

Yüksek Frekanslı İndüksiyon Kaynağında Farklı Üretim Parametrelerinde Mekanik Özelliklerinin Tespit Edilmesi

Ali Karaca¹, Munise Didem Demirbaş²,

^{*1} Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 38039, Kayseri, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, 38039, Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 17. 06.2025, Kabul / Accepted: 04. 07.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 31. 07.2025)

Anahtar Kelimeler

Yüksek Frekans Kaynak,
Kaynak Parametreleri,
Dikişli Boru Profil Üretimi,
Elektrik Ark Kaynağı, Isı Tesiri
Altındaki Bölge

Öz: Yüksek frekans kaynak yöntemi, son yıllarda seri ve hızlı imalata uygun olması ve çelik sac bant kenarlarının ısı ve basınç etkisiyle herhangi bir ilave tel veya elektrot kullanmaksızın birleştirme işleminin gerçekleştirilebilmesi ve birleştirme kalitesinin istenilen niteliklerde olması sebebiyle dairesel, kare ve dikdörtgen kutu profillerin imalatında tercih edilen bir yöntem olmuştur. Literatürde yapılan çalışmalarda bilim insanları kaynak bölgesinde malzemenin yapısında meydana gelen mekaniksel değişikliklere dair araştırmalar ve yüksek frekanslı kaynak makinesinin üretiminde iyileştirmesine dair araştırma yapmışlardır. Fakat kaynak parametrelerinin değiştirilmesi ile hangi kaynak hataları ile karşılaşılabilceği ve boru-profillerin mekanik özelliklerini nasıl etkilediği konuları hakkında yeterli bilginin olmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kare kutu profili değişik kaynak parametreleri (kaynak hızı ve empedor konumu, empedor çapı, indüksiyon bobin konumu, indüksiyon bobin çapı, kaynak role çapı) ile üreterek mekanik özelliklerin nasıl etkilendiği ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespitinde yassılma, genişletme ve çekme deneyi, sertlik ölçümü gibi teknikler kullanılmıştır. Elde edilen nicel ve nitel verilerin Minitab Programı ile regresyon korelasyon analizi ile değişik kaynak parametrelerinin malzemenin mukavemetinde sertliğinde etkileri belirlenmiştir. Analiz sonucu çekme dayanımı, akma dayanımı ve kopma uzaması için en doğru ilişkiye sahip parametreler tespit edilmiştir. Yüksek mukavemetli kaynak bölgesi ve akma dayanımı istenirse indüktör çapını toleranslar dahilinde 40mm seçilmesi ve empedor tolerans dahilinde 10mm ileride ayarlandığında çekme mukavemeti 375-380 N/mm², kopma uzaması ise 13-14 N/mm² ölçülürken, tam tersi durumda malzeme daha fazla tokluğa sahip olacağı için eğme ve bükmelere karşı daha fazla dayanıklı bir malzeme elde etmek için indüktör çapını toleranslar dahilinde 34mm seçilmesi ve empedor tolerans dahilinde 10mm geride ayarlanması durumunda ise çekme mukavemeti 355-360 N/mm² kopma uzaması ise yüksek 16,7-17 N/mm² ölçülmüştür.

Investigation Of The Effect Of Mechanical Parts Used In High Frequency Induction Welding Machines On Welding Quality And Determination Of Their Mechanical Properties

Keywords

High Frequency Welding,
Welding Parameters,
Welded Pipe Profile
Production,
Electric Arc Welding
Heat Affected Zone

Abstract: The high frequency welding method has been a preferred method in the production of circular, square and rectangular box profiles in recent years because it is suitable for serial and fast production and because the steel sheet band edges can be joined without using any additional wire or electrode under the effect of heat and pressure and the quality of the joint is at the desired level. In the past, scientists have conducted research on the mechanical changes that occur in the structure of the material in the welding area and on the improvement of the production of the high frequency welding machine. However, it has been

determined that there is not enough information on which welding errors can be encountered by changing the welding parameters and how they affect the mechanical properties of the pipe-profiles. In this study, experimental studies were conducted on how the mechanical properties were affected by producing the square box profile with different welding parameters (welding speed and impeder position, impeder diameter, induction coil position, induction coil diameter, welding roll diameter). In determining the mechanical properties, techniques such as flattening, expansion and tensile tests, hardness measurement were used. The effects of different welding parameters on the strength and hardness of the material were determined with the regression correlation analysis of the obtained quantitative and qualitative data with the Minitab Program. As a result of the analysis, the parameters with the most accurate relationship for tensile strength, yield strength and elongation at break were determined. If high strength weld zone and yield strength are desired, when the inductor diameter is selected as 40 mm within the tolerances and the impeder is set 10 mm ahead within the tolerances, the tensile strength is measured as 375-380 N/mm² and the elongation at break is measured as 13-14 N/mm², while in the opposite case, since the material will have more toughness, when the inductor diameter is selected as 34 mm within the tolerances and the impeder is set 10 mm behind within the tolerances, the tensile strength is measured as 355-360 N/mm² and the elongation at break is measured as high as 16.7-17 N/mm².

1. Giriş

Karbon salınımını azaltmaya yönelik sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, yüksek frekans kaynak yöntemiyle üretilen ince cidarlı boru ve profillerin, çevre dostu ve yüksek performanslı yapıları sayesinde farklı sektörlerdeki kullanım alanlarının önümüzdeki yıllarda artacağı öngörülmektedir. Türkiye, 2010 yılına gelindiğinde 3,5 milyon tona yakın çelik boru üretimiyle Avrupa'nın en fazla dikişli çelik boru üreten ülkesi konumuna yükselmiş, Türkiye'den sonra Avrupa'da en fazla çelik boru üreten ülkeler İtalya ve Almanya'dır. 2022 yılında ise bu rakam Türkiye'de 4,8 milyon tona ulaşmış ve çelik boru sektörü Avrupa'nın en fazla dikişli çelik boru üreten ülkesi olma unvanını korumuştur. Özellikle ince cidarlı dairesel kesitli içi boş boru ve profiller, maliyet ve ağırlık ekonomisi açısından bakıldığında birçok sektörde ve bileşenlerinde günden güne kullanımı yaygınlaşmakta, insanoğlu da daha çevreci ve yüksek performans özelliğine sahip doğa dostu bu malzemenin kullanıldığı yere göre nasıl bir mekanik özelliklere sahip olacağına ihtiyaç duymaktadır. Dikişli çelik boru üretimi gerçekleşirken ERW boru üretiminde iki metalin uzunluğu boyunca kaynaklı bağlantı sağlanabilmesi için günümüz teknolojisinde genellikle oldukça gelişmiş bir yöntem olan HF (High frequency) yani yüksek frekanslı kaynak cihazlarından faydalanılarak çok hızlı ve seri bir üretim sağlanır. Bu çalışmada kare kutu profillerin üretimi esnasında kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak hızı, empedor konumu, empedor çapı, indüksiyon bobin konumu, indüksiyon bobin çapı, kaynak role konumu ve kaynak role baskısı etkenleri değiştirilerek bu parametrelerin kaynak kalitesini nasıl etkilediği ve mekanik özellikleri nasıl değiştirdiği ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespitinde yassılma (TS 237 EN 10233), köşe genişletme (TS EN 10234) ve çekme deneyi (TS 138 EN 10002-1) teknikleri kullanılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışma ile literatüre ve profil imalat sektörüne kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

Literatür Taraması

Literatür taramasında çeşitli araştırmacılar, ERW kaynak teknolojisiyle üretilen farklı malzeme türlerinin nasıl sonuçlar doğuracağı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Örneğin tarihsel olarak en yakın zamanda Fan Yang ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada dikişli boru üretimi sırasında kalıcı şekil değiştirme sonrası ITAB bölgesi içinde ve dışında kalan alanların elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiş ve şerit deformasyonu detaylı olarak incelenmiştir. Christian Egger ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada benzer çalışma yürütmüşler ve kaynaklı borunun, kaynak dikişinin geometrisinin, sıkıştırmaya uygulanan kuvvetin; rulolar ve bant kenarları boyunca sıcaklık ve ısıdan etkilenen kısımdaki sertlik dağılımı gerçekçi bir şekilde simüle edilmiştir. Gholamreza Khalaj ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise ERW teknolojisi ile üretilen boruların kaynak bölgesindeki mikro yapı gelişimi ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi maksadıyla soğutma koşullarını değiştirerek elde edilen verileri analiz etmişlerdir. Kaynak bölgesine üzerine ısı işlem uygulayarak kaynak bölgesinde daha kaliteli kaynak elde edilmeye çalışılmış ve sonuçta temperleme ısı işleminin daha etkili olduğu görülmüştür. P. Yan ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada ise yaptıkları çalışmada ise malzemeye farklı ısı

işlem uygulayarak çalışma yapmışlar da hammaddeden kaynaklı malzemedeki farklı mekanik özelliklerdeki malzeme yapısı, kristalografik doku ve daha büyük tane boyutu olduğu saptanmıştır. Bu 3 farklı bilimsel çalışmada daha güvenilir bir kaynak edilebilirlik ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Fakat bütün deneyler de kritik bölgelerdeki gerilme yoğunlukları tespit edilmesinde yardımcı olurken, sertlik ve tokluk ve kopma uzaması gibi verilerin tespit edilmediği eksiklikler görülmüştür. ERW teknolojisiyle seri ve hızlı üretim yapılırken anlık olarak kaynak kalitesinin kontrol edilmesi çok önemlidir. Aksi halde yüksek fire onaranları ve müşteri şikâyetleri ile karşılaşılabilir. Bunun için hattın üstünde Eddy Current tahribatsız muayene ölçüm yöntemi vardır. Hakan GÜNAY, Süleyman KARADENİZ, (2008) tarafından yapılan çalışmada ise boyuna dikişli çelik boruların girdap akımı yöntemiyle kontrol uygulamaları konulu araştırma yapmışlardır. Elektromagnetik bir test yöntemi olan (Eddy Current) girdap akımı testleri boruya hasar vermeden tüm boru hacminin veya kaynak dikişi çevresinin kontrolü için kullanılmakta olduğunu ve bu çalışmada, çelik boru imalatında hatasız boru üretimini sağlayacak en önemli test yöntemlerinden birisi olan girdap akımı test uygulamalarının temellerine, uygulama yöntemlerine, test sistemlerine ve testi etkileyen parametrelerin nasıl kontrol altında tutulması gerektiğine değinilmiştir. John Wright tarafından yapılan çalışmada ise kaynak kalitesinden daha ziyade ERW kaynak teknolojisiyle üretim sırasında Enerji verimliliğin optimize edilmesi ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Ürünün kaynak kalitesi ve verimi düşmeden en verimli kaynak hem de en kaliteli kaynak edilebilirlik konusunda optimize çalışmaları yapılmış ve enerjide doğrudan tasarruf sağlayacak parametreler üzerine yoğunlaşmıştır. Cunfeng Kang ve ark.da, tarafından yapılan çalışmada ise John Wright gibi yine ERW teknolojisinde enerji verimliliğini düşürmeye yönelik çalışmalar yapmış ve kaynak bölgesindeki Vee açıklığını değiştirmek suretiyle verimliliği takip etmiştir. Sonuçta kaynak bölgesindeki V açısı ne kadar küçük olursa ısıtma verimliliği o kadar düşük olduğunu, aç ne kadar yüksek olursa, ısıtma verimliliğinde o kadar yüksek olduğunu araştırmıştır. By D. Kim ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise ERW teknolojisi ile üretilen malzemenin kaynak bölgesini Yüksek Frekanslı Elektrik Direnç Kaynağı Görüntü İşleme teknolojisi ile incelemiş, görüntü verilerinden elde ettiği bu çalışmada kaynak noktasının yakınında, kusurları ortadan kaldırmaya veya en aza indirmeye yönelik çalışma yapmıştır. Joonmin Lee ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise yılında Erw teknolojisi ile üretilen malzemenin akma gerilmesindeki değişimi tahmin etmeyi amaçlayan, ERW haddeleme işlemi için sayısal bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Prerana Das ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise Yüksek ısı işlem sırasında boyuna kaynaklı borulardaki sıcaklık profilinin simülasyonu Frekans İndüksiyonlu (HFI) kaynak işlemi ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Yüksek frekanslı indüksiyon kaynağı sırasında kaynak kalitesine ısıdan etkilenen bölgenin en önemli faktörlerden birisinin saptamışlardır. Bu çalışmada çelik borudaki 3 boyutlu sıcaklık profilinin sayısal hesaplama analizi yapılmıştır. Elektromanyetik modeli termal modelle birleştirilerek modeli yüksek frekanslı akım ve manyetik alanlar tüp, bobin ve empeder değerlendirilmiştir.

Prerana Das ve ark. (2019), Ahmet Serdar GÜNDOĞDU, Orhan, S. tarafından yapılan çalışmalarda ise yüksek frekanslı indüksiyon kaynağı yöntemiyle üretilen boyuna dikişli çelik borularda kullanılan mikro alaşımlı malzemelerin kaynak zayıflığının azaltılması ile ilgili çalışma yapılmıştır. Kare kutu profillerin üretimi esnasında kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak hızı, empeder konumu, empeder çapı, indüksiyon bobin konumu, indüksiyon bobin çapı, kaynak role konumu ve kaynak role baskısı etkenleri değiştirilerek bu parametrelerin kaynak kalitesini nasıl etkilediği ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Prerana Das ve ark kaynak hattının hızı, yaklaşan şerit kenarlarının açısı, indüksiyonun fiziksel konfigürasyonu bobin, empeder, şekillendirilmiş çelik şerit ve kaynak rulolarının birbirine göre, kaynak rulolarının basıncı ve indüksiyon bobinindeki yüksek frekanslı akımın frekansı olduğunu belirlemişler, Sezai Orhan ise, kaynak hızı, empeder konumu, empeder çapı, indüksiyon bobin konumu, indüksiyon bobin çapı kaynak makara konumunu değiştirilerek kaynak kalitesini nasıl etkilediği saptayan çalışmalar yapmıştır. Fakat bu çalışmalarda kaynak makara çaplarına hiç değinilmediği görülmüştür. Üstelik bu parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkisine ayrı ayrı değinilmiş, fakat bütün parametrelerin birbiri ile iç içe birlikte değerlendirildiğinde ne gibi sonuçlar çıkacağına ilişkin ortada bir boşluk olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada özellikle yüksek frekanslı indüksiyon (HFI) kaynağı ile üretilen kaynak bağlantısının kalitesi bir takım proses parametrelerine bağlı olduğunu tespit edilmiş ve kaynak edilirken farklı parametrelerine malzemenin mekanik özellikleri üzerinde (çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması, sertlik) ne gibi değişkenliklere etki ettiği analiz edilmiştir. Mekanik özelliklerin tespitinde yassılma (TS 237 EN 10233), köşe genişletme (TS EN 10234) ve çekme deneyi (TS 138 EN 10002-1) teknikleri kullanılarak nitel veya nicel veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler, analiz edilmesinde Mintap yazılımsal bir istatistik program kullanılmıştır. Bilim insanları çalışmalarında elde ettiği verileri tecrübeyle ve sayısal verilerden yorumlayarak bir kaniya varmaya çalışmış olduğundan analiz elde edilen bulguların analiz edilmesinde boşluk olduğu görülmüştür. Bu boşluk minitab istatistik analiz programı sayesinde histogramı, boxplot, scatterplot, x-bar ve regresyon ve çoklu korelasyon yöntemleri sayesinde farklı parametrelerin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileşimi, standart sapması, varyansı, ortalaması, minimum ve maksimum değerleri kolayca analiz edilmiş ve nihai ürün üzerinde nasıl bir mekanik özellik isteniyorsa ona göre hangi parametre değerlerinin tercih edileceği analiz edilmiştir.

E Yeniyl, C Boga, U Esme (2019) tarafından yapılan çalışmada ise Ultrasonik kaynak, Al, Cu, Ni gibi malzemeleri kolayca birleştirebilme özelliği ile güneş enerjisi sistemlerinin bileşeni olan güneş kolektörlerinin kaynağında tercih edilen bir yöntem haline geldiğini tespit etmişlerdir. Güneş kolektörlerinin kaynağında sistem parametreleri, elbette kullanılan malzemelerin özelliklerine göre ayarlanmalı, böylece numuneler arasındaki ısı transferi etkilenmeyeceği gibi bu çalışmada, güneş kolektörlerinin seçici kaplamalı levhası ve ısı taşıyıcı boruları ultrasonik dikiş kaynağı kullanılarak kaynaklanmış ve kullanılan Cu-DHP bakır alaşımına göre optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir.

O Er, MK Külekci, U Eşme, C Boğa (2021) tarafından yapılan çalışmada ise Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW), esas olarak demir dışı metalleri ve alaşımlarını birleştirmek için kullanılan bir katı hal kaynak yöntemi, diğer kaynak işlemlerinin aksine, FSSW kirlilik içermemesi ve dolgu malzemesi olmaması gibi avantajlara sahip olduğundan bu çalışmada, Taguchi yöntemi ve Gri İlişkisel Analiz (GRA) kullanılarak sürtünme karıştırma nokta kaynaklı EN AW 5005 alüminyum alaşımının çoklu tepki optimizasyonu için bir girişimde bulunulmuştur.

Ş Öcalır, U Eşme, C Boğa, MK Külekci 2020 tarafından yapılan çalışmada ise EN AW-5083-H111 ve EN AW-6082-T651 olmak üzere iki alüminyum alaşım malzemesi, takım omuz çapı, mil hızı ve ilerleme hızı parametreleri dikkate alınarak Sürtünme Karıştırma Kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu kaynak parametreleri kullanılarak kaynak bağlantılarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve mikro sertlik gibi mekanik özellikleri ve metalografik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kaynak bağlantılarının akma dayanımları 136-217 MPa arasında, çekme dayanımları 159-230 MPa arasında ve yüzde uzamaları ise % 2,28-5,44 arasında bulunmuştur.

1.2. Problem durumu

Bu çalışmada, yüksek frekans kaynağı ile boru üretimi ile ilgili geniş bir literatür bilgisine ve saha gözlemlerine yer verilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesindeki malzemenin mekanik özellikleri laboratuvar cihazları ile ölçülerek değerlerin hangi parametreye göre nasıl etkilendiği ile ilgili ele edilen veriler irdelenmiştir.[14]

Yapılan bu çalışmada, yüksek frekanslı indüksiyon kaynağında farklı üretim parametrelerinin kaynak bölgesi üzerindeki mekanik özellikleri üzerine çalışma yapılmış ve sonuçlanmıştır. Denemelerin daha güvenilir ve daha sağlıklı veriler elde edilebilmesi için bazı değişkenlikler (makine, kalıp, bant genişliği, hammadde, insan (operatör) farkı, soğutma) sabit tutulmuş ve bütün deneyler peş peşe gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, belirli üretim parametreleri (kaynak hızı, empeder pozisyonu, indüktör çapı, empeder çapı, makara çapı) değiştirildiğinde mekanik özellikler üzerinde farklı sonuçlar elde edilebileceği varsayılmış ve bu doğrultuda deneysel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, değiştirilen üretim parametrelerinin çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve sertlik gibi mekanik özellikler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir.

1.3. Araştırmanın amacı

Yüksek frekanslı kaynak teknolojisiyle ürün üretmek uzun yıllardan beri var olan bir üretim prosesidir. Fakat bu kaynak edilebilirlik ile ilgili kaynak teknolojisi üzerine geçmişte ve günümüzde birçok çalışmalar kaynak makinesi üreticileri tarafından yapılmıştır. Sezai Orhan tarafından (2008) yılında yapılan çalışmada sadece her parametrenin kaynak üzerindeki etkisi ile ilgili ayrı ayrı çalışmalar ve deneyler yapılmış olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise birden fazla değişken parametrelerin ortak bir şekilde değişmesinin sonuçları, korelasyon ve regrasyon analizi değerlendirilerek sonuçları minitab analizi ile ortaya konmuştur.

1.4. Araştırmanın önemi

Bu çalışmanın önemi, ERW kaynağı ile üretilen ürünlerin farklı parametre sonucu birbiri ile iç içe etkileşiminin tespit edilmesinde önemli katkılar sağlamak için yapılmıştır. Araştırmanın temel katkısı şu şekilde özetlenmiştir;

- Hammadde Seçiminde Verimliliğin Optimize Edilmesi; belli bir mekanik özelliklere sahip bir malzemenin kaynak edildikten sonra ortaya çıkan yeni mekanik özelliklerinin tespit edilmesi ile malzeme seçiminde daha bilinçli kararlar alınmasını sağlar. Yeni malzeme türlerinin geliştirilmesine ve mevcut malzemelerin performanslarının iyileştirilmesine katkı sağlar. Bu hem araştırma hem de endüstri açısından yenilikçi çözümler sunar.
- Mekanik Değerlerine Göre Üretim Parametrelerinin Tespit Edilmesi: üretime başlamadan önce malzemenin kullanım alanına ve yerine göre istenen mukavemete gelebilmesi için üretilmeden önce parametre değerlerinin ona göre ayarlanması sağlanır.

- Elektrik Enerjisi Sarfının Daha Ekonomik Olması: Farklı parametrelerden elde edilen sonuçlara göre yeteri kadar kaynak amper girdisi sağlanır ve enerji girdilerinde tasarruf sağlanırsa daha sürdürülebilir mühendislik çözümleri sunabilir. Malzemelerin daha verimli kullanılması, üretim maliyetlerini azaltırken çevresel etkileri de minimize eder.
Sonuç olarak, bu çalışmanın önemi, yüksek frekans kaynağı teknolojisi ile üretilen ürünlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi ile ilgili olup, mühendislik uygulamalarında bu teknoloji ile üretilen ürünlerin istenen mekanik özelliklerde üretilmesini ve verimli, güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır.

2. Malzeme ve Metot

Yüksek Frekanslı İndüksiyon kaynağı, indüktör bobini ile empeder arasındaki kaynak edilecek malzemenin akım yardımıyla kaynatılması işlemidir. Diğer bir ifadeyle transformatöre bağlı olarak çalışan indüktöre yüksek frekanslı akım yüklenir, yuvarlak şeklindeki malzemenin ise kesiştiği açık ağızlarda ise manyetik alan oluşturulur, Lenz kanuna göre manyetik alan içerisinde bulunan elektrik motorunun da indüklenmesi sonucu akımında indüklenmesi oluşur, Foucault akımlarının Joule etkisi ile ısı açığa çıkarılır böylece açık iki ağız kısmında apex noktasında kaynak oluşabilecek kadar ısı meydana gelir ve kaynak makaralarının baskısı sayesinde ısı kenarları bastırılır ve birleştirilir.

Bu çalışmada değişken parametrelerden hammadde, bant genişliği, ürün, makine, operatör, ürün gibi değişkenler sabit tutulmuş, empeder konumu ve çapı, kaynak makara çapı, indüktör çapı, kaynak hızı gibi etkenler toleranslar dahilinde değiştirilerek, kaynak bölgesi üzerinde ve mekanik özelliğin değişmesine nasıl bir performans gösterdiği araştırılmıştır. Deney çalışmasında ürün olarak 40x40x1,20mm ölçüsünde ürün üretilmesi noktasında deneme yapılması kararlaştırılmıştır. Bütün deneylerin tek bir makine de yapılması, aynı makine operatörü ile sürecin yürütülmesi kararlaştırılmıştır. Bütün deneyler için en önemli girdilerden birisi olan hammaddenin de sabit tutulması belirlenmiştir. Hammaddeden kaynaklı farklılıklar farklı sonuçları ortaya koyma ihtimali çok yüksek olduğu için hammaddeye bağlı değişkenliklerin ortadan kalkması hedeflenmiştir.

2.1. Sabit ve değişken parametrelerin tespit edilmesi

2.1.1. Hammadde seçimi

Deneyisel çalışmada DIN EN 10130 standardında DC01 kalite 1,20mm kalınlığındaki çelik sac kullanılarak, yüksek frekans indüksiyon kaynağı metodu ile farklı kaynak parametrelerinde 40x40x2 mm ebadında profiller üretilmiştir. Çalışmada kullanılan sacın hammadde sertifikasındaki kimyasal değerleri ve mekanik değerleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Hammadde sertifikasındaki mekanik ve kimyasal değerler.

Üretici	Detay Et Kalınlık	Mekanik Değerler			Kimyasal Değerler					
		Çekme Dayanımı Rp 0,2N/mm ²	Akma Dayanımı Rp 0,2N/mm ²	% Uzama	C	Mn	Si	S	P	Al
Ataşehir	1,09	316	190	38	0,046	0,186	0,004	0,006	0,009	0,107

Deneyde kullanılacak olan malzeme segrasyon hataları içermeyecek şekilde tercih edilmiştir. Hammadde Erdemir 6112 kaliteye denk gelecek şekilde seçilmiştir. Ataşehir tarafından üretilmiş olan hammadde yığın tavlama yöntemi ile ısıtılmış elektrik direnç kaynağına uygun bir hammaddedir. Kaynak kalitesine etki eden %Cu bakır oranı %0.15-0.35 arasında olacak şekilde, çekme dayanımı ve akma dayanımı minimum ve maksimum değerlerin ortalaması gelen ürün tercih edilmiştir. Bütün denemelerde aynı hammadde kullanılmıştır.

2.1.2. Bant genişliği seçimi

Bant genişliği tercihi ITAB bölgesinde segrasyon oluşmaması açısından önemlidir. Kaynak bölgesi mikroskop altında incelendiğinde oluşan kaynak akış çizgilerinin yataya paralele yakın olması istenir. Eğer bant genişliği olması gerekenden daha dar tutulursa segrasyon oluşma riski daha fazla artar. P. Yana, O.E. Gungor ve ark. (2011) tarafından yapılan deneyisel çalışmalarda bant genişliğinin 1mm daraltılması akış çizgisinin 4-7 derece yataydan uzaklaşmasına sebebiyet vermiş olduğu görülmüştür. Bu nedenle 40x40mm üretilecek ürün için en uygun bant genişliği için 159mm olacağı kararlaştırılmış ve bütün deneylerde aynı bant genişliği kullanılmıştır.

2.1.3. Vee açıklığı seçimi

ERW (Electric Resistance Welding – Elektrik Direnç Kaynağı) boru üretiminde geçen "Vee açıklığı", üretim sürecindeki kaynak bölgesinde oluşan "V" şeklindeki açıklığı ifade eder. Bu açıklık, kaynak kalitesini doğrudan etkileyen çok kritik bir parametredir. Vee açıklığının kaynak kalitesinin yüksek olması için mümkün olduğunca kısa olması istenir. Fakat Vee mesafesi kaynak makaralarının dış çapına bağlı olarak değişir. Vee mesafesi indüktör ile apex noktası arasındaki mesafede oluşan iki kenar bant arasındaki ölçüdür. Kaynak makara çapı 128mm büyük seçildiğinde mesafe uzaklaşır ve Vee açıklığı geniş ayarlanır, 103mm küçük seçildiğinde ise mesafe kısılır ve Vee açıklığı dar ayarlanmıştır.

2.1.4. Makine ve kalıp seçimi

Değişkenlik ne kadar çok olursa, deney sonucunda da farklı değerlerin oluşmasına neden olur. Makine ve kalıplardaki farklılıklar da deneyde farklı sonuçların oluşmasına neden olmaması için sabit tutulmuştur. Bütün deneylerde form finpass ve kalibre makaraları ile makine aynı olacak şekilde seçilmiştir.

2.1.5. İndüktör seçimi

İndüktör akımı yüzey etkisinden dolayı borunun dış yüzeyinde oluşur. Bu sebeple akımın en düşük kayıpla malzemeye aktarılması için bakır malzemeden yapılır. Borunun dış çapı ile indüktörün iç çapı arasındaki boşluk mümkün olduğunda en dar olacak şekilde (indüktör iç çapını mümkün olduğunca boru dış çapına yakın) seçilirse indüktörden en yüksek verimi elde edilir. Fakat kaynak akış yönüne doğru malzeme hareket ettiğinde de indüktörün malzemeye sürmemesi gerekir.

2.1.6. Empeder ebat seçimi ve konumu

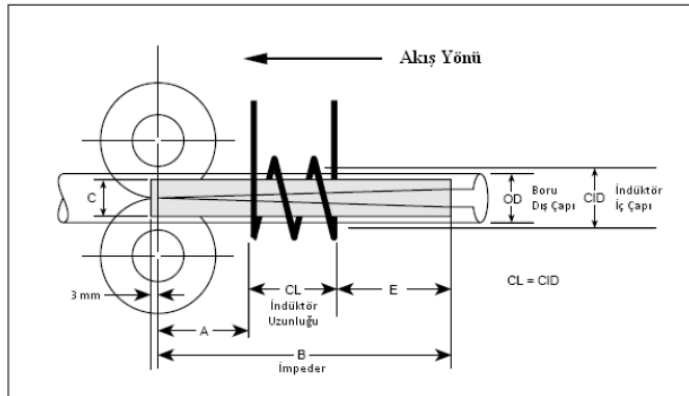
Empeder'den en yüksek verimi elde etmek için mümkün olduğunca boru iç çapına yakın seçilmesi gerekir. Bu oran pratikte boru iç çapının %75'i ile sınırlı olur. Burda da indüktör seçiminin tam tersi şekilde borunun iç çapı ile empederin dış çapı arasındaki boşluk mümkün olduğunda en dar olacak şekilde seçilirse empederden en yüksek verimi elde edilir. Fakat kaynak akış yönüne doğru malzeme hareket ettiğinde de empederin malzemeye sürmemesi gerekir. Empederin çapı büyüdükçe kaynak hızı da artar.

Deney çalışmasında üreteceğimiz 40x40x2,0mm profilin boru çapı 50,8mm'dir. Malzemenin et kalınlığı ise 2,00mm olduğundan boru iç çapını hesap ederken $\text{Boru Dış Çapı} - \text{Et kalınlığı} \times 2 = \text{Boru İç Çapı}$ formülünden faydalanılır. Buna göre; $50,8\text{mm} - 2,00 \times 2 = 46,8\text{mm}$ deney yapacağımız borunun iç çapı olarak bulunur. Yapılacak olan deney çalışmamızda Empederin dış çapını 34mm ve 40mm olarak deneme yapılacaktır.

34mm seçtiğimizde $34 / 46,8 = \%72,6$ doluluk oranı sahip iken,

40mm seçtiğimizde ise $40 / 46,8 = \%85,4$ doluluk oranı sahip olur.

Empederi pozisyonu ile ilgili olarak ise, borunun tam merkezine yerleştirmek yerine mümkün olduğunca kaynak noktasına daha yakın bir pozisyonda yerleştirilirse daha kaliteli kaynak elde etmek mümkün olur. Normalde indüktörün empederin tam ortasına gelecek şekilde pozisyonlanması, empederin ise kaynak bölgesine doğru ise kaynak makaralarının merkezini 3mm geçecek şekilde ayarlanması gerekir. Bu deney çalışmasında empeder kaynak makaralarının merkezini 10mm geçecek şekilde ve kaynak makaralarının merkezini 10mm gerisinde olacak şekilde ayarlanarak denemeler yapılmıştır.



Şekil 1. Empeder ve İndüktör Ebat Seçimi ve Konumu

2.1.7. Kaynak hızı

Farklı kaynak hızı değerlerinin, üretilen profilin kaynak dikişi geometrisine ve mekanik özelliklerine etkisini tespit edebilmek amacıyla 3 farklı düşük orta ve yüksek olacak şekilde hızların, 40 m/dak, 60 m/dak, 80 m/dak hızlarda üretimler gerçekleştirilecektir.

2.1.8. Kaynak makara grubu

Baskı miktarının ne kadar artarsa kaynak kalitesine olumlu bir etki yarattığı teorik olarak biliniyor olması nedeniyle, deney çalışması sırasında baskı miktarı değiştirilmeyecektir. Bu deney çalışmasında farklı kaynak makaraları çapları kullanılarak kaynak kalitesinde meydana gelen kalite durumları araştırılmıştır. Literatür taramalarında bu hususla ilgili bir çalışma geçmişte yapılmadığı görülmüştür. Makine üreticilerinin özel yazılımlara makara çapının maksimum ve minimum olarak kullanılabilecek çap aralıkları verilmiştir. Bu çaplara bağlı kalarak maksimum değere yakın ve minimum değere yakın 2 farklı makara işlenecek ve üretim aşamasında kaynak kalitesi üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Kaynak makaralarının çapı minimum 103mm ve maksimum 128mm olacak şekilde 2 farklı makara tasarlanacaktır.

2.2 Deneyisel çalışmalarda farklı kaynak parametrelerin irdelenmesi

Değişken parametrelere göre, toplamda 48 farklı durum ortaya konmuştur. Her bir durum birbirinin tekrar eden durumlar olmayıp, parametrelerin değişmesine göre farklı durumlar ortaya çıkmıştır.

1.Durumda ; kaynak makara çapı 128mm ve empederin çapı 40mm sabit tutulmuştur. İndüktör, kaynak makaralarının merkezine 100 mm mesafeye yerleştirilmiş, iki farklı indüktör (61 mm ve 67 mm) denenmiştir. Empeder pozisyonu, kaynak merkezine göre +10 mm ve -10 mm olacak şekilde değiştirilmiş; her kombinasyon için 40, 60 ve 80 m/dak üretim hızlarında üretim yapılmıştır.

Tablo 2. Durum 1 Kaynak Parametreleri

İndüktör Konumu	Makara Çapı mm	Empeder Çapı mm	İndüktör Çapı mm	Empeder Konumu mm	Kaynak Hızı m/dk	Numune Kodu
Kaynak Makara Merkezini 100mm	Kaynak Makara Çapı 128mm	40mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	1
		40mm	61mm		60 m/dk	2
		40mm	61mm		80 m/dk	3
		40mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	4
		40mm	61mm		60 m/dk	5
		40mm	61mm		80 m/dk	6
		40mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	7
		40mm	67mm		60 m/dk	8
		40mm	67mm		80 m/dk	9
		40mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	10
		40mm	67mm		60 m/dk	11
		40mm	67mm		80 m/dk	12

2.Durumda ; Kaynak makarası çapı 128 mm olarak korunmuş, empeder çapı 34 mm'ye düşürülmüştür. Diğer parametreler Durum 1 ile aynı şekilde uygulanmıştır (indüktör mesafesi 100 mm, indüktör çapları 61 mm ve 67 mm, empeder pozisyonları ± 10 mm, üretim hızları 40/60/80 m/dak).

Tablo 3. Durum-2 Kaynak Parametreleri

İndüktör Konumu	Makara Çapı mm	Empeder Çapı mm	İndüktör Çapı mm	Empeder Konumu mm	Kaynak Hızı m/dk	Numune Kodu
Kaynak Makara Merkezini 100mm	Kaynak Makara Çapı 128mm	34mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	13
		34mm	67mm		60 m/dk	14
		34mm	67mm		80 m/dk	15
		34mm	67mm		40 m/dk	16

		34mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	60 m/dk	17
		34mm	67mm		80 m/dk	18
		34mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	19
		34mm	61mm		60 m/dk	20
		34mm	61mm		80 m/dk	21
		34mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	22
		34mm	61mm		60 m/dk	23
		34mm	61mm		80 m/dk	24

3.Durumda ; Kaynak makarası çapı 103 mm olarak seçilmiş, empeder çapı 34 mm sabit tutulmuştur. Diğer deney parametreleri Durum 2 ile aynıdır.

Tablo 4. Durum-3 Kaynak Parametreleri

İndüktör Konumu	Makara Çapı mm	Empeder Çapı mm	İndüktör Çapı mm	Empeder Konumu mm	Kaynak Hızı m/dk	Numune Kodu
Kaynak Makara Merkezini 100mm	Kaynak Makara Çapı 103mm	34mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	25
		34mm	61mm		60 m/dk	26
		34mm	61mm		80 m/dk	27
		34mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	28
		34mm	61mm		60 m/dk	29
		34mm	61mm		80 m/dk	30
		34mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	31
		34mm	67mm		60 m/dk	32
		34mm	67mm		80 m/dk	33
		34mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	34
		34mm	67mm		60 m/dk	35
		34mm	67mm		80 m/dk	36

4.Durumda ; Kaynak makarası çapı 103 mm olarak sabit kalmış, empeder çapı bu kez 40 mm'ye çıkarılmıştır. Diğer parametreler yine aynı şekilde sabit tutulmuştur.

Tablo 5. Durum-4 Kaynak Parametreleri

İndüktör Konumu	Makara Çapı mm	Empeder Çapı mm	İndüktör Çapı mm	Empeder Konumu mm	Kaynak Hızı m/dk	Numune Kodu
Kaynak Makara Merkezini 100mm	Kaynak Makara Çapı 103mm	40mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanacak	40 m/dk	37
		40mm	67mm		60 m/dk	38
		40mm	67mm		80 m/dk	39
		40mm	67mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	40
		40mm	67mm		60 m/dk	41
		40mm	67mm		80 m/dk	42
		40mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezinden 10 mm geride olacak şekilde ayarlanacak	40 m/dk	43
		40mm	61mm		60 m/dk	44
		40mm	61mm		80 m/dk	45

	40mm	61mm	Kaynak Makaraları Merkezini 10 mm geçecek şekilde ileride ayarlanaacak	40 m/dk	46
	40mm	61mm		60 m/dk	47
	40mm	61mm		80 m/dk	48

2.3. Deneysel çalışmalarda yapılan testler ve muayeneler

2.3.1. Yassılma Deneyi

Farklı kaynak parametrelerinde ürettiğimiz numunelerin şekil alabilme kabiliyetini ve kaynak kalitesini ölçebilmek için yassılma deneyi EN10233'e uygun olarak yapılmıştır. Yassılma testinde et kalınlığı dış çapın %15'inden az olması gerekir. Boru kesiti, bir preste paralel yüzlemler arası H mesafesi aşağıdaki Formül-1 ile verilen değere ulaşana kadar yassıtılır.

$$H = \frac{(1+e).t}{1+\left(\frac{t}{D}\right)} \quad (1)$$

H: Karşılıklı düzlemler arasındaki uzaklık [mm]

D: Dış çap [mm]

T: Et kalınlığı [mm]

C: Sabite olup değeri Tablo-6'da verilmiştir.

Tablo 6. Yassılma Deneyi Standartı

Çelik Kalitesi		
Çelik Adı	Çelik Numarası	C
E 155	1..0033	0,10
E 195	1..0034	0,09
E 235	1..0308	0,09
E 275	1..0225	0,07
E 355	1..0580	0,07

Deney sırasında kullandığımız hammaddenin Akma Dayanımı 190Rp 0,2N/mm² gelmektedir. Bu sebeple E değeri için E 155 standardına göre deney yapılması uygundur. C sabit katsayısı bu tabloya göre 0,10 değeri alınacaktır. Deney için hazırladığımız numuneler 40x40 profil ölçüsü olup, boru dış çapı Ø50,8mm'dir.

D: 50,8 [mm]

T: 1,09 [mm]

C: 0,10

H= [(1+ 0,10)/(0,10+(1,09/50,8))]x1,09 =10mm olarak hesap edilmiştir.

Numuneler EN 10233 standardında belirlenmiş değere ulaşana kadar baskı plakaları arasında, bir tarafı kaynak yanda (saat 3 pozisyonu) diğer tarafı da kaynak üstte (saat 12 pozisyonu) olacak şekilde yassılma işlemi Baskı plakaları arasındaki uzaklık EN 10233 standardında verilen yukarıdaki denkleme göre 10mm olacak şekilde uygulanmıştır. Deney sonrası numune parçalarda çatlak ve kırılma olmamalıdır.



Şekil 2. Yassıtma Deneyleri

4 ayrı durum ve 48 farklı numune üzerinde yassıtma deneyi sonucu Nitel veriler elde edilmiş olup KABUL yada RED olarak tespitlerde bulunulmuştur. Deney sonrası numune parçalarda çatlak ve kırılma olmamalıdır. Ancak kenarlarda hafif çatlak red olarak değerlendirilmemiştir.

Tablo 7. Yassıtma Deneyleri Sonuçları

Numune Kodu	Yassıtma Testi Deney Sonucu	Numune Kodu	Yassıtma Testi Deney Sonucu	Numune Kodu	Yassıtma Testi Deney Sonucu	Numune Kodu	Yassıtma Testi Deney Sonucu
1	Kabul	13	Kabul	25	Kabul	37	Kabul
2	Kabul	14	Kabul	26	Kabul	38	Kabul
3	Kabul	15	Kabul	27	Kabul	39	Kabul
4	Kabul	16	Kabul	28	Kabul	40	Kabul
5	Kabul	17	Kabul	29	Kabul	41	Kabul
6	Kabul	18	Kabul	30	Kabul	42	Kabul
7	Kabul	19	Kabul	31	Kabul	43	Kabul
8	Kabul	20	Kabul	32	Kabul	44	Kabul
9	Kabul	21	Kabul	33	Kabul	45	Kabul
10	Kabul	22	Kabul	34	Kabul	46	Kabul
11	Kabul	23	Kabul	35	Kabul	47	Kabul
12	Kabul	24	Kabul	36	Kabul	48	Kabul

2.3.2 Ağız genişletme deneyi

Deney EN10234'e uygun olarak 60°'lik konik bir mandrelle yapılacaktır. Boru kesiti Tablo-10'da gösterilen dış çaptaki % artışa ulaşılan kadar genişletilmiştir.

Tablo 8. Ağız Genişletme Deney Standartı

Çelik Kalitesi		Aşağıdakiler İçin D Çapında % Artış	
Çelik Adı	Çelik Numarası	T<4mm	T>4mm
E 155	1..0033	22	17
E 195	1..0034	20	15
E 235	1..0308	18	12
E 275	1..0225	15	10
E 355	1..0580	15	10

Deney sırasında kullandığımız hammaddenin Akma Dayanımı 190Rp 0,2N/mm² gelmektedir. Bu sebeple E değeri için E 155 standardına göre deney yapılması uygundur. Deney için hazırladığımız numuneler 40x40 profil ölçüsü olup, boru çapı Ø50,8mm'dir. Numunenin detay et kalınlığı ise 1,09mm olduğundan T değeri içinde T<4mm seçilecektir. Deney için kullandığımız borunun dış çapı 50,8 olduğundan Tablo-11 deki D dış çapındaki artış oranı

%22 olarak hesaplanmıştır. Ağız Genişletme Dış Çapı: $D \times \%22 = 50,8 \times \%22 = \varnothing 62\text{mm}$ 'e kadar çap genişletilerek test edilmiştir.



Şekil 3. Ağız Genişletme Deneyleri

4 ayrı durum ve 48 farklı numune üzerinde yassılma deneyi sonucu Nitel veriler elde edilmiş olup KABUL ya da RED olarak tespitlerde bulunulmuştur. Deney sonrası numune parçalarda çatlak ve kırılma olmamalıdır. Ancak kenarlarda hafif çatlak red olarak değerlendirilmemiştir.

Tablo 9. Ağız Genişletme Deneyleri Sonuçları

Numune Kodu	Ağız Genişletme Deney Sonucu	Numune Kodu	Ağız Genişletme Deney Sonucu	Numune Kodu	Ağız Genişletme Deney Sonucu	Numune Kodu	Ağız Genişletme Deney Sonucu
1	Kabul	13	Kabul	25	Kabul	37	Kabul
2	Kabul	14	Kabul	26	Kabul	38	Kabul
3	Kabul	15	Kabul	27	Kabul	39	Kabul
4	Kabul	16	Kabul	28	Kabul	40	Kabul
5	Kabul	17	Kabul	29	Kabul	41	Kabul
6	Kabul	18	Kabul	30	Kabul	42	Kabul
7	Kabul	19	Kabul	31	Kabul	43	Kabul
8	Kabul	20	Kabul	32	Kabul	44	Kabul
9	Kabul	21	Kabul	33	Kabul	45	Kabul
10	Kabul	22	Kabul	34	Kabul	46	Kabul
11	Kabul	23	Kabul	35	Kabul	47	Kabul
12	Kabul	24	Kabul	36	Kabul	48	Kabul

2.3.3 Sertlik test deneyi

Deneylerde farklı hızlar ve farklı makara çapları ile kaynak baskıları uygulanarak kaynak bölgesinin ısı tesiri altındaki yüzey sertliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Vickers sertlik ölçüm cihazı ile 5kg'lık (HV5) yük uygulanmak suretiyle ölçümler yapılmıştır. Her bir numune üzerindeki ısı tesiri altındaki 3 ayrı noktadan ölçümler yapılmıştır.



Şekil 4. Sertlik Ölçümü Deneyleri

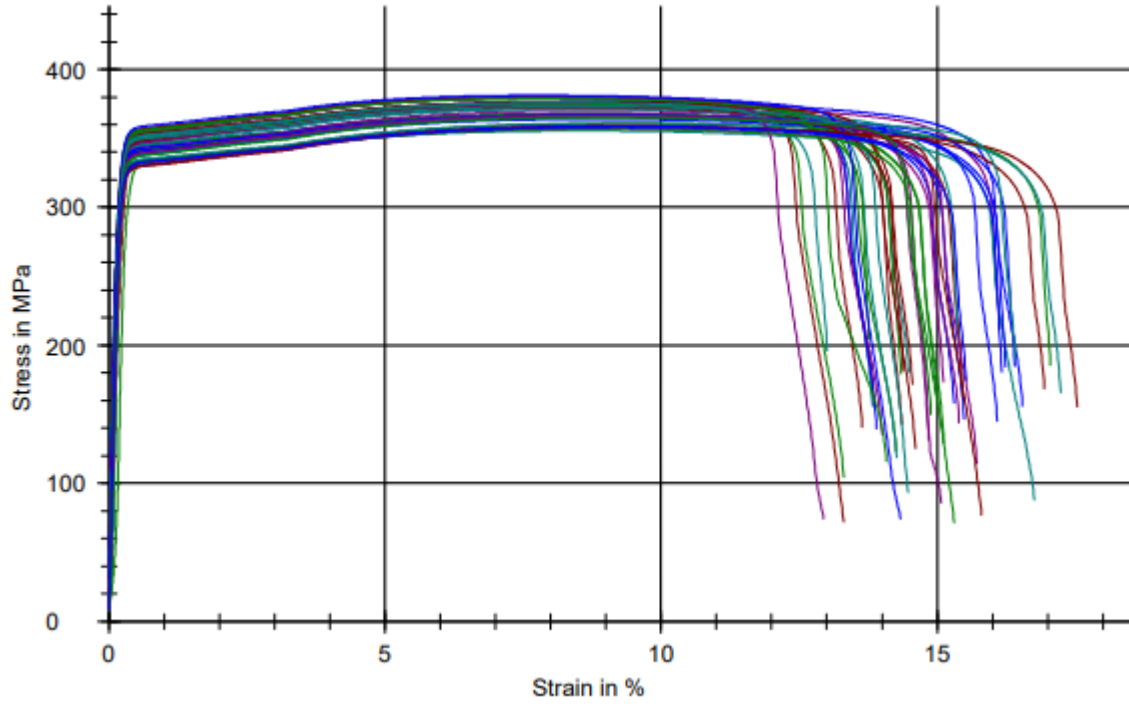
Tablo 10. Sertlik Ölçümü Deneyleri Sonuçları

Numun e Kodu	Yüzey Sertliği Ortalaması (HRB)	Numun e Kodu	Yüzey Sertliği Ortalaması (HRB)	Numun e Kodu	Yüzey Sertliği Ortalaması (HRB)	Numun e Kodu	Yüzey Sertliği Ortalaması (HRB)
1	74,8	13	70,3	25	79,4	37	80,6
2	75,5	14	72,7	26	80,7	38	81,1
3	75,1	15	74,5	27	80	39	80,9
4	75,1	16	78	28	79,3	40	75,7
5	76,3	17	75,6	29	82,3	41	79,2
6	75,4	18	78,5	30	81,9	42	77,7
7	76,8	19	76,3	31	79,2	43	76,2
8	75,7	20	74,3	32	79,6	44	69
9	76,1	21	75,3	33	80,7	45	73,9
10	75,4	22	75,9	34	81,5	46	78,5
11	74,9	23	76,8	35	76,1	47	79,2
12	74,9	24	80,4	36	80,9	48	78,4

2.3.4. Çekme Testi Deneyi

Yüksek frekans indüksiyon kaynak tekniği ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak üretilen kutu kare profillerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılarak gerilim - uzama eğrileri elde edilmiştir. Tablolar halinde bütün numunelerin çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Farklı kaynak parametrelerine ait numunelerin gerilim - uzama eğrileri ayrı ayrı gösterilmiştir. Farklı parametrelerle üretilen her bir numune üzerinden aşağıda görselde gösterildiği şekilde kaşık numunesi lazer yöntemiyle kesip çıkarılmış ve her bir numuneye ayrı ayrı çekme testi uygulanmıştır.

**Şekil 5.** Çekme Testi Deneyleri



Şekil 6. Zwick Çekme Testi Deney Sonuçları

Tablo 11. Çekme Testi Deneyleri Sonuçları

Numune Kodu	Çekme Testi Çekme Muk. N/mm2	Çekme Testi % Muk. N/mm2	Çekme Testi Kopma Uzaması N/mm2	Çekme Testi Akma Dayanımı Rp MPa	Numune Kodu	Çekme Testi Çekme Muk. N/mm2	Çekme Testi % Muk. N/mm2	Çekme Testi Kopma Uzaması N/mm2	Çekme Testi Rp MPa
1	374	349	14,3	344	13	380	358	13,8	352
2	374	350	13,3	345	14	376	352	14,2	346
3	366	341	16	335	15	374	350	16	343
4	379	358	13,7	353	16	380	359	13,6	352
5	373	349	13,9	344	17	379	358	14,3	352
6	376	351	13,2	343	18	377	354	16,4	349
7	373	352	14,2	345	19	355	335	16,7	330
8	368	346	15,4	340	20	370	343	15	336
9	372	349	14,4	343	21	358	331	16,9	325
10	380	359	13,8	352	22	361	335	17	329
11	376	355	14,4	349	23	366	340	16,1	334
12	368	347	14,9	341	24	361	336	17,2	330
Numune Kodu	Çekme Testi Çekme Muk. N/mm2	Çekme Testi % Muk. N/mm2	Çekme Testi Kopma Uzaması N/mm2	Çekme Testi Rp MPa	Numune Kodu	Çekme Testi Çekme Muk. N/mm2	Çekme Testi % Muk. N/mm2	Çekme Testi Kopma Uzaması N/mm2	Çekme Testi Rp MPa
25	373	349	14,8	344	37	379	357	14	351
26	366	343	15,4	336	38	381	360	14,3	354
27	367	344	15,1	339	39	376	354	12,9	347
28	364	342	16,2	336	40	357	334	15,6	330
29	371	347	15,2	342	41	358	334	17,5	328

30	367	345	15	339	42	357	335	14,7	330
31	373	350	14,3	344	43	358	332	15,2	326
32	375	354	13,6	349	44	366	339	16,3	334
33	367	345	16,3	339	45	367	341	15,3	337
34	373	351	14,4	345	46	359	332	15,8	326
35	380	356	12,9	350	47	365	339	15,3	334
36	377	355	14,5	350	48	359	334	15,4	329

2.4 Metot

Minitab, Pennsylvania State Üniversitesi'nde 1972 yılında geliştirilmiş bir istatistik yazılım programı olup, ilk başta üniversite öğrencilerinin istatistiği öğretmek amacıyla tasarlanan bu program, zamanla profesyonel bir analiz aracına dönüşmüş, mevcutta birçok kurumsal işletmelerde, üniversitelerde, araştırma görevlileri ve eğitimciler tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Minitabın amacı elde edilen nitel veya nicel verilerin görselleştirilmesi, analiz edilmesinde kullanılan yazılımsal bir istatistik programdır. Çeşitli endüstrilerde ve akademik kurumlarda istatistiksel analiz, kalite iyileştirme ve süreç optimizasyonu için yaygın olarak tercih edilmektedir.

Netice itibariyle, deneysel çalışmalardan elde edilen 48 farklı durumdaki sonuçları minitab sayesinde mühendislerin daha etkin tasarımlar yapmalarını, malzemelerin performansını optimize etmelerini ve ürünlerin mukavemet ve dayanıklılığını artırmalarını sağlar. Malzeme seçiminde farklı kaynak parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, çoklu korelasyon analizi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

3. Modelleme ve analiz

3.1. Deneye olumsuz etki edecek değişkenliklerin sınırlandırılması

Bütün deneysel çalışmada DIN EN 10130 standardında DC01 kalite 1,20mm kalınlığındaki çelik sac kullanılarak 40x40x2 mm ebadında profiller üretilmiştir. Deneyde kullanılacak olan malzeme segrasyon hataları içermeyecek şekilde tercih edilmiştir. Hammade Erdemir 6112 kaliteye denk gelecek şekilde seçilmiştir. 40x40mm üretilen ürün için en uygun bant genişliği için 159mm olacağı kararlaştırılmış ve bütün deneylerde aynı bant genişliği kullanılmıştır. Vee mesafesi indüktör ile apex noktası arasındaki mesafede oluşan iki kenar bant arasındaki ölçü olduğundan kaynak makara çapı büyüdükçe Vee mesafesi de orantılı olarak artacak şekilde ayarlanmıştır. Deneysel süreçte farklılıkların etkisini sınırlamak amacıyla makine, kalıplar ve operatör sabit tutulmuştur.

Öncelikle hammadde ayarlanmış ve deney için hazır edilmiş ve aynı gün içinde bütün deneyler boru profil hatlarında tek kalemde üretilmiştir.

3.2. Deneyde test edilecek farklı parametreler

İndüktör, yüksek frekans kaynak teknolojisinde başlıca kullanılan diğer bir ekipmandır. İndüktör kaynak makinesinde aldığı enerji ile boru etrafında manyetik bir akı oluşturur. Borunun dış çapı ile indüktörün iç çapı arasındaki boşluk mümkün olduğunda en dar olacak şekilde seçilir. Bu çalışmada üretilen 40x40mm profilin kaynak bölgesindeki boru çapı 50,8mm'dir. İndüktörün çapıda 50,8mm daha büyük olacak şekilde seçilecektir. Deney çalışmamda tolerans dâhilinde 2 farklı indüktör çapı 61mm ve 67mm tercih edilmiştir.

Empeder'den en yüksek verimi elde etmek için mümkün olduğunca boru iç çapına yakın seçilmesi gerekir. Bu oran pratikte boru iç çapının %75'i ile sınırlı olur. Burada da indüktör seçiminin tam tersi şekilde borunun iç çapı ile empederin dış çapı arasındaki boşluk mümkün olduğunda en dar olacak şekilde (empederin dış çapını mümkün olduğunca boru iç çapına yakın) seçilirse empederden en yüksek verimi elde edilir. Deney çalışmasında üreteceğimiz 40x40x2,0mm profilin boru çapı 50,8mm'dir. Malzemenin et kalınlığı ise 2,00mm olduğundan boru iç çapını hesap ederken $\text{Boru Dış Çapı} - \text{Et kalınlığı} \times 2 = \text{Boru İç Çapı}$ formülünden faydalanılır. Buna göre; $50,8\text{mm} - 2,00 \times 2 = 46,8\text{mm}$ deney yapılan borunun iç çapı olarak bulunur. Yapılan deney çalışmasında Empederin dış çapı 34mm ve 40mm olarak tercih edilmiştir.

Empederi pozisyonu ile ilgili olarak ise, borunun tam merkezine yerleştirmek yerine mümkün olduğunca kaynak noktasına daha yakın bir pozisyonda yerleştirilirse daha kaliteli kaynak elde etmek mümkün olur. Bu deney

çalışmasında empeder kaynak makaralarının merkezini 10mm geçecek şekilde ve kaynak makaralarının merkezini 10mm gerisinde olacak şekilde ayarlanarak denemeler yapılmıştır.

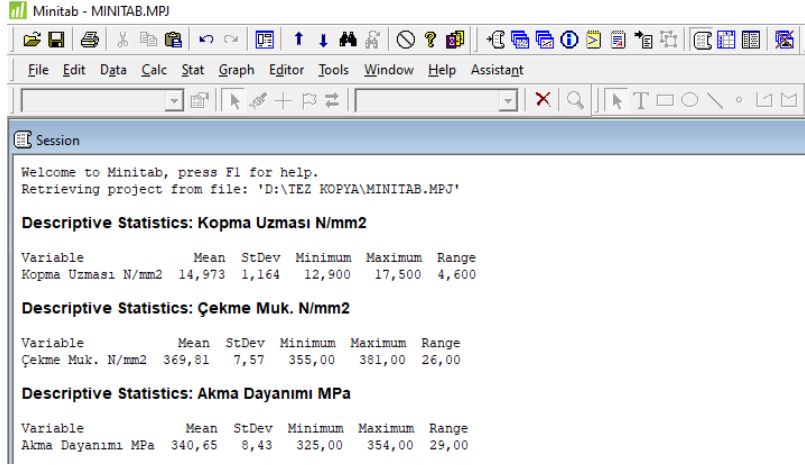
Farklı kaynak hızı değerlerinin, üretilen profilin kaynak dikişi geometrisine ve mekanik özelliklerine etkisini tespit edebilmek amacıyla 3 farklı düşük orta ve yüksek olacak şekilde hızların, 40, 60, 80 m/dak hızlarda üretimler gerçekleştirilmiştir.

Baskı miktarının ne kadar artarsa kaynak kalitesine olumlu bir etki yarattığı teorik olarak biliniyor olması nedeniyle, deney çalışması sırasında baskı miktarı değiştirilmeyecektir. Maksimum değere yakın ve minimum değere yakın 2 farklı makara işlenecek ve üretim aşamasında kaynak kalitesi üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Kaynak makaralarının çapı minimum 103mm ve maksimum 128mm olacak şekilde 2 farklı makara tasarlanmıştır.

3.4. Analiz

Bu aşamada, yassılma, ağız genişletme, çekme ve sertlik ölçümleri sonucu elde edilen sayısal bulguların malzemenin mekanik davranışları üzerindeki etkisi minitab programı ile analiz edilmiştir.

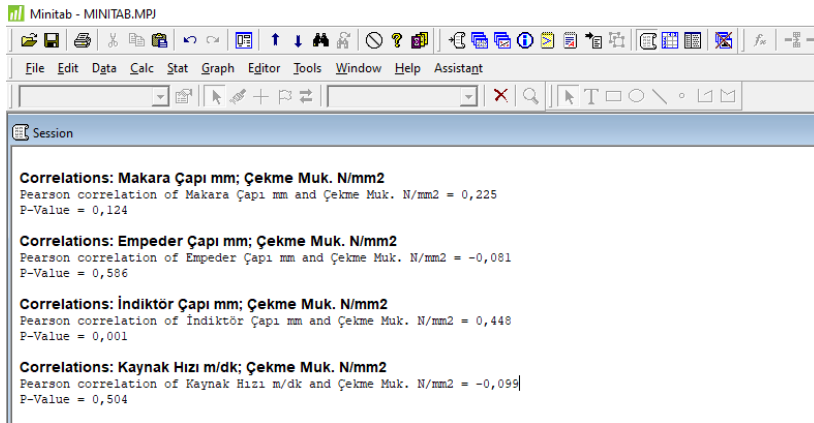
Histogram diyagramı ile Çekme testi sonucunda elde edilen Çekme Mukavemeti, Kopma Uzaması, %Mukavemet ve Akma Dayanım değerleri analiz edilmiş, Çekme Testi sonucu 48 adet numuneden elde edilen nicel veriler Histogram grafiği üzerinde gösterilmiş, ayrıca minimum, maksimum, standart sapması, ortalaması gibi tüm istatistiksel veriler Şekil-6 üzerinde görsel olarak Minitab ile gösterilmiştir.



Şekil 7. Kopma Uzaması, Çekme Mukavemeti ve Akma Dayanımı İstatistiksel Analizi

Boxplot kutu grafiği ile her bir değişken parametrenin, malzeme üzerindeki Çekme Mukavemeti, Kopma Uzaması ve Akma Dayanım değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Box plot (kutu) grafiği, verinin alt ve üst sınırlarını (minimum ve maksimum değerleri, aykırı değerler hariç) gösterir. Verinin ne kadar yaygın (dağılım) olduğunu anlamaya yardımcı olur. Medyan (ortanca) çizgisi sayesinde verinin ortasındaki değeri kolayca görmeyi sağlar.

Çekme Deneyi sonucunda elde edilen verilerin çekme mukavemeti üzerinde makara çapı mı, empeder çapı mı, empeder pozisyonu mu, indüktör çapı mı, kaynak hızının mı etkisinin daha çok olduğuna dair korelasyon yöntemi kullanılarak inceleme yapılmış olup;



Şekil 8. Korelasyon Yöntemi ile Parametrelerin Analizi

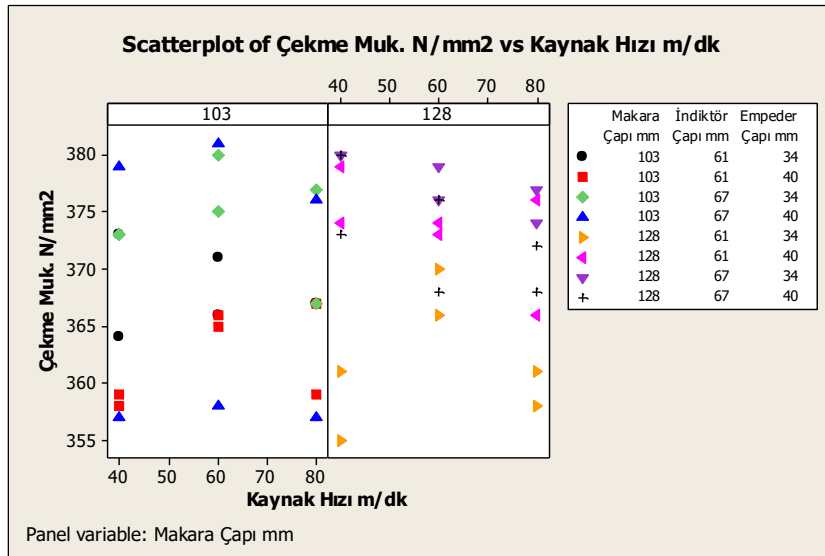
Bu sonuçlara göre, çekme mukavemetini arttırmak istiyor isek, değişkenlerden en fazla etkiyi **İndüktör çapının** etkilediği görülmüştür. **Empeder Çapı ve Kaynak Hızının** ise, çekme mukavemeti üzerindeki etkisi en düşüktür. Makara çapının çekme mukavemeti üzerinden etkisi olduğundan bahsedebiliriz, fakat diğerlerine oranla daha düşüktür.

Scatterplot diyagramı ile Çekme Mukavemeti üzerinde diğer değişkenliklerinin (kaynak hızı, makara çapı, indüktör çapı ve empeder çapı) tamamının birbiri arasındaki ilişkiyi görmememize yardımcı olan bir diyagramdır. Her bir durum farklı simge (kare, yuvarlak, üçgen, artı şeklinde) farklı renklerle (kırmızı, siyah, turuncu yeşil...) ifade edilerek Çekme Deneyinde elde edilen sonuçların tek bir grafik üzerinde değerlendirilmesinde fayda sağlamaktadır.

Graphical Summary (özet grafik) yöntemi ile farklı parametrelerin sertlik ölçümü üzerindeki ilişkisi çıkartılmış ve elde edilen verilerin kaynak kalitesi üzerinde etkisi olup olmadığı ile ilgili analizler yapılmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada tüm veriler Minitab analiz programı ile analiz edilmiş ve değişken parametrelerin kaynak bölgesinde malzemenin mekanik özelliklerine ortaya koyulmuştur.



Tablo12. Scatterplot Diyagramı ile Parametrelerin Analizi

Yapılan araştırmalar sonucu bütün deneylerin yassılma, ağız genişletme testlerinden başarılı bir şekilde geçtiği görülmüştür. Sertlik ölçümlerinde de farklı değerler saptanmış ise de birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu ve standart sapmalarının kayda değer bir miktarda olmadığından bütün parametreler için aynı olduğu kabul edilmiştir. Deneylerin sonucunda Çekme, akma ve kopma uzamalarında farklı sayısal değerler elde edilmiş ve bunlara göre şu kaniya varmak mümkün olmuştur;

Kaynak hızının, empeder çapının ve makara çapının çekme, akma ve kopma üzerinde etkileri olduğu ancak bu etkinin düşük olduğu saptanmıştır. Empeder pozisyonunu değiştirmek ve indüktör çapını değiştirmek ise malzemenin çekme, akma ve kopma uzaması üzerinde daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. Eğer ki malzeme de işlem sonrası yüksek mukavemetli kaynak bölgesi ve akma dayanımı istenirse, indüktör çapının toleranslar dâhilinde büyük seçilmesi ve empederin tolerans dâhilinde ileride ayarlanması mukavemetin daha dayanıklı olacağını, yük taşıma kapasitesinin yüksek olacağı anlamına gelirken, kopma uzaması düşük olması sebebiyle kırılma dayanımında düşeceği anlamına gelir. Eğer ki malzemede işlem sonrası yüksek çekme ve akma dayanımı düşük, fakat kopma uzaması yüksek olması istenir ise bu sefer tam tersi işlem yapılmalı ve bu durumda malzeme daha fazla tokluğa sahip olacağı için eğme ve bükmelere karşı daha fazla dayanıklı bir malzeme elde etmek mümkündür.

Yapılan bütün çalışmalarda, düşük toleranslı değişikliklerin malzemenin mekanik özelliği üzerinde nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Yassılma ve ağızda genişletme test sonucu elde edilen verilerin tamamında "Kabul" kriterinde çıkması parametrelerin dar toleranslı seçilmesinden kaynaklanmıştır.

Değişkenlerin mukavemet akma ve kopma dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmış ve en fazla etkinin indüktör çapı ile empeder pozisyonunda olduğu görülmüştür. Bu sebeple kaynak bölgesinde yüksek çekme mukavemet ve akma

dayanımı isteniyorsa, empeder pozisyonu tolerans içinde kaynak makara merkezinden ileri olacak şekilde ayarlanmalı, indüktör çapı da optimum büyük seçilebilir. Sezai Orhan tarafından (2008) yılında yapılan çalışmada, indüktör çapının boruya temas etmeden minimum seçilmesinin daha doğru olacağı bahsedilmiş ise de, yapılan bu çalışmaya göre, tolerans dahilinde indüktörün daha büyük seçilmesi, üzerinden geçen akının artmasıyla birlikte daha mukavemetli ve akma dayanımı yüksek ürün elde etmenin mümkün olabileceği saptanmıştır. Ayrıca bu çalışma bize farklı birden fazla parametrenin aynı anda değiştirildiğinde nasıl bir sonuç elde edilebileceğinin etkisini gösteren bilimsel bir çalışma olmuştur.

Yüksek mukavemetli kaynak bölgesi ve akma dayanımı istenirse indüktör çapını toleranslar dahilinde 40mm seçilmesi ve empeder tolerans dahilinde 10mm ileride ayarlandığında çekme mukavemeti 375-380 N/mm², kopma uzaması ise 13-14 N/mm² ölçülürken, tam tersi durumda malzeme daha fazla tokluğa sahip olacağı için eğme ve bükmelere karşı daha fazla dayanıklı bir malzeme elde etmek için indüktör çapını toleranslar dahilinde 34mm seçilmesi ve empeder tolerans dahilinde 10mm geride ayarlanması durumunda ise çekme mukavemeti 355-360 N/mm² kopma uzaması ise yüksek 16,7-17 N/mm² ölçülmüştür.

Kaynakça

- [1] Fan Yang, Tong Wen, Qiufeng Wang, Longzhu Zhang, Hailong Liu, Yang Zhou 2024 Effect of high-frequency induction weld seam on the deformation of M1700 ultra-high strength steel shell structures considering residual tensile stress
- [2] Christian Egger, Marco Luchinger, Michael Schreiner and Wolfgang Tillmann 2022 Numerical Simulation of Tube Manufacturing Consisting of Roll Forming and High-Frequency Induction Welding
- [3] Gholamreza Khalaj, Hesam Pouraliakbar, Mohammad Reza Jandaghi, Abbas Gholami, (2007) HF-ERW tekniği ile mikro alaşımlı çelik kaynaklar ile yeni PWHT çevrimleri
- [4] P. Yana, O.E. Gungor, P. Thibaux, M. Liebeherr, H.K.D.H. Bhadeshia (2011) Tackling the toughness of steel pipes produced by high frequency induction welding and heattreatment
- [5] Hakan GÜNAY, Süleyman KARADENİZ, TMM, Tahribatsız Malzeme Muayene San. ve Tic. Ltd.Şti, Bursa DEU, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
- [6] Wright, J., 1997: Principles of High Frequency Induction Tube Welding, Electronic Heating Equipment Inc. Technical Paper Sumner, Washington
- [7] Cunfeng Kang, Chunyang Shi , Zixiao Liu, Zhifeng Liu, Xiaoqing Jiang, Shunjun Chen, Chunmin Ma, (2020) Research on the optimization of welding parameters in high-frequency induction welding pipeline
- [8] By D. Kim, T. Kim, Y. W. Park, K. Sung, M. Kang, C. Kim, C. Lee, And S. Rhee Kaynak Kalitesinin Tahmini Yüksek Frekanslı Elektrik Direnç Kaynağı Görüntü İşleme
- [9] Joonmin Lee, Dongwook Kim, Luca Quagliato, Soochang Kang, Naksoo Kim, 2017 Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect
- [10] Prerana Das, John Inge Asperheim, Bjørnar Grande, Thomas Petzold, Dietmar Hömberg 2017 Simulation of temperature profile in longitudinal welded tubes during High- Frequency Induction (HFI) welding
- [11] Prerana Das, John Inge Asperheim and Bjørnar Grande, Thomas Petzold, Dietmar Hömberg 2019 Three-dimensional numerical study of heat-affected zone in induction welding of tubes
- [12] E Yeniyl, C Boga, U Esme (2019) Effects of ultrasonic welding parameters for solar collector applications
- [13] O Er, MK Külekci, U Eşme, C Boğa (2021) Multi Response Optimization of Friction Stir Spot Welding Process Using Taguchi Based Grey Relational Analysis
- [14] Ş Öcalır, U Eşme, C Boğa, MK Külekci 2020 Investigation Of Mechanical And Metallographic Properties Of Two Different Aluminum Alloys Joined With Friction Stir Welding Method Using Different Welding Parameters
- [15] Ahmet Serdar GÜNDOĞDU (2012) Yüksek Frekanslı İndüksiyon Kaynağı Yöntemiyle Üretilen Boyuna Dikişli Çelik Borularda Kullanılan Mikro Alaşımlı Malzemelerin Kaynak Zayıflığının Azaltılması
- [16] Orhan, S. (2008). Yüksek frekans kaynağı ile birleştirilen çelik profillerin mekanik özelliklerinin incelenmesi
- [17] Merve SEYYİTOĞLU (2020) Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynaklı Çelik Borularda Meydana Gelen Çatlaklara Triz Yaklaşımı