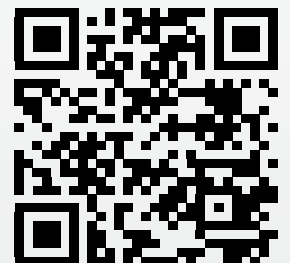


# IJIEA



INTERNATIONAL JOURNAL OF  
INNOVATIVE ENGINEERING APPLICATIONS



### **Editor-in-Chief**

Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR  
Prof. Dr. Hikmet ESEN

### **Deputy Editor-in-Chief**

Dr. Abdullah KAPICIOĞLU

### **Executive Editor-in-Chief**

Prof. Dr. Messaoud SAIDANI  
Prof. Dr. Niyazi BULUT  
Prof. Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU  
Asst. Prof. Dr. Salwa BOUADILA

---

### **Associate Editor**

Prof. Dr. Tahir KHAN  
Prof. Dr. Şükrü TALAŞ  
Prof. Dr. Asaf VAROL  
Prof. Dr. Mehmet EROĞLU  
Assoc. Prof. Dr. İbrahim CAN  
Assoc. Prof. Dr. Reza BAKHTIARI  
Assoc. Prof. Dr. Jose SENA-CRUZ  
Assoc. Prof. Dr. H. Mehmet BAŞKONUŞ

Assoc. Prof. Dr. Mevlüt ALATAŞ  
Asst. Prof. Dr. Serdar MERCAN  
Asst. Prof. Dr. Ferit AK  
Asst. Prof. Dr. Alper POLAT  
Asst. Prof. Dr. Yusuf DOĞAN  
Asst. Prof. Dr. Kouider BENDINE  
Asst. Prof. Dr. Nagihan M. KARAASLAN  
Dr. Berivan POLAT

### **Secretariat**

Instructor Habip ŞAHİN

Res. Asst. Cihangir KALE

---

International Journal of Innovative Engineering Applications is published June and December.

Adress for the manuscripts and correspondence:  
Uluslararası Yenilikçi Mühendislik Uygulamaları Dergisi  
Fırat Üniversitesi Kampüsü, Teknoloji Fakültesi, Merkez–Elazığ

Tel: +90 424 237 0000/ Ext.7655  
e-mail: ijieatr@gmail.com

ISSN: 2587-1943

Elazığ-2019



# IJIEA

## volume 3 issue 2

### CONTENTS / İÇİNDEKİLER

Eklemeli İmalat Yönteminde Oluşan Isıl Değişimler ve Modellenmesi

Sayfalar: 33-38

*Onur Özsolak*

---

Elastik Yarı Sonsuz Düzlem Üzerine Oturan İki Tabakanın Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sürekli Temas Problemi Analizi

Sayfalar: 39-47

*Pınar Bora, Talat Şükrü Özşahin*

---

The Lifecycle Cost and CO2 Emission Analysis with the Building Information Modeling Applications

Sayfalar: 48-60

*Sare Gökçen Armutlu, Ayça Gülten*

---

Natural Ventilation Performance of Residential Urban Areas at Pedestrian Level: Comparison of Old and New Settlements

Sayfalar: 61-66

*Ayça Gülten*

---

Kaynak Bağlantılarında Hasar Analizi

Sayfalar: 67-75

*Serdar Mercan*

---



## THERMAL CHANGES AND MODELING IN ADDITIVE MANUFACTURING

Onur Özsolak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, Turkey

Review Paper

The use of additive manufacturing (AM) methods is constantly increasing in terms of application and market share. It continues to grow rapidly in industry such as energy, surgical implants, aerospace and automotive. In additive manufacturing method, design freedom is quite high and manufacturing time is faster than traditional methods. In order to make AM processes faster and more reliable, modeling of metal AM processes is of great importance for process and product optimization. In this study, thermal changes occurring in additive manufacturing method and their modeling are investigated.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Thermal Analysis, Modeling, Temperature Distribution

## EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE OLUŞAN ISIL DEĞİŞİMLER VE MODELLENMESİ

Derleme

Eklemlerli imalat (Eİ) yöntemlerinin kullanımı uygulama ve pazar payı açısından sürekli artış göstermektedir. Enerji, cerrahi implantlar, havacılık-uzay ve otomotiv gibi endüstri alanlarında büyümeye hızla devam etmektedir. Eklemlerli imalat yönteminde tasarım özgürlüğü oldukça fazla ve imalat süresi geleneksel yöntemlere göre daha hızlıdır. Eİ işlemlerinin daha hızlı ve daha güvenilir hale getirilmesi için metal Eİ süreçlerinin modellenmesi süreç ve ürün optimizasyonu için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada eklemlerli imalat yönteminde oluşan ısıl değişimler ve modellenmesi araştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemlerli İmalat, Termal Analiz, Modelleme, Sıcaklık Dağılımı

### 1 Giriş

Yeni sanayi devrimi olan Endüstri 4.0 akıllı üretim sistemlerinin ve gelişmiş bilgi teknolojilerinin entegrasyonunu teşvik etmektedir. Bu yeni teknoloji entegrasyonunda eklemlerli imalat yöntemi temel bir bileşen olarak kabul edilir. Eklemlerli imalat, işletme birimlerini birbirine bağlamak ve iş dağılımını sağlamak için oluşturulmuş olan endüstri 4.0 teknolojisi ekosisteminin temel bir parçasıdır.

Son birkaç yılda, havacılık ve motor sporları uygulamaları gibi ağırlık tasarruflarından faydalanabilecek alanlarda metal esaslı ana yapısal parça uygulamalarında eklemlerli imalat yöntemi üretimine önemli bir eğilim vardır. Eİ işlemlerinin daha hızlı ve daha güvenilir hale getirilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, metal Eİ süreçlerinin modellenmesi süreç ve ürün optimizasyonu için büyük önem arz ettiğinden gerek araştırmacılar gerekse imalatçılar için güncel bir konudur.

Purtonen ve ark., doğrudan lazer biriktirme (DLB) ve lazer kaplaması için temassız sıcaklık ölçüm yöntemlerinin ayrıntılı bir literatür taramasını yapmıştır [1].

Wang ve ark., ince bir paslanmaz çelik levhanın DLB 'si sırasında pirometri kullanarak, eritilmiş havuz içindeki sıcaklık dağılımının lazer giriş gücüne duyarlı olduğunu

ve incelenmiş olan lazer güçlerinin ön-boşluğunun likidus sıcaklığının üzerinde aşırı ısındığını göstermiştir [2].

Tang ve Landers, H13 takım çeliği için tek nozüllü DLB kullanarak, ortalama eriyik havuz sıcaklığının 2140 K civarında olduğunu tespit etmiştir. Eriyik havuzu sıcaklık dağılımı, işlem parametrelerinin değiştirilmesiyle deneysel olarak ölçülmüştür [3].

Peng ve ark., DLB sırasında özgül enerjinin, bir eriyik havuzunun temsili / şekli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Genel olarak, özgül enerji arttıkça, biriken katman yüksekliği, genişliği ve derinliğinin arttığını göstermiştir [4].

Parça boyunca enerji aktarımı, kendi içsel mikroyapısal evrimi ile doğrudan bağlantılıdır. Costa ve ark., termal enerji problemi önce belirli bir zaman adımı için çözülebilir, daha sonra mikroyapı ampirik korelasyonlarla belirlenir ve daha sonra bir sonraki termal zaman adımı gerçekleştirilebilir olduğunu göstermişlerdir [5].

Sonlu elemanlar analizindeki ticari programlar ile Nisar ve ark., katmanlı üretim işlemlerinde meydana gelen sıcaklık bölgesi için bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model ile sıcaklık bölgesini incelemişlerdir [6].

Kolossov ve ark., ise titanyum tozunun lazer ile sinterlenmesi esnasında titanyum toz yatağının üst kısmındaki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için sonlu

\* Corresponding author.

E-mail address: onurozsolak@gmail.com (O. Özsolak) | ORCID Number : 0000-0001-8219-9305

Received 31 October 2019; Received in revised form 10 December 2019; Accepted 13 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

elemanlar modeli geliştirmiştir. Buradaki sonlu elemanlar yöntemi modelinde sinterleme potansiyeli ve özgül ısı kapasitesi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaba katılmıştır. Aynı zamanda sıcaklık ölçümlerinin doğrulanması için toz yatağının üst kısmından infrared kamera ile ölçümler yapılmıştır [7].

Roberts ve ark., yaptığı çalışmada çok tabakalı taramayı içeren bir lazer ergitmeli prosesinde sıcaklık değişimini belirlemek için bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Proses sürecinde zaman ve sıcaklık ilişkisinde ısı transferinin malzeme üzerinde etkileri incelenmiştir [8].

Modelleme ve simülasyon, malzemelerin davranışını öngörmek ve uzun süreli, kapsamlı deney ihtiyacını azaltmak için kolaylaştırıcı bir yöntem olarak kullanılabilir. Romano ve ark., Ti6Al4V, paslanmaz çelik 316L ve 7075 Al tozları gibi yaygın olarak kullanılan malzemeler için sonlu elemanlar simülasyonu ile termal modelleme yaparak bu toz malzemelerin termal karakteristik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Toz yatağındaki sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu geometrisini lazer eritme işlemini termal modellemiştir [9].

Metal lazer sinterleme, metalik tozlardan doğrudan karmaşık şekilde parçalar üretmek için kullanılabilen bir toz yataklı eritme işlemidir. Toz yataklı eritme işlemlerinin başlıca problemlerinden biri, lazer ışınının sürekli hareketi sırasında, sıcaklık dağılımının homojen olmadığı ve toz içinde kararsız hale gelmesidir. Dong ve ark., titanyum esaslı toz malzemelerin lazer ile sinterlenmesinde üç boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımı ile ABAQUS yazılım paketi kullanılarak toz yatağı eritme

işleminde sıcaklık dağılımını tahmin etmek için çalışmışlardır [10].

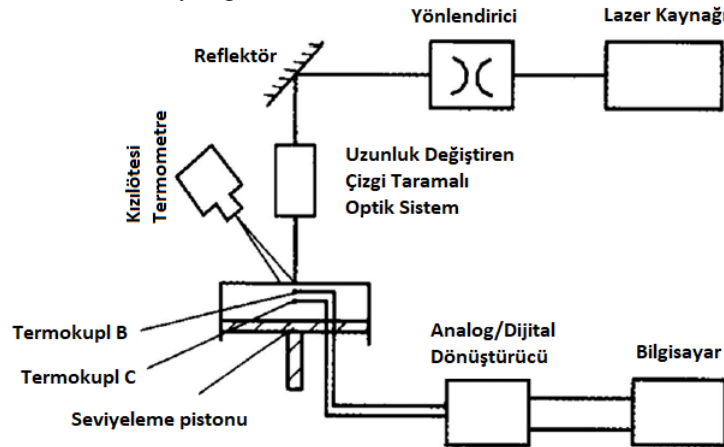
Eİ prosesi sürecinde oluşan ısı değişimlerin anlaşılması, malzeme mikroyapısının değişimini anlamak ve kontrol etmek için gereklidir. Eİ prosesi sürecinde parçanın termal sürecin bilinmesi bu açıdan önemlidir.

## 2 Materyal ve Metod

### 2.1 Eİ Yönteminde Termal Ölçme ve Görüntüleme

İmalat sırasında bir parçanın sıcaklık süreci geleneksel ölçüm aletleri kullanılarak deneysel olarak kaydedilebilir. Termokupullar sıcaklığı sadece noktasal olarak ölçerken termal kameralar sıcaklık dağılımının görüntüsünü vererek sıcaklık alanının değerlendirilmesinde daha fazla bilgi vermektedir. Bai ve ark., kızılötesi termometre ve termokupl sistemi kullanarak seçici lazer sinterleme yöntemi ile molibden tozunun polimer ile kaplanmasında termometre ile toz yüzeyindeki sıcaklığı ölçerken termokupl içerdeki sıcaklığı ölçmüştür [11]. Şekil 1' de bu sistem gösterilmektedir.

Termografik görüntüler, görüntüleme ekipmanının çözünürlük, örnekleme ve entegrasyon süresi ile sınırlıdır. Bazı malzemeler için DLB sırasında ortaya çıkan maksimum sıcaklıklar da yüksek sıcaklık kalibrasyonu veya yüksek derecede özelleştirilmiş ekipman gerektirir. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve eriyik havuzunun sıcaklığı, sıcaklık arttıkça daha görünür radyasyon (yani daha kısa dalga boyları) yayan kızılötesi (birçok metal için) radyasyon yayar [12].



Şekil 1. Kızılötesi termometre ve termokupl bileşenli sıcaklık ölçüm sistemi [11]

Termal izleme, DLB işlem verimliliğini arttırmaya yardımcı olsada, DLB yapı odası, uygulanan termografi için elverişli değildir. Lazer radyasyonunun yaklaşık üçte ikisi yayılır / yansır ve bu da ölçüm ekipmanını etkileyebilir. Ayrıca, ince toz partikülleri görüş hattını kısmen gölgelemekte ve ölçülecek bölge sürekli olarak pozisyon değiştirmektedir. DLB eriyik havuzunun yakın çevresinde nispeten sert olan ortam, ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek birçok termal radyasyon kaynağından oluşmaktadır yayma, yansıma ve plazma etkileşimini içerir [1]. Hedefi çevreleyen ortam da dikkate alınmalıdır.

Hedefe yakın olan nesnelere, hedeften yansıyan karışık radyasyon sağlayabilir. Çevreleyen üfleme tozu ve inert gaz da termal radyasyonun saçılmasını ve emilmesini sağlar.

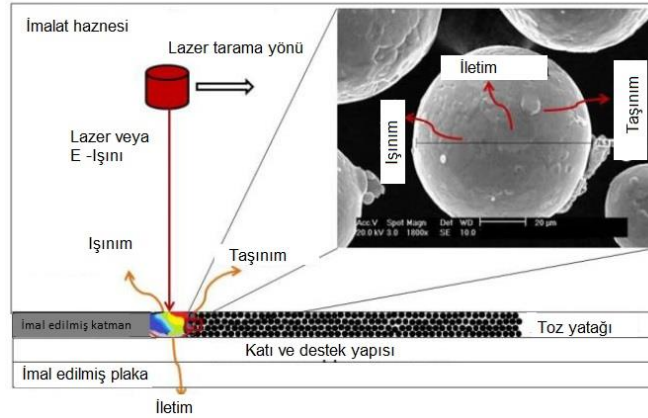
### 2.2 Termal (Isı) Analiz ve Sayısal Modelleme

Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde bulunan çeşitli birleştirme işlemleri mevcut birçok karmaşık fiziksel özelliğin bir sonucudur. Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde hem ısı hem de kütle transferi makro

ve mikroskobik ölçeklerde başlı başına bir problem kaynağıdır [9]. Şekil 2 'de toz yataklı işlemlerde bulunan makroskobik ve mikroskobik ısı transferi mekanizmaları gösterilmektedir.

Eİ prosesi sürecinde kullanılan besleme malzemesinin enerji emilimi, sıcaklık profilini, metal biriktirme geometrisini, katılaşmayı, iç yapıyı ve nihai ürünün

özelliklerini etkilemektedir. Enerji emili enerji kaynağının özelliklerine göre değişmektedir. Lazerler, elektron ışınları ve plazma arklar için çap ve güç yoğunluk dağılımı ısı kaynağı için önemli özelliklerdir. Bu ısı kaynaklarının güç yoğunluğu dağılımı genellikle Gauss ışın profilleri ile anlaşılmalı çalışılmaktadır [13].



Şekil 2. Makro ölçekli ve mikro ölçekli ısı transfer modeli ve ısı kaynağının yönelimi [9]

Biriktirilen malzemeden parçaya kadar, proses sürecinde çok sayıda etkili termal ve akışkan olayı vardır: Bunlar eriyik havuzu başlatma (toz eritme), eriyik havuzu aşırı ısıtma ve katılaşma, eriyik havuzu akışkanlar mekaniği ve ıslatma davranışı, konveksiyon ve termal radyasyonu içeren sınır ısı transferi (parçadan çevreye ve tersi) ve iletimi içeren (eriyik havuzdan alt katmana) iç kısım ısı transferi ve ısı üretimi / tahribatı (katı hal dönüşümleri ile ilgili) içeren termal ve akışkan olaylarıdır.

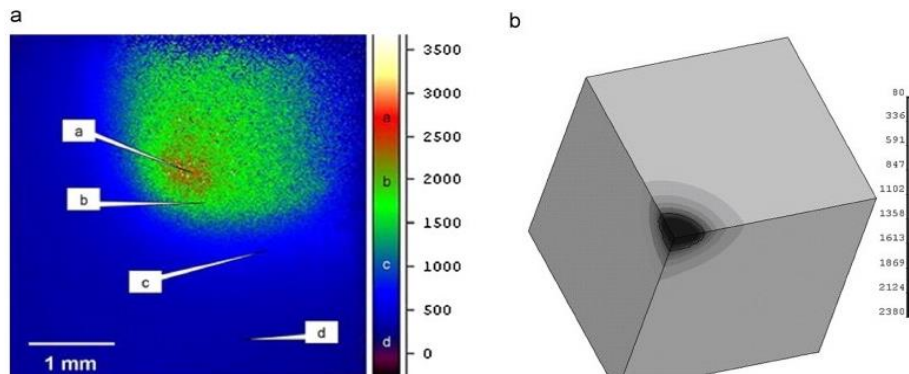
Eriyik havuzu ve parça içi ısı transferinin termal / akışkan davranışı, nihai parça kalitesine önemli bir bakış açısı sağladığından, DLB sürecini anlamak ve optimize etmek, iş sırasında meydana gelen termal / akışkan olaylarının anlaşılmasını gerektirir. Lazer ile metal biriktirme yöntemi için ısıl analiz literatürü incelendiğinde eriyik havuz termal / akışkan davranışı, katılaşma, ısı transferi, termal görüntüleme gibi alt başlıklar göze çarpmaktadır [12].

Katılaşma simülasyonu birçok farklı yolla ele alınabilir, modelleyici mikroskobik veya makroskobik bir yaklaşımı alabilir. Makroskobik yaklaşımda ısı ve kütle korunum denklemleri sonlu fark / elemental yöntemler ile

çözülebilir. Bu makroskobik yaklaşımlarda, mantar bölgesi oldukça basitleştirilebilir [14].

Sayısal olarak DLB sürecini modellemede karşılaşılan ortak zorluklar şunları içerir: kütle ekleme, 3 boyutlu nesnelerin çoklu iz biriktirme etkileri, sıcaklığa bağlı özellikler, erime/katılaşma ve eriyik havuzu akışkan dinamiği/ıslatma davranışı. Simülasyonun mesh şeması ve boyutsallığı da önemlidir çünkü bu daha doğru sonuçlar sağlayabilir. Termo-kinetik modeller, sıcaklık alanını, parçadaki mikroyapısal dağılımın tahmin edilmesine yardımcı olmak için ampirik mikroyapı-özellik ilişkileri ile birleştirmek için kullanılabilir [5].

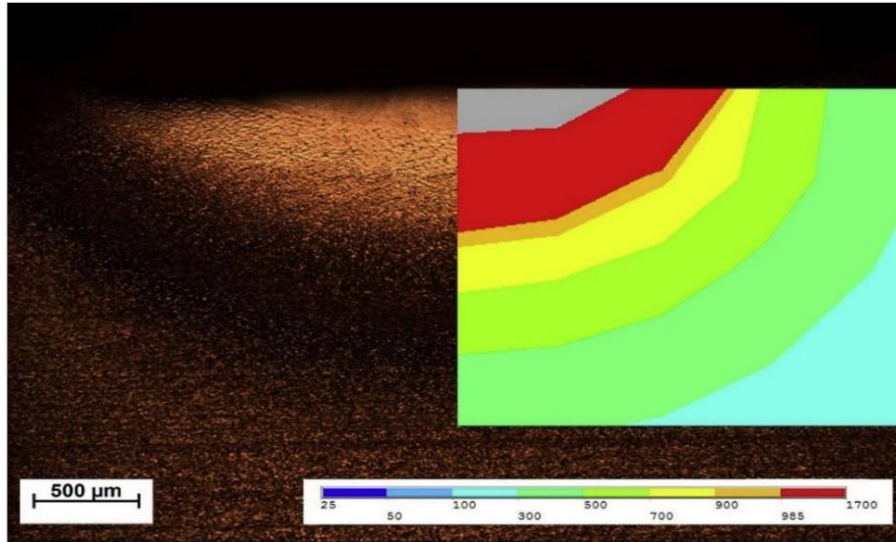
Fischer ve ark., gerçekleştirdiği deneysel çalışmadaki verileri kullanarak yapılan modellemenin deneysel sonuçlara yakın sonuçları tahmin edebildiğini vurgulamışlardır [15]. Referans çalışmada Titanyum tozunun seçici lazer ile sinterlenerek yüzey sıcaklığı bir Raytheon kızılötesi kamera ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmadaki yüzeydeki sıcaklık dağılımı ve simülasyondaki tahmin edilen değerler Şekil 3 'de gösterilmektedir.



Şekil 3. (a) Kızıl ötesi kamera ile ölçülen sıcaklık dağılımı (Kelvin) (b) Simülasyon modelindeki (Çeyrek simetri modeli) sıcaklık dağılımı (°C) [15]

Tang ve ark., Ti-22Al-25Nb malzemeden lazer esaslı eklemeli imalat yöntemi ile ince cidarlı numuneler imal etmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile ısı süreç incelenerek Ti esaslı numunenin mikro yapı analizi, mikro sertlik ve çekme testleri ile sayısal modelleme

doğrulanmıştır. Çalışmada eriyik havuzu ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) morfolojisindeki sıcaklık dağılımını doğrulamak için Ti esaslı alaşımın optik görüntülerini kullanmışlardır (Şekil 4) [16].

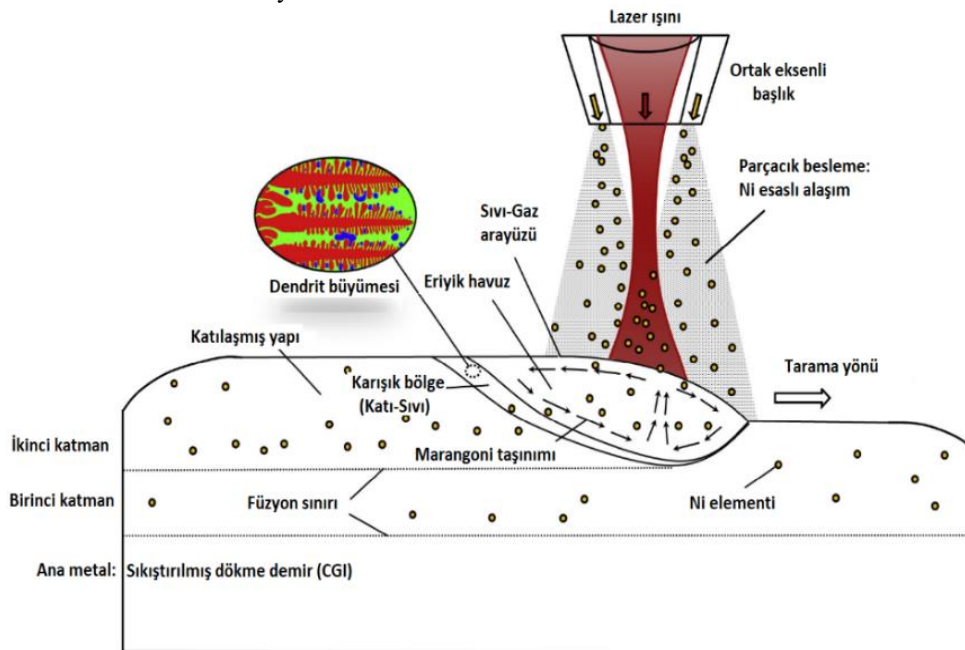


Şekil 4. Ti-22Al-25Nb numunenin eriyik bölgesi ve ITAB morfolojisine ait optik mikroskop görüntüsünün (sol kısım) sayısal simülasyon (sağ kısım) ile karşılaştırılması [16]

Gan ve ark., yapmış olduğu bu çalışmada, üç boyutlu bir sayısal modelleme geliştirilerek dökme demir üzerinde nikel esaslı alaşımların çok katmanlı olarak imal edilmesi Marangoni etkisi, termal davranış, bileşimin taşınımı, katılaşma davranışı ve dendrit büyümesi gibi çok yönlü fiziksel özelliklerin tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen tahmin modelinin yapılan deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür [17].

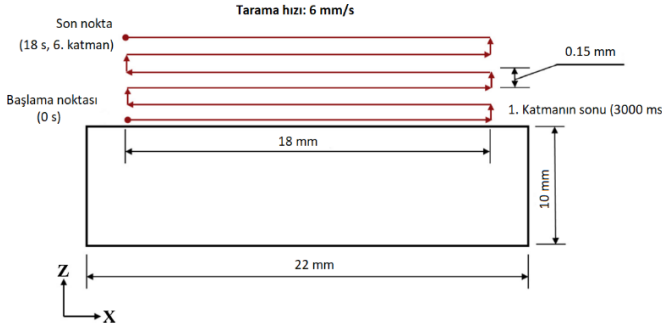
Gri dökme demir üzerindeki Ni esaslı alaşımının çok katmanlı lazer esaslı eklemeli imalat yönteminde ısı

taşınımı, katılaşma davranışı ve çözünen maddenin taşınımının anlaşılması için geçici, ısı ve kütle transferinin, sıvı metal akışının üç boyutlu sayısal modeli geliştirilmiştir. Hesaplanan erimiş eriyik havuz geometrisi ve bileşen profili ilgili deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [17]. Çok katmanlı eklemeli imalat için çok yönlü fiziksel özellikler Şekil 5’de gösterilmektedir.



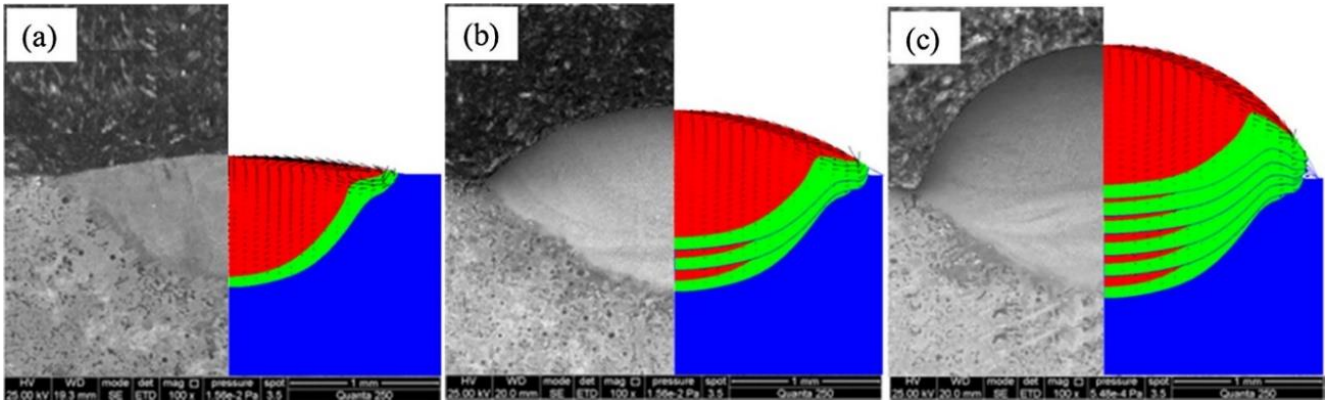
Şekil 5. Çok katmanlı eklemeli imalatta çoklu fiziksel özellikler [17]

Gri (grafitli) dökme demir üzerindeki Ni esaslı alaşımın altı katmanlı eklemeli imalat prosesi sayısal olarak simüle edilmiştir [17]. Şekil 6 altı katmanlı eklemeli imalat prosesinin şematik görüntüsüdür.



Şekil 6. 6 katmanlı eklemeli imalat sürecinin şeması [17]

Farklı katmanlardaki erimiş havuzun hesaplanan geometrisinin kesitleri ve deneysel kesitleri Şekil 7 'de



Şekil 7. Deneysel ve hesaplanmış kesitlerinin karşılaştırması: (a) bir katman, (b) üç katman, (c) altı katman [18]

Tablo 1. Sıcaklık ve akışkan akışı için mevcut yaklaşımların karşılaştırılması [13]

Yaklaşım	Özellikler
<i>Analitik Yaklaşım</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Analitik olarak Rosenthal'ın ısı iletim eşitliğini çözer</li> <li>✓ Çıktıları sıcaklık alanı, son boyutlar ve soğutma oranı</li> <li>✓ Hesaplama maliyeti nispeten ucuz, kullanımı kolay ve</li> <li>✓ Etkili ısı transferi mekanizmalarını dikkate almaz ve bilinen hata oranı büyüktür</li> </ul>
<i>Sonlu Elemanlar Metodu ile Isı İletim Modeli</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sürekli ve geçici hal enerji korunumu eşitliği ile taşınım ve ışıma sınır koşullarını çözer</li> <li>✓ Çıktıları 3B sürekli ve geçici hal sıcaklık dağılımı, son boyut ve şekil</li> <li>✓ Karmaşık geometrilerin çözümü için uygulanabilen yazılım paketleri</li> <li>✓ Eriyik havuzundaki sıcaklık bölgesinde sıvı metalin taşınım akışını dikkate almaz. Bu nedenle pik sıcaklığı ve soğutma oranını değerinden fazla tahmin eder</li> </ul>
<i>Sonlu Farklar Metodu ile Isı Transferi ve Akışkan Akışı Modeli</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 3B geçici kütle korunumu eşitliği, momentum ve enerjiyi çözer</li> <li>✓ Çıktıları 3B geçiş sıcaklığı, hız dağılımı, katılma parametleri son şekil ve boyut</li> <li>✓ Eriyik havuzundaki eriyik akışını dikkate alır ve bu nedenle kesin doğru sıcaklık dağılımını sağlar</li> <li>✓ Hesaplamaları çözülebilir yapmak için biriken kısmın üst geometrisini düz kabul eder</li> </ul>
<i>Seviye Ölçüm Metodu</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Eriyik havuzunun serbest yüzeyini izler</li> <li>✓ Çıktıları serbest eğri yüzeyinin 3B sıcaklık ve hız dağılımı</li> <li>✓ Hesaplanan birikintinin şekil ve boyutu deney ile oldukça uyumludur</li> <li>✓ Hesaplamalar hassas ve kütle korunumuna izin verme eğilimindedir</li> </ul>
<i>Sonlu Farklar Metodu ile Akışkan Hacim Modeli</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Eriyik havuzunun serbest yüzeyini izler</li> <li>✓ Çıktıları serbest eğri yüzeyinin 3B sıcaklık ve hız dağılımı</li> <li>✓ Hassas hesaplamalar</li> <li>✓ Seviye ölçüm metodu'na kıyasla kütle korunumu en az keskin ara yüzey içindir</li> </ul>
<i>Lattice Boltzman Metodu ve Keyfi Lagrangian-Eulerian</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 2B ve 3B numerik metotlar ile hücresel otomat modelleme, ayrık uzay, zaman ve parçacık hızları ile ayrık parçacık kinetiği</li> <li>✓ Serbest yüzey koşullarında termodinamik işlemi, yüzey gerilimi, faz geçişleri ve ıslatma</li> <li>✓ Çıktıları eriyik havuzu geometrisi, son parça boyut ve şekli</li> <li>✓ Son parçanın geometrisini doğru tahmin eder, yumru hatası ve yüzey pürüzlülüğü simüle edilebilir</li> <li>✓ Hassas hesaplamaları olduğu için kütle paralel hesaplamaya uygundur</li> </ul>



### 3 Bulgular ve Sonuç

Eİ işlemlerinin daha hızlı ve daha güvenilir hale getirilmesi için metal Eİ süreçlerinin modellenmesi süreç ve ürün optimizasyonu için büyük önem arz etmektedir.

Eklemeli imalat yöntemi ile imalat esnasında oluşan ısıl değişimlerin ve termal sürecin bilinmesi malzeme mikroyapısının değişimini anlamak ve kontrol etmek için oldukça önemlidir.

İlgili literatür ışığında bu çalışmada aşağıdaki belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Eklemeli imalatla katılma esnasında termal akış olayı ısı transferini doğrudan etkiler ve böylece parçanın mikro yapısını ve ilgili termomekanik özellikleri etkiler.
2. Eklemeli imalat sürecinin optimizasyonu, tutarlı olabilmesi ve yüksek kaliteli parçaların sağlanması için termal / akışın yönünü tam olarak anlamak çok önemlidir.
3. Termal davranışın kontrolü, ürün tekrarlanabilirliğini ve kalitesini sağlayan bir araçtır.
4. Mikroyapı ve sonuçtaki mekanik özelliklerini kontrol etmek için, katman esaslı üretim prosesi sırasında termal gradyanlarını, lokal-katılma olaylarını ve artık gerilmelerini anlamak ve tahmin etmek büyük önem taşımaktadır.
5. Sonlu eleman yöntemleri ve sayısal akışkanlar dinamiği çok yönlü-fiziksel DLB problemini modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışma, 2018 - 1. Dönem - TÜBİTAK 2219 Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında, "Lazer ile Metal Biriktirme Yöntemiyle Eklemeli İmalatta Isı Tesiri Etkisinde Kalan Bölgenin Sayısal ve Deneysel Olarak Araştırılması" adlı proje ile desteklenmeye değer bulunmuştur. TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

### 4 Kaynaklar

- [1] Purtonen, T., Kalliosaari, A., Salminen, A., Monitoring and adaptive control of laser processes, *Physics Procedia*, 56, 1218–1231, 2014.
- [2] Wang, L., Felicelli, S.D., Craig, J.E., Experimental and numerical study of the LENS rapid fabrication process, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131, 041019-8, 2009.
- [3] Tang, L., Landers, R.G., Melt pool temperature control for laser metal deposition processes-Part I: Online temperature control, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132, 011010-9, 2010.
- [4] Peng, L., Taiping, Y., Sheng, L., Dongsheng, L., Qianwu, H., Weihao, X., Xiaoyan, Z., Direct laser fabrication of nickel alloy samples, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 45, 1288–1294, 2005.
- [5] Costa, L., Vilar, R., Reti, T., Deus, A.M., Rapid tooling by laser powder deposition: process simulation using finite element analysis, *Acta Materialia*, 53, 3987–3999, 2005.

- [6] Nisar, A., Schmidt, M.J.J., Sheikh, M.A., Li, L., Three-dimensional transient finite element analysis of the laser enamelling process and moving heat source and phase change considerations, In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 217, 753–764, 2003.
- [7] Kolossov, S., Boillat, E., Glardon, R., Fischer, P., Locher, M., 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 117–123, 2004.
- [8] Roberts, I.A., Wang, C.J., Esterlein, R., Stanford, M., Mynors, D.J., A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 916–923, 2009.
- [9] Romano, J., Ladani, L., Sadowski, M., Thermal modeling of laser based additive manufacturing processes within common materials, *Procedia Manufacturing*, 1, 238–250, 2015.
- [10] Dong, L., Correia, J.P.M., Barth, N., Ahzi, S., Finite element simulations of temperature distribution and of densification of a titanium powder during metal laser sintering, *Additive Manufacturing*, 13, 37–48, 2017.
- [11] Bai, P.K., Cheng, J., Liu, B., Wang, W.F., Numerical simulation of temperature field during selective laser sintering of polymer-coated molybdenum powder, *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 16, 603–607, 2006.
- [12] Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N., Yadollahi, A., An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics, *Additive Manufacturing*, 8, 36–62, 2015.
- [13] DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Heid, A.W., De, A., Zhang, W., Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, 92, 112–224, 2018.
- [14] Grujicic, M., Cao, G., Figliola, R.S., Computer simulations of the evolution of solidification microstructure in the LENS rapid fabrication process, *Applied Surface Science*, 183, 43–57, 2001.
- [15] Fischer, P., Locher, M., Romano, V., Weber, H.P., Kolossov, S., Glardon, R., Temperature measurements during selective laser sintering of titanium powder, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 1293–1296, 2004.
- [16] Tang, Y.J., Zhang, Y.Z., Liu, Y.T., Numerical and experimental investigation of laser additive manufactured Ti2AlNb-based alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 196–204, 2017.
- [17] Gan, Z., Liu, H., Li, S., He, X., Yu, G., Modeling of thermal behavior and mass transport in multi-layer laser additive manufacturing of Ni-based alloy on cast iron, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 709–722, 2017.
- [18] Liu, H., Hao, J., Han, Z., Yu, G., He, X., Yang, H., Microstructural evolution and bonding characteristic in multi-layer laser cladding of NiCoCr alloy on compacted graphite cast iron, *Journal of Materials Processing Technology*, 232, 153–164, 2016.
- [19] Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389–405, 2016.



## THE CONTACT PROBLEM ANALYSIS OF TWO LAYERS RESTED ON AN ELASTIC SEMI-INFINITE PLANE USING ANALYTICAL AND FINITE ELEMENT METHODS

Pınar Bora<sup>1</sup>, Talat Şükrü Özşahin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Turkey

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Karadeniz Technical University, Turkey

Original Scientific Paper

In this study, the continuous contact problem of two layers which are rested on an elastic semi-infinite plane loaded by two rigid blocks is analyzed. In the problem, all surfaces are considered frictionless and the mass forces of the layers are included. The analytical solution of the problem is performed by using elasticity theory and integral transformation techniques, firstly. The initial separation loads  $\lambda_{cr}$ , initial separation distances  $x_{cr}$ , and normal stresses  $\sigma_y$  which occur the layers and between the substrate and the elastic semi-infinite plane are obtained. Then, the finite element model of the problem is constituted with the ANSYS program. The results obtained from the analytical solution are compared with those obtained from the finite element model. The results are shown in table and graphs.

**Keywords** Continuous Contact, Elastic Layer, Rigid Blok, Integral Equation, Finite Element Method

## ELASTİK YARI SONSUZ DÜZLEM ÜZERİNE OTURAN İKİ TABAKANIN ANALİTİK YÖNTEM VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SÜREKLİ TEMAS PROBLEMİ ANALİZİ

Orijinal Bilimsel Makale

Bu çalışmada, iki rijit dikdörtgen blok ile yüklenmiş elastik yarı sonsuz düzlem üzerine oturan iki tabakanın sürekli temas probleminin analizi yapılmıştır. Problemden tüm yüzeyler sürtünmesiz kabul edilmiş ve tabakaların kütle kuvvetleri dahil edilmiştir. Öncelikle elastisite teorisi ve integral dönüşüm teknikleri kullanılarak problemin analitik çözümü yapılmıştır. Tabakalar arasında ve alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem arasında meydana gelen ilk ayrılma yükleri  $\lambda_{cr}$ , ilk ayrılma uzaklıkları  $x_{cr}$ , ve  $\sigma_y$  normal gerilmeleri elde edilmiştir. Daha sonra ise problem sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı ANSYS paket programı yardımıyla modellenmiştir. Analitik çözümden elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Sonuçlar tablo ve grafikler halinde gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürekli Temas, Elastik Tabaka, Rijit Blok, İntegral denklemler, Sonlu Elemanlar Metodu

### 1 Giriş

Mühendislikte pek çok durumda yapı elemanları birbiri ile temas halindedir ve yükler yapıların farklı elemanları veya bölümleri arasındaki temas ile aktarılır. Bu nedenle temas problemleri pratik öneme sahip mühendislik yapılarında geniş uygulama alanları bulmuşlardır.

Temas mekaniği konusunun Hertz tarafından 1882 yılında yazılan “Elastik Cisimlerin Teması” adlı makale ile başladığı söylenilebilir. Hertz’in yapmış olduğu bu çalışma sürtünmesiz yüzey ve tam elastik cisimlerle sınırlandırılmıştır [1]. Ratwani ve Erdoğan, değişik profillerdeki blok ile bastırılan ve elastik yarım düzleme oturan sürtünmesiz düzlemsel temas problemini incelemişlerdir [2]. Geçit ve Gökpınar, rijit dairesel bir mesnete oturan elastik tabakanın temas problemini, tabaka ve mesnetler arasında sürtünme olmadığı temas yüzeyleri boyunca sadece basınç gerilmelerinin aktarıldığı varsayarak incelemişlerdir [3]. Giannakopoulos ve Pallot, elastik yarı sonsuz düzlem üzerine oturan silindirik rijit bir blok aracılığı ile

yüklenmiş elastik tabakanın sürtünmesiz temas problemini incelemiştir [4]. Özşahin ve Taşkın, rijit üç blok ile yüklenmiş elastik yarı sonsuz düzlem üzerine oturan tabakanın temas problemini incelemişlerdir [5]. Literatürde elastik yarı sonsuz düzlem üzerine oturan farklı yükleme özelliklerine sahip elastik tabaka veya tabakaların sürtünmesiz sürekli ve sürekli temas problemlerine sıklıkla rastlamak mümkündür [6-14].

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte, analitik çözümlerde karmaşık matematiksel denklemlerin çözülmesi daha kolay ve daha kısa sürede gerçekleştiği için araştırmacılar, problemlerin çözümünde yaklaşık yöntemler kullanmaya başlamışlardır. Bununla birlikte çalışmaların sayısı önemli ölçüde artış göstermiştir. Sezer, ANSYS Sonlu Elemanlar paket programını kullanarak temas eden sistem yapı elemanlarını modellemiş ve ANSYS paket programı içerisinde bulunan değişik temas algoritmaları ve temas elemanı uygulama seçeneklerini irdelemiştir [16]. Kanber, iki boyutlu temas problemlerini geçiş elemanları kullanarak Sonlu Elemanlar Metodu ile incelemiştir [17]. Yaylacı, düzgün yayılı yük ile yüklü simetrik iki çeyrek düzleme oturan iki elastik tabakanın

\* Corresponding author.

E-mail address: [pyildirim@cumhuriyet.edu.tr](mailto:pyildirim@cumhuriyet.edu.tr) (P. Bora) | ORCID Number : 0000-0001-8932-1828

Received 31 October 2019; Received in revised form 8 December 2019; Accepted 10 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

simetrik iki çeyrek düzleme oturan iki elastik tabakanın sürtünmesiz temas problemini elastisite teorisine göre incelemiş ve aynı problemi sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS paket programı ile analiz etmiştir [18]. Polat vd. Elastik yarı sonsuz düzlem üzerine oturan iki dikdörtgen blok ile yüklenmiş fonksiyonel derecelendirilmiş tabakadaki sürekli temas problemini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir [19]. Yine literatürde sonlu elemanlar yöntemi ve ANSYS gibi paket programlar yardımı ile çözümlenen pek çok çalışmaya rastlamak mümkündür [ 20-28]. Bu çalışmada amaç, iki rijit dikdörtgen blok ile yüklenmiş elastik iki tabakanın sürekli temas problemini her iki yüzey içinde analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyerek sonuçları kıyaslamaktır. Problemde hem tabakalar hem elastik yarı sonsuz düzlem homojen ve izotropdur.

## 2 Problemin Analitik Çözümü

Problemin çözümünde ilk olarak denge denklemleri, bünye denklemleri, yer değiştirme ve şekil değiştirme bağıntıları yardımıyla Navier denklemleri elde edilmiştir. Navier denklemlerine, Fourier integral dönüşüm tekniği uygulanarak bir grup adi diferansiyel denklem takımı elde edilmiştir.

Tekil integral denklemlerin çözümünde ise Gauss-Chebyshev integrasyon formüllerinden faydalanılmıştır. Dış yükler P ve Q tabakalara iki düz blok ile aktarılmaktadır.  $(+\infty, -\infty)$  aralığında uzanan  $h_1$  ve  $h_2$  yüksekliğindeki sürtünmesiz iki tabakaya ait geometri ve eksen takımı şekil 1'de görülmektedir. Problemin çözümünde tabaka yükseklikleri eşit alınmıştır. Genel denklemler:

ivmesidir.  $u_k$  ve  $v_k$ , x ve y eksenini doğrultularındaki yer değiştirme bileşenlerini,  $\mu_k$  ve  $\kappa_k$  ise kayma modüllerini ve elastik malzeme sabitlerini göstermektedir.  $\kappa_k$  elastik tabakalara ait malzeme sabitlerinin düzlem şekil değiştirme halinde  $\kappa_k = (3-4\nu_k)$ , düzlem gerilme halinde ise  $\kappa_k = (3-\nu_k)/(1+\nu_k)$  olduğu bilinmektedir.  $\nu_k$  poisson oranını göstermektedir ( $k=1,2$ ). 1ve 2 indisi elastik tabakaları göstermektedir.

$u_p$  ve  $v_p$  kütle kuvvetlerinin dahil edilmesi durumunda meydana gelen yer değiştirmeleri,  $u_h$  ve  $v_h$  ise kütle kuvvetinin ihmal edilmesi durumunda meydana gelen yer değiştirmeleri göstermektedir. Toplamda meydana gelen yer değiştirmeler ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

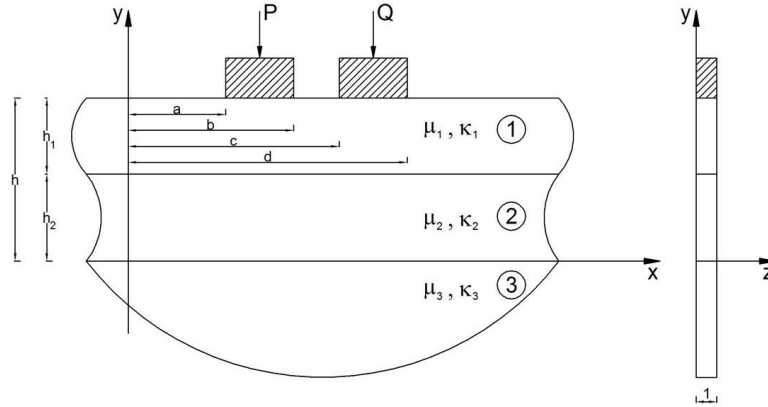
$$u = u_p + u_h \quad (3)$$

$$v = v_p + v_h \quad (4)$$

Navier denklemlerini adi diferansiyel denklem takımına dönüştürmek ve çözümü kolaylaştırmak için yer değiştirmeler  $u(x,y)$  ve  $v(x,y)$ , bilinmeyen fonksiyonlar

$U = (x, y)$ ,  $V = (x, y)$  'nin Fourier dönüşümleri olarak tanımlanırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$u_h(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x, y) e^{i\alpha x} d\alpha \quad (5)$$



Şekil 1. Problemin geometrisi

$$\mu_k \nabla^2 u_k + \frac{2\mu_k}{(\kappa_k - 1)} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\mu_k \nabla^2 v_k + \frac{2\mu_k}{(\kappa_k - 1)} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) = \rho_k g \quad (2)$$

burada  $\rho_k g$  y eksenini doğrultusundaki kütle kuvveti,  $\rho_k$  ve  $g$  ise sırasıyla tabakanın yoğunluğu ve yer çekimi

$$v_h(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_1(x, y) e^{i\alpha x} d\alpha \quad (6)$$

Burada  $i = \sqrt{-1}$  'dir. (5) ve (6) nolu denklemlerde verilen yer değiştirmelerin türevleri (1) ve (2) nolu denklemlerde yerine yazılıp elde edilen ikinci dereceden diferansiyel denklemlerin çözümüyle x ve y doğrultularındaki yer değiştirmeler aşağıdaki gibi bulunur.

$$u_{ih}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{ie^{-|\alpha|y} [-A_i \frac{|\alpha|}{\alpha} + B_i(\frac{\kappa_i}{\alpha} - \frac{|\alpha|}{\alpha} y)] + ie^{|\alpha|y} [C_i \frac{|\alpha|}{\alpha} + D_i(\frac{\kappa_i}{\alpha} + \frac{|\alpha|}{\alpha} y)]\} e^{i\alpha x} d\alpha \quad (7)$$

$$v_{ih}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{ie^{-|\alpha|y} [A_i + B_i y] + ie^{|\alpha|y} [C_i + D_i y]\} e^{i\alpha x} d\alpha \quad (8)$$

1 ve 2. tabakalar için gerilme denklemleri Hooke Kanunları ve (7) ve (8) nolu denklemler kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\sigma_{x_{i_h}}(x, y) = -\frac{\mu_i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \{e^{-|\alpha|y} \{-2A_i |\alpha| + B_i[(\kappa_i + 3) - 2|\alpha|y]\} + e^{|\alpha|y} \{2C_i |\alpha| + D_i[(\kappa_i + 3) + 2|\alpha|y]\}\} d\alpha$$

$$\sigma_{y_{ih}}(x, y) = \frac{\mu_i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \{e^{-|\alpha|y} \{-2A_i |\alpha| + B_i[(\kappa_i - 1) - 2|\alpha|y]\} + e^{|\alpha|y} \{2C_i |\alpha| + D_i[(\kappa_i - 1) + 2|\alpha|y]\}\} d\alpha \quad (10)$$

$$\tau_{xy_{ih}}(x, y) = \frac{i\mu_i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \{e^{-|\alpha|y} \{2A_i \alpha + B_i[-\frac{|\alpha|}{\alpha}(\kappa_i + 1) + 2\alpha y]\} + e^{|\alpha|y} \{2C_i \alpha + D_i[\frac{|\alpha|}{\alpha}(\kappa_i + 1) + 2\alpha y]\}\} d\alpha \quad (11)$$

Şekil 1a' da verilen eksen takımına göre  $y = -\infty$  durumunda yer değiştirmeler sıfırdır ve elastik yarı sonsuz düzlemin elastik sabitlerinin  $\mu_3, \nu_3$  olması durumunda elastik yarı sonsuz düzlem için gerilme ve yer değiştirme bağıntıları aşağıda gösterildiği gibi elde edilebilir.

$$v_{3_h}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{ie^{|\alpha|y} [A_3 + B_3 y]\} e^{i\alpha x} d\alpha \quad (12)$$

$$u_{3_h}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{ie^{|\alpha|y} [A_3 \frac{|\alpha|}{\alpha} + B_3(\frac{\kappa_3}{\alpha} + \frac{|\alpha|}{\alpha} y)]\} e^{i\alpha x} d\alpha \quad (13)$$

$$\sigma_{x_{3_h}} = -\frac{\mu_3}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \{e^{|\alpha|y} \{2A_3 |\alpha| + B_3[(\kappa_3 + 3) + 2|\alpha|y]\}\} d\alpha \quad (14)$$

$$\sigma_{y_{3_h}} = \frac{\mu_3}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \{e^{|\alpha|y} \{2A_3 |\alpha| + B_3[(\kappa_3 - 1) + 2|\alpha|y]\}\} d\alpha \quad (15)$$

$$\tau_{xy_{3_h}}(x, y) = \frac{i\mu_3}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha x} \{e^{|\alpha|y} \{2A_3 \alpha + B_3[\frac{|\alpha|}{\alpha}(\kappa_3 + 1) + 2\alpha y]\}\} d\alpha \quad (16)$$

1, 2, 3 numaralı indisler sırasıyla 1. tabaka, 2. tabaka ve elastik yarı sonsuz düzlemi temsil etmektedir.  $A_i, B_i, C_i$  ve  $D_i$  ( $i=1,2,3$ ) bilinmeyen katsayılar ise problemin sınır koşulları kullanılarak belirlenmiştir. Kütle kuvvetinin dahil edilmesi durumunda 1. tabaka ve 2. tabaka için  $\sigma_y$  boyutsuz gerilmelerine dahil edilecek değerler aşağıdaki gibi elde edilebilir [13].

$$\sigma_{1y_p} = \rho_1 g(y-h) \quad (17)$$

$$\sigma_{2y_p} = -\rho_1 g h_1 + \rho_2 g(y-h_2) \quad (18)$$

Sonuç olarak toplam gerilme değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{iy} = \sigma_{iyh} + \sigma_{iyp} \quad (19)$$

Aşağıda verilen sınır şartları kullanılarak bilinmeyen katsayılar elde edilmiştir.

$$\sigma_{y_1}(x, h) = \begin{cases} -p(x) & a \langle x \langle b \\ -q(x) & c \langle x \langle d \\ 0 & -\infty \langle x \langle a, b \langle x \langle c, d \langle x \langle \infty \end{cases} \quad (20)$$

$$\tau_{xy_1}(x, h) = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (21)$$

$$\tau_{xy_1}(x, h_2) = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (22)$$

$$\tau_{xy_2}(x, 0) = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (23)$$

$$\tau_{xy_2}(x, h_2) = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (24)$$

$$\sigma_{y_2}(x, h_2) = \sigma_{y_1}(x, h_2) \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (25)$$

$$[v_2(x, h_2) - v_1(x, h_2)] = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (26)$$

$$\tau_{xy_3}(x, 0) = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (27)$$

$$[v_2(x, 0) - v_3(x, 0)] = 0 \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (28)$$

$$\sigma_{y_2}(x, 0) = \sigma_{y_3}(x, 0) \quad -\infty \langle x \langle \infty \quad (29)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [v_1(x, h)] = 0 \quad a \langle x \langle b \quad (a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [v_1(x, h)] = 0 \quad c \langle x \langle d \quad (b) \quad (30a-b)$$

$p(x)$  ve  $q(x)$  sırasıyla 1.ve 2. blok altındaki bilinmeyen temas gerilmeleridir. Probleme ait denge şartları :

$$\int_a^b p(x)dx = P \quad (a)$$

$$\int_c^d q(x)dx = Q \quad (b) \quad (31a-b)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bilinmeyen temas gerilmelerinin belirlenebilmesi için (30a-b) nolu sınır şartları kullanılmıştır. Elde edilen katsayıların bu sınır şartlarında yerlerine konulup gerekli düzenlemeler yapılarak;

$$-\frac{1}{\pi} \frac{1}{\mu_1} \int_a^b p(t_1) dt_1 \left[ k_1(x_1, t_1) + \frac{1+\kappa_1}{4} \frac{1}{(t_1-x_1)} \right] - \frac{1}{\pi} \frac{1}{\mu_1} \int_c^d q(t_2) dt_2 \left[ k_1(x_1, t_2) + \frac{1+\kappa_1}{4} \frac{1}{(t_2-x_1)} \right] = 0 \quad (32)$$

$a < x_1 < b$

$$-\frac{1}{\pi} \frac{1}{\mu_1} \int_a^b p(t_1) dt_1 \left[ k_1(x_2, t_1) + \frac{1+\kappa_1}{4} \frac{1}{(t_1-x_2)} \right] - \frac{1}{\pi} \frac{1}{\mu_1} \int_c^d q(t_2) dt_2 \left[ k_1(x_2, t_2) + \frac{1+\kappa_1}{4} \frac{1}{(t_2-x_2)} \right] = 0 \quad (33)$$

$c < x_2 < d$

(32) ve (33) nolu integral denklem takımları elde edilmiştir.

Denklemden geçen  $k_1$  çekirdeği aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$k_1(x, t) = \int_0^\infty \{ \{ 16\alpha^3 (1 + (1 + \kappa_1)) (e^{-4\alpha h} - e^{-4\alpha h_2} - 4\alpha e^{-2\alpha h - 2\alpha h_2} (h - h_2)) (1 + \kappa_2) ma (-1 - \kappa_3 - (1 + \kappa_2) mb + e^{-4\alpha h_2} (1 + \kappa_3 - (1 + \kappa_2) mb) + 2e^{-2\alpha h_2} (-2\alpha h_2 (1 + \kappa_3) + (1 + \kappa_2) mb)) + (e^{-4\alpha h} + e^{-4\alpha h_2} - 2e^{-2\alpha h - 2\alpha h_2}) (1 + \kappa_1) (1 + \kappa_3 + (1 + \kappa_2) mb + e^{-4\alpha h_2} (1 + \kappa_3 - (1 + \kappa_2) mb) + 2e^{-2\alpha h_2} ((1 + 2\alpha^2 h_2^2) (-1 - \kappa_3) + 2\alpha h_2 + (1 + \kappa_2) mb)) \} / \Delta - (1 + \kappa_1) / 4 \} \{ \sin \alpha (t - x) \} d\alpha \quad (34)$$

$$\Delta = -64\alpha^3 \{ [-e^{-4\alpha h_2} - 2(2\alpha h - 2\alpha h_2) e^{-2\alpha h - 2\alpha h_2} + e^{-4\alpha h} (1 + \kappa_1) [e^{-4\alpha h_2} ((1 + \kappa_3) - (1 + \kappa_2) mb) - ((1 + \kappa_3) (1 + \kappa_2) mb) - 2e^{-2\alpha h_2} (-1 + 2\alpha^2 h_2^2) (1 + \kappa_3) + 2\alpha h_2 (1 + \kappa_2) mb] + [e^{-4\alpha h_2} - 2(1 + 2\alpha^2 (h - h_2)^2) e^{-2\alpha h - 2\alpha h_2} + e^{-4\alpha h} (1 + \kappa_2) ma [e^{-4\alpha h_2} ((1 + \kappa_3) - (1 + \kappa_2) mb) - ((1 + \kappa_3) + (1 + \kappa_2) mb) - 2e^{-2\alpha h_2} (-2h_2 (1 + \kappa_3) + (1 + \kappa_2) mb)]] \} \quad (35)$$

İntegral takımının sayısal çözümü için aşağıdaki boyutsuz büyüklükler tanımlanmıştır.

$$a < x_1 < b, c < x_2 < d$$

$$x_1 = \frac{b-a}{2} r_1 + \frac{b+a}{2} \quad t_1 = \frac{b-a}{2} s_1 + \frac{b+a}{2} \quad (36)$$

$$x_2 = \frac{d-c}{2} r_2 + \frac{d+c}{2} \quad t_2 = \frac{d-c}{2} s_2 + \frac{d+c}{2} \quad (37)$$

$$G_1 = P(s_1) / P/h \quad G_2 = q(s_2) / P/h \quad (38)$$

$$ma = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad mb = \frac{\mu_3}{\mu_2} \quad (39)$$

Tanımlanan bu boyutsuz büyüklükler (32) ve (33) nolu integral denklemlerde yerlerine yazıldığında;

$$-\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 g_1(s_1) \frac{b-a}{2h} ds_1 + [m_1(r_1, s_1) + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{\frac{b-a}{2}(s_1-r_1)}] - \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 g_2(s_2) \frac{d-c}{2h} ds_2 [m_2(r_1, s_2) + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{[\frac{d-c}{2}s_2 + \frac{d+c}{2}] - [\frac{b-a}{2}r_1 + \frac{b+a}{2}]}] = 0 \quad (40)$$

$$-\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 g_1(s_1) \frac{b-a}{2h} ds_1 [m_3(r_2, s_1) + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{[\frac{b-a}{2}s_1 + \frac{b+a}{2}] - [\frac{d-c}{2}r_2 + \frac{d+c}{2}]}] - \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 g_2(s_2) \frac{d-c}{2h} ds_2 [m_4(r_2, s_2) + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{[\frac{d-c}{2}(s_2-r_2)}] = 0 \quad (41)$$

$$m_1(r_1, s_1) = k_1(x_1, t_1), m_2(r_1, s_2) = k_1(x_1, t_2) \quad (42)$$

$$m_3(r_2, s_1) = k_1(x_2, t_1), m_4(r_2, s_2) = k_1(x_2, t_2) \quad (43)$$

denklemleri elde edilir. Burada  $g(s)$  rijit blok üzerinde ortaya çıkan boyutsuz temas gerilmesidir.  $g(s)$   $s = \pm 1$ 'de tekilliğe sahip olduğundan integral denklemin indeksi +1'dir [15].

$$g_i(s_i) = G_i(s_i) / (1 - s_i^2)^{1/2} \quad (-1 < s_i < 1) \quad (i=1,2) \quad (44)$$

olarak alınabilir. Uygun Gauss-Chebyshev integrasyon formülleri kullanılacak olursa (40) ve (41) nolu denklemler;

$$\begin{aligned}
 & -\sum_{i=1}^n W_i G_1(s_{1i}) \frac{b-a}{2h} [m_1(r_1, s_1) \\
 & + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{\frac{b-a}{2}(s_{1i}-r_{1j})}] \\
 & -\sum_{i=1}^n W_i G_2(s_{2i}) \frac{d-c}{2h} [m_2(r_1, s_2) \\
 & + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{[\frac{d-c}{2}s_{2i} + \frac{d+c}{2}][\frac{b-a}{2}r_{1j} + \frac{b+a}{2}]}] = 0 \\
 & (j=1, \dots, n-1) \tag{45}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\sum_{i=1}^n W_i G_1(s_{1i}) \frac{b-a}{2h} [m_3(r_2, s_1) + \frac{(1+\kappa_1)}{4} \\
 & \frac{1}{[\frac{b-a}{2}s_{1i} + \frac{b+a}{2}][\frac{d-c}{2}r_{2j} + \frac{d+c}{2}]}] - \\
 & \sum_{i=1}^n W_i G_2(s_{2i}) \frac{d-c}{2h} [m_4(r_2, s_2) + \\
 & \frac{(1+\kappa_1)}{4} \frac{1}{[\frac{d-c}{2}(s_{2i}-r_{2j})]}] = 0 \\
 & (j=1, \dots, n-1) \tag{46}
 \end{aligned}$$

şeklini alır.

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n \pi W_i G_1(s_{1i}) \frac{b-a}{2h} &= 1 \tag{a} \\
 \sum_{i=1}^n \pi W_i G_2(s_{2i}) \frac{d-c}{2h} &= Q/P \tag{b} \tag{47a-b}
 \end{aligned}$$

olarak elde edilir.

Bu eşitliklerde;

$$\begin{aligned}
 W_{1i} = W_{2i} \quad W_1 = W_n &= \frac{1}{2n-2} \\
 W_i &= \frac{1}{n-1} \quad i = 2, \dots, n-1 \tag{48}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s_{1i} = s_{2i} &= \cos\left(\frac{i-1}{n-1} \pi\right) \quad i = 1, \dots, n \tag{a} \\
 r_{1j} = r_{2j} &= \cos\left(\frac{2j-1}{2n-2} \pi\right) \quad j = 1, \dots, n-1 \tag{b} \tag{49a-b}
 \end{aligned}$$

olarak tanımlanmıştır. Böylece (45) ve (46) nolu denklemlerden n bilinmeyenli n tane denklem elde edilmiş olur. İntegral denklemlerden p(x) ve q(x) bulunduktan sonra elastik tabakalar ve alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem arasındaki  $\sigma_{y_1}(x, h_2)$  ve  $\sigma_{y_2}(x, 0)$  gerilme dağılışı

$$\begin{aligned}
 \sigma_{y_1}(x, h_2) &= -\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\pi} \int_a^b k_2(x, t_1) p(t_1) dt_1 - \\
 & \frac{1}{\pi} \int_c^d k_2(x, t_2) q(t_2) dt_2 \tag{50} \\
 & -\infty < x < \infty
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{y_2}(x, 0) &= -\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\pi} \frac{\mu_2}{\mu_1} \int_a^b k_3(x, t_1) p(t_1) dt_1 - \\
 & \frac{1}{\pi} \frac{\mu_2}{\mu_1} \int_c^d k_3(x, t_2) q(t_2) dt_2 \tag{51} \\
 & -\infty < x < \infty
 \end{aligned}$$

elde edilir. Burada  $\lambda_1, \lambda_2$  yük faktörleri olup

$$\lambda_1 = \frac{P}{\rho_1 g h_1} \tag{52}$$

$$\lambda_2 = \frac{P}{\rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2} \tag{53}$$

bağıntılarından elde edilmiştir.  $k_2(x, t)$  ve  $k_3(x, t)$  denklemlerin çekirdekleri olup aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

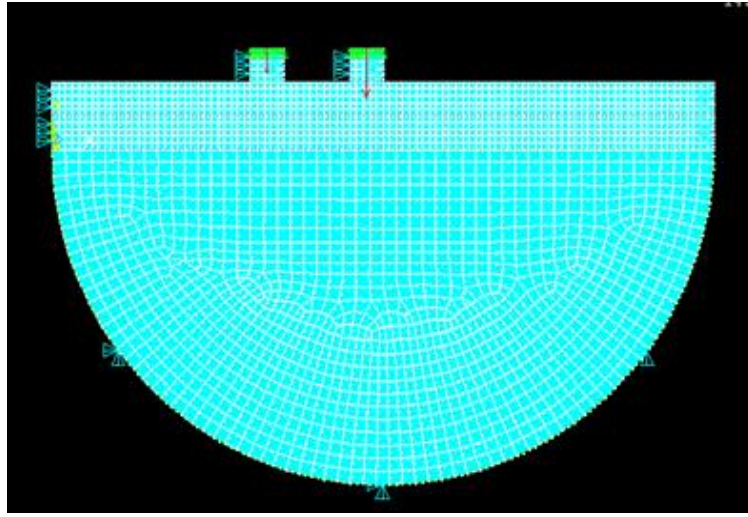
$$\begin{aligned}
 k_2(x, t) &= \int_0^\infty [128\alpha^3 (e^{-2ah}(-1 + \alpha(h-h_2)) + e^{-2ah_2} \\
 & (1 + \alpha(h-h_2)))(1 + \kappa_1) [e^{-ah-5ah_2}((1 + \kappa_3) \\
 & - (1 + \kappa_2)mb) + e^{-ah-ah_2}((1 + \kappa_3) + (1 + \kappa_2)mb) \\
 & - 2e^{-ah-3ah_2}((1 + 2\alpha^2 h_2^2)(1 + \kappa_3) - 2\alpha h_2 \\
 & (1 + \kappa_2)mb)] / (\cos \alpha(t-x)) d\alpha \tag{54}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_3(x, t) &= \int_0^\infty \{-256\alpha^3 [(1 + \alpha h_2) + e^{-2ah_2}(-1 + \alpha h_2)] \\
 & (1 + \kappa_1)(1 + \kappa_2)mb [e^{-ah-4ah_2} \\
 & (-1 + \alpha(-h + h_2)) + e^{-3ah-2ah_2} \\
 & (1 + \alpha(-h + h_2))]\} d\alpha \tag{55}
 \end{aligned}$$

Tabakalara ait ara yüzeydeki ilk ayrılma yükü ve ilk ayrılma uzaklığının belirlenebilmesi için (50) nolu ifadenin sıfıra eşitlenmesi, alt tabaka ve elastik yarı sonsuz düzlem arasındaki ilk ayrılma yükü ve ilk ayrılma uzaklığının belirlenebilmesi için ise (51) nolu ifadenin sıfıra eşitlenmesi gerekir. Bu eşitliği sağlayan x uzaklığı ilk ayrılma uzaklığı ve buna karşılık gelen yük faktörü de kritik yük faktörü olarak ifade edilmiştir.

$$\lambda_{cr1} = \frac{P_{cr}}{\rho_1 g h_1} \tag{56}$$

$$\lambda_{cr2} = \frac{P_{cr}}{\rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2} \tag{57}$$



Şekil 2. Problemin Q=2P durumuna ait ANSYS Modeli

### 3 Problemin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözümü

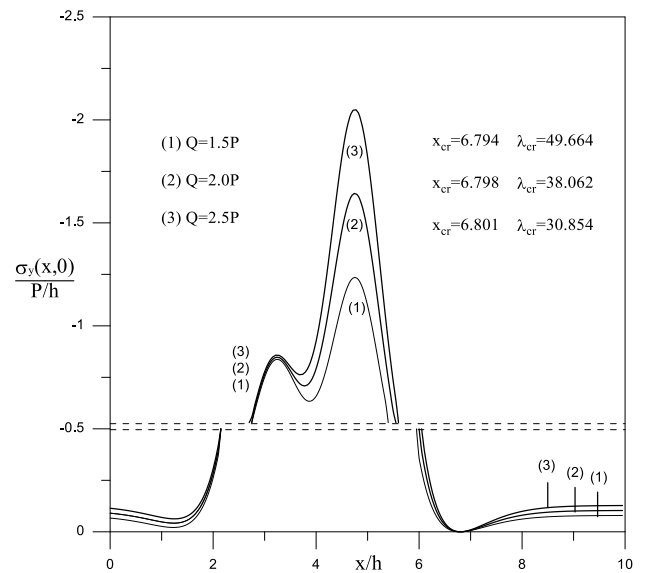
Temas problemlerinin çözümünde, bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte özellikle sayısal analiz yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi bu yöntemler içerisinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Sonlu elemanlar yönteminde, parçanın bütünü yerine bölünmüş çok sayıda eleman üzerinde çözümler yapılır ve sonuca ulaşılır. Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analiz işlemi yapılırken problemin çözümü için birçok işlem gerçekleştirilmektedir. İşlem aşamaları; problemin geometrisinin oluşturulması, eleman tipinin belirlenmesi, malzeme özelliklerinin atanması, modelin sonlu elemanlara ayrılması, blokların üst kısmındaki düğüm noktalarının düşey yer değiştirmelerinin birbirine bağlanması, temas yüzeylerinin tanımlanması, sınır koşullarının belirlenmesi ve yüklemenin yapılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Problemin sonlu eleman modeli 2 boyutlu düzlem şekil değiştirme problemi olarak tanımlanmış ve geometrik model ANSYS standart menü araçlarıyla oluşturulmuştur. Eleman tipi olarak 8-node PLANE 183 kullanılmıştır. Sonlu elemanlara bölme işleminde her çizgi 0.05 aralıklara bölünmüştür. Ayrıca blok-tabaka, tabaka-tabaka, tabaka-elastik düzlem arasında temas çiftleri tanımlanmıştır. Bu çiftler temas ve hedef elemanları olarak ikiye ayrılır. Temas CONTA 172, hedef ise TARGE 169 elemanları olarak seçilmiştir. Bu çalışmada ANSYS paket programının temas yüzeylerindeki davranışına yönelik farklı temas algoritmalarından Lagrange Metodu kullanılmıştır. ANSYS çözüm için kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

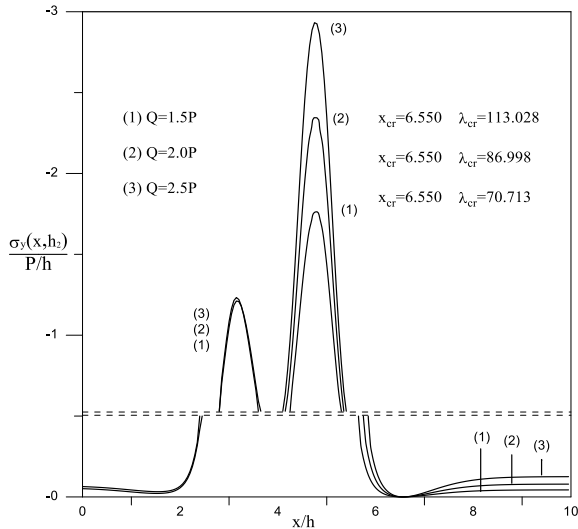
Eleman	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Rijit Bloklar	$e^{10}$	0.25
Tabaka 1	25000	0.25
Tabaka 2	50000	0.25
Elastik Düzlem	25000	0.25

### 4 Sonuçlar

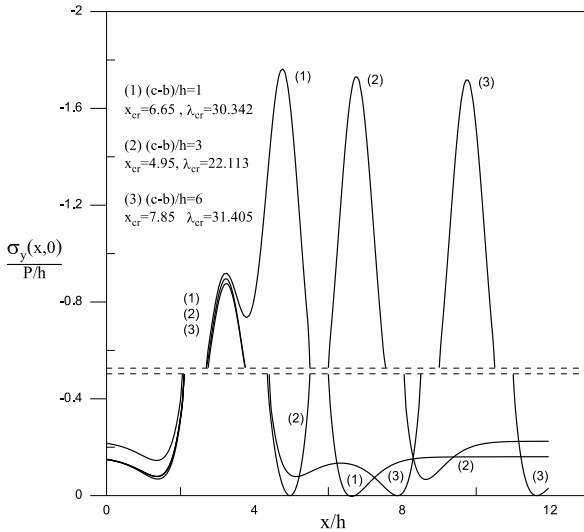
Bu çalışmada öncelikle iki rijit blok ile yüklenmiş elastik yarı sonsuz düzlem üzerine oturan homojen iki tabakanın sürekli temas problemi analitik yöntem ile incelenmiştir. Problemin analitik çözümünde integral denklemler Gauss-Chebyshev integrasyon formülleri yardımıyla sayısal olarak ayrı ayrı çözülmüştür. Analitik çözümde bloklara etki eden yük oranları ve bloklar arası mesafe değişimine bağlı olarak ilk ayrılma uzaklıkları ve ilk ayrılma yük değerleri hesaplanmış ve grafikler çizilmiştir. Yine farklı yük oranlarında bloklar arasındaki etkileşimin sona erdiği mesafeler hesaplanmış ve tablo ile bu değerler verilmiştir. Daha sonra ise sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analiz işlemi yapan ANSYS paket programı yardımı ile problem modellenmiş ve her iki çözümden de elde edilen sonuçlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile problemin çözümü, analitik çözüm yöntemine göre daha kolay ve zaman bakımından daha kısa sürede gerçekleşmiştir.



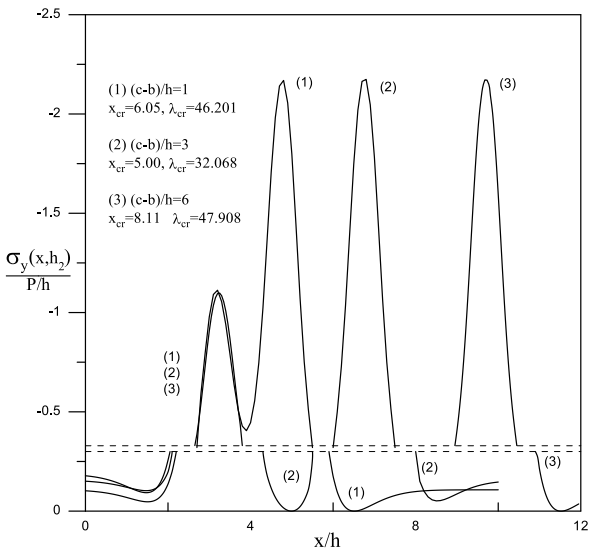
Şekil 3.  $\sigma_y(x,0)$  boyutsuz gerilme dağılımının yük oranları ile değişimi ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 2$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 0.5$ ,  $a/h = 3$ ,  $(b-a)/h = 0.5$ ,  $(d-c)/h = 0.5$ ,  $(c-b)/h = 1$ ,  $h_2/h_1 = 1$ )



**Şekil 4.**  $\sigma_y(x, h_2)$  boyutsuz gerilme dağılımının yük oranları ile değişimi ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 2$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 0.5$ ,  $a/h = 3$ ,  $(b-a)/h = 0.5$ ,  $(d-c)/h = 0.5$ ,  $(c-b)/h = 1$ ,  $h_2/h_1 = 1$ )



**Şekil 5.**  $\sigma_y(x, 0)$  boyutsuz gerilme dağılımının bloklar arası mesafe ile değişimi ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 1$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 1$ ,  $a/h = 3$ ,  $(b-a)/h = 0.5$ ,  $(d-c)/h = 0.5$ ,  $Q = 2P$ ,  $h_2/h_1 = 1$ )



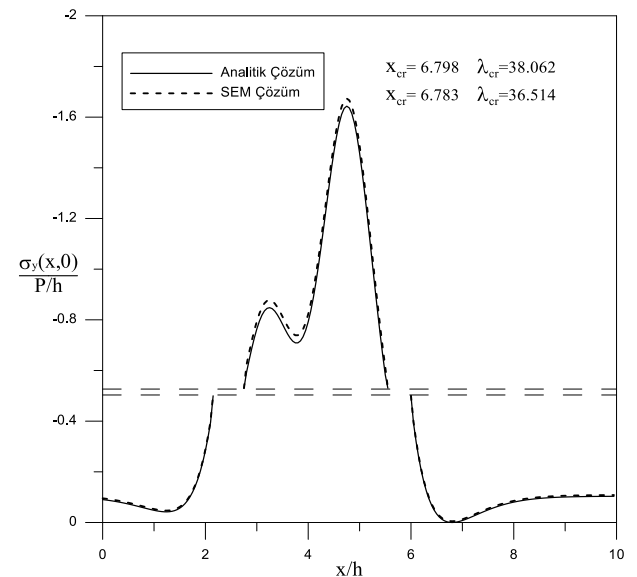
**Şekil 6.**  $\sigma_y(x, h_2)$  boyutsuz gerilme dağılımının bloklar arası mesafe ile değişimi ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 1$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 1$ ,  $a/h = 3$ ,  $(b-a)/h = 0.5$ ,  $(d-c)/h = 0.5$ ,  $Q = 2P$ ,  $h_2/h_1 = 1$ )

Şekil 3-4'te alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem ve tabakalar arasındaki ilk ayrılma yükü ve uzaklığının yük oranı ile değişimi görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi yük oranı arttıkça her iki temas yüzeyinde de ilk ayrılma yükleri azalmakta, ilk ayrılma uzaklıklarında ise tabakalar arasında farklılık gözlemlenmezken, alt tabaka ve elastik yarı sonsuz düzlem arasında çok küçük oranlarda artış görülmektedir. Blok altlarında oluşan gerilmeler her iki temas yüzeyinde de artış göstermiştir ancak tabakalar arasında meydana gelen gerilme değerleri daha büyüktür. Şekil 5-6'da alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem ve tabakalar arasında meydana gelen temas gerilmeleri bloklar arasındaki mesafe değişimi göz önüne alınarak incelenmiştir.

Yine temas yüzeyleri arasında ayrılmalara sebep olacak ilk ayrılma yükü ve ilk ayrılma uzaklıkları bulunmuştur. Bu durumda her iki yüzey arasındaki ilk ayrılma uzaklıkları birbirine çok yakın çıkmış ancak tabakalar arasında ilk ayrılmaya sebep olan kritik yük değerlerinin alt tabaka ve elastik yarı sonsuz düzlem arasında ayrılmaya sebep olan kritik yük değerinden daha büyük olduğu görülmüştür.

Her iki temas yüzeyinde de  $(c-b)/h = 1$  olması durumunda ilk ayrılmalar ikinci bloğun sağ tarafında gerçekleşmesi beklenirken,  $(c-b)/h = 3$ ,  $(c-b)/h = 6$  olması durumlarında ilk ayrılmaların bloklar arasında gerçekleşmesi beklenmektedir. Bloklar arasındaki mesafe belirlenen bir limit değerden büyük olduğunda blokların beraberce incelenmesine gerek kalmamaktadır. Bu durumda her blok ayrı bir problem olarak incelenebilir.

Şekil 7,8'de alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem ve tabakalar arasında meydana gelen temas gerilmeleri  $Q = 2P$  olması durumunda analitik ve sonlu elemanlar çözümü grafiksel olarak incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde iki farklı yöntemle elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

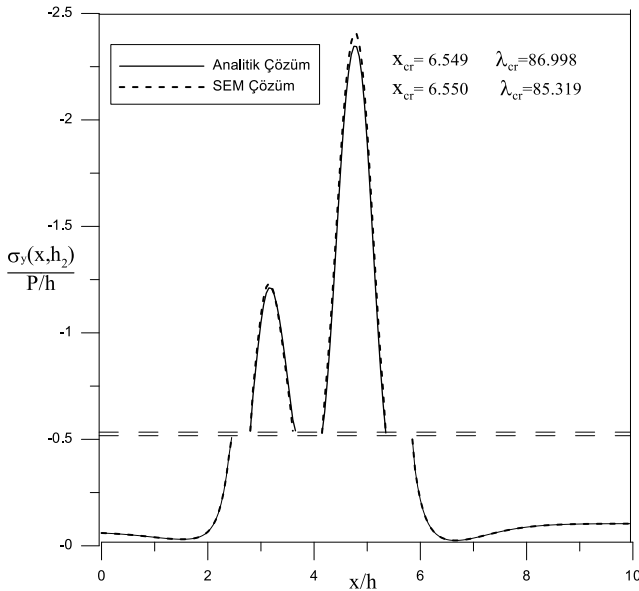


**Şekil 7.**  $\sigma_y(x, 0)$  boyutsuz gerilme dağılımı ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 2$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 0.5$ ,  $a/h = 3$ ,  $(b-a)/h = 0.5$ ,  $(d-c)/h = 0.5$ ,  $(c-b)/h = 1$ ,  $h_2/h_1 = 1$ )

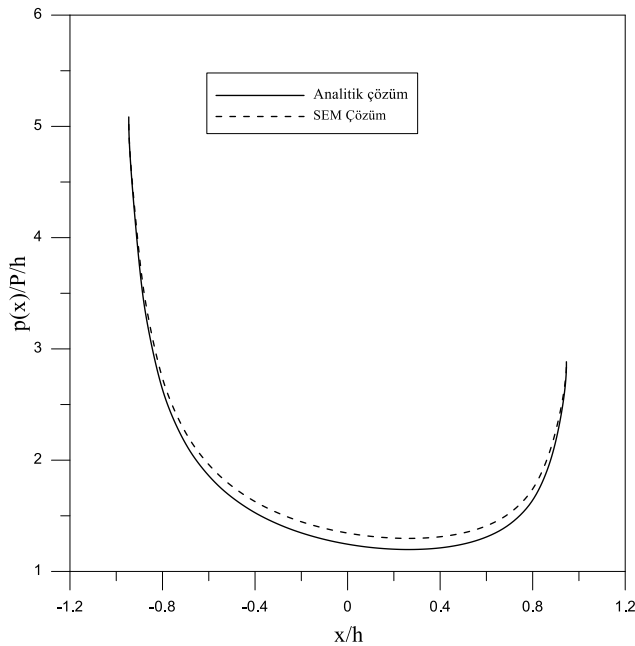


Tablo 2. Alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem ara yüzeyinde iki blok arasındaki etkileşimin son bulunduğu uzaklığın  $((c-b)/h)$  yük oranı ile değişimi  $\mu_2/\mu_1 = 1$ ,  $\mu_3/\mu_2=1$ ,  $a/h=3$ ,  $(b-a)/h=0.5$ ,  $(d-c)/h=0.5$ ,  $h_2/h_1=1$

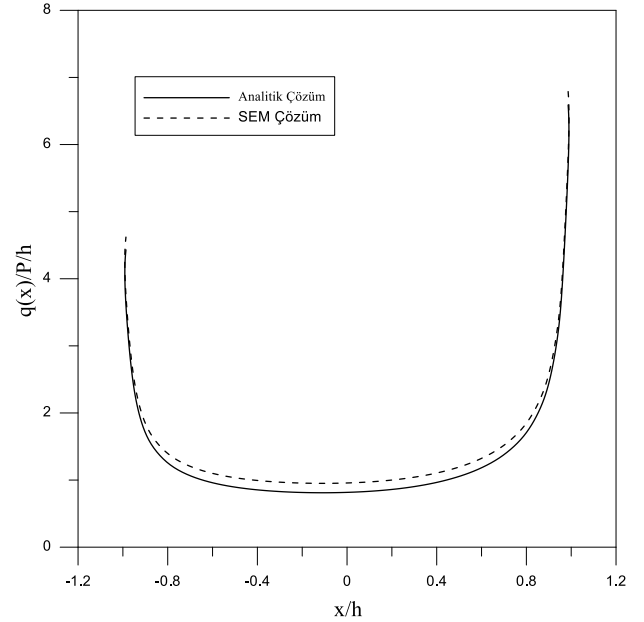
Q	$\frac{(c-b)}{h}$	BLOK 1		BLOK 2	
		$\lambda_{cr_{sol}}=\lambda_{cr_{sağ}}$	$(a-x_{cr_{sol}})/h=(x_{cr_{sağ}}-b)/h$	$\lambda_{cr_{sol}}=\lambda_{cr_{sağ}}$	$(c-x_{cr_{sol}})/h=(x_{cr_{sağ}}-d)/h$
P	6.8396	62.633	1.6320	62.331	1.6320
2P	6.8392	62.258	1.6321	31.410	1.6320
4P	6.8368	61.510	1.6323	15.728	1.6320
6P	6.8362	60.765	1.6324	10.490	1.6319
8P	6.8360	60.022	1.6327	7.8701	1.6319



Şekil 8.  $\sigma_y(x, h_2)$  boyutsuz gerilme dağılımı ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 2$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 0.5$ ,  $a/h=3$ ,  $(b-a)/h=0.5$ ,  $(d-c)/h=0.5$ ,  $(c-b)/h=1$ ,  $h_2/h_1=1$ )



Şekil 9.1. Blok altındaki gerilme dağılımı ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 2$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 0.5$ ,  $a/h=3$ ,  $(b-a)/h=0.5$ ,  $(d-c)/h=0.5$ ,  $(c-b)/h=1$ ,  $h_2/h_1=1$ )



Şekil 10. 2. Blok altındaki gerilme dağılımı ( $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 2$ ,  $\mu_2/\mu_1 = 2$ ,  $\mu_3/\mu_2 = 0.5$ ,  $a/h=3$ ,  $(b-a)/h=0.5$ ,  $(d-c)/h=0.5$ ,  $(c-b)/h=1$ ,  $h_2/h_1=1$ )

Tablo 2'de alt tabaka ile elastik yarı sonsuz düzlem arasındaki yüzeyde iki blok arasındaki etkileşimin son bulunduğu uzaklığın yük ile değişimi görülmektedir. Tabloda görüldüğü gibi Q/P oranındaki artış blokların etkileşimini sona erdiren sınır mesafesini etkilememiştir. İlk ayrılma mesafesinin başlangıçtan uzaklığı ise Q/P oranı ile çok fazla değişmemiştir. Buna ek olarak Q/P oranındaki artış kritik yük değerinin azalmasına sebep olmuştur.

Şekil 9, 10'da Q=2P olması durumunda bloklar altındaki temas gerilmeleri verilmiştir. Grafiklerde ikinci blok yükünün birinci blok yükünün iki katı olması durumunda ikinci blok altında temas gerilmelerinin arttığı görülmektedir. Bloklar arasındaki etkileşime bakıldığında en düşük gerilme değerinin birinci bloğun ikinci bloğa yakın olan köşesinde oluşmaktadır. Grafikler incelendiğinde iki yöntemle de elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada elastik yarı sonsuz düzleme oturan homojen iki tabakanın sürekli temas problemi elastisite teorisi kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra problem sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bir paket

program ile modellenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde yük oranındaki artışla her iki ayrılma yüzeyinde de ilk ayrılma yük değerlerinin azaldığı, temas gerilmelerinin ise arttığı görülmektedir. Bloklar arası mesafenin artırılması ve mesafenin belli bir değeri aşması durumunda ise blokların beraberce incelenmesine gerek kalmadığı ve her bloğun ayrı bir problem olarak incelenebileceği görülmüştür. Problemin her iki yöntemle elde edilen sonuçları karşılaştırıldığında ise birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar ile çözüm, analitik yöntemle göre daha kısa sürede çözüm imkanı tanıdığı için tercih edilebilir.

Çalışmanın devamında malzeme özellikleri, tabaka yükseklikleri, blok genişlikleri gibi pek çok değişkene bağlı olarak çözümler elde edilebilir.

## 5 Kaynaklar

- [1] Hertz, H., On The Contact of Elastic Solids, *J. Reine Ang. Mathematic*, 92, 156-171, 1982.
- [2] Ratwani, M., Erdoğan, F., On the Plane Contact Problem for a Frictionless Elastic Layer, *International Journal of Solids and Structures*, 9, 921-936, 1973.
- [3] Geçit, MR., Gökpinar, S., Frictionless contact between an elastic layer and a rigid rounded support, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 10, 245-251, 1985.
- [4] Giannakopoulos, AE., Pallot, P., Two-Dimensional Contact Analysis of Elastic Graded Materials, *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 48, 1597-1631, 2000.
- [5] Özşahin, TS., Taskiner, O., Contact Problem for an Elastic Layer on an Elastic Half Plane Loaded by Means of Three Rigid Flat Punches, *Mathematical Problems in Engineering*, 137427, 14, 2013.
- [6] Çakıroğlu, F. L., Çakıroğlu, M. ve Erdöl, R., Contact Problems for Two Elastic Layers Resting on Elastic Half-Plane, *Journal of Engineering Mechanics*, 127, 2, 113-118, 2001.
- [7] Adams, G. G., An Elastic Strip Pressed Against an Elastic Half Plane by a Steadily Moving Force, *Journal of Applied Mechanics*, Transactions of ASME, 45, 89-94, 1978.
- [8] Wriggers, P., *Computational Contact Mechanics*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2002
- [9] Geçit, MR., A Tensionless Contact without Friction between an Elastic Layer and an Elastic Foundation, *International Journal of Solids and Structures*, 16, 387-396, 1980.
- [10] Özşahin, TŞ., Frictionless contact problem for a layer on an elastic half plane loaded by means of two dissimilar rigid punches, *Structural Engineering and Mechanics* 25:4 383403, 2007
- [11] Adıbelli, H., Çömez, İ., Erdöl, R., Rijit Panç İle Bastırılmış Elastik Yarım Düzleme Oturmuş Ağırksız Çift Şeritte Değme Problemi, XVI. Ulusal Mekanik Kongresi, Erciyes Üniversitesi, Bildiriler Kitabı, 1, 71-82, Kayseri, Türkiye, 2009.
- [12] Çömez İ., Frictional Contact Problem for A Rigid Cylindrical Stamp and An Elastic Layer Resting on A Half Plane, *International Journal of Solids and Structures*, 47(7-8), 1090-1097, 2010.
- [13] Bora, P., İki Rijit Dikdörtgen Blok ile Yüklenmiş Elastik Yarı Sonsuz Düzlem Üzerine Oturan İki Elastik Tabakanın Temas Problemi, Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2016.
- [14] Polat, A., Kaya, Y., Özşahin, TŞ., Analytical Solution to Continuous Contact Problem for A Functionally Graded Layer Loaded Through Two Dissimilar Rigid Punches, *Meccanica*, 53(14), 3565-3577, 2018
- [15] Erdoğan, F. ve Gupta, GD., On the Numerical Solution of Singular Integral Equations, *Quarterly Journal of Applied Mathematics*, 29, 525-534, 1972.
- [16] Sezer, S., An evaluation of ANSYS contact elements, Master's Theses, Louisiana State University, 2005.
- [17] Kanber, B., Finite Element Analysis of Contact Problems Using Transition Elements, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 1997.
- [18] Yaylacı, M., İki Elastik Çeyrek Düzleme Oturan İki Elastik Tabakanın Temas Problemi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
- [19] Polat, A., Bendine, K., Kaya, Y., Özşahin, TŞ., Frictionless Contact Problem for a Functionally Graded Layer Loaded Through Two Rigid Punches Using Finite Element Method, *Journal Of Mechanics*, DOI: [10.1017/jmech.2018.55](https://doi.org/10.1017/jmech.2018.55), 2019
- [20] Abhilash, MN., Murthy, H., Finite element analysis of 2-d elastic contacts involving FGMs. *International Journal of Computer Methods Engineering Science Mechanics*, 15:3, 253-7, 2014.
- [21] Jackson, RL., Green, I., A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 127, 343-354, 2005.
- [22] Brezeanu, LC., Contact Stresses: Analysis by Finite Element Method (FEM), *Procedia Technology*, 12, 401-410, 2014.
- [23] ANSYS Software, Bilgisayar Programı, Houston PA, Swanson Analysis System, 2015.
- [24] Birinci, A., Adıyaman, G., Yaylacı, M., Öner, E., Analysis of Continuous and Discontinuous Cases of A Contact Problem Using Analytical Method and FEM, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12, 1771-1789, 2015.
- [25] Oner, E., Yaylacı, M., Birinci, A., Analytical Solution of A Contact Problem and Comparison With the Results From FEM, *Structural Engineering and Mechanics*, 54, 607-622, 2015.
- [26] Güler, MA., Kucuksucu, A., Yılmaz, KB., Yıldırım, B., On the analytical and finite element solution of plane contact problem of a rigid cylindrical punch sliding over a functionally graded orthotropic medium, *International Journal of Mechanical Sciences*, 120, 12-29, 2017.
- [27] Rashid, A., Finite element modeling of contact problems, Doctoral thesis, Linköping University, 2016.
- [28] Kaya, Y., Polat, A., ve Özşahin TŞ., Comparison of FEM Solution with Analytical Solution of Continuous and Discontinuous Contact Problem, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 977-992, 2018.



## THE LIFECYCLE COST AND CO<sub>2</sub> EMISSION ANALYSIS WITH THE BUILDING INFORMATION MODELING APPLICATIONS

Sare Gökçen Armutlu<sup>1</sup>, Ayça Gülten<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architecture, Faculty of Architecture, Firat University, Turkey

Original Scientific Paper

In this study, the impact of the Building Information Modeling (BIM) applications on the energy performance of the buildings has been revealed with an application study upon the lifecycle cost and CO<sub>2</sub> emission values. With this purpose, a comparison has been conducted with the Building Information Modeling applications for the alternative status of the building determined according to the variables such as the current location of the building, orientation, southern facade transparency ratio and the outer wall insulation material and thickness. In this respect; the lifecycle cost being 62810 \$ in the current state has been attained as 46574 \$ for the formed alternative state. CO<sub>2</sub> emission values attained for the fuel consumption have been respectively 6.2 Mg and 3.3 Mg for the current and alternative states. Consequently; the fact that the energy performances of the buildings could be enhanced using the BIM based programs for an applied building or a building that is at the design stage and the environmental impact to be provided in this way have been concretely revealed.

**Keywords:** Building Information Modeling, Energy Analysis, Lifecycle Cost, CO<sub>2</sub> emission

### 1 Introduction

Technology and life standards have developed together with the industrialization in 20<sup>th</sup> century, but natural resource and raw material consumption ratio have shown a rapid increase (Armutlu, 2019; Işın, 2016). Together with the occurrence of this environmental problem, the studies conducted regarding the efficient use of energy have gained significance (Shi, 2017).

It is necessary for the governments to make more effort in the issue of the energy efficiency being one of the most important factors regarding the decrease in the energy-based air pollution and reaching the long-term climate missions (IEA, 2018). The studies to be conducted at the design stages of the buildings have great importance to produce solutions for the efficient use of the energy by the countries. It is possible to save 60% energy for the heating and cooling and approximately 50% energy for the artificial illumination with the use of methods convenient for the efficient use of energy (IEA, 2018). CO<sub>2</sub> emission could also be decreased when the energy efficiency of the buildings are increased.

There are many parameters affecting the energy performance of the building. Taking these parameters into consideration before the commencement of the construction of the building is very important in terms of preventing the problems possible to occur afterwards and being able to save energy. Problems that are not possible to solve afterwards may occur when this issue is not paid attention at the design stage of the building and the

different solution methods that could be developed will cause to the loss of time and cost (Harputlugil, 2007).

Building Information Modeling (BIM) is a design approach using smart three-dimensional computer models to form, modify, share and coordinate the information at the design stage. Building energy performance analyses could be conducted with the building information modeling applications today. These analyses provide great facilitate on in the issue of designing energy-efficient buildings (Douglass, 2010; [knowledge.autodesk.com/support/revit-products](http://knowledge.autodesk.com/support/revit-products)). In the literature, there are many studies conducted regarding the improvement of the energy performances for the current buildings and by taking support from BIM-based programs. Abanda and Byers (2016) have calculated the energy consumption in the Revit program of this building upon a sample building. When the building orientations have been changed, it has been concluded that energy could be saved especially in the electricity and fuel consumption. Savaşkan (2015) has formed different scenarios by modifying the number of rooms, transparency ratio, roofing and thermal insulation material upon a sample house seed model using Autodesk REVIT software. He has conducted a study showing that the buildings with high energy efficiency could be designed upon these scenarios. Leinartas and Stephens (2015) have calculated the cost and energy performances using BEOpt and EnergyPlus programs on ten types of sample buildings which were constructed before 1978, were independent and whose outer wall material is brick in

\* Corresponding author.

E-mail address: [aycagulten@gmail.com](mailto:aycagulten@gmail.com) (A. Gülten) | ORCID Number : 0000-0001-9837-8674

Received 8 November 2019; Received in revised form 08 December 2019; Accepted 23 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

Chicago. Consequently; they have shown that at least 50% energy saving could be provided with the renovations conducted on the building. In addition; it has also been revealed that the implementation of these energy renovations to all of the house buildings in Chicago region before 1987 will provide the investment opportunity to the region. Kuo et al. (2014) have studied the reliability of the BIM-based energy analysis in the concept design stage of a structure. This study has proven the applicability and reliability of the energy analysis via BIM-based programs by comparing the values regarding the electricity use calculated in the simulation program to the measured real values of the production of the electricity. Sancaktar (2015) has examined the heating performance in the buildings before 2000. He has conducted performance and cost analysis by re-arranging the five-storey two-block building with the enhancements possible to be conducted according to TS 825 standard upon TS 825 calculation program. The improvements performed on the walls and windows have provided 56.8% energy saving. Öktem and Ergen (2017) have aimed to form a guide for the companies to adapt to the building information modeling. Two frames have been prepared for this and the validity and convenience of these frames have been assessed. As a result; an operational building information modeling frame that could be used as a guide by the companies has been formed. Akcatir, Nacar and Yeşilata (2011) have determined the criteria according to which the programs used in the energy load calculations could be assessed. For this, they have examined the usage of EnergyPlus, Design Builder and Hourly Analysis Program (HAP) software items and conducted a sample application study with EnergyPlus software. In conclusion, they have expressed that it has met the reliability of the important software items. Douglass (2010) has examined the usage of energy analysis and simulations with the building information modeling. For this, he has conducted the analysis studies of a house he has modeled with Autodesk Revit with Autodesk Ecotect and DesignBuilder. Consequently; he has observed that some problems are faced in the process of transmitting the building information modeling data to the analysis tools, but all the problems could be solved. Besides; the simulation results attained from Ecotect and DesignBuilder have shown a difference of 15% in the annual heating and cooling energy among the passive solar design strategies in the best and worst condition. In his study, Martin (2013) has conducted a comparative study with the integration of Autodesk Green Building Studio to examine the impacts of a primary school on the energy consumption, lifecycle energy cost and carbon emission with the building information modeling. While performing this, examinations that will reveal the benefits of the sustainable and usage life costs of the buildings via building information modeling have been conducted. As a result of his examinations, he has emphasized the importance of the early inclusion of the energy modeling analyses in the conceptual design of the construction projects. He has also specified that early design energy analysis will provide energy saving provision opportunity

with the use of reaching cost decisions, *Green Building Studio* and building information modeling at the beginning of the lifecycle of the building. Le (2014) has introduced Autodesk *Green Building Studio* being a software for the analysis of buildings. This software gives the results of the energy consumption such as water usage and costs, natural ventilation potential, carbon emissions based on a real model, local energy resources and weather condition data. He has conducted his study on a villa of 279 m<sup>2</sup> modeled with Revit. As a result, a design suggestion that is sustainable and that has energy efficiency for the future projects. Within the results of his study, he has given place to the fact that *Green Building Studio* is a very strong and useful tool operating under real standards and giving highly reliable results. Flores (2016) has aimed to determine the estimation of the energy usage of a building and the potential design developments to be able to be applied before the construction process with the main lines. For this, he has tried to develop building performance analysis using Revit 2017 in a training building. Consequently; the validity of the used method has been verified by taking the eye-catching results into consideration. Also, he draws the attention to the fact that there are possible practical applications and more research potential on this issue.

The energy and cost saving to be provided with the use of BIM applications have been focused in most of the conducted studies and the attained results have been emphasized to be reliable and correct. Besides; it has been specified that considering BIM applications at the design stage will provide more efficient results in the energy efficient building designs, but the applied buildings will also be ultimately beneficial within the scope of the improvement studies in terms of the energy efficiency. The provided energy savings and CO<sub>2</sub> emissions decreasing depending on this and the gained environmental benefit have been the subject of very few studies.

In this study, the impact of Building Information Modeling (BIM) applications on the improvement of the energy efficiency of an applied building or a building at the design stage has been investigated with an application study. As different from the previously conducted studies and the ones in which BIM has been used, the assessments have been calculated upon the lifecycle cost and the CO<sub>2</sub> emission of the fuel necessary for the heating. In this way, the contribution of BIM applications to the environmental impact as well as the energy and cost saving it provides has been desired to be emphasized. For this purpose, a comparison has been conducted upon the lifecycle cost and CO<sub>2</sub> emission values for the determined alternative state of the house determined according to the current state and the variables of orientation, southern facade transparency ratio and external wall insulation material and thickness with the Building Information Modeling applications. Parameters used in the analysis have been evaluated in relation as using the appropriate value selected for the previous parameter in the analysis for the next one. For example, output value for orientation has

been used as an input for the next parameter to be analysed.

## 2 Material and Method

In this study, three dimensional modelings have been conducted with Autodesk Revit and energy analyses have been attained with Green Building Studio. Also a validation study has been conducted upon HAP program for the purpose of proving the correctness of the conducted analyses. The impacts of the variables on the lifecycle cost and CO<sub>2</sub> emission have been examined and a design has been formed as an alternative to the current building in which three variables with the best energy performance have been used together. The energy analysis of the current house and the energy analysis results of the formed alternative design have been compared to examine the impacts of the formed alternative design on the building energy performance.

### 2.1 Variables Determined for the Current House Information and Formed Alternative Design

There are kitchen, living room and WC in the ground floor and bedrooms in the first floor of the sample house. The furnishing of the ground floor contacts the soil. All of the northern and southern facades and a part of the eastern facade are connected to the outer environment. Floor plans belonging to the house are shown in Figure 1. Drawing of the floor plans used in the formation of the energy analysis model and the internal and external environment data belonging to the building have been formed in Revit 2017 (Autodesk Revit, 2017) program. The building A-A section attained upon the Autodesk Revit 2017 drawing and three dimensional image of the building are shown in Figure 2

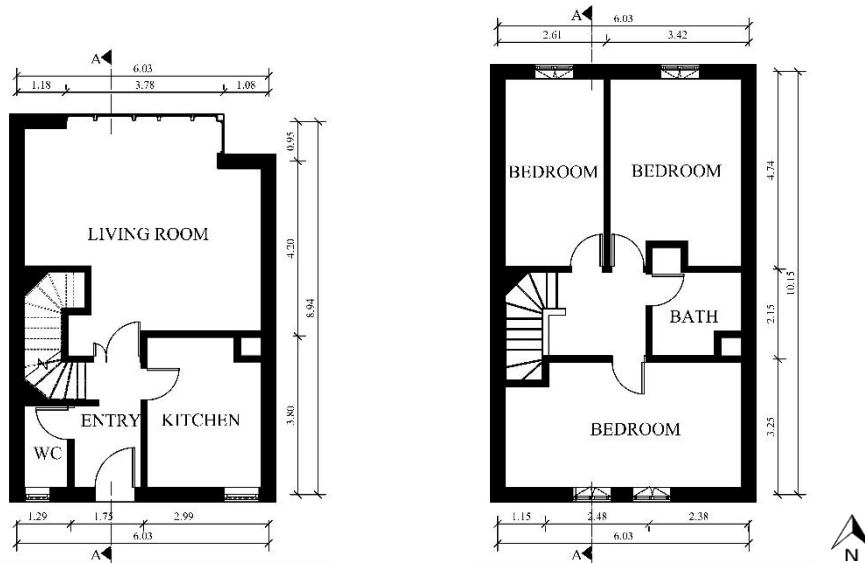
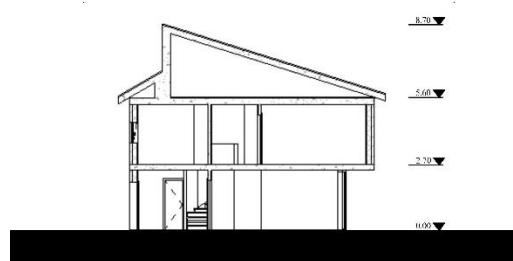
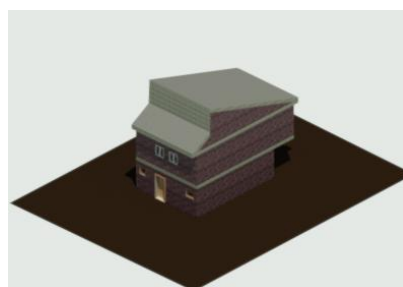


Figure 1. Sketch of the ground and first floors respectively



(a)



(b)

Figure 2. For existing housing (a) A-A section (b) three dimensional image

In Figure 3, the location of the sample house in the adjacent order with the buildings around it is shown. The house has been placed together with the surrounding buildings on the field within eastern-western direction and the front facade of the building has been oriented to north.

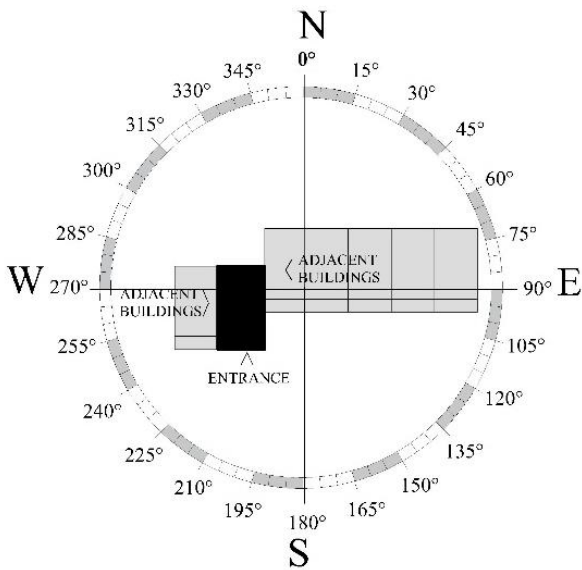


Figure 3. The current location of the building and surrounding buildings

The location of the building selected for the application study has been determined as the city of Elazig with continental climate in 37.67 N latitude and 39.24 E longitude. There are outer environment data used for the simulation in Table 1. The building usage hours by the residents, building usage type and other design data preferred in the program are given in Table 2 for the heating and illumination, U values of the building components are given in Table 3. There is no thermal insulation on the outer walls in the current state. Windows are double-glazed. U value has been accepted as 3.13 W/m<sup>2</sup>K and SHGC values have been accepted as 0.76.

The fact that the front facade of the current building has been oriented to north, there is no insulation on the outer walls and the southern facade space is too little have been efficient in the selection of these variables as determinative to form an alternative design for the current state. In this respect; the current state has been accepted as 0° and the orientation has been changed with the increasing angles by 15° in clockwise direction while forming an alternative design for the current building in the study. Analyses also have been conducted for the situations in which XPS, EPS, glass wool and rock wool insulation materials have been applied to the outer walls with the thickness of 3, 5 and 8 cm (Table 4) and the situations in which the southern facade transparency ratio being 6.5% in the current state has been taken as 15, 30, 40, 50, 65, 80%.

Table 1. Climate data for the location

<b>Location</b>	Elazığ, Turkey
<b>Latitude</b>	37.67
<b>Longitude</b>	39.24
<b>Summer Dry Bulb</b>	41 °C
<b>Summer Wet Bulb</b>	17 °C
<b>Winter Dry Bulb</b>	-8 °C
<b>Mean Daily Range</b>	22 °C
<b>Maximum Temperature</b>	43 °C
<b>Minimum Temperature</b>	-13 °C

Table 2. Building design data

<b>Building Type</b>	Residential Housing
<b>Area</b>	103 m <sup>2</sup>
<b>Volume</b>	248,75 m <sup>3</sup>
<b>Number of People</b>	4
<b>Peak Load</b>	August 17.00
<b>Heating System Indoor Comfort Temperature For Heating</b>	Fan Coil System 21,11 °C
<b>Cooling System Indoor Comfort Temperature For Heating</b>	Fan Coil System 23,33 °C
<b>Operating Schedule for Heating</b>	00.00-05.00 between %90 06.00 %70 07.00-08.00 between %40 09.00-14.00 between %20 15.00 %30 16.00-18.00 between %50 19.00-20.00 between %70 21.00 %80 22.00-23.00 between %90
<b>Operating Schedule for Lighting</b>	00.00-04.00 between %10 05.00 %30 06.00-09.00 between %45 10.00-17.00 between %30 18.00 %60 19.00-21.00 between %80 22.00 %60 23.00 %30
<b>Calculation Method</b>	ASHRAE thermal balance method

Table 3. U values of the building components

<b>Building Components</b>	<b>U Values (W/m<sup>2</sup>.K)</b>
<b>Roof</b>	2.95
<b>Walls</b>	2.57
<b>Door</b>	2.19
<b>Windows</b>	3.13
<b>Floor</b>	2.49

**Table 4.** Thermophysical properties of insulation materials used in the study

Insulation Materials	Thermophysical Properties of Insulation Materials		
	Thermal conductivity (W/ m.K)	Specific heat (J/g. °C)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )
XPS	0.027	1.0300	40
EPS	0.035	0.800	20
GLASSWOOL	0.040	1.000	65
ROCKWOOL	0.044	0.9200	110

## 2.2 Lifecycle Cost Assessment

Lifecycle Cost Assessment (LCCA) is a method for the evaluation of the total cost. It consists of the analyses regarding the environmental impacts of the building. The costs regarding the building consist of;

- First cost in which purchasing and construction costs are included,
- Fuel cost,
- Operation - Maintenance – Repair cost,
- Residue costs stemming from sale or disposal,
- Finance fees such as credit – interest payments,
- Non-monetary benefits and costs.

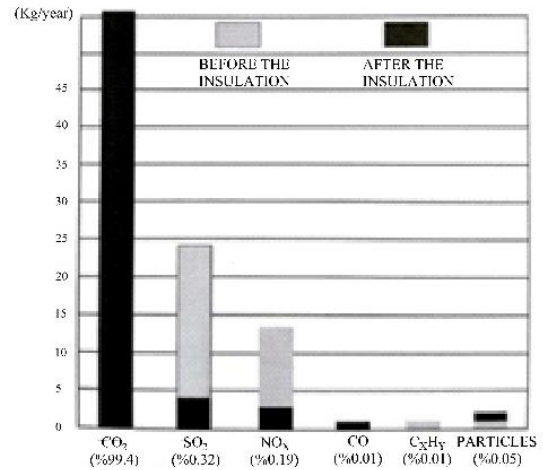
It is aimed to determine, measure and express in currency the economic impacts with the lifecycle analyses. The other aim of the analyses is to estimate the total cost of the design alternatives and determine the design that is qualified, functioning, consistent and with the lowest cost for the construction.

Lifecycle cost analyses is an important element of the studies conducted on determining which design ideas have more economic income in the building performance analyses. In this study, only the lifecycle usage and cost analyses of the energy consumption stemming from the need for cooling energy and the fuel consumption stemming from the need for electricity and heating energy and hot water have been conducted (Röck et al., 2018; Bueno and Fabricio, 2018; Soust-Verdaguer et al., 2018).

## 2.3 CO<sub>2</sub> Emission

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), diazotemonoxide (N<sub>2</sub>O) and F-gases causing to global warming by preventing the back reflection of the sun rays causing to greenhouse effect from the earth surface and the gases of nitrous oxides (NO<sub>x</sub>), non-methane volatile organic compounds (NMVOC), carbon monoxide (CO) and sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) being indirect greenhouse gases cause to the greenhouse gas emissions (Tuik, 2018).

Figure 4 shows the emission amounts of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, C<sub>x</sub>H<sub>x</sub> and particles emitted to the environment before and after the insulation of a building. According to the graphics, CO<sub>2</sub> emissions form 99.4% of the emissions being the majority.



**Figure 4.** Isolated and uninsulated emissions of the same buildings (Karakoç et al.,2011).

## 2.4 Validation Study

Heating and cooling load have been calculated upon HAP (Hourly Analysis Program) 4.90 used in the heating and cooling load calculations for the purpose of ensuring the correctness of the results attained from Autodesk Revit 2017 program. Validation study has been conducted upon the house sample to be used for the study. The results attained for Revit under the same internal and external environmental conditions have been compared with this calculation.

The heating and cooling load analyses and the total loads of roof, outer wall, outer door and window being four components having the highest impact on the heating and cooling load of the building are given in Table 5. Cooling load has been calculated as 2969 W for HAP and as 2894 W for REVIT. Heating load has been calculated as 9131 W for HAP and as 9736 W for REVIT. The fact that the difference between cooling loads has been calculated as 3% and the difference between the heating loads has been calculated as 7% show that the results are within close values and the analyses conducted with Revit could be counted as valid.

**Table 5.** Comparison of REVIT and HAP results

	REVIT(W)	HAP(W)
<b>Heating Load</b>	9736 W	9131 W
<b>Difference</b>	% 7	
<b>Cooling Load</b>	2894 W	2969 W
<b>Difference</b>	% 3	

### 3 Results and Discussion

Analyses have been conducted for the current state of the building at the first stage of the study. The lifecycle energy cost of the building for the sample house, annual energy cost, lifecycle fuel usage, annual fuel consumption amount and energy usage intensity are given in Table 6.

In this respect; the lifecycle cost showing the fuel and electricity consumption cost has been attained as 62818 \$ and the CO<sub>2</sub> emission stemming from the fuel has been attained as 6.2 Mg.

**Table 6.** Energy analysis data for sample housing

<b>Lifecycle Cost (\$)</b>	62818
<b>Annual Energy Cost (\$)</b>	4611
<b>Lifecycle Fuel Consumption (MJ)</b>	3751404
<b>Annual Fuel Consumption (MJ)</b>	125047
<b>Energy Usage Intensity (MJ / m<sup>2</sup> / year)</b>	1671
<b>Annual CO<sub>2</sub> Emmission (Mg)</b>	6.2

#### 3.1 Findings Attained with the Modification of Building Orientation

Lifecycle cost according to the energy usage for the situations in which the building orientation has changed with the increasing angles of 15°, the fuel usage amount during the lifecycle and the CO<sub>2</sub> emission amounts according to the fuel usage are given in Table 7.

**Table 7.** Lifecycle and the CO<sub>2</sub> emission amounts for building orientation

<b>Building Orientation</b>	<b>Lifecycle Cost (\$)</b>	<b>Lifecycle Fuel Consumption (MJ)</b>	<b>Annual CO<sub>2</sub> Emission (Mg)</b>
0°	62810	3751407	6.2
+15°	62568	3733746	6.2
+30°	<b>62560</b>	3728328	6.2
+45°	62680	3735108	6.2
+60°	62921	3743382	6.2
+75°	63946	3754944	6.2
+90°	64533	3758691	6.2
+105°	64656	3747276	6.2
+120°	64558	3731106	6.2
+135°	64321	3710220	6.2
+150°	63788	3695967	6.1
+165°	63345	3676389	6.1
+180°	62607	3659046	6.1
+195°	<b>62571</b>	<b>3633732</b>	<b>6.0</b>
+210°	62791	3614571	6.0
+225°	63595	<b>3613953</b>	6.0
+240°	64580	3633108	6.0
+255°	64956	3666423	6.1
+270°	65423	3708213	6.2
+285°	65590	3750399	6.2
+300°	65322	3786414	6.3
+315°	64830	3804591	6.3
+330°	64005	3798576	6.3
+345°	63056	3774273	6.3

The impact of the orientation on lifecycle is more than its impact on the energy usage. The highest lifecycle cost is 65590 \$ with +285° and the lowest cost is 62560 \$ with +30° orientation. CO<sub>2</sub> emission amount changes depending on the different orientation angles between 6 and 6.3 Mg.

When the energy and fuel consumption amounts are examined depending on the building orientations, the orientation with the lowest energy consumption is orientation +30° with 4594 \$ (Figure 5) and the difference between +195° orientation and +30° orientation whose lifecycle costs are very close to each other is 11\$. It is seen that the orientation with the lowest fuel consumption is +195° orientation with 2376\$ (Figure 6). 195° - 240° orientations in which the CO<sub>2</sub> values calculated according to the fuel consumption are low decrease the harmful gas emission given by the building to the environment when compared to other orientations with 6.0 Mg.

Orientation of the living spaces in which users spend more time during the day to benefit from the daylight more to the southern facade will make the house more functional. In the current state, orientation of kitchen which is in the southern facade to the north will increase the efficiency of the building.

When the results related to the building orientation are taken into consideration, the most ideal orientation among all the values has been selected as +195° both for the cost and energy usage according to their impact on the building energy performance and presented in Figure 7.



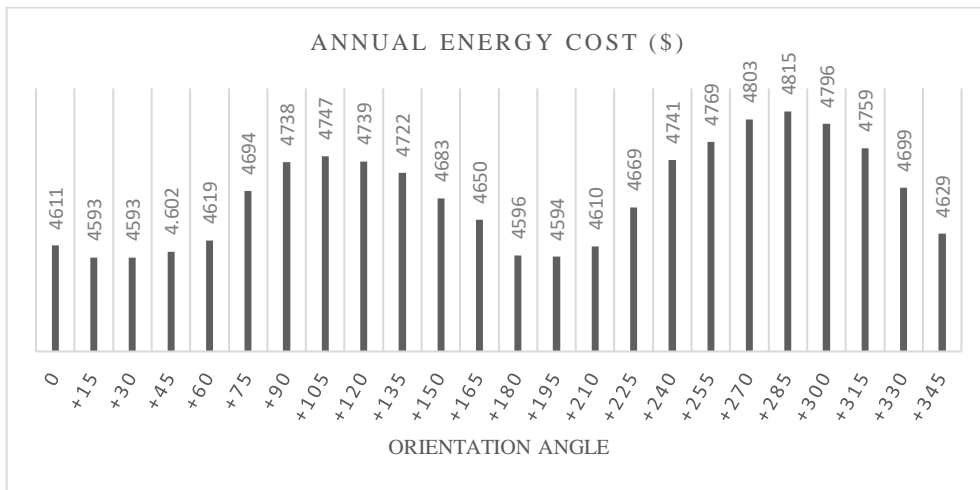


Figure 5. Annual energy cost graph with building orientations

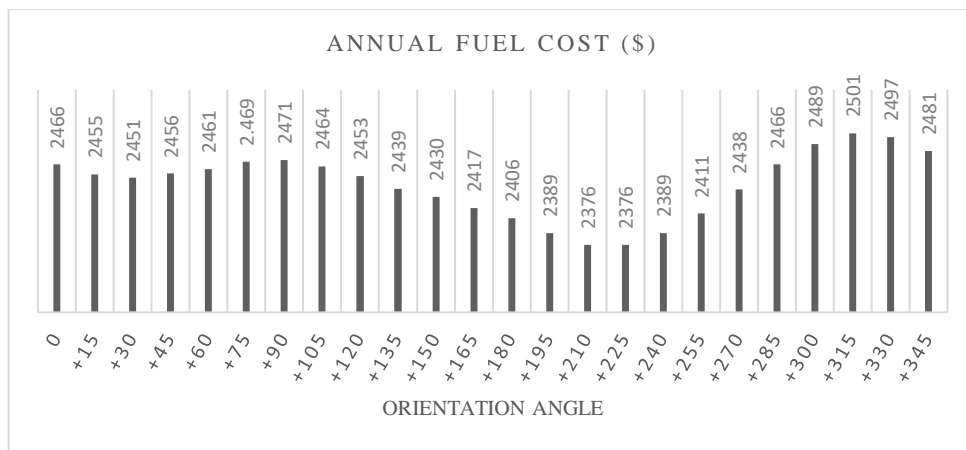


Figure 6. Annual fuel cost graph with building orientations

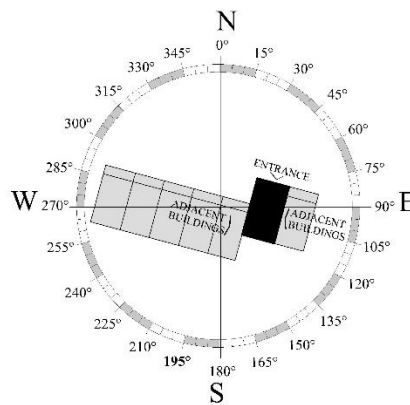


Figure 7. Recommended for building orientation 195°

### 3.2 Findings Attained with the Change in the Southern Facade Transparency Ratio

Eastern and western facades do not affect the building transparency ratios because the sample house is in adjacent order with other houses in its surroundings. Energy usage ratio will increase because the increase in the facade transparency ratio in the northern facade will increase the fuel usage. Because the modification of the transparency ratio in northern facade will not increase the

energy efficiency, the current state has not been changed in the northern facade transparency ratio.

What affects the energy efficiency of the building most is the southern facade transparency ratio. For this, the energy consumptions of the southern facade within the transparency ratios of 15, 30, 40, 50, 65, 80% have been examined.

Figure 8 and Figure 9 presents the annual energy and fuel costs respectively. While the energy cost increases together with the increase in the southern facade transparency ratio, fuel usage amount decreases. Annual

energy cost increase becomes 80\$ while the facade transparency ratio passes to 30% from 15% and from 30% to 40% and this difference changes between 100\$-280\$ in other transitions. Energy usage intensity and annual fuel usage amount belonging to the change in the southern facade transparency ratio are given in Table 8, lifecycle analysis and CO<sub>2</sub> emission amounts are given in Table 9. Energy usage intensity has decreased approximately by 0.015 MJ/m<sup>2</sup>/year between 15% and 30%, but it has started to increase again when the transparency ratio has been increased from 40% to 50%. The increase in the southern facade transparency ratio in Table 9 has caused to the increase in the lifecycle cost stemming from the

energy usage. The increase in the southern facade transparency ratio has caused to the decrease in the lifecycle fuel usage amount stemming from the fuel usage of the building and the CO<sub>2</sub> emission stemming from the fuel usage. This situation has occurred due to the calculation of the unit price of the electricity on 0.17 \$ and the calculation of the unit price of the fuel costs on 0.02 \$. Annual fuel consumption has continuously decreased together with the increase in the southern transparency ratio. When the energy usage intensity is taken into consideration, the determination of the southern facade transparency ratio as 40% will provide advantages in energy efficient building design.

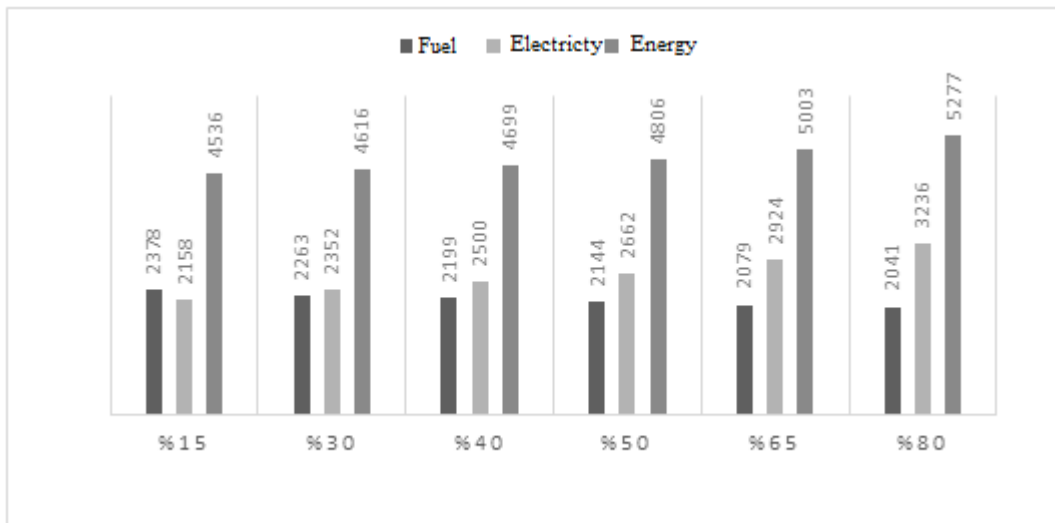


Figure 8. Annual energy cost for changing facade transparency

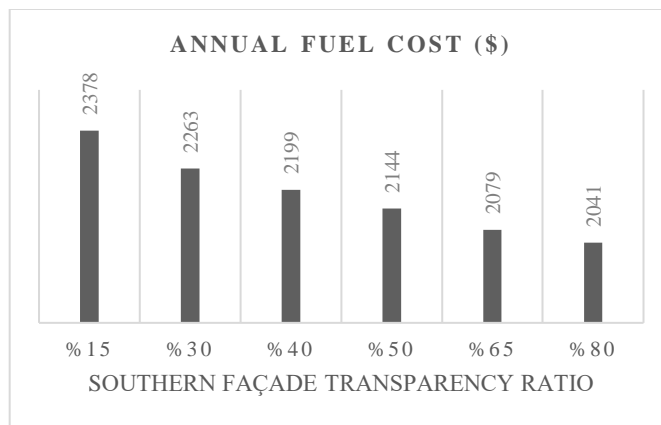


Figure 9. Annual fuel cost for changing facade transparency

Table 8. Annual energy and fuel use according to the transparency rate of the southern facade

Transparency Ratio	Annual Energy Cost (\$)	Energy Usage Intensity (MJ /m <sup>2</sup> /year)	Annual Fuel Consumption ( MJ)
%15	4536	16299	120541
%30	4616	16148	114755
%40	<b>4699</b>	<b>16144</b>	<b>111488</b>
%50	4806	16217	108708
%65	5003	16452	105415
%80	5277	16925	103464

**Table 9.** Life cycle analysis and CO<sub>2</sub> emissions for southern facade transparency

Transparency Ratio	Lifecycle Cost (\$)	Lifecycle Fuel Consumption (MJ)	Annual CO <sub>2</sub> Emission (Mg)
%15	61783	3616224	6.0
%30	62871	3442641	5.7
%40	64006	3344643	5.6
%50	65463	3261240	5.4
%65	68143	3162462	5.3
%80	71873	3103911	<b>5.2</b>

Within the direction of the information belonging to the southern facade transparency ratio, the option that will provide benefit from the sunlight and will affect the energy load of the building least becomes 40% southern facade transparency ratio.

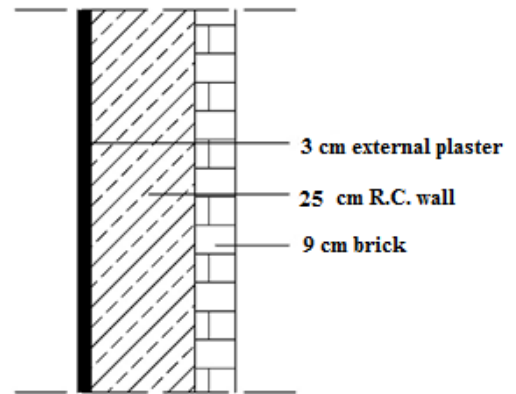
**3.3 Findings Attained with the Change in Thermal Insulation Material**

Thermal insulation material has not been applied to the current state of the building. The external wall section for the current building is shown in Figure 10. Non-insulated external wall layers consist of 9 cm brick, 25 cm reinforced concrete curtain wall and interior rendering from the outside towards the inside. Insulation materials have been separately added to the non-insulated external wall according to their thermal values. Lifecycle cost, annual energy cost, energy usage and annual fuel usage amount for the different insulation materials of the building are given in Table 10. Energy cost, energy usage intensity and fuel usage values show parallelism with one another for the insulation materials. Energy and fuel usage are ordered from the highest to the lowest as the rock wool, glass wool, EPS and XPS.

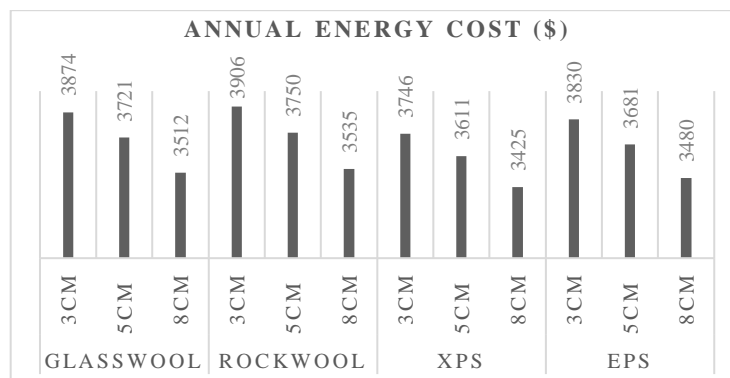
It is seen that the energy and fuel usage difference between 3 cm and 5 cm thicknesses of the insulation materials is higher. When the thicknesses of the insulation materials are raised to 8 cm, a decrease at a less ratio occurs for the fuel and energy usages. Energy cost difference between 3 cm and 5 cm thicknesses becomes 135\$ and the difference between the energy usage

intensities becomes 69.2MJ/m<sup>2</sup>/year for XPS which is the insulation material with the lowest values of annual energy and fuel usages. The energy cost difference between 8 cm and 5 cm becomes 186\$ and the difference between energy usage intensities becomes 34.7MJ/m<sup>2</sup>/year. These differences show that increasing the XPS thickness to 8 cm decreases the energy amount per m<sup>2</sup> in a less ratio.

Figure 11 shows the impact of the insulation material on the annual energy cost. Annual energy costs of rock wool and glass wool are closer to each other, but high when compared to EPS and XPS.



**Figure 10.** External wall section for existing building



**Figure 11.** Annual energy cost for different insulation materials

**Table 10.** Annual energy and fuel usage according to insulation material

Insulation Material	Thickness of Insulation Material	Annual Energy Cost (\$)	Energy Usage Intensity (MJ /m <sup>2</sup> /year)	Annual Fuel Consumption ( MJ)
GLASSWOOL	3cm	\$3874	1335.3	93840
	5cm	\$3721	1257.9	86555
	8cm	\$3512	1214.3	79268
ROCKWOOL	3cm	\$3906	1350.0	95291
	5cm	\$3750	1271.4	87879
	8cm	\$3535	1225.6	80376
XPS	3cm	\$3746	1276.4	88037
	5cm	\$3611	1207.2	81506
	8cm	<b>\$3425</b>	<b>1172.5</b>	<b>75246</b>
EPS	3cm	\$3830	1315.0	91847
	5cm	\$3681	1239.7	84744
	8cm	\$3480	1199.0	77804

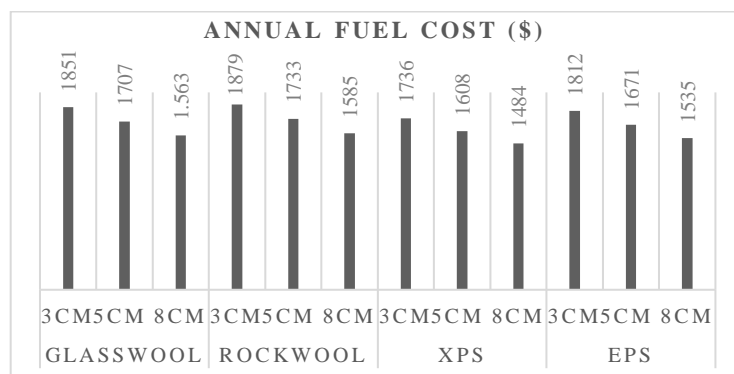
Annual fuel usage cost graphics for the insulation material is given in Figure 12. The insulation material with the lowest annual fuel cost is 8 cm XPS and the closest value becomes 8 cm EPS. The costs of rock wool and glass wool at 5 and 8 cm thicknesses have gradually come closer to each other.

Lifecycle cost, fuel amount used during the lifecycle and CO<sub>2</sub> emission amount stemming from the fuel usage are given in Table 11 according to the energy usage of the

different insulation materials. The most advantageous insulation material in terms of the energy usage is XPS and the results attained for EPS show that it is close to XPS. When the energy usage amounts of the insulation materials are examined according to their heat conductivity, specific heat and intensity values, it is seen that the most convenient insulation material is 8 cm XPS for the sample house.

**Table 11.** Life cycle analysis and CO<sub>2</sub> emissions for insulating material

Insulation Material	Thickness Of Insulation Material (cm)	Lifecycle Cost (\$)	Lifecycle Fuel Consumption (MJ)	Annual CO <sub>2</sub> Emission (Mg)
GLASSWOOL	3	\$52767	2815209	4.7
	5	\$50682	2596660	4.3
	8	\$47836	2378032	4.0
ROCKWOOL	3	\$53203	2858741	4.8
	5	\$51084	2636374	4.4
	8	\$48149	2411293	4.0
XPS	3	\$51031	2641121	4.4
	5	\$49191	2445183	4.1
	8	<b>\$46648</b>	<b>2257388</b>	<b>3.8</b>
EPS	3	\$52169	2755396	4.6
	5	\$50143	2542322	4.2
	8	\$47401	2334112	3.9



**Figure 12.** Annual fuel cost for different insulation materials

### 3.4 Comparison of the Suggestion Improving the Building Performance and the Current State

The selected alternative design, current location and the annual energy cost graphics of the selected parameters are given in Figure 13. The fact that the difference between the annual energy costs for the current house and the formed alternative is 1191\$ shows the advantage that could be provided in terms of cost.

The graphics in which the alternative design, current location and the selected parameters are compared according to their annual fuel costs is given in Figure 14. The parameter being most efficient in decreasing the fuel costs of the alternative design has been 8 cm XPS insulation application.

The selected alternative design, current location, the lifecycle assessment of the selected parameters and CO<sub>2</sub> emission amounts are given in Table 12. Lifecycle cost of the current house is 62810\$ and this cost decreases to 46648\$ in the formed alternative. It also shows decrease in the selected parameters and in the formed alternative in the amount of the annual CO<sub>2</sub> emission amount stemming from the fuel usage.

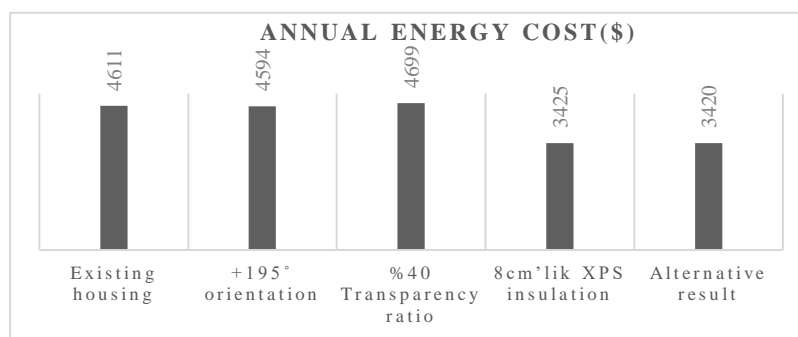
The highest impact has been attained with the change in the thermal insulation material of the outer wall in the

changed parameters. While the energy usage cost of the house is 4611\$ in current situation, it becomes 3425\$ when 8 cm XPS insulation material is used. Decrease has been observed in the energy usage, lifecycle cost and CO<sub>2</sub> emission amount stemming from the fuel usage in the alternative design formed by using the optimum energy usage values of the parameters of building orientation, southern facade transparency ratio and outer wall thermal insulation material. The lifecycle cost being 16236\$ in the formed alternative design decreases the CO<sub>2</sub> emission amount by 2.9 Mg.

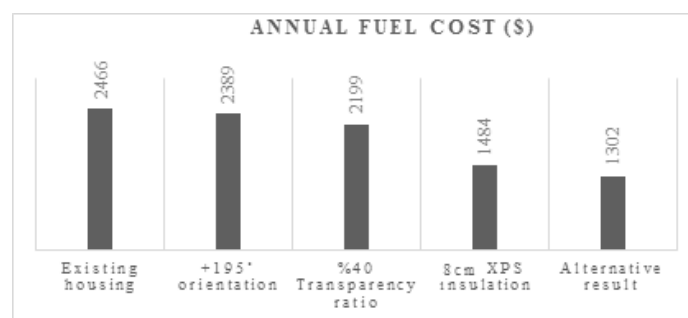
While the annual energy cost of the house is 4611\$ in the current state, it has been decreased to 3420\$ in the formed alternative. Annual fuel cost has decreased from 2466\$ to 1302\$, annual heating cost per square meter has decreased from 22.87\$ to 9.92\$, lifecycle cost has decreased from 62810\$ to 46574\$, annual CO<sub>2</sub> emission for on-site fuel usage has decreased from 6.2 Mg to 3.3 Mg. while the fuel usage cost for heating forms 51% of the total energy cost in the current situation, 32% of the total energy is fuel cost in the alternative design. The energy consumption amount used for heating has been attained as 66% at the first situation and has been attained as 47% for the formed alternative.

**Table 12.** Lifecycle analysis and CO<sub>2</sub> emissions

Affected Parameter	Lifecycle Cost (\$)	Lifecycle Fuel Consumption (MJ)	Annual CO <sub>2</sub> Emission (Mg)
Existing housing	62810	3751407	6.2 Mg
+195° orientation	62571	3633732	6.0 Mg
%40 Transparency ratio	64006	3344643	5.6 Mg
8cm'lik XPS insulation	46648	2257388	3.8 Mg
Alternative result	46574	1980352	3.3 Mg



**Figure 13.** Annual energy cost for selected alternative design



**Figure 14.** Annual fuel cost for selected alternative design

## 4 Conclusion

This study has been prepared with the integration of Autodesk Revit 2017 software with Green Building Studio. In the study, the impacts of the variables belonging to building orientation, transparency ratio and external wall thermal insulation material being from the parameters affecting the building energy performance on a used sample has been examined with BIM and an alternative design has been formed by taking the attained analysis results into consideration. The energy and cost savings of the formed alternative design and current building have been comparatively presented. Moreover; the lifecycle assessments and CO<sub>2</sub> emissions of the buildings have been mentioned and it has been aimed to form a foresight regarding these issues.

The results obtained from the study could be sequenced as follows;

- The highest impact in the changed parameters has been attained with the change in the thermal insulation material of the external wall. While the energy usage cost of the house in the current situation is 4611\$, it becomes 3425\$ when 8 cm XPS insulation material is used.
- Decrease has been observed in the energy usage, cost, usage amount during lifecycle and CO<sub>2</sub> emission amount stemming from the fuel usage in the alternative design formed by using the values of the parameters of building orientation, southern facade transparency ratio and outer wall thermal insulation material with the optimum energy usage.
- While the annual energy cost is 4611 \$ in the current state of the house, it has decreased to 3420 \$ in the formed alternative.
- While the annual fuel cost of the current house is 4611 \$, it has decreased to 1302 \$ in the formed alternative.
- Annual heating cost per square meter could be decreased from 22.87 \$ to 9.92 \$.
- Lifecycle cost has decreased from 62810 \$ to 46574 \$.
- Annual CO<sub>2</sub> emission for on-site fuel usage has decreased from 6.2 Mg to 3.3 Mg.
- While the fuel usage cost for heating in current situation forms 51% of the total energy cost, 32% of the total energy is fuel cost in the alternative design.
- While the energy consumption amount used for heating has been 66% in the first situation it has been attained as 47% for the formed alternative design.
- In the formed alternative design, lifecycle cost decreases by 16236 \$ and CO<sub>2</sub> emission amount decreases by 2.9 Mg.

The results of the study on the improvement of the energy performance have affected the fuel usage more than electricity usage. Despite this; due to the fact that the fuel costs have been calculated upon 0.02\$ and the electricity costs have been calculated upon 0.17\$, decreasing the usage of electricity will decrease the energy consumption cost more. With this study, it has been shown that it is possible to conduct the energy analyses for a building applied or at design stage with the building information modeling applications and the validity of these analyses will also be able to be provided.

## 5 References

- Abanda, F.H. ve Byers, L., 2016. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling), *Energy*, 97, 517-527.
- Akcatir, M.A., Nacar M.A. and Yeşilata, B., 2011. A short assessment on software for energy efficiency in buildings, X. National Installation Engineering Congress, Energy Performance in Buildings Symposium, İzmir, Turkey 13-16 April, p. 853-862.
- Armutlu, S.G., 2019. Energy analysis in buildings with building information modelling applications, Master Thesis, Firat University, Institute of Science, Elazığ, Turkey.
- Autodesk Revit. BIM based program. [Internet]. [cited October 2019] Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products>.
- Bueno, C. and Fabricio, M., 2018, Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in, *Automation in Construction*, 90, 188-200.
- Douglass, C.D., 2010. Instructional modules demonstrating building energy analysis using a building information model, Master of Science Thesis, University of Illinois at Urbana, Champaign.
- Flores M.S.M., 2016. Building performance evaluation using Autodesk Revit for optimising the energy consumption of an educational building on subtropical highland climate: A case of study in Quito, Ecuador, Master Thesis in Renewable Energy and Architecture, The University of Nottingham, UK.
- Harpulutgil, G., 2007. Architectural design process in the building energy simulation program applications, *Technology*, 10, 249-265.
- IEA (International Energy Agency), 2018. The Future of Cooling, Opportunities for energy-efficient air conditioning, Paris, France [Internet]. [cited July 2019]. Available from: <http://www.iea.org/pub.htm>.
- Işın, A., 2016. A model proposal for concept design of residential buildings and settlements considering energy efficiency, *Master Thesis*, İ.T.Ü., İstanbul, Turkey.
- Jonathan Shi (2017) A quantitative method for assessing home envelope's energy performance using measured data, *International Journal of Construction Management*, 17:2, 89-99.
- Karakoç, T.H. Turan, O. Binyıldız, E. ve Yıldırım, E., Thermal Insulation, 1st edn. Rota, Istanbul 2011.
- Kuo, H. Hsieh, S. Guo, R. Chan, C., 2014. A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM, *Energy and Buildings*, 130, 676-691.
- Le, M.K., 2014. Autodesk Green Building Studio for an energy-efficient sustainable building, Bachelor's Thesis, HAWK University of Applied Sciences, Germany.
- Leinartas, H.A. ve Stephens, B., 2015. Optimizing whole house deep energy retrofit packages: a case study of existing chicago-area homes, *Buildings*, 5, 323-353.
- Martin, P., 2013. Building Information Modelling (BIM) based

- energy analysis and response to low carbon construction innovations, MSc. in Energy Management, Institute of Technology Sligo, Ireland.
- Öktem, S. and Ergen, .E. 2017. Operational framework for the transition to BIM, 7th International Construction Management Congress with International Participation, Samsun, Turkey. 06-07 October, 627-635.
- Röck, M., Hollberg, A., Habert, G. and Passer, A., 2018. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages, *Building and Environment*, 140, 153-161.
- Sancaktar, O. 2015. Investigation on the building an application example in heating performance, *Master Thesis, İ.T.Ü., İstanbul, Turkey*.
- Savaşkan, M.O., 2015. A BIM based open source system model for high energy performance residential buildings, *Master Thesis, İ.T.Ü., İstanbul, Turkey*.
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. and Garcia- Martinez, A., 2016. Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments, *Building and Environment*, 103, 215-227.
- Tuik, Turkish Statistical Institute. [Internet]. [cited September 2017]. Available from: <http://www.tuik.gov.tr/Start.do>.



## NATURAL VENTILATION PERFORMANCE OF RESIDENTIAL URBAN AREAS AT PEDESTRIAN LEVEL: COMPARISON OF OLD AND NEW SETTLEMENTS

Ayça Gülten<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Architecture, Faculty of Architecture, Firat University, Turkey

Original Scientific Paper

This study evaluates the natural ventilation performance of different urban areas in Elazığ, Turkey based on a parameter called “spatially averaged- wind velocity ratio”. The Computational Fluid Dynamics (CFD) 3-D steady-state simulations were made for old and newly built urban areas in Elazığ. Wind velocities of 3 and 5 m/s with NW prevailing wind direction were used in the simulations. Spatially-averaged wind velocity ratio (VRW) considering 20 m and 30 m building heights were used in the study as governing parameters. It is found that, there is remarkable difference between natural ventilation performance of configurations assessed for old and new settlements. Narrow streets in old settlements could not be ventilated effectively while the streets in new settlements have a better wind distribution and ventilation potential.

**Keywords:** Natural ventilation, urban areas, CFD, wind velocity ratio

### 1 Introduction

The urbanization character of a city directly affects the ventilation performance of urban areas. Uncontrolled urbanization also causes increase with energy consumption beside uncomfortable outdoor conditions for human being. In urban areas exposed to poor ventilation, the urban heat island effect is stronger with the effect of traffic pollutants and reduced green areas.

Urban building arrangement and street networks in an urban area could be defined as the main factors that affect the ventilation performance of a city [1]. Many studies on ventilation performance of urban areas used computational fluid dynamics simulations. Yuan and Ng [2] developed a practical application in order to predict the wind environment at pedestrian level in high rise urban areas of Hong-Kong. They aimed to find answer to the questions about input boundary conditions, simulation modelling, modelling verification, data collection and analysis. Du and Mak [3] developed a framework in order to improve the low wind velocity environment in high density cities. They performed Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations for three different cases considering campus model with lift-up design, without lift-up design and with an opening in building Y. They found that proposed design framework could help in improve the low wind velocity environment at pedestrian level. He et al. [4] studied the effect of angular road patterns on pedestrian wind environment. They found that wind flow is affected by also relative orientation of adjacent road segments beside prevailing wind direction. Mirzaei and Haghighat [5] introduced a ventilation system

to improve the air quality at pedestrian level. They studied using computational fluid dynamics and on comfort parameters such as air temperature, wind velocity, air exchange rate. The results of simulations showed that physical ventilation system could improve the pedestrian level wind comfort.

Many of the studies that aimed to improve the wind environment in urban areas used indices to evaluate the performance of natural ventilation [6]. Spatially-averaged wind velocity ratio has become a remarkable parameter in recent years. Peng et al [7] used spatially-averaged wind velocity ratio as a natural ventilation indicator with air temperature. They compared the ventilation performance of different configured urban spaces by using CFD. Hu and Yoshie [8] also used spatially-averaged wind velocity ratio with CFD simulations. They evaluated natural ventilation of urban areas comparing a reference urban model that represents the residential region of Shanghai with configurations that have different building coverage ratios and building arrays and heights. Peng et al.[9], compared the ventilation performance of three high-rise residential areas in Jinan and emphasized the importance of avoiding matrix arrangement of buildings to provide a good ventilation. He et al. [10], evaluated urban breezeway networks over different morphological components. They proposed a linear regression analysis in order to predict the pedestrian wind velocities. Wise et al.[11], studied on the effect of small modifications to the inlet wind direction on CFD simulation results for seven different wind directions with 5° increasing angles from 205° to 235°.

\* Corresponding author.

E-mail address: aycagulten@gmail.com (A. Gülten) | ORCID Number : 0000-0001-9837-8674

Received 15 November 2019; Received in revised form 17 December 2019; Accepted 23 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

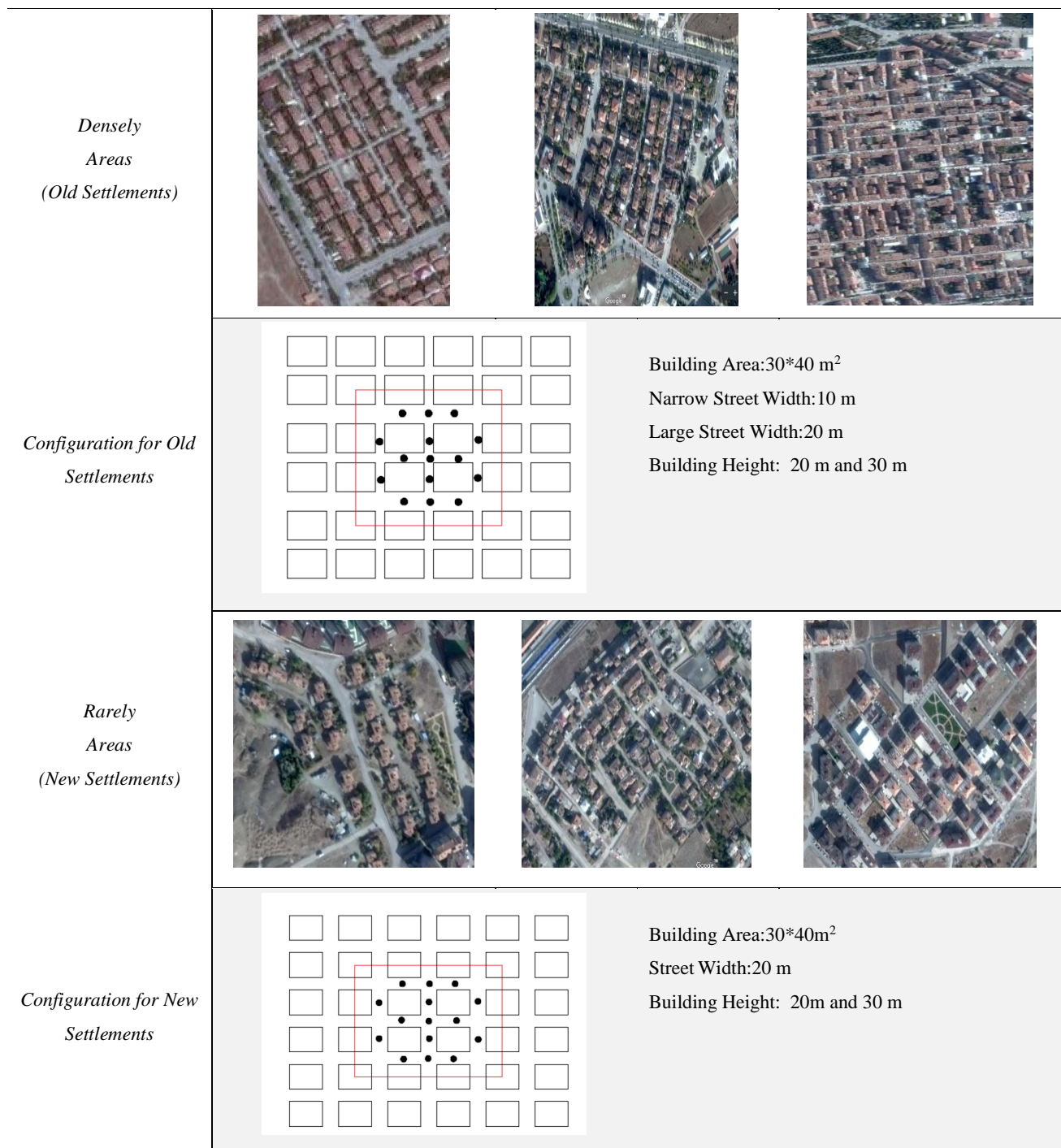


In Turkey, evaluation of natural ventilation performance of urban areas have been ignored especially in the urban transformation process. On the other hand cities' uncontrollable growth adversely affects ventilation performance of urban districts beside causing an increase for cooling and heating loads. The main aim of this work is to evaluate the natural ventilation performance of a city, Elazığ, which is on east side of Turkey considering old and new settlements to be able to analyze the growing quality of city in terms of it's ventilation ability. Based on the literature survey and author' knowledge, this work is the first attempt in order to evaluate the natural ventilation performance of a city in Turkey by comparing old and new settlements' urbanisation characters. Thus, it is aimed

to lead a better urbanisation process for new settlements by concerning ventilation performance of old settlements.

## 2 Method

In this study, Elazığ's urban morphological characteristics have been classified with changing layouts for old and newly built settlements (Figure 1). Modelling process of urban morphological features have been established due to some assumptions determined for old and newly constructed urban areas. Old settlements present a layout with densely structured residential blocks while the new settlements stand seperately with a rectangular plan layout.



**Figure 1.** Configurations for old and new settlements in Elazığ [12].

20 m and 30 m high buildings have been evaluated for two different configurations. Figure 1 presents the assessed configurations based on existing settlements for both of old and new urban areas. Simulations were made for whole configuration while wind velocity values have been calculated for the points determined in the red square.

### 2.1 Solution Methodology

The velocity profile ( $U$ ) of inlet, the turbulent kinetic energy profile ( $k$ ) and turbulent dissipation rate profile ( $\epsilon$ ) are calculated by equations (1) – (3)

$$U_0 = U_{ref} \left(\frac{z}{H}\right)^{0.25} \quad (1)$$

$$k(z) = u_*^2 / \sqrt{C_\mu} \quad (2)$$

$$\epsilon(z) = C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}} / (k_\nu z) \quad (3)$$

Where  $z$  presents the height coordinate (m),  $z_0$  is the aerodynamic roughness length (m),  $k$  is the von Karman constant, and  $u_*$  is the atmospheric boundary layer friction velocity (m/s) [13]. The governing equations of Fluent have not been presented in order to summarize the paper and could be found in the reference [14].

### 2.2 Boundary Conditions and Simulation Set-Up

Building width and length are accepted as 30mx40m respectively. Street widths are accepted as 10 m for densely and 20 m for rarely urban areas. The height of the computational domain is set to 6H while the outlet boundary is set to 15H away from buildings (Figure 2) [15]. The prevailing wind direction is set up as NW, while on the Cartesian coordinate system, the X-direction represents the East and the Y-direction the North. Since 2 to 5 m/s wind speed is dominant in Elazığ [16], inflow wind velocities 3m/s and 5m/s have been used in order to evaluate natural ventilation performance of urban districts.

In this study, simulations were performed by a commercial CFD program Ansys Fluent 18. 5. Modelling and meshing studies were also performed in Workbench in accordance with Fluent solver. Mesh skewness ratio was accepted as a criteria for mesh quality. Since it is aimed to evaluate the ventilation efficiency of building arrays, standart k-ε model is used for steady-state three dimensional simulations [8] .

### 2.3 Spatially Averaged Wind Velocity Ratio

Wind velocity ratio ( $W_{RW}$ ) is a remarkable indice to measure the wind's availability in an urban area considering pedestrian level. It is the ratio of wind velocity at the top of the boundary layer to the wind velocity at about 2m above ground.  $W_{RW}$  is strongly affected by arrangement of buildings in an urban area [17].

It can be calculated by equation (4)

$$V_{RW} = V_p / V_{ref} \quad (4)$$

$V_p$  presents the wind velocity at 2m above the ground level (pedestrian level) while  $V_{ref}$  is the inlet velocity of the wind. It is necessary to assess measurement points distributed about 10-50 m apart around the study area in order to calculate the spatially averaged wind velocity ratio [17].

### 2.4 Validation Study

An observational study was performed in order to validate the code. For this purpose, wind velocity measurements were done for the points determined as P1 to P5 (Figure 3) on the new settlement. Measurements were done by a mobile CEM DT-619 model thermo-anemometer [18] and taken on 21<sup>th</sup> September 2019. Average wind velocities and directions of the related day for Elazığ was taken from the Government Meteorological Office. This data is used as input for the simulations that were done for validation study. Measured and simulated wind velocities presented in Figure 4 and showed a good agreement.

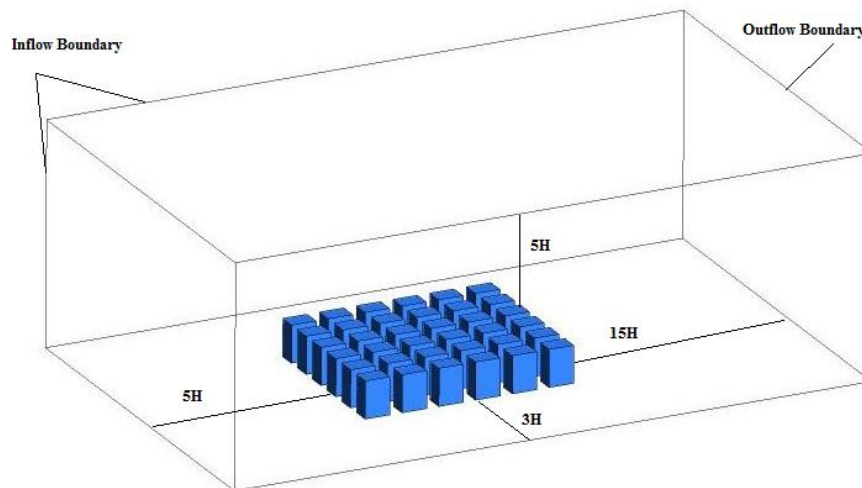


Figure 2. Domain of the study

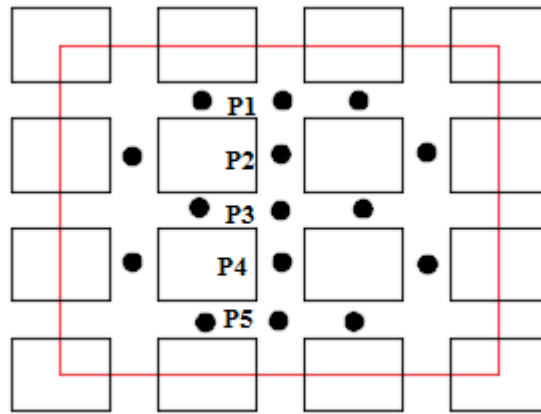


Figure 3. Assessed points in the configuration of new settlement for the validation study.

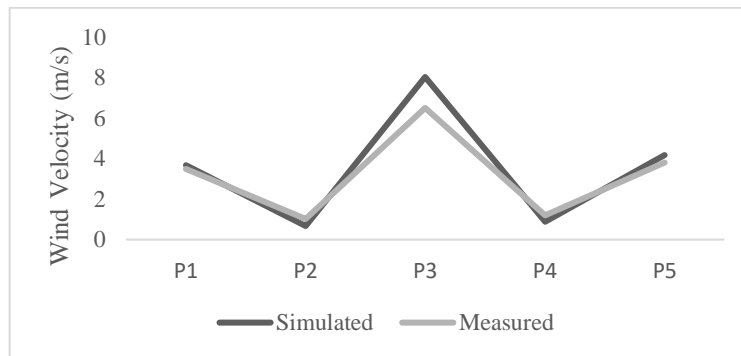


Figure 4. Comparison of measured and simulated wind velocities for P1-P5 points

### 3 Results

In this study, a CFD computation was completed in order to analyse the natural ventilation performance of two different configurations that represent the old and new settlements in Elazığ. Two wind velocities (2 and 5 m/s) and two different building heights were taken into consideration for simulations. Configurations were analyzed based on  $V_{RW}$  for 15 points determined on the settlements while calculation results were supported by visual flow field images.

Figure 5 shows the  $V_{RW}$  values calculated due to simulations results. Old city configuration has lower  $V_{RW}$  values and the difference between old and new configurations is very remarkable. Changing wind velocity does not affect the configurations’s natural ventilation performance and values for  $V_{RW}$  is very close to each other while it is 0.14 for 20 m height buildings considering 3 and 5 m/s wind velocities. It is equal to 0.15 for 3m/s and 0.12 for 5m/s wind velocities considering 30 m height buildings. Figure 6 presents the flow field for old configuration considering defined building heights and wind velocities. Because of the wind’s NW direction, coming flow could not be influenced by narrow streets and natural ventilation performance is weak in general. Laminar flow field is dominant on the 20 m width streets. Increasing wind velocity does not provide an increase for  $V_{RW}$  while increasing building height causes decreasing with natural ventilation performance. Narrow streets in the old configuration is the main problem that cause lower  $V_{RW}$  for old city configuration. Most of the narrow streets lack of natural ventilation

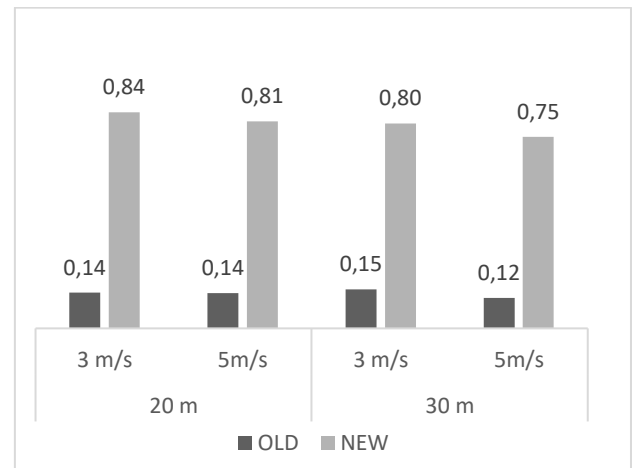
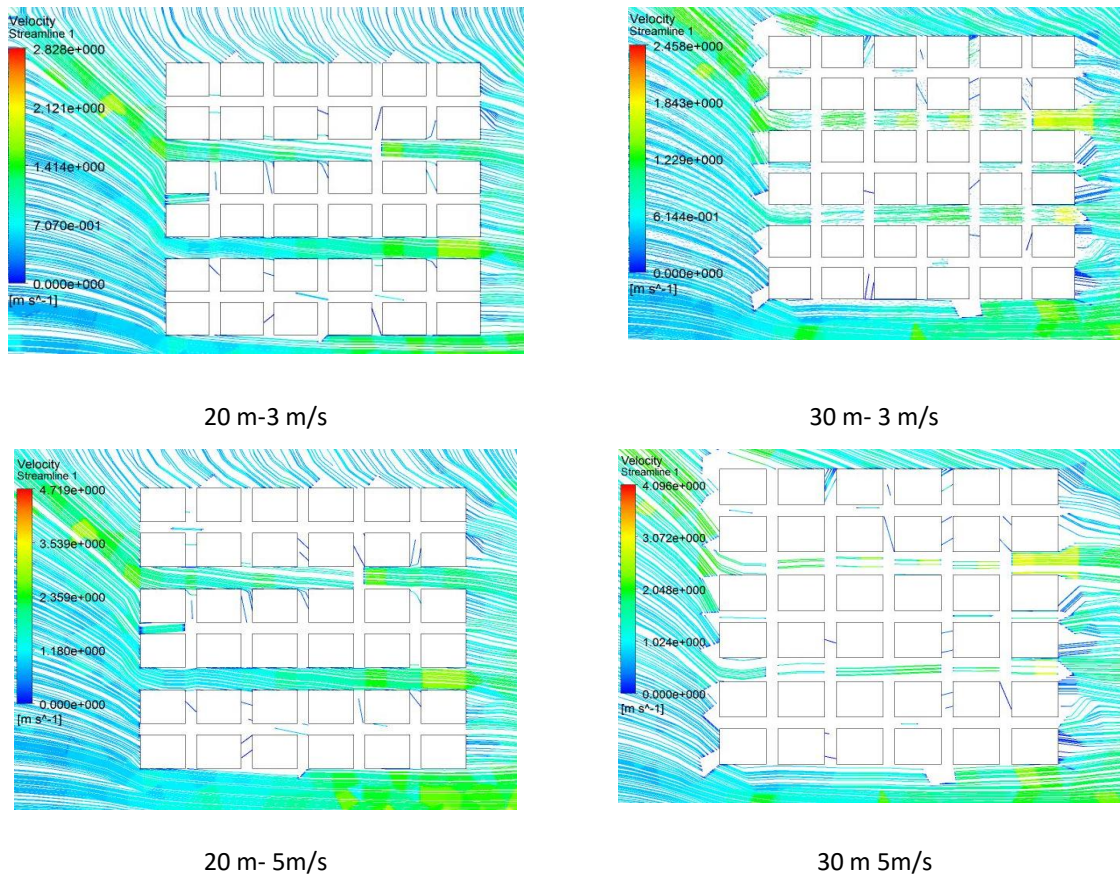
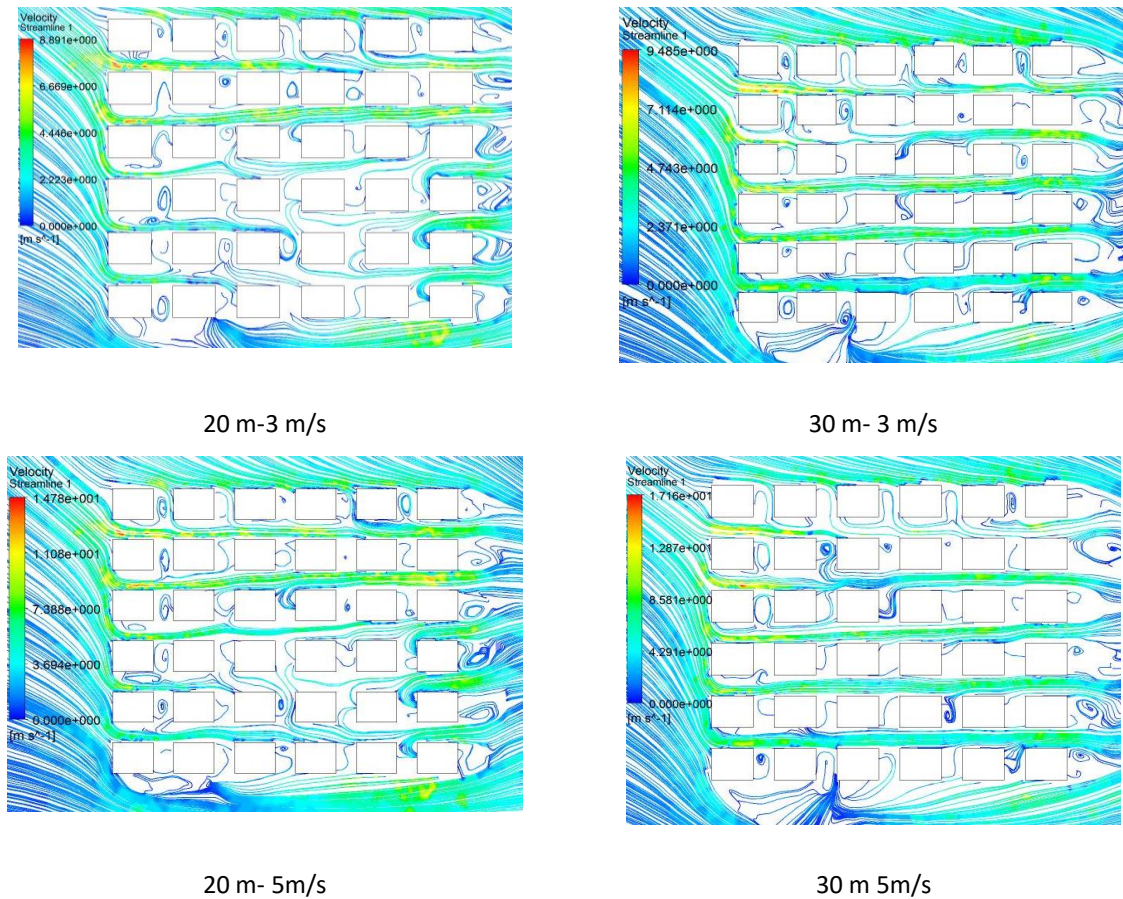


Figure 5.  $V_{RW}$  of configurations assessed for old and new settlements

$V_{RW}$  values varied between 0.84 and 0.75 (Figure 5) for configuration of new settlement. Better ventilation results were calculated for 3m/s wind velocity. Configuration for new settlement showed a balanced ventilation performance in comparison with configuration of old settlement. Figure 7 presents the flow field via wind velocities and building heights for configuration of new settlements. Due to the coming wind direction, flow goes fluently on the horizontal axis. The flow escaped between buildings on the vertical axis provides a cross ventilation for street grids. For the consideration of new settlement, streets on both of X and Y axes show a good performance in terms of natural ventilation while the ones on X axis have a better performance because of wind’s coming angle.



**Figure 6.** Simulated flow field for configuration of old settlements



**Figure 7.** Simulated flow field for configuration of new settlements

The laminar flow is dominant on X axis while turbulent flow occurs in the streets of Y axis that are perpendicular to the wind flow. Increasing wind velocity also increases the laminar flow effect. Increasing building height decreases the wind distribution (Figure 7). For example, 20 m height buildings with 3 m/s have a better wind distribution in comparison with the configuration with 30 m height buildings considering new settlement. This increases turbulent flows between buildings for the configuration with 20 m height buildings and the wind velocity ratios decrease. Depending on the geometry of buildings in the configuration, lower building heights provide better and comfortable outside conditions.

#### 4 Conclusion

In this work, the aim was to analyze the ventilation performance of old and new settlement configurations existing in Elazığ province in the east of Turkey. CFD-based simulations were completed considering, 3 m/s, and 5m/s wind velocities for NW wind direction. 20 m and 30 m building heights have also been used as governing parameters. Wind velocity ratios for old and new settlement configurations were determined and related flow field images were presented. Main findings of the study could be listed as:

- Configuration for old settlements showed lower  $V_{RW}$  values. The difference between old and new settlements is remarkably high. It is 0.70 for 3m/s, 0.67 for 5m/s, when the building height is 20m and 0.65 for 3 m/s, 0.63 for 5 m/s when the building height is 30 m.
- Configuration for new settlements presented  $V_{RW}$  values as 0.84 and 0.81 for 3 and 5 m/s wind velocities when the building height is 20 m, 0.80 and 0.75 for 3 and 5 m/s wind velocities when the building height is 30 m.
- Increasing wind velocity did not increase the natural ventilation potential. It is much more related to urban configuration and wind direction.
- Configuration for new settlements presented a balanced wind distribution while narrow streets in the configuration for old settlements lack of natural ventilation.
- Increasing building height showed that laminar flows increase and distribution of wind is blocked.

Since urban configuration is the most important parameter that affect the urban ventilation, a comparison of old and new settlements have been analysed in order to notice the negative or positive sides of old and new urban areas in terms of natural ventilation. The author intends to develop the types of configurations that represent old and new settlements with future studies in order to make comparisons from a wider perspective.

#### 5 References

1. Givoni, B., *Climate Considerations in Building and Urban Design*, Van Nostrand Reinhold, Newyork, 1998.

2. Yuan, C., Ng, E., (2014). Practical application of CFD on environmentally sensitive architectural design at high density cities: A case study in Hong Kong. *Urban Climate*, (8), 57–77.
3. Du, Y., Mak, C.M., 2018. Improving pedestrian level low wind velocity environment in high-density cities: A general framework and case study. *Sustainable Cities and Society*, (42), 314–324.
4. He, Y., Tablada, A., Wong, N.H. 2019. Aparametric study of angular road patterns on pedestrian ventilation in high-density urban areas. *Building and Environment*, (151), 251–267.
5. Mirzaei, P.A., Haghighat, F., 2010. A novel approach to enhance outdoor air quality: Pedestrian ventilation system. *Building and Environment*, (45)-,1582-1593.
6. Qihong Deng, Guangxing He, Chan Lu & Weiwei Liu (2012) *Urban Ventilation - A New Concept and Lumped Model*, *International Journal of Ventilation*, 11:2, 131-140.
7. Peng, Y., Gao, Z., Ding, W., (2017), An Approach on the Correlation between Urban Morphological Parameters and Ventilation Performance. *Energy Procedia*, (142), 2884-2891.
8. Hu, T., Yoshie, R. (2013). Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (112), 39-51.
9. Peng, Y., Gao, Z., Ding, W. (2017). An investigation on outdoor ventilation performance in high-rise residential districts based on CFD simulation and field measurement. *Procedia Engineering*, (205), 3035-3041.
10. He, Y., Tablada, A., Wong, N.H. (2018). Effects of non-uniform and orthogonal breezeway networks on pedestrian ventilation in Singapore's high-density urban environments. *Urban Climate*, (24), 460-484.
11. Wise, D.J., Boppana, V.B.L. Li, K.W. Poh, H.J. (2018). Effects of minor changes in the mean inlet wind direction on urban flow simulations. *Sustainable Cities and Society*, (37), 492-500.
12. Google Earth, 2019.
13. Bouhacina, B., Saima, R., Benzenine, H., Oztop, H.F. (2013). Analysis of thermal and dynamic compartment of a geothermal vertical U-tube heat exchanger. *Energy and Buildings*, (58), 37-43.
14. Ansys Fluent User's Guide, 2019.
15. Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A., Krüs, H., Schatzmann, M., Westbury, P., et al. (2004). Recommendations on the use of CFD in wind engineering. *Cost Action C*, vol. 14, C1.
16. Government Meteorological Office of Turkey, (10.02.2019)
17. Ng, E. (2009) Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong, *Building and Environment*, (44), 1478-1488.
18. www. Cem-instruments.com/en (1.11.2019)



## FAILURE ANALYSIS OF WELD JOINTS

Serdar Mercan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, Turkey

Review Paper

The weakest element in a welded structure or machine is the joint areas. For this reason, failure analysis of welded joints is very important in terms of system operation and preventing recurrence of similar failures. Failure analysis of welded joints; it is a method that identifies the causes of the connection to be damaged by detecting the failure and taking into account the negative factors that arise due to these failures. Failures occur depending on welding design, manufacturing process or working conditions. Damage is caused by excessive stress and the combination of one or more technological failures. The types of damage can be classified under the main headings as crash, fracture, corrosion and fatigue damages. In this study, it is aimed to investigate the mechanism of damage occurring in welded metal materials and to determine the causes of damage and to create a systematic approach to be used in failure analysis.

**Keywords:** Welding, Failure, Failure analysis, Welding defects, Types of failure

## KAYNAK BAĞLANTILARINDA HASAR ANALİZİ

Derleme

Kaynaklı bir yapıda veya makinede en zayıf unsur birleşme bölgeleridir. Bu nedenle kaynaklı bağlantılarda hasar analizi sistemin çalışması ve benzer hataların tekrarını önlemek açısından çok önemlidir. Kaynaklı bağlantılarda hasar analizi; hataları tespit etmekte ve bu hatalar nedeni ile ortaya çıkan olumsuz faktörleri göz önünde bulundurarak, bağlantının hasara uğrama nedenlerini ortaya koyan yöntemdir. Hatalar kaynak tasarımı, imalat süreci veya çalışma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Aşırı zorlanma ve teknolojik hatalardan bir veya birkaçının biraraya gelmesi sonucunda hasar meydana gelmektedir. Oluşan hasar türleri ise çarpılma, kırılma, korozyon ve yorulma hasarları olarak ana başlıklar altında toplanabilir. Bu çalışmada, kaynak yöntemi ile birleştirilmiş metal malzemelerde oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi ile hasar nedenlerine karar vermek ve hasar analizlerinde kullanılmak üzere sistematik bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaynak, Hasar, Hasar analizi, Kaynak hataları, Hasar türleri

### 1 Giriş

Kaynak yöntemleri; mühendislik uygulamalarındaki gelişmeler, yeni malzeme türlerinin bulunması ve ihtiyaçların artması ile birlikte oldukça gelişmiştir. Bu gelişim ile birlikte aynı veya farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde kaynak yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum kaynak yönteminin endüstride önemini son derece arttırmıştır [1]. Kullandığımız hemen hemen her üründe karşımıza çıkan kaynaklı yapıda veya makinelerde en zayıf unsur birleşme bölgeleridir. Bu durum sistemin bütünlüğünü bozmamak amacıyla kaynaklı bağlantıların kullanılmaz hale gelme durumunun araştırılmasını ve hasar analizlerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır [2]. Hasar analizi, hasar kanıtlarının toplanıp, incelenerek bir parçanın veya sistemin hasara uğrama nedenini ve hasarın karakterizasyonunu belirlemede yapılan inceleme, yorumlama ve raporlama işlemlerini içermektedir. Bu işlemlerle, hasarın oluşum nedenleri anlaşılabilir ve gelecekte benzer hasarların önlenmesi için gerekli tedbirlerin alınması sağlanır [3]. Aynı zamanda hasar analizi ile sistemlerin ve ürünlerin kalitesindeki ilerleme takip edilebilir.

Hasar analizi konusunda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Hasar analizinin üretimde etkinliğini gösteren çalışmasında Toparlı (2019), bir üretim hattında düşük

çevrimde kırılan parçalardaki hasar sebeplerini incelemiş ve sistemin tasarımı revize ederek çalışma ömründe yaklaşık 20 kat iyileşme sağlamışlardır [4]. Hasar analiz süreçlerinin uygulandığı diğer çalışmalarda Öndürücü vd. (2017), hasar analiz süreçlerini uygulayarak bir greyderin dişli rotunun oluşan hasarın nedenlerini araştırmışlar ve malzeme türünü tespit ettikten sonra hasarlı parçadan standartlara uygun numuneler hazırlayarak sertlik, çentik darbe ve üç nokta eğme deneyleri ile metalografik incelemeler yapmışlardır [3]. Kumari vd. (2014), bir uçak motorunun türbin rotorlarındaki kanatçıkların uğradığı hasarın sebebinin araştırmışlardır. Hasarın nedenini araştırırken bıçakların mikro ve makro açıdan yapısal incelemelerini, kimyasal analizini ve sertlik ölçümlerini yaparak hasar analiz süreçlerini başarılı bir şekilde tamamlamışlardır [5]. Kaynaklı bağlantılarda da hasara neden olan hatalar arasında yer alan geometrik dizayn, konusundaki inceleme Aktaş vd. (1999), tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında pim bağlantılı karbon/epoksi kompozit levhalarda geometrik parametrelerin hasar yükü üzerindeki etkilerini deneysel yöntemlerle incelemişler, hasar davranışları deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır [6]. Tariq vd. (2012), yüksek yoğunluklu basınçlı doğalgaz borularında meydana gelen hasar için ayrıntılı bir hasar analizi yapmışlardır. Gözle muayene sonucunda hasarın başlangıcının iki farklı malzemenin

\* Corresponding author.

E-mail address: smsmercank@gmail.com (S. Mercan) | ORCID Number : 0000-0002-1225-8290

Received 24 November 2019; Received in revised form 16 December 2019; Accepted 23 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

birleştirildiği kaynak bölgesinde olduğunu tespit etmişlerdir. Hasarın temel nedeninin birleştirilen malzemeler arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığını bildiren incelemelerini mekanik, termal ve metalürji muayenesi dahil üzere çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilmişlerdir. Hasarlı eklem yüzeyinin fraktografisinin, tipik yorulma hasarı olduğunu, mekanik test sonuçları ile ana malzemeler arasındaki çekme ve yorulma dayanımları arasında büyük uyumsuzluk olduğunu bildirmişlerdir. Ana malzemelerin erime noktalarını diferansiyel taramalı kalorimetre ile belirlemiş ve erime noktası indeksleri arasında büyük fark bulmuşlardır [7]. Malachowski vd. (2016), bir saldırı tüfeğindeki mekanik hasarın nedenlerini belirlemek için kullanılan bir araştırma metodolojisi sunmuşlardır [8]. Rakesh vd. (2007), kaynaklı bağlantılarda hasarın önlenmesi için digraph modelleme ve matris yaklaşımına dayalı bir prosedür kullanmışlardır. İşlem prosesi ile hasar modunun en aza indirilmesi için çeşitli hasar nedenlerini belirlemeye çalışmışlardır. Uygun eylemlerin sonucunda bağlantıların güvenilirliğinin artırılmasının tasarımcı ve uygulayıcılar için faydalı olacağını, kaynaklı bağlantılarda güvenliğinin artırılmasında hata sebeplerini ve yayılımını anlamak gerektiğini belirtmişlerdir [2].

Bu çalışmada, kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiş metal malzemelerde oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi ve hasar nedenlerine karar vererek, hasar analizlerinde kullanılmak üzere sistematik bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır.

### 1.1 Kaynak İşlemi

Kaynak işlemi aynı ya da farklı malzeme çiftlerinin ısı, basınç ya da her ikisini birlikte kullanarak malzemelerin ergime sıcaklıkları altında katı halde veya ergime sıcaklıklarının üstünde ergiyik halde yapılan birleştirme yöntemidir. Kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen parçaların sürekliliği bozulmaz ve sökülemeyen bir birleştirme elde edilir.

Kaynak yöntemleri malzeme türüne, işleme yöntemine, uygulama şekline ve kaynağın amacına göre sınıflandırılabilir (Şekil 1). Kaynak yöntemlerinin çeşitliliği kullanılan teknik donanımın sayısını da artırmaktadır [9]. Bu ise kaynaklı bağlantıların hasar analizinde üretim/tesis hatalarının tespit edilmesinde ihtiyaç duyulan ve incelenmesi gereken donanım ve parametre sayısının fazla olmasına neden olmaktadır.

### 1.2 Metallerin Kaynak Edilebilirliği

Kaynak yöntemi ile birleştirilen bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler ısı ve basınçtır. Kaynak yöntemi ile birleştirilmiş metalsel bir malzemede meydana gelen mikro yapı değişiklikleri Şekil 2' de gösterilmiştir [12]. Mikroyapı değişimleri ile birlikte malzemenin mekanik ve kimyasal bazı özellikleri değişmektedir. Özellikle kaynak işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklığın yerel dağılımı ve değişimi karşısında metalin davranışı kaynak kalitesinin

belirlenmesinde ve oluşabilecek bir hasar üzerinde etkili olmaktadır [10, 11].

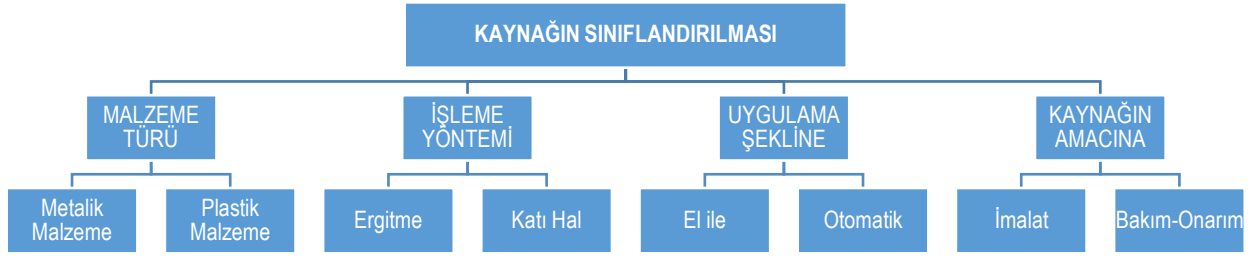
Kaynak için gerekli sıcaklığa kadar ısıtmayı izleyen soğumaya bağlı olarak kaynak bölgesinde, çeşitli ısı işlemler görmüş dolayısı ile mekanik özellikleri ve içyapısı gerek esas metal ve gerekse kaynak metalinden farklı bölgeler ortaya çıkmıştır. Farklı özelliklerdeki bu bölgelerde, tüm yapının zorlanması halinde, gerilme ve şekil değişiminde olduğu gibi korozyona dayanıklılıkta da esas metalden farklı davranışlar görülür. Kaynak yapılan bir parçada kaynak bölgesi, erime bölgesi ve ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) olmak üzere üç bölümde incelenir [13].

Kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini bu bölgelerde oluşan mikroyapılar doğrudan etkilemektedir. Bu mikroyapılar, kaynak edilen parçanın kalınlığına, kimyasal bileşimine ve enerji girişine bağlı olarak değişim göstermektedir [14]. Kaynak metali ile esas metalin birleştiği sınırdan başlayarak, kaynak sırasında uygulanmış olan ısının oluşturduğu çeşitli ısı çevrimlerinden etkilenmiş ve dolayısı ile içyapı değişimine uğramış, ITAB olarak adlandırılan alan kaynak bölgesinin ikinci kısmını oluşturur. Bu bölge çeliğin üretim sürecindeki ısı çevrimlerinden farklı olduğundan, ortaya içyapısı buna bağlı olarak mekanik özellikleri farklı bir bölge ortaya çıkar. Çeliklerin kaynağında, bu bölgede sıcaklık 700 - 1450 °C arasında değişmektedir. Erişilen maksimum sıcaklığa bağlı olarak içyapı ve özellikleri farklı bölgeler oluşur (Şekil 2). Kaynak sırasında ITAB hızlı bir şekilde ısınmakta ve sonrada parça kalınlığı, kaynağa uygulanan enerji ve ön tav sıcaklığının fonksiyonu olarak hızlı bir biçimde soğumaktadır. Çeliğin bileşimine göre bu soğuma hızı, kritik soğuma hızını aştığında, genellikle 900 °C' nin üstündeki bir sıcaklığa kadar ısınmış bölgelerde sert, dolayısı ile kırılgan bir yapı elde edilir. Genellikle, ısının tesiri altında kalan bölge diye adlandırılan bu bölge kaynak bağlantısının en kritik bölgesidir ve birçok çatlama ve kırılmalar bu bölgede oluşur [13]. ITAB' da oluşabilecek muhtemel bir hata, kaynak bölgesindeki sorunların temelini oluşturmaktadır [14]. Bununla birlikte, hasar analizleri yapılırken kaynak yöntemi, kaynak parametreleri, malzeme çiftlerinin seçimi, dolgu metali, ortam şartları, kaynak öncesi yapılan işlemler, kaynakçı gibi birçok etkenin kaynaklı bağlantının kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır.

## 2 Hasar Analizi

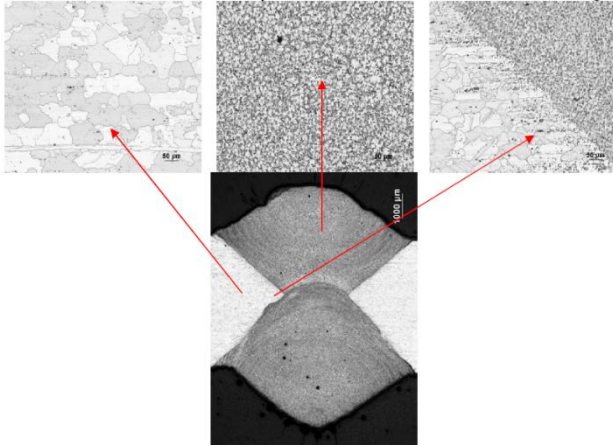
### 2.1 Hasar

Hasar, bir malzemenin veya yapının beklentiler ölçüsünde işlevini yerine getirememesi ve kullanılmaz hale gelmesidir. Oluşan hasarlar ürünün mekanik ya da kimyasal etkilerle aşırı zorlanması sonucunda meydana gelir [15]. Aşırı zorlanma; ürünün taşıyabileceği zorlanmaya ek olarak, ürünün tasarımı, malzeme içyapısı, imalat, montaj ve uygun olmayan çalışma koşullarında meydana gelen teknolojik hataların oluşturduğu zorlanmalarında eklenmesiyle oluşur. Çünkü bir ürün tasarım, imalat, montaj ve işletme evrelerinden geçirilerek kullanılır.



Şekil 1. Kaynağın sınıflandırılması [9]

Bu evrelerden birinde yapılan bir veya birkaç teknolojik hata nedeniyle hasar ortaya çıkar [16,17,18]. En basit haldeki hasarda sistem veya parça çalışır ancak amacına uygun fonksiyonlarını yerine getiremez. Bu hasar işlev hasarı olarak tanımlanabilir. Hasarın diğer aşamasında sistem veya parça görevini yerine getirir ancak emniyetsiz olarak çalışır. Bu aşama servis ömrünün zarara uğramasına neden olur. Hasarda en son aşama ise sistemin veya parçanın görevini yerine getiremez hale gelmesidir. Parçalarda oluşan hasarların tamamen önlenmesi ise mümkün değildir [19].



Şekil 2. Kaynak bölgesinde oluşan mikroyapı [12].

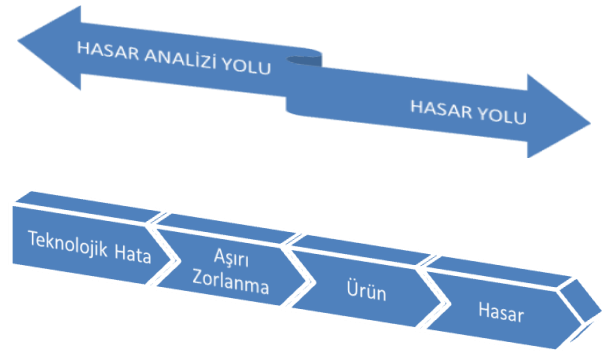
## 2.2 Hasar Çeşitleri

Hasarı sınıflandırmanın birçok yolu mevcuttur. Sınıflandırma sistemine bağlı olarak malzemelerin fiziksel hasarı birçok kategoriye ayrılır. Hasarı tanımlama, nedenlerini bulma ve bunun sonucunda hasarı önlemek için alınması gereken önlemlerin belirlenmesinde hasarları şu şekilde sınıflandırılabilirler; distorsiyon ve deformasyonlar, kırılma, korozyon, sürünme, aşınma, sıkışma, gevşeme gürtülü çalışma ve yorulma hasarı. Bu hasarlar, hasarın çeşitli temel mekanizmalarını içerir ve iki veya daha fazla mekanizma bazı hasarlarda aynı anda meydana gelebilir [18,20].

## 2.3 Hasar Analizi Aşamaları

Hasar analizi, hasara uğramış ürün üzerinde ve bu ürünün kullanıldığı her aşamada, geriye doğru yani üretim evrelerinin tersine doğru araştırma yaparak hasarın

türünü, hasara neden olan teknolojik hatanın cinsini, teknolojik hatanın hangi evrede oluştuğunu, bununla birlikte hasarın sorumlusunu ortaya çıkartarak benzer yapılar için gelecekteki tasarım ve üretim faaliyetlerinde bu hasarın oluşumunu önleyici tedbirleri önermek amacıyla gerçekleştirilen faaliyetlerin tümüne verilen addır (Şekil 3) [15].



Şekil 3. Hasar analizi yolu [15].

Hasar analizinin aşamaları oluşan hasara göre değişiklik gösterse de aşağıdaki aşamalar hasar analizinin temelini oluşturur [19].

1. Hasarın net olarak tanımlanması
2. Geçmişle ilgili bilgi toplamak ve numune seçimi
3. Hasara uğramış elemanın ön kontrolü
4. Hasarlı parçaların incelenmesi
5. Delillerin analizi, sonuçlar ve hasar raporu

## 3 Kaynaklı Bağlantılarda Hasar Analizi

Bugüne kadar yapılan incelemelerin birçoğunda hasara neden olan kaynak hatalarının oluşumundaki en yaygın neden; kaynağın uygulanışı ve esas metal ile kaynak metali arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kaynağın orijinal geometrik dizaynı ve orijinal kaynak parametrelerinin seçimi önemlidir. Bunlarla birlikte diğer önemli kaynak hatalarından biri de çalışmalarda kullanılan parametrelerin çok çeşitli olması ve doğru seçimin yapılamamasından kaynaklanmaktadır [2,21].

Kaynaklı bağlantılarda hasar analizi iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşama, parçanın özelliklerini tanımaya yönelik olarak hasara neden olan hatanın ne olduğunun ortaya çıkartarak hasarlı parçanın incelenmesidir. Bu aşamada kaynaklı bağlantılarda hatanın nedenine karar vermek için normal hasar analiz



teknikleri; görsel muayene, ışık mikroskobu ve tahribatsız muayeneleri diğer malzeme testleri takip eder. Bunlara ek olarak örnek numunelerin ve oluşan gerilmelerin analitik incelemesi yapılır. İncelemelerde ışık mikroskobunun yanında elektron mikroskobu da kullanılabilir. Mikroskobik ve kimyasal analizler hata bölgesi için tam yorum yapılmasını sağlar [21]. İkinci aşama ise benzer hatanın tekrarını önlemek için yapılacak analizi, sonuçları ve hasar raporunun hazırlanmasını içermektedir.

### 3.1 Hasarın Tanımlanması ve Kaynaklı Bağlantılarda Hasar Nedenleri

Hasar analizinde ilk olarak hasarın tanımı anlaşılır biçimde yapılmalıdır. Hasar göstergesi, nedeni ve hasar mekanizması arasındaki fark ve sonuçlar belirtilmelidir. Bundan dolayı içinde bulunulan durumun her bir parçasını iyi bir şekilde değerlendirmeli, hasar göstergeleri ve hasar mekanizmaları belirlenmelidir [22]. Bu aşamada; bir kaynaklı bağlantıda hasara neden olabilecek hataların bilinmesi gerekmektedir. Hasarlar aşırı zorlanma ve teknolojik hataların biraraya gelmesi ile ortaya çıkar. Kaynaklı bağlantılarda hasarın temel sebebidir teknolojik hatalardır. Bu nedenle, kaynakta hasar analizinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için parçada oluşan hasarın hangi teknolojik hatadan kaynaklandığının bilinmesi gerekir. Kaynaklı bağlantılarda hasarlar bir veya birkaç teknolojik hatanın bir araya gelmesinden dolayı oluşabilir [15,20]. Teknolojik hatalar ve bunların çözümü üç kategori içinde ele alınabilir [23].

1. Kaynaklı bağlantılardaki tasarım hataları (Tasarım ve malzeme hataları),
2. Üretim/tesis hataları (İmalat ve montajda yapılan hatalar)
3. Uygun olmayan çalışma koşullarına bağlı olan hasarlardır.

Teknolojik hatalar hasar çeşitlerinin biriyle veya birkaçıyla hasarın oluşmasına neden olurlar. Sistemi oluşturan elemanların aşırı zorlanması ile hasara uğraması dışındaki tüm hatalar teknolojik hata olarak sınıflandırılırlar. Teknolojik hatanın ne olduğunu tespit içinse hasar başlangıcının yani hasara neden olan veya hasarı başlatan bölgenin bulunması gerekir [20].

#### 3.1.1 Kaynaklı Bağlantılardaki Tasarım Hataları

Tasarım aşaması, orijinal fikrin gelişimi, genel konfigürasyonun tanımı ve detaylı dizayn, malzeme seçimi ve üretim aşamalarının kullanıcı/üretici açısından optimize edilmesini içerir. Kaynaklı bağlantıların tasarım aşamasında yapılacak hatalar hasarın temel nedenini oluşturur. Kaynaklı bağlantılarda ortaya çıkan tasarım hataları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

1. Uygun olmayan geometriler
2. Kaynak yöntemi ve kaynak parametrelerinin doğru seçilmemesi
3. Isıl çevrimlere bağlı meydana gelen yüksek gerilmeler ve distorsiyon
4. Malzeme hataları ve uygun olmayan malzeme seçimi

Tasarım eksiklikleri yüzünden meydana gelen hasarlar genellikle hesaplanandan çok daha fazla gerilmelerin meydana gelmesine ve parçanın çok daha iyi performans gerektiren servis şartlarında hasara uğraması ile sonuçlanır. Bu nedenle konstrüksiftif olarak ele alınan kaynaklı bağlantıda kuvvet çizgilerinin akışı, dikişlerin konumu, parça kalınlığı, çentik etkisi, rijitlik farklılıkları değerlendirilmelidir. Kaynak bölgesinin güvenliği için gerilmelerin tür ve şiddeti, zorlanma hızı, sıcaklık ve korozyon gibi gerilmeye neden olacak durumlar ve kaynaklı birleştirme için hangi kaynak yönteminin seçileceğine ve kaynaktan sonra, uygulanması gereken (ısıtıl işlem/temizleme) işlemlerin ve malzeme türünün tasarım aşamasında belirlenmesi gerekir [3].

#### 3.1.1.1 Uygun olmayan geometriler

Uygun olmayan geometriler parça veya sistemlerin kapasiteleri altında çalışmasına neden olur [24]. Kaynaklı bağlantılarda uygunsuz geometriler; parça kalınlığı, hatalı kaynak ağzı seçimi, hatalı kaynak profili ve birleştirilen parçalar arasındaki kalınlık farkları, kaynak dikiş şekli, çentik etkileri, zorlanma durumunun hatalı hesaplanması şeklinde sıralanabilir.

Tasarım aşamasında uygun olmayan bir geometrinin etkilerinin tek tek incelenmesi gerekmektedir. Düzgün hazırlanmış birleşim yüzeyleri ve uygun birleşim tasarımı özellikle sıcak çatlakların oluşumunu önleme açısından çok önemlidir. Birleşim tasarımı uygun olmadığında; geniş kaynak dikişlerinin oluşturulmasına neden olur. Örneğin sadece kaynak ağzı seçiminde oluşabilecek hatalar sonucunda; kaynak banyosu hacmi artmakta bu beraberinde kaynak bağlantı malzemesinin mekanik-teknolojik değerlerinin düşmesi gibi bazı problemleri meydana getirmekte bununla birlikte mikro gözenek gibi kaynak hatalarının meydana gelme olasılığı yükselmektedir [24,25].

#### 3.1.1.2 Kaynak yöntemi ve kaynak parametrelerinin doğru seçilmemesi

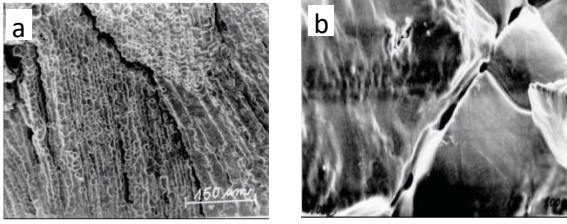
Kaynak yönteminin doğru seçilmesi tasarım aşamasına bağlıdır. Tasarımın seçilen kaynak yöntemi ile yapılabileceği yapılamayacağı araştırılmalıdır. Kaynak yöntemleri ve her bir yöntem için seçilecek parametre sayısı çok fazladır [26]. Bu durum doğru kaynak yöntemi ve doğru parametre seçimini zorlaştırır. Ayrıca uygun kaynak yöntemi ve parametrenin seçilmesi tek başına yeterli değildir. Çünkü kaynak parametrelerinin birbiri ile uyumu noktasında da optimizasyon yapılmalıdır. Optimizasyon işlemleri için farklı malzeme türlerinin herbiri için kaynak yöntemindeki parametreler ayrı ayrı değiştirilerek yapılmalı ve çıktılarının gözlemlenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Gözlemlenen veri gruplarının ortalamaları arasında önemli farklılıklarının olup olmadığının ölçülmesinde varyans analizi tekniği kullanılabilir [27].

#### 3.1.1.3 Isıl çevrimlere bağlı meydana gelen yüksek gerilmeler ve distorsiyon

Kaynak işlemi boyunca oluşan ısı çevrimlerinin neden olduğu ve tasarımda hesaplanmayan yüksek

gerilmeler ile metalürjik faktörler tasarım hataları arasındadır [13]. Söz konusu ısıl çevrimler ile birlikte malzeme içyapısında ve mekanik özelliklerinde değişimler söz konusudur. Yüksek sıcaklık nedeniyle malzemede meydana gelen tane yapısındaki değişimleri engellemek mümkün değildir [28]. Kaynaklı bağlantı hasar analizlerinde mikroyapı değişikliklerine bağlı hasar oluşumları incelenmelidir.

Diğer taraftan kaynaklı bağlantılarda hasara neden olan dört temel çatlak tipi bulunmaktadır. Bu çatlaklar; sıcak çatlak, soğuk çatlak, lameller yırtılma ve yeniden ısınma ile ortaya çıkan çatlaklar olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4). Çatlaklar kaynak bölgesinde olabileceği gibi ısıdan etkilenen bölgelerde de görülmektedir [29]. Hasarın hangi nedenle ortaya çıktığının ana nedenlerinin bilinmesi için bağlantıda oluşan çatlakların ana metalürjik özelliklerinin incelenmesi gerekir. Çatlak tiplerini ayırt etmek için onların nedenlerini bilmek onların uygun tedbirlerin alınması için çok önemlidir. Bu incelemelerden yola çıkılarak hatanın tekrarı önlenmeye çalışılır.



Şekil 4. Kaynaklı bağlantılarda oluşan çatlak şekilleri [29]  
a. Soğuk çatlak b. Sıcak çatlak

### 3.1.1.4 Uygun olmayan malzeme seçimi

Malzeme hataları tasarımdaki eksikliğin bir çeşididir. Malzemelerdeki kabul edilemez eksiklikler ve süreksizlikler kusur olarak tanımlanır. Kusurlar sistemin veya ürünün performansını olumsuz yönde etkilerler. Malzemelerde anizotropi veya bir üründe özelliklerin bölgesel değişimi gözlemlenebilir. Söz konusu durum nedeniyle malzeme içindeki hataların tasarım aşamasında göz önüne alınması gerekir [19].

Malzeme içinde, başlangıçta hatalar mevcutsa parça servise iken bu hatalardan gelişen hasarlar meydana gelir. Böyle bir malzemenin kaynakla birleştirilmesinde hatalar ortadan kaldırılamayacağı için bu hatalar parçanın çalışması sırasında potansiyel tehlike noktaları olarak kalırlar. Bu gibi parçaları kaynak ile birleştirerek kullanmanın riski çok yüksektir. Bu nedenle hata içermeyen malzemeden yeni parça kullanmak gerekir [15].

Malzeme seçiminde yapılacak yanlışlar da malzeme hataları gibi tasarımdaki eksikliğin bir çeşididir. Çünkü seçilen malzeme talep edilen uygun mekanik özellikleri (korozyon, yüksek sıcaklık, yorulma vb.) sağlamalıdır [13]. Herhangi bir hasar oluşumunda malzeme performansı önemli bir role sahiptir. Nitekim parça veya sistemin performansı fabrika koşullarında üretilen malzemelerin davranışına bağlıdır. Malzeme hasarlarının nedenlerini sınıflandırırken, hasarın oluşumunu hızlandıran faktörler göz önünde tutulmalıdır. Faktör; direkt veya dolaylı olarak hasara neden olan dış etki olarak

tanımlanır. Bu etkileri anlamak temel nedenin kararlaştırılması ve hasar analizinin etkisinin anlaşılması bakımından önemlidir [20]. Diğer taraftan malzemelerin verilen bir yöntem ile bir dereceye kadar kaynak edilebildiği, seçilecek uygun bir yöntem uygulanarak metalik bağlantı elde edildiği zaman, bağlantı yerel özellikleri ve bunların konstrüksiyona etkisi bakımından, belirlenmiş bulunan özellikleri sağlayıp sağlamayacağına bakılmalıdır [13].

Kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemelerin istenilen doğru malzeme çeşidi olup olmadığı kimyasal analiz yöntemi ile tespit edilir. Eğer ortamda gerilmeli korozyon veya korozyon mevcutsa hasar nedeni saptanırken tufal ve diğer korozyon ürünleri ile malzemenin temasta olduğu ortamın kimyasal analizi yapılmalıdır. Bir malzemenin kimyasal analizi sonucunda belirli bir elementin olması gereken miktardan daha fazla miktarda olması, hasarın bu fazlalıktan kaynaklandığı anlamına gelmez. Belli sınırlar içinde, mikro yapısal bileşenlerin malzeme içindeki dağılımı, bunların malzeme içindeki oranlarından çok daha önemlidir [16]. Kaynak yöntemi ile birleştirilecek malzemelerin seçiminde kimyasal analizle birlikte bağlantının çalışma koşulları ve çalışma şekli göz önünde bulundurularak mekanik özelliklerine bakılmalıdır. Malzeme içyapısına bağlı olarak değişen mekanik özelliklerin tespitinde tahribatlı deneyler kullanılabilir ve malzeme sertifika belgeleri incelenebilir.

### 3.1.2 Üretim/Tesis Hataları

Üretim; teknik bilgiler ve ham malzemeyle yeni bir ürün oluşturma aşamalarını kapsar. Kaynak yönteminde üretim ise daha önceden yapılan kaynak tasarımına uygun olarak kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesidir. Kaynak parametrelerinin istenilen tolerans aralıklarında kullanılmaması durumunda ortaya hatalı ürün çıkar. Bu nedenlerle kaynak işlemlerinin mutlaka tasarım aşamasında hazırlanan kaynak prosedürlerine uygun olarak yapılması gerekmektedir. Diğer taraftan kaynak uygulamalarının mutlaka yeterliliği olan kişilerce yapılması zorunludur. Bu aşamada yapılacak üretim/tesis hataları;

1. Kaynaklı bağlantı kusurları,
2. Temizleme/son işlem,
3. Fabrikadaki montaj/kurulum,
4. Kalite kontrol tekniklerindeki hatalardır [16].

#### 3.1.2.1 Kaynaklı Bağlantı Kusurları

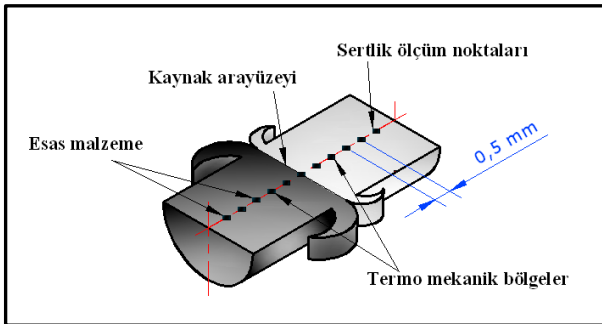
Kaynak işleminde kaynak kusurları istenmez ama pratikte hatasız bir kaynak işlemi mümkün değildir [30]. Üretim ve tesis hatası olarak karşımıza çıkan kaynak hataları genelde kaynak tasarımının yanlış yapılmasına veya kaynak prosedürlerine uyulmamasına (kaynağın uygulanışı) bağlı olarak meydana gelen hatalardır. Kaynak hatalarının oluşumundaki diğer nedenler ise esas metal ile kaynak metali arasındaki uyumsuzluk ve kullanılan sarf malzemelerin kirlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Muhtemel hasarların başlangıcı olabilen kaynak bağlantı kusurları [30] ve hasar analizlerinin yapılabilmesi için inceleme teknikleri aşağıda belirtilmiştir.

Kaynak işlemi boyunca ortaya çıkan kaynak hataları; nüfuziyet azlığı, birleştirme azlığı, yanma oluşu, kaynak dikişinin taşması, bindirme dikişlerinde levha kenarlarının erimesi, gözenekler, fişkırtma, curuf kalıntıları, çatlaklar, hatalı kaynak şekli ve boyutu, sıçramalar, çarpılma, mikroskopik iç hatalardır [31].

Kaynak kusurlarının tespitinde; doğrudan içyapı incelemelerinin yapıldığı ve sonuçların anında değerlendirilebildiği tahribatsız muayeneler, kaynaklı bağlantıların hasar analizlerinin yapılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Oluşan teknolojik hatalar hangi aşamadan olursa olsun tahribatsız muayene yöntemleri ile tespit edilebilir. Birbirlerinden farklı olan bu tahribatsız muayene yöntemleri kaynaklı bağlantıda hasar oluşmadan önce hataların tespiti amacı ile kullanılırlar. Söz konusu tahribatsız muayene yöntemlerinden yaygın olarak kullanılanlar 1.Görsel Muayene 2. Sıvı Penetran Testi 3. Girdap akımları (Eddy Akımı) ile Muayene 4. Manyetik Parçacık Testi 5. Ultrasonik Muayene 6. Radyografik (Röntgen) Işınları ile Muayene ve 7. Akustik Emülsiyon Testi şeklinde sıralanabilir.

Gerekli durumlarda sertlik ölçümü gibi diğer tahribatlı muayene yöntemleride kullanılabilir. Yapılacak iş belirlendiğinde, kullanılacak kontrol sisteminin de sınırları kendiliğinden ortaya çıkmış olur. Ancak muayene yöntemlerinin tamamında kaynaklı bağlantı ve özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Örneğin sertlik dağılımının belirlenmesi gereken bir durumda ölçümlerin tüm kaynak bölgesini kapsayacak şekilde kaynak yöntemine uygun olarak kaynak ekseninden esas metale doğru belirli ölçüm aralıkları ile yapılması gerekir (Şekil 5). Kontrol sistemine karar verilmesi ile kullanılacak tahribatlı muayene yöntemleri ise 1. Çekme Deneyi 2. Basma Deneyi 3. Yorulma Deneyi 4. Çentik Darbe Deneyi 5. Aşınma Deneyi ve 6. Eğme Deneyi ve 7. Sertlik Ölçümü şeklinde sıralanabilir.



Şekil 5. Kaynaklı bağlantılarda sertlik ölçüm noktaları [32]

Test yöntemlerinde muayene edilecek malzeme göz önüne alınarak, en uygun yöntemin, uygun standardın seçilmesi ve yöntemin doğru yapılması gerekir. Söz konusu yöntemler hasara uğramış olan kaynaklı parçaların kontrollerinde hasar başlangıcının bulunması amacı ile kullanılabilirler.

### 3.1.2.2 Temizleme/Son İşlem Yapılmamasından Kaynaklanan Hatalar

İyi bir hazırlık kaynaklı bağlantının başarısı açısından önemlidir. Kaynaktan önce ve kaynaktan sonra temizlik çoğu zaman kaynak işleminin en önemli

kısımudur. Kaynak edilecek malzemeler genellikle kimyasal veya mekanik yollarla temizlenir. Yüzeyler temizlenirken arzu edilmeyen durumların ortaya çıkmamasına özen gösterilmelidir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken faktörler [33];

- Birleştirilecek parçalar arasında kalan kir yağ ve curuf tabakasının süreksizliğe neden olması,
- Malzemeye önceden yapılmış olan uygun olmayan temizleme şartlarından kaynaklanan korozyon,
- Asitle temizleme yapılmasından kaynaklanan hidrojen gevrekliği veya taneler arası etkileşim.

### 3.1.2.3 Fabrikadaki Montaj/Kurulum aşamasında ortaya çıkan hatalar

Kaynaklı parçaların montaj/kurulumunda bağlantı üzerinde ek gerilme oluşturulmamasına dikkat edilmelidir. Söz konusu durumun tasarım aşamasında planlanmış olması gerekmektedir. Ortaya çıkabilecek önemli hatalardan bazıları aşağıda verilmiştir;

- Eksen kaçıklığı,
- Eksik/Yanlış parça,
- Kurulumun uygun olarak yapılmaması,
- Bağlantı sistemi ve sıkma torkunun uygun olarak uygulanmaması,
- Yetersiz yüzey hazırlığı [15]

### 3.1.2.4 Kalite Kontrol Tekniklerindeki Hatalar

İmal edilmiş parçaların son kontrollerinde uygulanan kontrol tekniklerinin karakteristiklerinden kaynaklanan hatalar;

- Manyetik partikül muayenesinden kaynaklanan ark yanıkları,
- Asitli derin dağlamadan kaynaklanan gevrekleşme,
- Damgalama izlerinden oluşan yorulmuş veya su verme çatlakları olarak ifade edilebilir [20].

### 3.1.3 Çalışma Koşullarına Bağlı Olan Hasarlar

Bir ürünün veya sistemin ömrü servisteki çalışma şekli ve ortamından etkilenir. Bir ürünün servis ömrü bu ürünün çalışma şekli, bakımı, muayenesi, tamiri ve modifiyesini içermektedir. [19]. Kaynaklı bağlantı elemanlarında işletme koşullarında düzensiz değişken, çok boyutlu kompleks zorlanmalara maruz kalmaktadır. Bu zorlamalar dolayısıyla işletme ömrünün, işletme mukavemetinin tespitinde pek çok zorluklarla karşı karşıya kalınmaktadır. Kaynak işlemi sırasında önceden belirlenemeyen oluşumlar gibi çok sayıda faktör matematiksel kesin bir çözümü imkansız kılmaktadır. Bu bağlantılarda hesap daha çok deneylerden kazanılan varsayımlara, hipotezlere, katsayılara ve tecrübelerle dayanmaktadır [24]. Çalışma koşullarında meydana gelen herhangi bir hasar tasarım aşamasında, malzeme temininde ve ürünlerin imalatı esnasında yapılan hata/hatalar nedeni ile meydana gelir [19]. Kaynaklı bağlantılarda servis esnasındaki uygun olmayan bakım uygulamalarında yapılacak hatalar kaynaklı bağlantının

hasara uğramasına neden olabileceği hasar analiz sürecinde göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.2 Geçmişle İlgili Bilgi Toplamak ve Numunelerin Seçimi

Hasara uğramış elemanın veya yapının imalat ve işletme geçmişi araştırılır ve gerekli bilgiler toplanır. Bilgilerin kişisel duygu ve düşüncelerden uzak olması amacıyla kaynaklı bağlantının tüm tasarım hususlarını kapsayan kaynak prosedürleri, şartnameler ve teknik resmi elde edilmeli hasara uğrayan kaynaklı bağlantı fotoğrafları ile birlikte temin edilmelidir. Meydana gelen hasarla ilgili tüm detaylar öğrenilmelidir [16]. Hasarın çalışma şartları esnasında mı, montajda mı yoksa hasarlı bağlantının imalatından kaynaklanan bir hata mı, aşamasında mı meydana geldiğinin bilinmesi gerekir.

### 3.3 Hasara Uğramış Kaynaklı Bağlantılarda Ön Kontroller

Hasara uğramış eleman ve bu elemandan kırılmak suretiyle ayrılmış tüm parçalar direkt gözle veya ara elemanlar (optik mikroskop) kullanılarak kontrol edilmeli ve kayıt altına alınmalıdır. Gözle yapılan bu inceleme hasara neden olan hataların fark edilmesine yardımcı olabilir. Yeterli ışık altında yapılması gereken kontrollerde kaynak bölgesinde gözle görülür kaynak hataları ile hasara uğramış kaynak bölgesinde bulunan çatlak, çatlak ilerleme yönü ile kırık yüzeyler, kaynak boyutu ve geometrisi incelenmelidir. Kırık yüzeyinin geometrisinin incelenmesiyle hasara neden olan gerilme sistemi hakkında bilgi edinilebilir. Parçaların makroskobik etüdüyle hasarın orijini olan çatlak başlangıç noktası, çatlakın ilerleme saptanabilir [16]. Ayrıca kaynak geometrisinde kuvvet akışını engelleyen durumlar, dışardan gelen etkiler ön kontroller sonucunda tespit edilebilir.

### 3.4 Hasara Uğrayan Parçaların İncelenmesi

Hasar analizi yapılırken kırık yüzeylerinin mekanik ve kimyasal etkilerden korunması gerekmektedir. Kırık yüzeyine çıplak elle temas edilmemelidir. Zorunlu durumlar dışında kalan yüzeyler su ile yıkanmamalıdır. Kırık yüzeyinde temizleme işlemi yüzeyde incelemeyi zorlaştıran kirlerin bulunması halinde ve mikroskopla incelemeyi hemen önce yapılmalıdır. Temizleme işlemi yumuşak fırça, kuru hava akımı veya ultrasonik temizleme yöntemleri ile yapılabilir. Kırık yüzeyi korozyondan etkilenmiş parçaların temizlenmesi selüloz asetat ile yapılarak, gerekirse kırık yüzeyinden uzaklaştırılan yabancı maddeler muhafaza edilmelidir [16].

Kaynaklı bağlantılardaki muhtemel hatalar, imalat esnasında veya belli bir müddet kullandıktan sonra oluşan çatlaklar, iç kesimlerde oluşan boşluklar, kesit incelmeleri vb. hatalar herhangi bir numune hazırlanmadan doğrudan iş parçası üzerinde, tahribatsız muayene yöntemleri uygulanarak tespit edilebilir. Ancak tespit edilememesi durumunda metalografik incelemeler için numune hazırlanması gerekir. Bu durumda numune kesitlerinin kesme işlemi sırasında kırık yüzeyin ve buna yakın bölgelerin oluşan ısı nedeni ile değişime uğratılmamasına özen gösterilmelidir. Korozyon oluşmaması için kesme

işlemi esnasında zorunlu kalmadıkça soğutma sıvısı kullanılmamalıdır. Ayrıca numunelerin alındığı yerler ve doğrultular dikkatle belirtilmelidir [16]. Numunelerin ana metali, ITAB bölgesini ve kaynak bölgesini kapsayacak şekilde bir kesit alınarak yüzeyi uygun yöntemlerle zımparalanmalı ve parlatılmalıdır. Her durumda zorunlu olmasada uygun yöntemlerle yüzey dağlanarak, ısı girdilerinin farklılığından oluşan bir görüntünün açığa çıkması sağlanmalıdır. Kaynaklı numunelerin hasar analizinin en önemli aşaması bu parlatılan ve dağlanmış kesitlerin optik mikroskop ve SEM kullanılarak incelenmesi oluşturmaktadır. Bu amaçla hasara uğrayan kaynaklı bağlantılarda incelenecek bölgenin seçimi doğru bir analiz yapmak için önemli bir aşamadır. Numunenin hasarın özelliklerini temsil edecek şekilde olması gerekir. Bu nedenle nereden ve nasıl alınacağına dikkat edilmelidir. Hasar bölgesinde optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda kaynaklı birleştirmelerdeki çatlaklar, boşluklar, kalıntılar, ergime noksanlığı, nüfuziyet azlığı, birleştirme azlığı, yanma oluşu gibi gerilme yığılmaları nedeni ile hasara neden olabilecek kaynak hatalarının olup olmadığı tespit edilebilir. Ayrıca ısıdan etkilenen bölgenin genişliği belirlenebilir. Kaynak pasosunun uygun atılıp atılmadığı kaynak ağız şeklinin ve hasar tiplerinin oluşumunun kaynak geometrisine bağlı ortaya çıkıp çıkmadığı ve uygunluğu incelenebilir [34]. Hasara katkıda bulunan faktörlerden, metal olmayan kalıntılar, mikro yapısal segregasyonlar, taneler arası korozyon ve hatalı ısıl işlem gibi birçok metalürjik hatalar bu aşamada ortaya çıkarılabilir. Kaynak bölgesinin metalografik kesit incelenmesinden elde edilen bilgilerin kırılmanın kök nedenini belirlemek için kırılma tipinin (gevrek, sünek, gerilmeli korozyon vb.) saptanması bu aşamada yapılır.

#### 3.4.1 Kaynaklı Bağlantılardaki Hasar Çeşitleri

Kaynak işlemleri yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu nedenle malzemelerin hassas bir biçimde ayarlanmış kimyasal bileşimlerinde, planlı uygulanmış ısıl işlem çevrimlerinde ve bazı hallerde de bir mekanik işlem ile kontrol altına alınan malzeme içyapılarının değişerek mikro hatalar oluşmasına neden olur [13]. Kaynak işleminde ortaya çıkan bu hatalar; iç hatalar sonucunda ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) meydana gelen gevrek kırılma, ITAB' in hassasiyeti, artık gerilme çatlakları, cüruf inklüzyonları, kaynak dikişi sonundaki bölgede krater oluşumu, sıcak çatlaklar, düşük sıcaklıkta görülen çatlaklar, nemden kaynaklanan hidrojen gevrekliği ve kaplama kirliliğinden kaynaklanan sıvı metal gevrekliğine neden olarak kaynaklı birleştirmenin hasara uğramasına neden olur [19]. Söz konusu bu tasarım hataları kaynak prosedürlerine uygun kaynak yapılmaması durumunda artarlar. Oluşan hasar türleri çarpılma hasarları, kırılma hasarları, korozyon hasarları ve yorulma hasarları olarak ana başlıklar altında toplanabilir. Yıpranma kaynaklı hasarlar aşınma ve yapışma olarak ayrıştırılabilir [4].

#### 3.5 Delillerin Analizi, Sonuçlar ve Hasar Raporu

Elde edilen bilgiler analiz edilerek ara raporlar hazırlanır. Araştırmaların ilk adımında belirlenen hasar

tipinin doğruluğunu kanıtlayan sonuçlar ve ara raporlardan elde edilen bilgilerle birlikte hasar raporu düzenlenir. Raporda bir hasar analiz sürecinde bulunması gereken temel bilgiler ve hasar analizinde sorulan genel sorular ve cevapları yazılmalıdır. Buna ek olarak kaynaklı bağlantıların yapısına uygun olarak aşağıda hazırlanan örnek soruların hasar incelemesinde sorularak cevapları rapora yazılmalıdır.

- Kaynaktan önce işlem yapılmış mı?
- Kaynak eşdeğerliği yüksek seçilmiş mi?
- Kaynaklı bağlantı geometrisi uygun mu?
- Kaynak ağzı geometrisi uygun mu?
- Kaynak yöntemi doğru seçilmiş mi?
- Sarf malzeme depolama koşulları ve kullanım prosedürleri doğru mu?
- Kaynak parametrelerinin doğru seçilmiş mi? Kendi içinde parametreler uyumlu mu?
- Isıl çevrimlere bağlı meydana gelen yüksek gerilmeler ve distorsiyon var mı?
- Uygun malzeme seçimi yapılmış mı? Malzemede mikroyapı değişimleri var mı?
- Kaynak işlemleri ankastre bağlı parça üzerinde mi yapılmıştır?
- Çatlak ilerleme şekilleri nasıl olmuştur?
- Çatlaklarda ani yön değişimi var mı?
- Kaynak bölgesinde ani sertlik değişimleri var mı?
- Kırılma şekli gevrek mi, sünek mi?
- Kaynak metali akma sınırı ile esas metal akma sınırları uyumlu mudur?
- ITAB da sertlik değişimleri meydana gelmiş midir?
- Birleşmemiş kısımlar var mı?
- Kaynak bölgesinde gözenek mevcut mu?
- Nüfuziyet azlığı var mı?
- Birleşme azlığı gibi durumlar söz konusu mu?
- Kaynak bölgesinde yanma olukları gibi profil hataları var mı?
- Kaynak dikişinde taşma var mı?
- Bindirme dikişlerinde levha kenarlarında erime var mı?
- Levha kenarlarında erime olan bölgelerde (varsa) dolgu kaynağı yapılmış mı?
- Hızlı katılma nedeni ile fişkırmaya oluşmuş mu?
- Curuf kalıntıları var mı?
- Kaynak bölgesi kuvvet hatlarının yön değiştirdiği bölge mi? Bu bölgelerde uygun kaynak profili var mı?
- Sıçrama var mı? Yüzey pürüzlü mü?
- Korozyon var mı? Çevre koşulları nelerdir?
- Hangi tip korozyon oluşmuş, korozyon tipi ve hızı nedir? Var olan korozyon ürünleri nelerdir?
- Ortam ve bu metalle temasta olan metal yüzeyinin doğası ve bileşimi nedir?
- Bağlantı kimyasal bileşiminde farklılıklar meydana gelmiş mi?
- Bağlantı bölgesinde kalıntı var mı kalıntılar metal bileşiminden farklı mı?
- Bağlantı bölgesinde tekrarlı, değişen gerilme ve gerilmeler var mı?

## 4 Sonuç

Kaynaklı bağlantılarda hatalar tasarım, üretim/tesis ve çalışma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Hasara neden olan bu hatalar bu adımların birinde veya birkaçında oluşur ve hasar türlerinden birinin oluşması sonucunda bağlantı kullanılamaz hale gelir. Kaynaklı bağlantılarda hatanın nedenine karar vermek için görsel muayene, ışık mikroskobu, elektron mikroskobu, tahribatsız ve gerekli durumlarda tahribatlı muayene yöntemleri ile kimyasal analizler kullanılabilir. Yapılacak incelemeler hata bölgesinin başlangıcının tespitine ve ilerlemesi hakkında yorum yapılmasını ve hasarın hangi nedenle ortaya çıktığının ana nedenlerinin bilinmesini sağlar. Hasarın nedenleri ve hasar türü belirlendikten sonra hasar analiz raporları hazırlanır. Raporun sağlamış olduğu verilerden yola çıkarak hatanın tekrarı önlenmeye çalışılır.

## Bilgilendirme

SOCAR Turkey Enerji AŞ. Malzeme ve Kontrol birim çalışanı teknisyen Şevket MALKOÇ' a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

## 5 Kaynaklar

- [1] Mercan S., Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 2205 / AISI 1020 Malzeme Çiftinin Mikroyapı ve Yorulma Davranışının Araştırılması, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Ens. Doktora Tezi, 2013.
- [2] Sehgal, R., Angra, S., Sharma, V., Failure cause analysis of welded joints, Indian Jour. of Eng. Mat. Sci., 14,24-30, 2007.
- [3] Öndürücü, A., Kanbir, Ö., Bir Greyderin Dişli Rotunun Hasar Analizi, Süleyman Demirel Üniv. Fen Bil. Ens. Dergisi 21,2,599-606, 2017.
- [4] Toparlı, M.B., Soğuk Dövme Kalıplarında Ömür Artışı Elde Etmek İçin Baskın Hasar Mekanizmasının Belirlenmesi, Uludağ Üniv. Müh. Fak. Dergisi, 24,2,157-172, 2019.
- [5] Kumari, S., Satyanarayana, D.V.V., Srinivas, M. Failure Analysis of Gas Turbine Rotor Blades, Engineering Failure Analysis, 45,234-244, 2014.
- [6] Aktas A., Karakuzu R., Failure analysis of two-dimensional carbon-epoxy composite plate pinned joint, Mechanical Composite Material Structures, 6,347-361, 1999.
- [7] Tariq, F., Naz N., Amir, M., Rasheed, K., Baloch, A., Failure Analysis of High Density Polyethylene Butt Weld Joint, J Fail. Anal. and Preven. 12:168-180, 2012.
- [8] Malachowski, J., Damaziak, K., Platek, P., Sarzynski, M., Kupidura, P., Wozniak, R., Zahor, M., Numerical and experimental failure analysis of rifle extractor, Engineering Failure Analysis, 62,112-127, 2016.
- [9] <http://www.metaluzmani.com/kaynak-yontemlerinin-siniflandirilmesi/>.
- [10] <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Kaynak.pdf>.
- [11] <http://w3.bilecik.edu.tr/makine/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/kaynakteknigi-f%C3%B6y-notu.pdf>.
- [12] Karataş, Ö., Morgenstern, C., Sonsino, M., C., Vogt, M., Dilger, K., Gülsöz, A., "Biçimlenebilen Magnezyum Alaşımlardan Kaynaklı Birleştirmelerin Yorulma Dayanımı Değerlendirmelerinde Mikro-Destek Etkisi Konseptinin Uygulanması, 8. Uluslararası Kırılma Konf., 2007.
- [13] Anık, S., Tülbentçi, K., Kulaç, E., Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı", Gedik Holding Yayını, İstanbul, 1991.

- [14] Eroğlu, M., Aksoy, M., 15Mo3 Çeliđinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı ve Mekanik Öz. Etkisi, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, S.31.
- [15] Eryürek, B., Dikiciođlu, A., Onarım Kaynağında Hasar Analizinin Önemi”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kong., 2003.
- [16] Eryürek, B., “Hasar Analizi”, Birsen Yayınevi, 171s., 1993.
- [17] Ay, İ., <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture1.pdf>.
- [18] <http://www.metaldunyasi.com.tr/haber/detay/1884>.
- [19] Varol, H., Av ve Spor Tüfeklerin İçin Kritik Parçaların Hasar Analizi, Süleyman Demirel Ün. Fen Bil. Ens., Makina Eđitimi Anabilim Dalı, Yüksek L. Tezi, 2008.
- [20] Anonim, Failure Analysis and Prevention, ASM International, 11,2910, USA, 2002.
- [21] Ayşe, B.,R., Pense, A.,W., Welding Failure Analysis, Materials Characterization, 33,3,295-309, 1994.
- [22] [http://www.tech.plym.ac.uk/sme/Interactive\\_Resources/tutorials/FailureAnalysis/index.html](http://www.tech.plym.ac.uk/sme/Interactive_Resources/tutorials/FailureAnalysis/index.html).
- [23] Canale, L.,C.,F., Mesquita, R.,A., Totten, G.,E., Failure Analysis of Heat Treated Steel Comp., ASM International, 2008
- [24] Özden, H., Gemi İnşaatında Kalın Çelik Sac Kaynak Bağlantılarının İşletme Mukavemeti, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, 2003.
- [25] <https://www.askaynak.com.tr/yayinlar/bultenler/kaynak-hatalarini-onleme-yollari>.
- [26] Çalıgölü, U., Dikbaş, H., Taşkın, M., Microstructural Characteristic of Dissimilar Welded Components (AISI 430 Ferritic-AISI 304 Austenitic Stainless Steels) by CO2 Laser Beam Welding, Gazi Ün. Jour. of Sci., 25(1):35-52, 2012.
- [27] Lazic', Z.,R., Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide, Wiley VCH, 157-165, 2004.
- [28] Çelik, A., Şen, S., Ece, H., Kaynak Sonrası Isıl İşlemlerin St-37-2 Çeliđinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Kaynak Teknolojisi I. Ulusal Kongresi 1997.
- [29] Bernasovský, P., Failure Analysis Of Welded Components – Importance For Technical Practice, IIW International Congress, High Tatras, Stará Lesná, Slovakia, 2009.
- [30] Gourd, L.,M., Kaynak Teknolojisinin Esasları, İTÜ Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [31] <http://docplayer.biz.tr/192387-Kaynak-hatalari-cizelgesi.html>.
- [32] Mercan S., Aydın S., Ozdemir N. Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205–AISI 1020 joined by friction welding, International Journal of Fatigue 81 (2015) 78–90, 2015.
- [33] Ođuz, B., Ark Kaynağı El Kitabı, Oerlikon Yayını, 1975.
- [34] Şen, F., Sayman, O., Seri Çift Civata Bağlantılı Çapraz Takviye Edilmiş Tabakalı Kompozit Levhaların Hasar Davranışı, DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Der., 9,3, 21-33, 2007.