

Galvanizli Çelik Boru Dirseklerinin Üretim Sürecine Bağlı Mekanik Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Tuba Demirel^{*1}, Eyyup Gerçekcioğlu², İrem Küçük¹, Zeynep Danışman³, Adil Burak Külekci¹

^{*1}Hasan Kalyoncu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

²Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri

³Hasan Kalyoncu Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

(Alınış / Received: 08.02.2025, Kabul / Accepted: 14.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Sonlu Elemanlar Yöntemi,
Gerilme Analizi,
Üretim İş Akışı,
Malzeme Davranışı

Öz: Galvanizli çelik havalandırma boru sistemlerinde, boru ve dirsek elemanları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 6 adet dirsek bağlantı elemanının soğuk şekillendirme sonrası kaynaklı imalatla birleştirilme süreci teorik ve uygulamalı olarak değerlendirilmiştir. Solidworks 2020 Simulation yazılımı kullanılarak oluşturulan boru tasarım modeli, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analizlerde borunun gerilme dağılımları ve dirsek üzerindeki toplam deformasyon incelenmiştir. Von Mises gerilme analizi sonuçları, yükün elastik deformasyon bölgesinde kaldığını ve güvenli çalışma şartlarına uygun olduğunu göstermiştir. Malzemenin akma mukavemeti ve Von Mises gerilme değerleri, uygulanan kuvvet ve sınır şartları dikkate alındığında güvenilir bulgular sunmaktadır. 3D modelleme ve statik analiz yöntemleri sayesinde prototip üretim öncesinde zaman kaybının önüne geçileceği öngörülmektedir.

Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Galvanized Steel Pipe Elbows Depending on the Manufacturing Process

Keywords

Finite Element Method,
Stress Analysis,
Manufacturing Workflow,
Material Behavior

Abstract: Galvanized steel ventilation pipe systems frequently utilize pipe and elbow components. In this study, the process of joining six elbow connection components through welded fabrication after cold forming was theoretically and experimentally evaluated. The pipe design model, created using Solidworks 2020 Simulation software, was analyzed using the finite element method. The stress distributions of the pipe and the total deformation on the elbow were examined in the analyses. The results of the Von Mises stress analysis showed that the applied load remained within the elastic deformation range and met safe working conditions. The yield strength of the material and Von Mises stress values provided reliable findings, considering the applied forces and boundary conditions. It is anticipated that 3D modeling and static analysis methods will prevent time loss caused by unsuccessful trials before prototype production.

*İlgili Yazar, tuba.demirel@hku.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde iklimlendirme amacıyla yaygın olarak kullanılan havalandırma boru sistemleri, sistem verimliliği ve iç mekan hava kalitesi açısından önemlidir. Bu boruların üretimindeki kaynaklı birleştirme bağlantılarında, kaynak bölgesinin ani soğuması sonucunda artık gerilmeler oluşmaktadır. Boru tasarımı, esas olarak gerilme analizine bağlıdır. Boru hatlarındaki aşırı yüklemeye ile aşırı gerilim/yorgunluk ile oluşan akma, bağlantı noktalarında sızıntı, borulardaki hareketlerden kaynaklı bağlantı teçhizatı üzerindeki tahrip edici yükler ve aşırı itme, boru desteklerinde kopmaya sebep olmaktadır [1-4]. Bu gerilmelerin analizinde sonlu elemanlar tabanlı bilgisayar programları yardımcı olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikte karmaşık fiziksel problemlerin çözümü için kullanılan bir sayısal analiz tekniğidir. Analiz için geometrik elemanlar düğüm ve noktalara ayrılmalıdır. Sonuçlar bu noktalar üzerindeki değerlerden elde edilir [5]. Statik simülasyon, bir malzemenin statik yüklere dayanma yeteneğini belirler ve yükün etkilerini iş parçası üzerine dağıtmaktadır [6].

Ay ve ark., AISI 316L (EN 1.4404) kalite paslanmaz çelikten üretilen dirsek boruların üretim sürecini incelemiştir. Gerilme dağılımları ve toplam deformasyon değişimleri analiz edilerek, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve üretim parametreleri optimize edilmiştir. Et kalınlıklarının, EN 10243-4 standardına göre 152,4 mm çapındaki borular için belirlenen toleranslar içinde olduğu tespit edilmiştir. Analizler, 20, 25, 30, 35 ve 40 saniyelik işlem süreleriyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, maksimum gerilmenin, bükme yarıçapının dış tarafında ve hidrolik iticinin temas ettiği bölgede olduğu belirlenmiştir. Üretim hatalarının önlenmesi için, yağlama koşullarının ve kalıp yüzey pürüzlülüğünün uygun seviyede olması, ayrıca kaynak ağzı açma işleminin standartlara uygun yapılması önerilmiştir. Toplam deformasyonun, erkek kalıba temas eden bölgede maksimum seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Süre ve gerilme kuvvetleri karşılaştırıldığında ise, 25 saniyelik işlem süresi optimum değer olarak belirlenmiş ve bu sürenin işçilik ile maliyet açısından tasarruf sağladığı ortaya konmuştur [7].

Xie ve Yue, denizaltı boru hatlarının genellikle deniz tabanına döşendiğini ve bu süreçte bükme, eksenel gerilim, boru üzerindeki tepki kuvvetinin etkileri altında büyük deformasyonların meydana geldiğini belirtmiştir. Bükülmüş boruların karşı karşıya olduğu riskler de artmaktadır. Boru üzerindeki ortalama basınç kuvveti yaklaşık 400 kN olarak ölçülmüştür. Model testlerinden elde edilen kuvvet sonuçları, sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlara kıyasla biraz daha düşük çıkmıştır. Bu farkın, test modeli ile sonlu elemanlar modeli arasındaki kaçınılmaz yapısal farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Eksenel gerilim, eğilme momenti, tepki kuvveti ve gemi hareketinin yüksek birleşik yükleri, boru hattında plastik deformasyona neden olabilir ve bu deformasyonun doğru şekilde ölçülmesi oldukça zordur. Aşırı bükülme nedeniyle oluşan gerilme ve deformasyonların doğru bir şekilde tespit edilmesi, boru hasarlarını önlemek ve operasyonel parametrelerin optimize edilmesini sağlamak için etkili bir yöntem sunmaktadır [8].

Gök ve ark., çelik sacların soğuk şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan problemleri çözmek için bilgisayar destekli non-lineer sonlu elemanlar yazılımı (DYNAFORM 5.0) kullanmıştır. Şekillendirme sürecindeki gerilme, deformasyon ve kalıp tasarımı gibi sorunlar daha doğru bir şekilde analiz edilmiş ve optimize edilmiştir. Bu, üretim verimliliğini artırmış ve ürün kalitesini iyileştirmiştir [9]. Geri dönüştürülebilir özelliğiyle sürdürülebilir kalkınma ve yeşil ekonomi hedeflerine katkı sağlayan galvanizli sac, havalandırma boru üretiminde çinko kaplaması sayesinde korozyona karşı koruma sağlayarak kaynak bölgelerinin paslanmasını önlemektedir. Kolay şekillendirilebilen ve dayanıklı bir malzeme olan galvanizli sac da, özellikle kalın cidarlı bölümlerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında otomatik gaz altı kaynakları (örneğin, MIG/MAG veya TIG) ve punto, elektrot kaynakları bulunmaktadır. Bu yöntemler, yüksek kaliteli ve güvenilir kaynak dikişleri sağlamak için tercih edilmektedir [8-10]. EN 10346:2015, galvanizleme, alaşımlama veya diğer koruyucu kaplama işlemleriyle üretilen düşük karbonlu çelik levha ve şeritlere yönelik bir üretim standardıdır. DX51D, sıcak daldırma galvanizli çelik sacların bir sınıfıdır ve EN 10346 standardı kapsamında tanımlanır. Bu tür çelikler genellikle iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu sınıfta bulunan çelik grubunun mekanik özelliklerine bakıldığında; Akma Sınırı (R_e): en fazla 280 MPa, Çekme Mukavemeti (R_m): en fazla 500 MPa, Uzama (A_{80}): Minimum %22 (≥ 0.50 mm kalınlıkta) olmalıdır [11, 12]. Bir malzeme, elastik şekil değiştirme bölgesinde kalırsa kalıcı deformasyon oluşmaz. Tasarımda, malzemenin mekanik özellikleri bu bölgeye göre hesaplanır ve yük kaldırıldığında malzeme eski haline dönerse kalıcı deformasyon meydana gelmez. Bunun için yükte oluşan gerilmenin, malzemenin akma mukavemetinden küçük olması gerekir [13]. Bir yapısal elemanda güvenlik faktörü (SF — Safety Factor), yapının maksimum dayanabileceği gerilmenin, uygulanan çalışma gerilimine oranı olarak tanımlanır. Yani malzemenin akma dayanımının, yük altında oluşan maksimum gerilmeye oranıdır. Tasarım mühendisliğinde genellikle 1'in oldukça üzerinde bir güvenlik katsayısı (s) kullanılır (örneğin: 1,5; 2 veya daha yüksek). Eğer bu katsayı 1'in altındaysa, malzeme veya yapı, uygulanan gerilme altında kalıcı deformasyona uğrayabilir [14].

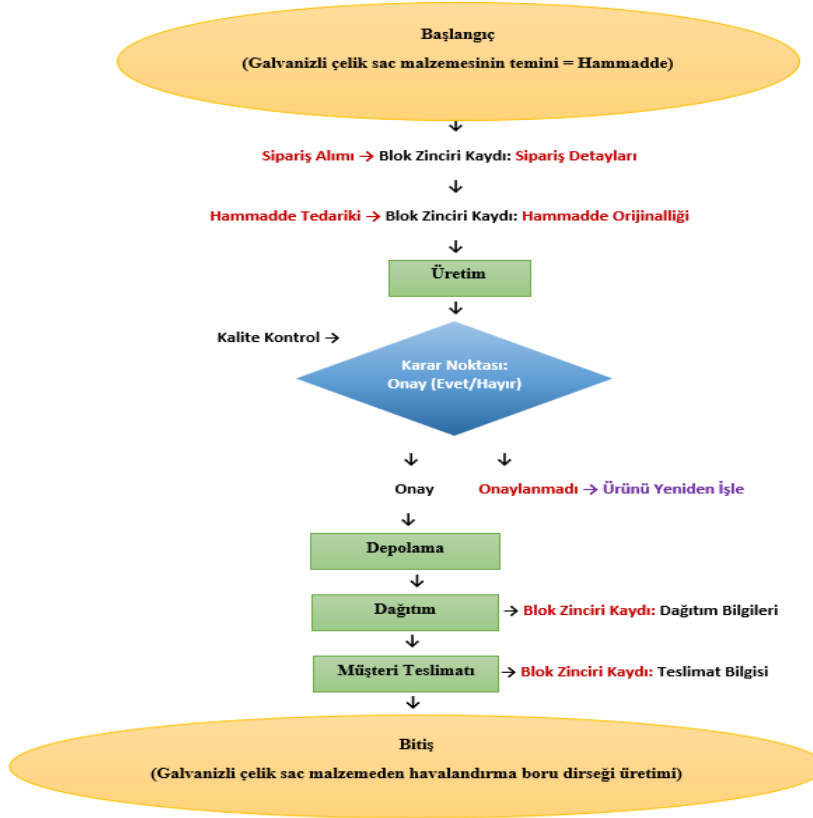
Boru tasarımı, temel olarak gerilme analizine dayanmaktadır ve iyi analiz edilmiş yapılar daha dayanıklı ve maliyet açısından daha avantajlıdır. İnce galvanizli sac malzeme şekillendirilirken, özellikle karmaşık kalıp geometrilerinde yırtılma gibi hatalar kritik sorunlar yaratabilir ve üretim sürecini olumsuz etkileyebilir. Bu çalışmada, bükülerek elde edilen 6 boru parçasının kaynaklanmasıyla oluşturulan galvanizli havalandırma borusunun statik analizi, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgelerine kuvvet yüklemesi uygun olmadığından, yalnızca borunun kendi statik ağırlığı dikkate alınmıştır. Havalandırma borusunun dayanabileceği maksimum yük, katalog değerlerine göre analiz edilmiştir. Solidworks 2020 yazılımı kullanılarak şekillendirme sürecinde oluşabilecek gerilme ve deformasyon parametreleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, üretim sürecinde şekillendirme işlemi sırasında uygulanan yük altında boru dirseğinin yapısal dayanım sınırlarının sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile sayısal olarak analiz etmek ve bu süreç için optimum şekillendirme yükü değerini belirlemektir. Yapılan analizlerde; malzeme özellikleri, geometrik toleranslar ve sınır şartları dikkate alınarak şekillendirme işlemi sırasında oluşabilecek maksimum gerilme ve deformasyon bölgeleri tespit edilmiştir. Böylece, üretim sürecinde ortaya çıkabilecek istenmeyen

deformasyonların ve yapısal zafiyetlerin önüne geçilmesi amaçlanmakta, aynı zamanda malzeme performansının korunması ve üretim kalitesinin artırılması sağlanmaktadır. Çalışmada ayrıca deneysel verilerle sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır.

2. Havalandırma Borusu Üretimindeki İş Akışı

Proses akış modeli, imalat sürecinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu süreçteki potansiyel sorunları tespit etmeye yardımcı olmuştur. Bu model, tedarik zincirinin her aşamasında blok zinciri teknolojisinin her aşamadaki veri akışının nasıl sağlandığını göstermektedir (Şekil 1).



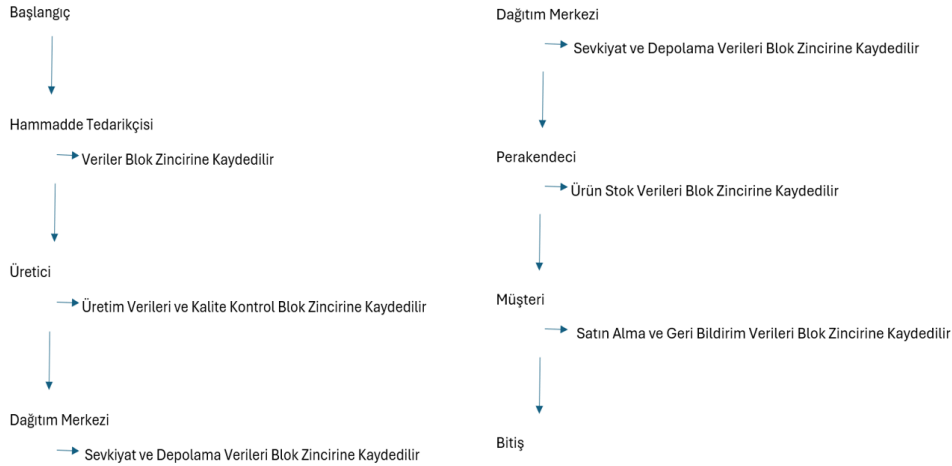
Şekil 1. Üretim hattındaki iş akış modeli

Bu çalışmada, tedarik zinciri yönetim süreçlerinde blok zinciri (blockchain) teknolojisinin entegrasyonu ele alınmış ve bu teknolojinin sağladığı yapısal avantajlar detaylı olarak değerlendirilmiştir. Blok zinciri; değiştirilemez ve şeffaf veri yapısı sayesinde, tedarik zincirinin tüm aşamalarında veri güvenliği, izlenebilirlik ve işlem doğruluğu sağlamaktadır. Her işlem veya veri girişi, blok zinciri sisteminde kriptografik olarak imzalanan bağımsız bloklar hâlinde kaydedilmekte ve bu bloklar birbirine zaman damgası ve hash değerleri ile bağlı olarak eklenmektedir. Blok zinciri teknolojisi, her işlem veya veri girişini bir blok olarak kaydeder ve her yeni blok, önceki bloğun verilerini doğrulayarak güvenliği sağlar.

Bu sistem sayesinde, üretimden nihai kullanıcıya kadar olan tüm süreçlerde sahtecilik, veri manipülasyonu ve hatalı işlem riski minimize edilmekte, aynı zamanda sistemdeki her işlem geri izlenebilir ve denetlenebilir hâle gelmektedir. Özellikle tedarik zincirinin karmaşık ve çok aktörlü yapısı göz önünde bulundurulduğunda, blok zinciri ile elde edilen veri bütünlüğü ve şeffaflık, tedarik zinciri yönetiminde önemli bir güven unsuru oluşturmaktadır.

Çalışmada sunulan Şekil 2'deki blok zinciri entegrasyonlu iş akış diyagramı ve pseudocode ise bu sürecin işleyiş mantığını hem görsel hem algoritmik düzeyde açıklamıştır. Pseudocode yapısı, sistemin temel algoritmik mantığını basitleştirilmiş bir dilde aktararak, veri akışının ve blok zincirinin nasıl yapılandırıldığını sistematik bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu diyagram ve kod, veri akışını ve blok zincirinin nasıl oluşturulduğunu anlamayı kolaylaştırarak teknolojinin uygulanabilirliğini ve faydalarını açıkça göstermeyi amaçlar. Bu modelde, entegrasyonun en önemli katkıları arasında; gerçek zamanlı veri paylaşımı, süreç optimizasyonu, hataların hızlı tespiti, maliyet kontrolü ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi yer almaktadır. Ayrıca, sistemin sahip olduğu değiştirilemez veri yapısı, yasal uyumluluk ve denetim süreçlerinde de önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Ürün üretildiğinde, üretim verileri dijital olarak kaydedilmekte ve blok zincirine bir blok olarak eklenmektedir. Her yeni blok, önceki blokların bütünlüğünü kontrol ederek doğrulama işleminden geçmektedir. Tedarik zincirinin her aşamasında benzer şekilde veri girişleri yapılmakta ve zincir sürekli olarak genişlemektedir. Böylelikle zincir üzerindeki tüm işlemler dağıtık defter (distributed ledger) yapısı sayesinde herkes tarafından erişilebilir ve denetlenebilir hâle gelmektedir.



Şekil 2. Pseudocode blok zinciri

Bu çalışmada, galvanizli sac malzemesinin kullanıldığı havalandırma borusu üretim süreci, firmanın standart iş akış modeline uygun olarak toplam yedi aşamada sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tosyalı Toyo Çelik A.Ş. firmasından galvanizli sac malzemesi temin edilmiştir (Şekil 3) [10]. Üretim aşamaları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir. Bu üretim akışı, malzeme kaybını minimumda tutarak, seri ve standardize üretimi mümkün kılan bir sistematik sunmaktadır. Ayrıca her adımda, ürün kalitesinin ve iş güvenliğinin sağlanması için endüstriyel standartlara uygunluk gözetilmektedir:

1. Boyutlandırma işlemi: Üretime başlanmadan önce kullanılacak galvanizli sac levhanın geometrik boyutları belirlenmiştir. Bu aşama, ürünün teknik resmine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde TS EN 1505:2000 standardında belirtilen boyut ve tolerans kriterleri dikkate alınmıştır (Şekil 3a).

2. Kesme işlemi: Belirlenen boyutlara uygun olarak CNC kontrollü sac levha kesme makinesi yardımıyla hassas şekilde kesilmiştir. Kesim işlemi sırasında, $\pm 0,5$ mm imalat toleransı sağlanarak, sonraki işlemlerin hassasiyeti güvence altına alınmıştır. Kesim işlemi, üretim toleranslarını sağlamak ve sonraki işlemlerin doğruluğunu garanti altına almak açısından kritik öneme sahip olmuştur (Şekil 3b).

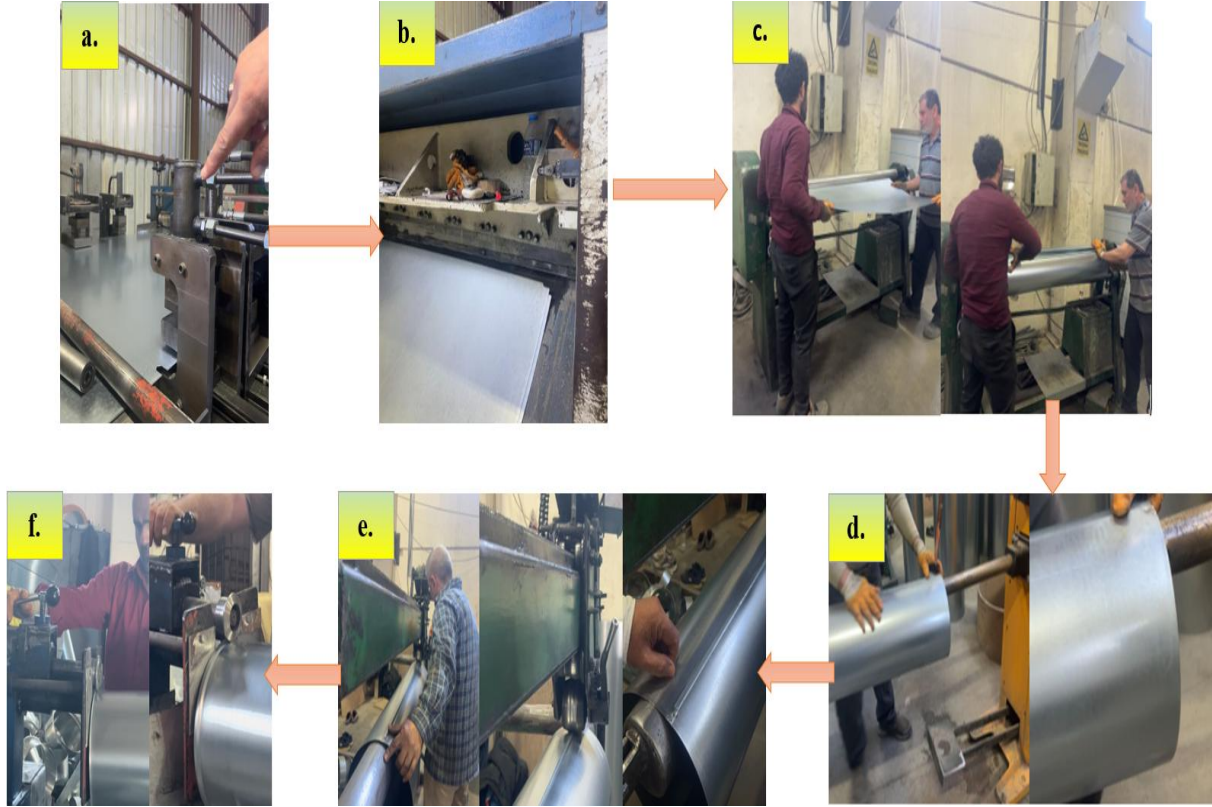
3. Bükme ve Şekillendirme işlemi: Kesilen sac levhaların kenarları, hidrolik pres bükme makineleri yardımıyla istenilen açı ve yarıçapta bükülmüştür. Ardından, silindirik formu elde etmek amacıyla rulo şekillendirme makineleri kullanılmıştır. Bu aşamada sac kalınlığı olarak seçilen 0,7 mm, hem şekillendirme kolaylığı hem de yeterli yapısal dayanım sağlamıştır (Şekil 3c).

4. Puntalama işlemi: Şekillendirilmiş sacın birleşim bölgelerine geçici olarak puntalama kaynağı uygulanmıştır. Bu işlem, nihai kaynağın düzgün ve hizalı yapılabilmesi için bir ön bağlama yöntemidir (Şekil 3d).

5. Birleştirme ve Sızdırmazlık işlemi: Puntalanmış bölgeler, kenetleme ve sıkıştırma işlemi ile tamamen birleştirilmiştir. Bu işlem, sac kenarlarının birbirine geçirilmesi ve mekanik sıkıştırma yöntemiyle sızdırmazlık sağlanmasını mümkün kılmıştır. Bu aşamada, TS EN 10143:2006 standardına uygun tolerans ve sızdırmazlık değerleri kontrol edilmiştir (Şekil 3e).

6. Kenetleme İşlemi: Borunun uç kısımlarına, montaj kolaylığı sağlamak amacıyla kenetleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, boruların montaj esnasında birbirine bağlanabilmesi için gerçekleştirilmiştir. Uçlardan

birine tek kenarlı, diğerine ise çift kenarlı kenetleme yapılarak bağlantı sırasında uygun geçme ve sızdırmazlık sağlanmıştır (Şekil 3f).



Şekil 3. Havalandırma borusunun üretim aşaması (a-f)

7. Kaynak işlemi: Üretim sürecinin son aşamasında, şekillendirilmiş iki boru parçası eksenel doğrultuda hizalanarak, üst üste getirilip giydirme yöntemiyle birleştirilmiştir (Şekil 4). Galvanizli çelik sac levhalar, rulo şekillendirme makinelerinde silindirik boru formuna dönüştürüldükten sonra, boru kenarları ilk olarak direnç (punta) kaynağı yöntemiyle geçici olarak birleştirilmiştir. Bu işlem, parçaların eksenel hizalanmasını sağlamak, kaynak sırasında oluşabilecek çarpımları kontrol altına almak ve montaj toleranslarını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Geçici puntalama işleminden sonra, gaz altı kaynağı (MIG/MAG) yöntemi kullanılarak puntalanan bölgeler üzerinden kaynak dikişi oluşturulmuştur. Burada, kaynak sırasında uygulanan ısı girdisi dikkatle kontrol edilerek, galvanizli malzemenin kaplama yapısında oluşabilecek bozulmaların ve çinko buharlaşmasının önüne geçilmiştir. Ayrıca, kaynak parametreleri (akım, gerilim, hız, ısı girdisi) malzeme kalınlığı olan 0,7 mm'ye uygun şekilde optimize edilmiştir. Böylece kaynak sonrası deformasyon, çarpılma ve gerilme birikimi en aza indirgenmiştir.

Son aşamada ise, daha yüksek yapısal bütünlük ve sızdırmazlık sağlamak amacıyla, manuel ark (elektrot) kaynağı yöntemi uygulanmıştır. Bu işlem, özellikle MIG/MAG kaynağının ulaşmadığı, geometrik olarak zor erişilen noktalarda kaynak sürekliliğini ve mekanik dayanımı sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Yapılan kaynak işlemi, TS EN ISO 15614-1, TS EN ISO 5817 ve TS EN 10219 standartlarında belirtilen kaynak dikişi kalitesi, boyutsal toleranslar ve mekanik özellik kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çok aşamalı kaynak yöntemiyle birlikte, boru elemanlarının birleşim bölgelerinde homojen kaynak dikişleri, minimum deformasyon, optimum mukavemet ve standartlara uygun tolerans değerleri sağlanarak, üretim kalitesi ve yapısal güvenilirlik artırılmıştır.



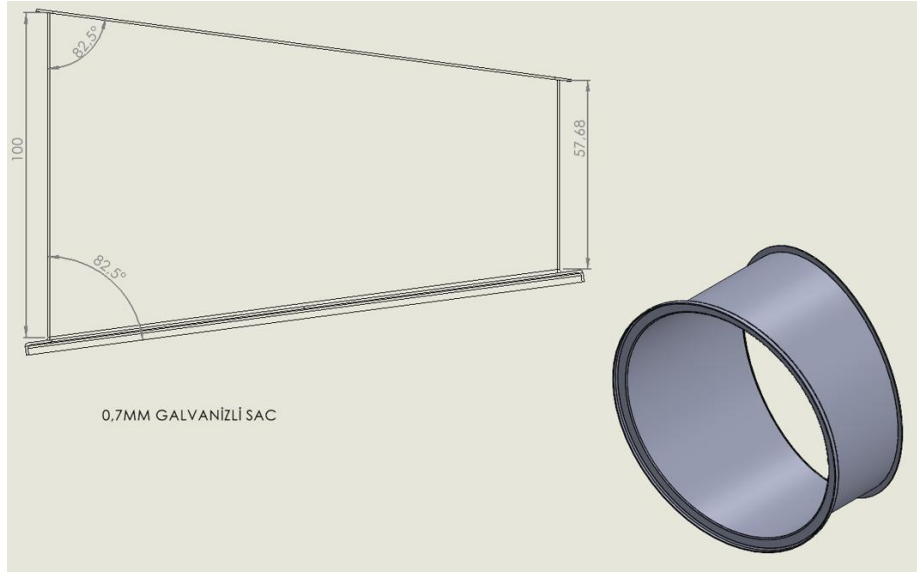
Şekil 4. Birleştirilmiş boru dirseklerinin 6 adet bağlantı elemanları

Galvanizli çelik boru dirseklerinin üretim süreci ile sonlu elemanlar yöntemi arasında önemli bir bağ vardır. Üretim süreci sırasında uygulanan işlemler (örneğin, şekillendirme, kaynaklama, galvanizleme) malzemenin mekanik özelliklerini, yüzey pürüzlülüğünü ve iç gerilmelerini etkiler. Bu faktörler, sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme modelleme parametrelerini doğrudan etkiler ve analiz sonuçlarının doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Üretim sürecindeki sıcaklık değişimleri, mekanik deformasyonlar ve galvanizleme işlemi, çelik borunun mukavemet, elastiklik modülü ve akma dayanımı gibi özelliklerini değiştirir. Sonlu elemanlar yönteminde doğru sonuçlar elde edebilmek için bu parametrelerin analize doğru şekilde dahil edilmesi gerekir. Üretim sırasında oluşabilecek mikro çatlaklar, iç gerilmeler ve yüzey kusurları, dirseğin yük taşıma kapasitesini ve yorulma dayanımını etkiler. Bu kusurların etkilerinin simüle edilmesi, üretim sürecindeki kritik aşamaların belirlenmesine yardımcı olabilir. Şekillendirme sürecinde oluşan geometrik deformasyonlar ve tolerans sapmaları, dirseklerin çalışma performansını etkileyebilir. Bu deformasyonların çalışma koşullarında ne tür sonuçlara yol açabileceğini öngörmek için kullanılabilir. Üretim sürecindeki belirli parametrelerin optimize edilmesine olanak tanır. Kullanılan çelik türü, galvanizleme yöntemi veya şekillendirme basıncı gibi parametreler, sonlu elemanlar simülasyonları ile test edilerek maliyet, dayanıklılık ve performans açısından en uygun üretim süreci geliştirilebilir. Bu bağlamda, sonlu elemanlar analizi ve üretim süreci, birbiriyle etkileşimli olarak değerlendirilmelidir. Üretim sürecindeki her aşama, sonlu elemanlar modellemesine temel oluştururken, sonuçları da üretim sürecini optimize etmek ve ürün kalitesini artırmak için geri besleme sağlamaktadır. İş akış şemasında her bir adım, detaylı inceleme ve doğrulama gerektirebilir, bu nedenle her adımı dikkatlice takip etmek önemlidir.

3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme

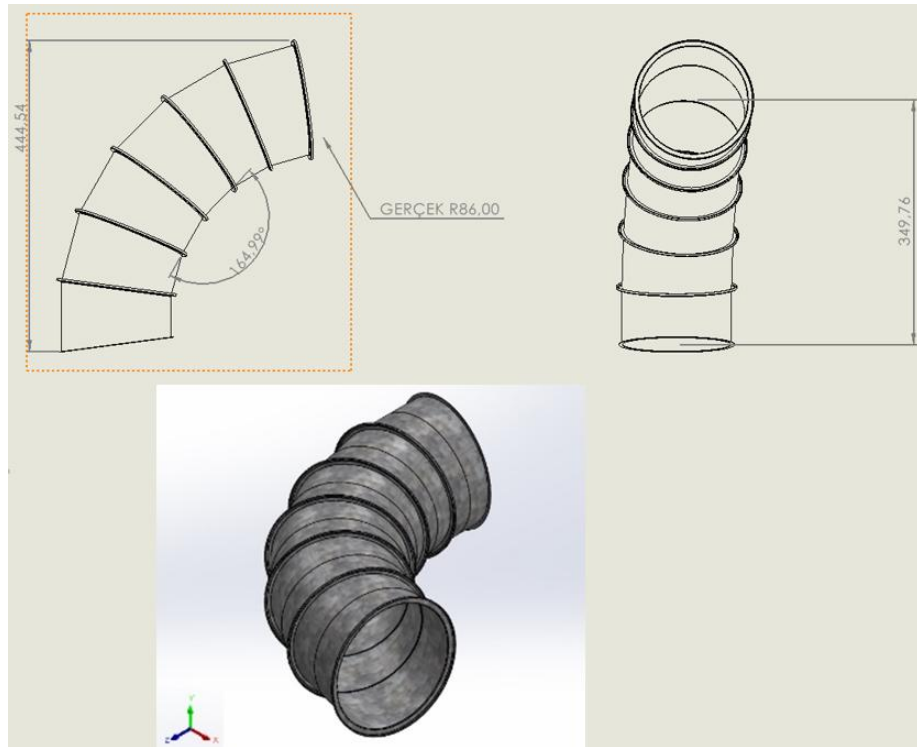
Çalışmada, galvanizli çelik sac boru dirseğinin geometrik boyutları ve üretim spesifikasyonları, ilgili teknik çizim ve detaylı teknik resimlerle gösterilmiştir. Bu çizimler, boru dirseğinin tasarımına dair ölçüsel verileri ve üretim aşamasındaki kritik toleransları içermektedir (Şekil 5). Üretimde sac kalınlığı 0,7 mm alınmıştır. Malzemedeki sac kalınlığı, hem yapısal dayanıklılığı hem de borunun şekillendirilebilirliğini doğrudan etkilemektedir. 0,7 mm kalınlık, yeterli mukavemeti sağlarken, aynı zamanda bükme ve kaynak işlemlerini kolaylaştıracak optimum bir değer olarak belirlenmiştir. Daha ince bir sac, yırtılma veya şekil bozulmasına yol açabilirken, daha kalın bir sac şekillendirme sırasında işlem zorlukları yaratabilir. Seçilen bu değerler, statik analizlerde doğru sonuçlar elde edilmesi ve malzeme israfının önlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Üretimde kullanılan sac malzeme ve işlemler, TS EN 10346:2015 "Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Mamuller" standardı, TS EN 1505:2000 "Havalandırma Tesisatı — Kanal Sistemleri — Sac Kanal ve Bağlantı Elemanları İçin Boyutlar" standardı ve EN 10143:2006 "Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Ürünler için Toleranslar" standardına uygun şekilde seçilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu sayede, endüstriyel standartlarla uyumluluk sağlanmış ve ürün kalitesi güvence altına alınmıştır [15-18]. Şekil 5'te boru parçasını oluşturan sacın boyutları verilmiştir.



Şekil 5. Galvanizli çelik boru dirseğinin bağlantı elemanı (mm)

Tasarlanan havalandırma borusu, 6 adet dirsek bağlantı elemanının dikkatlice birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Her bir dirsek bağlantı elemanı, borunun yön değiştirmesini sağlayan ve sistemin düzgün çalışması için gerekli olan geometrik yapı bileşenleri olarak işlev görmektedir. Bu elemanların birleşimi, borunun istediği şekle ulaşmasını ve hava akışının istenilen yönlere yönlendirilmesini sağlamaktadır. Şekil 6'da bu tasarımın boyutları ve üç boyutlu (3D) modeli verilmiştir. Şekil 6' da galvanizli çelik borunun çapı Ø172 mm'dir.



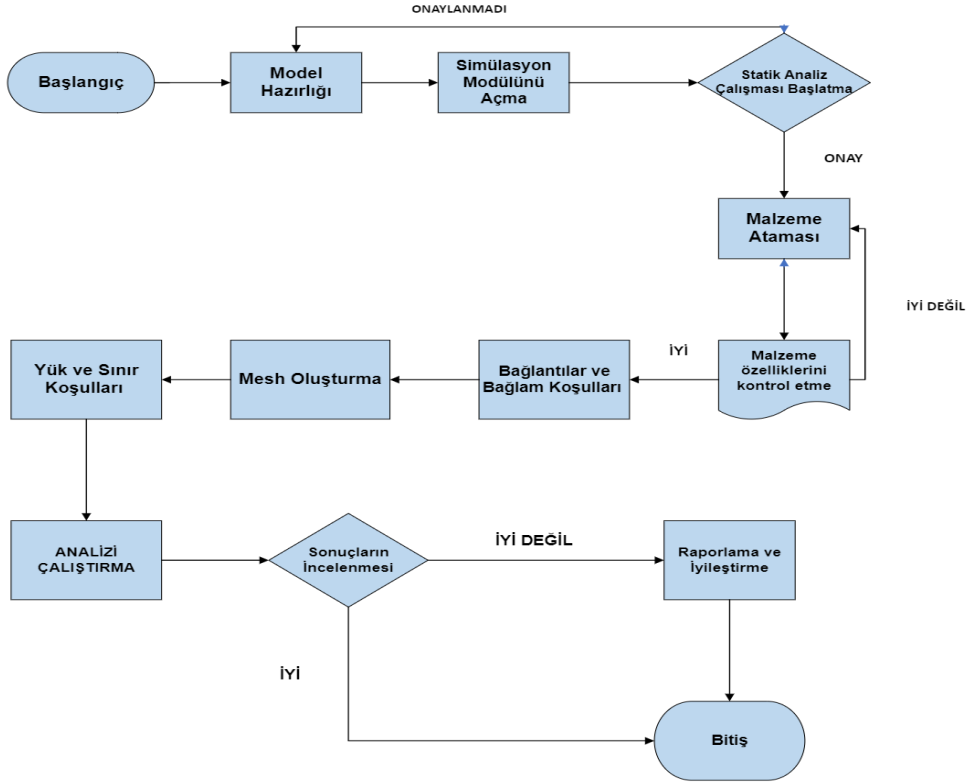
Şekil 6. Galvanizli çelik boru 6 adet bileşenin montajı (mm)

Havalandırma borusu malzemesinde soğuk haddelenmiş galvanizli sac malzemesi seçilmiştir. Galvanizli sacın kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen galvanizli çelik sacın malzeme özelliklerini içeren katalog değerleri firmadan temin edilmiştir [10].

Tablo 1. Galvanizli çelik sac malzemenin kimyasal özellikleri [10]

Metal Türü	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Al	% V	%Nb	%Ti
Galvanizli sac	0,047	0,0106	0,2483	0,0096	0,0066	0,0338	0,0023	0,0027	0,001

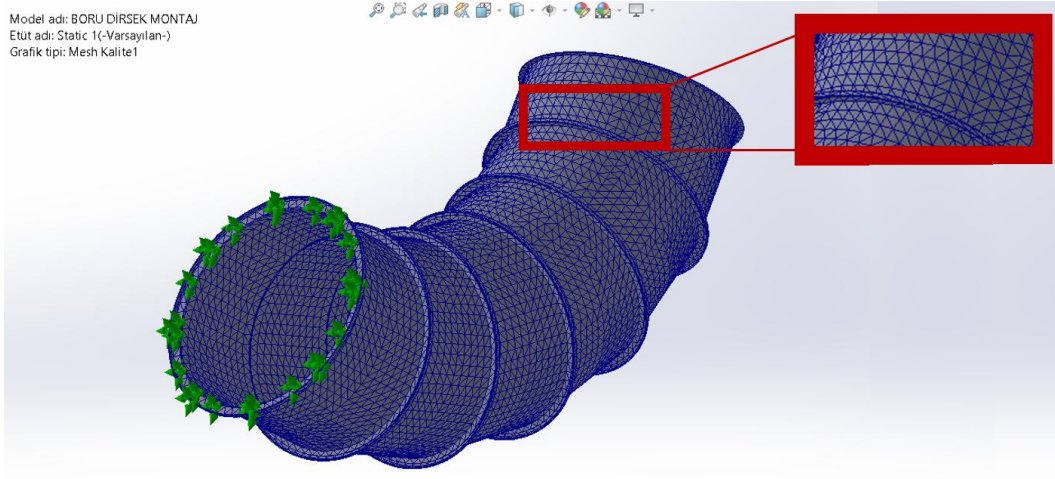
Boru dirseğinin modellenmesi ve statik hata analizinin basamakları, sonlu elemanlar modellenmesindeki iş akış şeması Şekil 7'de sunulmuştur. Bu şemada, her adımın sırasıyla nasıl ilerlemesi gerektiği detaylandırılmıştır. İş akış modelinin oluşturulmasında, Microsoft Visio programı kullanılarak görsel olarak şemanın düzeni ve süreci net bir şekilde aktarılmıştır.

**Şekil 7.** Havalandırma borusunun sonlu elemanlarda modellenmesindeki iş akışı

4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

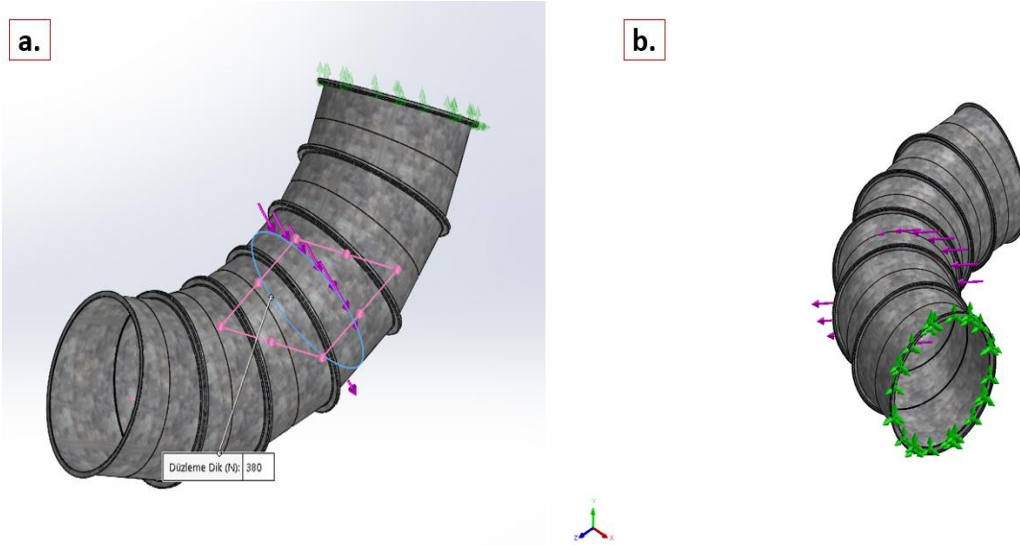
Tasarım süreci açısından sonlu eleman analizinin doğruluğu, meshleme işlemine bağlıdır. Boru dirsek montajının katı modeli önce ağ örgüsüne (mesh) dönüştürülmüştür (Şekil 8). Mesh işlemi, yüksek kaliteli çözüm elde etmek amacıyla uygulanmıştır. Mesh yapısı, altı yüzlü (hexahedral) elemanlardan oluşmaktadır. Altı yüzlü elemanlar, yüksek dereceli sayısal entegrasyon için yaygın olarak kullanılır ve daha fazla nokta içeren integral hesaplamaların çözüm doğruluğunu artırabilir. Sonlu eleman modelinde toplamda 86472 düğüm (node) ve 42790 eleman bulunmaktadır. Mesh kalitesi yüksek olarak seçilmiştir.

Oluşturulan katı model, basma kuvveti ve basınç yüküne maruz bırakılarak analiz edilmiştir. Altı yüzlü elemanlar, daha yüksek dereceli sayısal entegrasyon sağlayarak özellikle karmaşık geometrilerde ve düzensiz yüklemelerde çözümün doğruluğunu arttırmaktadır. Seçilen mesh tipi ve eleman sayısı, elde edilen statik analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini etkilemektedir.



Şekil 8. Montajlı havalandırma boru dirseğinin mesh ağ örgüsü

Şekil 8’de yeşil renkli görülen kısımda sabitleme noktaları verilmiştir. Statik gerilme için yerçekimi kuvveti programda tanımlanmıştır. Meshleme işleminden sonra Şekil 9a’da kuvvet yükü yüzeye uygulanmıştır. Sınır şartları belirlenmiştir. Statik yükler altında boru dirseğinin y ekseninde yaptığı harekete karşılık radyal bir dönme açısı oluşturmasından dolayı, dirsek üzerinde aynı zamanda basma kuvveti, tork ve basınç oluşmaktadır. Programda yüksek gerilme altındaki etkisini değerlendirmek için 380 N (38,75 Kg)’luk kuvvet boru dirseğinin tam ortasına uygulanmıştır (Şekil 9b). Bu analiz, boru dirseğinin yük altındaki davranışını incelemeye yardımcı olmuş ve basma kuvveti ile oluşan gerilme ve deformasyon incelenmiştir.



Şekil 9. Havalandırma boru dirseğinin sabit ve yükleme sınır şartları

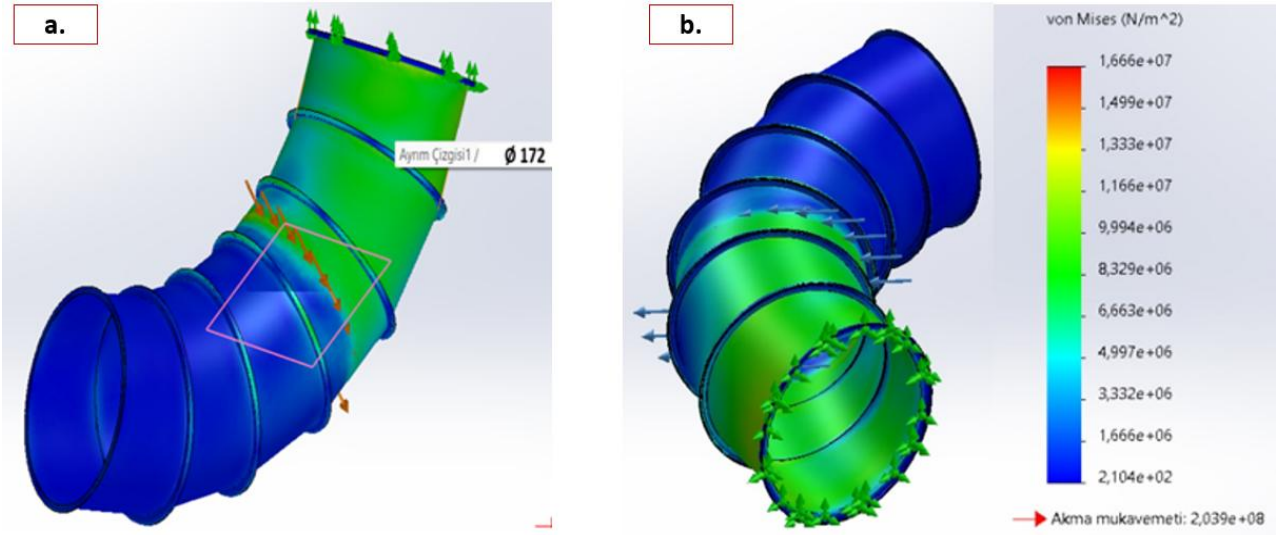
380 N yük altında galvanizli çelik sac malzemenin analizde kullanılan malzeme özelliği değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Galvaniz çeliğin analiz veri girdileri

Akma Dayanımı	$2,03943e+08 \text{ N/m}^2 = 203,94 \text{ MPa}$
Maksimum Gerilme Dayanımı	$3,56901e+08 \text{ N/m}^2 = 356,90 \text{ MPa}$
Elastiklik Modülü	$2e+11 \text{ N/m}^2 = 200 \text{ GPa}$
Poisson Oranı	0,29
Yoğunluk	7870 kg/m^3

5. Bulgular

Dirsek borunun eğrisel geometrisi nedeniyle, üzerine gelen yüklerin dağılımı homojen gerçekleşmemektedir. Bu durum, basınç kuvvetlerinin boru boyunca düzensiz şekilde yayılmasına neden olmaktadır. Genellikle montaj sırasında borunun üst kısmı bir destek yapısına sabitlenmektedir. Üst kısma sınır şartı uygulanması, yüklerin kontrol altına alınmasına ve daha az kritik bölgenin analize dâhil edilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmadaki amaç; üretim sonrasında uygulanan yük altında borunun dayanım sınırlarını analiz yöntemiyle öngörmek ve şekillendirme sırasında uygulanan yükün yapısal performans üzerindeki etkisini belirlemektir. Statik tekil yükler altında boru üzerinde oluşan maksimum gerilme ve yüzey üzerindeki deformasyon dağılımı incelenmiştir. Gerilme skalası incelendiğinde elde edilen maksimum gerilme değeri (σ_{maks}) 16,6 MPa'dır. Dolayısıyla bu değer, malzemenin 203,94 MPa akma dayanımı sınırına göre yaklaşık 12 kat daha düşük bir değerdir (emniyet katsayısı $S=12$). Yani, malzemenin kaynak bölgelerine uygulanan (F_{uyg}) 38,75 kg ($\approx 38,75 \text{ kg} \times 9,81 = 380,74 \text{ N}$) yükü çok rahat bir şekilde taşıyabileceği değerlendirilmektedir. Uygulanan yükün malzeme üzerinde oluşturduğu gerilmeler, yüklerin malzeme yüzeyinde nasıl dağıldığı ve en yüksek gerilme noktaları Şekil 10'da görülmektedir. Borunun sabitlenen bölgesine yakın alanlarda en düşük gerilmeler oluşmuştur. Renk skalasında mavi, düşük gerilme bölgelerini temsil eder. Renk skalasında Yeşil, orta düzeyde gerilme bölgelerini ifade eder. Bu bölgeler, malzemenin nominal gerilme seviyelerine yakındır. Malzeme güvenli olabilir, ancak dikkatle değerlendirilmelidir. Bu bölgelerde malzeme üzerindeki gerilme etkisi azdır. Malzemenin akma sınırına ulaşma riski düşüktür ve bu alanlar genellikle güvenlidir.



Şekil 10. Kaynakla birleştirilen 6 adet dirsek bağlantı elemanının statik yük altında Von Mises gerilmesi (MPa):
a. Ön görünüş, b. Üst görünüş

Boru dirseği üretiminde şekil verirken uygulanan yükleme miktarı; borunun malzemesine, şekillendirme yöntemine, borunun çapına, duvar kalınlığına ve şekillendirme işlemi sırasında kullanılan ekipmanlara bağlıdır. Ayrıca, bu yüklemenin borunun akma dayanımı, plastik deformasyon sınırı ve kaynak dikişlerinin dayanıklılığı göz önünde bulundurularak belirlenmesi gerekmektedir.

Boru dirseği üretimi sırasında, galvanizli çelik boru için akma dayanımı (σ_{akma}) = 203,94 MPa ve borunun çapı ($d_{dış}$) = 172 mm (0,172 m), duvar kalınlığı (t) = 0,7 mm (0,0007 m), boru uzunluğu = 1000 mm (1 m) ise, bu borunun en fazla dayanabileceği yük miktarı üç adımda şöyle bulunur [19, 20]:

a. İç Çapı ($d_{iç}$): Sac kalınlığı (t) ve dış çap ($d_{dış}$) değerlerinin bilinmesi önem arz etmektedir (Denklem 1) [15, 16]:

$$d_{iç} = d_{dış} - 2 \cdot t \quad (1)$$

$$d_{iç} = 0,172 - 2 \cdot 0,0007 = 0,1706 \text{ m}$$

b. Kesit Alanı (A): Borunun dış ve iç çapları arasındaki alan farkı, borunun kesit alanını vermektedir (Denklem 2) [19, 20]:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{dış}^2 - d_{iç}^2) \quad (2)$$

$$A = \frac{3,1416}{4} \cdot (0,172^2 - 0,1706^2) \approx 0,0002197 \text{ m}^2$$

c. Maksimum Kuvvet (F_{max}): Akma dayanımını (σ_{akma}) ve kesit alanını (A) kullanarak maksimum kuvvet hesaplanır (Denklem 3) [19, 20]:

$$F_{max} = \sigma_{akma} \cdot A \quad (3)$$

$$F_{max} = (203,94 \times 10^6) \cdot 0,0002197 \approx 44,81 \text{ N}$$

Newton'u kilograma çeviririz (Denklem 4) [19, 20]:

$$\text{kg cinsinden yük} = \frac{F_{max}}{g \text{ (yer çekim ivmesi)}} \quad (4)$$

$$\text{kg cinsinden yük} = \frac{44,813}{9,81} \approx 4,57 \text{ kg}$$

Boru bağlantı elemanları, akma dayanımına kadar yaklaşık 4,57 kg yük taşıyabilir. En fazla taşıyabileceği bu yüke kadar boruda plastik deformasyon olmaz. Statik analizde 38,75 kg kuvvet alınmasının nedeni ise 4,57 kg'a göre fazla yük bindirip model üzerindeki etkileri tespit etmektir.

Güvenlik faktörü (oranı), malzemenin akma dayanımının, yük altında oluşan maksimum gerilmeye oranıdır ve Denklem (5) verilmiştir. Şekil 10'da Von Mises en düşük gerilme değeri 0,0002104 MPa ve en yüksek gerilme değeri 16,66 MPa'dır. Ortalama Von Mises gerilme değeri ise 8,33 MPa'dır.

$$\text{Güvenlik Faktörü (S)} = \frac{\text{Malzemenin akma mukavemeti } (\sigma_{akma})}{\text{Yük altında ortalama Von Mises gerilme mukavemeti } (\sigma)} \quad (5)$$

$$\text{Güvenlik Faktörü (S)} = \frac{203,943}{8,33} \approx 24,48 \text{ olur.}$$

Borunun üst kısmının mesnetlenmesi, diğer kısımlarda oluşan gerilmelerin ve deformasyonların daha belirgin hale gelmesini sağlayarak, kritik bölgelerdeki gerilmeleri, kaynak dikişlerindeki dayanıklılığı ve malzemenin akma sınırına yaklaşan noktalarını tespit edilebilme olanağı sağlamaktadır. Bu sınır şartı, borunun stabilitesini sağlarken kısmi hareket özgürlüğüne de sahip bir mesnet oluşturmaktadır. Gerilme, malzemenin birim alana uygulanan kuvvetidir. 172 mm'lik boru çapının olduğu bölgenin alanı 23223,44 mm² 'dir. Bu simülasyon modelinde, 38,75 kg'lık yükün kaynak birleşim bölgeleri üzerindeki deformasyon etkileri analiz edilmiştir. Bu yükün alanda oluşturduğu basınç kuvveti yaklaşık 0,0000000161 MPa olarak hesaplanmıştır.

Havalandırma borusu üretiminde kullanılan galvaniz kaplamalı çelik sac malzemenin dayanıklılığının belirlenmesi, katalog değerindeki akma mukavemeti (203,94 MPa) doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Statik tekil yükler altında maksimum gerilme dayanımı ile bu gerilmenin yüzey üzerindeki dağılımı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, malzemenin kaynak bölgelerine uygulanan 38,75 kg'lık yükü rahatlıkla taşıyabildiği görülmüştür. Bu durum, borunun dayanıklılık açısından tasarım gerekliliklerini fazlasıyla karşıladığını göstermektedir. Firmada, büküm işlemi için 1 kg'dan daha yüksek yük bindirmesi yapılmamıştır.

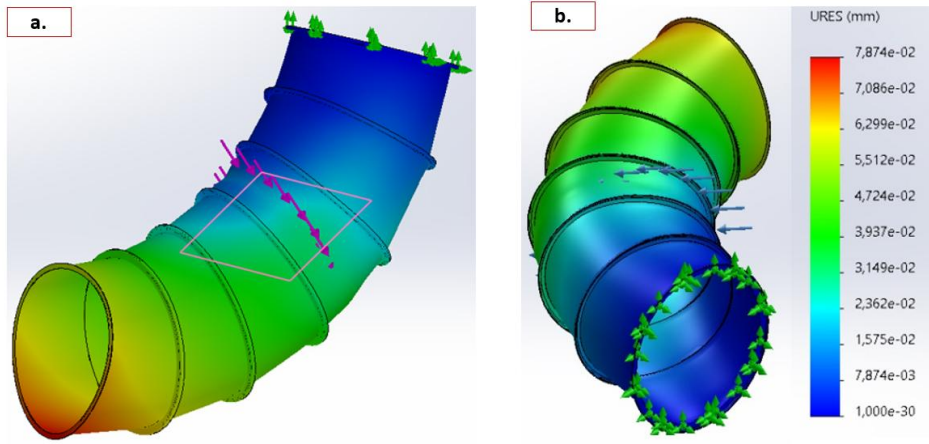
Uygulanan 38,75 kg yük, malzeme üzerinde yaklaşık 24,48 değerinde güvenlik katsayısı oluşturmaktadır. Bu değer, malzemenin 203,94 MPa akma sınırından yaklaşık 24,48 kat daha güvenli bir seviyede olduğunu gösterir. Bu durumda, uygulanan yükün oluşturduğu gerilme, malzemenin akma dayanımının çok altında bir değerdir. Malzemenin akma sınırının çok altında olduğundan, uygulanan yükün malzeme üzerinde plastik deformasyona neden olması mümkün değildir. Bu da malzemenin güvenli bir şekilde bu yükü taşıyabileceğini doğrulamaktadır. Havalandırma borusunun yüklenme sonucunda her noktasının mesafe olarak değişimi (deformasyonun büyüklüğünü ve yönünü), bu yapı elemanının hangi yönde hareket ettiğini görselleştirmiştir.

Deformasyon ölçeği, analizde hesaplanan gerçek deformasyonu görsel olarak daha belirgin hale getirmek için kullanılan bir büyütme katsayısıdır. Yer değiştirme ve gerinimde Şekil 11 ve 12 'de deformasyon ölçeği 725,62

alınmıştır. Bu ifade ise, deformasyonun yaklaşık 725,62 kat büyütüldüğünü ifade etmektedir. Eğer deformasyon ölçeği bu kadar yüksekse, modeldeki gerçek deformasyon miktarının çok küçük olduğu anlaşılmaktadır. Malzemenin rijitliği çok yüksektir ve dolayısıyla deformasyon miktarı gerçekte çok küçük kalmıştır. Yükler veya sınır koşulları model üzerinde küçük deformasyonlar oluşturmuştur.

Statik yüklenme sonucu boruda oluşan maksimum yer değiştirme 0,07874 mm olarak bulunmuştur. Maksimum yer değiştirme (mm), borunun uç kısmındaki iç bükey üst kavis bölgesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının geometrisi gereği gerilimin ve deformasyonun bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. Bağlantı noktaları, maksimum zorlamaya maruz kalan alanlar olarak değerlendirilmiştir, ancak uygulanan yük kaldırıldığında borunun eski formuna geri döneceği düşünülmektedir. Bu da malzemenin elastik davranışının bir kanıtıdır.

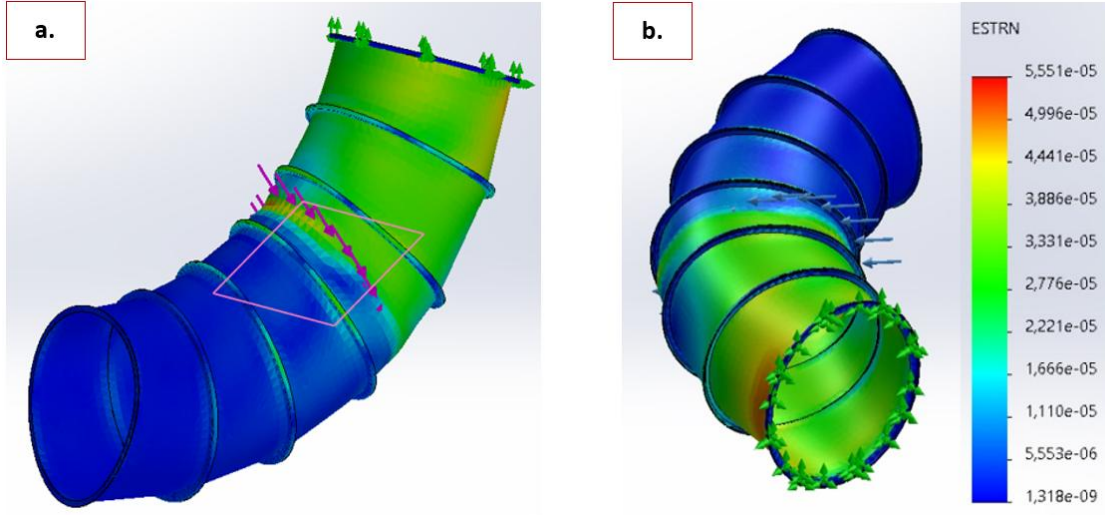
Mavi görünen yerler, destek noktaları (mesnetler) ya da yükten uzak alanlardır. Genellikle minimum yer değiştirmeyi veya hiçbir hareket olmayan alanları temsil etmektedir. Yeşil - sarı - turuncu bölgeler ise orta büyüklükteki yer değiştirme alanlarını göstermektedir. Yapının yüklerle temas eden ve gerilime maruz kalan kısımları bu renk ile gösterilmiştir. Kırmızı bölge ise maksimum yer değiştirmeyi temsil etmektedir. Genellikle, yükün en fazla etkilediği ve deformasyonun yoğun olduğu bölgelerdir. Kritik bölgelerin tespitinde **kırmızı alanlar** dikkatle incelenmiştir. Bu bölgeler, yapısal sorunların veya deformasyonun yoğun olduğu alanları göstermiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Statik yük altında malzemenin yer değiştirmesi (mm): **a.** Ön görünüş, **b.** Üst görünüş

Statik sonlu elemanlar analizinde gerinim, malzeme üzerindeki şekil değişim oranını ifade etmektedir. Genellikle deformasyonun büyüklüğü ile yükün malzeme üzerindeki etkisini anlamak için gerinim değeri kullanılmaktadır. Gerinim analizi, hem malzemenin davranışını anlamak, hem de güvenli tasarım parametrelerini oluşturmak için önemli bir araçtır. Gerinim statik yük altında bir birimsiz büyüklüktür. Bunun nedeni, gerinimin temel olarak bir uzunluk değişiminin (deformasyon) orijinal uzunluğa oranı olmasıdır. Renk skalası, elastik deformasyonun nerede bittiğini ve plastik deformasyonun başladığını görselleştirmeye yardımcı olmaktadır. Bu görselleştirme sayesinde yapısal güvenliği optimize etmek ve tasarımı iyileştirmek mümkün hale gelmektedir. Mavi kısım minimum gerinimi ve kırmızı olan bölge de maksimum gerinimi (kritik bölge) ifade etmektedir. Mavi ve yeşil alanlar güvenli bölgeleri temsil ederken, kırmızı alanlar dikkatle incelenmesi gereken kritik noktaları işaret etmektedir.

Şekil 12’de statik yük altında malzemenin gerinimi verilmiştir. Minimum gerinimi $1,318 \times 10^{-9}$ iken maksimum gerinimi de $5,551 \times 10^{-5}$ ’dir. Boru üzerindeki gerinim, sabit mesnetin bulunduğu bölgenin alt kısımlarında çok düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu gerinimin, çalışan makine parçalarında görülebilen tipik bir gerinim miktarına yakın olduğu düşünülmektedir. Gerinim analizinde kullanılan renk skalası, elastik deformasyonun sona erdiği ve plastik deformasyonun başladığı bölgeleri görselleştirerek, deformasyon sürecinin sınırlarını daha net bir şekilde ortaya koymuştur. Yeşil alan (Orta düzey gerinim); $3,886 \times 10^{-5}$ - $2,221 \times 10^{-5}$ gerinim aralığını temsil etmektedir. İncelenen sistemde güvenlik faktörü 24,4 olarak hesaplanmıştır. Güvenlik faktörü 24,4 olan bir yüklemde plastik deformasyon gerçekleşmez. Uygulanan yük altında boruda plastik deformasyon meydana gelmeyeceğini ve tüm deformasyonların elastik sınırlar içinde gerçekleşmiştir. Özellikle havalandırma sistemleri gibi titreşim ve çevresel etkilere maruz kalan sistemlerde bu durum, hem sistem güvenliği hem de uzun vadeli dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 12. Statik yük altında malzemenin gerinimi: **a.** Ön görünüş, **b.** Üst görünüş

Deformasyon genellikle plastik şekil değişikliği ve gerilme ile ilişkilendirilirken, yer değiştirme daha çok elastik hareketler ve malzeme deformasyonu ile bağlantılıdır. Bu nedenle deformasyon, havalandırma borusunun geometrisindeki değişiklikleri ifade ederken, yer değiştirme malzemenin her noktasındaki konum değişikliğini göstermektedir.

6. Tartışma ve Sonuç

Galvanizli çelik boru dirseklerin üretim süreci ile sonlu elemanlar analizinin (yönteminin) amacı (SEY veya FEA); üretim sırasında oluşan malzeme özelliklerindeki değişimlerin ve geometrik tolerans sapmalarının, dirseklerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Bilgisayar ortamında 3D katı modelleme ile klasik bir havalandırma boru modeli tasarlanmıştır. Solidworks 2020 Simulation yazılımının statik analiz modülü kullanılmıştır. Yüksek mesh yapısına (yani eleman ve düğüm sayısının sık olması) sahip boru modeli analizinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen deformasyon $1,000 \times 10^{-30}$ - $7,874 \times 10^{-2}$ mm aralığında çıkmıştır. Şekil değiştirme $3,886 \times 10^{-5}$ - $2,221 \times 10^{-5}$ gerinim aralığındadır. Havalandırma boru dirseği modeli, maksimum Von Mises gerilme değeri olan 16.6 MPa altında çalıştığı için elastik deformasyon bölgesinde kalmıştır. Tasarımda ise mavi ve yeşil alanlar sıklıkla gözlenmiştir. Bu iki renk skalası da güvenli bölgeleri temsil etmiştir.

Elde edilen veriler, malzeme üzerinde oluşan gerinim yoğunluklarının bölgesel dağılımını ve yapısal açıdan riskli alanları hızlıca belirleme olanağı sağlamıştır. Yük altında boru veya malzemenin şekil değiştirdiği bölgeler belirlenmiştir. Ancak bu deformasyonlar kalıcı değildir, çünkü akma sınırına ulaşılmamıştır. Akma sınırına kadar olan deformasyon elastik olup, yük kaldırıldığında geri dönme eğilimindedir. Model üzerine uygulanan kuvvet ve belirtilen sınır şartlarına bakıldığında elde edilen sonuçların güvenilir olduğu görülmüştür. Malzemenin akma mukavemeti ile analiz sonucundan elde edilen Von Mises gerilme değeri karşılaştırıldığında, güvenlik faktörüne (emniyet katsayısına) uygun bir durumun söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan analizin güvenli bir tasarım için yeterli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, galvanizli çelik boru dirseğinin büküm noktasındaki dayanımı teorik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Statik analiz sonucunda, kaynak bölgelerindeki olası zayıf noktalar tespit edilmiş ve öneriler geliştirilmiştir. Üretimde, yüksek dayanımlı ve homojen bir mikro yapıya sahip galvanizli çelik malzemeler kullanılmalıdır. Kaynak sırasında kullanılan dolgu malzemesi, borunun malzemesiyle uyumlu ve yüksek mekanik dayanım özelliklerine sahip olmalıdır. Kaynak dikiş tasarımı, gerilme yoğunluğunu azaltacak şekilde optimize edilmelidir (örneğin, yuvarlatılmış köşe kaynaklar veya düzgün bindirme kaynaklar tercih edilebilir). Büküm açısı veya boru kalınlığı optimize edilerek kaynak bölgesine düşen gerilme azaltılabilir. Bu öneriler, kaynak bölgesinde zayıf noktaların oluşumunu önlemeye ve dirseğin büküm noktasındaki dayanımı artırmaya yönelik adımlar olarak değerlendirilebilir.

Üretim hatalarının azalması, maliyetlerin düşürülmesine de katkı sağlamıştır. Ayrıca, bu yöntem ile tasarım doğrulama süreçleri hızlanmış ve mühendislik süreçleri daha verimli hale getirilmiştir. Endüstriyel üretim

hattındaki kaynak ve şekillendirme işlemleri, analiz sonuçlarına göre optimize edilmelidir. Özellikle kaynak dikişlerinin dayanım kapasitesinin artırılması, boru üretiminin güvenilirliğini artırabilir. Yapılan bu çalışmada elde edilen veri analiz sonuçları da gerçek üretim aşamasında kullanılmıştır. Solidworks ortamında tasarlanan 3D katı modellerin statik analizlerinin yapılması, özellikle çok parçalı ve maliyeti yüksek makinelerin prototip üretiminden önce, üreticilere ve tasarımcılara önemli ölçüde zaman kazandırmıştır. Benzer çalışmalara ve literatüre ışık tutacağını söylemek mümkündür. Analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar yeni bir ürünün tasarımında ve imalatında kullanabilir.

7. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine katkılarından dolayı Kahramanmaraş ilimizde bulunan Küçüksan Metal Makina Otomasyon A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

8. Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

9. Kaynakça

- [1] Çitil Ş., Ayaz Y., Temiz Ş., Aydın M.D., 2017. Mechanical Behaviour of Adhesively Repaired Pipes Subject to Internal Pressure, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 75(1), 88-95. doi: [10.1016/j.ijadhadh.2017.02.015](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.02.015)
- [2] Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Da Silva L.F.M., DeJesus A.M.P., 2011. Strength Prediction of Single- and Double-lap Joints by Standard and Extended Finite Element Modeling, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31(5), 363-372. doi: [10.1016/j.ijadhadh.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.09.008)
- [3] Çetin, A. D., Bayer, İ. 2018. Buhar Devreleri Boru Tasarımı ve Boru Gerilme Analizi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 211(1), 63-72.
- [4] Tambrallimath, V., Keshavamurthy, R., Saravanabavan D, Koppad, P.G., Pradeep Kumar, G.S., 2019. Thermal Behavior of PC-ABS Based Graphane Filled Polymer Nonocomposite Synthesized by FDM Process, *Composites Communication*. 15(2), 129-134. doi: [10.1016/j.coco.2019.07.009](https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.07.009)
- [5] Altuncu, E., Eker, C., Kırmızıtepe, S., 2021. Havalandırma Kanalı Tasarımında Malzeme Seçimi ve Tasarımına Bağlı Ağırlık Optimizasyonu, *Academic Perspective Procedia*, 4(1), 161-170. doi: [10.33793/acperpro.04.01.26](https://doi.org/10.33793/acperpro.04.01.26)
- [6] Kurniawan, R.N.A., Romahadi, D., Fitri, M., Karim, M.R., 2023. Implementation of The Finite Element Method In Solidworks to Optimize The Front Cast Wheel Design for Motorcycles, *International Journal of Innovation in Mechanical Engineering & Advanced Materials (IJIMEAM)*, 4(3), 66-73. doi: [10.22441/ijimeam.v4i3.18794](https://doi.org/10.22441/ijimeam.v4i3.18794)
- [7] Ay, M., Hartomacioğlu, S., Manav, M., Saraç, Ş., 2021. Çelik Dirsek Üretiminde Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi ile Modellenmesi ve Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed and Refereed*, ISSN: 2667-6702, 8(16), 49-67. doi: [10.38065/euroasiaorg.582](https://doi.org/10.38065/euroasiaorg.582)
- [8] Xie, P., Yue, Q., 2017. Onboard Monitoring System of Overbend Pipe During Deepwater S-Lay Installation, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 27 (2), 216-221. doi: [10.17736/ijope.2017.jc667](https://doi.org/10.17736/ijope.2017.jc667)
- [9] Gök, A., Halil I., Gök, K., 2009. Sonlu Elemanlar Metodunun Gerçek Bir Sanayi Parçası Üzerinde Uygulanması. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs Karabük, 1-5.
- [10] Tosyalı Toyo Çelik A.Ş. <https://www.tosyalitoyo.com.tr> (Erişim Tarihi: 02.08.2024).
- [11] DX51D Markalı Çelik Ürünler, <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/dx51d> (Erişim Tarihi: 03.08.2024).
- [12] Tat-metal A.Ş. Galvanizli Yassı Çelik, (Erişim Tarihi: 02.08.2024). <https://www.tatmetal.com/uploads/file/d7d4e3d32d9f3852e642b8372bf2ca5c-1595421895205.pdf>

- [13] Gürsoy, Ö.K., Esener, E. 2019. Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(1), 1-11. doi: 10.35193/bseufbd.549657
- [14] Sezer, Ç., Mekanik Tasarımda Emniyet Katsayısı, (Erişim Tarihi: 03.08.2024). <https://www.sezercoban.com/mechanical-design-safety-factor/>
- [15] TS EN 10346:2015, Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Mamuller — Teknik Teslim Şartları, Türk Standardları Enstitüsü, 2015, (Erişim Tarihi: 02.08.2024).
<https://www.sincerelysteel.com/tr/hot-dipped-galvanized-steel-coil-hdgi-product/>
- [16] TS EN 1505:2023, Havalandırma Tesisatı — Kanal Sistemleri — Sac Kanal ve Bağlantı Elemanları İçin Boyutlar, Türk Standardları Enstitüsü, (Erişim Tarihi: 02.08.2024).
<https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/havalandirma-ve-kl-ma-s-stemler--genel-tekn-k-sartname-taslagi-20230104101224.pdf>
- [17] EN 10143:2006, Sürekli Sıcak Daldırma ile Kaplanmış Çelik Yassı Ürünler için Toleranslar, European Committee for Standardization (CEN), (Erişim Tarihi: 02.08.2024).
<https%3a%2f%2fcdn.standards.iteh.ai%2fsamples%2f23469%2f9655a722c817441388285d9f1a2a3c69%2fSIST-EN-10143-2006-en-.pdf/RK=2/RS=SVoqO1ELpsWa9IIqLDfjqPb6ogs->
- [18] Baycık, H., 2013. Çeliklerin Sıcak Daldırılmalı Galvaniz Kaplanması İçin Avrupa Standartları, Mühendis ve Makine, 47(555), 33-34.
- [19] Beer, F.P., Johnston Jr.E.R., DeWolf, J.T., 2015. Mechanics of Materials, 8th Edition, Published by McGraw-Hill Education, New York/ United States of America, ISBN: 978-0-07-339823-5.
- [20] Shames, I.H., Pitarresi, J.M., 2003. Introduction to Solid Mechanics 3rd Edition, Published by Pearson, United States of America, 792 pp. ISBN: 978-0132677585.