

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Proje No: FEN-A-110915-0433

Proje Türü
A TİPİ PROJE

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Mustafa Kemal BİLİCİ
Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu/Kuyumculuk ve Mücevher Tasarımı

Ahmet İrfan YÜKLER
Nişantaşı Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği

Memduh KURTULMUŞ
Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu/Kuyumculuk ve Mücevher Tasarımı

İlyas KARTAL
Teknoloji Fakültesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Eylül 2021
İSTANBUL

TEŞEKKÜR

Bu proje Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FEN-A-110915-0433 nolu proje ile desteklenmiştir. Projenin ilerleyişinde ve malzeme-araç gereç alımlarında bize yol gösteren BAP birimindeki Engin ŞİMŞEK ve Hakan DOĞAN' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	
ABSTRACT	
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM	3
4. BULGULAR	6
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	25
KAYNAKLAR	27
EKLER	30

ÖZET

Sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) temel prensibi, kendi ekseninde dönen kaynak takımının malzemeye temas etmesi ile karıştırma bölgesinde meydana gelen sıcaklığı kaynak yapılacak hat boyunca ilerlemesini sağlamaktır. Belli sıcaklığa ulaşan ve plastik deformasyona uğrayan malzemeyi kaynak hattı boyunca homojen bir şekilde ilerlemesini sağlamak en önemli noktadır. Kaynak takımının omuz kısmı hem malzemeye basınç uygular hem de ısı üretir. Uç kısmı ise ısınan malzemeyi deforme eder ve uç etrafına yayılmasını sağlar. Kaynak takımındaki bu üç değişken (omuz çapı, uç çapı ve uç uzunluğu) birbiri ile uyumlu olması gerekir.

Plastik malzemelere uygulanan sürtünme karıştırma kaynağında kaynak performansına ve kaynak kalitesine etki eden bir çok faktör vardır. Bu faktörler birbirlerini etkilemektedir. Sürtünme karıştırma kaynak sürecine etkin kaynak değişkenlerinin fazla olması sebebiyle yüksek mukavemetli SKK bağlantıları, yüksek kaynak performansı ve kaynak sürecini kontrol etmek oldukça zordur. Her parametrenin kaynağın birleştirilmesine ve kaynak esnasındaki malzeme hareketlerine farklı etki göstermektedir. Öncelikle SKK'na etki eden faktörler geniş aralıkta seçilerek Taguchi deney tasarımı kullanarak deneyler yapılmış ve ANOVA analizi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak etki eden faktörler biraz daha sınırlandırılarak bir deney tasarımı daha yapılmıştır. Bu sayede etkin parametreler hakkında daha net sonuçlar elde edilmiştir. Bundan sonraki SKK birleştirmeleri bu parametreler kullanılarak birbiriyle etkileşimleri incelenmiştir.

Kaynaklı levhaların çekme deneyi ile çekme mukavemeti, alından alınan kesitler ile kaynak bölgelerindeki sertlik değişimleri SHORE-D yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Kaynak performansını, mekanik özellikleri, mikroyapı (SEM) ve makroyapı (Fotoğraf) ile hem kaynak takım değişkenleri hem de kaynak parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir.

Seçilen makine parametreleri ve kaynak takım değişkenleri ile yapılan kaynaklarda, başarılı birleştirmeler yapılmasına rağmen bazı kaynak parametrelerinde olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Olumsuz sonuç veren kaynaklarda meydana gelen kaynak hataları tespit edilmiştir. Bu kaynak hataları sınıflandırılarak, hangi şartlarda kaynak hatalarına sebep olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca meydana gelen bu kaynak hatalarının giderilmesi ve önlenmesi için önerilerde bulunulmuştur. Hatalı kaynakların makro olarak fotoğrafları çekilmek suretiyle hataların detaylı incelemeleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Kaynak takım değişkenleri, Kaynak hataları, Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı

ABSTRACT

The basic principle of friction stir welding (FSW) is to ensure that the heat that occurs in the stir zone moves along the line to be welded by the contact of the welding tool rotating on its own axis to the material. The most important point is to ensure that the material, which reaches a certain temperature and undergoes deformation, moves homogeneously along the welding line. The shoulder of the welding tool both applies pressure to the material and generates heat. The pin deforms the heated material and allows it to spread around the pin. These three variables in the weld tool (shoulder diameter, pin diameter and pin length) must be compatible with each other.

There are many factors affecting the welding performance and welding quality in friction stir welding applied to plastic materials. These factors must be compatible with each other. Due to the large number of welding variables effective on the friction stir welding process, it is very difficult to control the high strength FSW connections, high welding performance and welding process. Each parameter has a different effect on the joining of the weld and the material movements during welding. First of all, the Taguchi experimental design was carried out by choosing a wide range of factors affecting FSW. Based on the results obtained, another experimental design was made by limiting the influencing factors a little more. In this way, clearer results were obtained about the effective parameters. These parameters were used in the next FSW joins.

The tensile strength of the welded plates with the tensile test, the cross-sections taken from the butt and the hardness changes in the weld areas were determined using the SHORE-D method. Welding performance, mechanical properties, microstructure (SEM) and macrostructure (Photo) were investigated depending on both welding tool variables and welding parameters. In the welds made with the selected machine parameters and welding tool variables, although successful joints were made, fault results were obtained in some welding parameters. Welding defects in the welds with fault results have been identified. By classifying these welding defects, it has been tried to determine under which conditions they cause welding faults. In addition, suggestions have been made for the elimination and prevention of these welding defects. Macro photographs of faulty welds were taken.

Keywords: friction stir welding, Welding tool variables, Weld defects, friction stir welding of plastics

1. GİRİŞ

Son 50 yılda plastik malzeme kullanımı hızla yaygınlaşmış ve birçok metal veya metal dışı malzemenin yerini almıştır. Kimyasal dayanım özellikleri, paslanmama, bakteri üretmeme, kolay temizlenebilme, yüksek aşınma dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, hafiflikleri, ucuz oluşları ve iyi kaynak kabiliyeti özelliklerinden dolayı, daha önce endüstrinin birçok alanında metal olarak üretilen birçok parça artık plastiklerden yapılmaktadır. İnşaattan boya sanayisine, spor alanları'ndan rekreasyon alanlarına, otomobil sektöründen tekstil endüstrisine, gıdadan tarıma, bilişim teknolojileri, ilaç, beslenme, iletişim, ulaşım, sulama, konteyner, giyim, binalar, otoyollar gibi her alanda polimer grubundan ürünlerle karşılaşmaktadır. Polimerik malzemelere baktığımızda Termoplastik, termoset ve elastomerler olmak üzere 3 temel polimer sınıfı vardır. Bu sınıflar arasındaki ayrım uygulanan ısı altında davranışları ile tanımlanır [1-3].

Termoplastik polimerler, amorf veya kristal halde olabilir. Nispeten sünek bir şekilde davranırlar, düşük mukavemete sahiptirler. Termosetler, ısıyla sertleşen polimerlerdir her zaman amorfudur, serttir ve kırılındırlar. Elastomerler ise her zaman şekilsizdir ve Tg'nin üstünde kullanılırlar. Kalıcı hasar vermeden elastik olarak deforme olma özelliğine sahiptirler. Termoplastik polimerler, toplam plastik üretiminin %70'ini oluşturur ve ticari bakımdan termoplastikler en önemli grubu teşkil eder [3].

Plastiklerin kaynakla birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) diğer kaynak yöntemlerine oranla oldukça yeni bir kaynak tekniğidir [4]. Metal ve alaşımlarına kıyasla, plastiklerin birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağının kullanımı endüstriyel olarak henüz yaygınlaşmamıştır [5-9]. Bu projede termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği üzerine araştırmalar yapılması amaçlanmıştır. Yapılan literatür taramaları neticesinde, plastiklere uygulanan sürtünme karıştırma kaynağında kaynak performansını, kaynağın mekanik özelliklerini ve kaynak dikiş morfolojisine etki eden faktörler oluşturulmuştur [10,11]. Üç ana gruba ayrılan bu faktörler, kendi içlerinde de sınıflandırılmıştır. Özellikle iki parametrenin birbiri ile uyumlu olması halinde başarılı kaynaklar elde edileceği saptanmıştır. Kaynak parametreleri ve kaynak takımının SKK'na olumlu ve olumsuz sonuçlar meydana getirdiği görülmüştür. Bu etkenler özellikle kaynağın kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Temel olarak burada incelenmesi ve araştırılmasını istediğimiz olay bu iki parametrenin etkinlikleri ve SKK'na nasıl etki gösterdiğidir.

1.2. AMAÇ VE KAPSAM

Termoplastik levhaların SKK yöntemi ile birleştirilmesi çalışmaları ilk defa 15 yıl önce kullanılmıştır. Termoplastikler ile yapılan SKK araştırmaları hakkındaki yayınlar ve araştırmalar tekdüze gerçekleştirilmiş ve detaylı bir araştırma çalışmalarına rastlanmamıştır. Otomotiv sektöründe termoplastik parça tüketimi sürekli artış gösterdiğinden bu parçaların kaynak edilebilirliği ve özellikleri her geçen gün önem kazanmaktadır. Aynı cins veya farklı cinsteki plastiklerin kaynağı kadar bunların metaller ile kaynaklı birleştirmeleri hem otomotiv hem de havacılık, gemi üretim endüstrisi gibi bir çok endüstri kolunda önem kazanmaktadır [12-14]. Bu kaynak yöntemi ile endüstride gün geçtikçe kullanım alanı bulan plastik malzemelerinde bu kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği amaçlanmıştır.

Bu projenin amacı endüstride çok kullanılan önemli ticari termoplastik olan HDPE ile bunların duruma göre imkan dahilinde kompozit levhalarının SKK özellikleri incelenecektir. Kaynak takımı, kaynak parametreleri ve malzeme cinsinin karıştırma bölgesindeki mikroyapı oluşumuna ve mekanik özellikleri üzerine etkileri tespit edilecektir.

Yapılan SKK birleştirmelerin kaynak dayanımını kaynak dikiş yüksekliği ve dikiş kalınlığı (karıştırma b6lgesi alanı) tayin eder. Farklı şartlar altında, kaynak parametreleri (d6nme hızı, d6nme s6resi ve karıştırma s6resi) ve kaynak takım 6zellikleri (uç çapı, uç uzunluğu, omuz çapı, omuz açısı, uç açısı ve uç geometrisi) kaynak dikiş 6zelliklerine etkinliğinin detaylı olarak araştırılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar ile optimum kaynak dayanımı elde etmek hedeflenmiştir. Seçilen kaynak şartları ile daima başarılı kaynakların yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bahsedilen değişkenlerin optimizasyon çalışması yapılarak plastik malzeme için optimum kaynak şartları ve kaynak takım boyutları tespit edilmiştir.

Termoplastiklerin SKK'na etki eden fakt6rlerin detaylı olarak araştırılması ile yayınlanan ve yayınlanacak makaleler ile bu alanda çalışanlara hem yardımcı olacak hemde yol g6stereceği kanısındayım. Elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmış ve end6striyel olarak uygulanabilirliklerini ve avantajlarını 6n plana çıkartmaya çalışılmıştır. Proje alışması kapsamında uluslararası makale sempozyumlarda yayınlar gerçekleştirilmiştir. İstenen hedeflere ulaşılmıştır. Başta İngiltere, Japonya, A.B.D. , G6ney Kore, Almanya ve in olmak 6zere otomotiv end6strisinde uygulanan plastiklerin SKK y6ntemi ile birleştirme tekniği [4,15-17] uygulama çalışmaları gerçekleştirmiştir. Hen6z T6rkiye end6strisinde uygulama alanı bulamamıştır. 6lkemiz end6strisine tanıtılması için de 6nemli bir çalışma olmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

Otomotiv sekt6r6nde 1974 petrol krizinden itibaren araç ağırlığını azaltacak tedbirler 6nem kazanmıştır [15]. Bu tedbirler ile araçların yakıt t6ketim verimi artmıştır. Yakıt ekonomisinin yanı sıra evre kirlenme 6nleme yasaları da taşıt ağırlığının azalmasında etkili olmuştur. Araç ağırlığının azaltılmasında birinci rol araç g6vde ağırlığındaki d6şmeleri sağlayacak tedbirlere verilmiştir. Araç g6vdesini azaltmak için; 1. Y6ksek mukavemetli çelikler 6retilmiştir, 2. Al6minyum alaşımlarının t6ketimi arttırılmıştır, 3. Magnezyum alaşımları geliştirilmiştir ve 4. Termoplastik bazlı y6ksek mukavemetli kompozitler 6retilmiştir [4,15-17]. B6t6n bu geliştirilen malzemelerden ve klasik malzemelerden yapılan parçalar birbirine ergitmeli kaynak y6ntemleri ile birleştirilmektedir. Son 40 yıl içerisinde hafif malzemelerin (al6minyum, plastik ve magnezyum) araç ağırlığındaki payı s6rekli olarak artmaktadır. Her geliştirilen malzemenin kaynaklı birleştirmelerinde kaliteli dikiş elde etmek maksadıyla mevcut kaynak y6ntemlerinde geliştirme veya yeni kaynak y6ntemi elde etme çalışmaları yapılmıştır [4,15-17].

Al6minyum alaşımlarının ergitmeli kaynak problemlerinden kurtulmak için ergitmesiz bir kaynak y6ntemi olan s6rt6nme karıştırma kaynak (SKK) y6ntemi geliştirilmiştir [16]. Bu kaynak y6nteminde belli bir hızda d6nen kaynak takımı kullanılmaktadır. Belirlenen devirde d6nen kaynak takımı iş parçasına omuz kısmının temasına kadar daldırılır. Burada belirlen s6rede kalarak kaynak yapılacak malzemenin uç ve omuz vasıtasıyla ısınması sağlanır. Kaynak takımı genellikle yatay oluk kaynak pozisyonunda ilerleyerek iş parçalarının alın, bindirme veya k6ře birleştirilmeleri gerçekleştirilir. Kaynak takımı birleştirilecek iş parçaları içerisinde ilerlerken takım geometrisine (omuz çapı, omuz açısı, uç çapı, uç profili, uç açısı, vida diş geometrisi) ve kaynak parametrelerine (takım dalma derinliği, takım açısı, takım d6nme hızı, takım ilerleme hızı, takım basma kuvveti) bağlı olarak birleştirmeler gerçekleşir. Kendi ekseninde d6nen kaynak takımının malzemeye teması ısınmaktadır. Isınan malzeme, d6nen takımın hareketi ile karışmaktadır. Kaynak takımı omuz kısmının uyguladığı basınç ile ısınan malzemeler arasında katı halde dif6zyonu gerçekleşmektedir. Al6minyum alaşımlarının SKK birleştirmesinde elde edilen kaynak dikişi, ergitmeli kaynak dikişlerinin tipik problemlerini içermemektedir. Bu nedenle SKK y6ntemi otomotiv, uzay ve havacılık, gemi inşa ve raylı taşıt end6strisinde her g6n artan uygulama alanı bulmuştur. Ancak kaynak

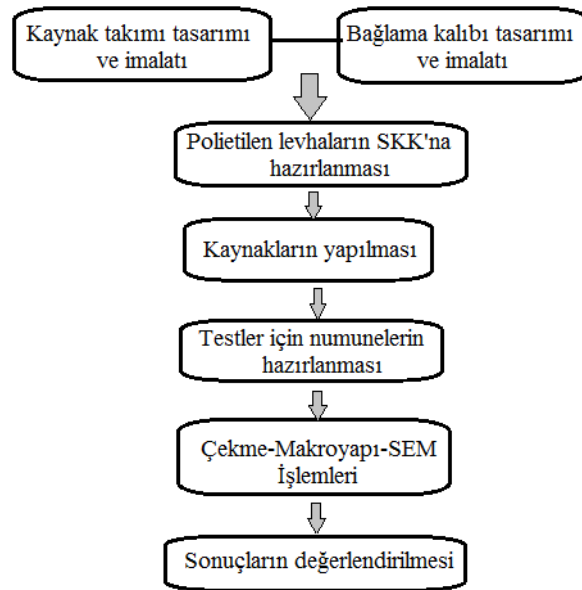
parametrelerine ve takım geometrisine bağılı olarak SKK birleştirmelerinde hatalar oluşmaktadır [15-22].

Son 10 yılda termoplastiklerin SKK yöntemi ile birleştirilmesi konusunda çalışmalar biraz daha artmıştır. SKK yönteminin termoplastiklere başarıyla uygulanabileceği tespit edilmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen, poliamid, akrilonitril bütadien stiren, polikarbonat ve polietilen tereftalat plastik malzemelerin plakalarına SKK uygulamaları yapılmıştır [2,3,5,8]. Ayrıca kompozit plastik plakalara SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir [5]. Otomotiv endüstrisinde ağırlıklı olarak yüksek yoğunluklu polietilen ve polipropilen kompozitleri kullanıldığından araştırmalarımızda, yüksek yoğunluklu polietilen kullanılmıştır. Yapılan araştırmalarda kaynak parametrelerinin (takım dönme hızı, takım dalma derinliği, takım karıştırma süresi) ve takım geometrisinin (uç profili, uç uzunluğu, omuz boyutu ve omuz geometrisi) dikiş oluşumuna ve kaynağın mekanik özelliklerine direkt etki etmektedir. Ayrıca metal ve metal dışı yapılan SKK için katı hal kaynağı terimide kullanılmaktadır. Fakat plastik malzemelerin SKK için bu terimin kullanılamayacağı tespit edilmiştir. Literatürde plastiklerde oluşan bu terime sıvı hal kaynağı denilmiştir. Kaynak takımı ucu çevresinde karıştırılan plastik malzemeler oluşan sürtünme ısısı ile ergimektedir. Kaynak takımının yaptığı basınç altında sıkışan sıvı katılaşmaktadır. Aynı cinsteki iş parçalarının birleştirmelerinde plastiklerin sadece eritilmesi ve basınç altında katı hale geçmesi olayları gerçekleştirilmektedir. Farklı iş parçalarının kaynağında ise yukarıda açıklanan olaylar ile birlikte karışım oluşumu gerçekleşmektedir. Karışımlardaki karışabilirlik ve uyumsuzluk sorunları SKK birleştirmelerinde de yaşanmaktadır [23-25].

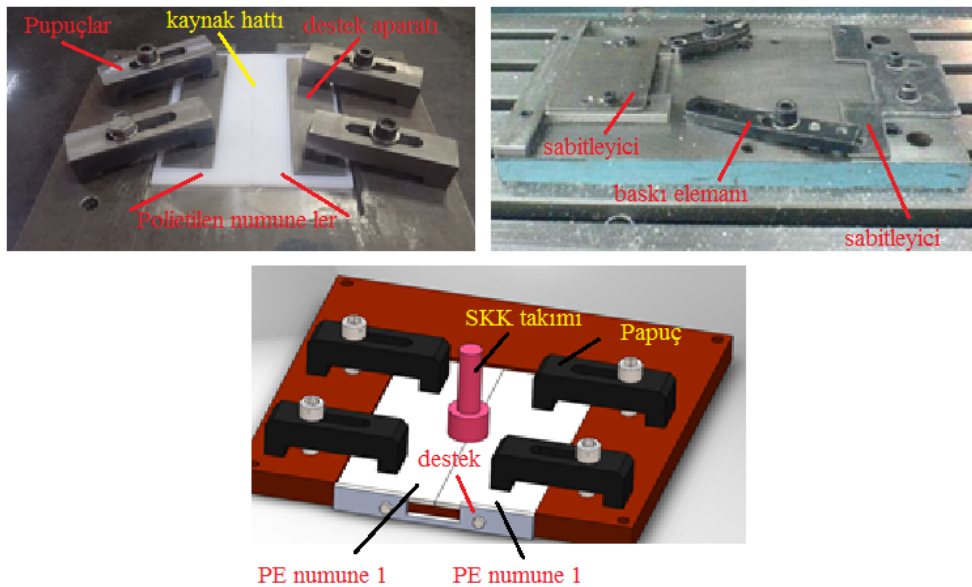
Polimerik malzemeler ve bunların kompozitleri özellikle son 10 yıldır otomotiv endüstrisinde artan miktarda kullanılmaktadır [3,7,26,27]. Bu malzemelerden üretilmiş parçaların mekanik özellikleri ve bu parçalara uygulanan birleştirme tekniklerinin önemi artmaktadır. Bu nedenle yeni bir kaynak yöntemi olan SKK ve bu yöntemin bir uygulama şekli olan sürtünme karıştırma ve nokta kaynağının önemi giderek artmaktadır. Termoplastiklere uygulanan SKK yöntem parametrelerinin ve takım geometrisinin optimizasyonu ile farklı bileşim ve özellikteki iş parçalarının karışımında çıkan sorunların çözüm yolları önem kazanmıştır [26,27]. Plastik-metal melez malzeme birleştirmeleri üzerinde araştırmalar son beş yıldır araştırılmaktadır. Plastik kökenli malzemelerin SKK ve SKNK birleştirmesi hakkında otomotiv sektöründe başlayan ilgi ve araştırmaların etkisi başta havacılık ve gemi inşa sektörü olmak üzere bir çok endüstri kolunda kendisini göstermektedir. Bu endüstri kollarında da araştırmalara başlanmıştır [28-30].

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Yapılan literatur taramaları ve daha önce yapmış olduğumuz çalışmalardan esinlenerek bir akış planı oluşturulmuştur (Şekil 1). Bu akış planı doğrultusunda çalışmalarımıza devam edilmiştir. Akış diyagramında bağlama kalıbı tasarımı ve imalatı, karıştırıcı ucun tasarım ve imalatı aşamasını atölyede proje ekibi tarafından gerçekleştirmiştir. İş akışının başlangıcını oluşturan en önemli kısmı kaynak takım tasarımı-imalatı ve kaynakların yapılması için gerekli bağlama kalıbının tasarımıydı. Öncelikli olarak kaynak yapılacak malzemelerin ölçüleri belirlenmiştir ve 60x100 ölçülerinde olacak olan plastik plakalara göre bir bağlama kalıbı tasarlanmıştır. Şekil 2’ de tasarlanan bağlama kalıbının Solid programında çizilmiş resmi ve üretimi yapılan bağlama kalıplarının resmi verilmiştir. Bu kalıpların tasarımında kaynakların gerçekleştirildiği Freze tezgahının tabla ölçüleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İki kalıp tasarlamamızın sebebi bir kalıbın universal olmasıdır. Yani bu kalıpta hem SKK hemde SKNK yapılabilir ve daha küçük parçaların kullanma olasılığının olmasıdır.

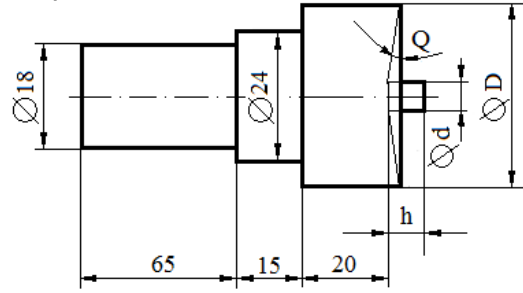


Şekil 1. Deneysel çalışma akış programı



Şekil 2. SKK için tasarlanan bağlama kalıbının Solidwork çizimi ve üretilen bağlama kalıpları

Literatür araştırması ile elde edilen veriler doğrultusunda kaynak takımına ait değişkenler geniş aralıkta seçilip imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3' te kaynak takımına ait imalat resmi çizimi verilmiştir. Burada kaynak takımı üzerinde sabit ölçülerin yanında değişkenler mevcuttur. Bu değişkenler omuz çapı, uç çapı ve uzunluğu, omuz açısıdır. Tablo 1'de ise bu seçilen aralıklar verilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağının yapılabilmesi için bağlama kalıbı ve kaynak takım ucunun imalatı için Teknik Eğitim Fakültesi ve Teknoloji Fakültesi bünyesinde Makine ve Malzeme ve Metalürji Mühendisliğine ait Temel İşlemler Atölyesi, Freze Atölyesi, Taşlama Atölyesi ve Isıl İşlem Laboratuvarı kullanılmıştır. SNK için tasarlanan bağlama kalıbı Fe 37 çeliğinden ve kaynak takımları ise SAE 1040 çeliğinden imal edilmiştir. Bağlama kalıbı ve kaynak takım malzemeleri endüstriden hibe şeklinde alınmıştır. İmalatı gerçekleştirilen bütün kaynak takımlarının yüzeyleri 600 mesh zımpara ile temizlenmiştir. Daha sonra su verilerek sertleştirilmiş ve temperlenerek kaynak takım ucunda 42 HRC sertlik elde edilmiştir.



Şekil 3. Sürtünme karıştırma kaynak takımına ait ölçüler

SKK Takım değişkenleri	Birim	Değişken aralığı
Uç çapı (d)	mm	3-10
Uç uzunluğu (h)	mm	2.5-3.8
Omuz çapı (D)	mm	14-30
Omuz açısı	derece	0-6
Uç profili		Silindirik

Tablo 1. Sürtünme karıştırma kaynak takımına ait değişkenler ve aralıkları

Sürtünme karıştırma kaynakları Freze Atölyesinde bulunan TEZSAN marka NC Freze Tezgahında gerçekleştirilmiştir. Yapılan kaynakların mekanik testleri Polimer Laboratuvarında Instron Marka Test cihazında, Kaynak bölgesi sertlik ölçümleride aynı laboratuvarında Shore A test yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgelerindeki değişimleri makro yapı olarak incelemek ve birleştirilen malzemelerde oluşan kaynak hatalarını tespit etmek için fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Daha önce araştırılmamış ve şu ana kadar literature taramalarında rastlanmayan kaynak hatalarının tespiti için çok fazla veri elde edilmesi amaçlanmıştır. Sertlik ölçümleri için birleştirilen malzemeler enine farklı bölgelerden kesilmiştir. Kesilen parçaların bir kısmı ile sertlik ölçümleri, diğerleri ile mikrotorm cihazında 0,1-0,2 mm kalınlığında kesilmek suretiyle SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri Malzeme ve Metalurji Mühendisliğinden hizmet alımı olarak gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında planlanan Malzeme Metalurji Mühendisliği bölümünün bünyesinde bulunan arızalı olan Bruker Marka XRD cihazının kurşun geçirmez camı ve anakart alımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede XRD çalışır duruma gelerek üniversite ve üniversite dışına hizmet vermesi sağlanmıştır. Bu sayede üniversitemize bir katma değer kazandırılması amaçlanmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında, karıştırma bölgesine ilave tozlar kullanılarak kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Dışarıdan temin edilen az miktarda tozlar ile yapılan ön denemelerde istenen sonuçlar elde edilememiştir. İlave toz ile kaynak edilebilirliği açısından problemlerle karşılaşmış ve bu problem giderilememiştir. Bu yüzden farklı malzeme ve boyutlarda alınması planlanan tozların alımı iptal edilmiştir. Tozlar için ayrılan bütçe kullanılmamıştır. Tozların ilave edilerek birleştirme işlemi planlanan kaynakların karıştırma bölgesi ve ITAB bölgelerinin aşınma deneyleri yapılması planlanmıştır. Proje kapsamında planladığımız ve plastik malzemelerin kaynak bölgelerindeki aşınma dirençlerini ölçmek için hali hazırda bulunan aşınma test cihazının modifiye edilmesi planlanmıştır. Bu işlemi hem kaynakların gerçekleştirilememesi hemde olağan dışı durumlardan dolayı gerçekleştirilemedik ve buraya ayrılan bütçe kullanılmamıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağına etki eden parametrelerin çokluğu nedeniyle ilk etapta, bu parametrelerin değişkenleri geniş aralıkta seçilmek suretiyle Taguchi Yöntemi ile deney

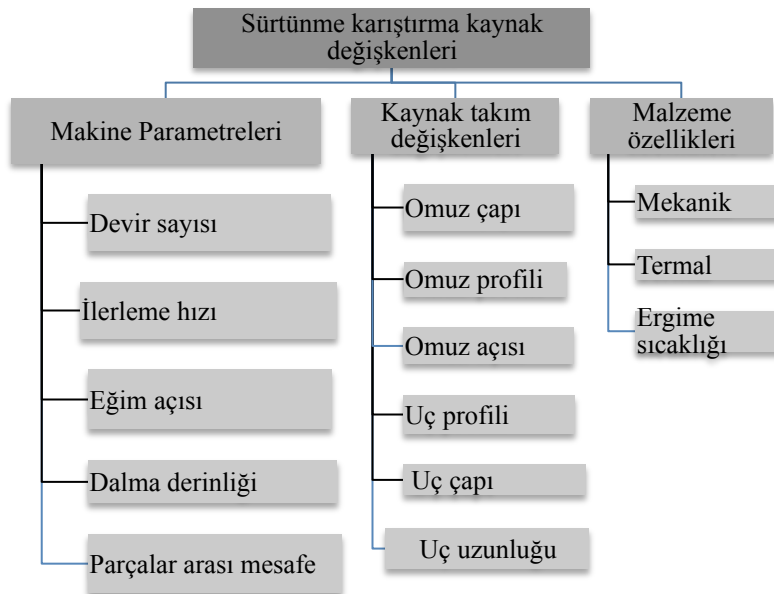
tasarımı oluşturulmuştur ve sonuçlar Minitab programı kullanılarak ANOVA analizi ile değerlendirilmiştir [31-32]. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda seçilen aralıklar biraz daha daraltılarak bir daha Taguchi deney optimizasyonu uygulanmıştır. Sonuçlar tekrar değerlendirilerek SKK uygulamalarında kullanılmak üzere kaynak parametrelerin aralıkları tespit edilmiştir. Üçüncü bir optimizasyonda, daha önce elde edilen sonuçlardan en etkin olan şartlar alınmak suretiyle, bu parametrelerin kaynak performansına, mukavemete ve kaynak hatalarına etki eden parametrelerin etki oranları tespit edilmiştir. Daha sonraki yapılacak birleştirmelerde ve araştırmalarda en etkin parametrelerin üzerine gidilmiştir. Sonuçları olumsuz çıkan aralıklar devre dışı bırakılmıştır. Şekil 4'te yapılan sürtünme karıştırma kaynağına ait bir fotoğraf verilmiştir. Burada camsı geçiş sıcaklığına ulaşan plastik malzemenin alın altına temas halinde olan iki plaka arasından çıkışı görülmektedir. Ayrıca etrafta bulunan plastik talaşlar ise omuzun üst malzemeye teması ile gerçekleşmektedir. Parametrelerin uygun seçilmesi halinde bu olayların gerçekleşmesi engellenebilmektedir.



Şekil 4. YYPE malzemesine uygulanan sürtünme karıştırma kaynak işlemi ve meydana gelen olaylar

4. BULGULAR

Yapılan literatür taramalarından ortaya çıkan sonuçlar çok dağınık, farklı farklı değişkenler ve aralıklar elde edilmiştir. Bunları gruplandırmak suretiyle etkin parametreler ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Bu çerçevede üç ana grup oluşturulmuştur. Araştırma için iki ana grup üzerine gidilmiştir. Şekil 5'te sürtünme karıştırma kaynak işleminde kaynağa etkin olan değişkenler görülmektedir .



Şekil 5. Sürtünme karıştırma kaynak sürecinde etkin olan değişkenler [11-33].

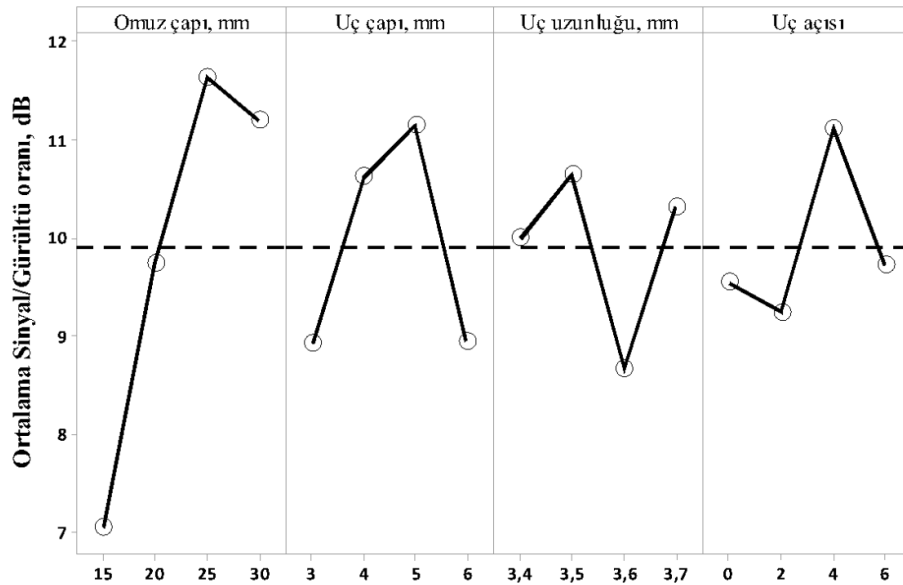
Bu değişkenlerden makine parametreleri ve kaynak takım değişkenleri üzerine gidilmiştir. Malzeme özellikleri kaynak edilecek malzeme değiştiğinde değişeceği ve hem sıcaklık hemde mekanik özellikler değiştiğinden ayrı olarak değerlendirilmesinin daha iyi olacağı düşünülmüştür. Kaynak takımında omuz çapı, uç çapı, uç uzunluğu ve omuz açısı, makine parametrelerinde ise devir sayısı, ilerleme hızı, eğim açısı ve dalma derinliği değişkenleri alınmıştır.

Öncelikle kaynak takımındaki değişkenleri incelemek için Tablo 2’de verilen aralıklarda 4x4=16 Taguchi deney planı oluşturulmuştur [34-35]. Bu şartlarda yapılan kaynaklarda devir sayısı 900 d/d ve ilerleme hızı 33 mm/d alınmıştır.

Yapılan 16 deney sonrasında yapılan birleştirmelerin çekme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Minitab programında en yüksek en iyi değerlendirme metoduna göre sinyal /gürültü grafiği elde edilmiştir. Şekil 6’da sinyal gürültü oranına ait grafik verilmiştir. Burada en yüksek sinyal değeri bize kaynağın çekme mukavemet değerine en etkin parametreleri ve değerini, en düşük değerler ise etkin olmayan (daha az etkili) parametre ve değerlerini vermektedir. Sinyal gürültü değerlerine bağlı olarak yapılan ANOVA analizi ile takım değişkenlerinin çekme mukavemetine etki oranları da tespit edilmiştir. Anova analizi sonucunda oluşan sinyal gürültü oranlarını incelediğimizde (Şekil 6), omuz çapı ile uç çapında en yüksek S/N değeri elde edilmiştir. Çalışmamızda aralıkları daraltmak adına takım değişkenleri için, bir sonraki optimizasyon için omuz çapı ve uç çapı değerleri üzerinde inceleme yapmamız gerektiğine S/N değerlerine bakarak karar verdik.

Tablo 2. Kaynak takımındaki değişkenler

A	B	C	D
Omuz çapı, mm	Uç çapı, mm	Uç uzunluğu, mm	Omuz açısı, derece
15	3,0	3,4	0
20	4.	3,5	2
25	5,0	3,6	4
30	6,0	3,7	6

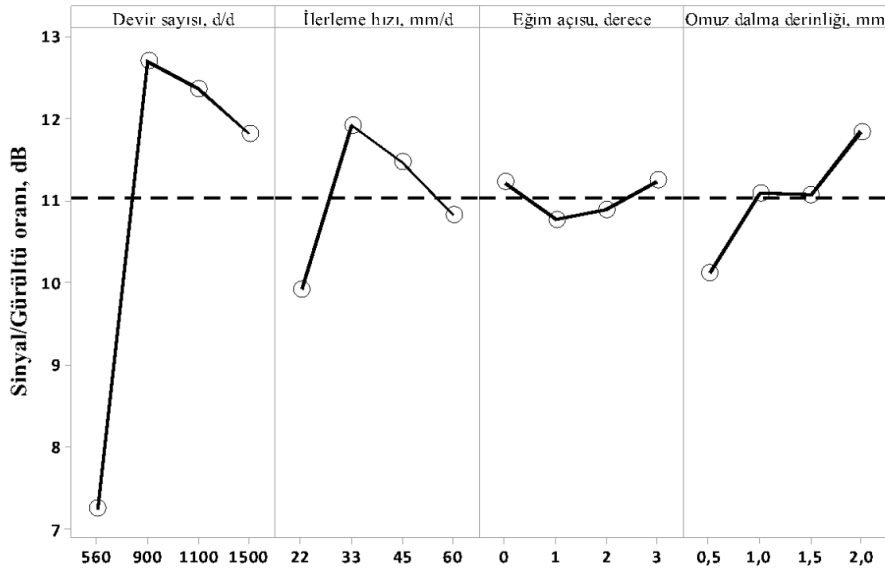


Şekil 6. Takım değişkenlerine ait S/N oranları

Makine parametrelerini incelemek için $4 \times 4 = 16$ Taguchi deney planı oluşturulmuş ve bir optimizasyon çalışması daha yapılmıştır. Burada devir sayısı, ilerleme hızı, takım eğim açısı ve omuz dalma derinliği parametreleri alınmıştır. Makine parametrelerini incelemek için yapılan deneylerde kullanılacak takım için bir önceki optimizasyonda en yüksek S/N elde edilen değerler alınarak (omuz çapı 25 mm, uç çapı 5 mm, uç uzunluğu 3,6 ve omuz açısı 4 derece) imal edilen takım kullanılmıştır. Makine parametrelerine ait değişkenlerin aralıkları da Tablo 3'te verilmiştir. Yapılan değerlendirme ile makine parametreleri için Şekil 7'de gösterilen sinyal/gürültü grafiği elde edilmiştir. Grafiği incelediğimizde burada en etkili parametre devir sayısı ve ilerleme hızı bulunmuştur. Diğer parametrelerin çekme mukavemetine etkileri daha az olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3. Makine parametrelerindeki değişkenler

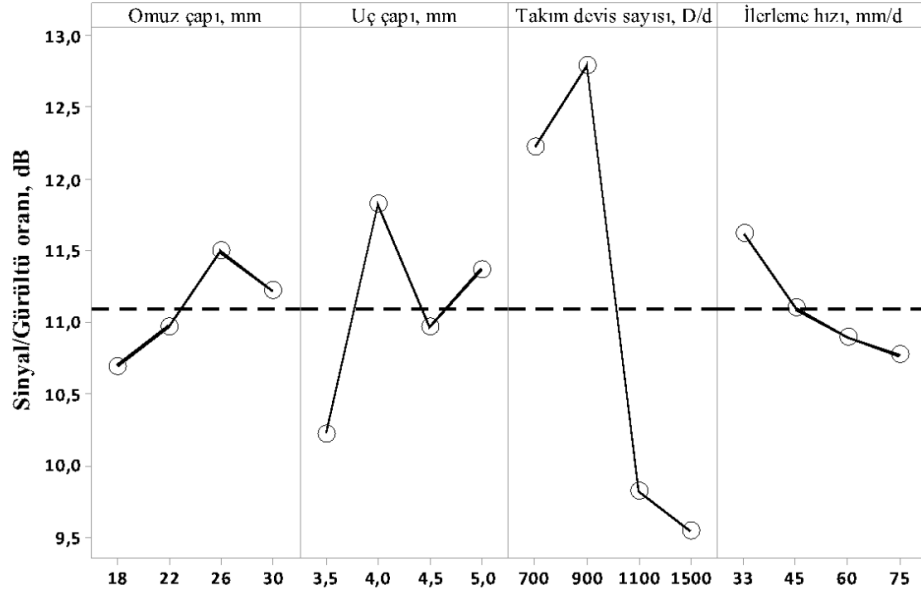
A	B	C	D
Devir sayısı, d/d	İlerleme hızı, mm/d	Eğim açısı, derece	Dalma derinliği, mm
14	3.0	600	20
16	3.5	900	30
18	4.0	1100	40
20	4.5	1500	50



Şekil 7. Makine parametrelerine ait S/N oranları

Kaynak takım değişkenleri ve makine parametrelerini bir arada kullanmak üzere son bir optimizasyon yapmak için, takım değişkenlerinden omuz çapı ve uç çapını, makine parametrelerinden ise devir sayısı ve ilerleme hızı seçilmiştir. Bu parametrelerin değişken aralıkları ise Şekil 6 ve Şekil 7 irdelenerek karar verilmiştir. Bu parametreler için kullanılan aralıklar Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te kullanılan aralıklar daha önceki yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre seçilmiştir. Omuz çapı 18-30 mm (Şekil 6), uç çapı 3,5-5 mm (Şekil 6), devir sayısı 700-1500 d/d (Şekil 7) ve ilerleme hızı ise 33-75 mm/d aralıklarında seçilmiştir. Tablo 4'te de seçilen aralıklar listelenmiştir. Bu değişkenler ile $4 \times 4 = 16$ deney şartları belirlenmiş ve deneyler yapılmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar ile yapılan ANOVA analiz sonucunda Şekil 8'de gösterilen S/N grafiği elde edilmiştir. İki değişkenden optimum parametreler seçilerek yapılan deneylerden en etkin ve çekme mukavemet değerini etkileyen en önemli parametre devir sayısı (takım dönme hızı)

tespit edilmiştir. İkinci parametre olarak uç çapı, üçüncü ve dördüncü parametrelere ise sırasıyla ilerleme hızı ve omuz çapı elde edilmiştir.



Şekil 8 . Makine ve Takım değişkenlerine ait Sinyal/Gürültü oranları

Tablo 4. Gerçekleştirilen SKK' na ait parametreler ve değişkenler

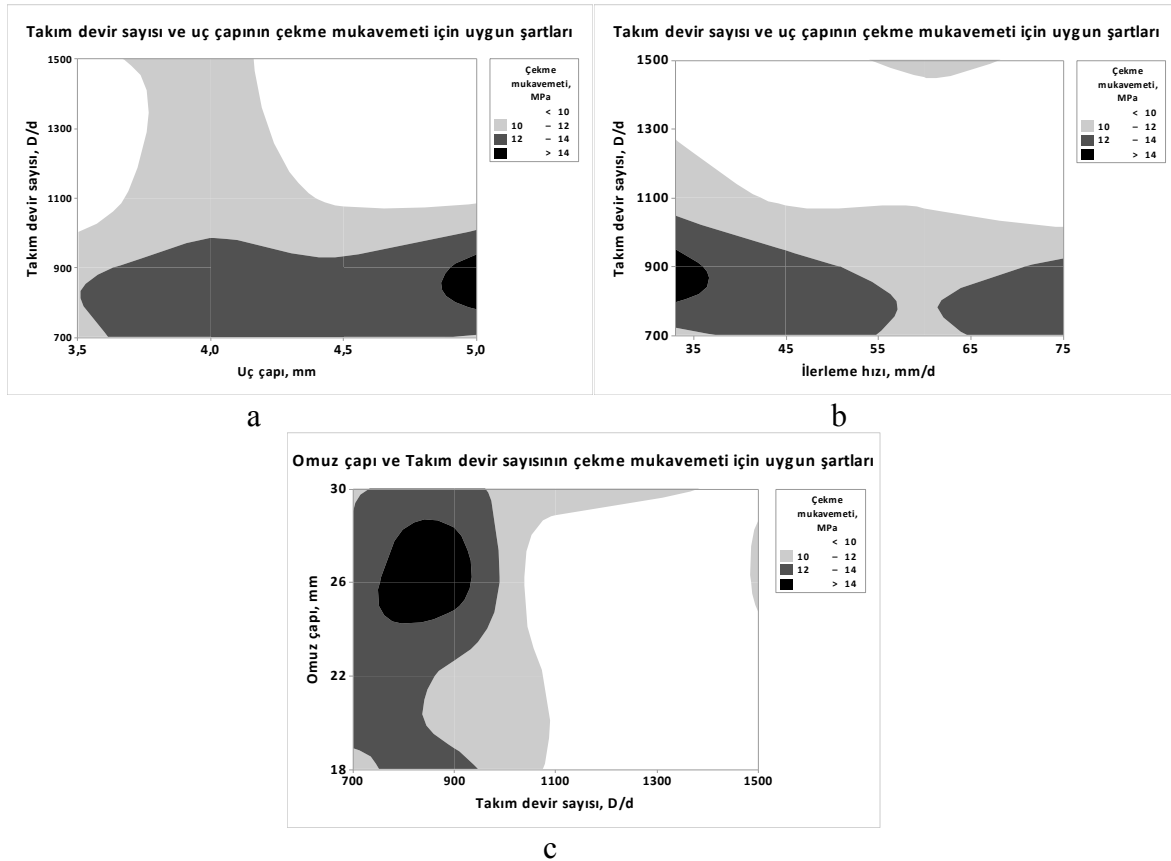
A	B	C	D
Omuz çapı, mm	Uç çapı, mm	Devir sayısı, d/d	İlerleme hızı, mm/d
18	3.5	700	33
22	4.0	900	45
26	4.5	1100	60
30	5,0	1500	75

Bu deney tasarımında ANOVA analizi yapılarak her parametrenin çekme mukavemetine ne kadar hangi oranda etki ettiği tespit edilmiştir. Yapılan ANOVA analizinde en etkin faktörün takımın devir sayısı olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağının kalitesine ve çekme mukavemetine yaklaşık % 42 oranında etki etmektedir. Devir sayısının uygun şartlarda seçilmemesi durumunda yapılacak kaynağa negatif bir etki gösterecektir. İkinci en önemli faktör ise % 25 oranında etki gösteren uç çapıdır. Bu iki faktör irdelendiğinde kaynağın karıştırma bölgesi üzerine ve kaynağın ITAB bölgesine yaklaşık olarak % 67 oranında tesir etmektedir. İlk etapta bu iki faktör üzerinde durulmaya karar verilmiştir. Daha sonra diğer etkenlerde incelenecektir.

Tablo 4. Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları ve kaynak parametrelerinin etkinlik yüzdesi.

Kaynak Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	F değeri	Etkinlik Oranı, %
A Omuz çapı, mm	3	8,55	2,66	13,60
B Uç çapı, mm	3	15,72	4,89	25,00
C Takım devir sayısı, dev/dak	3	26,05	8,10	41,41
D İlerleme hızı, mm/dak	3	11,16	3,47	17,74
Hata payı	3	1,42	0,44	2,25
TOPLAM	15	62.90		100,00

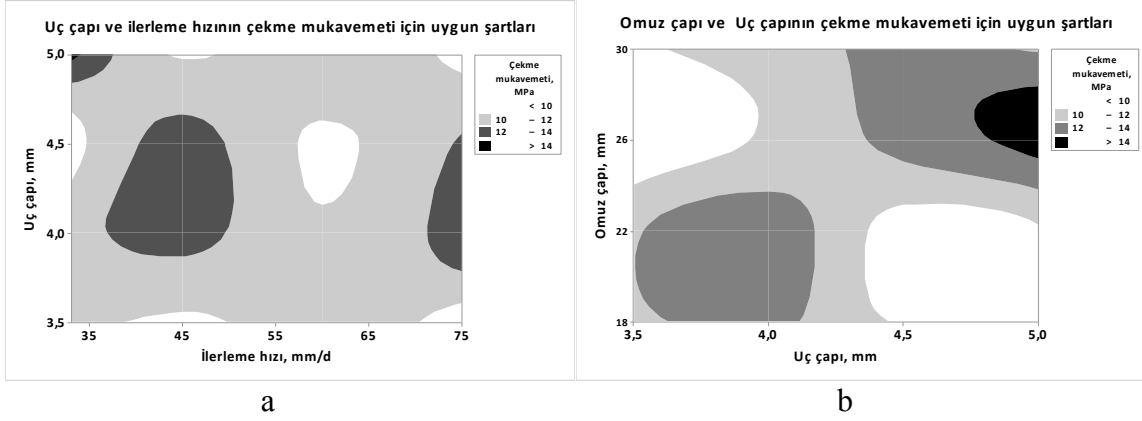
Yapılan ANOVA analizine bağlı olarak çekme mukavemetine etki eden faktörler ikili grafikler halinde Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Bu grafikleri irdelediğimizde elde edeceğimiz mukavemet değerlerine göre renklendirilmiştir. 14 MPa 'dan fazla çekme mukavemeti elde edilmesi istendiğinde bütün grafiklerde siyah bölgelere denk gelen şartlarda birleştirmelerin yapılması gerekmektedir. Siyah bölgeler grafiklere bağlı olarak bazılarında geniş bir aralıkta oluşmuş, bazılarında ise daha dar bir aralıkta kalmıştır. Şekil 9 incelendiğinde, % 41 oranında etki gösteren takım devir sayısının diğer faktörle olan etkileşimine bakılmıştır. Şekil 9'a ve b'de takım devir sayısı 800-1000 d/d aralığında olması gerektiği, uç çapının 4,8-5,0 mm aralığında ve ilerleme hızının ise 35-38 mm/d aralıklarında olması gerektiği tespit edilmiştir. Şekil 9 c' de takım devir sayısı ile en etkin ikinci faktör olan omuz çapı değerlendirildiğinde takım devir sayısının 750-920 d/d ve omuz çapının 24 – 29 mm aralığında olması gerekliliği belirlenmiştir. Takım devir sayısına bağlı olarak diğer faktörler belirlenen aralıklarda seçilmesi durumunda kaynak performansı daima yüksek olacaktır. Kaynak performansına bağlı olarak hem hatasız kaynaklar hemde yüksek çekme mukavemeti oluşturacak birleştirmeler gerçekleşecektir.



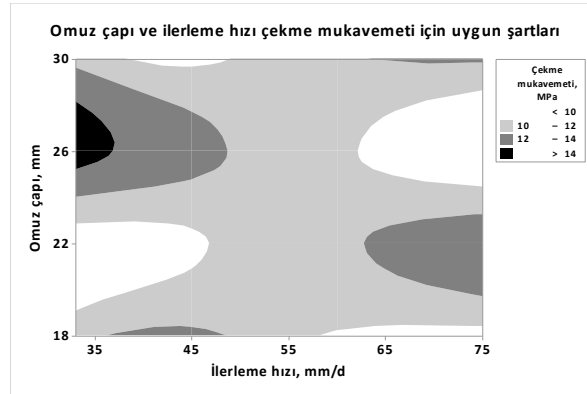
Şekil 9. Kaynak performansına ve çekme mukavemetine etki eden en etkin parametreolan takım devir sayısının diğer kaynak şartları ile ilişkisinin ANOVA analizi grafikleri

Şekil 10'da en etkin ikinci parametre olan uç çapının grafiği verilmiştir. Bu grafikte uç çapının ve ilerleme hızı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Uç 4,8 mm ve üstü, ilerleme hızı 35-37 mm/d ve takım devir sayısı 800-950 d/d olması gerektiği tespit edilmiştir. Şekil 10 a'da sol üst köşede çok az miktarda bir siyah alan mevcuttur. Bu iki parametrenin çekme mukavemetine etkisinin daha az olması açık ve net olarak grafiğede yansımaktadır. Şekil 11 irdelediğinde ise burada daha az etkin olan son iki parametrenin birbiri ile olan ilişkisi

görülmektedir. İlerleme hızının 35 mm/d ve omuz çapının 24-26 mm olması gerektiği görülmektedir. Üç grafikte siyah bölgelerin fazla olması bu parametrelerin etkisi ile bize bilgi vermektedir.



Şekil 10. Kaynak performansına ve çekme mukavemetine etki eden en etkin ikinci parametre olan omuz çapının diğer kaynak şartları ile ilişkisinin ANOVA analizi grafikleri



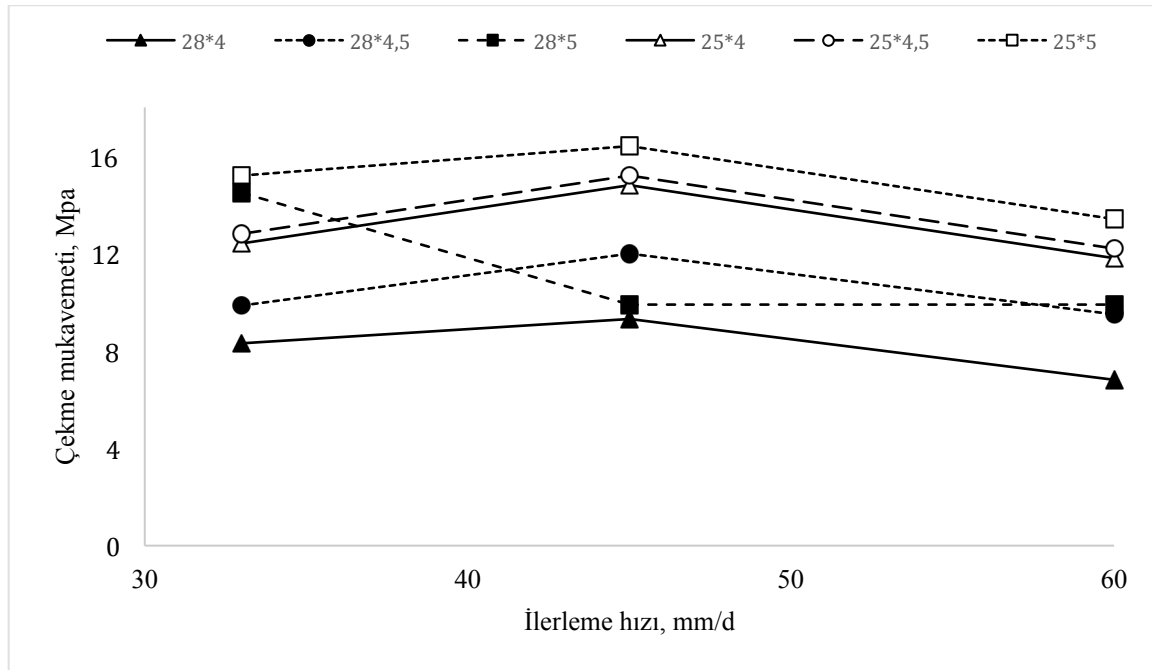
Şekil 11. Uç çapı ile ilerleme hızının kaynak performansına ve çekme mukavemetine etkisinin ANOVA analiz grafiği

Yapılan üç tane optimazsyon ile polietilenin sürtünme karıştırma kaynağının gerçekleştirilmesi için çalışma aralıkları, kaynak takımı ile bilgiler ve veriler elde edilmiştir. Belirlenen şartlarda daha detaylı inceleme yapılması için tekrardan bir deney planı oluşturulmuştur. Çekme mukavemetlerini bulmak için yapılan birleştirmelerin hepsinden çekme numuneler alınarak çekme testi uygulanmıştır. Bu sayede kaynakta kullanılan parametreler hakkında daha net bir bilgiye kavuşmuş olduk. Yapılan birleştirmelerde kullanılan takım devir sayısı 560-1100 aralığında , ilerleme hızı 22-60 mm/d aralığında, uç çapı 4,5-5 mm aralığında ve omuz çapı 25-28 mm aralığında seçilerek gerçekleştirilmiştir. Makine parametresindeki değişkenler direk makinede ayarlandığı için herhangi bir ilave bir işleme gerek duyulmamıştır. Fakat kaynak takımında ise yeniden kaynak takımı tasarımı yapılmıştır. Kaynak takım tasarımı için ise omuz çapı 25 mm ve uç çapı olarak 4, 4,5 , 5 mm çaplarında üç takım, omuz çapı 28 mm ve uç çapı olarak 4, 4,5 , 5 mm çaplarında üç takım üretilmiştir. Bu takımların hepsinde omuz açısı 6 derece ve uç uzunluğu 3,7 mm sabit tutulmuştur. Yapılan deneylerde elde edilen çekme mukavemet değerleri aşağıda grafikler

halinde verilmiştir. Öncelikle kaynak takımları arasında bir değerlendirme yapmak için bir deney yapılmıştır. Bu deneylerde 900 d/d takım devir sayısı ve 33-60 mm/d ilerleme hızı kullanılmıştır. Bu deneyler için kullanılan takımlara ait ölçüler aşağıda Tablo 5'te verilmiştir.

No	Omuz çapı, mm	Uç çapı, mm	Uç uzunluğu, mm	Omuz açısı	Kısa kod no
1	28	4	3,7	6	28*4
2	28	4,5	3,7	6	28*4,5
3	28	5	3,7	6	28*5
4	25	4	3,7	6	25*4
5	25	4,5	3,7	6	25*4,5
6	25	5	3,7	6	25*5

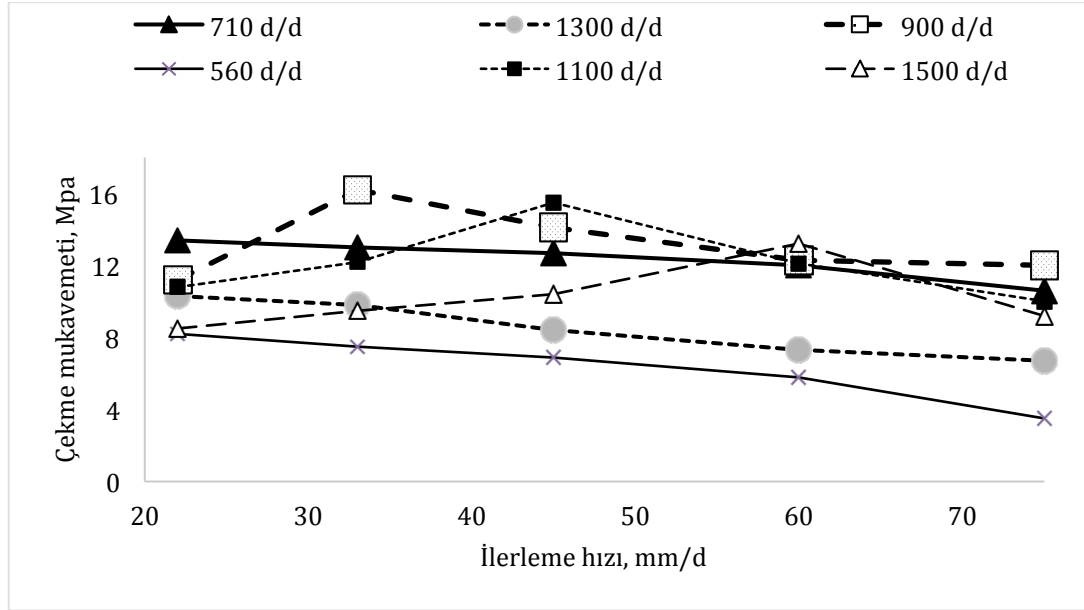
Tablo 5. Tasarlanan deney takımlarına ait ölçüler



Şekil 12. Kaynak takımlarına ait çekme mukavemeti değerleri

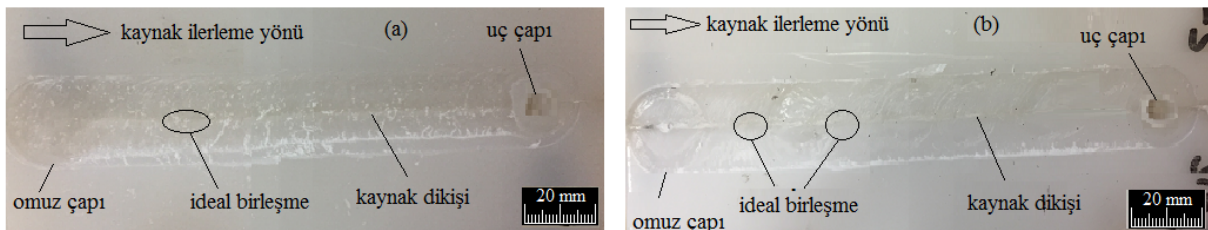
Şekil 12'de tasarlanan altı takıma ait elde edilen çekme mukavemet değerleri verilmiştir. Omuz çapı ve uç çapı arasındaki ilişkiyi tespit etmek için yapılan deneylerde, bu oranın 5 olması durumunda en yüksek çekme mukavemeti değeri elde edildiği görülmüştür. Ayrıca uç çapının artması durumunda hem kaynak dikişinde olumsuzluklar ve çekme mukavemetinde düşüşler meydana gelmiştir. İlerleme hızının belli bir değerden sonra artması durumunda da olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Özellikle ilerleme hızı 45 mm/d dan sonra kaynağa olumsuz etkisi ortaya çıkmaktadır. Şekil 12'de en yüksek mukavemet değeri elde edilen omuz çapı ve uç çapı oranı 5 olan takım ile (25 mm omuz çapı ve uç çapı 5 mm) farklı takım devir sayıları ve ilerleme hızlarında deneyler yapılarak hem takım devir sayısının hemde ilerleme miktarlarının etkisi çekme mukavemetine etkisi incelenmiştir. Şekil 13'te elde edilen çekme deney sonuçları verilmiştir. Elde edilen çekme deneyi sonuçlarından artan ilerleme hızları ile çekme mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu takım için en en yüksek çekme mukavemeti 900 takım devir sayısında ve 33 mm/d ilerleme hızında 16,2 MPa elde edilmiştir.

Bu şartlarda karıştırma bölgesinde elde edilen ısının kaynak hattı boyunca ideal olarak dağılımının sağlandığını anlıyoruz. Ayrıca devir sayısının bir kademe artması (1100 d/d) ile ilerleme hızının da bir kademe artması (45 mm/d) halinde yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir (15,5 MPa). 710 d/d takım devir sayısında ise üretilen ısıya bağlı olarak ilerleme hızı 22 mm/d en yüksek çekme mukavemeti elde edilirken, ilerleme hızının artması ile çekme mukavemeti lineer olarak azalma göstermiştir. Bunun sebebi ise ısınan ve camsı geçiş sıcaklığına ulaşan plastik malzemenin ilerleme hızının artması ile kaynak dikişi oluşumunda problem oluşturmaktadır.



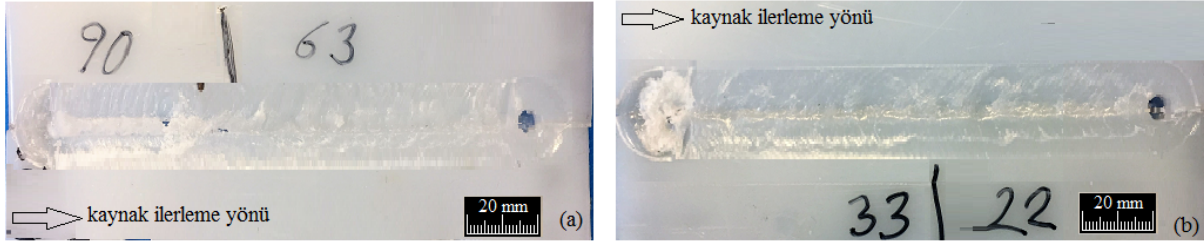
Şekil 13. Takım devir sayısı ve ilerleme hızlarına ait çekme mukavemeti değerleri

Şekil 14'te en yüksek mukavemet değerleri elde edilen birleştirmelere ait görüntüler verilmiştir. Bu birleştirmelerde kaynak ilerleme yönünde nüfuziyet istenen şekilde gerçekleşmiştir. Ayrıca plastik malzemenin taşması fazla gerçekleşmemiştir. Kaynak dikişinde homojen bir karışım gerçekleşmiş ve dikişlerde herhangi bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. İdeal bir kaynağın oluşması için takım devir sayısı ile ilerleme hızının birbiri ile uyumu çok önemlidir. Bu önemi açıklamak için 1100 d/d takım devir sayısında ilerleme hızlarını değiştirmek suretiyle kaynak dikişinde oluşan değişimleri görmekteyiz. En düşük ilerleme hızında (22 mm/d) kaynak takımı karıştırma bölgesinde fazla kaldığı için malzeme dışarı taşmaya başlamıştır (Şekil 15b). İlerleme hızı artırıldığında taşma miktarı azalmış ve kaynak dikişi oluşmaya başlamıştır. 45 mm/d da ideal birleşme sağlanmıştır (Şekil 14 b). En yüksek ilerleme hızında ise (90 mm/d) malzeme omuz vasıtasıyla kaynak ilerleme yönünde baskı sağlanamamıştır. Dikiş oluşumu gerçekleşmemiştir (Şekil 15a). İlerleme bir alt kademeye alındığında malzeme omuz vasıtasıyla hem baskı hemde taşma engellenmiştir. İdeale yakın bir dikiş görüntüsü elde edilmiştir [11,36,37].



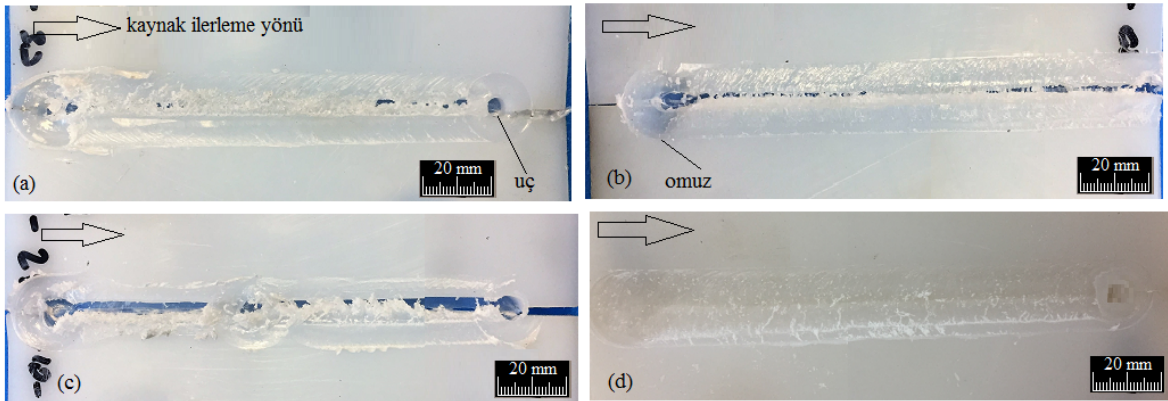
Şekil 14. En yüksek çekme mukavemeti elde edilen SKK'ns ait makro görüntüler, a) 900 d/d

takım devir sayısı ve 33 mm/d ilerleme hızı, b) 1100 d/d takım devir sayısı ve 45 mm/d ilerleme hızı.



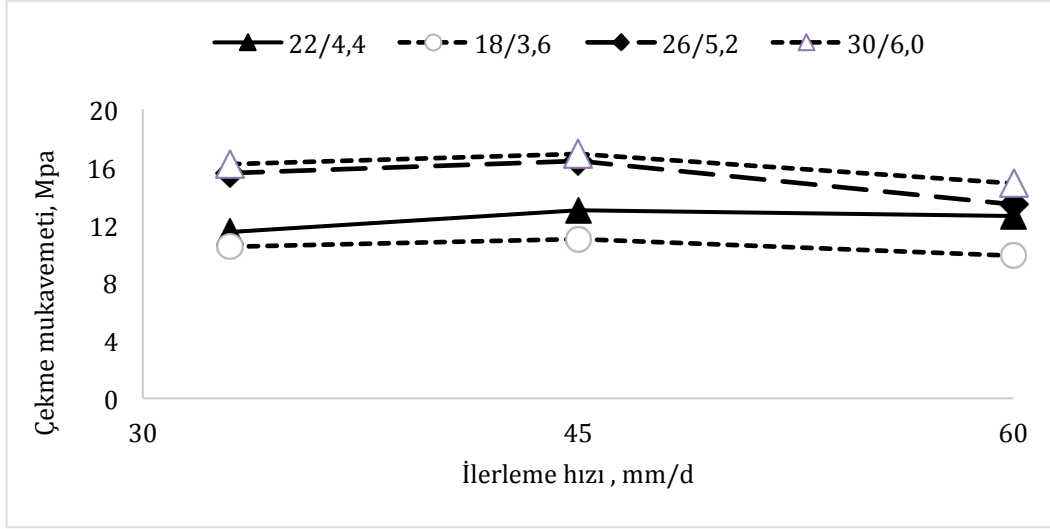
Şekil 15. Farklı ilerleme hızlarına bağlı olarak kaynak dikişindeki değişimler

Şekil 16'da omuz çapı 25 mm olan ve uç çapları farklı olan 4 takım ile yapılan kaynaklarda elde edilen dikiş görüntüleri verilmiştir. Burada uç çaplarının kaynak dikişinin oluşumuna nasıl bir etki gösterdiği açıklanmıştır. En yüksek kaynak mukavemeti elde edilem 900 d/d ve 33 mm/d ilerleme hızlarında gerçekleşmiştir. Şekil 16'da sırasıyla uç çapları 4 mm, 6 mm, 8 mm ve 5 mm dir. Sürtünme karıştırma kaynağında en önemli nokta hamur kıvamına gelen malzemenin omuz vasıtasıyla kaynak ilerleme yönünde aktarımını sağlamak ve omuz iç kısmında hapsolmesinin sağlanmasıdır. Omuz çapı ile uç çapı oranı bu yüzden çok önemlidir. Uç çapı arttığında omuzun iç kısmında malzemenin tutunması zorlaşır ve kaynak dikişi sanki bir kanal açılmış gibi bir görüntü elde edilir ve birleşme gerçekleşmez. Uç çapı çok küçük olduğunda ise ucun malzemeyi karıştırma işlevini tam manasıyla gerçekleştirememesi ortaya çıkar. Bu durumdada birleşme gerçekleşmez. Yaptığımız araştırmalarda ideal kaynak takımının omuz çapına bağlı olarak yaklaşık olarak 5 olması gerektiği tespit edilmiştir [38].



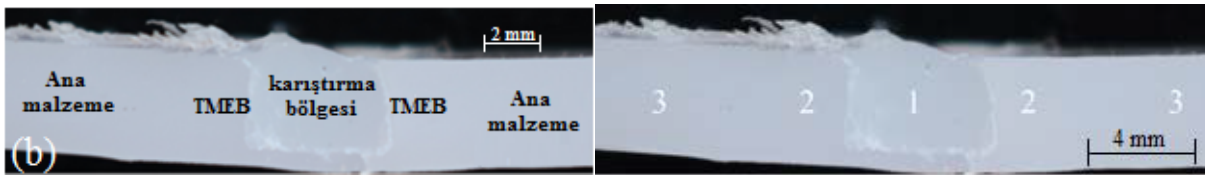
Şekil 16. Farklı uç çaplarına ait elde edilen kaynak dikişleri

Omuz çapı ile uç çapı oranının 5 olduğu takımlarla yapılan birleştirmelerden elde edilen çekme mukavemet değerleri Şekil 17'de verilmiştir. Bunun için omuz çapı 18, 22, 26 ve 30 mm olan ve omuz ve uç çapı 5 olacak şekilde kaynak takımları üretilmiştir. Yapılan birleştirmeler başarılı olmuştur. Kaynak takım devir sayısı ise bu takımlarda 900 d/d ve ilerleme hızı 33,45,60 mm/d seçilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yapılan değerlendirmede omuz çapının yüksek olduğu takımlarda yüksek çekme mukavemetinin elde edildiği görülmüştür. Bunun sebebi ısı üretimine omuzun yardımcı olmasından ve bu malzemeyi rahat bir şekilde taşımasından dolayı olduğu tespit edilmiştir. Aynı oranlara sahip olsa dahi, omuz çapları azaldığında mukavemet değerleri düşmüştür. Yapılan kaynakların hepsinde birleşme meydana gelmiştir. Fakat uç ve omuz çaplarından dolayı farklı mukavemet değerleri elde edilmiştir.



Şekil 17. Omuz çapı ve uç çap oranı 5 olan takımlarla elde edilen çekme mukavemeti değerleri

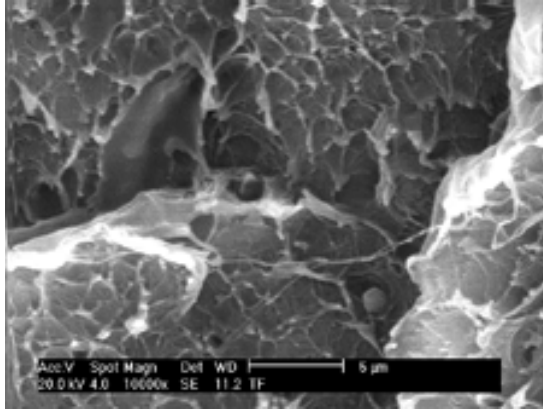
SKK ile yapılan tipik bir birleşmede, üç kaynak bölgesi meydana gelir. Karıştırma bölgesi (KB), termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) ve ana malzeme bölgesi (AM). Kaynağın merkezi, karıştırma bölgesi veya külçe bölgesi olarak adlandırılır ve plastik deformasyon nedeniyle eş eksenli bir yapı oluşur [38]. Bu bölgenin genişliği seçilen makine parametrelerine ve kaynak takımının ölçülerine bağlıdır. Karıştırma bölgesine en yakın olan bölge termo mekanik olarak etkilenen bölgedir. Bu bölge, karıştırma bölgesi kadar değişiklik yaşamaz, ancak hem mekanik hem de termal olarak etkilenir. Kısmen yeniden kristalize edilmiş yapılardan oluşur. Ana malzeme, kaynak işleminden öncekiyle aynı özelliklere sahip olup herhangi bir değişim söz konusu olmaz. Şekil 18’de yapılan kaynakların alından kesilerek elde edilen fotoğraf görülmektedir. Karıştırma esnasında omuz ısının oluşmasına, sıcaklığın artmasına ve karışım bölgesine baskı uygulamasına yardımcı olması hem mukavemeti hemde kaynak performansını direkt etkiler. Termo mekanik olarak etkilenen bölge ne kadar geniş bir alanda kalırsa çekme mukavemeti artmaktadır. Ayrıca ucun malzemeyi karıştırma süresi de mukavemeti etkilemektedir.



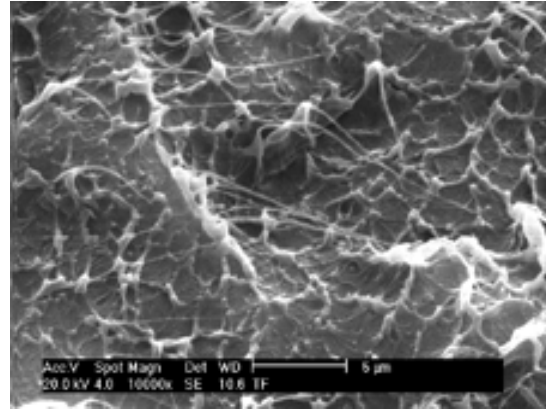
Şekil 18. SKK alın kesit görüntüsü, 1. Karıştırma bölgesi, 2. Termo-mekanik olarak etkilenen bölge, 3. Ana malzeme

Şekil 17’de elde edilen çekme mukavemetlerinden en düşük ve en yüksek çekme mukavemeti elde edilen numunelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 19 ve Şekil 20 de verilmiştir. Şekil 19’da en düşük çekme mukavemeti elde edilen omuz çapı 18 mm, uç çapı 3,6 mm olan takım ile yapılan kaynakta, karıştırma bölgesindeki ve mekanik olarak etkilenen bölgedeki farklılıklar görülmektedir. Karıştırma bölgesindeki görüntüde malzemenin homojen bir şekilde karışmadığı açıkça görülmektedir. Ayrıca karışım gerçekleştikten sonra bağların birbiri ile bağlanmadığı ve parça parça kaldığı görülmektedir. Bu durum termo mekanik olarak etkilenen bölgede de görülmektedir [36,37]. . Bu durum omuz çapının düşük olmasından dolayı karıştırma alanına oluşturduğu baskının az olmasından dolayı meydana gelmiştir. Omuz çapı

daha fazla olsa idi bu baskı fazla bir alana nüfuz edecekti. Bu yüzden burada oluşan yapının homojen oluşmasını engellemiştir.



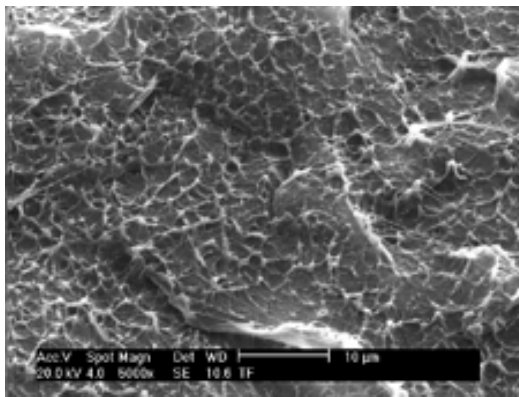
(a)



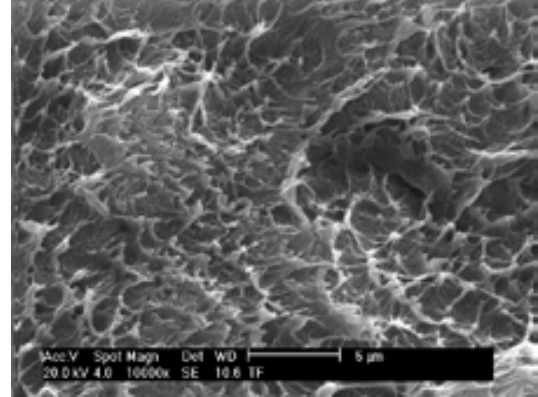
(b)

Şekil 19. 18/3,6 mm olan takım ile yapılan kaynaktan alınan SEM görüntüleri. a) Karıştırma bölgesi, b). Termo-mekanik olarak etkilenen bölge

Şekil 17’de en yüksek çekme mukavemeti elde edilen omuz çapı 30 mm, uç çapı 6 mm olan takım ile yapılan kaynaktaki, karıştırma bölgesindeki ve mekanik olarak etkilenen bölgedeki görüntülere yer verilmiştir. Karıştırma bölgesinde uç çapının ve omuz çapının fazla olmasından dolayı hem karıştırma bölgesinde hemde termo mekanik olarak etkilenen bölgede düzenli bir yapı oluşumu sağlanmıştır. Karıştırma bölgesindeki görüntüde malzemenin homojen bir şekilde karıştığı ve ucun karıştırma esnasında hareket halinde olan plasstiği omuzun kaynak dikiş bölgesinde tuttuğunu anlayabiliriz. Ayrıca karışma esnasında akışkan haldeki plastik malzeme omuz vasıtasıyla karıştırma bölgesine baskı yapmıştır. Bu sebepten dolayı kaynak esnasında dikişte düzenli bir yapı oluşmuştur. Bu düzenli yapı hem kanak performansı hemde mukavemet değerinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Omuz çapının fazla olması ile akışkan malzeme kaynak bölgesinde rahatlıkla tutulmaktadır [11,36,37, 39].



(a)

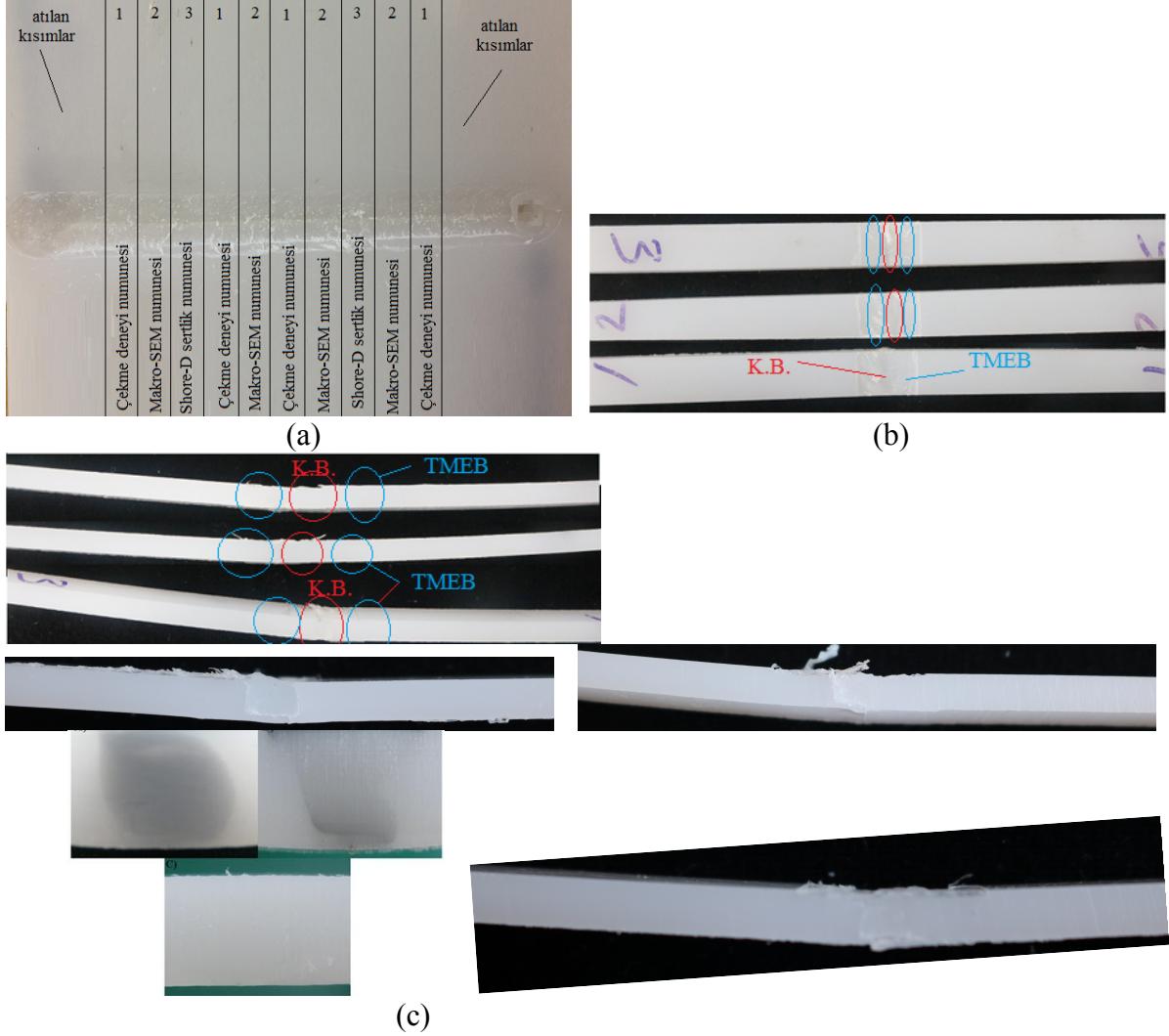


(b)

Şekil 20. 30/6 mm olan takım ile yapılan kaynaktan alınan SEM görüntüleri. a) Karıştırma bölgesi, b). Termo-mekanik olarak etkilenen bölge

Yapılan birleştirmelerden farklı bölgelerden alınan numunelerden çekme deneyi, makro-mikroyapı numuneleri ve sertlik deneyi için numuneler çıkarılmıştır. Bu numunelerin yapılan kaynaklarda nerelerden alındığı Şekil 21 a’da gösterilmiştir. Çekme deneyi, makro-mikroyapı numuneleri ve sertlik deney için kesilen numuneler ve kaynak bölgeleri Şekil 21 b ve c’de gösterilmiştir. Burada farklı kaynak parametreleri uygulanarak başarılı olmuş ve yüksek

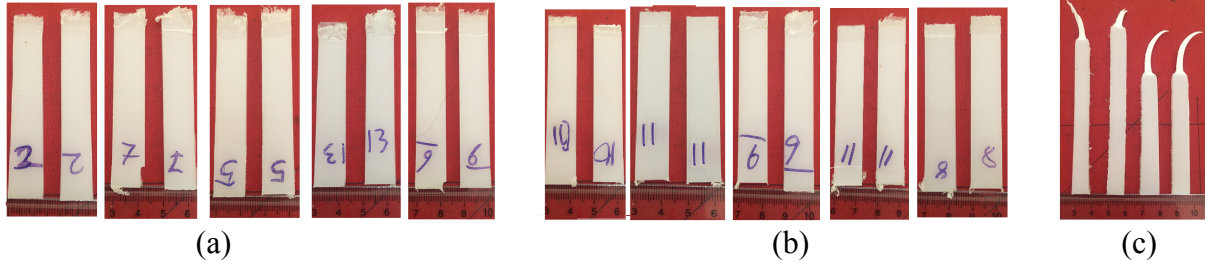
çekme mukavemeti elde edilmiş birleştirmelerden alınan alın kesit görüntülerinde bölgelerdeki büyüklükler açıkça görülmektedir. Karıştırma bölgesi (K.B.) ve termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) alanları arasındaki bölgesel dağılım net olarak anlaşılmaktadır [11,36].



Şekil 21. Yapılan SKK birleştirmelerinden alınan numunelerin görüntüleri

Yapılan çekme deneylerinde yüksek mukavemet değerleri elde edilen numunelere ait çekme deney numuneleri Şekil 22 a'da verilmiştir. Burada kaynaklı numunelerin çoğunluğu sünek kopma tipinde veya karışık (sünek-gevrek) gerçekleşmiştir. Kopma yerleri ise genellikle TMEB bölgesinden gerçekleşmiştir. Bu bölgeden kopması kaynak performansı ve kalitesinin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Karıştırma bölgesi ile TMEB arasında homojen bir karışımın gerçekleştiğini ve kopma esnasında bir plastik deformasyon meydana gelmesini sağlamıştır. Şekil 22'de gevrek kırılma elde edilen numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. Düşük ve orta derecede olan çekme mukavemet değerlerinde elde edilmiştir. Kırılma yerlerinin büyük çoğunluğu karıştırma bölgesi ve karıştırma bölgesi ile TMEB bölgesi kesişme yerlerinden gerçekleşmiştir. Gevrek kırılmalarda plastik deformasyon gerçekleşmemiştir. Ani ve kararsız kırılmalar meydana gelmiştir. Bu kırılmada homojen bir karışım gerçekleşmediğini ve bölgeler arasında karışımın tam manasıyla oluşmadığını anlamaktayız. Bu kırılma tipini yapılan SKK numunelerinde tercih edilmektedir [11,36,37, 39]. Şekil 22 c'de kaynak edilmeyen HDPE numunesine ait çekme deney sonrası elde edilen

görüntü verilmiştir. Burada plastik deformasyonun gerçekleştiği ve yapılan SKK numunelerinin ana malzemeye göre ne kadarlık bir çekme mukavemet değeri elde edildiğinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

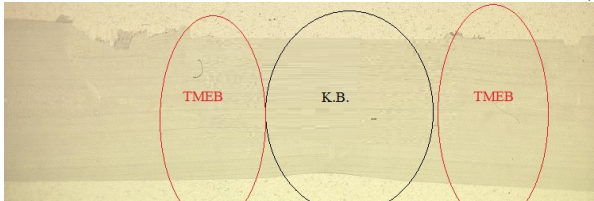


Şekil 22. Çekme deneylerinden elde edilen kırılma tipleri

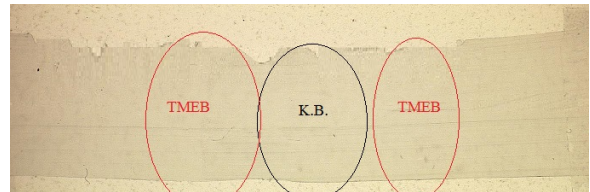
Çekme deneyleri, makro yapı ve göz ile yapılan değerlendirmelerden elde edilen sonuçlardaki numunelerden SEM görüntülerinin alınmasına karar verilmiştir. SEM analizleri için enine kesilen numuneler mikrotorm cihazında (Şekil 23 a) 0,10 mm kalınlığında film tabakalar kesilerek alınan numunelerden alınan film tabaka Şekil 23 b ve c’de verilmiştir. Alınan film tabakalar iki cam lam içerisine alınarak bir kaç gün bu şekilde bekletilmiştir. Bu sayede 0,1 mm kalınlığındaki plastik film tabakaların daha düzgün olması sağlanmıştır.



(a)



(b)

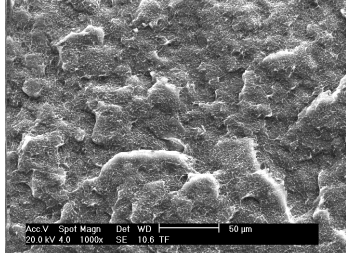
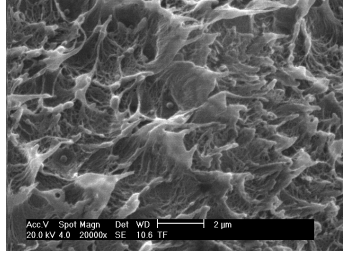
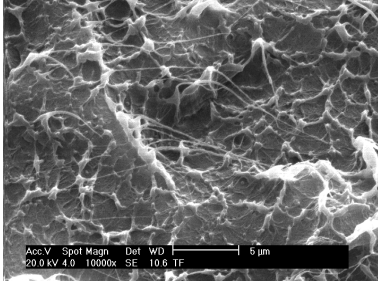
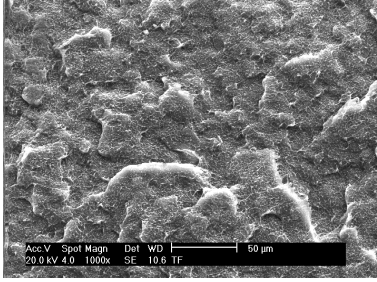
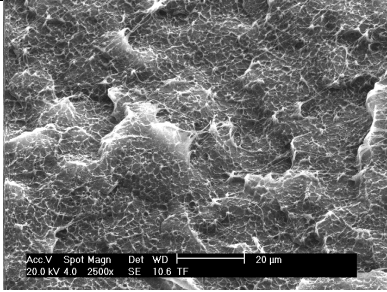
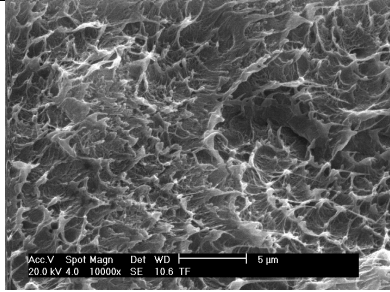
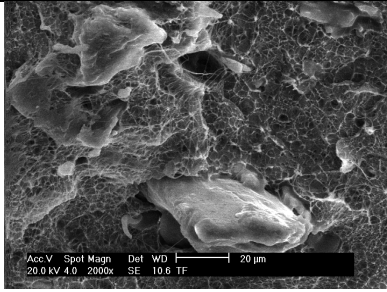
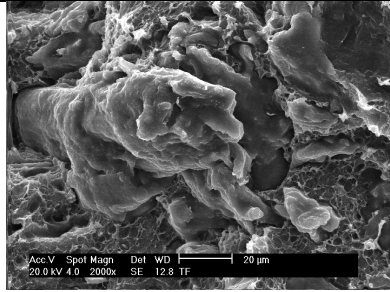


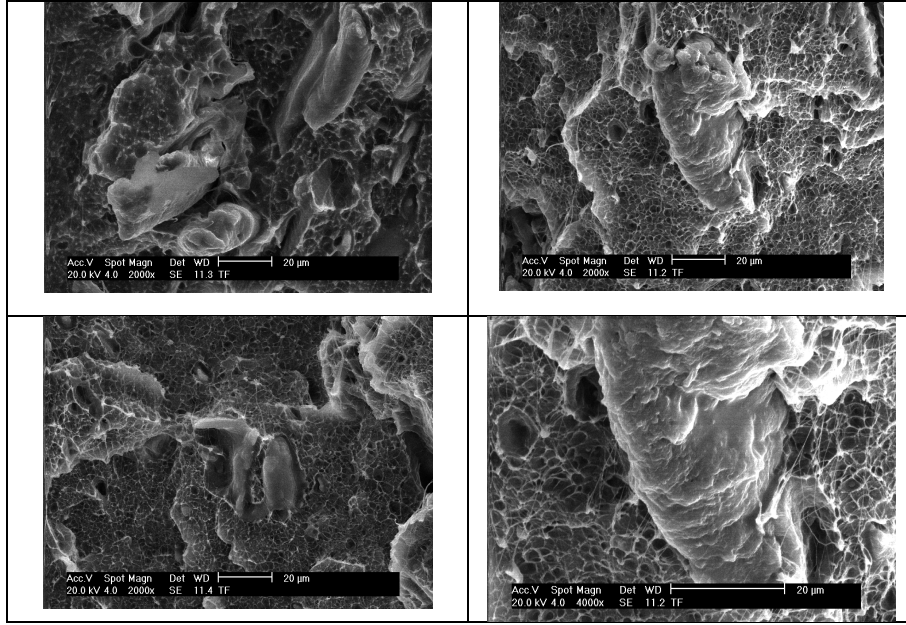
(c)

Şekil 23. SEM görüntüleri için kullanılan mikrotorm cihazı ve SEM için kesilen numuneler

Yapılan detaylı araştırmalardan sonra elde edilen optimum kaynak takımları ve makine parametreleri ile yapılan deneylerden yüksek çekme mukavemetleri ve kaynak performansları yüksek çıkmaktadır. Yüksek çekme mukavemeti elde edilen numunelerden alınan SEM görüntülerinde karıştırma ve TMEB bölgelerinden görüntüler alınmıştır (Şekil 24). Karıştırma bölgesinin homojen karışımı ve karıştırma bölgesinden malzeme taşması meydana gelmediği durumlarda zincir üzerindeki bağlar tekrar düzenli bir hal almıştır. Bu sayede uniform bir yapı meydana gelmiştir. Karıştırma bölgesi dışında kalan TMEB plastik deformasyona uğrayan karıştırma bölgesinden gelen plasyik malzeme ve omuzun baskısı ile bu alanda bir türbılan oluşur. Hem üstten baskı hemde yan taraftan karıştırmadan dolayı gelen yatay bir hareket ile bu bölgede karmaşık bir düzen meydana gelir. Omuzun uç çapı ile uyumu sayesinde iki bölge arasında karıştırma esnasında homojen bir yapı oluşmuştur. Bu

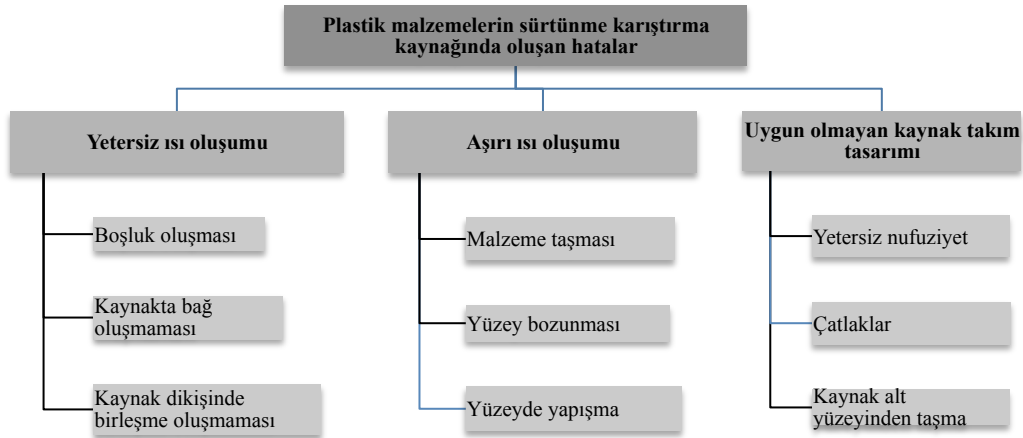
sayede de yüksek çekme mukavemetleri elde edilmiştir. Düşük çekme mukavemeti elde edilen numunelerden alınan SEM görüntülerinde ise takım ve makine parametrelerinin uyumsuzluğu öncelikle ön plandadır. Özellikle karıştırma bölgesinden alınan görüntüde karımın tam olarak gerçekleşmediği ve ısıdan dolayı ana zincirden kopan dalların tekrar birleşmediği görülmektedir. Omuz çapı ve uç çapıda uygun olmadığı zaman bu olayı ayrıca tetiklemektedir. Bu şartlardan yapılan kaynaklarda daima düşük mukavemet, kaynak performansı düşük ve kaynakta devamlı olarak hatalar meydana gelir.

Çekme mukavemeti en yüksek çıkan parametrelerden alınan SEM görüntüleri	
TMEB Bölgesi	Karıştırma Bölgesi
	
	
	
Çekme mukavemeti düşük çıkan parametrelerden alınan SEM görüntüleri	
TMEB Bölgesi	Karıştırma Bölgesi
	



Şekil 24. SEM görüntüleri

Optimasyon çalışmaları, takım devir sayısı, ilerleme hızı, takım omuz çapı ve uç çapının aratırmalarını yapmak için yüzlerce SKK birleştirmeleri yapılmıştır. Yapılan literatür taramalarında kaynak parametreleri ve takım geometrileri üzerine araştırmalara rastlanmıştır. SKK oluşan hatalar ve bu hataların sebep olduğu şartlar, önleme yöntemleri üzerine bir çalışmaya ratlanmamıştır. Buradan yola çıkarak bu proje kapsamında kaynak hataları üzerine bir araştırmada yapılmıştır. Öncelikle yapılan kaynakta oluşan hatalar ana başlıkta gruplandırılmıştır. Daha sonra bu hatalar detaylandırılmıştır. Şekil 25'te yapılan gruplandırmaya ait bilgiler verilmiştir.



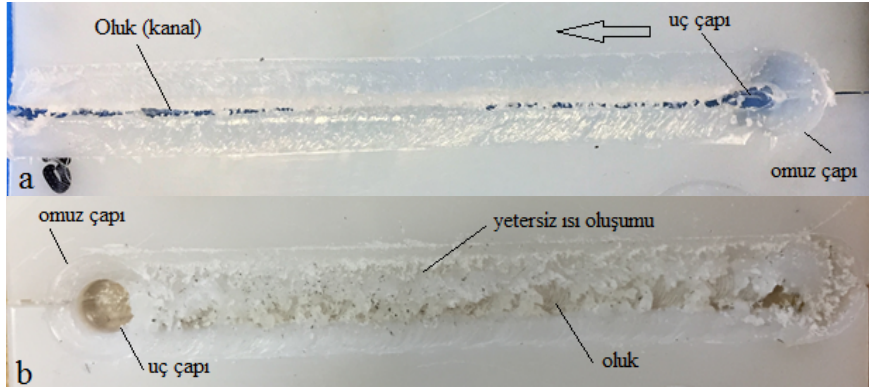
Şekil 25. Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağında meydana gelen hatalar [40].

Kaynak hataları, özellikle karıştırma bölgesi ve termo mekanik olarak etkilenen bölgede oluşan olumsuzluklardan dolayı meydana gelmektedir. Belirtilen bölgelerde yaşanan olumsuzluklar kaynak bölgesine farklı etki göstermektedir.

Yetersiz ısı oluşumu

SKK esnasında karıştırma bölgesinde ve TMEB bölgesinde oluşacak yetersiz ısı oluşumu ile

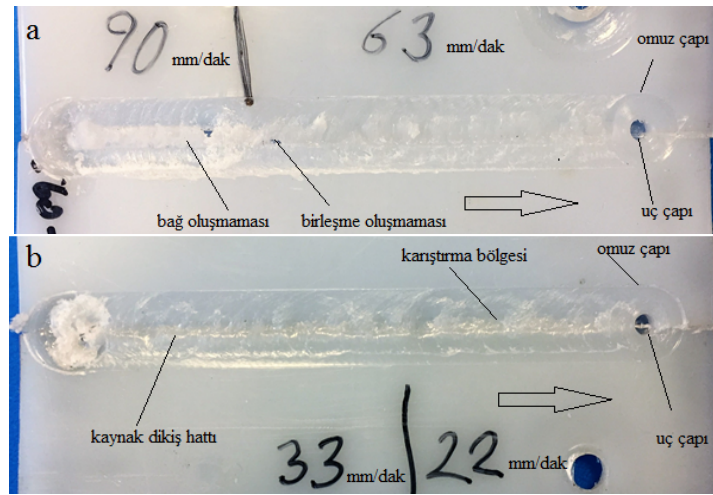
kaynak hattında boşluk oluşması, bağ oluşmaması ve dikişte birleşme oluşmaması tarzında hatalar meydana gelmektedir. Burada etkin parametreler olarak ısıyı üretmek için kullanılan takım dönme hızı, kaynak takımının omuz çapı ve uç çapıdır. Takım dönme hızı düşük kaldığında ısı oluşumu sağlanmayacak ve kaynak ilerleme yönünde ısınan malzemeyi ilerletmek mümkün olmayacaktır. Ayrıca ısıyı üretmek için kullanılan kaynak takımında omuz ve uç çapının belli bir değerden büyük yada küçük olması durumunda bu hataların meydana gelmesine sebep olmaktadır. Şekil 26' da aynı devir sayısı ve farklı uç çapları ile yapılan birleştirmeler görülmektedir. Boşluk oluşması malzemenin yeterli miktarda ısınmadığında yada ısı oluşmadığında kaynak dikişinde ilerleme yönünde uç ölçüsüne yakın oluklar ve kanal şeklinde oluşur. Oluk oluşmaması için elde edilecek ısı miktarının yeterli olması gerekmektedir. Ayrıca omuz çapı ile kaynak takım ucu arasındaki oranda önemlidir. Plastik malzemelerin SKK'larında ideal omuz çapı/uç çapı oranı daha önceki çalışmalarımızda 4-5 arasında olduğu tespit edilmiştir [38]. Bu oran küçüldükçe oluk oluşması, büyüdükçe ise aşırı ısınmadan dolayı malzeme taşması ve kaynak bölgesindeki kalınlıkta azalma meydana gelmektedir. SKK numunelerinin aşırı düşük takım dönme hızında nihai gerilme mukavemeti bu yüzden düşük çıkmakta ve kaynakta daha az ısı oluşması nedeniyle kaynak hattında kırılma çizgisi gözlenmiştir. Şekil 26 a'da omuz çapı ve uç çapı oranı yaklaşık 6'dır. Ayrıca takım dönme hızı da düşük olduğundan dolayı ısı üretimi yeterli seviyede oluşmamıştır. Uç çapı küçük olduğu için bazı bölgelerde kısmi birleşme meydana gelmiştir. Genel olarak kaynak hattı boyunca bir kanal söz konusudur [38,40]. Şekil 26b'de ise omuz ve uç çapı oranı yaklaşık 2 oranındadır. 710 dev/dak takım dönme hızında yeterli ısı oluşmuş fakat uç çapı büyük olduğundan dolayı omuz malzemeyi hapsedememiş ve kaynak hattı boyunca yayılmasını sağlayamamıştır. Omuz çapı ile uç çapı oranı küçük olduğunda hangi şartlar olursa olsun hem kanal oluşur hemde yeterli birleşme gerçekleşmez.



Şekil 26. a) 560 dev/dak takım dönme hızı, 33 mm/dak ilerleme hızında, omuz çapı 18 mm ve uç çapı 3mm, b) 710 dev/dak takım dönme hızı, 33 mm/dak ilerleme hızında, omuz çapı 16 mm uç ve çapı 8 mm.

Bağ oluşmaması ve dikişte birleşme oluşmaması hatası, kaynak ilerleme yönünde oluşan düzensiz bir dikiş oluşumu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dikişlerdeki düzensizlikler hem kaynak parametrelerinin uygun seçilmediğini durumlarda hem de ısı üretiminin yetersiz olduğunu göstermektedir. Dikişin kaynak ilerleme yönünde homojen oluşmasını sağlamak için en önemli kaynak parametresi olarak ilerleme hızı belirlenmiştir. Karıştırma bölgesi yeterli ısı ulaşsa bile ilerleme hızı yüksek olduğunda dikişlerde oluklar ve süreksizlikler meydana geldiği görülmüştür. Bu yüzden kaynak dikiş hattında kısmi olarak birleşme oluşmadığı şeklinde veya bölgesel olarak birleşme olduğu görülmüştür. Malzeme birleştirme gerçekleşecek kadar ısınmaması durumunda ilerleme esnasında malzeme omuz tarafından homojen yayılmayı gerçekleştirememektedir. Şekil 27'de aynı kaynak takımı ile

farklı kaynak parametrelerinde yapılan kaynaklarda oluşan kaynak hataları gösterilmiştir. Şekil 7 a'da 1400 dev/dak takım dönme hızında 90 mm/dak ve 63 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynakta ilerleme hızının azaltılması ile kaynakta bağ ve birleşme oluşması gerçekleşmiştir. İlerleme hızının biraz daha azaltılması durumunda ideal birleşme sağlayacağı açıkça görülmektedir. 90 mm/dak ilerleme hızında ısınan plastik malzeme omuzun iç kısmında hapsettiği malzemeyi kaynak hattına yayamamıştır. İlerleme hızı azaltıldığında bu malzeme kaynak hattı boyunca yayılmaya başlamış, birleşme ve bağ oluşumu kaynak dikişi boyunca başlamıştır. Şekil 27 b'de 560 dev/dak takım dönme hızında 33 mm/dak ve 22 mm/dak ilerleme hızında kaynaklar yapılmıştır. Polietilen malzeme yeterince ısınmıştır. İlerleme hızı 33 mm/dak durumunda omuzun temas alanında malzeme azalması görülmektedir. İlerleme miktarı yeterli olmadığı için omuzun temas bölgesinde plastik malzeme hacminde azalma meydana gelmiştir. İlerleme hızı biraz azaltıldığında omuz temas alanındaki malzeme hacminde artma meydana gelmiştir. Buda hem bağ oluşmasına hemde birleşme gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır. İlerleme hızının karıştırma ve TMEB bölgesine etkin olduğu açıkça görülmektedir [37,38,40]. Ayrıca ilerleme hızının takım dönme hızına bağlı olarak değiştiği ve kaynak hattına etkileri rahatlıkla anlaşılmaktadır. Isı oluşumunu arttırmak için sürtünme karıştırma kaynağında omuzun iş parçasına temasından sonra bekleme süresini arttırılabiliriz. Fakat oluşan ısı ile hamur kıvamına gelen malzemeyi de kaynak hattı boyunca uniform yayılmasını sağlama gerekir. Kaynak hattına malzemeyi uniform dağılımı sağlamak için uygun ilerleme hızının kesinlikle seçilmesi gerekir (Şekil 26)

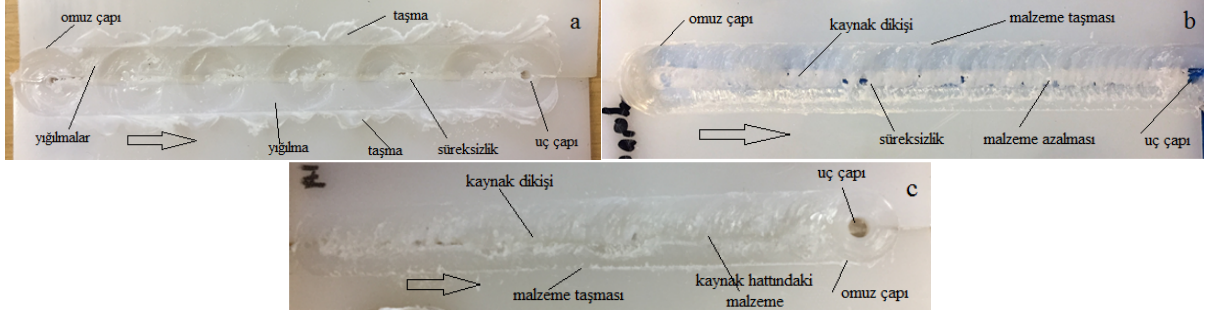


Şekil 27. Kaynak ilerleme hızına bağlı olarak kaynak dikiş hattındaki değişimler a) 1400 dev/dak takım dönme hızı, b) 560 dev/dak takım dönme hızı

Aşırı ısı oluşumu

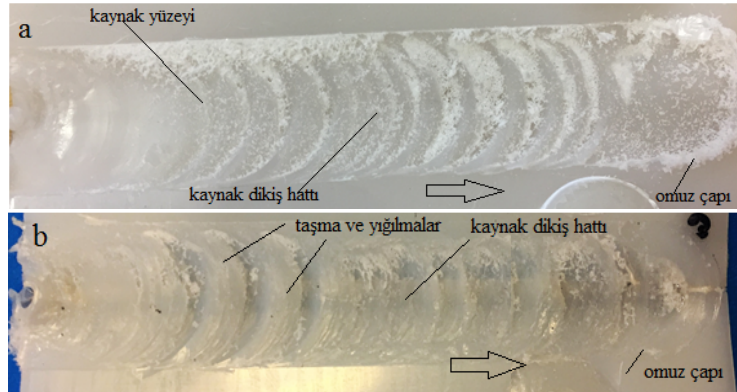
Kaynak esnasında aşırı ısı üretimi neticesinde malzeme taşması, yüzey bozunması ve yüzeyde yapılaşma hataları meydana gelmektedir. Aşırı ısı üretimi kaynak takımının yüksek devirde dönmesi ile birlikte ilerleme hızının düşük olduğu şartlarda meydana gelmektedir. Ayrıca kaynak takım tasarımı da aşırı ısı üretimini desteklemektedir. Karıştırıcı takım ucunun ve omuzun sürtünmesi ile başlayan ısınma yeterli seviyeye geldiğinde omuzun bu akışkan malzemeyi kaynak ilerleme yönünde homojen bir şekilde yayması gerekmektedir. Kaynak ilerleme hızı yavaş olduğunda, karıştırma bölgesinde ve omuzun temas halinde olan TMEB ve karıştırma bölgesinde malzeme akışı aşırı ısı üretiminde kontrol edilememektedir. Bu sebeple akışkan malzeme omuz kısmından dışarı taşmaktadır. Omuzun akışkan halde bu malzemeyi kontrol altına alması için kaynak takımına iç bükey bir açı verilmiştir. Bu açı sayesinde sıvı malzemenin belirli bir miktarı burada hapsolür ve ilerleme başladığında yüzeye

baskı yaparak dikiş oluşumuna yardımcı olur. Malzeme taşması gerçekleşen ilerleme hızından daha hızlı ilerleme hızında yapılan kaynaklarda malzeme taşması ve yüzey bozulmalarının azaldığı görülmüştür (Lambiase, et.al. 2020). Şekil 28’de aşırı ısı üretimi ile gerçekleşen kaynak hatalarına ait görüntüler verilmiştir. Burada aynı takım devir sayısında, farklı ilerleme hızları kullanılarak kaynak bölgesinde meydana gelen hatalar görülmektedir. Artan ilerleme hızı ile oluşan malzeme taşması, yüzey bozunması ve yüzeyde oluşan yapışma azalmıştır.



Şekil 28. 1400 dev/dak takım dönme hızında farklı kaynak ilerleme hızına bağlı olarak kaynak dikiş hattındaki değişimler a) 22 mm/dak ilerleme hızı, b) 45 mm/dak ilerleme hızı, c) 65 mm/dak ilerleme hızı

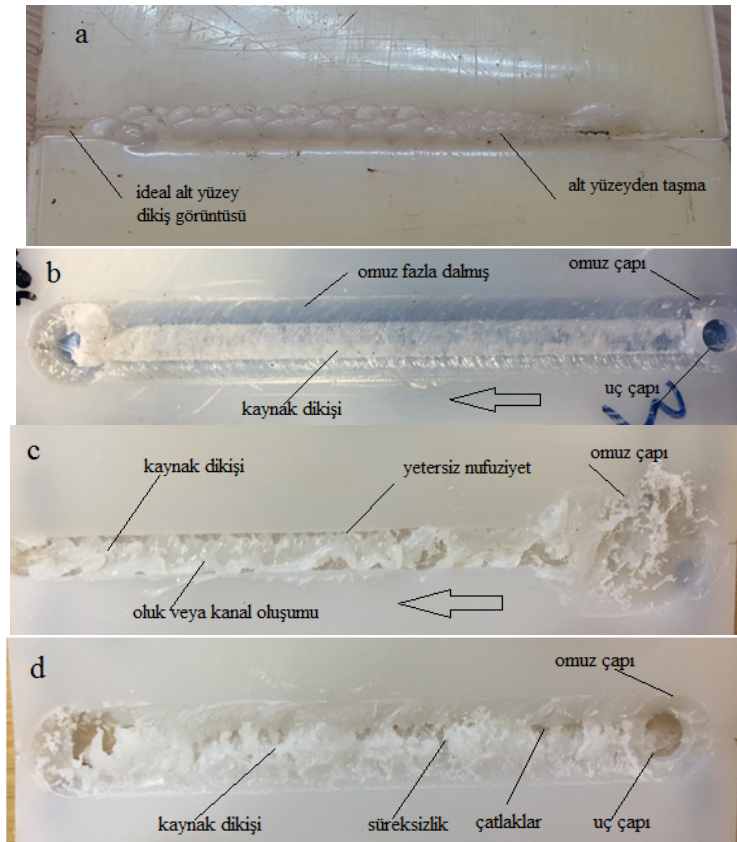
Şekil 28a’da kaynak hattında düşük ilerleme hızından dolayı aşırı ısınan malzeme omuz kısmında tutunması zorlaşır ve malzeme omuz kısmından kaynak hattı boyunca taşmış ve dikişte düzensizlikler meydana gelmiştir. Şekil 28b ve c’de İlerleme hızı kademeli olarak arttırıldığında kaynak dikiş kalınlığı artmış ve buna bağlı olarak karıştırma bölgesindeki malzeme hacmi artmıştır. Artan ilerleme hızı sayesinde omuzun iç kısmında hapsolan malzeme kaynak hattına daha fazla nüfuz etmiştir. Bu sebeple karıştırma bölgesi ve kaynak dikişi iyileşmiştir. Ayrıca, ısı üretiminde her ne kadar takım dönme hızı önemli ise de kaynak takım omuz çapıda önemlidir. Omuz çapı ve dönme hızı yüksek olduğunda omuz çapı düşük olan takımlara göre daha fazla ısı üretilir. Şekil 29’de 30 mm omuz çapına sahip bir takım ile aynı takım dönme hızında ve farklı ilerleme hızında yapılmış bir kaynak görüntüleri verilmiştir. Bu kaynaklarda devir sayısı yüksek ve omuz çapının büyük olmasından dolayı aşırı ısı oluştuğundan dolayı malzemeyi omuz alt kısmında tutmak oldukça zordur. Burada ilerleme hızına bağlı olarak yüzeyde bozunmalar meydana gelmiştir (Şekil 29 a,b). Aşırı ısıdan dolayı malzeme kontrol edilememiştir ve malzeme de omuzun dönme yönünde yüzeyde taşmaların olmasına neden olmuştur. Uygun ilerleme hızı seçilmediğinde ise birleşme olmasına rağmen kaynak hattı boyunca yüzeyde bozunmalar ve yapışmalar meydana gelmiştir [40].



Şekil 29. 1400 dev/dak takım dönme hızında farklı kaynak ilerleme hızına bağlı olarak 30 mm omuz çaplı takım ile yapılan kaynaktaki değişimler a) 45 mm/dak ilerleme hızı, b) 22 mm/dak ilerleme hızı

Uygun olmayan kaynak takım tasarımı

Kaynak takımına ait değişkenlerin birbiri ile uyumlu olmadığı durumlarda, makine parametreleri uygun seçilmiş olsa bile yetersiz nüfuziyet, çatlaklar ve kaynak alt yüzeyinden taşma tarzında kaynak hataları meydana gelmektedir [11,37,38,40]. Kaynak takımı hem ısı üretimine yardımcı olurken hemde deformasyona uğrayan malzemeyi kaynak hattı boyunca homojen şekilde yayılma sürecine yardımcı olmaktadır. Kaynak takımında omuz çapı, uç çapı, omuz açısı ve uç uzunluğu değişken olarak tasarımda kullanılır. Daha önceki çalışmalarımızdan elde ettiğimiz sonuçlarda omuz çapı ile uç çapı oranı 4-5 oranında olması gerektiği tespit edilmiştir. Bu oran azaldıkça kaynak hattında süreksizlik, çatlak oluşumuna neden olur [40]. Ayrıca kaynak yapılacak malzeme ile kaynak takım ucu arasında bir ilişki vardır. Kaynak takım uç uzunluğu kaynak yapılacak malzeme kalınlığından 0,2-0,3 mm küçük olmalıdır. Kaynak esnasında omuz malzeme yüzeyine temas ettikten sonra 0,1 mm daldırıldığında kaynak ucu kalıbın tabanına 0,1-0,2 mm boşluk kalması sağlanmalıdır. Bu mesafe azaldıkça parça alt yüzeyinden taşmalar meydana gelir (Şekil 30 a). Bu mesafe ne kadar büyür ise kaynak dikişinde yetersiz nüfuziyet meydana gelir (Şekil 30 c). SKK'nda etkin parametrelerinden biri de uç uzunluğudur. Uç uzunluğu kaynak edilecek malzeme kalınlığının yaklaşık % 87-90 oranında olması gerekir [38,40]. Bu oran fazla olduğunda kaynak alt yüzeyinden taşma, az olduğunda ise yetersiz nüfuziyet hatası meydana gelir (Şekil 29 c). Ayrıca omuzun parça yüzeyine fazla daldırılması neticesinde de kaynak hattında parça kalınlığında azalma meydana gelir (Şekil 30 b). Malzeme kalınlığının azalması kaynak mukavemet değerlerini ve kaynak kalitesini olumsuz etkilediği görülmüştür. İdeal kaynak parametreleri ve takım tasarımı sağlandığında bu kaynak hatalarının oluşması önlenmiş olur.



Şekil 30. a) Kaynak alt yüzeyinden taşma, b) Omuzun üst parçaya fazla dalması, c) Uç uzunluğunun idealden kısa olması durumunda yetersiz nüfuziyet, d) Omuz çapı ile uç çap oranının küçük olduğu durumda oluşan süreksizlik, çatlaklar

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Polimerik malzemelerin ve bunların kompozitleri son yıllarda otomotiv endüstrisinde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yeni bir kaynak yöntemi olan SKK ve bu yöntemin bir uygulama şekli olan sürtünme karıştırma nokta kaynağının (SKNK) [64-69] kullanım alanı artan plastik malzemelere SKK uygulaması çalışmaları başlamıştır. Termoplastik plastiklere SKK yönteminin uygulanabilirliği, makine parametrelerin ve takım geometrisinin optimizasyonu ve kaynakta ortaya çıkan sorunların çözüm yolları önem kazanmıştır. Proje kapsamında YYPE levhalara bir plan doğrultusunda SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir. YYPE levhalarına SKK ile başarılı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. SKK kalitesine, mukavemetine ve kaynak performansına etkin olan üç temel kaynak değişkeni mevcuttur. Bu değişkenlerin birbirleri ile devamlı olarak uyumlu olması gerekmektedir. Uyumsuzluk olması durumunda öncelikle mukavemeti, karışım bölgesindeki yapı ve kaynak performansını olumsuz etkilemektedir. Bu durumda da kaynak hataları meydana gelmektedir. Proje kapsamında hedefimiz, makine parametrelerinin, takım değişkenlerinin ve oluşan kaynak hatalarının tespiti üzerineydi. Yapılan optimizasyon çalışmaları ile YYPE levhalara uygulanan SKK ile kaynak parametrelerinin etkin olan şartları tespit edilmiştir. Kaynak şartlarının birleştirme bölgesindeki mikroyapıya etkileri araştırılmıştır. Kaynak parametreleri ile takım geometrilerinin birbiri ile devamlı olarak uyumlu olması gerekliliği tespit edilmiştir. Elde edilen en uygun değerler ile kaynaklar gerçekleştirilmiş olup YYPE levhaların SKK yöntemi ile sorunsuz birleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Fakat plastik malzemelerin ısındıklarında kontrol edilebilirliği çok zor olduğu için kaynak şartlarının seçiminin çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca oluşan kaynak hataları ve bunların önleme yöntemleri ile ilgili de detaylı bir inceleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile iki adet kabul edilmiş ve bir adet değerlendirmede olan SCI makale hazırlanmıştır. Ayrıca 2 tane uluslararası sempozyumda bildiri sunulmuştur. Bir adet çalışmada aralık ayında düzenlenecek sempozyumda sunulması planlanmaktadır. Yapılan başarılı birleştirmelerden ve elde edilen olumlu sonuçlardan sonra plastik malzemelerin ve kompozitleri bir robot ile kaynakların yapılabilirliğini incelemek için TUBİTAK 1001 projesi verilmiştir fakat ikinci değerlendirmeden geçememiştir. Projede yayın açısından hedeflere ulaşılmıştır. Proje önerimizde yapmak istediğimiz fakat daha sonra vazgeçtiğimiz çalışma toz ilavesi ile SKK yapmaktı. Demo çalışmalardan alınan sonuçların olacağını düşündüğümüz veya planladığımız şekilde gerçekleşmemesinden dolayı bu tozların alımından vazgeçilmiştir. Tozlar için ayrılan bütçe kullanılmamıştır.

Proje kapsamında planlanan Temel İşlemler Atölyesinde kendi tasarımı ve imalatımız olan ve kalibrasyonu yapılmış bir pin on disk aşınma cihazının modernize edip toz ilaveli kaynaklı numunelerin aşınma deneylerini yapmaktı. Bu aşınma cihazında sadece ağırlık kaybı metodu ile aşınma deneyleri gerçekleştirilirken, geliştirme ile hem yükseklik kaybı hemde deney esnasındaki yük değişimlerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Fakat projede öngörülme ve aşınma deney cihazının elektronik kısımlarının tasarımı gerçekleştirecek kişinin doktora çalışmasının yoğunluğu, yurt dışına çıkması, bir aratırmacı hocamızın emekli olmasından ve alım zamanındaki dövizin öngörülemeyen bir yükseliş göstermesinden dolayı aşınma cihazı modernize edilmemiştir. Buraya ayrılan bütçe kullanılmamıştır. Projede araştırmacı olarak katkıda bulunan Prof.Dr. Ahmet İrfan YÜKLER hocamızın emekli olması ve diğer araştırmacılarında yoğunluğu sebebiyle, projenin sonuna doğru da patlak veren pandemi sebebi ile proje planlanan takvim içerisinde gerçekleşmemiştir.

Proje kapsamında Teknoloji Fakültesinde bulunan XRD cihazının kurşun geçirmez camı ve anakartı projeden karşılayıp cihazı kullanılabilir duruma getirilmiştir. Bu iki kalem proje bütçesinin neredeyse yarısına bedeldi. Bu sayede hem üniversite içine hemde özel sektörün faydalanması sağlanmış olup, bir katma değer sağlanmıştır.

YYPE levhaların SKK birleştirmelerinde kaynak hataları meydana gelmiştir. Sonuçta kaynak hatalarının oluşmaması durumunda her zaman ideal kaynak ve yüksek mukavemet değerleri elde edileceği tespit edilmiştir. Bu yüzden SKK'larda meydana gelen hatalar nedenleri ve giderilmesi için yapılacak işlemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

* Yetersiz ısı oluşumu ile boşluk, bağ ve kaynak dikişinde birleşme oluşmaması hataları meydana gelir. Burada ısı üretiminin yetersiz olması düşük takım dönme hızında ve akışkan malzemeyi kaynak hattında ilerletmek için kullanılan ilerleme hızının büyük olduğu durumlarda meydana gelir. Kaynak takımında ise omuz çapı büyüdükçe uç çapında aynı oranda büyümesi gerekir. Bu oran 4-5 olmalıdır.

* Aşırı ısı oluşumu ile malzeme taşması, yüzey bozunması ve süreksizlik hataları meydana gelir. Karıştırma bölgesinde ısı üretiminin fazla olması yüksek takım dönme hızında ve akışkan malzemeyi kaynak hattında ilerletmek için kullanılan ilerleme hızının küçük olduğu durumlarda meydana gelir. Yüksek takım dönme hızlarında ısı üretimi rahatlıkla gerçekleşeceği için ilerleme hızında artırılması gereklidir.

* Uygun olmayan kaynak takım tasarımı ile, yetersiz nufuziyet, çatlaklar ve parça alt yüzeyinden taşmalar meydana gelir. Kaynak edilecek malzemenin kalınlığına göre uç uzunluğu tayin edilmelidir. Uç uzunluğunun büyük olması parça alt yüzeyinden taşmalara, küçük olması durumunda ise ısı oluşumu ve karıştırma tam olarak gerçekleşemeyeceği için çatlaklar ve yetersiz nufuziyet hataları oluşur.

* Aşağıda temel kaynak hataları ve giderilme yöntemleri tablo halinde verilmiştir.

Kaynak Hataları	Önleme Yöntemleri
Boşluk	Yetersiz omuz baskısı Yetersiz takım ilerleme hızı Yetersiz ısı oluşumu Yetersiz malzemeyi karıştırma hareketi Küçük omuz çapı Parçaların birbirine tam örtüşmemesi
Boşluk	Aşırı ilerleme hızı
Yetersiz nufuziyet	Kısa uç uzunluğu Yetersiz omuz dalma derinliği Yetersiz takım devir sayısı
Malzeme Taşması	Aşırı ısı oluşumu Aşırı omuz baskısı Aşırı omuz dalma derinliği
Çatlaklar	Yüksek ilerleme hızı Aşırı omuz çapı

Sonuç olarak tablo halinde verilen önleme yöntemleri uygulandığında problemsiz kaynakların yapılabileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Rother, S.R.N. 1999. Mineral Fillers in Thermoplastics I. Materials and Processing, Advance Polymer Science, 139: 67-75.
2. Abdel-Gwad, E.F. Omar, A.B.M. and Radwan, A.H. 2015. Load Ability of Friction Stir Welded Joints of High Density Polyethylene, International Journal of Technical Research and Applications, 32: 25-32.
3. Patel, A.R. and Dalwadi C.G. 2016. Dissimilar Material Joining of Metal to Polymer using Friction Stir Welding (FSW), International Journal of Science Technology & Engineering, 2 (10): 702-706.
4. Lohwasser D., Chen Z., Friction Stir Welding, Woodhead Publishing, 2010.
5. Kiss, Z, Czigány, T. Microscopic analysis of the morphology of beads in friction stir welded polypropylene. Express Polym Lett 2012 6: 54-62. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.6
6. Eslami, S, Miranda, JF, Mourao, L, et al. Polyethylene friction stir welding parameter optimization and temperature characterization. Int J Adv Manuf Technol 2018 99: 127-136.
7. Nelson, TW, Sorensen, CD, John, CJ. Friction stir welding of polymeric materials. US Patent 2009 6: 811.
8. Mendes, N, Loureiro, A, Martins, C, et al. Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding. Mater Des 2014 64: 81-90.
9. Aydin, M. Effects of Welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-polyethylene. Poly Plastic Technol Eng 2010 49(6): 595-601.
10. Tablo Arbegast, W.J. 2008. A flow-Partitioned Deformation Zone Model for Defect formation during Friction Stir Welding. Scripta Materials, 58 (5): 372-376.
11. Mishra, D. Sahu, K.S. Mahto, P.R. Pal, S.R. and Pal, K. 2019. Friction Stir Welding for Joining of Polymers, Strengthening and Joining by Plastic Deformation, Chapter 5, 123-162.
12. Paoletti A., Lombiase F., Ilio D., Optimization of friction stir welding of thermoplastics, The paper will be published in Procedia CIRP.
13. Hoseinlghab S., Mirjavadi S. S., Sadeghian N., Jalili I., Azarbarmas M., Givi M. K. B., Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates. Materials and Design, 2015, 67, 369-378.
14. Panneerselvam, K., Lenin, K., Effects and defects of the polypropylene plate for different parameters in friction stir welding process. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2013, 2(2), 143-152.
15. Peretz J., Das S., Tonn B., Evaluating Knowledge Benefits of Automotive Lightweighting Materials, Evaluation and Program Planning, 2009, 32 300-309.
- 16 Rai R., De, A., Bhadeshia H.K.D.H., Debroy T., Friction stir Welding Tools. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16, 325-342.
17. Hattingh D.G., Niekerk T.I., Blignault C., Kruger G., James M.N., Analysis of the FSW Foot Print and its Relationship with Process Parameters to Optimise Weld Performance and Tool Design. Welding in the World, 2004, 48, 50-58
18. Kanwer S., Arora S., Pandey S., Schaper M., Kumar R., Effect of Process Parameters on Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 2219-T87. International Journal of Advance Manufacture Technology, 2010, 50, 941-952
19. Kaluç E., Taban E., Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, İstanbul, 2007

20. Lertora E., Gambaro C., AA 8090 Al-Li Alloy FSW Parameters to Minimize Defects and Increase Fatigue Life, *International Journal Material Forum*, 2010, 3, 1003-1006.
21. Liming L., Jifeng W., Gang S., Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy, *Materials Science and Engineering*, 381A, 2004, (1-2), 129-133.
22. Commin L., Dumont M., Masse J.E., Barrallier L., Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters, *Acta Materialia*, 2009, 57, 326-334
23. Strand S.R., Effects of friction stir welding on polymer microstructure, Master of Science Thesis, Brigham Young University, Mechanical Engineering Department, 2004.
24. Rezgoui M. A., Trabelsi A. C., Ayadi M., Hamrouni K., Optimization of friction stir welding process of high density polyethylene. *International Journal of Production and Quality Engineering*, 2011, 2(1), pp. 55-61.
25. Strapasson R., Amico S.C., Pereira M.F.R., T.H.D. Sydenstricker T.H.D., Tensile and impact behavior of polypropylene/low density polyethylene blends, *Polymer Testing*, 2005, 24, 468-473
26. Bagheri, A, Azdast, T, Doniavi, A. An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets. *Mater Des* 2013 43: 402-409.
27. Zafar, A, Awang, M, Khan SR, Friction stir welding of polymers: An Overview. 2nd Inter Conf Mecha Manuf Proces Plant Eng 2017 19-36.
28. Gorev Y. A., Rivkind V. N., Polyester Composites for Shipbuilding, *Russian Journal General Chemistry*, 2010, 80, 1098-2114
29. Zinno A., Bakis C.E., Prota A., Mechanical Characterization and Structural Behaviour of Composite Sandwich Structures for Train Applications, 8th International Conference on Sandwich Structures, Porto 2008.
30. Esteves J.V., Goushegir S.M., Santos J.F., Canto L.B., Hage E.J, Amancio S.T., Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): Effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength, Paper will be published in *Materials and Design*.
31. Paoletti, A., Lambiase, F., Di Ilio, A. Optimization of Friction Stir Welding of Thermoplastics *Procedia CIRP* 33 2015: pp. 562 – 567.
32. Minitab User Manual (Release 17). Making Data Analysis Easier. MINITAB Inc. State College, PA: USA. 2018.
33. Arbegast, W.J. 2008. A flow-Partitioned Deformation Zone Model for Defect formation during Friction Stir Welding. *Scripta Materials*, 58 (5): 372-376.
34. Ross PJ. Taguchi techniques for quality engineering. New York: Mc-Graw Hill; 1988.
35. Peace GS. Taguchi methods. New York: Addison-Wesley; 1993.
36. Mendes, N. Loureiro, A. Martins, C. Neto, P. and Pires, J.N. 2014. Morphology and Strength of Acrylonitrile Butadiene Styrene Welds Performed by Robotic Friction Stir Welding, *Materials Design*, 64: 81-90.
37. Nelson, T.W. Sorensen, C.D. and John, C.J. 2009. Friction Stir Welding of Polymeric Materials. *US*. 6: 811.
38. Bilici M.K, Kartal İ., Kurtulmuş M, Yüklér Aİ., Investigation of factors affecting friction stir welding of polyethylene by ANOVA analysis, *Materials Science-Medziagotyra*, 27 (3) 2021; 367-272.

39. Yongxian, H. Xiangchen, M. Yuming, X. Long, W. Zongliang, L. Jian, C. And Jicai, F. 2018. Friction Stir Welding/Processing of Polymers and Polymer Matrix Composites, Applied Science and Manufacturing, 105: 235-257.
40. Bilici M.K., Welding faults and causes of plastics joining with friction stir welding, III. International ICONTECH Symposium on Innovative Surveys in Positive Sciences, 28-29 Ocak 2021, 61-73, Oujda, Fas.

EKLER

Makaleler

Bilici M.K, Kartal İ., Kurtulmuş M, Yükler Aİ., Investigation of factors affecting friction stir welding of polyethylene by ANOVA analysis, Materials Science-Medziagotyra, 27 (3) 2021; 367-272.

Bilici M.K, Investigation of friction stir spot welding of high density polyethylene and polypropylene sheets, Journal of Elastomer and Plastics, 2021. (Kabul edildi yayınlanma sırasında)

<https://journals.sagepub.com/toc/JEP/0/0?pageSize=20&startPage=1>

Bilici M.K, Investigation of the effects of welding variables on the welding defects of the friction stir welded high density polyethylene sheets, Journal of Elastomer and Plastics, 2021. (Haken değerlendirilmesinde)

Sempozyum

Bilici M.K., Welding faults and causes of plastics joining with friction stir welding, III. International ICONTECH Syposium on Innovative Surveys in Positive Sciences, 28-29 Ocak 2021, 61-73, Oujda, Fas.

Bilici M.K., Investigation of welding tool variables in joining polyethylene sheets by friction stir welding method, International ICONTECH Syposium on Innovative Surveys in Positive Sciences, 28-29 Ocak 2021, 52-60, Oujda, Fas.

Investigation of the effect of machine parameters on welding strength and performance in joining polyethylene sheets by friction stir welding method (Hazırlandı sempozyumda sunulacak)