

**ÇELİK SANDVIÇ PANELLERİN ÜÇ NOKTA BÜKÜM
TESTİ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ
MEHMET AYDIN**



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK SANDVIÇ PANELLERİN ÜÇ NOKTA BÜKÜM TESTİ
PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Mehmet AYDIN
0000-0003-4943-4574

Doç. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Mehmet AYDIN tarafından hazırlanan “ÇELİK SANDVIÇ PANELLERİN ÜÇ NOKTA BÜKÜM TESTİ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

Başkan : Prof. Dr. Fatih KARPAT
0000-0001-8474-7328
Bursa Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza,

Üye : Doç. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU
0000-0003-4970-4490
Bursa Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza,

Üye : Dr. Öğr. Üyesi. Celalettin YÜCE
0000-0003-1387-907X
Bursa Teknik Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza,

Yukarıdaki sonucu onaylarım
Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
.././....(Tarih)

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06/09/2021
İmza
Mehmet AYDIN

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Doç. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU
06.09.2021

Mehmet AYDIN
06.09.2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK SANDVIÇ PANELLERİN ÜÇ NOKTA BÜKÜM TESTİ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Mehmet AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

Sandviç panel yapılarında tasarıma girdi oluşturacak parametrelerin seçilerek kalite ve dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi Taguchi deney tasarımı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin belirlenmesinde üretilebilirlik sınırları gözetilmiş olup, bu değerlendirme sonucunda üç faktör değerlendirmeye alınmıştır. Üç faktör ve üç değişkenden oluşan parametreler Taguchi deney tasarımına göre dokuz farklı model için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları incelenmiştir. Analiz çıktılarının MINITAB programında değerlendirilerek etkin parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Etkin parametrelerin değiştirilerek tasarıma edilen müdahalenin minimum sayıda yapılası ve zaman kayıplarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi analiz doğruluğunu test etmek amacıyla referans çalışma sonuçları karşılaştırılmış olup fiziksel testlerin analiz sonuçlarına uyumluluğu kontrol edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları değerlendirildiğinde en etkin tasarım parametresi olarak sac levha kalınlığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde belirlenen parametrenin etkinliği doğrulanmış olup etkin parametreler etki şiddetine göre grafiklerde gösterimi yapılmıştır. Simülasyon sonuçları varyans analizi (ANOVA) metodu ile istatistiksel olarak da değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sandviç Panel, Sonlu Elemanlar Analizi, Üç Nokta Büküm Testi, Taguchi

2021, xii + 57 sayfa.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE THREE POINT BENDING TEST PERFORMANCE OF STEEL SANDWICH PANEL WITH FINITE ELEMENT METHOD

Mehmet AYDIN

Bursa Uludağ University
Institute Of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

In sandwich panel structures which is the improvement of quality, strength properties and selecting the parameters that will give input to the design was carried out by using Taguchi experimental design method. Manufacturability limits were taken into account in determining the factors and interactions to be evaluated, and three factors were taken into consideration as a result of this evaluation. Finite element analysis were carried out for nine different models according to Taguchi experimental design, and the analysis results were examined. The analysis outputs were evaluated in the MINITAB program and the effective parameters were determined. It is aimed to make a minimum number of interventions to the design by changing the effective parameters and to prevent time losses. In order to test the accuracy of the finite element method analysis, the results of the reference studies were compared and the compatibility of the physical tests with the analysis results was checked. When the finite element analysis results were evaluated, sheet metal thickness was determined as the most effective design parameter. As a result of the studies, the effectiveness of the determined parameter was confirmed and the effective parameters were shown in the graphics according to the severity of the effect. The results of the simulation were also statistically evaluated using the variance analysis (ANOVA) method.

Keywords : Sandvich Panel, Finite Element Analysis, Three Point Bending Test,

Taguchi

2021, xii + 57 pages.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez alışmamın hazırlanması süresince yardım, destek ve yönlendirmelerini esirgemeyen değerli hocam Sn. Doç. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU ve Sn. Prof. Dr. Fatih KARPAT' a teőekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın ortaya çıkmasında sonlu elemanlar analizleri konusunda tecrübesini ve desteğini esirgemeyerek katkıda bulunan Sn. Onur EROL' a, teőekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi, tez yazımı süresince desteğini eksik etmeyen değerli eşim Rahime AYDIN, kardeşim Cemil AYDIN ve sabrından dolayı oğlum Kuzey AYDIN' a teőekkürü bir borç bilirim

Mehmet AYDIN
06/09/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----|
| ÖZET..... | Vi |
| ABSTRACT..... | Vii |
| TEŞEKKÜR..... | Vii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | x |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 3 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 9 |
| 3.1. Lazer kaynak yöntemi | 9 |
| 3.2. Deney tasarımı | 17 |
| 3.2.1. Kalite geliştirmede deney tasarımı..... | 18 |
| 3.2.2. Deney tasarımının önemi ve aşamaları | 19 |
| 3.3. Sonlu elemanlar yöntemi | 21 |
| 3.3.1. Ansys programı | 24 |
| 3.3.2. Ansys genel işlem basamakları | 25 |
| 3.3.3. Ansys analizlerinde kullanılan elementler | 26 |
| 3.3.4. Ansys’de meshleme | 28 |
| 3.3.5. Statik analizler..... | 28 |
| 3.4. Sandviç panel | 29 |
| 3.4.1. Test metodu ve ekipmanları | 30 |
| 3.4.2. Taguchi deneme tablosunun oluşturulması..... | 32 |
| 3.4.3. Geometrilerin modellenmesi ve sonlu elemanlar analizi | 33 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA | 38 |
| 4.1. Test ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması | 38 |
| 4.2. Deneme tablosu analiz sonuçları..... | 39 |
| 4.3. Etkin parametrelerin minitab programında belirlenmesi | 45 |
| 5. SONUÇ..... | 52 |
| KAYNAKLAR | 53 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 57 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|-----------------|-----------------------------------|
| k | Basma akma gerilmesi oranı |
| K | Genel rijitlik matrisi |
| U | Nodal deplasman vektörü |
| F ^a | Uygulanan toplam yük vektörü |
| F ^r | Reaksiyon yük vektörü |
| D _Y | Eğilme dayanımı |
| D _{QY} | Kesme dayanımı |
| ω _s | Kesme deplasmanı |
| ω _b | Sağ ve sol kısım deplasman artışı |
| ω | Orta kısım deplasman artışı |
| L | Numune boyu |
| B | Numune genişliği |
| s | Aşık aralığı |
| t _w | Levha kalınlığı |
| h _c | Perde yüksekliği |
| ΔP | Yük artışı |

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|-----------------------|
| CAD | Computer aided design |
| ANOVA | Analysis of variance |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Çelik sandviç panel geometrik karakteristikleri | 1 |
| Şekil 3.1. Lazer ışınının oluşma prensibi | 10 |
| Şekil 3.2. Lazer ışın cihazı şematik gösterimi..... | 11 |
| Şekil 3.3. Lazer ışınının parça üzerine yansıtılması..... | 11 |
| Şekil 3.4. Lazer kaynak kalitesini etkileyen parametreler | 14 |
| Şekil 3.5. İletim ve derinlemesine kaynak yöntemi | 15 |
| Şekil 3.6. Lazer kaynak ile birleştirme yöntemleri | 16 |
| Şekil 3.7. Taguchi deney tasarım modeli | 18 |
| Şekil 3.8. Tek boyutlu elementler | 26 |
| Şekil 3.9. İki boyutlu elementler | 27 |
| Şekil 3.10. Üç boyutlu elementler..... | 27 |
| Şekil 3.11. Sandviç yapının geometrik karakteristikleri | 29 |
| Şekil 3.12. Lazer kaynak ile sandviç yapının birleştirilmesi | 29 |
| Şekil 3.13. Üç nokta büküm testinin uygulanması..... | 30 |
| Şekil 3.14. Dört sütunlu hidrolik pres ve sandviç yapının test düzeneği | 32 |
| Şekil 3.15. Catia programında hazırlanan 3D sandviç yapının görüntüsü | 34 |
| Şekil 3.16. 2D sonlu elemanlar modeli. | 34 |
| Şekil 3.17. Ansys programına hazırlanan sonlu elemanlar modeli | 34 |
| Şekil 3.18. Ansys programında tanımlanan kontak bölgeleri | 35 |
| Şekil 3.19. Ansys programında hazırlanan mesh model..... | 36 |
| Şekil 3.20. Mesnet tipi ve deplasman belirlenmesi..... | 36 |
| Şekil 3.21. Model üzerindeki gerilme dağılımı..... | 37 |
| Şekil 4.1. Sandviç yapının yük deplasman eğrisi | 38 |
| Şekil 4.2. Test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması | 39 |
| Şekil 4.3. 1 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 40 |
| Şekil 4.4. 2 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 40 |
| Şekil 4.5. 3 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 41 |
| Şekil 4.6. 4 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 41 |
| Şekil 4.7. 5 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 42 |
| Şekil 4.8. 6 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 42 |
| Şekil 4.9. 7 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 43 |
| Şekil 4.10. 8 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 43 |
| Şekil 4.11. 9 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri | 44 |
| Şekil 4.12. Von mises gerilmesi ve S/N oranları | 46 |
| Şekil 4.13. Eğilme dayanımı ve S/N oranları..... | 48 |
| Şekil 4.14. Kesme dayanımı ve S/N oranları | 50 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

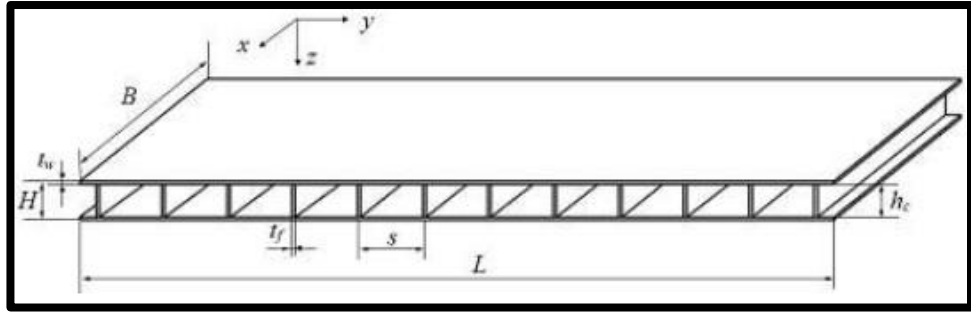
Sayfa

| | |
|---|------|
| Çizelge 3.1. Sandviç yapının geometrik karakteristiklerinin ölçüleri..... | 30 |
| Çizelge 3.2. Taguchi metoduna göre hazırlanmış deneme tablosu | 32 |
| Çizelge 3.3. Üç faktör üç değişken deneme tablosu | 33 |
| Çizelge 4.1. Analiz sonuçlarına göre gerilme, eğilme ve kesme dayanımı değerleri | 45 |
| Çizelge 4.2. Von Mises gerilme sonuçlarına göre elde edilen S/N oranı yanıt tablosu .. | 45 |
| Çizelge 4.3. Von Mises gerilme sonuçlarına göre ANOVA analizi | 45 |
| Çizelge 4.4. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre elde edilen S/N oranı yanıt tablosu | 45 |
| Çizelge 4.5. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre ANOVA tablosu..... | 459 |
| Çizelge 4.6. Kesme dayanımı sonuçlarına göre elde edilen S/N oranı yanıt tablosu.... | 459 |
| Çizelge 4.7. Kesme dayanımı sonuçlarına göre ANOVA tablosu | 4551 |

1.GİRİŞ

Denizcilik sektörün daha hafif ve daha hızlı deniz araçları üretme ihtiyacı sebebiyle tasarım olarak etkili yapıların kullanım ihtiyacını doğurmuştur. Bu çerçevede tasarlanan yapıların bu şartları sağlaması istenmektedir. Sandviç yapılar kullanılarak hem dayanıklı hem de hafif yapılar tasarlanabilmektedir. Bu tip yapılar denizcilikte kullanılan geleneksel yöntemlere oranla 30-50% daha hafif olup gerekli dayanım şartlarını sağlamaktadırlar (Kujala ve Klanac, 2004; Allen, 2013). Sandviç çelik yapılara duyulan bu ilgiye lazer kaynak birleştirme yöntemindeki gelişmeler eşlik etmiştir. Kullanılan çelik sacların ölçüsel hassasiyeti, yüksek kaynak hızı kabiliyeti ve sacların dış bölgeden birbirine kaynak edilebilirliği sayesinde uygulamada kullanımı önemli ölçüde verimlilik sağlamaktadır (Kozak, 2009; Romanoff ve Varsta, 2007).

Perde çekirdek sandviç yapılar Şekil.1.1’de görüldüğü üzere tüm çelik yapılar içerisinde en basit çekirdek topolojisine sahiptir. Lazer kaynaklı sandviç panel T şeklinde kaynak edilerek birleştirme işlemi yapılmaktadır. Bağlantı yatay olarak yerleştirilmiş iki levha arasına dikey olarak yerleştirilmiş çelik sacların kaynak edilmesi ile sağlanır. Sandviç yapı bu yapının birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan yapı olarak adlandırılabilir.



Şekil 1.1. Çelik sandviç panel geometrik karakteristikleri (Jiang, Ji, Rejab, Zhak, Ishak ve Zhu, 2017)

Bu çalışmada çelik sandviç yapıların dayanımını test etmek amacıyla üç nokta büküm testi uygulanmıştır. Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak üç faktör ve üç değişken olmak üzere dokuz farklı model için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametre olarak sac levha kalınlığı, dikey perde yüksekliği ve iki perde arasındaki mesafe dikkate alınmıştır.

Parametrelerin değiştirilmesi yoluyla analiz sonuçlarına göre karşılaştırma yapılarak etkin tasarım parametrelerinin MINITAB programında tayini ve ANOVA analizleri gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu CAD modellerinin oluşturulmasında CATIA V5 programı kullanılmış olup, sonlu elemanlar analizleri ANSYS R19.2 programında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan sonlu elemanlar analizlerinin sonuçların istatiksel analizinde ANOVA yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde Taguchi metodu ile elde edilen faktörlerin önem sıralaması ile ANOVA analizi sonucunda elde edilen faktörlerin etki sıralaması birbiri ile karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sandviç yapılar üzerine literatürde birçok çalışma yapılmıştır.

Çelik ve Solmaz (2018) yaptıkları çalışmada altıgen petek (bal peteği) yapılı sandviç kompozitlerin basma kuvveti etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir. Sandviç yapıların çekirdek kısımlarının üretimini üç boyutlu yazıcı (3D) yazıcı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. 3 farklı hücre boyutuna ve 3 farklı hücre yüksekliğine sahip petek yapılı sandviç numuneler aksel basma deneyine maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlar numunenin ağırlığına oranlanarak her bir parametre için özgül kritik burkulma yük değerleri belirlenmiş ve grafikler halinde sunulmuştur. Sonuç olarak maksimum dayanım 7 mm hücre boyutu ve 25 mm hücre yüksekliğinde elde edilmiştir.

Kaman ve Solmaz (2009) bal peteği sandviç yapılarda petek hücre boşluklarına köpük ilavesinin kritik burkulma yüküne etkisini incelemiştir. Bu amaçla dört farklı hücre boyutunda üretilen bal peteği sandviç numunelerin petek hücre boşlukları köpük ile doldurulmuştur. Üretimden sonra köpüklü ve köpüksüz numuneler aynı şartlarda basma deneylerine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde kritik burkulma yükünün petek hücre duvarı kalınlığının artırılması ile arttığı tespit edilmiştir. Hücre sayısı ve boyutunun dikkate alındığı deney sonuçları, hücre boyutunun artması ile kritik burkulma yükünün düştüğünü göstermiştir. Petek hücre boşluklarının köpük ile doldurulması işlemi tüm numuneler için köpüksüz numunelere göre kritik burkulma yükünü arttırmıştır.

Güden ve Kılıçaslan (2019) yaptıkları çalışmada sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş oluklu kora sahip alüminyum sandviç yapıların enerji sönümlenme kapasiteleri incelenmiştir. Sandviç yapılarda kor olarak yamuk ikizkenar şeklinde zikzak 1050 H14 Al alaşımından yapılmış olan oluklu katmanlar ile yüz ve ara plakalar kullanılmıştır. Oluklu korların deformasyon tipinin belirlenmesi amacıyla deneyin nümerik simülasyonu LS-DYNA programı ile oluşturulmuştur. Panellerin enerji sönümlenme kapasiteleri aynı şekilde sahip ancak 9 mm yüksekliğindeki oluklu korlu sandviç paneller ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda kor yüksekliğinin artması ile efektif ezilme

uzunluğunun arttığı ve darbe enerjisinin panele daha homojen olarak dağıtıldığı görülmüştür.

Gürses ve Yardımcı (2016) yaptıkları çalışmada 4 noktadan bükme testine maruz bıraktıkları sandviç bir kirişin sayısal benzetimini yapmışlardır. Sandviç yapının yüzey ve dolgu malzemesi olarak alüminyum kullanılmış olup dolgu geometrisi düzgün altıgen bal peteğidir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulan yapının plastik gerinimlere neden olacak büyüklükteki yer değiştirmeler altında gösterdikleri davranışları karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bükme yüküne maruz kalan sandviç yapılarda en kritik hasar tipi hücre duvarlarına meydana gelen burkulma olarak belirlenmiş olup hücre boyutunun sandviç yapının performansı üstünde ciddi farklılıklar yarattığı tespit edilmiştir.

Akkuş, Düzcükoğlu ve Şahin (2015) alüminyum bal peteği yapılarda oluşan eğilme kuvvetlerinin çoklu regresyon ile incelenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Saf epoksi ve %1 çok duvarlı karbon nano tüp (mwcnt) takviyeli yapıştırıcı ile farklı hücre genişliği ve farklı yükseklikteki numuneler yapıştırılarak üretilen alüminyum bal peteklerinin üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında hücre genişliği sabit tutulduğunda hücre yüksekliği arttırıldığında eğilme kuvvetinde artma olduğu gözlemlenildi. Aynı hücre yüksekliği için bakıldığında hücre genişliği arttıkça eğilme kuvvetinde azalma olduğu tespit edilmiştir. %1 mwcnt ile takviye edilen yapıştırıcı eğilme kuvvetlerinde azalmaya sebep olmuştur.

Subaşı, Çetin ve Şamandar (2017) kompozit panellerde levha ve çekirdek kalınlığının mekanik özelliklere etkisini incelediler. Çalışmada alüminyum damla desenli saç ve hazır cam takviyeli polyester (CTP) levha kullanılarak üretilmiş bal peteği sandviç levhaların kalınlığı ve çekirdek kalınlığı değişimi ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki üç nokta eğilme testi ile incelenmiştir. Sonuç olarak, çekirdek kalınlığı artışının ve CTP kalınlığı artışının eğilme kuvvetini arttırdığı, ancak bal peteği kalınlık artışının eğilme kuvveti üzerinde çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Metschkow (2006) lazer kaynakla birleştirilmiş sandviç panellerin gemi yapımındaki uygulamalarını incelemiştir. Bu tip yapılar modüler oluşturulabilir bağlantılar yanında

daha kolay montaj çözümlerini beraberinde sunmaktadırlar. Diğer taraftan mevcut yapılara kıyasla aynı ağırlık ile daha fazla dayanım sunabilmektedirler. Avantajlar göz önüne alındığında sandviç yapıların kullanımı önem arz etmektedir.

Sun ve Saafi (2015) yaptıkları çalışmada lazer kaynakla birleştirilmiş sandviç yapılarda yük etkisiyle geometrinin farklı bölgelerindeki değişimleri incelemişlerdir ve üç nokta büküm testi ile eğilme performanslarının deneysel olarak doğrulanması yoluna gidilmiştir. Eğilme dayanımı sandviç yapının performansını belirleyen önemli göstergelerin başında gelmektedir. Sonlu eleman analizleri Abaqus programında gerçekleştirilmiş olup aşağıdaki çıktılar değerlendirilmiştir;

- Sandviç levhanın yük deplasman eğrisi incelendiğinde, elastik limitin yük aralığı ve sandviç levhalar için maksimum taşıma kapasitesi hesaplanmıştır.
- Üç testin ortalaması ve sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların oldukça yakın olduğu görülmüştür. Analiz ve test sonuçlarının birbirine oldukça yakın olması alınan sonuçları desteklemektedir.
- Sandviç plakanın alt yüzeyinde ölçülen strain değeri, maksimum gerilimin T-bağlantı kaynak düğümüne yakın yerde oluştuğunu göstermektedir.
- Sandviç plakaların final lokal bükülme kırılması üst kısmında aşık aralığının orta kısmına yakın bir yerde meydana geldiğini ve eksantrik hareketin sandviç yapının burkulma konumunu değiştirebileceği gözlemlenmiştir.

Jiang ve Zhu (2014) yaptıkları çalışmada farklı kaynak parametrelerinin etkisi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kaynak genişliği ve kaynak hızının değişiminin sandviç yapı üzerine etkileri incelenmiştir.

- Kaynak genişliğindeki artış eğilme dayanımı ve kesme dayanımında artış meydana gelmektedir. Özellikle 3 mm et kalınlığının altındaki değerlerde bu artış daha belirgindir.
- Kaynak genişliği arttıkça maksimum yük kapasitesi doğru orantılı artmaktadır.
- Lazer kaynaklı ağ çekirdekli sandviç levhanın rijitlik ve mukavemeti düşünüldüğünde kaynak genişliğinin eğilme özellikleri üzerindeki etkisi dikkate

alınmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi, lazer kaynaklı ağ çekirdekli sandviç plakaların sertlik ve mukavemet analizi için mükemmel bir seçimdir.

Jiang ve Fei (2017) yaptıkları çalışmada sandviç yapılarda kaynak genişliği üzerine incelemede bulunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada deformasyon oluşumunu üç farklı aşamaya ayırmıştır. Bunlar elastik deformasyon, plastik deformasyon ve yapıda hata oluşumunun yani T kaynakta kopma meydana gelip test sürecinin tamamlandığı kısımlardır. Yapılan çalışmada elde edilen veriler sonucunda düşük kaynak kalınlıklarının yüksek yüklere karşı performanslarının yetersiz olduğu yönünde çıktılar elde etmiştir. Ayrıca kaynak noktasının sandviç yapıdaki en zayıf nokta olması yanında kaynak geometrisi ve özelliklerinin önemini belirtilmiştir.

Gavade ve Sable (2018) alüminyum sandviç panelleri üzerine yaptıkları çalışmada çeşitli sandviç yapıları üzerinde karşılaştırma gerçekleştirmiştir. Bunlar I , H ,V ve Z tip olup basma testi yapılmış ve gerilme değerleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda V tip dikey silindir yapı ağırlık ve dayanım göz önüne alındığında en optimum çözüm olarak ortaya koymuşlardır.

Yadollahi ve Pakar (2015) yaptıkları çalışmada trapez şeklindeki çelik tasarımda meydana gelen değişiklikler ile sonlu eleman analizlerini gerçekleştirdiler. Farklı kalınlık ve tipteki yapıların yük deplasman eğrisini karşılaştırma yoluyla değerlendirmelerde bulundular. Trapez levha uzunluğunun seçilen parametreler arasında en az etkili tasarım parametresi olduğunu tespit ettiler.

Damghani ve Gonabadi (2017) yaptıkları çalışmada alüminyum trapez sandviç panelin enerji absorpsiyonu üzere çalışma gerçekleştirdiler. Test ve analiz sonuçlarının karşılaştırıldığı bu çalışmada çekiç düşme testi ile parçanın ani yükleri sönmeme performansı değerlendirilmiştir. Sonlu eleman analizleri ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir. Panel yüksekliğinin artması ile enerji sönmeme miktarının arttığı görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmada plakalar arasındaki ayrılmanın yüksek kesme gerilmesi sebebiyle meydana geldiği ortaya koyulmuştur.

Wenbin Yu (2015) yapmış olduğu çalışmada farklı genetik şifrelere sahip malzemeleri kullanılarak boş kısımların doldurulması ile yapısal analizler gerçekleştirmiştir. Modelleme ilkelerine bağlı olarak yapılan analizlerde kurucu model yaklaşımı ile hareket edilmiş olup bilgilerin SwiftComp TM bilgisayar koduna aktarılmasıyla sistematik olarak daha güvenilir sonuçlara ulaşılmıştır.

Caccese ve Yorulmaz (2009) gemi güverte bölümü üzerinde kullanılan lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmiş sandviç yapı için incelemede bulunmuşlardır. Çalışmada kaynak bağlantı kalınlığının etkisi yanında kaynak pozisyonu da incelenmiştir. Beklenildiği üzere merkezde bulunan kaynaklar köşedeki kaynaklara oranla daha esnek bir davranış sergilediler. Ayrıca boyuna atılan kaynaklar enine atılan kaynaklara oranla daha yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Burada yapılan ek kaynak maliyeti ve sağlamlığın arasında bir tasarım dengesi olması gerekmektedir.

Romanoff (2007) yaptığı çalışmada lazer kaynakla birleştirilmiş sandviç yapının bükülme davranışı ile ilgili incelemelerde bulunmuştur. Lazer kaynaklı bağlantılarda moment yükleri alt ve üst plaka arasında transfer edilmektedir. Bu aşamada dikey plakalarda düzlem içi kuvvetler oluşur. Moment değeri sıfıra yakın olduğunda ise dikey plakalar düzlem içi yükleri yatay plakalara aktaramaz ve dikey plakalar yükün çok büyük bir kısmını taşımak durumunda kalır. Bu durum genellikle dikey plakaların çok ince olması durumunda ve lazer kaynağın dönme dayanımının çok küçük olduğu durumda ortaya çıkabilmektedir.

Briscoe ve Mantell (2011) konutlarda sandviç panel kullanımının tasarım prosedürleri ile ilgili çalışmalarda bulunmuşlardır. Konutlarda kullanılan bu paneller ile birlikte termal şartların sağlanması amacıyla sandviç panel arasına köpük uygulaması yapılmakta olup aynı zamanda dolgu malzemesi ile dayanım değerlerinin de artması sağlanmaktadır. Tasarım parametreleri göz önüne alındığında dikey perde yüksekliklerinin(h_c) minimize edilmesi için yapısal ve termal özelliklerin arasında denge olması gerekliliği ön plana çıkmıştır.

Frank (2014) yaptığı çalışmada yanal yüklere maruz kalan çelik sandviç panellerdeki yorulma direncini incelemiştir. Sandviç yapılarda lokal bozulmaların sonucu olarak meydana gelen bağlantı noktalarındaki yorulma ayrılması ele alınıp 2.5 mm ile 16 mm arasındaki levha kalınlıklarına odaklanılmıştır. Birleştirilmiş plakalar yatay yükler altında panelin düşük kesme dayanımı sonucu olarak ikincil bir bükülmeye eğilimlidir ve bu durum bağlantı çentiklerinden biri ile diğeri arasında sıkıştırmaya neden olup çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Söz konusu durumda yorulma çatlağının çekme çentiğinin ucunda başlayıp yayılarak lokal bölgede bozulmaya ve ayrılmaya yol açtığı görülmüştür.

Klanac (2004) yapmış olduğu çalışmada gemilerde sandviç panel uygulamalarının optimum tasarımı üzerine incelemelerde bulunmuştur. Tasarım süreci yük modelleme, hesaplamalar ve optimizasyon gibi birçok alt görevden oluşan karmaşık bir süreçtir. Ayrıca ağırlık ve üretim maliyetlerini minimuma indirilmesi sürdürülebilirlik açısından oldukça önem arz etmektedir. Tasarım çalışması yapılırken gemi güvertelerinde bulunan geleneksel tek panelli yapı dışına çıkılarak çift panelli tasarımı üzerine yönelik ilerlemeler kaydedildi. Optimum tasarım yaklaşımı kullanılarak yapı performansı iyileştirilmiş olup paralelinde yapı ağırlığı ve maliyette azalma sağlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

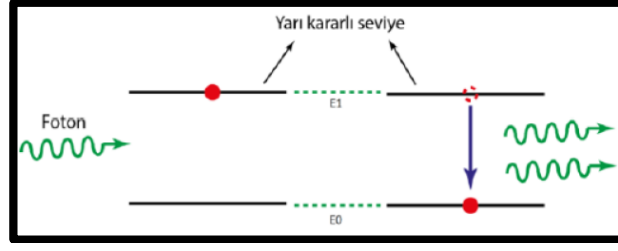
2.1. Lazer kaynak yöntemi

Lazer, kelimesi İngilizce Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, yani uyarılmış radyasyon salınımlarıyla ışığın kuvvetlendirilmesi sözcüklerinin baş harflerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Lazer ışını tek renkli, uyumlu ve yönlendirebilir parlak ışın demetidir. Fiziksel temeli Einstein'ın teorisi olan uyarılmış ışımaya dayanır (Akman, 2007). Patenti Amerikalı fizikçi ve mühendis Gordon Gould tarafından 1977 de alınmıştır (Uyguntürk, 2020).

Metal sacların lazerle kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre avantajlıdır. Çalışılabilen bölgenin dar olması, yüksek sıcaklıklarda kontrol, istenen derinliğe odaklanabilme, aynı ya da farklı malzemelerin kaynatılabilmesi gibi seçim açısından öne geçiren özelliklere sahiptir. Lazer kaynakta kritik parametreler istenen kaliteye ve malzemeye uygun ayarlandığında kaliteli kaynak elde etme ihtimali yüksektir. Parametrelerin uygun olmaması ya da yanlış değerlerin ayarlanması durumunda malzemede delikler, kesikler ya da kalitesiz kaynak dikişleri oluşabilir (Özcan, Tarakçıoğlu ve Kahramanlı, 2004).

A. Lazer ışını

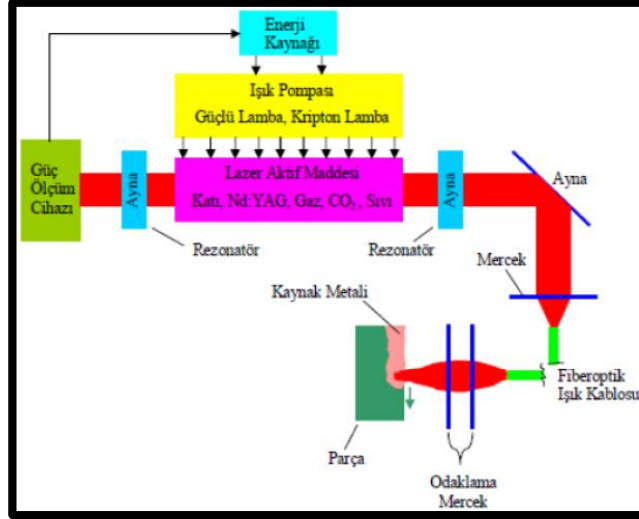
Lazer ışını maddenin dışardan harici bir uyarıcı ile uyarılarak foton yayınımlı sağlanarak elde edilmektedir (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Farklı enerji seviyelerine sahip atomlar aradaki enerji farkına eşit seviyede fotona sahiptirler. Aynı frekansta bir ışıkla enerjisi yükseltile atom sürekli o seviyede kalmaz. Yüksek enerji seviyesinden düşük seviyeye geçerken eşit seviyede fotonu çevreye bırakır. Lazer ışınının oluşma prensibi şematik olarak şekil 3.1'de gösterilmiştir (Uyguntürk, 2020).



Şekil 3.1. Lazer ışınının oluşma prensibi (Uyguntürk, 2020)

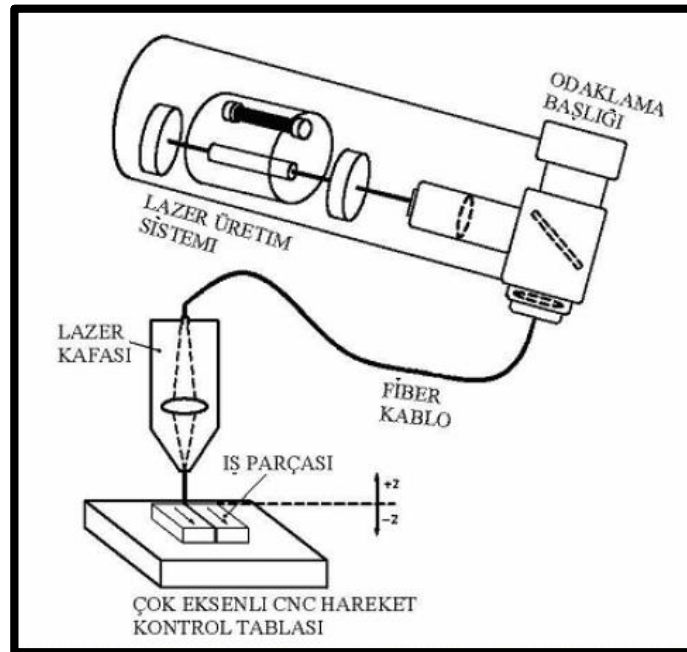
Yukarıda bahsedilen harici enerji genel olarak kimyasal, optik ve elektriksel olabilir. Etrafa saçılan fotonlar içerisinde buldukları kap ya da aynalardan yansyarak tekrarlı reaksiyonlarla bir ışık demeti oluşturur. Lazer ışınları kızılötesi dalga boylarından mor ötesi dalga boylarına kadar yayılım gösteren ışın demetleridir. Bu yüzden lazer sistemleri çok uzun mesafelerde enerji kaybı yaşanmadan iletilebilirler (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Birçok yoldan elde edilebilen lazer ışını elektromanyetik ışımayı güçlendiren ve morötesinden kızılötesi bölgeye kadarki dalga boylarında ışımaya verebilen bir aletten elde edilir (Akman, 2007). Lazer ışını üretebilmek için kullanılan üç farklı yöntem vardır. Bunlar katı hal lazerleri, gaz lazerleri ve diyot lazerleridir.

Lazer ışını çok yüksek enerjiye sahip ışınlardır ve çok uzak mesafelere sac kılı kalınlığında bir ışın demetiyle taşınabilir (Uyguntürk, 2020). Lazer ışını malzemenin üzerine özel ekipmanlar kullanılarak yansıtılır. Oluşturulan lazer ışını fiber optik kablolar ve yansıtıcı aynalar kullanılarak yönlendirilir ve iş parçasının üzerine odaklanır iletilebilirler (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Lazer ışını elde edebilmek için; ışığı güçlendiren kazanç ortamı, uyarıcı görevi gören güç kaynağı ve geri besleme sistemleri gereklidir (Akman, 2007). Şekil 3.2’de lazer ışın cihazı ve onun ekipmanlarını şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.2. Lazer ışın cihazı şematik gösterimi

Güçlendirilen ışık, atomları hareketlendirerek manyetik dalgalar şeklinde proton üretilmesi sağlanır (Aydın ve Karaağaç, 2010). Oluşturulan ışık demeti istenilen noktaya yönlendirilebilir. Doğru bir lazer kaynağı için ışının parça üzerine doğru yönlendirilmesi çok kritiktir. Işının doğru yansıtılması için kaynak dikişine göre konumu, odaklama düzlemi, ışının yoğunluğu, kaynağın hızı ve atmosfer şartları belirleyici rol oynar (Çelen, 2006). Şekil 3.3'te lazer ışınının yansıtılması gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Lazer ışınının parça üzerine yansıtılması

B. Lazer kaynağı

Lazer kaynağı aynı ya da farklı malzemeleri bir araya getiren ergitmeli kaynak yöntemidir (Uyguntürk, 2020). Lazer ışın kaynağı sanayide sağladığı birçok avantajla günümüzde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Yöntem birden fazla metalin birbiriyle kaynaklanmasına olanak sağlar. Yoğunlaştırılmış ısı kaynağı haline dönüştürülerek dar ve derin nüfuziyet gerektiren alanlara uygulanarak, yüksek hızda kaynak ihtiyacına cevap verebilmektedir. Yöntem genel olarak otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır. Araçların şasi, şanzıman, kapı ve gövde bölgelerindeki kaynak ihtiyaçlarına yüksek seviyede cevap verebilmektedir. Örnek olarak Audi markası otomotivlerinin tüm gövde kaynağını lazer yöntemini kullanarak yapmaktadır (Koçlular ve Püskülcü, 2009).

Lazer kaynak, yüksek oranda en-boy değişimi olacak şekilde ve çok dar alanlarda yapılabilir. Lazer kaynak ortamında hava şartları çeşitli şeffaf malzemeler kullanılarak kontrol edilebilir (Özcan ve diğerleri, 2004).

Lazer kaynakta kaliteyi doğrudan etkileyen parametreler, ekipman parametreleri ve iş parçası olarak ikiye ayrılır. Ekipman parametreleri kısmında lazerin dalga boyu, gücü, odak çapı, odak uzaklığı, çalışma modu, koruyucu gaz, hızı olarak verilebilir. İş parçası kısmında ise bileşim oranı, fiziksel durum, kalınlık, yüzey temizliği ön plana çıkar (Akman, 2007).

Lazer ile kaynak anında ışının emilimi çok kritiktir. Kullanılan lazer tipi, ışının güç yoğunluğu ve kaynak parçasının yüzey temizliği emilimi etkiler. Işının çapı düşüktür, araştırmalara göre 100 ile 1000 mikron arasında, bu yüzden malzeme üzerinde oluşabilecek olukları doldurma konusunda yeterli değildir (Koçlular ve Püskülcü, 2009; Çelen, 2006).

Kaynak anında iş parçası üzerinde başlangıç noktası hedef noktası olarak seçilir. Işın yüzeye ulaştığında ışık enerjisi ısı enerjisiye dönüşmüş olur ve hedef noktadan başlayarak metal ergitmeye başlar. Yönlendirilen ışınla birlikte hedef doğrultuda ergime devam eder. Kaynak işlemi yapmak için ısı enerjisi metalin buharlaşma sıcaklığının altında

olmalıdır. Fakat delik açma ya da kesme işlemlerinde sıcaklık metalin buharlaşma sıcaklığının üzerinde olmalıdır. Derine nüfuziyetin verimli olması için kalınlığın maksimum kalınlığının 8-10 mm olması önerilir (Koçlular ve Püskülcü, 2009; Özcan ve diğerleri, 2004)

Kaynak edilecek malzemeye enerji aktarımı aynalardan yansiyarak uygun dalga boyuna gelen lazer ışınının odaklanmasıyla olur. Eriyip buharlaşmaya başlayan metal koruyucu gaz ile birleşerek bir plazma oluşturur. Bu plazma enerjinin malzemeye geçerek erimeye devam etmesini sağlar. Yüksek sıcaklık ve basınç farklılığı sebebiyle anahtar deliği formu oluşur. İş parçası hareketi ve ısınan buharın basıncıyla ergiyik kısım malzeme yüzeyine yükselmeye başlar. Bu yükselme ile çekme kuvveti, viskozite ve yüzey gerilmeleri ile kaynaklı genleşmeler de engellenmiş olur (Çalığülü ve Taşkın, 2009). Kaynak esnasında uygun ergiyik halin oluşması için iş parçasının ısıyı yutması gerekir. Maksimum ısı yutma ışının malzeme üzerine 90°C'lik açıyla gelmesi halinde oluşur (Akman, 2007). Malzeme hareket ettikçe geride kalan kısım soğur ve katılaştır böylece kaynak dikişi oluşmuş olur. Oluşan kaynağın kalitesinde malzeme mekanik özellikleri çok büyük rol oynar. Malzemenin ışını yansıtması ya da yutması ve ısı iletim katsayısı kaynak dikişi kalitesini doğrudan etkiler. Kaynak kalitesini etkileyen diğer unsur ise lazer kaynak parametreleridir (Çalığülü ve Taşkın, 2009). Deneysel çalışmalar ve sonuç kısmında detayları verilecek analizlerle kaynak dikişine etki eden parametrelerin başında kaynak gücü gelmektedir.

Kaynak dikişinin kalitesi kullanılan lazerin gücü, atım süresi, şekli, frekansı, odak genişliği, kaynak hızı, koruyucu gaz olmak üzere birçok parametreden etkilenir. Ayrıca nüfuziyet derinliği, kaynama başlama süresi, dikiş genişliği de kaliteli bir kaynak için doğru kombine edilmesi gereken parametrelerdir. Kaynak kalitesini etkileyen parametreler Şekil 3.4'te verilmiştir (Aydın ve Karaağaç, 2010)

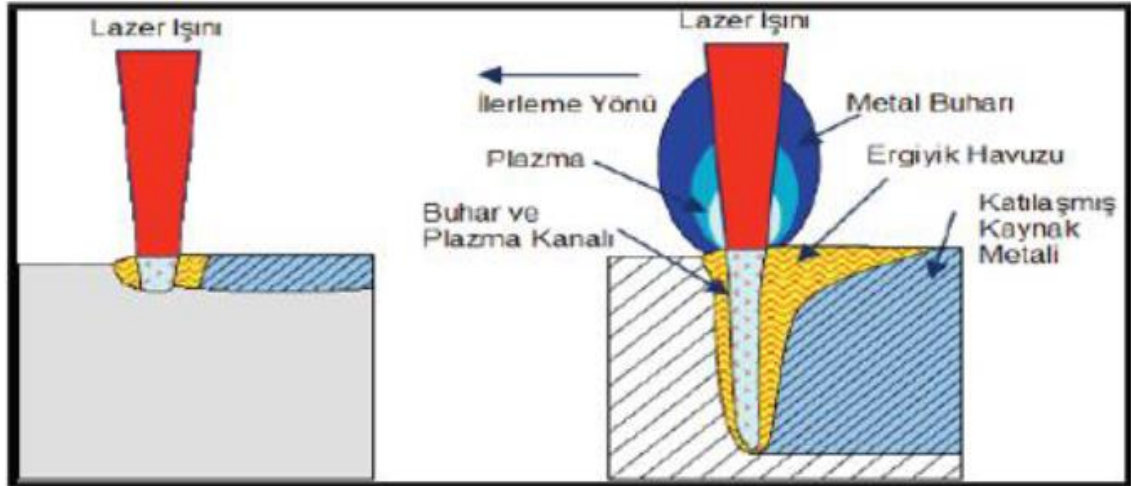


Şekil 3.4. Lazer kaynak kalitesini etkileyen parametreler (Aydın ve Karaağaç, 2010)

Koruyucu gaz kullanımı lazer kaynak yöntemi için gerekli şartlardan biridir. Gazın seçiminde, malzeme ve gazın metalürjik etkileşimi dikkate alınmalıdır. En önemli fonksiyonlarından biri kaynak bölgesini korumanın yanında plazma oluşumunu durdurmaktır. Plazma oluşumu lazer ışın etkisini düşürücü etki yapar. Gazın debisi genel olarak 10 ile 40 litre/dak arasında değişir. Ayarlanan tüm bu parametrelerin ne kadar sıklıkla tekrarlanacağı darbe frekansıyla ölçülür. Birim zamanda tekrarlama sıklığının artması etkinliği yükseltecektir. Yüksek güç kullanımı darbe frekansına da bağlıdır. Darbeler arası mesafe ve darbe süresi yüksek kaynak hızlarına çıkılmasına olanak sağlar. Darbelerin üst üste binmesi kaynak dikişinin formunun korunmasında önemli rol oynar (Çelen, 2006).

C. Lazer ile kaynak yöntemleri

Günümüz teknolojik şartları göz önüne alındığında yöntem iki temel şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar iletimle ve derinlemesine kaynak yöntemleridir (Akman, 2007). Lazer kaynağın uygulama alanının genişliği birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Ara yüzey reaksiyonlarının sınırlı olması en önemli avantajıdır. Kaynak bağlantı bölgesinin dayanımı göz önüne alındığında en iyi birleştirme yöntemidir (Akkurt, Aydın ve Ovalı, 2012). Şekil 3.5’de iki yöntemin temsili gösterimi verilmiştir.

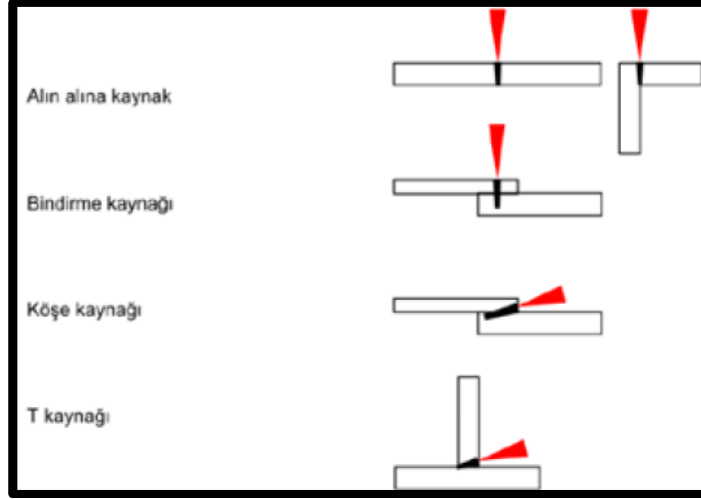


Şekil 3.5. İletim ve derinlemesine kaynak yöntemi

İki yöntem arasındaki temel fark iletimle kaynakta kaynak havuzu kapalı derinlemesine kaynakta açıktır. Ayrıca iletimle kaynak genel olarak ince sacların kaynatılmasında kullanılırken, derinlemesine kaynak kalın sacların birleştirilmesinde kullanılır (Akman, 2007)

D. Lazer kaynak ile birleştirme yöntemleri

Doğru ve sağlam bir birleştirme için öncelikle sağlanması gereken şartlar malzeme kaynak yüzeylerinin birbirine tam teması, lazer ışınının tüm yüzeye eşit olarak uygulanması ve parçaların doğru yerleştirilmesidir (Çelen, 2006). Lazer kaynakta kullanılan birleştirme yöntemleri genel olarak dört grupta toplanır. Bunlar alın altına, bindirme, T ve köşe kaynaktır (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Birleştirme yöntemlerinin görselleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Lazer kaynak ile birleştirme yöntemleri (Koçlular ve Püskülcü, 2009)

- **Alın alına kaynak**

En kolay birleştirme yöntemidir. İki malzeme arasında bırakılacak mesafe levha kalınlığının %0.05'i kadar olmalıdır. Farklı kalınlıklardaki malzemelerin kaynağında ışının büyük bir kısmı kalın sacın üzerine odaklanmalıdır. Malzemelerin kaynak anında sabitlenmesi kritiktir (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Işın her iki parçaya eşit düşürülmelidir. Işın sapma oranı $\pm\%10'$ dan fazla olmamalıdır. Kaynak esnasında oluşan buharın dışarı atılması için en uygun yöntemdir (Çelen, 2006).

- **Bindirme kaynağı**

Kaynak dikişi pozisyonunun çok önemli olmadığı durumlarda kullanılır. Yanlış hizalamanın olduğu durumlarda bile iyi sonuçlar alınabilir. Çoklu birleştirmelerde de iyi sonuçlar alınır. İki farklı malzemenin kaynağı esnasında ince malzemenin kalın malzeme üzerinde olması kritik durumdur (Koçlular ve Püskülcü, 2009). Eğer uygun sabitleme yöntemi kullanılırsa çoklu sacların kaynağında dahi başarılı sonuçlar alınır.

- **Köşe kaynağı**

Kritik parametrelerin doğru seçildiği durumlarda istenen derinliklerde kaynak yapma kabiliyetine sahiptir. Malzemelerin iyi sabitlendiği ve boşluk toleransının en ince sac kalınlığının %0.05'i kadar ayarlandığı durumda yüksek performans gösterir.

Parametrelerin doğru ayarlanamaması durumunda yanıklar, nüfuziyet derinliğinde problemler ve dayanım yetersizlikleri ortaya çıkar (Çelen, 2006).

- **T kaynak**

Herhangi bir köşe durumu olmadığında ışın 10 derecelik açılarla düşürülmelidir. Odak noktasının ayarlanması kritik olduğundan yanlış ayarlama durumlarında nüfuziyet etkilenir. Boşluk toleransının en ince sac kalınlığının %0.05'i kadar ayarlandığı durumda yüksek performans gösterir. Ağır malzemelerin kaynağında tercih edilebilen bir yöntemdir (Koçular ve Püskülcü, 2009). Metaller genel olarak %20-30 arasında yansıtıcılığa sahiptir (Akman, 2007). İyi bir dayanım dikiş boyunca tüm bileşenlerin ergitilmesiyle yakalanır (Çelen, 2006).

3.2. Deney tasarımı

Deney, genel anlamda bir veya daha fazla sayıda belirli bir konuda sınırlandırılmış soruları yanıtlamayı hedefleyen işlem şekli olarak tanımlanır. Deney tasarımı, belirlenmiş bir tasarım matrisine göre süreç üzerinde etkili olması muhtemel süreç değişkenleri değerlerinin sistematik olarak değiştirilerek, bir deney veya bir takım sıralı deneylerin gerçekleştirilmesi yöntemidir (Kasap, 2005).

Deney tasarımında amaç, herhangi bir konu üzerinde düşünülen problem ile ilgili en fazla sayıda bilgiyi mümkün olduğunca zaman, para ve deney malzemelerini en ekonomik şekilde kullanarak sağlamak ve kalite karakteristiğini etkileyen en önemli değişkenleri bulmaktır. Belirlenen hedeften olabilecek sapma, kalite kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle ürün; ürün ve süreç tasarımı sırasında en uygun şekilde tasarlanmalıdır. Bu iki aşamanın en önemli adımı şüphesiz parametre tasarımıdır.

Parametre tasarımı aşamasında, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin ürünün performansına olan etkilerini belirlemek için kullanılan en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Burada amaç, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerini, kontrol edilemeyen faktörlerin ürün üzerine olan etkilerini en aza indirecek şekilde süreci ayarlamaktır. Bu çeşit ürün ya da süreç tasarımı ile, sağlam (robust) ürün elde edilir. Deney tasarımı, çevrim dışı kalite kontrolün en etkin aracıdır (Koç 2003).

3.2.1. Kalite geliştirmede deney tasarımı

Deney tasarımı, üretim prosesi performansını arttırmak ya da dış kaynaklı değişkenlere karşı duyarsız bir üretim prosesi elde etmek için yeni bir üretim prosesi geliştirmekte ya da üretim prosesindeki sorunlara çözüm bulmakta kullanılır.

Ürün veya proses geliştirme;

1. Sistem tasarımı,
2. Parametre tasarımı,
3. Tolerans tasarımı

olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir. Sistem tasarımı, ilgilenilen ürünün veya prosesin temel fonksiyonel prototip modelini üretmek için mühendislik bilgilerinin kullanımını gerektirir ve birtakım yenilikleri içerir. Parametre tasarımında ise, klasik yaklaşımlardan farklı olarak, kontrol edilebilen faktörlerin iç (inner), kontrol edilemeyen faktörlerin de dış (outer) diziyeye yerleştirilerek incelendiği Şekil 3.7 'deki deney tasarım modelinin kullanılması önerilmektedir (Çelik, 1993).

| Deney No | İç Dizi | | | | | | Dış Dizi | | | | | | Performans İstatistiği |
|----------|---------|---|---|---|---|---|----------|---|---|---|---|---|------------------------|
| | A | B | C | . | . | K | U | X | . | . | . | . | |
| 1 | - | - | - | . | . | . | - | - | . | . | . | . | + |
| 2 | - | - | + | . | . | . | - | - | . | . | . | . | + |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| M | + | + | + | . | . | . | - | + | . | . | . | . | - |

Şekil 3.7. Taguchi deney tasarım modeli (Çelik, 1993).

Çok yüksek maliyet gerektirmeleri nedeniyle kontrol edilemeyen faktörlerin olumsuz etkilerini belirleyip ortadan kaldırmak yerine, bunların olumsuz etkilerini ortadan kaldıracak veya azaltacak kontrol edilebilen faktörlerin değerleri araştırılır. Kontrol edilebilen faktörler de performans değerine etkileri bakımından üç grupta sınıflandırılabilir;

1. Kontrol faktörleri,
2. Düzeltme faktörleri,
3. Etkisiz faktörler

Deneysel sonuçta elde edilen performans değerleri ve performans istatistiği (Sinyal/Gürültü (S/N) oranı: signal to noise ratio) bilgileri analiz edilerek bu sınıflama yapıldıktan sonra; kontrol faktörleri yardımıyla performans değerindeki değişkenlik azaltılır, düzeltme faktörleri yardımıyla da ortalama hedeflenen değerine getirilir. Etkisiz faktörlerin de en iyi ve en ekonomik değerleri seçilir. Bilinen eniyileme yöntemleriyle benzerlik kurulacak olursa, açıklanan iki aşamalı çözüm yaklaşımının tasarım eniyileme problemini kısıtsız eniyileme problemine dönüştürdüğü söylenebilir. Bir eniyileme prosesi olan parametre tasarımı sonunda değişkenlik yeterince azaltılamazsa tolerans tasarımı yapılmalıdır. Basit olarak tolerans tasarımı, performans değişkenliği üzerinde etkili olan bazı faktörlerin değişkenliğini ek harcamalarla azaltarak (kalitesini yükselterek) performans değerindeki değişkenliği azaltmaktır.

3.2.2. Deney tasarımının önemi ve aşamaları

Tasarım bugün sadece estetik açıdan ele alınan ve sadece ürüne ait bir kavram olmaktan çıkmış ve müşteri istekleri doğrultusunda gerek fonksiyonel gerekse estetik açıdan ürüne en iyi özellikleri sağlayacak ürün ve üretim sisteminin beraber tanımlandığı bir kavram haline gelmiştir. Tasarım kavramının bu şekilde estetik tasarımdan mühendislik tasarımına geçişi, tasarımda mühendislik bilgilerinin öncelikli yer tuttuğunu göstermektedir. "Kalite ürünle birlikte tasarlanmalıdır" anlayışı ile var olan veya yeni geliştirilen ürün/üretim sistemlerinde müşteri isteklerini karşılayacak ürünleri üretebilmek için gerekli ürün kalite karakteristiklerine ulaşmak için sistemli çalışmak şarttır (Mitra, 1993).

Ürün veya üretim sisteminde belirlenen problemlerin çözümüne yönelik değişik kalite geliştirme çalışmaları yapılabilir ancak bu çalışmalar belirli bir sistematik içinde kalite araç ve tekniklerini kullanılmadan gerçekleştirilirse, istenen amaca ulaşmak oldukça uzun zaman alabilir. Bu yüzden üründe veya üretim sisteminde belirlenen problemlerin çözümüne yönelik olarak birtakım araştırmalar yapılır. Bu araştırmalarda öngörülen deneylerin anlaşılır ve üzerinde yorum yapılabilir olması için uzun süren ön çalışmalarla alt yapısı hazırlanmalı ve iyi tasarlanmalıdır. Ürünün ve/veya üretim sisteminin performansını etkileyen faktörlerin ve seviyelerinin belirlenmesi ile başlayan bu ön hazırlık safhasında beyin fırtınası, balık kılıcı ve hata ağacı gibi kalite araçlarının kullanılması gereklidir.

Yapılan ön hazırlıklar genelde deneyin oluşum mekanizmasına da yansiyarak değişik deneysel tasarım yöntemlerinin oluşmasına neden olur. Bu deneysel tasarım yöntemleri temelde aynı amaca hizmet etmekle birlikte sonuca en kısa sürede ve maksimum kazançla ulaşabilmek için gerek ön çalışma gerekse deney matrisinin oluşturulmasında farklı yollar izlemektedir.

Deneysel tasarım yöntemlerinin amacı incelenen sistemdeki değişimlerin nedenlerini araştırmaya ve bu değişimleri ortadan kaldırmaya veya değişimlere karşı sistemi güçlendirmeye yönelik çalışmalar yapmaktır. Deneysel tasarım yöntemlerinde sistemi etkileyen tüm faktörler ele alındığı için normalde sistemdeki bir faktörü düzeltmekle elde edilebilecek fayda yerine, birkaç faktörde küçük değişiklikler yaparak toplamda daha çok fayda sağlanabilir. Müşteri memnuniyetsizliği ve/veya kalitenin zayıflığı nedeniyle oluşan ekonomik kaybı ortadan kaldırmak için, incelenen sistemdeki değişimleri azaltmak gereklidir.

Kalite yetersizliğinin neden olduğu bu kayıp, satış fiyatının %10-25 ini doğrudan harcar. Bunu aşmanın yolu ürünün ve prosesin doğru tasarımından geçmektedir (Bhote, 1991).

Yukarıda belirtildiği gibi üretilen ürün/proses de oluşacak değişimler, hem müşteri memnuniyetsizliğine yol açtığı için, hem de düşük kalitenin kaybettirdiği pazar payının

etkisi ile ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Değişimin temelde altı kaynağı vardır. Bunlar aşağıdaki maddelerle ifade edilebilir (Krottmaier, 1993);

- a. Zayıf yönetim
- b. Yetersiz ürün/proses spesifikasyonları
- c. Zayıf bileşen spesifikasyonları
- d. Yetersiz kalite sistemi
- e. Yetersiz tedarikçi malzemeleri
- f. Operatör hatası

Deneysel tasarım yöntemlerinde problem ister yeni ürün veya üretim sisteminin tasarlanması, ister var olanların geliştirilmesine yönelik çalışmalarda ortak bir dilin kullanılması hem deney tasarımını hem de istatistiki analizleri kolaylaştırmaktadır. Ayrıca bazı deneysel tasarımlarda, deneyi tasarlayan ve sonuçların analizini gerçekleştirenlerin farklı kişiler olması bu durumu zorunlu hale getirmektedir.

Gerek bilinçsiz olarak tasarlanmış deneylerde ve gerekse sistematik deney tasarımlarında kullanılan terimlerin anlaşılabilirliğinin sağlanması, deney tasarımlarının verimliliğini artırmaktadır. Araştırma geliştirme çalışmalarında önemli olan sistematik ve düzenli olarak çalışmaktır. Bu yüzden her şeyden önce deneylerin hangi değişkenlerle ve hangi şartlarda yapılacağı ve sonuçta hangi değişkenin ölçülmesinin gerekli olduğunu bilmek gerekmektedir.

Deneysel tasarım yöntemlerinde daha önce de belirtildiği gibi deney matrisleri farklı olmasına rağmen kullanılan ortak dil genelde aynıdır. Ancak tasarımcıların bazı kavramlar üzerinde daha hassasiyetle durmaları deney oluşum felsefesinde temel ayrımları ortaya çıkarmaktadır.

3.3. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi 1940'lı yıllarda Henry ve Hrennikoff tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metodudur (Yörür, 2012). Daha sonraki dönemlerde bu metot 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından karmaşık sınır şartlarında (sıcaklık, yük, sabitleme)

kullanılmak üzere mühendislik problemlerinin çözülmesinde kullanılmaya başlanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, uygulanan yükler altında sistemin potansiyel enerjisini en aza indirerek kuvvetlere, deformasyonlara vb. çözüm bulmak için kullanılan değişken bir tekniktir (Bahreyni, 2008). Makine, inşaat ve havacılık mühendisliği gibi birçok mühendislik alanında karşılaşılan elastikiyet, yapısal analiz, termal analizler, akış analizleri ve elektromanyetik gibi farklı problemlerin çözümünde halen kullanılmaktadır (Cen, 2018)

Mühendislik problemlerinin çözümlenmesinde iki yöntem uygulanmaktadır.

1. Sonlu Farklar Yöntemi (Basit problemlerin çözümünde)
2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Karmaşık problemlerin çözümünde)

Sonlu elemanlar yönteminin sonlu farklar yönteminden farkı lineer denklemler yerine integral formülasyonları kullanmasıdır. Her bir element için bir fonksiyon tasarlanır, daha sonra bu elementlerin çözümleri birleştirilerek tüm sistemin çözümüne ulaşılmış olur. Sonlu elemanlar yöntemi ile;

- Gerilme analizleri
- Termal Analizler
- Dinamik Analizler
- Titreşim Analizleri
- Burkulma Analizleri
- Deformasyon Analizleri gerçekleştirilir (Ovalı ve Esen, 2018).

Sonlu elemanlar yöntemi kısmi diferansiyel (veya integral) denklem sistemlerinin kurulması ve çözülmesi için kullanılan matematiksel bir tekniktir. Mühendislikte sonlu elemanlar metodu, kapalı form denklemleri kullanılarak davranışı tahmin edilemeyen bir sistemi küçük parçalara ya da çözümünü bilinen ya da yaklaşabilen elemanlara bölmek için kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemi, sistemin geometrisinin alanlara bölünerek düğüm adı verilen birtakım noktalarla tanımlanmasını gerektirir. Her bir düğüm, sisteme girişlere bağlı olarak değişebilen (sıcaklık, yer değiştirme vb.) bir serbestlik derecelerine sahiptir.

Bu düğümler, serbestlik derecelerinin matematiksel etkileşimlerini tanımlayan elementlerle bağlanır. Süreklilik elemanları gibi diğer elemanlar için, serbestlik dereceleri arasındaki etkileşim, eleman üzerinde sayısal bir entegrasyon ile tahmin edilir. Modeldeki tüm bireysel elemanlar, analiz edilecek sistemi temsil eden bir denklem seti oluşturmak için birleştirilir. Son olarak, bu denklemler sistemin davranışı hakkında faydalı bilgiler ortaya çıkarmak için çözülür.

Düzenli bir çokgenin kenar sayısı sonsuzluğa yaklaştığında mükemmel bir çembere ulaşırken, sonlu elemanlar modeli elemanların sayısı sonsuzlaştıkça sistem mükemmel bir seviyeye yaklaşır. Sistemi sonsuz sayıda elemana bölmek mümkün olmadığından, sonlu elemanlar metodu çözmek istediğiniz problemin yaklaşımına göre çözüm üretmektedir. Eleman sayısının artması mühendislik analizinin çözümü için iyi olur. Bununla birlikte, bu yaklaşım çözülecek olan denklem sayısını, el ile çözmeden daha pratik ve arzu edilen noktadan öteye taşımamasını sağlayabilir. Bu nedenle, sonlu elemanlar yöntemi, bu büyük denklem kümelerinin çözümlerini sizin için ayarlayan, çözen ve görselleştiren bilgisayar programları ile ilişkilidir (Thomson, J. ve Thomson K.M., 2017).

Sonlu Elemanlar Metodu kendine has birçok avantaja sahiptir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- Karmaşık yapıdaki geometrilerin incelenmesine olanak sağlar ve analiz türüne göre değişik sonlu elemanlar kullanılabilir.
- Numune geometrisinde basitleştirme yapma ihtiyacı duyulmaz,
- İstenilen hassasiyette analizleri gerçekleştirerek doğru sonuçlar alınabilir.
- Programa sınır koşulları girilip uygulanacak yönteme göre denklemler uygulanarak basit satır ve sütun işlemleriyle sisteme tanımlanabilir.
- Aynı geometri üzerinde birçok matematiksel yöntem uygulanarak çok sayıda problemi çözebilir.
- Matematiksel temelleri ile yöntemin sonuçları fiziksel anlam katmaktadır.
- Sektörde kullanılan birçok sonlu elemanlar yazılımı mevcuttur. (ANSYS, ALGOR, ABAQUS, NASTRAN, SAP 2000, COSMOS vb. gibi)

Sonlu elemanlar yönteminin kendi sınırlamaları vardır. Aşağıda listelenmiştir;

- Modele uygulanan yöntemin simülasyonun doğruluğu parametreler ve uygulanan yöntemin doğruluğuna bağlıdır.
- Doğru sonuçların elde edilmesi kurulan ağ yapısına (mesh) bağlıdır. Bu ağ yapısının oluşumu iyi bir deneyim gerektirmektedir.
- Sonlu elemanlar yöntemi ile modelin sonuçları iyi yorumlanmalı ve fiziksel yöntemle incelenmelidir. Simülasyon sonuçları daha önceden öngörülerek ona göre test edilmeli ve yorumlanmalıdır (Moaveni ve Ayhan, 2015).

3.3.1. Ansys programı

Sonlu elemanlar yöntemlerinden biri olarak bilinen ANSYS (ANalysis SYStem) 1970 yılında Pittsburgh'daki Westinghouse Nükleer Laboratuvarlarında çalışan Dr. John Swanson tarafından kuruldu, rotordaki çalışmaları elde etmek için nükleer reaktörden sorumluydu ve bilgisayar kodları geliştirdi. Daha sonra bazı meslektaşlarının yardımı ile kodunu geliştirmeye devam etmek için çalışmalarından ayrıldı ve 2003'ten bu yana CFX-4 gibi önemli yazılımları elde etmiştir.

ANSYS yazılımı CAD sistemleri ve tasarım modelleyici ile birlikte kullanılan yapısal, termal, akışkanlar mekaniği, mukavemet, titreşim ve elektromanyetik analizler yapmak için kullanılan bir sonlu elemanlar yöntemi programıdır. Geometri oluşturma ve en uygun şekle sokma, mevcut geometriyi ekleme sonlu elemanlar modelini ayarlama, çözme ve sonuçları incelemeye odaklanır. Bununla birlikte modellerin zayıf noktaları bulunarak ömür hesapları gerçekleştirilerek parametrelerin ön görülmesine yardımcı olur. ANSYS programında gerilme, termal, dinamik, titreşim, burkulma, deformasyon simülasyonları yapılırken elektromanyetik hesaplar, mekanizma hesapları, ısı transferi hesapları da yapılabilir (Yörür, 2012; Pençe, 2007).

3.3.2. Ansys genel işlem basamakları

Sonlu elemanlar yöntemi metodunda problemlerin doğru tanımlanması matematiksel modelin çözümünden daha büyük önem taşımaktadır. İşlem basamakları genel olarak aşağıdaki sıralama şeklindedir;

1. Yapılacak analiz türünün belirlenmesi
2. Modelin tasarlanması
3. Meshleme
4. Meshleme özelliklerinin tanımlanması
5. Matris formüllerinin ve denklemlerinin hazırlanması
6. Düğüm noktalarındaki değişkenlerinin hesaplanması
7. Simülasyon sonuçlarının çözümlenmesi (Ovalı ve Esen, 2018)

ANSYS yazılımında CAD yazılımları hem dışarıdan hem de kendi bünyesindeki “preprocessing” ile meshleme, geometri oluşumu ve sınır şartları tanımlanarak analiz sonuçlarını sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilir. ANSYS analizi üç kademede gerçekleşir;

1.Sınır şartlarının tanımlanması: Bu bölümde CAD programı ile dışarıdan alınarak ya da program içerisinde yapılan işlemdir. Modelin mekanik özelliklerinin (Elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk, genleşme katsayısı, özgül ısı, gerilim-gerinim oranı vb.) tanımlanması sağlanır. Daha sonra satırların, hacimlerin, alanların meshlemesi yapılır. Modelin geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak eleman türü belirlenir. Element türünün belirlenmesinde ise doğrusal hareket ve dönme hareketine bağlı olan serbestlik derecesi, deformasyon biçimi ve şekline göre tanımlama yapılır.

2. Sınır şartları ve çözümlenme: Bu bölümde yapılması istenen modele uygulanacak yükler, basınçlar veya sınır şartları girilerek çözümü yapılır. Ayrıca bu bölümler daha önce de preprocessing (ön işleme) bölümünde de önceden tanımlanabilir. Sonlu elemanlar modellerinin doğru olarak tanımlanmasında diğer bir kilit noktada sınır şartlarının doğru olarak tanımlanmasıdır. Modelde tam ve eksiksiz parametrelerin

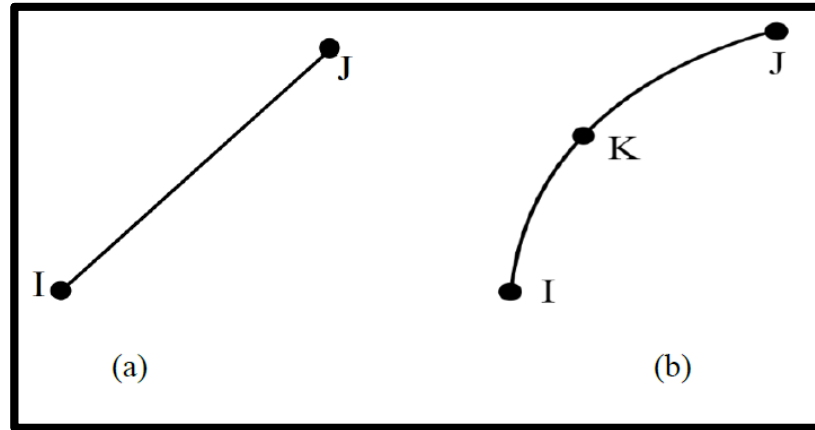
tanımlanması ve çözümlene süresinin en aza indirilmesi için tam olarak tanımlanması gerekmektedir.

3. Sonuçların değerlendirilmesi: İstenilen analizlerin belirtilen parametrelere göre sonuçlandığı bölümdür. Bu bölüm belirli yükler altında sistem davranışının modellenmesidir. Her bir düğüm noktasında meydana gelen deformasyon ve yer değiştirme hareketi gözlenebilir. Modelin analiz çıktılarına göre istenilen diyagramlar (gerilim-gerinim diyagramı, akma gerilimleri, etkin gerilme vb.) elde edilir.

3.3.3. ANSYS analizlerinde kullanılan elementler

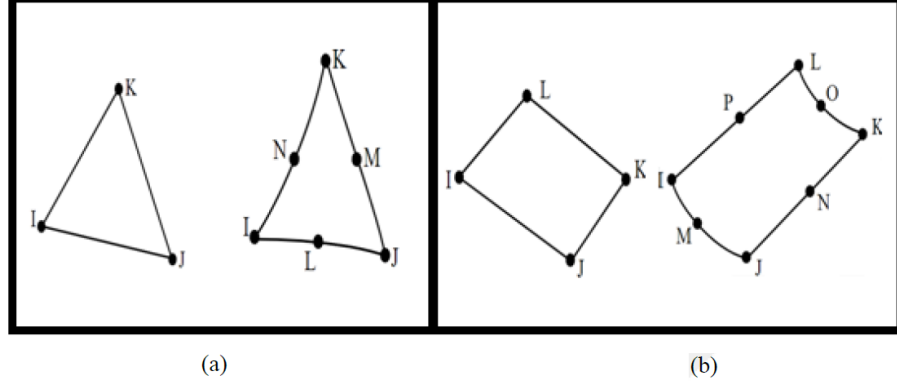
ANSYS genel işlem basamaklarında bahsedilen modellerde modellerin küçük alanlara bölünmesi büyük önem taşımaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan elementler modelin matematiksel bir parçasıdır. Bu nedenle bir noddan diğer noda nasıl bir interpolasyon ile aktarıldığını belirler. Element türleri üç sınıfta incelenir.

1. Tek boyutlu elementler: Tek boyutlu elementler en az iki düğümü olan çizgisel veya eğrisel elementlerden oluşan problemlerin çözümünde kullanılır. Modelin hassasiyetini arttırmak için elementlerin arasına düğüm noktaları atılabilir.



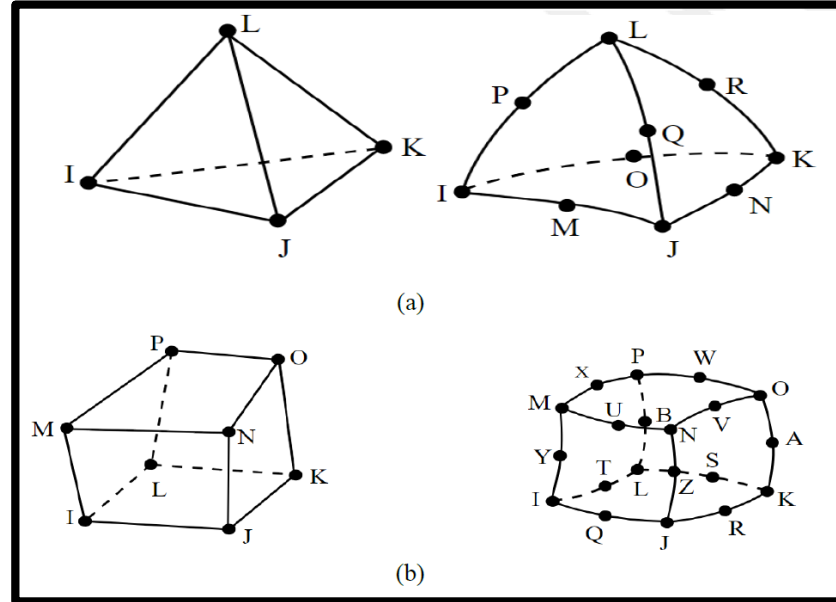
Şekil 3.8. Tek boyutlu elementler (a) Lineer tek boyutlu element (b) Eğrisel tek boyutlu element (Ovalı ve Esen, 2018)

2. İki boyutlu elementler: İki boyutlu analizlerde iki boyutlu elemanlar kullanılır. En az üç düğüm noktası olan bu elementler üçgen veya dörtgen element şeklini alabilirler.



Şekil 3.9. İki boyutlu elementler (a) Üçgen şeklindeki eleman tipi (b) Dörtgen şeklindeki eleman tipi (Ovalı ve Esen, 2018)

3. Üç boyutlu elementler: Hacimlerin sonlu elemanlar modeli oluşturmasında üç boyutlu elementler kullanılır. Dikdörtgenler prizması, üçgen prizmalar analizlerin çözülmesinde kullanılan eleman türleridir (Ovalı ve Esen, 2018; Yaldıran, 2018).



Şekil 3.10. Üç boyutlu elementler (a) Dört yüzlü eleman tipi (b) Düzensiz altı yüzlü eleman tipi (Ovalı ve Esen, 2018)

3.3.4. ANSYS’de meshleme

Sonlu elemanlar yöntemlerinde modelleri çok küçük alanlara bölerek ve boyutları belirlenmiş elementlerle çözümlene işlemine meshleme işlemi denir. Meshleme işlemi modelin geometrisine göre değişkenlik gösterir. Program çözümlenmesinde kaba ve hassas meshleme seçenekleri ile modelin daha doğru sonuçlar alınması sağlanılır. Ancak gereğinden fazla meshleme çözümlene süresini artırır. Keskin köşelerde, temas yüzeylerinde, çatlak başlangıçlarında, yük aktarım bölgelerinde bölgesel meshleme işlemleri yapılarak hata oranı azaltılır.

3.3.5 Statik analizler

Bu analiz prosedürüne göre kurulmuş sistemlerde düğüm noktalarında herhangi bir serbestlik derecesi, sıcaklık deformasyon, tanımlanmış olabilir. Ancak sönümlenme ve atalet etkileri dikkate alınmaz.

Yapısal sistemlerin tamamı için denge denklemleri;

$$[K]\{u\} = \{F\} \text{ ya da } [K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} \quad (3.1)(3.2)$$

ile oluşturulur. Burada;

$[K]$ = Genel rijitlik matrisini

$\{u\}$ = Nodal deplasman vektörünü

$\{F^a\}$ = Uygulanan toplam yük vektörünü

$\{F^r\}$ = Reaksiyon yük vektörünü ifade etmektedir.

Uygulanan toplam yük vektörünün bileşenlerinden biri ısı yük vektörüdür. Statik ısı analizlerinde ise aynı eşitlik geçerlidir. Bu analizlerde eşitliğin bileşenleri;

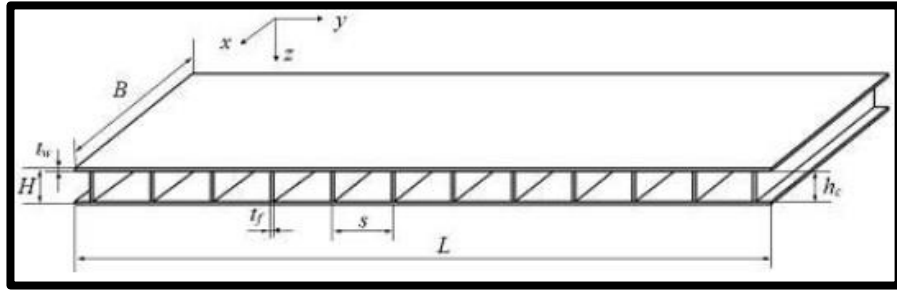
$[K]$ = Isı iletim katsayıları matrisi

$\{u\}$ = Nodal sıcaklık değerleri vektörü

$\{F\}$ = Isı akısı , akışı , konveksiyon gibi dış etkenlerin toplam vektörü şeklinde değişir.

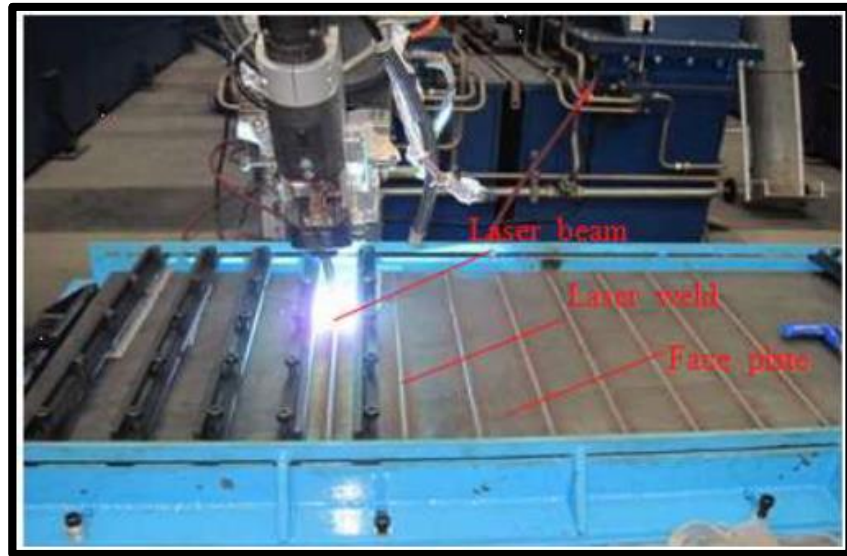
3.4 Sandviç panel

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi sandviç yapı t_f et kalınlığına sahip karşılıklı iki levha arasında t_w kalınlığında sahip dikey perdelerden oluşmaktadır. Bununla birlikte şekilde görüldüğü gibi L levhanın boyunu B ise levha genişliğini göstermektedir. Dikey perdeler arası mesafe s ve dikey perde yüksekliği h_c olarak adlandırılmıştır. Malzeme olarak paslanmaz çelik kullanılmış olup akma değeri 250MPa, kopma değeri ise 460 MPa’dır (Jiang ve diğerleri, 2017).



Şekil 3.11. Sandviç yapının geometrik karakteristikleri (Jiang ve diğerleri, 2017)

Dikey perde ve levhalar lazer kaynakla birleştirilmiştir. Kaynak gücü 12kW ve kaynak hızı 1000mm/dk olarak belirlenmiştir. Koruyucu gaz olarak karbondioksit kullanılmıştır (Jiang ve diğerleri, 2017).



Şekil 3.12. Lazer kaynak ile sandviç yapının birleştirilmesi

Çizelge 3.1’de test edilen levhanın geometrik karakteristikleri görülmektedir. Bu ölçülere göre imal edilen sandviç yapının üç nokta büküm testi sonuçları incelenecektir (Jiang ve diğerleri, 2017).

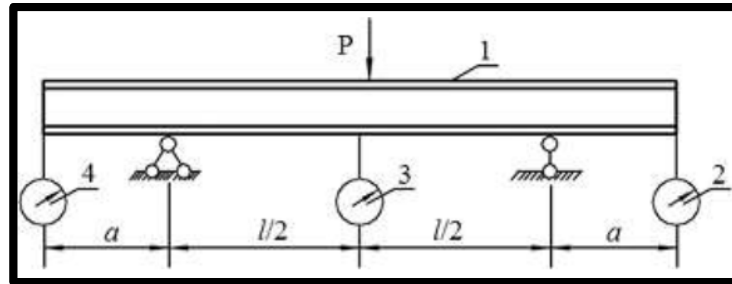
Çizelge 3.1. Sandviç yapının geometrik karakteristiklerinin ölçüleri

| Parametreler | L/mm | B/mm | H/mm | h _c /mm | s/mm | t _w /mm | t _f /mm |
|--------------|------|------|------|--------------------|------|--------------------|--------------------|
| Test 1,2,3 | 1200 | 500 | 60 | 50 | 100 | 2,5 | 5 |

3.4.1. Test metodu ve ekipmanları

A. Üç nokta büküm testi

Genel olarak bir levhanın eğilme dayanımı ve kesme dayanımının belirlenmesi için üç nokta büküm testi ve dört nokta büküm testi olmak üzere iki farklı metot kullanılmaktadır. Şekil 3.13’te gösterildiği gibi, üç noktalı eğme testi olarak adlandırılan bu yöntemin kesme sertliği ile birlikte eğilme sertliğini belirlemek için kullanılabileceği dikkate değerdir (Jiang ve diğerleri, 2017).



Şekil 3.13. Üç nokta büküm testinin uygulanması (Jiang ve diğerleri, 2017)

- 1,- Test numunesi
- 2,- Sağ taraf yer değiştirme sensörü
- 3,- Orta bölge yer değiştirme sensörü
- 4,- Sol taraf yer değiştirme sensörü

P – Yük sensörü

l – Aşık aralığı

a – Sağ ve sol taraf yer değiştirme sensörü ile mafsal arasındaki mesafe

Elastik segmentte yükleme sensöründen ölçülen yük değerine göre sol taraf yer değiştirme sensörü tarafından tespit edilen değer sol deplasman değeri, sağ taraf yer değiştirme sensörü tarafından tespit edilen değer sağ deplasman değeri ve orta bölge yer değiştirme sensörü tarafından tespit edilen ise orta deplasman değeri belirlenir. Formülasyon aşağıdaki gibidir (Jiang ve diğerleri, 2017).

$$D_y = \frac{\Delta P \cdot l^3}{48 \cdot B \cdot \omega_b} \quad (3.3)$$

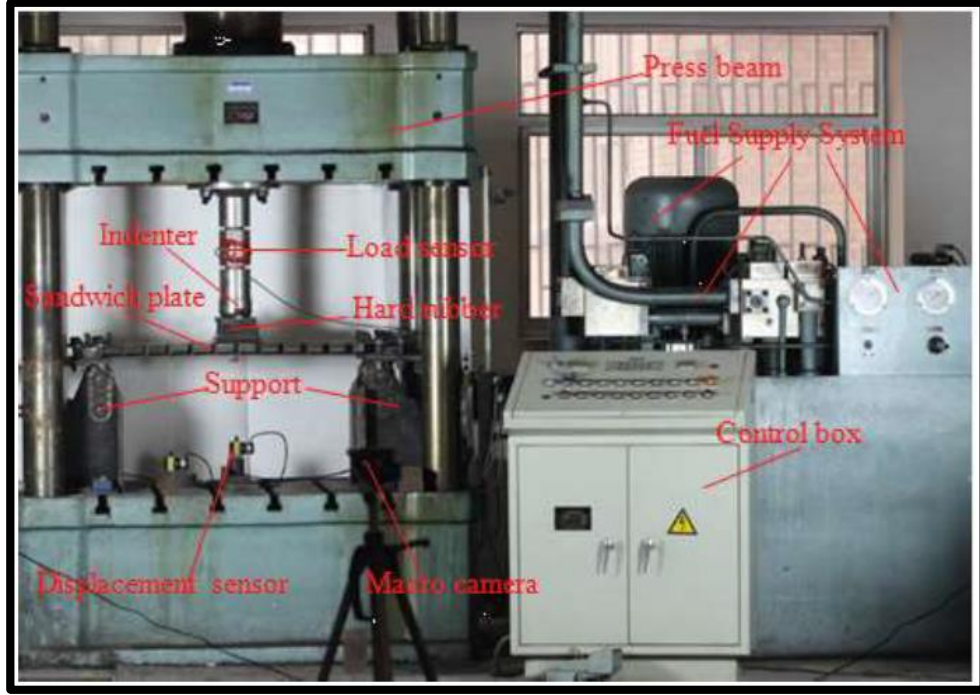
$$D_{Qy} = \frac{\Delta P \cdot l}{4 \cdot B \cdot (\omega - \omega_b)} \quad (3.4)$$

Burada D_y eğilme dayanımı, D_{Qy} kesme dayanımı, ΔP yük artışı(N), l (m) aşık aralığı, B (m) numune genişliği, ω orta kısım deplasman artışı (total deplasman(m)), ω_b sağ ve sol kısım deplasman artışı ve $\omega_b = (\omega_1 + \omega_r) / 2$ (m) , ω_s kesme deplasmanı ve $\omega_s = \omega - \omega_b$ (m)'dir.

B. Ekipman

Sandviç yapıların eğilme özellikleri için ASTM C393-00 standart test yöntemine ve sandviç yapılar için GB / T 1456-2005 performans test yöntemlerine göre Şekil 3.13'te gösterildiği gibi basit destek için uygun özel bir test düzeneği geliştirilmiştir. Dikey perdeli sandviç plakaların eğilme ve kesme sertliği bu test ekipmanı ile ölçülebilmektedir (Jiang ve diğerleri, 2017).

Deneyle 3150kN yük altında dört sütunlu bir hidrolik makine de gerçekleştirildi. Sütunlar arası açıklık 936 mm ve yükleme hızı 5mm /dk'dır. Şekil 3.14'te üç nokta büküm testi deney düzeneği görülmektedir (Jiang ve diğerleri, 2017).



Şekil 3.14. Dört sütunlu hidrolik pres ve sandviç yapının test düzeneği (Jiang ve diğerleri, 2017)

3.4.2. Taguchi deneme tablosunun oluşturulması

Taguchi deneme tablosunu oluştururken üç faktör ve üç değişken olmak üzere dokuz farklı model belirlenmiştir. Çizelge 3.2’de Taguchi metoduna göre hazırlanan deneme tablosu görülmektedir.

Çizelge 3.2. Taguchi metoduna göre hazırlanmış deneme tablosu

| Analiz No | Taguchi Deneme Tablosu | | |
|-----------|------------------------|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 |
| 5 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 2 | 3 | 1 |
| 7 | 3 | 1 | 3 |
| 8 | 3 | 2 | 1 |
| 9 | 3 | 3 | 2 |

Üç faktör ve üç değişken için hazırlanan deneme tablosuna göre belirlenen geometrik karakteristikleri Çizelge 3.3'te görüldüğü gibidir. Değiştirilecek parametreler dikey perde yüksekliği(h_c), levha kalınlığı(t_w) ve dikey perdeler arası mesafe(s) olarak belirlenmiştir.

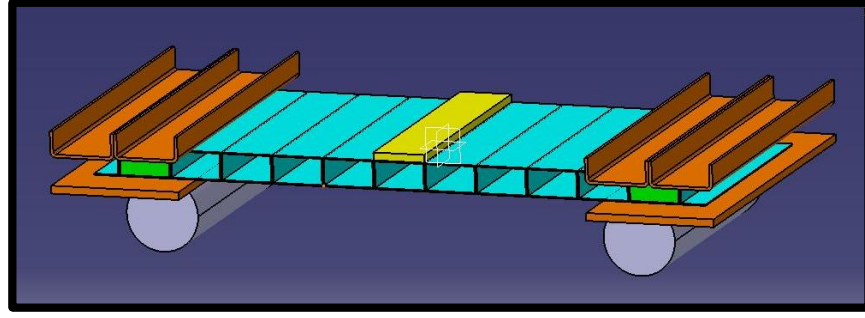
Çizelge 3.3. Üç faktör üç değişken deneme tablosu

| Parametreler | L/mm | B/mm | H/mm | h_c /mm | s/mm | t_w /mm | t_r /mm |
|--------------|------|------|------|-----------|------|-----------|-----------|
| 1 | 1200 | 500 | 60 | 50 | 100 | 1,5 | 5 |
| 2 | 1200 | 500 | 60 | 50 | 85 | 2 | 5 |
| 3 | 1200 | 500 | 60 | 50 | 70 | 3 | 5 |
| 4 | 1200 | 500 | 52 | 42 | 100 | 2 | 5 |
| 5 | 1200 | 500 | 52 | 42 | 85 | 3 | 5 |
| 6 | 1200 | 500 | 52 | 42 | 70 | 1,5 | 5 |
| 7 | 1200 | 500 | 46 | 36 | 100 | 3 | 5 |
| 8 | 1200 | 500 | 46 | 36 | 85 | 1,5 | 5 |
| 9 | 1200 | 500 | 46 | 36 | 70 | 2 | 5 |

3.4.3. Geometrilerin modellenmesi ve sonlu elemanlar analizi

A. Model geometrilerinin oluşturulması

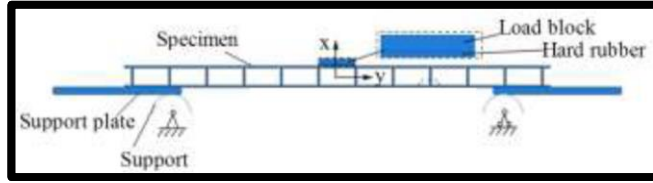
Analizi gerçekleştirilecek olan 3D modeller CATIA V5 programında hazırlanmıştır. Şekil 3.15'te CAD ortamında modellenen sandviç yapı, bağlantı ve mesnetler görülmektedir. Taguchi tablosunda belirlenen dokuz farklı sandviç yapı için modeller oluşturulmuştur. Modellenen numuneler Ansys programına aktarılmış, sınır şartları ve kontak bölgesinin detaylandırılması için ilgili bölgeler özel olarak tanımlanmıştır



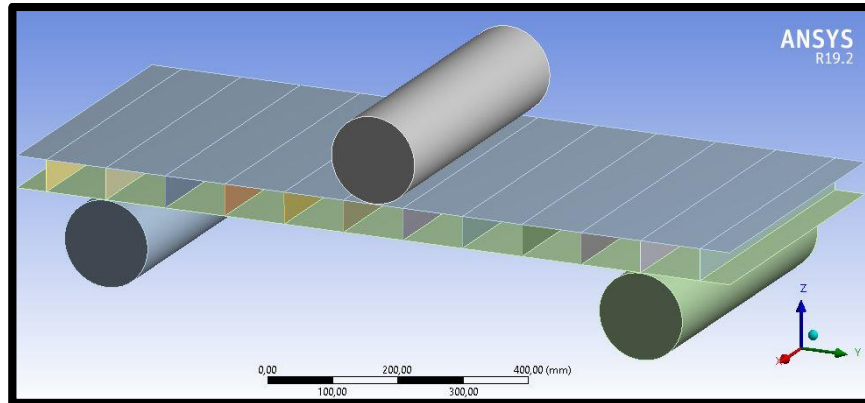
Şekil 3.15. CATIA programında hazırlanan 3D sandviç yapının görüntüsü

B. Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması

Sandviç yapıların analizi için ANSYS R19.2 standart çözücü programı kullanılmıştır. Şekil 3.17’de hazırlanan modellerden birisi görülmektedir. Modelleme yapılırken lazer kaynaklı kısımların kök boşlukları sıfır olup her bir dikey perde için orta kısımdan homojen olarak kaynak edildiği kabul edilmiştir. Hazırlanan bu modelde elementler sandviç yapı için SHELL181, test ekipmanları için MASS21 olarak kullanılmıştır.



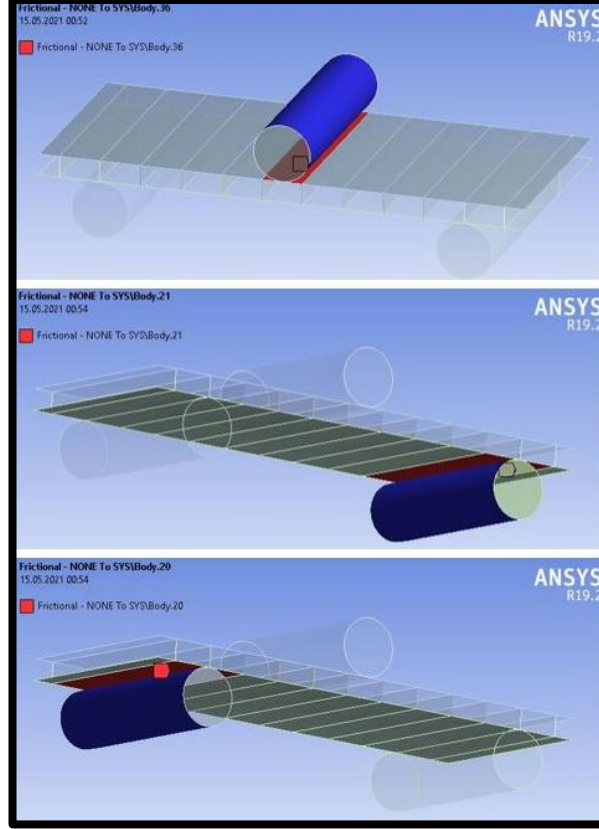
Şekil 3.16. 2D sonlu elemanlar modeli



Şekil 3.17. ANSYS programına hazırlanan sonlu elemanlar modeli

C. Kontak yüzeylerin oluşturulması

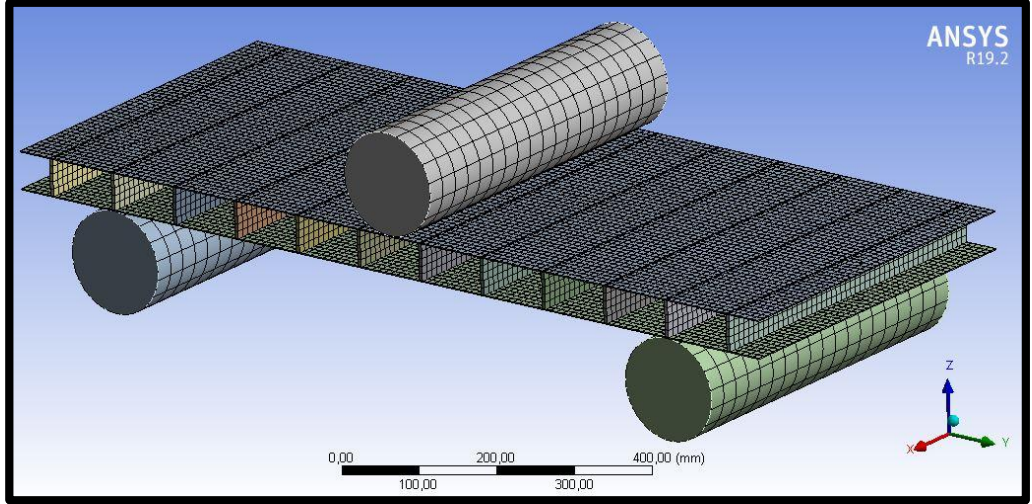
Şekil 3.18’de görüleceği üzere Ansys programında kontak bölgeler tanımlanmıştır. Kontak tipi olarak sürtünmeli ve kayabilir olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.28. ANSYS programında tanımlanan kontak bölgeleri

D. Mesh modelin hazırlanması

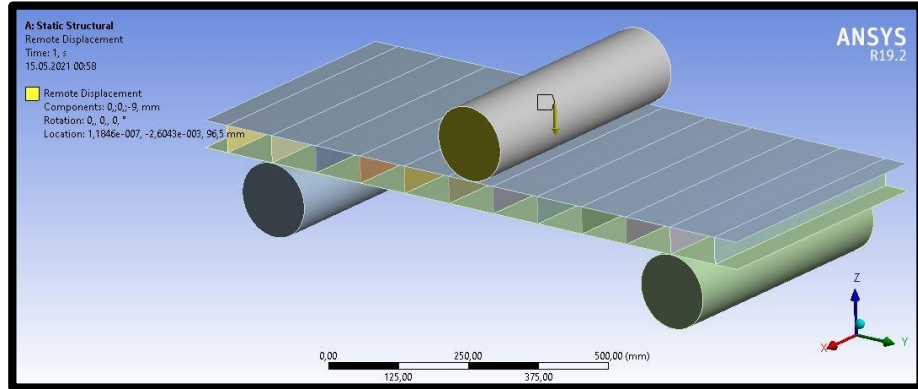
Mesh model hazırlanırken mesnet ve sandviç yapıya farklı mesh boyutu kullanılmıştır. Çelik sandviç yapı için mesh boyutu 10 mm olarak belirlenmiştir. Analizlerin doğru sonuç vermesi amacıyla mesh boyutunun optimumda tutulmasına gayret edilmiştir.



Şekil 3.19. Ansys programında hazırlanan mesh model

E. Mesnet tipi ve deplasman değerinin belirlenmesi

Şekil 3.20’de görüldüğü üzere 9 mm deplasman belirlenip modelin çözümü gerçekleştirilmiştir. Mesnetler için dönme ve öteleme değeri sıfır olarak tanımlanmıştır.

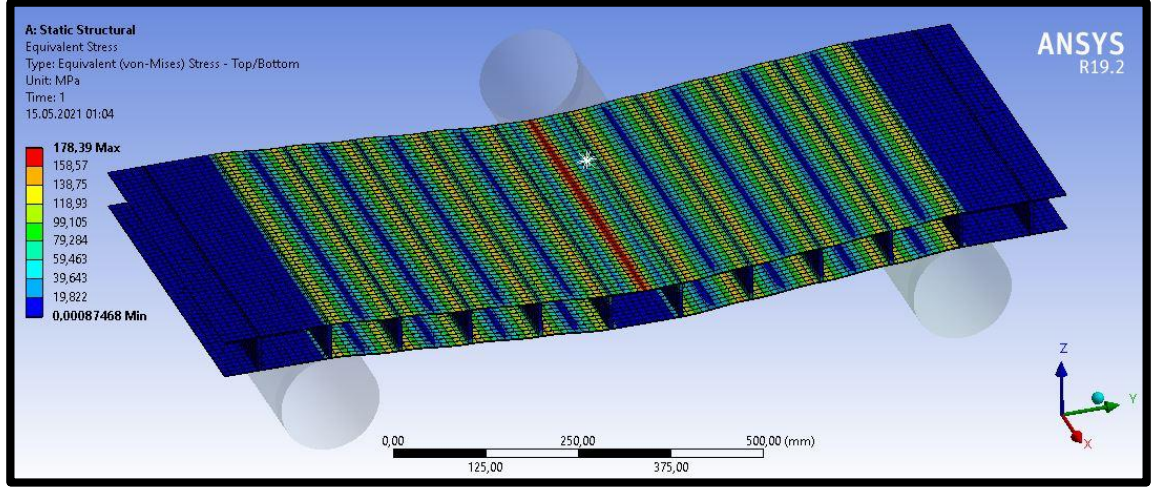


Şekil 3. Mesnet tipi ve deplasman belirlenmesi

F. Modelin çözümü

Belirlenen deplasman miktarına göre Taguchi tablosunda yer alan dokuz farklı model için analizler gerçekleştirilmiştir. Deplasman karşısında modelin gösterdiği direnç değerinin ölçülerek karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Belirlenen deplasman değeri için tüm

sonuçların malzeme akma sınırının altında olması alınan sonuçların daha güvenilir olarak değerlendirilmesini sağlamıştır. Şekil 3.21’de belirlenen deplasman değerine karşın gerilme sonuçları görülmektedir.

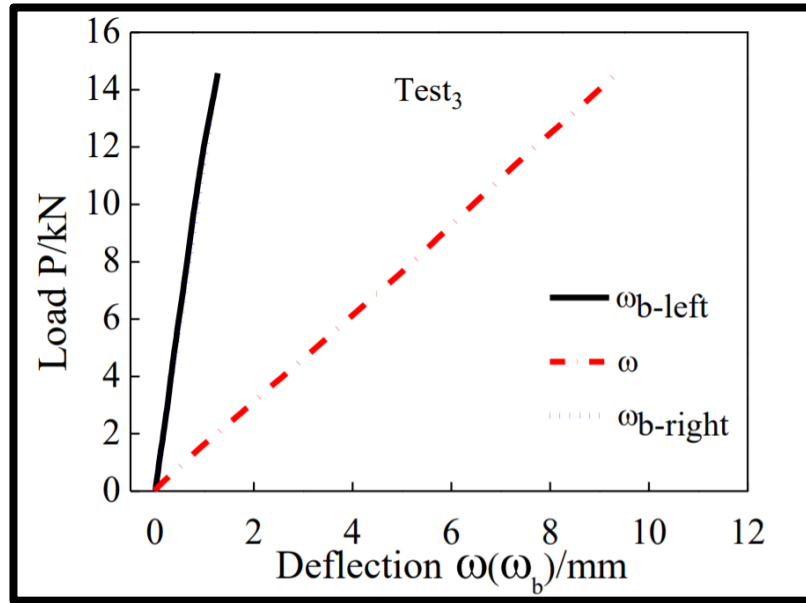


Şekil 3.41. Model üzerindeki gerilme dağılımı

Analiz sonuçlarına göre model üzerinde ölçülen maksimum gerilme 178,39 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer akma sınırının altında olması sebebiyle model üzerinden alınan kuvvetler yüksek güvenilirlikle değerlendirilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sandviç yapının deformasyonun elastik sınırlar içerisinde kalması için maksimum 20kN yük uygulanmıştır. Numune için üç kez test yinelenmiş olup sandviç yapının yük deplasman eğrisini Şekil 4.1’de görüldüğü gibidir (Jiang ve diğerleri, 2017). Yapılan çalışmada kaynak kalitesinin kusursuz olduğu kabul edilmiştir. Kaynakta bir sorun olması durumunda bu eğrilerde önemli oranda sapmalar olabileceği daha önce yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir (Allen, 2013). Yük ve yer değiştirme sensörlerinin kurulumu ve lokasyonlarının doğruluğu, simülasyon sonuçlarının uyumu ile ayrıca doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar oldukça doğru ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Aksi takdirde yük deplasman eğrileri birbiri ile eşleşmeyecektir (Kozak, 2009).

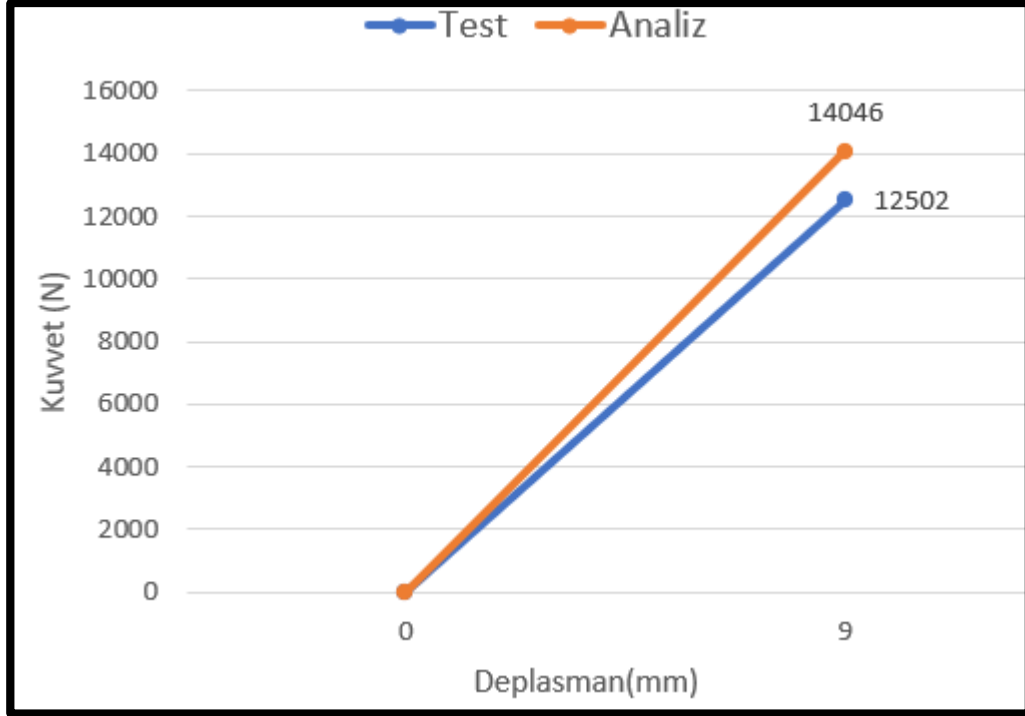


Şekil 5. Sandviç yapının yük deplasman eğrisi (Jiang ve diğerleri, 2017)

4.1. Test ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması

Kurulan sonlu eleman modelinin analiz sonuçlarını doğrulamak üzere literatürde gerçekleştirilen test ile doğrulama yapılmıştır. Şekil 4.2 test ve simülasyon sonuçlarının yük deplasman eğrisini göstermektedir. Deney sonuçları simülasyon sonuçları ile örtüşmektedir. Kaydedilen 9 mm deplasmana karşılık test sonucunda 12502 N kuvvet

elde edilmiştir (Jiang ve diğerleri, 2017). Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen değer ise 14046 N olup yakın değerlere ulaşılmıştır.

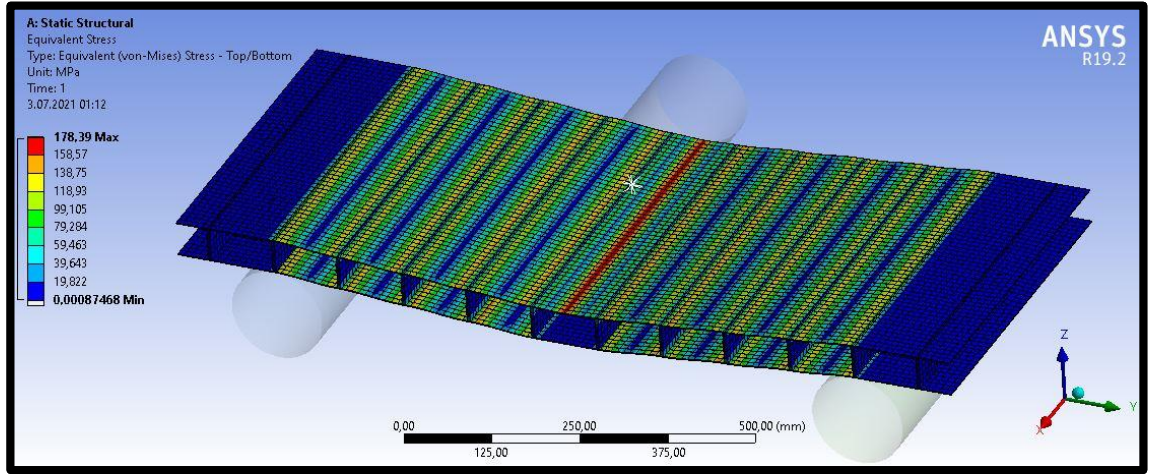


Şekil 6. Test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

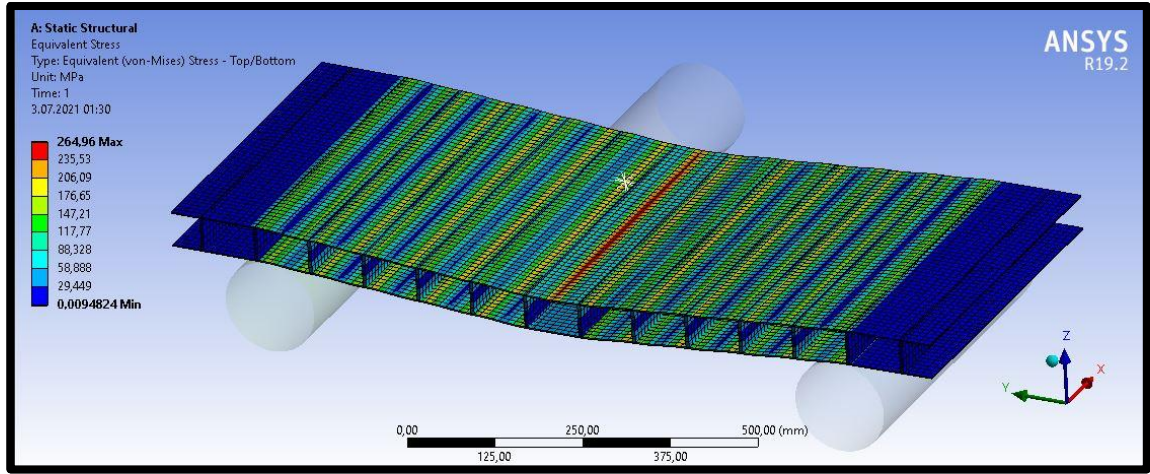
Deneysel test, malzeme analiz maliyetleri ve pahalı üretim maliyetleri sebebiyle sonlu elemanlar analizi yöntemi, farklı geometrik parametrelerle sandviç plakaları analiz etmek için çok etkin ve verimli bir seçim olacaktır. Bu sadece maliyet sorunlarını çözmek için değil, modeli değiştirmek de oldukça uygundur. Model valide edildikten ve geliştirildikten sonra, aşağıdaki içerikler ile analiz ettiğimiz sandviç plakanın sertliğini hesaplamak için mükemmel bir yöntemdir.

4.2. Deneme tablosu analiz sonuçları

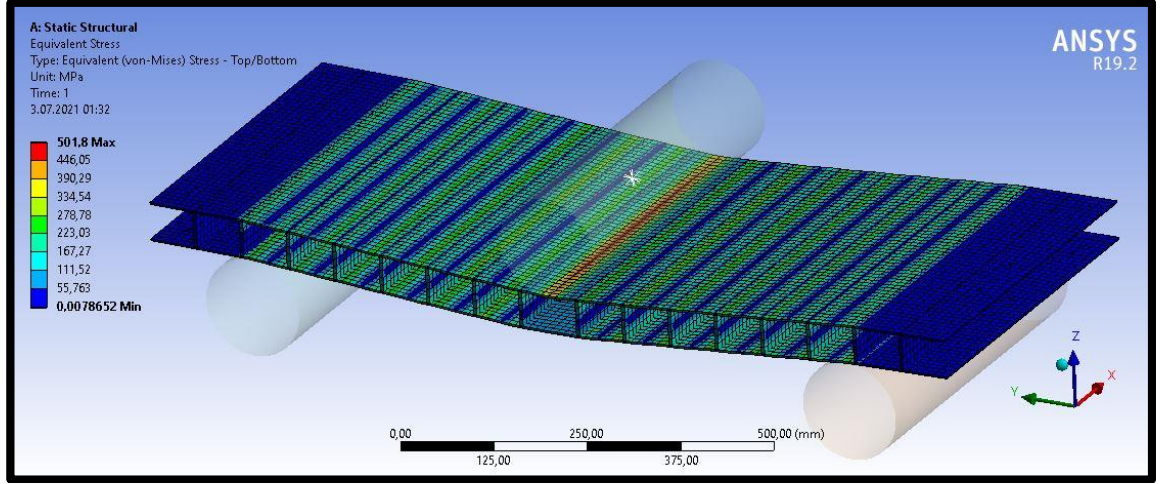
Taguchi yöntemine göre hazırlanmış olan deneme tablosuna göre üç boyutlu modeli hazırlanmış modellerin Ansys programında yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Dokuz farklı model için yapılan analizler sonucunda elde edilen Von Mises gerilme değerleri aşağıdaki gibidir.



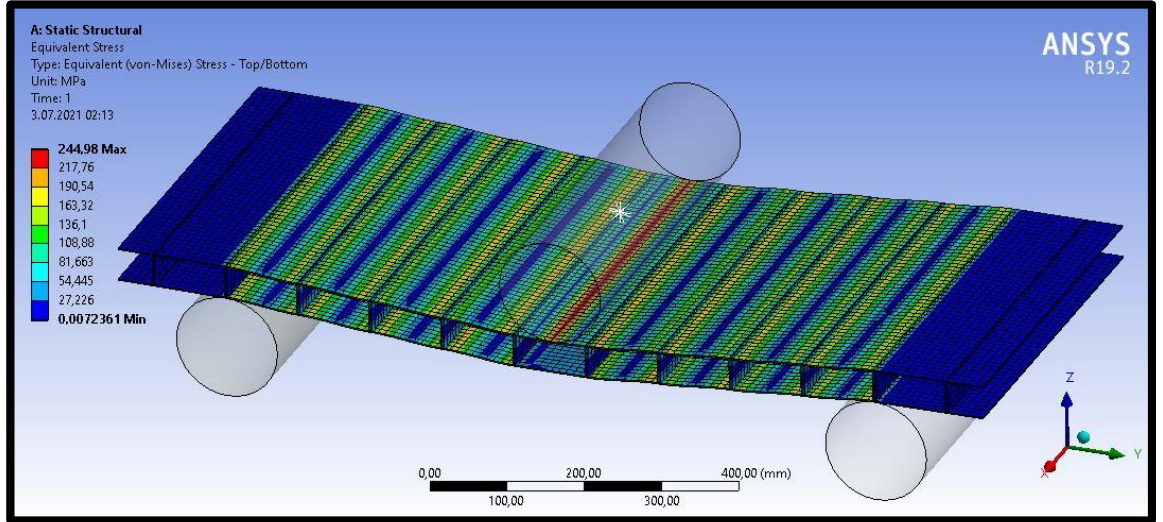
Şekil 7. 1 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



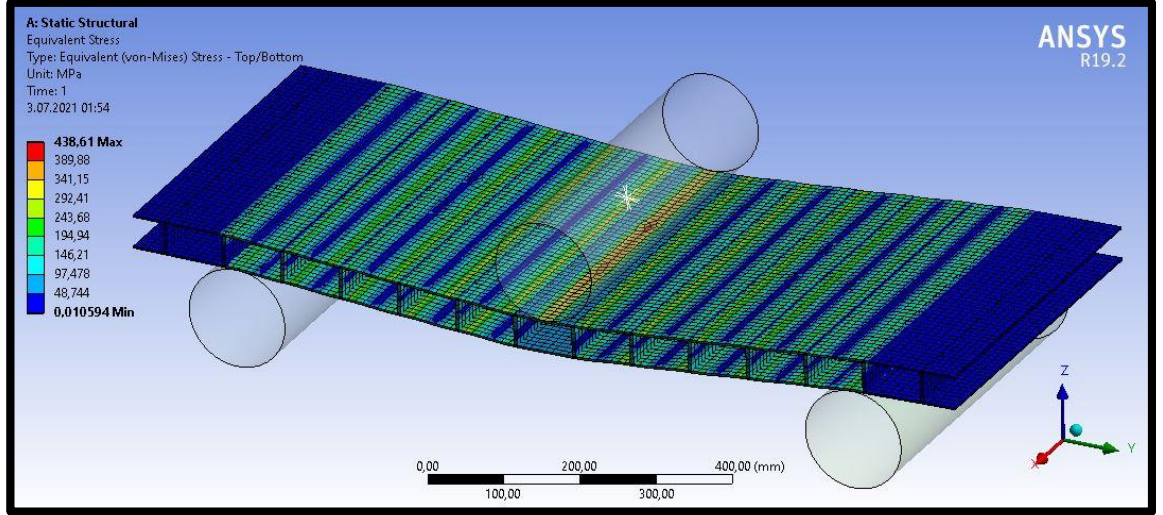
Şekil 8. 2 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



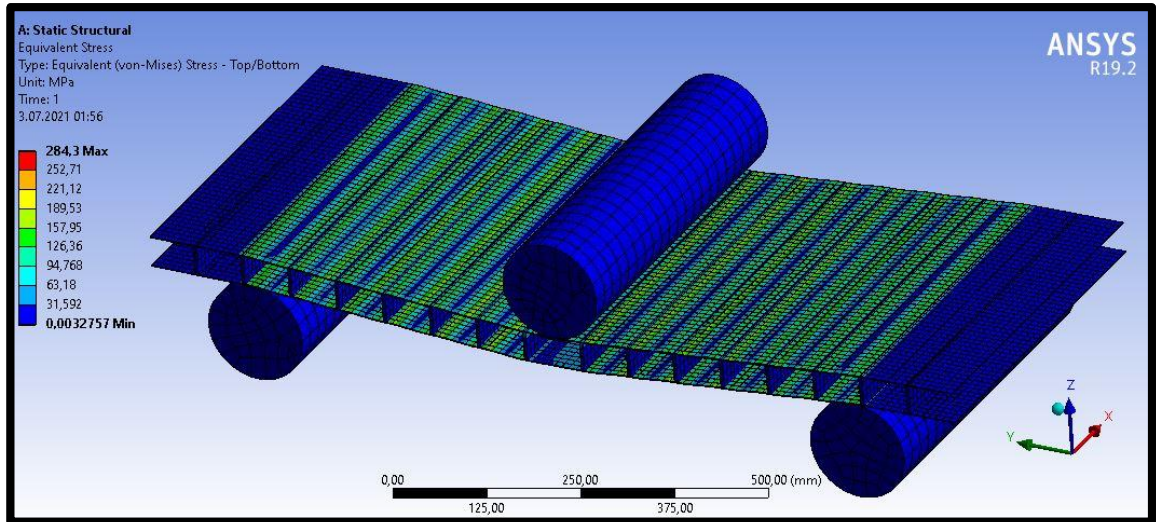
Şekil 95. 3 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



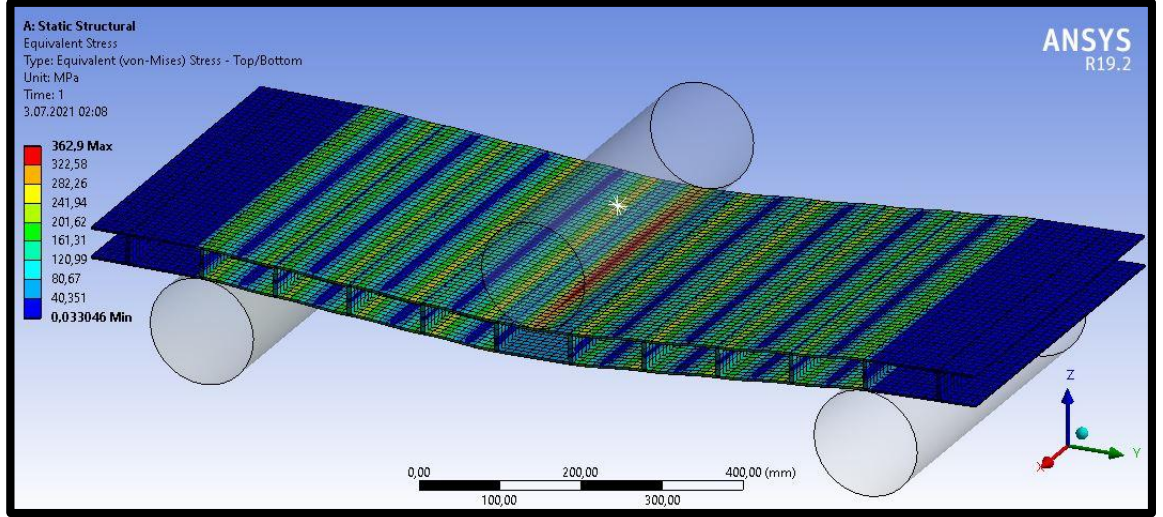
Şekil 10. 4 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



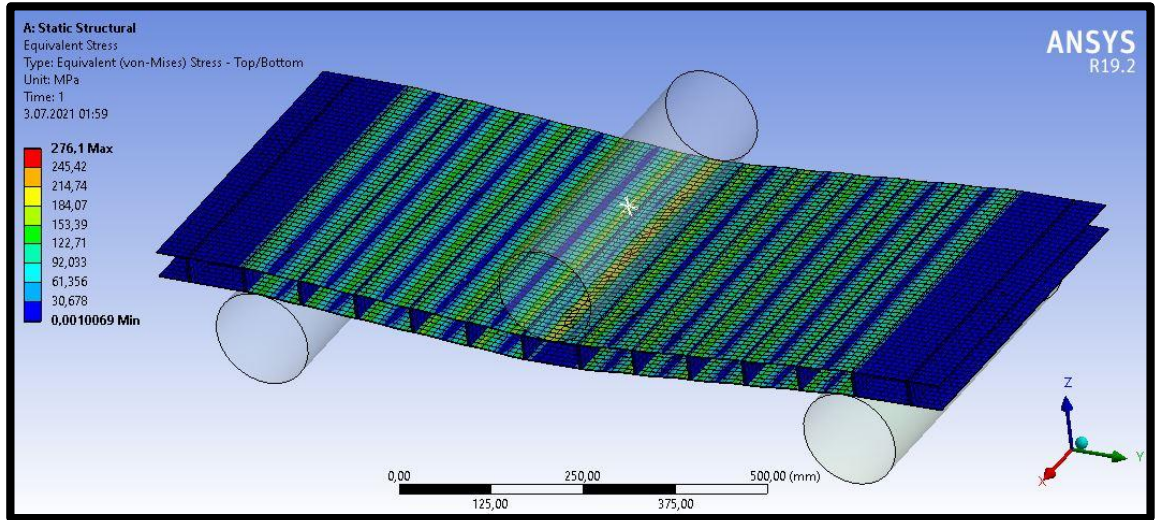
Şekil 11. 5 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



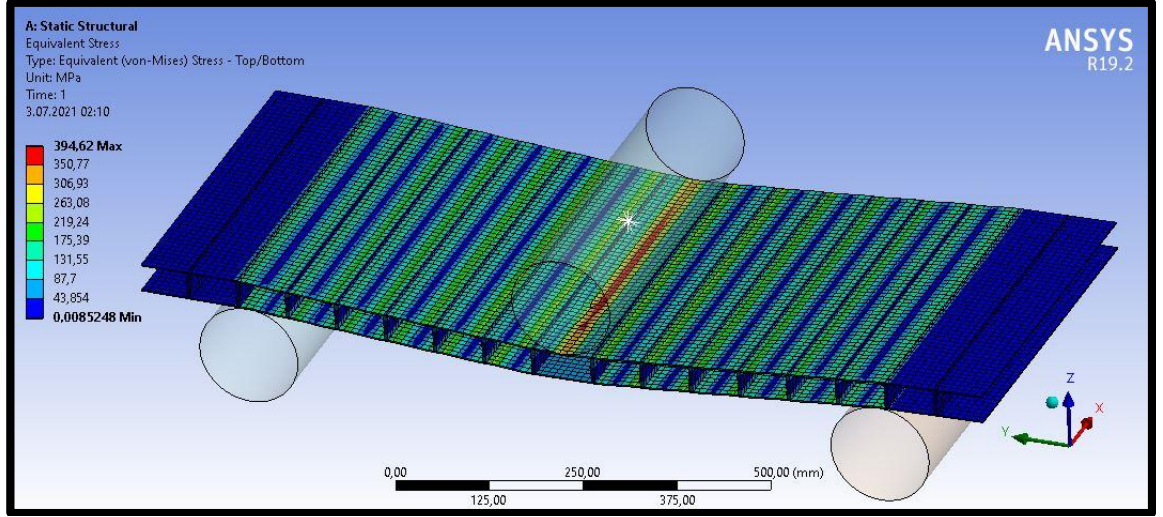
Şekil 12. 6 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



Şekil 13. 7 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



Şekil 14. 8 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri



Şekil 15. 9 numaralı modelin analiz sonuçlarına göre Von Mises gerilme değeri

Sandviç yapıların dayanıklılığını değerlendirmek için kesme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin oldukça önem arz ettiği literatür incelemeleri sonucunda görülmüştür. Çelik sandviç yapının belirlenen tüm varyasyonları için analiz sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. (1) ve (2) nolu denklemlere göre Eğilme Dayanımı (D_y) ve Kesme Dayanımı (D_{Qy}) değerleri hesaplanmıştır.

$$D_y = \frac{\Delta P \cdot l^3}{48 \cdot B \cdot \omega_b} \quad (4.1)$$

$$D_{Qy} = \frac{\Delta P \cdot l}{4 \cdot B \cdot (\omega - \omega_b)} \quad (4.2)$$

Çizelge 4.1. Analiz sonuçlarına göre gerilme, eğilme ve kesme dayanımı değerleri

| Parametreler | Von Mises | Eğilme | Kesme |
|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Deneme No | Gerilme / MPa | Dayanımı/Nm | Dayanımı/Nm |
| 1 | 178,4 | 561173,2 | 165994,7 |
| 2 | 265,0 | 699498,4 | 525908,4 |
| 3 | 501,8 | 1486004,1 | 2076736,6 |
| 4 | 245,0 | 665999,3 | 384824,8 |
| 5 | 438,6 | 1077900,4 | 1548195,5 |
| 6 | 284,3 | 418108,2 | 335245,2 |
| 7 | 362,9 | 811516 | 1198469 |
| 8 | 276,1 | 341551,9 | 227528,6 |
| 9 | 394,6 | 495204,5 | 775396,7 |

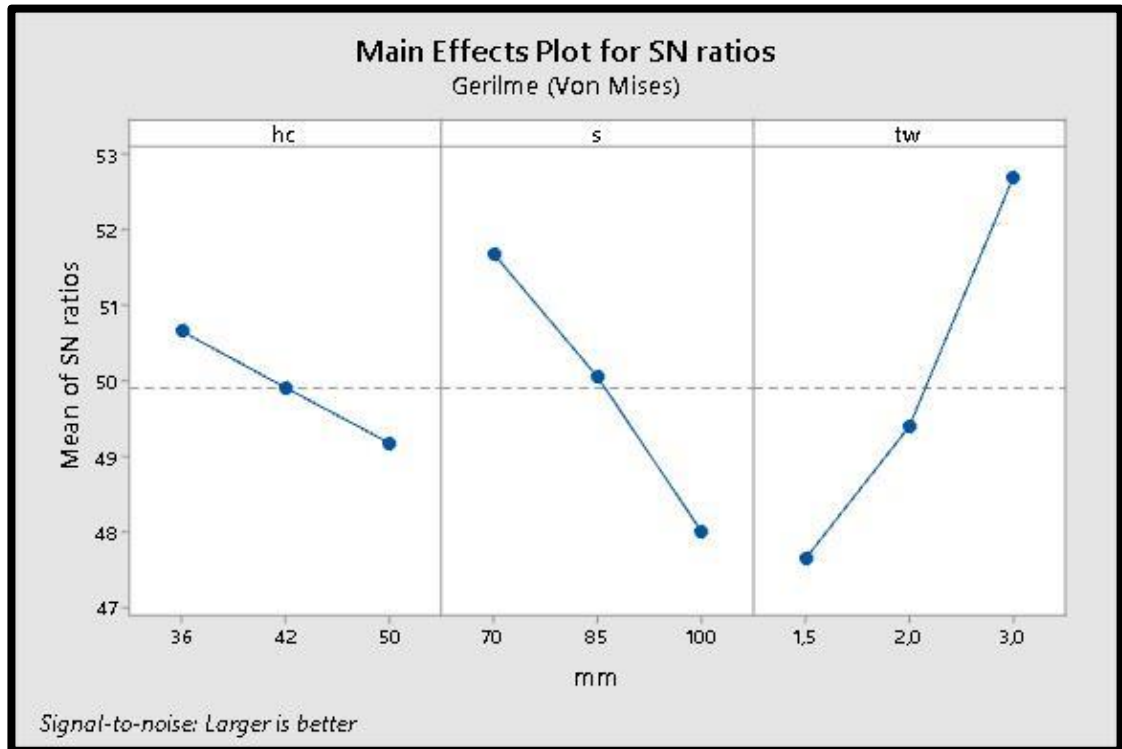
4.3. Etkin parametrelerin Minitab programında belirlenmesi

Gerilme değerlerinin Ansys Programında elde edilmesi ile birlikte değerler Minitab programına aktarılarak parametrelerin analizi gerçekleştirilmiştir. Minitab programında analizler gerçekleştirilirken S/N oranı için daha yüksek daha iyidir (larger is better) olarak tanımlanmıştır. Daha yüksek daha iyidir tanımlanması, değerlerin ne kadar yüksek olursa parametre performansının o ölçüde iyi olduğu anlamına gelmektedir. Çizelge 4.2’de Von Mises gerilme değeri için levha kalınlığı (t_w), aşık aralığı (s) ve dikey perde yüksekliği (h_c) parametrelerinin S/N yanıt tablosu görülmektedir. Delta değeri her bir faktörün seviyelerinin sahip oldukları maksimum S/N oranı ile minimum S/N oranı arasındaki farktır. Delta sayısı ne kadar büyük ise o faktörün çıktıya etkisi o kadar büyüktür. Gerilme değerleri göz önüne alındığında faktörlerin önem (rank) sırasına göre en etkili faktörün levha kalınlığı, sonra sırasıyla aşık aralığı (s) ve dikey perde yüksekliği (h_c) olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. Von Mises gerilme sonuçlarına göre elde edilen S/N oranı yanıt tablosu

| Seviye | h _c | s | t _w |
|--------------|----------------|-------|----------------|
| 1 | 50,65 | 51,67 | 47,64 |
| 2 | 49,90 | 50,04 | 49,39 |
| 3 | 49,17 | 48,00 | 52,86 |
| Delta | 1,48 | 3,67 | 5,04 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Şekil 4.13'te Ansys programında elde edilen Von Mises gerilme değerlerine göre levha kalınlığı, aşık aralığı ve dikey perde yüksekliğinin farklı seviyeleri için S/N oranlarının değişimi verilmektedir.



Şekil 4.13. Von Mises gerilmesi ve S/N oranları

Çizelge 4.3'te parametrelere uygulanan ANOVA analizine yer verilmiştir. Sandviç panel için seçilen faktörler arasında etki değeri en yüksek olan %61,95 ile levha kalınlığı (t_w) olduğu görülmektedir. Bunun anlamı levha kalınlığı gerilme değeri üzerindeki en etkili faktördür ve %61,95'lik bir etkisi vardır. Diğer bir parametre olan aşık aralığı (s)

%31,94'lük etkisi ile 2'nci etkili faktördür. Dikey perde yüksekliği (h_c) ise %5,18 oranlık etki ile üçüncü sıradadır. Taguchi metodu ile elde edilen faktörlerin önem sıralaması ile ANOVA analizi ile elde edilen faktörlerin etki sıralaması birbiri ile uyumludur.

Çizelge 4.3. Von Mises gerilme sonuçlarına göre ANOVA analizi

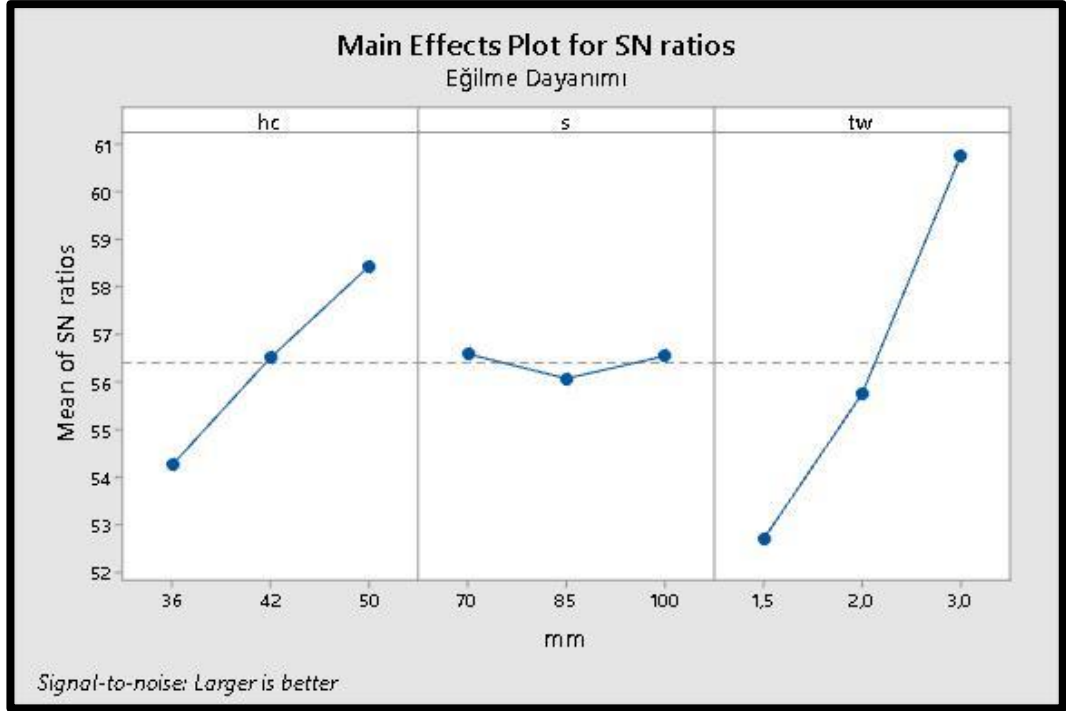
| Kaynak | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Varyans | F değeri | Etki (%) |
|---------------|---------------------|-----------------|---------|----------|----------|
| h_c | 2 | 3,2843 | 1,6421 | 5,55 | 5,18 |
| s | 2 | 20,2663 | 10,1332 | 34,24 | 31,94 |
| t_w | 2 | 39,31 | 19,6565 | 66,41 | 61,95 |
| Hata | 2 | 0,5919 | 0,296 | | 0,93 |
| Toplam | 8 | 63,4556 | | | 100 |

Çizelge 4.4'de eğilme dayanımı değeri için levha kalınlığı (t_w), aşık aralığı (s) ve dikey perde yüksekliği (h_c) parametrelerinin S/N yanıt tablosu görülmektedir. Eğilme değerleri göz önüne alındığında faktörlerin önem (rank) sırasına göre en etkili faktörün levha kalınlığı, sonra sırasıyla dikey perde yüksekliği (h_c) ve aşık aralığı (s) olduğu görülmektedir. Taguchi metodu sonucu tespit edilen optimum seviyelerin oluşturduğu deney kombinasyonu gerçekleştirilen deneyler arasında olduğu için doğrulama deneyi yapmaya gerek kalmamıştır.

Çizelge 4.4. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre elde edilen S/N oranı yanıt tablosu

| Seviye | h_c | s | t_w |
|--------------|-------|-------|-------|
| 1 | 54,25 | 56,59 | 52,69 |
| 2 | 56,52 | 56,07 | 55,75 |
| 3 | 58,44 | 56,55 | 60,76 |
| Delta | 4,19 | 0,52 | 8,07 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |

Şekil 4.13'te Ansys programında elde edilen eğilme dayanımı değerlerine göre levha kalınlığı, aşık aralığı ve dikey perde yüksekliğinin farklı seviyeleri için S/N oranlarının değişimi verilmektedir.



Şekil 16. Eğilme dayanımı ve S/N oranı

Çizelge 4.5'te parametrelere uygulanan ANOVA analizine yer verilmiştir. Sandviç panel için seçilen faktörler arasında etki değeri en yüksek olan %77,74 ile levha kalınlığı (t_w) olduğu görülmektedir. Bunun anlamı levha kalınlığı gerilme değeri üzerindeki en etkili faktördür ve %77,74 oranında bir etkisi vardır. Diğer bir parametre olan dikey perde yüksekliği (h_c) %20,61 etki oranı ile 2'nci etkili faktördür. Aşık aralığı (s) ise %0,38 oranlık etki ile üçüncü sıradadır. Taguchi metodu ile elde edilen faktörlerin önem sıralaması ile ANOVA analizi ile elde edilen faktörlerin etki sıralaması birbiri ile uyumludur.

Çizelge 4.5. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre ANOVA tablosu

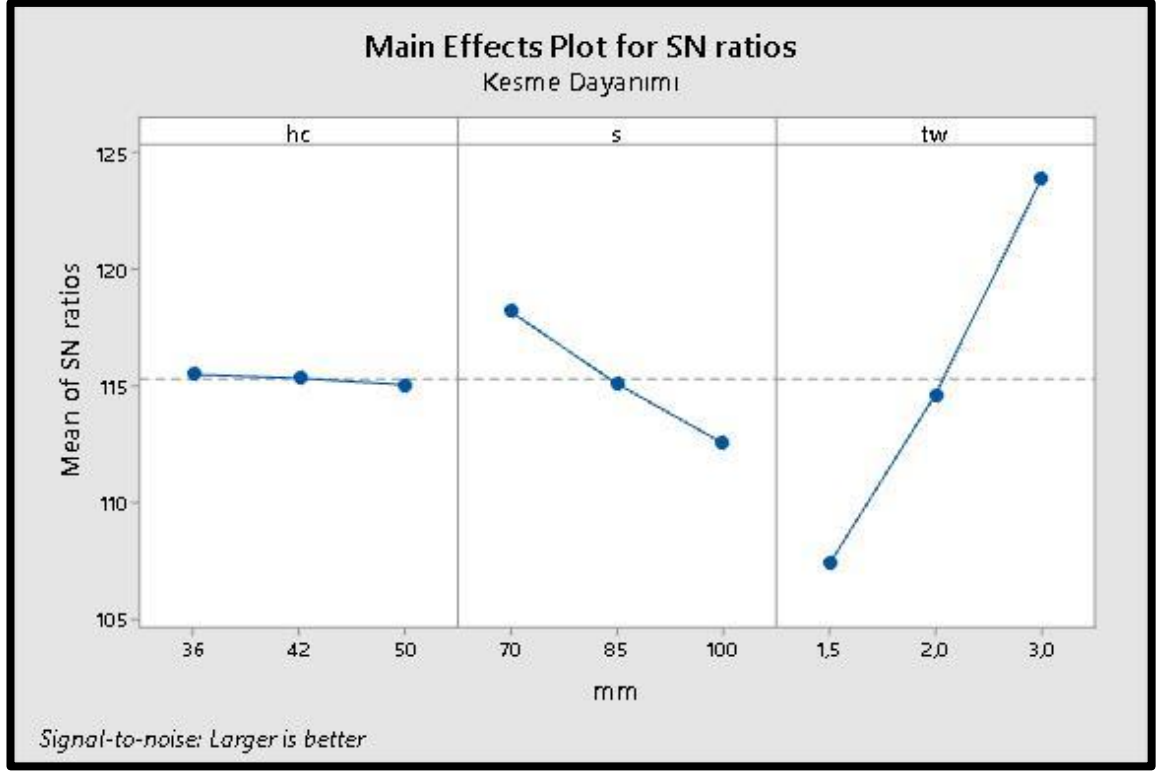
| Kaynak | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Varyans | F değeri | Etki (%) |
|----------------------|---------------------|-----------------|---------|----------|----------|
| h_c | 2 | 26,381 | 13,1907 | 16,24 | 20,61 |
| s | 2 | 0,491 | 0,2457 | 0,30 | 0,38 |
| t_w | 2 | 99,51 | 49,7531 | 61,25 | 77,74 |
| Hata | 2 | 1,625 | 0,8123 | | 1,27 |
| Toplam | 8 | 128,004 | | | 100 |

Çizelge 4.6’da kesme dayanımı değerleri için levha kalınlığı (t_w), aşık aralığı (s) ve dikey perde yüksekliği (h_c) parametrelerinin S/N yanıt tablosu görülmektedir. Kesme dayanımı değerleri göz önüne alındığında faktörlerin önem (rank) sırasına göre en etkili faktörün levha kalınlığı, sonra sırasıyla aşık aralığı (s) ve dikey perde yüksekliği (h_c) olduğu görülmektedir. Taguchi metodu sonucu tespit edilen optimum seviyelerin oluşturduğu deney kombinasyonu gerçekleştirilen deneyler arasında olduğu için doğrulama deneyi yapmaya gerek kalmamıştır.

Çizelge 4.6. Kesme dayanımı sonuçlarına göre elde edilen S/N oranı yanıt tablosu

| Seviye | h_c | s | t_w |
|--------------|-------|-------|-------|
| 1 | 115,5 | 118,2 | 107,3 |
| 2 | 115,3 | 115,1 | 114,6 |
| 3 | 115,1 | 112,6 | 123,9 |
| Delta | 0,4 | 5,7 | 16,6 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

Şekil 4.14’te Ansys programında elde edilen kesme dayanımı değerlerine göre levha kalınlığı, aşık aralığı ve dikey perde yüksekliğinin farklı seviyeleri için S/N oranlarının değişimi verilmektedir.



Şekil 17. Kesme dayanımı ve parametre ilişkisi

Çizelge 4.7’te parametrelere uygulanan ANOVA analizine yer verilmiştir. Sandviç panel için seçilen faktörler arasında etki değeri en yüksek olan %89,45 ile levha kalınlığı (t_w) olduğu görülmektedir. Bunun anlamı levha kalınlığı gerilme değeri üzerindeki en etkili faktördür ve %77,74 oranında bir etkisi vardır. Diğer bir parametre olan aşık aralığı (s) %10,42 oranında etkisi ile 2’nci etkili faktördür. Dikey perde yüksekliği (h_c) ise %0,07 oranlık etki ile üçüncü sıradadır ve oldukça az etkilidir. Von Mises gerilme değeri ve eğilme dayanımında olduğu gibi kesme dayanımı değerinde de Taguchi metodu ile elde edilen faktörlerin önem sıralaması ile ANOVA analizi ile elde edilen faktörlerin etki sıralaması birbiri ile uyumludur.

Çizelge 4.7. Kesme dayanımı sonuçlarına göre ANOVA tablosu

| Kaynak | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Varyans | F değeri | Etki (%) |
|---------------|----------------------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| hc | 2 | 0,304 | 0,152 | 1,06 | 0,07 |
| s | 2 | 48,117 | 24,059 | 167,01 | 10,42 |
| tw | 2 | 413,09 | 206,546 | 1433,76 | 89,45 |
| Hata | 2 | 0,288 | 0,144 | | 0,06 |
| Toplam | 8 | 461,801 | | | 100 |

5. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada lazer kaynakla üretilmiş sandviç panellerin tasarım sürecinde analiz programlarının kullanımı ile tasarım optimizasyonu yapılarak etkin parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede tasarımda en etkin parametrelerin değiştirilmesi yoluyla istenilen ölçüde dayanıklı yapıların oluşturulması hedeflenmiştir.

Literatürde yapılan test ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmış olup değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu karşılaştırma ile analiz sonuçlarının gerçek değerleri yansıtması konusunda güvenilirlik sağlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizlerine dayanılarak levha kalınlığı(t_w), perde yüksekliği(h_c) ve aşık aralığı(s) gibi geometrik parametrelerin değişmesi yoluyla etkin parametrenin belirlenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Taguchi metoduna göre üç faktör üç değişken olmak üzere dokuz farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

Alınan analiz sonuçları ile eğilme dayanımı ve kesme dayanımı tüm modeller için ayrı ayrı hesaplanmış olup verilerin Minitab programına aktarılarak geometrik parametrelerin etkileri analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre gerilme, eğilme ve kesme dayanımı birinci derecede etkileyen parametre olarak levha kalınlığı(t_w) değeri tespit edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde aşık aralığı(s) değerindeki artış kesme dayanımının azalmasına sebep olurken dikey perde yüksekliğindeki(h_c) artışın kesme dayanımına önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı göz önüne alındığında aşık aralığı(s) mesafesinin sonuçlara önemli etkisinin olmadığı ve faktörler arasında en az etkili parametre olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, A., Aydın, Ş. ve Ovalı, İ. (2012). AA2024 Alüminyum alaşımlarının lazer kaynağında kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 18, 37-45. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20501/218261#article_cite
- Akkuş, H., Düzcükoğlu, H. ve Şahin, Ö.S. (2015). Alüminyum bal peteği yapılarda oluşun eğilme kuvvetlerinin çoklu regresyon ile incelenmesi. *CBÜ Fen Bil. Dergi.*, Cilt 11, Sayı 2, 217-223 s. doi: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.36340>
- Akman, E. (2007). *Ti6Al4V titanyum alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Erişim adresi : <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/handle/11493/928>
- Allen, H. G. (2013). *Analysis and design of structural sandwich panels*. The Commonwealth and international library: Structures and Solid Body Mechanics Division. doi: 10.1016/C2013-0-02134-2
- Aydın, K. Karaağaç, Ş. (2010). Lazer kaynağı ve lazer kaynağının başlıca uygulamaları. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*. 5, 693-705. doi: 10.31202/ecjse.379958
- Bahreyni, B. (2008). *Fabrication and design of resonant microdevices*. W. Andrew Incorporated, Hardcover Isbn: 9780815515777.
- Bhote, K.R. (1991). *World Class Quality*. Second edition, American Management Association. Doi: 10.1109/MEI.2000.845032
- Boshidar, M. (2006). Sandwich panels in shipbuilding. *Gdansk University of Technology Polish Maritime Research*, Special issue/S1.
- Briscoe, C. R., Mantell, S. C. ve Davidson, H. J. (2011). Design procedure for web core sandwich panels for residential roofs. Davidson Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota Minneapolis, MN 55455, USA *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 13. doi:10.1177/1099636210365441
- Caccese, V. ve Yorulmaz, S. (2009). Laser welded steel sandwich panel bridge deck development : Finite element analysis and stake weld strenght tests. *Maine Dept of Transportation*. Erişim Adresi: <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/27127>
- Çelen, S. (2006). *Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, 9 Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cen, G. (2018). *Ön aks kovanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi ve test değerleri ile karşılaştırılması*. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.

Çelik, C. (1993). *Kalite geliştirmede tasarım eniyileme problemine Taguchi yöntemlerinin uygulanmasında sistematik bir yaklaşım*. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelik, E. ve Solmaz, M.Y. (2018). 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen bal peteği sandviç kompozitlerin basma yükü altındaki performanslarının araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*. 30(1), 277-286, 2018. Erişim adresi <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=JfP9YXqIQIoq9tvJpqXNjQ&no=zCrVszdq3FYvkQSSy0DKGQ>

Çetin, V., Subaşı, A. Ve Şamandar, A. (2017). Kompozit panellerde CTP levha ve çekirdek kalınlığının mekanik özelliklere etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 4, No: 2, 2017 (135-145)*. doi: 10.31202/ecjse.291853

Damghani, M. N. ve Gonabadi, A. M. (2017). Numerical and experimental study of energy absorption in aluminum corrugated core sandwich panels by drop hammer test. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*, Magnolithe, 8, ff10.2412/mmse.85.747.458ff. fhal-01500670

Frank, D. (2014). *Fatigue strength assessment of laser stake welds in web-core steel sandwich panels*. Aalto University publication series Doctoral Dissertations 93/2014. Erişim adresi: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5749-1>

Gavade, N. K., Sable, A., Thube, T. ve Rajput, V. (2018). Design and analysis of corrugated aluminium sandwich structures using Ansys Workbench. *International Journal of advance scientific Research and Engineering Trends*, Volume 3 ,Issue 6 , ISSN (Online) 2456-0774

Güden, M. ve Kılıçaslan, C. (2019). The effect of core height on energy absorbing capacity in aluminum corrugated sandwich panels. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. doi: 10.17341/gazimmdf.639834

Gürses, E. ve Yardımcı, O. (2016). Bal peteği dolguya sahip sandviç yapıların bükme yükü altındaki davranışlarının karşılaştırılması. *VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK)*. Erişim adresi: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/80876>

Jiang, X., Fei, S., Ji, H. ve Zhu, L. (2017). Failure analysis of the laser-welded web-Core steel sandwich panel with narrow weld width T-joints. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, China - *Applied Mechanics and Materials*, ISSN:1662-7482, Vol. 863, pp 311-316. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.863.311

Jiang, X. X., Zhu, L., Qiao, J. S., Wu, Y. X., Li, Z. G., ve Chen, J. H. (2014). Bending properties of laser welded web-core steel sandwich plates. *Advanced Materials Research*. 936, 1451-1455. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.936.1451

Jiang, X. X., Ji, H., Rejab, M.R.M., Zhang, S., Ishak, M. ve Zhu, L. (2017). Geometrical parameters influence on the stiffness of steel sandwich plates with web-core. *4th*

International Conference on Mechanical Engineering Research. doi: 10.1088/1757-899X/257/1/012081

Kaman, M.O. ve Solmaz, M.Y. (2010). Petek yapılı sandviç yapılarda köpük dolgusunun kritik burkulma yüküne etkisi. *e-Journal of New World Sciences Academy*. 2010, Volume: 5, Number: 1, Article Number: 1A0062. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/186343>

Kasap, S. (2005). *F-4 savaş uçaklarında yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin 2k deneyleri ve Taguchi yöntemiyle belirlenmesi*. Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Klanac, A. (2004). Optimal design of steel sandwich panel applications in ships. Ship laboratory, Helsinki University of Technology. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/268000608>

Klanac, A. ve Kujala, P. (2004). Optimal design of steel sandwich panel applications in ships. *In The Proceedings of The Ninth International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Lübeck-Travemünde (pp. 907-914).

Koç, S. (2003). *Kritik ünitelerin performansını etkileyen faktörlerin deneysel tasarım yöntemi ile optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, F.B.E., Adana.

Kozak, J. (2009). Selected problems on application of steel sandwich panels to marine structures. *Polish Maritime Research*. 9-15. doi: 10.2478/v10012-008-0050-4

Krottmaier, J. (1993). *Optimizing Engineering Design*. McGraw-Hill Book Company.

Kujala, P. ve Klanac, A. (2005). Steel sandwich panels in marine applications. *Brodogradnja*, 56(4), 305-314.

Mitra, A. (1993). *Fundamentals of quality control and improvement*. Macmillian Publishing Company.

Moaveni, S., Ayhan, A.O. (2015). *Sonlu elemanlar analizi teori ve Ansys ile uygulamalar*. Palme Yayınları.

Ovalı, İ., Esen, C. (2018). *Ansys Workbench*. Kodlab Yayınevi 3. Baskı, Sayfa 1-50.

Özcan, M. Tarakçıoğlu, N. ve Kahramanlı, Ş. (2004). Saç malzemelerin lazer kaynak Parametreleri. Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu C. 3, S:1-2004

Pençe, E. (2007). Eğitim amaçlı ANSYS paket programının tanıtılması, Ansys öğretimi ve uygulama örnekleri ZKÜ, Karabük.

Püskülcü, G. Koçlular, F. (2009). Lazer kaynak yöntemi ve uygulamaları. *Engineer & the Machinery Magazine*. Sayı 599, s8-17. 10p

Romanoff, J. ve Varsta, P. (2007). Bending response of web-core sandwich plates. *Composite Structures*, 81(2), 292-302.

Romanoff, J. (2007). *Bending response of laser welded web-core sandwich plates*. Doctoral dissertation Helsinki University of technology department of mechanical engineering ship laboratory TKK dissertations 88.

Romanoff, J. (2014). Optimization of web-core steel sandwich decks at concept design stage using envelope surface for stress assessment. *Engineering Structures*, 66, 1-9.

Sun, Y., Saafi, M., Zhou, W., Zhang, C. ve Li, H. (2015). Analysis and Experiment on Bending Performance of Laser-Welded Web-Core Sandwich Plates, School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China. doi: 10.1016/j.matpr.2015.05.038

Taşkın, M. ve Çalgülü, U. (2009). AISI 430/1010 çelik çiftinin lazer kaynağında kaynak gücünün birleşmeye etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. Cilt. 21 Sayı 1, s11-22. 12p.

Thomson, M. K., Thomson, J. (2017). Introduction to Ansys and finite element modeling. doi: 10.1016/B978-0-12-812981-4.00001-0.

Uyguntürk, E. (2020). *Titanyum boruların Tig ve lazer kaynak yöntemleri ile birleştirilebilirliğinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <http://acikerisim.karabuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/618>

Yadollahi, Y., Pakar, I. ve Bayat, M. (2015). Evaluation and comparison of behaviour of corrugated steel plate shear walls. *Latin American Journal of Solid and Structures* vol.12 No:4 Rio de Janeiro

Yaldıran, F. (2018). *Bir buğday silosunun Ansys programı kullanılarak analizi*. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.

Yörür, H. (2012). *Ahşap malzemeden üretilen köşe birleştirmelerin simülasyon (Ansys) ortamında teknolojik özelliklerinin belirlenmesi*. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Bartın.

Yu, W. (2015). Structure genome: Fill the gap between materials genome and structural analysis. *AIAA SciTech Forum. Kissimmee, Florida 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet AYDIN
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 1988
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Atatürk Lisesi, 2006
Lisans : Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 2010
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Yeşilova Holding Ar-Ge, Ficosa International, TOFAŞ

İletişim (e-posta) : mehmetaydin_7@hotmail.com

Yayımları :