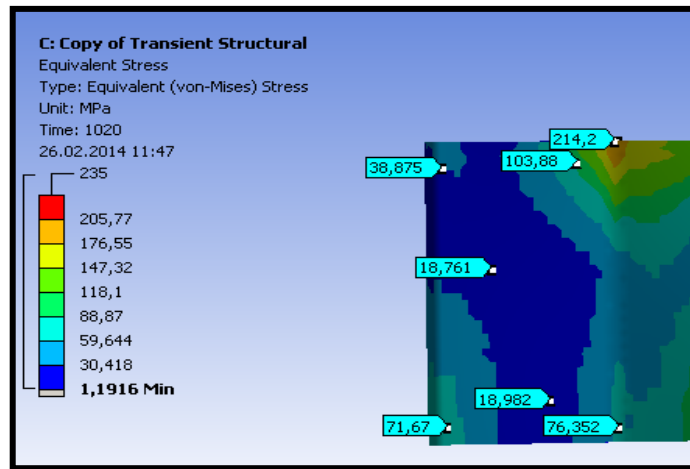
Şekil 3.9: (XRD-1) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, üst görünüm, (10.65 sn. sonrası).



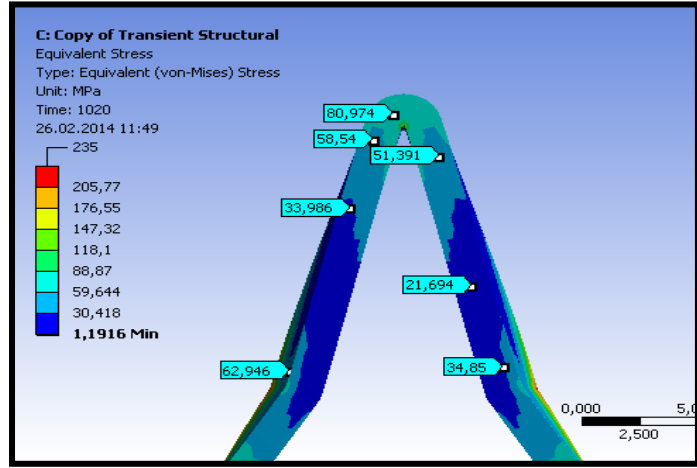
Şekil 3.10: (XRD-1) Numunesi yapısal analiz sınır koşulları (soğuma sonrası).



Şekil 3.11: (XRD-1) Numunesi yapısal analiz, (y) eksenı boyunca deformasyon.

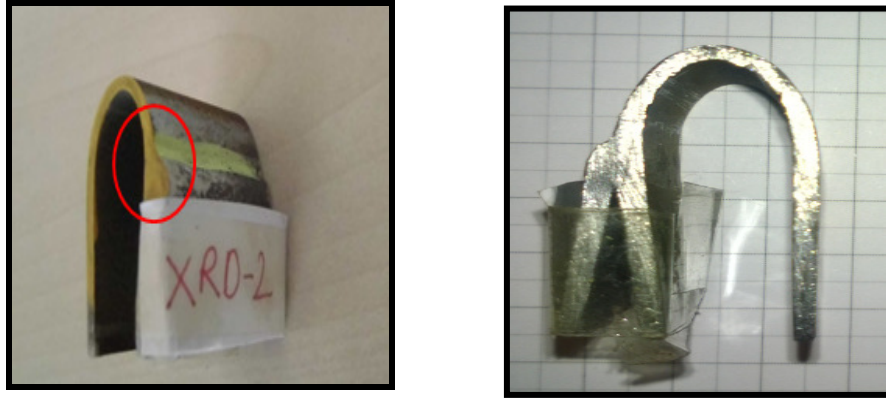


Şekil 3.12: (XRD-1) Numunesi yapısal analiz, eşdeğer gerilme dağılımı, yan kesit görünümü.

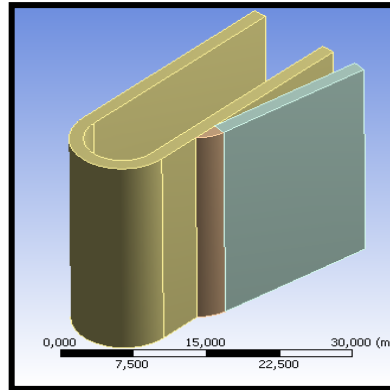


Şekil 3.13: (XRD-1) Numunesi yapısal analiz, eşdeğer gerilme dağılımı, üst kesit görünümü.

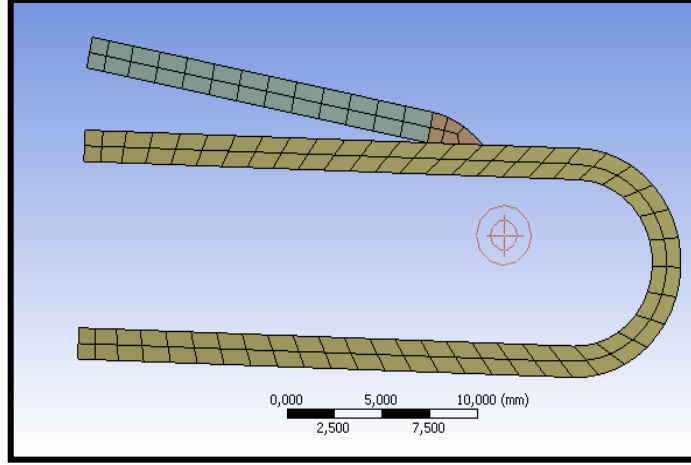
3.1.2 (XRD-2) (A2-A2) (DD1300-DD1300) Bağlantı Simülasyonları



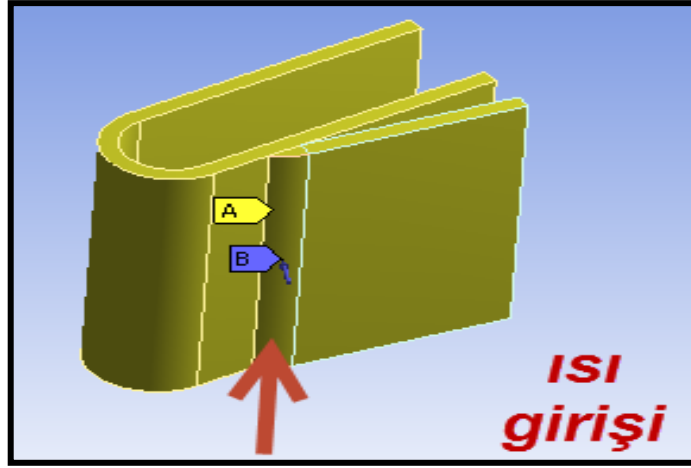
Şekil 3.14: (A2-A2) / (DD1300-DD1300) / (XRD-2) Kaynaklı birleşimine ait numune geometrisi.



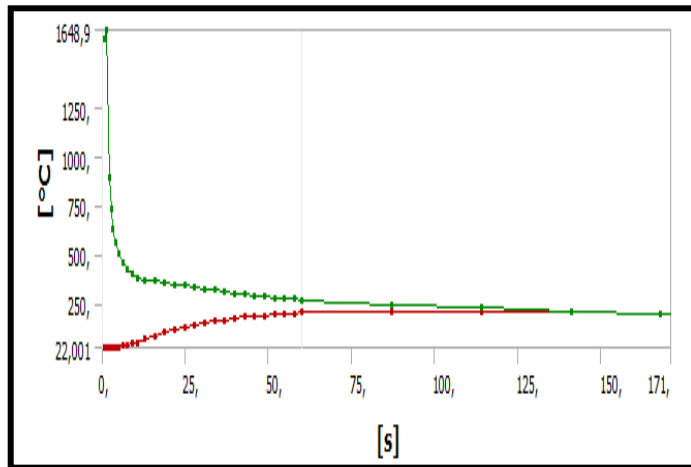
Şekil 3.15: (XRD-2) Numunesi 3 boyutlu modeli.



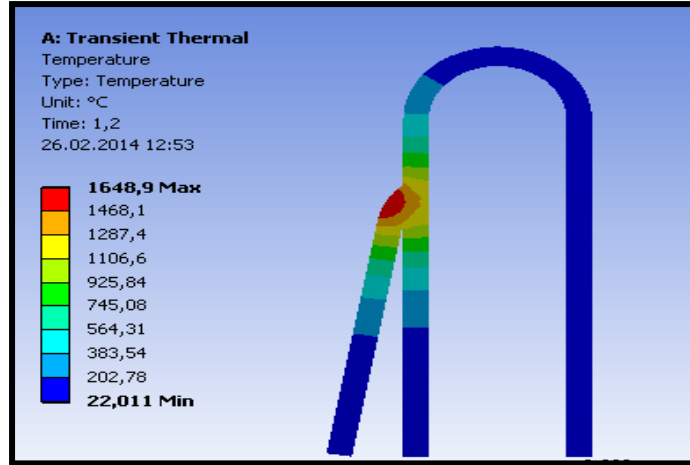
Şekil 3.16: (XRD-2) Numunesi mehleme detayı:
 Düğüm sayısı= 16292,
 Eleman sayısı=2777.



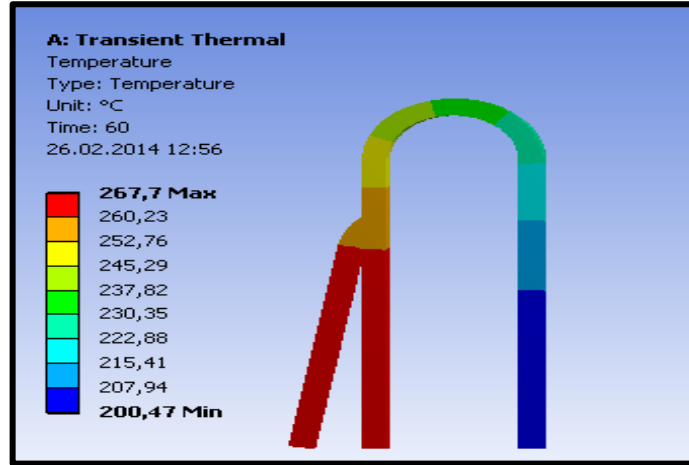
Şekil 3.17: (XRD-2) Numunesinin termal analiz sını koşullarının gösterimi.



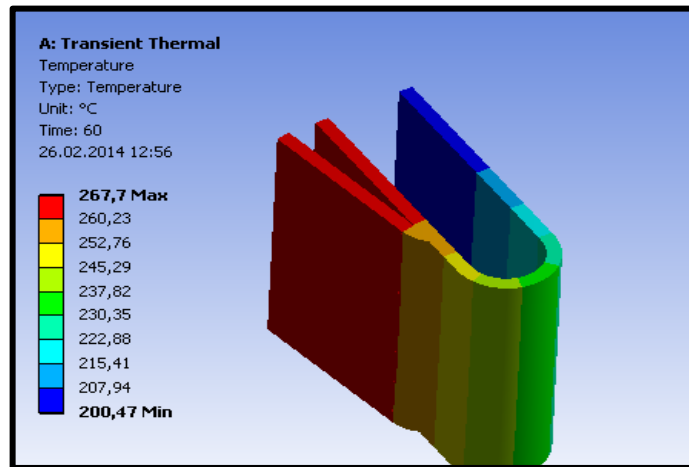
Şekil 3.18: (XRD-2) numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi



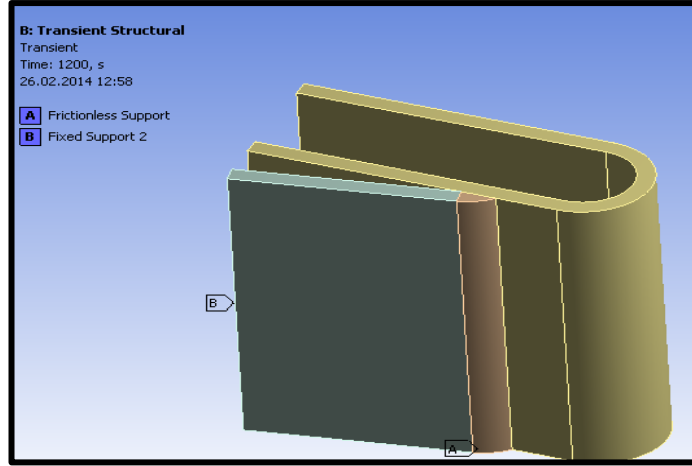
Şekil 3.19: (XRD-2) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yar görünüm, (1,2 sn. sonrası).



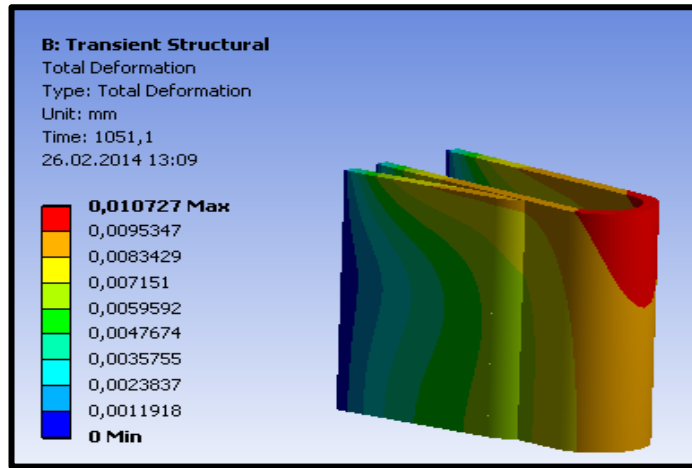
Şekil 3.20: (XRD-2) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, yan görünüm, (60 sn. sonrası).



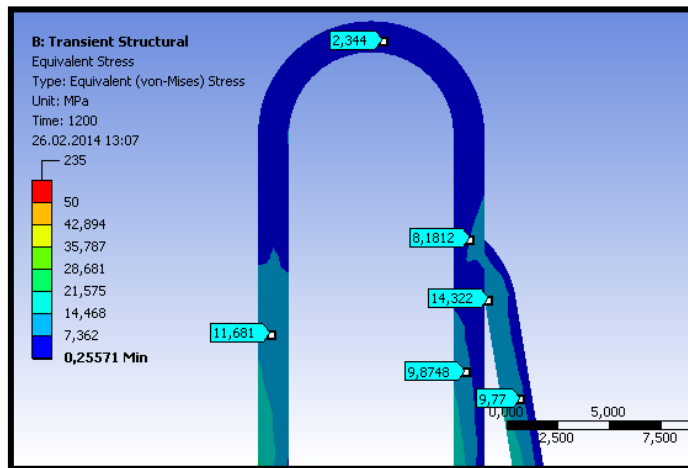
Şekil 3.21: (XRD-2) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, üst görünüm, (60 sn. sonrası).



Şekil 3.22: (XRD-2) Numunesi yapısal analiz sınır koşulları, soğuma sonrası.

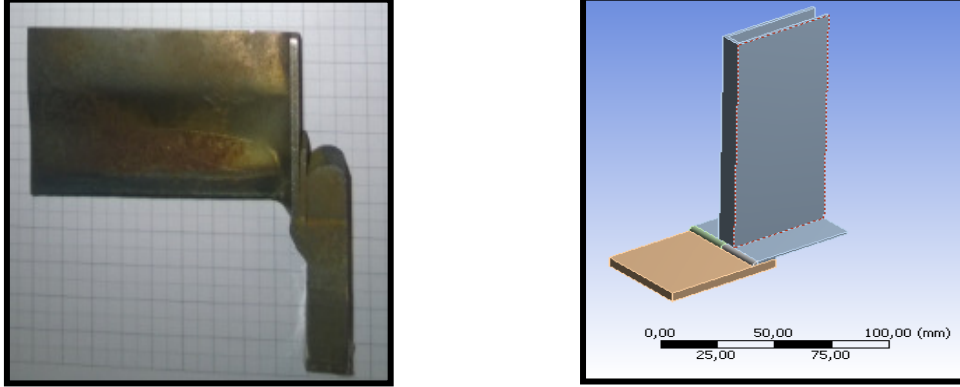


Şekil 3.23: (XRD-2) Numunesi yapısal analiz, deformasyon verisi.

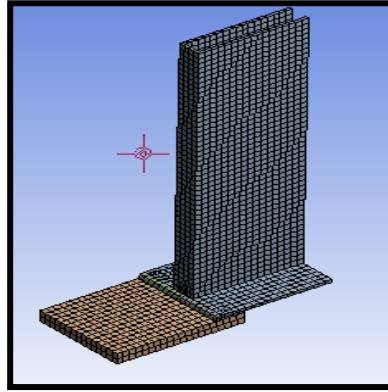


Şekil 3.24: (XRD-2) Numunesi yapısal analiz, eşdeğer gerilme dağılımı.

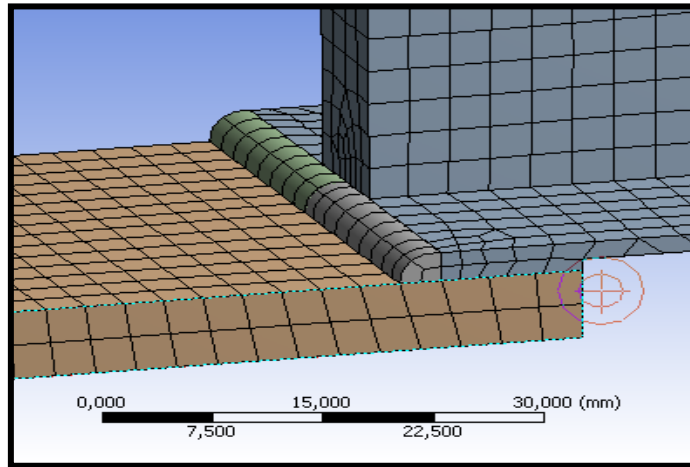
3.1.3 (XRD-3) (A2-A3) (DD1300-T6) Bağlantı Simülasyonları



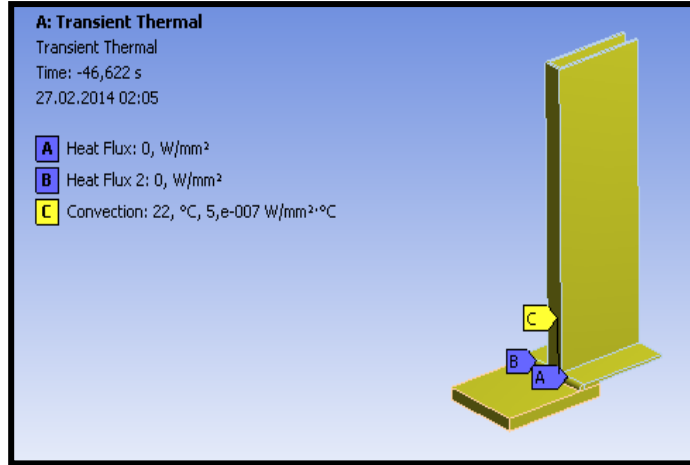
Şekil 3.25: (A2-A3) (DD1300-T6) (XRD-3) Kaynaklı birleşimine ait numune geometrisi.



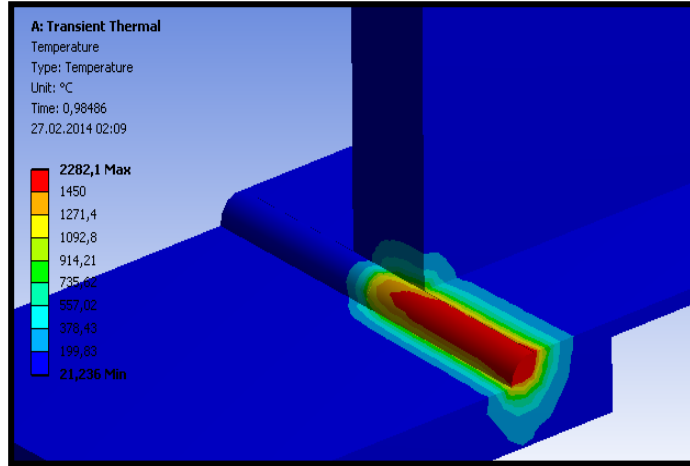
Şekil 3.26: (XRD-3) Numunesi MESH detayı:
Düğüm sayısı= 20101 Eleman sayısı=3185.



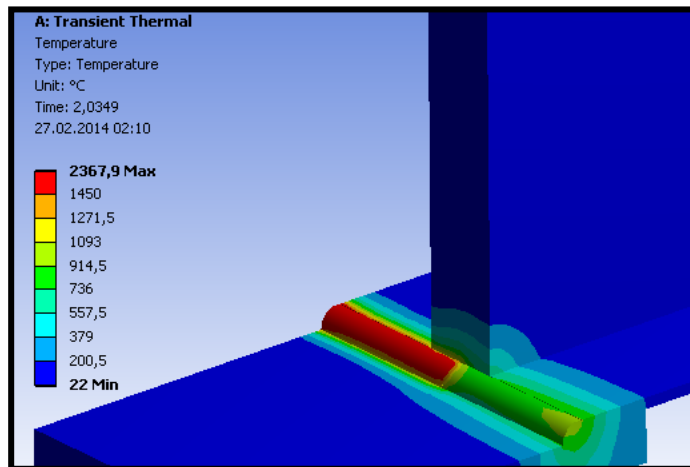
Şekil 3.27: (XRD-3) Numunesi MESH detayı: İlave katı modelin gösterimi.



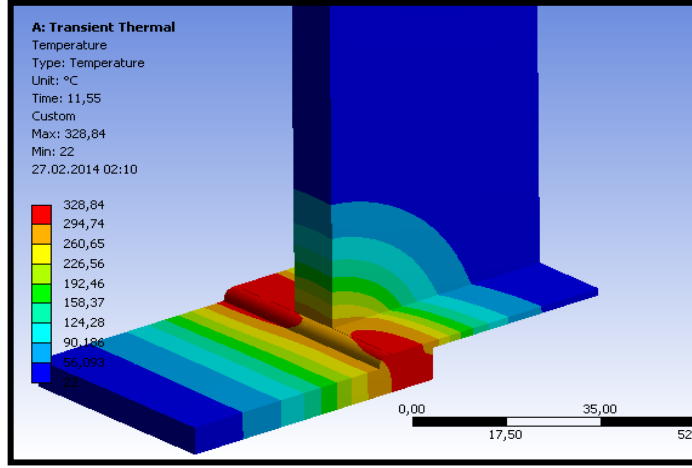
Şekil 3.28: (XRD-3) Numunesinin termal analiz sınır koşullarının gösterimi.



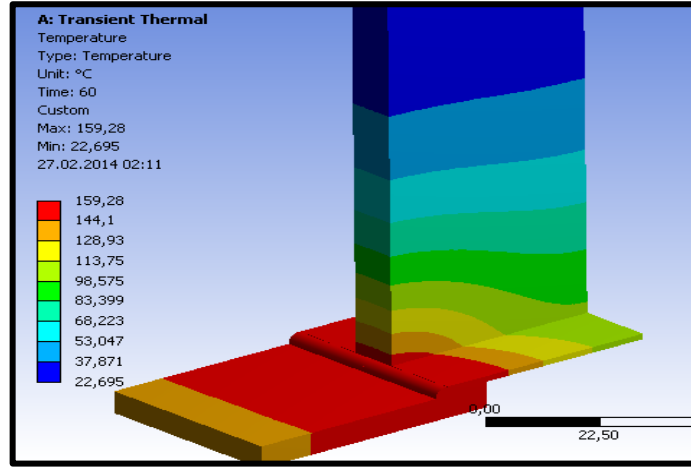
Şekil 3.29: (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (0,95 sn. sonrası).



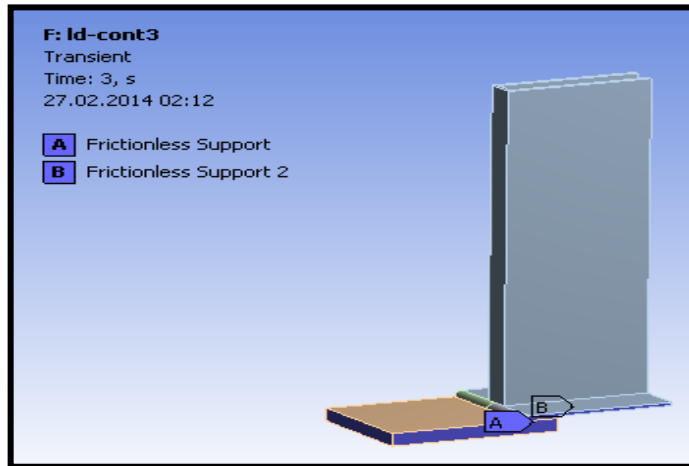
Şekil 3.30: (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (2,035 sn. sonrası).



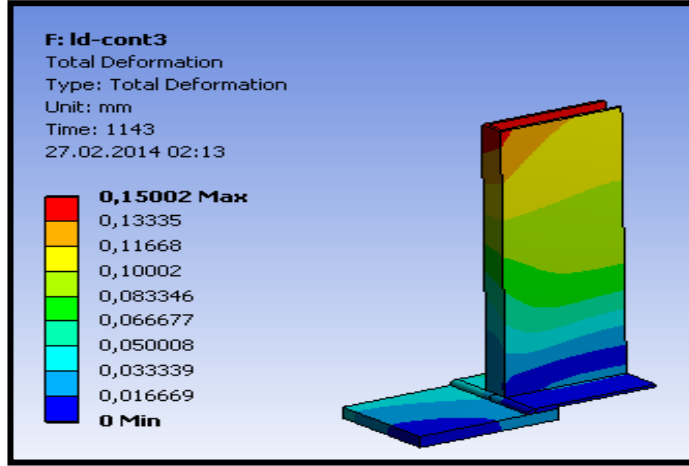
Şekil 3.31: (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (11,55 sn. sonrası).



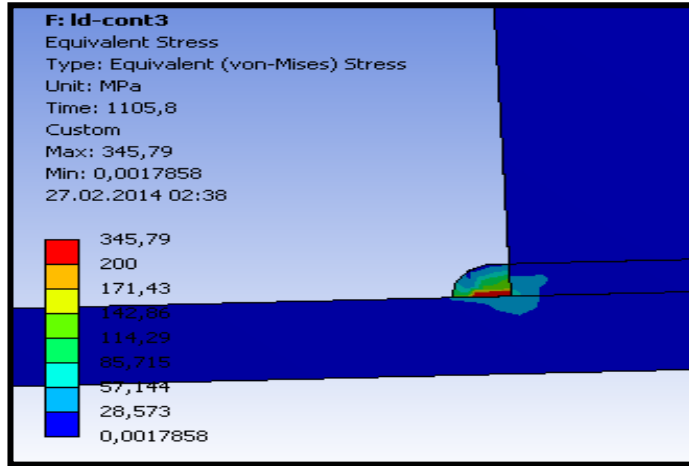
Şekil 3.32: (XRD-3) Numunesi zamana bağlı sıcaklık değişimi, kaynak anı, (60 sn. sonrası).



Şekil 3.33: (XRD-3) Numunesi yapısal analiz sınır koşulları (A: Fix Support, B: Loosen Support).

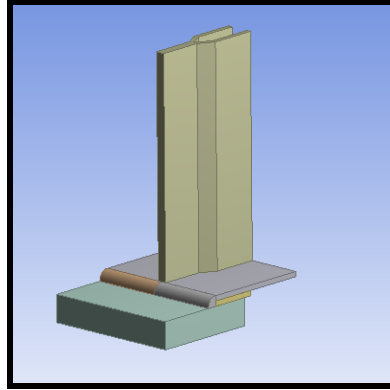


Şekil 3.34: (XRD-3) Numunesi yapısal analiz deformasyon miktarları.

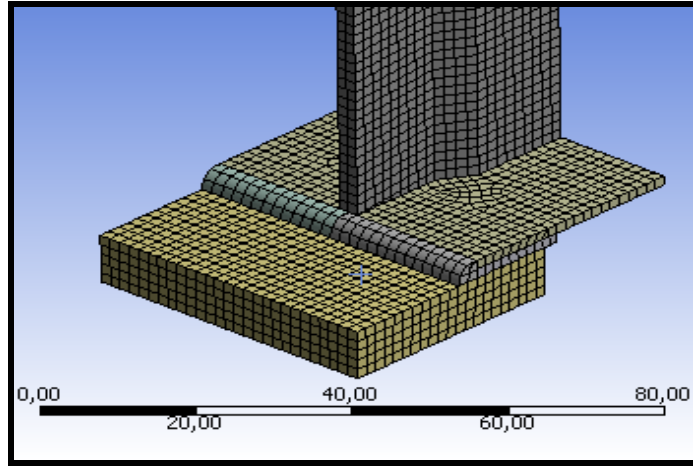


Şekil 3.35: (XRD-3) Numunesi yapısal analiz eşdeğer gerilme dağılımı.

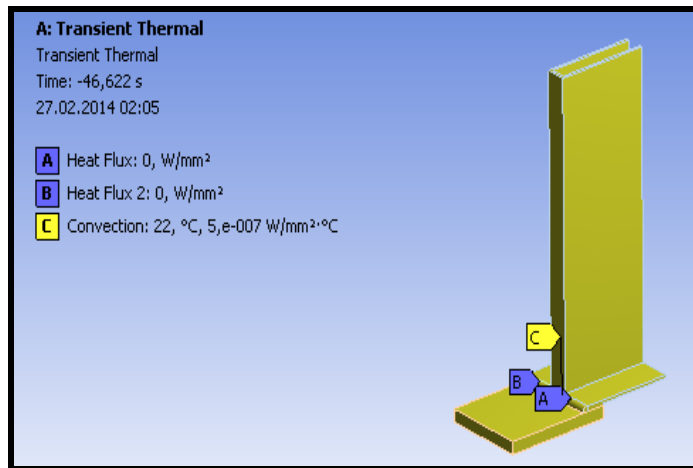
3.1.4 (XRD-4) (A1-A4) (DD1100-NPL80) Bağlantı Simülasyonları



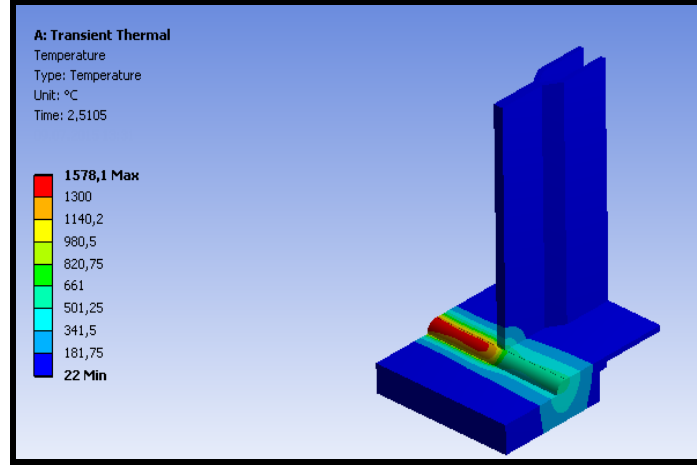
Şekil 3.36: (XRD-4) (A1-A4) (DD1100-NPL80) Numunesi geometrisi.



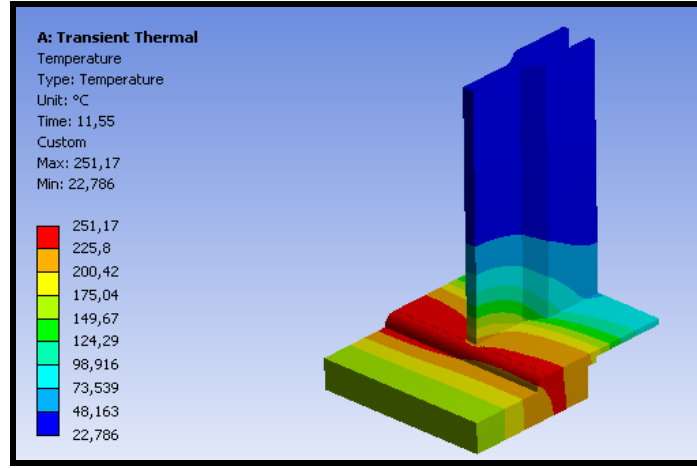
Şekil 3.37: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Numunesi MESH detayı.



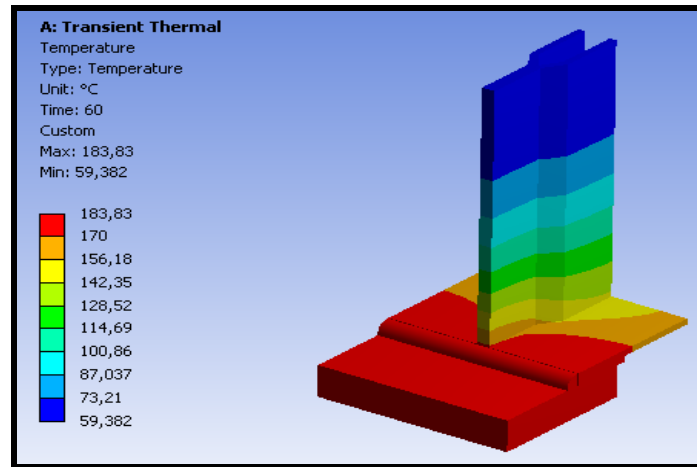
Şekil 3.38: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sınır koşulları.



Şekil 3.39: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sıcaklık dağılımı, Kaynak Anı.



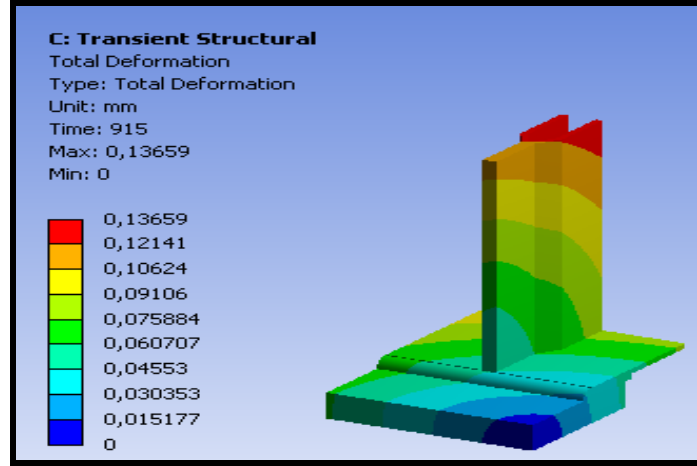
Şekil 3.40: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sıcaklık dağılımı, 11. saniye.



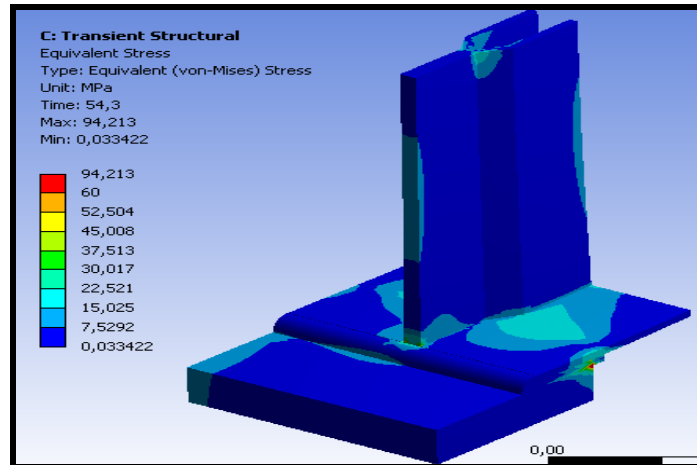
Şekil 3.41: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Termal analiz sıcaklık dağılımı, 60. saniye.



Şekil 3.42: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Yapısal analiz sınır koşulları .



Şekil 3.43: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Yapısal analiz deformasyon.



Şekil 3.44: (XRD-4) (DD1100-NPL80) Yapısal analiz eşdeğer gerilme.

3.2 Tümleşik Yapı Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi

Tez alıması bu aamadan sonra tümleşik analizler devam ettirilecektir. Bu analizlerde kullanılacak olan malzeme ve ısı girdisi parametreleri olarak yapılan malzeme mekanik test ve deneylerden elde edilen gerçek mekanik parametreler ve prototip imalatlar esnasında tutulan kaynak koşulları parametrelerinden elde edilen gerçek değerlerin kullanılması planlanmıştır. Kaynak işlemi ile ilgili parametrelerin listesi Tablo 3.2 'de verilmektedir. Malzeme parametreleri olarak deneysel yöntemlerle elde edilmiş parametreler Tablo 3.1 aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1: Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

Malzeme	Elastisite Modülü, (GPa)	Poisson Oranı ve Yoğunluk (g/cm ³)	Akma Dayanımı, (MPa)	ekme Dayanımı, (MPa)
A1 (DD1100)	211,32	0,30 7,685	255 (max. 280)	353 (270-410)
A2 (DD1300)	210,895	0,30 7,610	256 (max. 280)	355 (270-410)
A3 (T6)	205,31	0,30 7,670	264 (max. 300)	371 (360-510)
A4 (NPL80)	208,73	0,30 7,745	302 (max. 336)	457 (478)
K1,K2 ve K3	218,356	0,30 7,766	392 (420-tel)	481 (500-640-tel)

Tablo 3.2: Prototip kazanların kaynaklı imalat parametreleri

PROTOTİP KAZANLARIN (2000 ve 2500 kVA) KAYNAKLI İMALAT PARAMETRELERİ												
DOĞRUSAL KAYNAĞIN KODU	DOĞRUSAL KAYNAĞIN TANIMI	XRD NUMUNESİ TEMSİL DURUMU	DOĞRUSAL KAYNAĞIN UZUNLUĞU (cm)	KAYNAK SÜRSİ (sn)	KAYNAK HIZI (mm/sn)	TEL BESLEME HIZI (cm/sn)	TEL ÇAPI (cm)	KAYNAK MAKİNESİ SET AKIMI (A)	KAYNAK MAKİNESİ SET GERLİMİ (V)	ERGİYİK OLARAK AKTARILAN METAL KÜTLESİ (gr)	ISI GİRDİSİ (J/mm)	İLAVE KATI MODEL ANMA ÇAPI (mm)
P1	(DD1100-DD1100) (A1-A1) (2000 kVA)	XRD-2 KENDİSİ	109,5	145	7,6	2,00	0,10	108,0	17,4	17,9	199,1	3,3
P2	(DD1100-NPL80) (A1-A4) (2000 kVA)	XRD-4 KENDİSİ	150,0	181	8,3	5,95	0,10	226,0	26,2	66,4	571,6	5,4
P3	(DD1100-T6) (A1-A3) (2000 kVA)	XRD-3 EŞDEĞERİ	150,0	161	9,3	6,00	0,10	228,0	26,3	59,6	514,9	5,1
P4	(DD1300-DD1300) (A2-A2) (2500 kVA)	XRD-1 KENDİSİ	130,0	261	5,0	1,70	0,10	15,0	47,0	27,4	113,2	2,6
P5	(DD1300-DD1300) (A2-A2) (2500 kVA)	XRD-1 KENDİSİ	130,0	264	4,9	1,70	0,10	15,0	47,0	27,7	114,5	2,6
P6	(DD1300-DD1300) (A2-A2) (2500 kVA)	XRD-1 KENDİSİ	130,0	249	5,2	1,70	0,10	15,0	47,0	26,1	108,0	2,6
P8	(DD1300-NPL80) (A2-A4) (2500 kVA)	XRD-4 EŞDEĞERİ	176,0	236	7,5	5,73	0,10	226,0	26,2	83,4	635,2	5,5
P9	(DD1300-NPL80) (A2-A4) (2500 kVA)	XRD-4 EŞDEĞERİ	67,0	84	8,0	5,73	0,10	226,0	26,2	29,7	593,9	5,4
P10	(DD1300-NPL80) (A2-A4) (2500 kVA)	XRD-4 EŞDEĞERİ	176,0	236	7,5	5,73	0,10	226,0	26,2	83,4	635,2	5,5
P11	(DD1300-NPL80) (A2-A4) (2500 kVA)	XRD-4 EŞDEĞERİ	67,0	84	8,0	5,73	0,10	226,0	26,2	29,7	593,9	5,4
P12	(DD1300-T6) (A2-A3) (2500 kVA)	XRD-3 KENDİSİ	175,5	202	8,7	5,95	0,10	228,0	26,3	74,2	552,1	5,2
P13	(DD1300-T6) (A2-A3) (2500 kVA)	XRD-3 KENDİSİ	67,0	76	8,8	5,95	0,10	228,0	26,3	27,9	544,2	5,2
P14	(DD1300-T6) (A2-A3) (2500 kVA)	XRD-3 KENDİSİ	175,5	200	8,8	5,95	0,10	228,0	26,3	73,4	546,7	5,2
P15	(DD1300-T6) (A2-A3) (2500 kVA)	XRD-3 KENDİSİ	67,0	77	8,7	5,95	0,10	228,0	26,3	28,3	551,3	5,2

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tasarımı ve imalatı hali hazırda yıllar içinde birikmiş tecrübelerle göre gerçekleştirilen hermetik transformatör kazanı üretimine bilinçli bir mühendislik yaklaşımı sunmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ilk önce kazan imalatında kullanılan çelik malzemeleri tanımak ve bu malzemelerin mekanik yeteneklerinin literatürlere ve üretici sertifikalarına uyum gösterip göstermediğine emin olmak için çok geniş malzeme test ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra kullanılan çelik malzemelerin numune bazında bazı özelliklerinin kaynak işlemi ile değişen yapısı ve mekanik özellikleri kaynaklı bağlantı tipleri üzerinde yapılan test ve analizleri ile gözlem altına alınmıştır.

Çalışma kapsamında yaptığımız termal ve yapısal analizlerde bulduğumuz artık gerilme değerlerinin deneysel yöntemlerle yapılan ölçümlerle uyumlu sonuçlar üretmesi bu aşamadan sonra yapılacak analizler için değerli bir anlam taşımaktadır. Bu sayede yapısı gereği artık gerilmelerin kazan ömründe çok önem taşıdığı hermetik tip transformatör kazanlarının termal ve yapısal analiz parametreleri sağlıklı bir şekilde elde edilmiştir. Bundan sonra daha büyük kapasiteli hermetik transformatörlerin bilinçli bir şekilde tasarımını mümkün kılacak analizler yapılabilecektir. Tezin en önemli çıktısı bu olmakla beraber aşağıdaki sonuçlar detaylandırılabilir:

- 1- Kaynak ana malzemelerinin mekanik parametreleri (akma dayanımı, kopma dayanımı, kopma uması, Young Modülü) tedarikçilerin beyan ettiği değerlerle ve literatürle uyumludur.
- 2- Kaynaklı bağlantı metalografik kontroller ve mikroskopik incelemeler sıhhatli bir kaynak şartlarının oluştuğunu göstermektedir.
- 3- Kaynak ana malzemelerinin spektrometrik değerleri literatürle ve malzeme sertifikaları ile uyumludur.
- 4- Bağlantı örneklerinde kaynak çekirdeğinde PANalytical X'Pert Pro MPD model XRD cihazı ile yapılan ölçümlerde bası yönlü gerilmeler ölçülmüştür. Bu sonuç literatürle ve simülasyonlarla uyumludur.

5- Kaynaklı bağlantı tiplerinde mekanik mukavemet anlamında en çok zayıflayan bölgenin ITAB-Ana Malzeme geçiş bölgesi olduğu kabul edilen bir durumdur.

6- Tüm çekme kırılmaları aynı şekilde Ana Malzeme ya da ITAB-Ana Malzeme geçiş bölgelerinde gerçekleşmiştir.

7- Kaynaklı bağlantı tipleri için yapılan Transient Termal Analizler’de kaynak sonrası oluşan kalıcı gerilmeler simüle edilmiş oldu. Bu gerilmelerin geometrilerde bıraktığı kalıcı stresler sonraki Yapısal Analizler ile simüle edildi. Simülasyonlarda, tanımlanan sınır koşullarında modellere eklenen ilave katı yapı (IKY) bölgelerinde hesaplanan gerilme seviyelerinin bağlantı örnekleri ile yapılan deneysel XRD ölçümleri ile uyumlu olduğu, bu uyumluluk halinin yapılan simülasyonları doğruladığı tespit edilmiştir.

Bu bağlamda çalışmanın devamı için aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

1- Transformatör kazanı kaynaklı bağlantı tiplerimiz için simülasyon modellerinin ve sınır koşullarının, transformatör kazanı tümleşik yapısının kaynak işlemini olabildiğince realize edebilmesi için daha da geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

2- Analiz çalışmalarına tez aşamasında Yorulma faktörü dahil edilememiştir, bir sonraki aşamada bu faktörde dahil edilebilir.

3- Transient Termal Analizler ve Yapısal Analizleri örnek transformatör kazanı tipleri için sahadan elde edilen termal ısı girdisi sınır koşullarında tekrar yapılabilir.

4- Tezin endüstriyel hedefi; bağlantı tipi numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve güvenilirliği teyit edilmiş simülasyonlardan elde edilen bilgilerle olabilecek en büyük boyutlarda hermetik trafo kazanı modellenmesi ve analiz edilmesidir. Çalışmalar bu yönde ilerletilmektedir.

5- Simülasyon ortamında optimizasyonu tamamlanan en büyük transformatör kazanının imalat dokümantasyonu hazırlanarak imalatı gerçekleştirilebilir. Bu kazan tez kapsamında imal edilen trafo kazanı yorulma testi düzeneğinde gerçek işletme koşullarını simgeleyen bir yorulma testine tabi tutulabilir.

5. KAYNAKLAR

- [1]. Thomas H. Keogh, *United States Patent Office*, "Hermetically Sealed Distribution Transformer" 3,474,369., Patented Oct. 21, (1969).
- [2]. Abi-Samra, N., Artega, J., Daravny, B. and Foata, M. (2009). "Tank Rupture and Mitigation - A Summary of Current State of Practice and Knowledge", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1959-1967.
- [3]. Kawamura T., Ueda M. and Ando K. (1998). "Prevention of Tank Rupture Due to Internal Fault of Oil Filled Transformers," *CIGRÉ 1998 Session*, Paris, France, Paper 12-02.
- [4]. Foata M. (2008). "Power transformer fire risk assessment," *CIGRE 2008 Session*, Sydney, Australia, Paper A2.33.
- [5]. Kothmann R.E. and Thompson D.G., "Power transformer tank rupture risk assessment and mitigation" *EPRI Rep. TR-104994*, (1995).
- [6]. Herfati D., Kamvar B. A., Tavakkol A. and Milani K. R. (2007). "Calculation of Mechanical Stresses In Hermetically Sealed Transformers", *19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, Paper 0309.
- [7]. W. Tippachon, Klairung N., Khatsaeng T., Teara-Acharyakul N. and Hokierti J. (2006). "Failure Mode Distribution of Hermetically Sealed Transformers in Thailand" *2006 International Conference on Power System Technology*, DOI: 10.1109/ICPST.2006.321726.
- [8]. Ridwan M. I, Samsudin M.R, and Ghazali Y.Z.Y, (2011). "Reliability Analysis of Premature Failed 11/0.433kV Hermetically Sealed Distribution Transformers" *IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research CHUSER 2011*, Penang, 321-326.
- [9]. Jongen R, Gulski E., Morshius P. and Smit J. (2007). "Statistical Analysis of Power Transformer Component Life Time Data", *The 8th International Power Engineering Conference*, Singapore, 1273-1277.
- [10]. Krishnadev M, Ghali E., Larouche M., Sridnar R. and Lakshmanan V.I., "Cleavage Failure of Transformer Storage Tank Under Dynamic Rates of Loading: Influence of Base Plate And Weldment Microstructure and Toughness", *Engineering Fracture Analysis*, 1220 – 1232, (2006).

- [11]. Dastous J. B., Lanteigne J. and Foata M. (2010). “Numerical Method for the Investigation of Fault Containment and Tank Rupture of Power Transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1657-1665.
- [12]. Benson M. L., Rudland D. L. and Csontos A.A., “Weld Residual Stress Finite Element Analysis validation: Part:1- data Development Effort”, USNRC, Office of Nuclear Regulatory Research, NUREG-2162, (2014)
- [13]. BS EN 10002-01:2001 Tensile Testing of Metallic Materials. Method of Test at Ambient Temperature.
- [14]. BS ISO 12108 Metallic Materials Fatigue Testing- Fatigue Crack Growth.
- [15]. TS EN ISO 4136:2011 Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler-Enine çekme deneyi.
- [16]. TS EN ISO 5173: Metalik malzemelerde kaynak dikişleri üzerinde tahribatlı muayeneler- Eğme deneyleri.
- [17]. TS EN ISO 17639: Metalik malzemelerdeki kaynaklarda tahribatlı muayene- Kaynakların makroskopik ve mikroskopik muayenesi.
- [18]. TS EN ISO 6520-1: Kaynak ve ilgili işlemler-Metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması-Bölüm 1: Ergitme kaynağı.
- [19]. Dai H. (2012). “Modelling Residual Stress and Phase Transformations in Steel Welds”, Neutron Diffraction, InTech, [online], (2012). [http\\www.intechopen.com/books/neutron-diffraction / modelling residual stress and phase transformations in steel welds](http://www.intechopen.com/books/neutron-diffraction/modelling_residual_stress_and_phase_transformations_in_steel_welds)
- [20]. Deng D., Tong Y., Ninshu M.A. and Murakawa H. (2013). “Prediction of Residual Welding stress in 2.25 Cr-1Mo steel by Taking Account the Effect of the Solid-State Phase Transformation”, [online], [http\\www.springerlink.com](http://www.springerlink.com)
- [21]. Eren I. and Tolun F, “Evaluation of Effect of Welding Residual Stress to Structural Properties of Vehicle Chassis Frame”, *TTEM*, (2014).