

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAC YÜZLÜ KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ KIRIŞLARIN  
KAYMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

**Melis TAŞKIN**

**Danışman  
Prof. Dr. Serdal TERZİ**

**II. Danışman  
Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2018**



© 2018 [Melis TAŞKIN]

## TEZ ONAYI

Melis TAŞKIN tarafından hazırlanan "Sac Yüzlü Köpük Çekirdekli Sandviç Kirişlerin Kayma Parametrelerinin Belirlenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

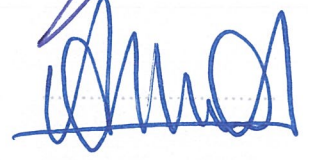
**Danışman**

**Prof. Dr. Serdal TERZİ**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Mehmet AVCAR**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU**  
Kocaeli Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Fuad OKAY**  
Kocaeli Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Hamide TEKELİ**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Enstitü Müdürü**

**Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR**

.....

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Melis TAŞKIN**



# İÇİNDEKİLER

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| İÇİNDEKİLER.....  | i            |
| ÖZET .....  | ii           |
| ABSTRACT .....  | iv           |
| TEŞEKKÜR .....  | vi           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....   | vii          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....   | ix           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....   | x            |
| 1. GİRİŞ .....  | 1            |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....  | 4            |
| 2.1. Sandviç Elemanların Tarihsel Gelişimi ve Uygulamaları .....  | 4            |
| 2.2. Sandviç Kiriş Tanımı ve Bileşenleri.....   | 9            |
| 2.2.1. Yüz malzemeleri .....  | 9            |
| 2.2.2. Çekirdek malzemeleri .....   | 10           |
| 2.2.3. Yapıştırıcı malzemeler .....   | 13           |
| 2.3. Sandviç Kirişlerin Göçme Modları .....   | 14           |
| 2.4. Sandviç Kiriş Teorisi .....  | 16           |
| 2.5. Sandviç Kiriş Deneyleri.....   | 20           |
| 2.6. Sandviç Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözülmesi.....  | 25           |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....   | 27           |
| 3.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzemeler.....   | 27           |
| 3.1.1. Galvanizli sac.....  | 27           |
| 3.1.2. Bir doğrultuda kabaran polistren köpük.....  | 28           |
| 3.1.3. Poliüretan yapıştırıcı .....   | 31           |
| 3.2. Köpük Malzemenin Basınç Deneyleri.....   | 32           |
| 3.3. Batma Deneyleri.....   | 35           |
| 3.4. Üç Nokta Eğilme Deneyleri .....  | 39           |
| 3.5. Üç Ray Kayma Deneyleri .....   | 41           |
| 3.5.1. Güçlendirilmemiş numune deneyleri .....  | 43           |
| 3.5.2. Üç ray kayma testi numunelerinin eğilmeye karşı güçlendirilmesi .....  | 45           |
| 3.6. Deney Numunelerinin Sayısal Modellenmesi.....  | 48           |
| 3.6.1. Batma deney numunelerinin sayısal modellenmesi .....   | 49           |
| 3.6.2. Üç nokta eğilme deney numunelerinin sayısal modellenmesi.....  | 51           |
| 3.6.3. Üç ray kayma deney numunelerinin sayısal modellenmesi.....   | 54           |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....  | 56           |
| 4.1. Köpük Çekirdeğin Basınç Deneyleri Sonuçları .....  | 56           |
| 4.2. Batma Deneyi Sonuçları .....   | 61           |
| 4.2.1. Batma deneyi sonuçlarının literatürdeki analitik ifadelerle karşılaştırılması.....   | 62           |
| 4.2.2. Batma deneyi ve sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması .....   | 67           |
| 4.3. Köpük Çekirdek Kayma Modülünün Üç Nokta Eğilme Testleri Sonuçları Kullanılarak Elde Edilmesi İçin Basit Bir Formülün Geliştirilmesi..... | 71           |
| 4.4. Üç Nokta Eğilme Deneyi ve Sayısal Analiz Sonuçları .....   | 78           |
| 4.5. Güçlendirilmiş Numunelerin Üç Ray Kayma Deneyi ve Sayısal Analiz Sonuçları.....  | 84           |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....  | 90           |
| KAYNAKLAR.....  | 94           |
| ÖZGEÇMİŞ.....   | 102          |

## ÖZET

Doktora Tezi

### SAC YÜZLÜ KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ KİRİŞLERİN KAYMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Melis TAŞKIN

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serdal TERZİ

#### II. Danışman: Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Sandviç yapı elemanları gelişen malzeme ve üretim teknolojilerinin de etkisiyle son yıllarda birçok mühendislik uygulamasında kullanılan yük taşıyıcı elemanlar haline gelmiştir. Sandviç yapı elemanları temel ilke olarak, nispeten ince ancak yüksek dayanıma sahip yüz levhaları arasına yerleştirilen, da, yüzlerin normali doğrultusunda yeterli rijitliğe sahip, kalın ve hafif çekirdek malzemeden oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, üst ve alt yüzeylerinden iki ince metal levhaya yapıştırılmış, bir doğrultuda kabaran polistren köpük (XPS) malzemeden oluşan sandviç kirişler incelenmiştir. Çekirdek malzemenin kesme kuvveti etkisindeki temel mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, literatürde bulunan çalışmalar ve mevcut yönetmelikler incelenmiş; bu tip malzemelerin kayma parametrelerinin belirlenmesinde en sık kullanılan iki yöntemin üç nokta eğilme ve üç ray kayma testleri olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tez kapsamında araştırılan köpük malzemenin kayma parametreleri her iki test yöntemi kullanılarak belirlenmiş; elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tezin ilk aşamasında, kayma parametrelerinin üç nokta eğilme testinden elde edildiği durumlarda, tekil yükün uygulandığı bölgede sıkça karşılaşılan batma probleminin çözümü için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda tekil yükün uygulandığı gerçek temas alanının, batma yüküne etkileri araştırılmış ve bu amaçla batma deneyleri yapılmıştır. Batma yükü için deneysel sonuçlar literatürde tanımlanan analitik ifadelerle ve test edilen batma numunelerinin sayısal modellerinin doğrusal analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci aşamasında köpük çekirdeğin kayma modülünün bulunması amacıyla üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğilme testleri, köpük çekirdeğin hem kabarma doğrultusunda hem de kabarma doğrultusuna dik doğrultuda yüklendiği sandviç kirişlere uygulanmıştır. Üç nokta eğilme testlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri kullanılarak köpük çekirdeğin kayma modülünün belirlenmesi için basit bir analitik ifade geliştirilmiştir. Bu ifade kullanılarak, test edilen köpük çekirdeğin kayma modülleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerler kullanılarak üç nokta eğilme testi deney numunelerinin sayısal modelleri yapılmış ve doğrusal analiz sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tezin üçüncü ve son aşamasında, köpük çekirdeğin kayma parametreleri üç ray kayma testiyle belirlenmiştir. Üç ray kayma testi için, EN 12090 standardındaki deney düzeneği esas alınmıştır. Üç ray kayma testinin önceki uygulamaları incelendiğinde çekirdek numunelerin serbest uçlarına yakın bölgelerde oluşan gerilme yığılmaları nedeniyle numunenin kayma dayanımlarına ulaşmadan göçtüğü bilgisi edinilmiştir. Tezde bu durum dikkate alınarak üç ray kayma testi numuneleri alt ve üst yüzlerine rijit plakalar yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş numunelerin deney sonuçları kullanılarak köpük çekirdeğin kayma parametreleri hesaplanmış ve bu değerler deney numunelerinin sayısal modellerinin doğrusal analizinde kullanılmıştır. Bu değerler kullanılarak yapılan sayısal analizlerde elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneyler sonucu, üç nokta eğilme deneyinden elde edilen kayma modülü değerlerinin, üç ray kayma testinden elde edilen değerlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Farklı boyutlara sahip deney numunelerinin test edildiği iki deney yönteminden elde edilen sonuçlardaki farklılığın, köpük çekirdeğin hücre sel yapıya sahip olması, buna bağlı olarak mekanik özelliklerinin numune boyutlarına göre değişmesinden kaynaklandığı düşünölmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Batma analizi, kayma parametreleri, köpük çekirdek, üç nokta eğilme testi, üç ray kayma testi, sandviç elemanlar.

**2018, 102 sayfa**

## **ABSTRACT**

**PhD. Thesis**

### **DETERMINATION OF SHEAR PARAMETERS OF SANDWICH BEAMS WITH METAL FACE SHEETS AND FOAM CORE**

**Melis TAŞKIN**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Serdal TERZİ**

**Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ**

In recent years, thanks to the improved materials and production technologies sandwich members have become one of the favorable load carrying elements used in many engineering applications. As a basic principle, sandwich members are composed of thick and light core material with sufficient rigidity placed between the faces of relatively thin but highly resistant face sheets.

In this thesis, the sandwich beams composed of polystyrene foam extruded in one direction (XPS) bonded to two thin metal face sheets were examined. In order to determine basic mechanical properties of foam core material under shear force, the studies in the literature and current standards were examined and it was concluded that the two most commonly used test methods while determining shear parameters of such foam materials were three point bending and three rail shear tests. In this dissertation, the shear parameters of the foam material examined in this study were determined using both test methods and the experimental results were compared with the results obtained from numerical analyses conducted using finite element method.

In the first stage of the dissertation, studies were conducted to solve the indentation problem frequently observed when shear parameters are determined using three point bending tests. In this stage, the effects of the contact area of the point load on indentation load were examined. Test results were compared with the predictions of analytical expressions defined in literature for indentation load as well as with the results of the linear analysis of numerical models of the tested indentation specimens.

Three point loading tests conducted in the second stage of the dissertation were carried out in the direction of both parallel and perpendicular to the extrusion direction of the foam core. A simple analytical expression was also developed for the determination of the shear modulus from load-displacement curves obtained from three point loading tests and shear moduli of the tested foam core were calculated using this expression. Numerical models of the three point bending test

specimens were made by using calculated values and linear analysis results were compared with the experimental results.

In the third and the last stage of the dissertation, the shear parameters of the foam core were determined using three rail shear tests. The three rail shear tests were performed based on the EN 12090 standard. When the previous applications of three rail shear test were examined, it was recognized that core specimens fail without reaching their ultimate shear strength due to occurrence of the stress concentrations near the free ends of the specimens. Taking this into consideration, the three rail shear test specimens were strengthened by bonding rigid plate to their top and bottom faces. The shear parameters of the foam core were also determined from three rail shear test results and this values were used linear analysis of the numerical models of test specimens. This numerical model results, which were made using experimental shear parameters values, were compared with the experimental results.

As a result of the experiments, the shear modulus values obtained from the three-point bending test were found to be greater than the values obtained from the three-rail shear test. It is thought that the difference in the results obtained from the two test methods in which the test specimens of different sizes are tested is due to the cellular structure of the foam core and the mechanical properties vary according to the sample dimensions.

**Keywords:** Indentation analysis, shear parameters, foam core, three point bending test, three rail shear test, sandwich members.

**2018, 102 pages**

## TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim sırasında yaşadığım tüm zorluklarda desteğini esirgemeyen ve bu zorlukları aşmam için çaba harcayan, tezimin gelişmesi için kıymetli katkılar sunan çok değerli danışmanım Prof. Dr. Serdal TERZİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

FYL2016-1424 kodlu Akdeniz Üniversitesi BAP projesi kapsamında elde edilmiş olan deneysel verileri kullanımına sunan ve sunulan bu tez ile ilgili önerilerde bulunan doktora tez II. danışmanı görevini yürütmüş olan Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ'a teşekkür ederim.

Doktora tez izleme komitemde yer alarak, tezimin uygun şekilde ilerlemesine değerli bilgi ve deneyimlerini aktararak katkı sağlayan ve ihtiyaç duyduğum önemli desteklerini esirgemeyen çok değerli hocalarım, Doç. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU ve Doç. Dr. Mehmet AVCAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışması süresince ve öncesindeki lisans-yüksek lisans öğrenimim boyunca hiçbir zaman akademik desteğinden mahrum kalmadığım, karşılaştığım zorluklarda yanımda olduğumu bildiğim çok kıymetli hocam Doç. Dr. Fuad OKAY'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam süresince akademik ve sosyal açıdan desteğini esirgemeyen ve katkılar sunan değerli arkadaşlarım Tuba AYDIN, Aydın KICI ve Süleyman GÖKOVA'ya teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalar sırasındaki yardımları için Tuğçe SARGIN, Refik ALİYEV, Umut HEKİM ve İsmail Selçuk YILMAZ'a teşekkür ederim.

FYL2016-1424 kodlu Akdeniz Üniversitesi BAP projesi kapsamında geliştirilmiş olan deney düzeneklerinin üretiminde sağladıkları cömert katkılar için Pak Metal A.Ş.'den Harun TAYLAN'a teşekkürü borç bilirim.

ÖYP05549-DR-14 numaralı proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı Koordinatörlüğü'ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanılan sonlu elemanlar paket programı ANSYS 18.1 yazılımını sağlayan Süleyman Demirel Üniversitesine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında sabrını ve özverisini esirgemedi beni destekleyen çok değerli aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Melis TAŞKIN  
ISPARTA, 2018

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 2.1. Mosquito avcı-bombardıman uçağı.....  | 4     |
| Şekil 2.2. (a) Sandviç kapsül detayı (b) Kapsülün dış kabuğunun hücresel sandviç formu.....  | 5     |
| Şekil 2.3. Sandviç fikrinin eğilme rijitliklerine katkısının şematik gösterimi .....   | 6     |
| Şekil 2.4. Tipik sandviç kirişin şematik gösterimi .....   | 9     |
| Şekil 2.5. Tipik çekirdek malzemeleri (a) oluklu (b) bal peteği (c) köpük (d) ahşap .....  | 11    |
| Şekil 2.6. Sandviç kiriş göçme modları (a) çekirdek kayma göçmesi (b) yüz levhasının plastikleşmesi (c) batma göçmesi (d) yüz levhasının buruşması göçme durumu..... | 15    |
| Şekil 2.7. Tekil yük etkisi altında basit mesnetli kiriş ve kesitinin şematik gösterimi.....   | 17    |
| Şekil 2.8. Sandviç kiriş kayma gerilmesi dağılımı (a) Gerçek kayma gerilmesi (b) sabit dağılım varsayımı .....   | 20    |
| Şekil 2.9. ASTM C273 test düzeneği-tek blok kayma testi .....  | 23    |
| Şekil 2.10. EN 12090 test düzeneği-üç ray kayma testi.....   | 23    |
| Şekil 2.11. ANSYS paket programının analiz araçlarının gösterimi .....   | 26    |
| Şekil 3.1. Polistren köpük panel üzerinde doğrultularının şematik gösterimi ...  | 30    |
| Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan çift fazlı poliüretan yapıştırıcı uygulaması ....   | 31    |
| Şekil 3.3. Tipik test düzeneği .....   | 33    |
| Şekil 3.4. XPS kesme cihazı.....   | 33    |
| Şekil 3.5. XPS köpüğün basit basınç testi düzeneği.....  | 34    |
| Şekil 3.6. Batma deneyi numunesinin şematik gösterimi .....  | 35    |
| Şekil 3.7. İnce galvanizli sac yüzü 300x100mm boyutlarındaki batma numunesi .....  | 36    |
| Şekil 3.8. İnce galvanizli sac yüzü 240x50mm boyutlarındaki batma numunesi .....   | 36    |
| Şekil 3.9. Dört plastik mafsalı batma numunesinin şematik gösterimi .....  | 37    |
| Şekil 3.10. Üç nokta eğilme testi için kesilmiş köpük ve sac .....   | 40    |
| Şekil 3.11. Üç nokta eğilme testi düzeneği .....   | 41    |
| Şekil 3.12. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneğinin önden görünüşü .....  | 42    |
| Şekil 3.13. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneğinin A-A kesitinden görünüşü .....   | 42    |
| Şekil 3.14. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneğinin B-B kesitinden görünüşü.....  | 43    |
| Şekil 3.15. Güçlendirilmemiş numune 1-3 düzlemi (a) test öncesi (b) göçtüktan sonra .....  | 44    |
| Şekil 3.16. Güçlendirilmemiş numune 2-3 düzlemi (a) test öncesi (b) göçtüktan sonra .....  | 44    |
| Şekil 3.17. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneği.....   | 45    |
| Şekil 3.18. Numunelerin hazırlanması (a) ısıl kesim işlemi (b) toplu üretilmiş numuneler .....   | 46    |
| Şekil 3.19. (a) Güçlendirme parçası çiftleri (b) Güçlendirilmiş numuneler .....  | 47    |
| Şekil 3.20. PLANE182 elemanının geometrisi .....   | 48    |
| Şekil 3.21. BEAM188 elemanın geometrisi.....   | 49    |
| Şekil 3.22. Batma deneylerinin sayısal modeli .....  | 51    |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 3.23. Üç nokta eğilme testi numunesinin sayısal modeli .....   | 53 |
| Şekil 3.24. Üç nokta eğilme testi numunesinin mesnet ve yükleme detayı .....   | 53 |
| Şekil 3.25. Üç ray kayma testi sayısal modelinin genel görünümü .....  | 55 |
| Şekil 4.1. Basınç testi yük-yer değiştirme sonuçları, 1 ekseninde yükleme .....                                      | 56 |
| Şekil 4.2. Basınç testi yük-yer değiştirme sonuçları, 2 ekseninde yükleme .....                                      | 57 |
| Şekil 4.3. Basınç testi yük-yer değiştirme sonuçları, 3 ekseninde yükleme .....                                      | 57 |
| Şekil 4.4. Rijit plastik köpüklerin tipik gerilme-birim deformasyon eğrisi .....                                     | 58 |
| Şekil 4.5. Tipik gerilme-birim deformasyon eğrisi .....  | 59 |
| Şekil 4.6. IGSY/25_Z numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri .....   | 62 |
| Şekil 4.7. IGSY/38_Z numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri .....   | 63 |
| Şekil 4.8. IGSY/50_K numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri.....  | 64 |
| Şekil 4.9. IGSY/38_Z numunesinin (a) yükleme sırasında yakından<br>(b) deney sonrası görüntüsü .....                 | 66 |
| Şekil 4.10. IGSY/25_Z numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları.....   | 67 |
| Şekil 4.11. IGSY/38_Z numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları.....   | 68 |
| Şekil 4.12. IGSY/50_K numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları .....  | 69 |
| Şekil 4.13. Sayısal analiz sonucu elde edilen deformasyon dağılımı .....   | 70 |
| Şekil 4.14. Basit mesnetli sandviç kirişin şematik gösterimi .....   | 71 |
| Şekil 4.15. Üç nokta eğilme testi numunesinin yüklenmesi .....   | 74 |
| Şekil 4.16. Birinci bölgeden kesilen kirişte oluşan iç kuvvetler .....   | 74 |
| Şekil 4.17. İkinci bölgeden kesilen kirişte oluşan iç kuvvetler .....  | 75 |
| Şekil 4.18. Kuvvetli doğrultuda yüklenen kirişlerin deneysel<br>ve sayısal sonuçları.....                            | 78 |
| Şekil 4.19. Zayıf doğrultuda yüklenen kirişlerin deneysel<br>ve sayısal sonuçları.....                               | 79 |
| Şekil 4.20. Kuvvetli doğrultuda yüklenen kirişin (a) deney öncesi<br>(b) göçme durumu .....                          | 81 |
| Şekil 4.21. Zayıf doğrultuda yüklenen kirişin (a) deney öncesi<br>(b) göçme durumu .....                             | 82 |
| Şekil 4.22. Kuvvetli doğrultuda yüklenen kirişin tipik deforme<br>olmuş görüntüsü .....                              | 83 |
| Şekil 4.23. Kuvvetli doğrultuda yüklenen numunelerin deneysel<br>ve sayısal sonuçları.....                           | 84 |
| Şekil 4.24. K/Güçlendirilmiş_3 numunesinin (a) test öncesi<br>(b) test sırasında (c) göçme sonrası görüntüleri ..... | 85 |
| Şekil 4.25. Zayıf doğrultuda yüklenen numunelerin deneysel<br>ve sayısal sonuçları.....                              | 86 |
| Şekil 4.26. Z/Güçlendirilmiş_2 numunesinin (a) test öncesi<br>(b) test sırasında (c) göçme sonrası görüntüleri ..... | 87 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Çizelge 3.1. Galvanizli sacın mekanik özellikleri .....  | 28           |
| Çizelge 3.2. İnce galvanizli sac yüzü numunelerin özellikleri<br>ve adlandırılması.....                                  | 39           |
| Çizelge 3.3. Batma deneyi numunelerinin sayısal modellerinde<br>kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri .....        | 50           |
| Çizelge 3.4. Üç ray kayma deneyi numunelerinin sayısal modellerinde<br>kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ..... | 54           |
| Çizelge 4.1. Basınç deneyi numunelerinin her bir eksen için<br>elastisite modülleri.....                                 | 60           |
| Çizelge 4.2. XPS malzemesinin mekanik özellikleri .....  | 61           |
| Çizelge 4.3. XPS'in klasik ve geliştirilmiş analitik ifadelerden<br>elde edilen kayma modülü değerleri .....             | 77           |
| Çizelge 4.4. XPS'in üç ray kayma testi sonuçlarından elde edilen<br>kayma modülü ve kayma dayanımı değerleri.....        | 88           |
| Çizelge 4.5. XPS'in ÜNET ve ÜREK testlerinden elde edilen<br>kayma modülü değerleri.....                                 | 89           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|               |   |
|---------------|---|
| $A$           | Kesit alanı   |
| $A'$          | Kayma şekil faktörü ile çarpılmış alan (indirgenmiş kesit alanı)          |
| ASTM          | Amerikan Test ve Malzeme Birliği  |
| $A_0$         | Numunenin yükleme öncesi kesit alanı                                      |
| $b$           | Kiriş genişliği   |
| $b_f$         | Basma parçası boyu  |
| BS            | İngiliz Standardı   |
| $c$           | Sandviç giriş çekirdeğinin kalınlığı                                      |
| $d$           | Alt ve üst başlık levhalarının ağırlık merkezleri arasındaki düşey mesafe |
| $d_0$         | Numunenin yükleme öncesi kalınlığı  |
| $D$           | Sandviç girişin eğilme rijitliği  |
| $E_c$         | Çekirdek malzemesinin elastisite modülü                                   |
| $E_f$         | Yüz malzemesinin elastisite modülü  |
| EN            | Avrupa Standardı  |
| EPS           | Bir Doğrultuda Genişleyen Polistren Köpük                                 |
| $F_e$         | Elastik bölgenin üst limit yük değeri                                     |
| $F_{10}$      | %10 birim deformasyona karşılık gelen yük                                 |
| $G^{XPS}$     | Köpük çekirdeği kayma modülü  |
| $h$           | Sandviç giriş kalınlığı   |
| $I$           | Atalet momenti  |
| $l$           | Sandviç girişin boyu  |
| $M$           | Eğilme momenti  |
| MDF           | Orta Yoğunluklu Lifli Ahşap Levha   |
| $M_p$         | Plastik moment  |
| $N$           | Eksenel yük   |
| $P$           | Tekil yük   |
| PUR           | Poliüretan  |
| PVC           | Poli Vinil Klorid   |
| $q$           | Yayıllı yük   |
| $Q$           | Statik alan momenti   |
| $R$           | Eğrilik yarıçapı  |
| $S^{XPS}$     | Köpük çekirdeği kayma dayanımı  |
| SEY           | Sonlu elemanlar yöntemi   |
| $T$           | Burulma momenti   |
| $t_f$         | Sandviç girişin başlık kalınlığı  |
| $U$           | Birim deformasyon enerjisi  |
| $V$           | Kesme kuvveti   |
| XPS           | Bir Doğrultuda Kabaran Polistren Köpük                                    |
| $\alpha$      | Kayma şekil faktörü   |
| $\delta_{1b}$ | 1.bölgede eğilme momenti sebebiyle oluşan sehim                           |
| $\delta_{1k}$ | 1.bölgede kesme kuvveti sebebiyle oluşan sehim                            |
| $\delta_{2b}$ | 2.bölgede eğilme momenti sebebiyle oluşan sehim                           |
| $\delta_{2k}$ | 2.bölgede kesme kuvveti sebebiyle oluşan sehim                            |
| $\delta$      | Sandviç girişin orta noktasında oluşan sehim                              |
| $\delta$      | Sandviç girişin orta noktasında oluşan sehim                              |
| $\delta_m$    | Mafsallın düşey yer değiştirmesi  |
| $\nu$         | Poisson oranı   |
| $\sigma_{cy}$ | Çekirdek malzemesinin basınç dayanımı                                     |

$\sigma_{c\ max}$  Çekirdekte oluşan maksimum normal gerilme  
 $\sigma_e$  Elastik basınç gerilmesi  
 $\sigma_f$  Yüz malzemesinin akma dayanımı  
 $\sigma_{f\ max}$  Yüz malzemesinde oluşan maksimum normal gerilme  
 $\tau$  Kayma gerilmesi  
ÜNİT Üç Nokta Eğilme Testi  
ÜRKT Üç Ray Kayma Testi



## 1. GİRİŞ

Sandviç eleman düşüncesi sanıldığından daha öncelere dayanan ve sürekli gelişim göstererek günümüze kadar ulaşan önemli bir fikirdir. Birçok mühendislik uygulamasında etkin ve ekonomik tasarım yapılmak istendiğinde, mukavemeti ve rijitliği yüksek ancak ağırlığı düşük elemanlar tercih edilmektedir. Sandviç elemanlar mühendislerin ve araştırmacıların ulaşmayı amaçladığı bu tasarımı olanaklı kılmakta ve gelişen teknoloji sayesinde yeni avantajları beraberinde getirmektedir.

Sandviç elemanlar en basit tanımıyla, ince ve rijitliği yüksek iki yüz levhası arasına yerleştirilen, nispeten kalın ancak hafif çekirdek malzemesinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Carlsson ve Kardomateas, 2011).

Sandviç elemanların farklı yükler etkisi altındaki davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, elemanı oluşturan temel bileşenlerin mekanik özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu tezde, alt ve üst yüzlerinden ince galvanizli sac levhalara yapıştırılmış, bir doğrultuda kabaran hafif köpükten imal edilen sandviç kirişler incelenmiştir. Köpük çekirdekli sandviç kirişin mekanik özellikleri ile yapısal kararlılığının önemli ölçüde köpük malzemesinin kayma davranışı tarafından kontrol edildiği bilinmektedir (Mahfuz vd., 2005; Fathi vd., 2015). Öyleyse doğru bir analiz ve tasarım için gerekli ön koşul, köpük çekirdeğin kayma parametrelerinin belirlenmesidir.

Köpük çekirdeğin kayma parametrelerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan iki ana yöntem vardır. Birinci yöntem, sandviç kiriş numunelerinin kullanıldığı eğilme testi yöntemi ikinci yöntem ise çekirdek malzemesinin iki rijit plaka arasına yerleştirilerek doğrudan yüklendiği blok kayma testi yöntemidir (Fathi vd., 2015). Bu test yöntemleri ASTM C393 (2016) (üç nokta eğilme testi), ASTM C273 (2016) (veya BS 4370 (1973)) (tek blok kayma testi) ve EN 12090 (1997) (çift blok kayma testi veya üç raylı kayma testi) gibi standartlar ışığında uygulanmış ve farklı araştırmacılar tarafından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Kelsey vd., 1958; Grayley, 1966; O'Connor, 1984).

Tez çalışmasında köpük çekirdeğin kayma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ASTM C393 (2016) standardında tanımlanan üç nokta eğilme testi (ÜNET) yöntemi kullanılmış ve incelenen köpük çekirdeğin kayma modülü belirlenmiştir. Üç nokta eğilme testi yöntemi deneysel ve analitik olarak araştırmacıların sıklıkla kullandığı yöntemlerden olmuştur (Lingaiah ve Suryana, 1989; Caprino ve Langella, 2000; Mujika, 2006; Gdoutos ve Daniel, 2008)

Literatürde üç nokta eğilme testiyle ilgili yapılmış diğer çalışmalar da incelendiğinde (Deshpande ve Fleck, 2001; Crupi ve Montanini, 2007; Russel vd., 2011; Banghai vd., 2015), bu test yönteminin sandviç kiriş kayma modülünün belirlenmesinde elverişli olduğu sonucuna varılarak bu tezin ilk bölümünde üç nokta kiriş eğilme testleri yapılması planlanmıştır. Ancak kiriş eğilme testleri sırasında batma probleminin ortaya çıkabildiği göz önünde bulundurularak, üç nokta eğilme testlerine geçilmeden önce batma problemi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Tezin ilk aşamasında ince galvanizli sac yüzü sandviç kiriş için batma deneyleri yapılmış ve “tekil” yükün uygulandığı yerde kullanılan temas alanının (basma parçası) boyu değiştirilerek bu parametrenin batma yükü değerine etkileri incelenmiştir. Daha sonra literatürde batma yükü için verilen analitik ifadelerde, basma parçası boyu değiştirilerek batma yükleri hesaplanmış elde edilen değerler deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Batma analizlerinin son aşamasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, ANSYS 18.1 (2008) paket programı aracılığıyla batma testi numunelerinin sayısal modelleri yapılmış, doğrusal analiz sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci aşamasında köpük çekirdeğin kayma modülünün belirlenmesi amacıyla sandviç kiriş üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme değerleri kullanılarak kayma modülünün bulunması için tez çalışması kapsamında yeni bir analitik ifade geliştirilmiştir. Geliştirilen analitik ifade, orta noktasından basma parçası boyunca yayılı yüke maruz, basit kirişin orta noktasının çökme değerini vermektedir. Bu ifadede, deney sonuçlarından elde edilen orta noktanın çökmesi değeri yerine yazılarak köpük çekirdeğin kayma modülü hesaplanmıştır. Hesaplanan kayma modülü değerleri kullanılarak deney numunelerinin sayısal modelleri yapılmıştır. Sayısal modellerin doğrusal

analizlerden elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılarak, geliştirilen analitik ifadeden elde edilen kayma modülü değerleri doğrulanmıştır.

Çalışmanın son aşamasında köpük çekirdeğin kayma parametreleri üç ray kayma testi (ÜRKT) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Üç ray kayma testinin uygulanabilmesi için farklı boyutlarda numunelerin test edilmesine olanak sağlayan bir üç ray kayma testi düzeneği FYL2016-1424 numaralı Akdeniz Üniversitesi BAP projesi kapsamında geliştirilmiştir. Bu düzenek Sargın (2018) tarafından kayma parametrelerinin bulunması amacıyla kullanılmış ve güçlendirilmemiş deney numunelerinde karmaşık gerilme dağılımları olduğu, bu nedenle elemanların kayma modüllerinin doğru şekilde bulunamadığı sonucuna varılmıştır. Bu durum göz önünde bulundurularak kayma testi numuneleri alt ve üst yüzlerinden rijit sac plakalarla güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş numune testleri köpük çekirdeğin kabarma (kuvvetli) ve kabarma doğrultusuna dik (zayıf) doğrultularda yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak rijit köpük çekirdeğin kayma parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler deney numunelerinin sayısal modellerinde kullanılmış ve sayısal modellerin doğrusal analizleri yapılarak analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Sandviç elemanların gelişimi ve bileşenleri, genel tasarım ilkeleri, tipik göçme modları ve uygulamaları gibi konuların incelenmesinin bu tez kapsamında yapılacak deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar için temel oluşturması bakımından gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu amaçla sandviç yapılar hakkında gerekli kaynak taramaları yapılmış ve kaynak taramasının özeti sunulmuştur.

### 2.1. Sandviç Elemanların Tarihsel Gelişimi ve Uygulamaları

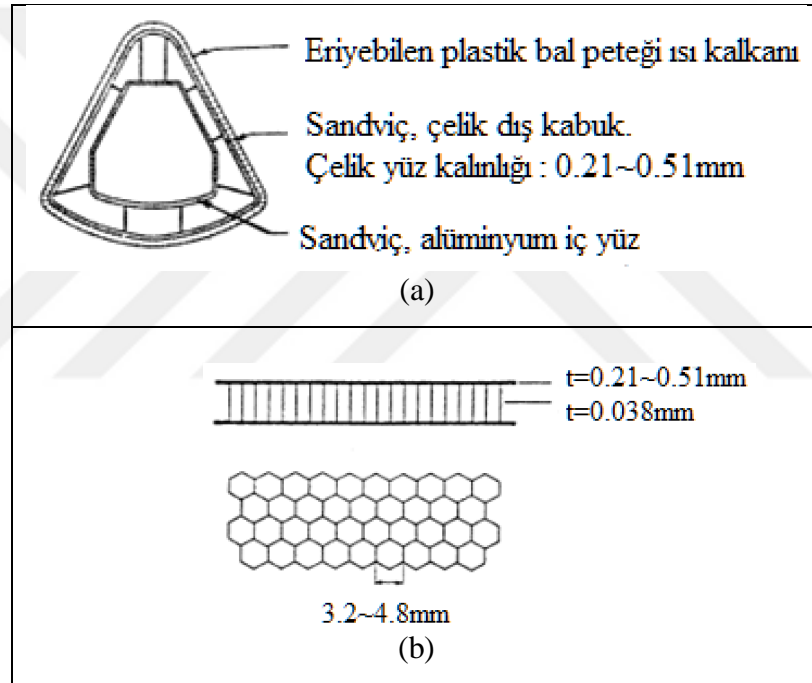
Sandviç elemanların tarihsel gelişimi ile ilgili çalışmalarda bu kavramı tanımlayan ve uygulamaya geçirerek kayıtlarda yer almasını sağlayan araştırmacının Fairbain (1849) olduğu belirtilmektedir (Allen, 1969). Fairbain, İngiltere'deki tüp kesitli köprü inşaatı sırasında yapılan çalışmalarda sandviç yapı prensiplerini düşünerek deneysel modeller önermiş ve elde edilen sonuçlar ışığında projeyi geliştirmiştir. Fairbain döneminden çok daha önce sandviç fikrinin aslında Leonardo da Vinci'nin çalışmalarında da yer aldığı bilinmektedir (Allen, 1969).

1924 yılında, Thomas von Karman ve Peter Stock uçak yapımında sandviç malzeme uygulamasının patentini almışlardır. Bu gelişmenin sonrasında, II. Dünya savaşının başlarında, sandviç kavramı özellikle havacılık sektöründe geniş çapta uygulama alanları bulmuş; ilk büyük ölçekli uygulama olarak kabul edilen avcı-bombardıman uçağı olan *Mosquito* (Şekil 2.1). 1938 yılında üretilmiştir (Palkowski ve Lange, 2005).



Şekil 2.1. Mosquito avcı-bombardıman uçağı (Howe ve Thirsk, 1999)

Bilindiği gibi Ay'a ilk başarılı uzay aracı gönderilmesi 20 Temmuz 1969 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu başarılı olayda, gelişen bilgisayar, malzeme ve üretim teknolojilerinin yanında, sandviç elemanların teknolojisinin de payı büyüktür. Böylece tarihte, sandviç panellerin kullanıldığı en önemli araçlardan biri *Apollo 11* olmuştur. Sandviç teknolojisinin sağlamış olduğu, ağırlığın azalması ve maruz kalınan gerilmelere karşı istenilen dayanıma ulaşılması gibi avantajlar *Apollo 11*'in başarılı bir kalkış yapmasında yadsınamaz paya sahiptir. *Apollo 11* kapsüllerinin duvar yapısı, birbirine bağlanmış iki sandviç kabuktan oluşmaktadır (Şekil 2.2a). Dış kabuk Şekil 2.2b'de detaylandırıldığı gibi, iki çelik yüz ve bal peteği çekirdekten meydana gelmiştir (Davies, 2001).

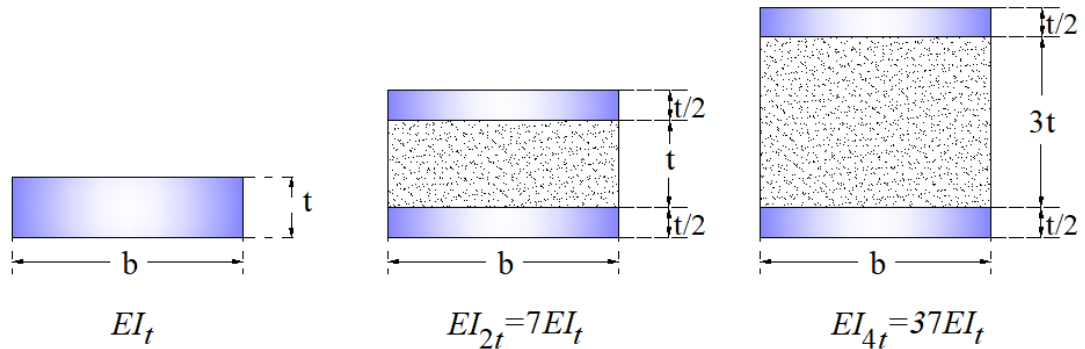


Şekil 2.2. (a) Sandviç kapsül detayı (b) Kapsülün dış kabuğunun hüresel sandviç formu (Davies, 2001)

Sandviç elemanların bahsi geçen büyük ölçekli yapılarda kullanılması, bu elemanlara olan ilgiyi arttırmıştır. Bunun yanında sandviç elemanların, araç gereçlerde, inşaat ve otomobil endüstrisinde sıklıkla kullanıldığı da bilinmektedir (Davies, 2001). Son yıllarda sandviç elemanların, özellikle inşaat ve makine mühendisliği uygulamalarındaki artış, sandviç elemanları birçok araştırmacının çalışma konusu haline getirmiştir (Stundzinski vd., 2009).

Sandviç elemanlar, tipik olarak iki ince rijit yüz levhası ile sınırlanmış kalın ama hafif çekirdekten oluşmaktadır (Carlsson ve Kardomateas, 2011). Bu basit ilke, yalnızca farklı tabakalardan ve malzemelerden oluşan yeni bir eleman tasarımını ortaya koymaz; aynı zamanda malzeme miktarında önemli bir artışa neden olmadan, yüzler arasındaki mesafenin açılmasıyla kesit rijitliğinin artmasını sağlar. Sandviç kavramının en önemli kazanımı olan bu yaklaşım, 1820’lerde Fransız Duleau tarafından ortaya atılmış ve testlerle desteklenmiştir. Bu fikir daha sonra I kirişlerin tasarımına da ışık tutmuştur. Buna göre, benzer bir prensiple, sandviç elemanlarda basınç ve çekme yüklerini doğrudan taşıyan yüzler I kirişte başlıklara, kesme kuvvetlerini taşıyan çekirdek ise gövdeye karşılık gelmektedir (Kuenzi, 1959).

Şekil 2.3’te aynı kalınlıkta yüz malzemesine sahip ancak farklı kalınlıklarda çekirdek malzemesi kullanılarak elde edilen elemanların eğilme rijitliklerindeki değişim göreceli olarak sunulmuştur.



Şekil 2.3. Sandviç fikrinin eğilme rijitliklerine katkısının şematik gösterimi (Aydınçak, 2007)

Şekil 2.3’te eğilme rijitlikleri arasındaki ilişki verilmiş olan kesitlerden  $t$  kalınlık,  $b$  genişlik olmak üzere,  $t$  kalınlıklı kesit için eğilme rijitliği,

$$EI_t = E \frac{1}{12} bt^3 \quad (2.1)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada  $E$  yüz levhasının elastisite modülü,  $I$  atalet momentidir. Çekirdek malzemesinin, sandviç elemanın eğilme rijitliğine katkısı, elastisite modülü yüz malzemesine kıyasla çok düşük olduğundan ihmal

edilmektedir. Buna göre çekirdeğin eğilme rijitliği dikkate alınmadan,  $t/2$  kalınlıklı yüzler arasındaki mesafenin artmasıyla oluşan yeni kesitlerinin eğilme rijitliğinin, atalet momentine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. İkinci ve üçüncü kesit için sırasıyla eğilme rijitlikleri,

$$EI_{2t} = E \times 2 \left( \frac{1}{12} b \frac{t^3}{8} + b \frac{t}{2} \left( \frac{t}{4} + \frac{t}{2} \right)^2 \right) = E \frac{7}{12} b t^3 \quad (2.2)$$

$$EI_{4t} = E \times 2 \left( \frac{1}{12} b \frac{t^3}{8} + b \frac{t}{2} \left( \frac{t}{4} + \frac{3t}{2} \right)^2 \right) = E \frac{37}{12} b t^3 \quad (2.3)$$

olarak elde edilmiştir.

Buna göre, sandviç elemanların maruz kaldıkları eğilme momentlerinin etkisi altında eğilme rijitliklerini arttırmada fayda sağladığı görülmektedir. Sandviç elemanların sağladığı bu önemli yapısal faydanın yanı sıra,

- yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması,
- ek işlem gerektirmeden optimum ısı yalıtımı ve montaj kolaylığı sağlaması,
- aynı ağırlığa sahip homojen duvar veya çatı elemanlarıyla karşılaştırıldığında üstün ses yalıtımı sağlaması,
- hava koşullarından etkilenmeyen kurulum ve hızlı inşaat süreci,
- herhangi bir zamanda sökme ve yeniden kurma kolaylığının bulunması

gibi avantajları da sandviç elemanların son yıllarda yaygın şekilde kullanılmasının önemli nedenlerinden olmuştur (Tajbaksh, 1992).

Bahsi geçen üstünlüklerinin yanı sıra sandviç elemanların zayıflıkları da bulunmaktadır. Bu zayıflıklar;

- sert plastik köpük çekirdekli sandviç elemanların yangın etkisi altında dayanım kaybına uğraması,

- bir tarafı ısıya maruz kalan sandviç elemanlarda iki yüz arasında deformasyon farklarının oluşması, (örneğin etkili güneş ışığına maruz çatı kaplaması)
- düşük ısı kapasiteye sahip olması,

olarak özetlenmektedir (Davies, 2001).

Sandviç elemanlar, genel olarak eğilme etkilerine maruz kalmalarına karşın uygulama alanlarına göre oldukça farklı yüklenme koşullarında bulunmaktadır. Örneğin, otomobil endüstrisindeki kullanımlarında darbe yüklerine maruz kalırken, türbin kanadı uygulamalarında düzlem içi basınç kuvvetlerinin etkisi altında kalırlar (Donga, 2005).

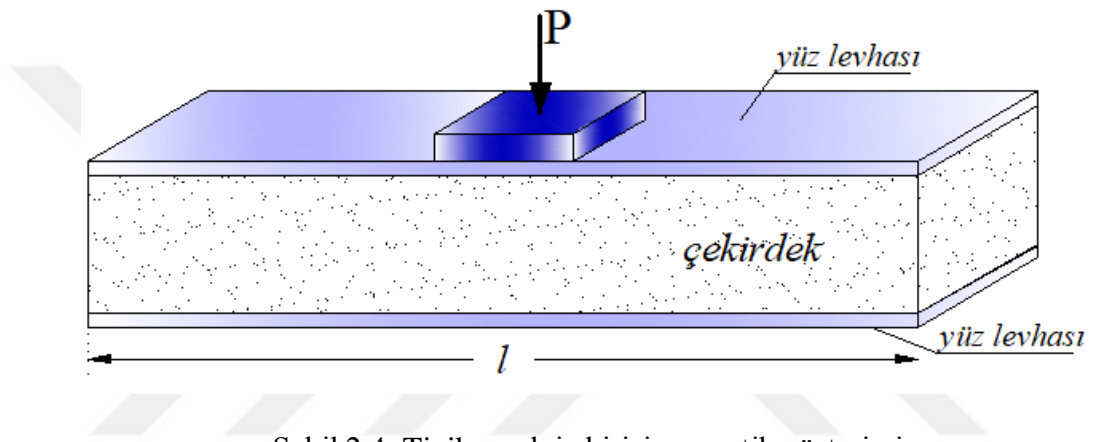
Kirişler, bilindiği gibi inşaat mühendisliğinin çoğu uygulamasında yer alan en temel yapı elemanlarından biridir. Sandviç kirişler sahip oldukları hafiflik ve yüksek mukavemet üstünlükleri sayesinde yalnızca inşaat mühendisliği uygulamalarında değil, uzay aracı, denizaltı inşası (Gullberg ve Olsson, 1990), otomobil endüstrisi, ulaşım gibi alanların uygulamalarında da kullanılmaktadır (Kawasaki vd., 2006; Ghugal ve Shikhare, 2015).

Özellikle havacılık alanında uçakların kabin zemininin, helikopter kanatlarının ve yakıt depolarının inşası gibi özel uygulamalarda kullanıldığı düşünüldüğünde, sandviç elemanların analizinin oldukça önemli olduğu görülmektedir (Burman, 1998).

Son yıllarda sandviç panellerin, özellikle sahip oldukları ısı ve ses yalıtımındaki üstünlükleri sayesinde, duvar, çatı kaplaması, iç duvar ve tavan kaplaması olarak kullanımı da artmıştır (Pokharel ve Mahendran, 2003). Günümüzde sandviç kirişler, bahsi geçen uygulama alanlarında geleneksel yapı elemanları ile yarışır hale gelmiştir. Bu nedenle, sandviç kirişlerin tasarımında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ile yapının fiziksel özelliklerine uygunluk, uzun ömürlülük, estetik, etkin üretim ve ekonomi göz önünde bulundurulmaktadır.

## 2.2. Sandviç Kiriş Tanımı ve Bileşenleri

Sandviç kirişler, alt ve üst yüzlerine eğilme rijitliği yüksek ince metal yüzler yapıştırılmış, hafif köpük çekirdekten oluşan bir boyutlu elemanlar olarak tanımlanmaktadır. En genel anlamda, Şekil 2.4'te şematik gösterimi verilmiş temel bileşenlerden oluşmaktadır. Bu temel bileşenler, sıklıkla kullanılan yapı malzemelerinden oluşabileceği gibi daha özel uygulama alanlarında kullanılan farklı malzemeler de olabilmektedir. Bu durum, sandviç kirişlerin çok geniş uygulama alanları bulmasını sağlayan önemli nedenlerdendir.



Şekil 2.4. Tipik sandviç kirişin şematik gösterimi

Sandviç kirişi oluşturan yüz ve çekirdek bileşenlerinin yanı sıra bu bileşenleri mekanik olarak bir araya getiren yapıştırıcı malzemeler de bileşen olarak tanımlanıp incelenmektedir. Son yıllarda geleneksel yapıştırıcı malzemelerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alınarak, bu etkileri barındırmayan yeni yapıştırıcı malzemeler tercih edilmektedir.

### 2.2.1. Yüz malzemeleri

Sandviç kirişin üst ve alt yüzlerindeki levhaların birincil işlevi, kirişin yeteri kadar eğilme rijitliğine sahip olmasını sağlamaktır (Marshall, 1998). Sandviç kirişlerin yüz levhalarına yaygın olarak metal kullanımı tercih edildiği bilinmektedir. Metal kullanımı, döküm teknolojisinin 1620'lerde metal mühendisliğinin ağırlıklı ilgili alanı olması; 1850 sonrası çeliklerin gelişimi ve 1940'lara doğru hafif ve özel alaşımların üretilmesiyle giderek artmıştır (Ashby, 1999).

Gelişen teknolojiyle birlikte metallerin yerine farklı malzemelerde tercih edilmiştir. Yine de metaller, en genel anlamda, sahip olduğu yüksek elastisite modülü, yük etkisi altında sünek davranış gösterme ve uygulanan alaşım ve ısı işlemlerle dayanımının artırılabilmesi gibi üstün mekanik özellikleri sayesinde sandviç kirişlerin yüz malzemesi olarak kullanılmaktadır (Ashby, 1999).

Metal yüzü sandviç kirişler ile ilgili yapılan çalışmalarda çelik/paslanmaz çelik, galvanizli çelik ve alüminyum gibi yapı malzemelerinin kullanıldığı görülmüştür (Sokolinsky vd., 2003; Tagarielli vd., 2004; Yan vd.,2014; Gabr vd., 2016). Bunun yanı sıra ahşap, lifle güçlendirilmiş plastik (Mohan, 2007) ya da betondan yüz levhası olarak kullanılan yapı malzemelerindedir (Davies, 2001).

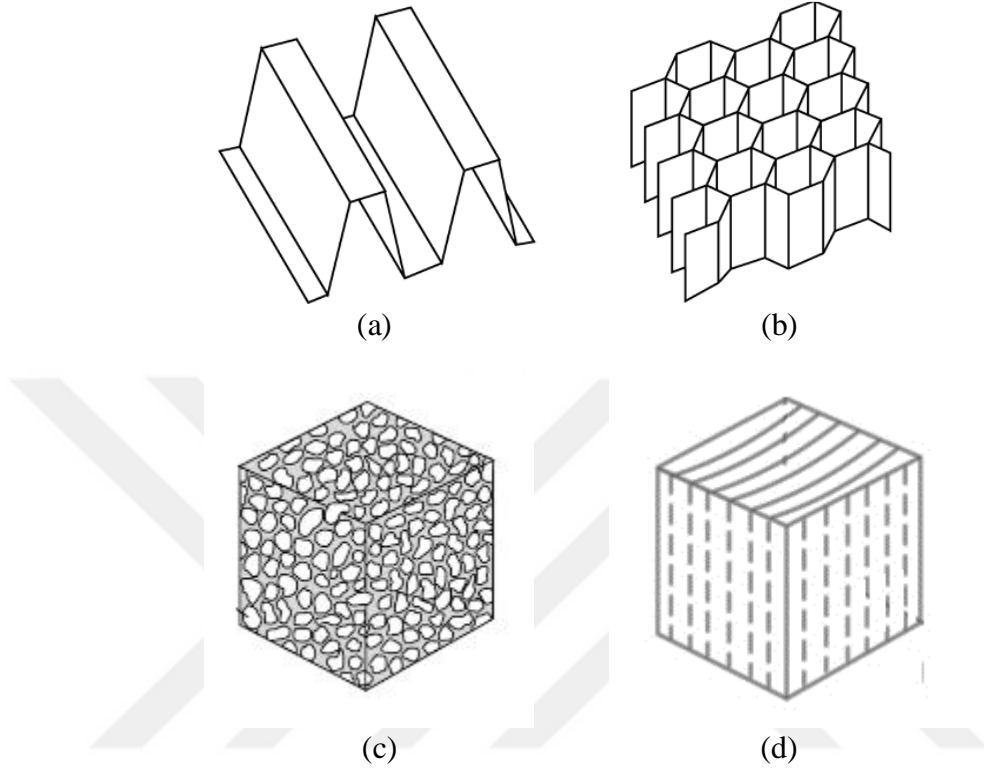
Bu malzemelerin yanı sıra özellikle uzay araçlarının tasarımında kullanılan sandviç elemanlarda farklı lif ve reçine tiplerinden üretilen kompozit yüzler de kullanılmaktadır (Steeves ve Fleck, 2004a). Cam elyafı/epoksi reçine, karbon elyaf/epoksi reçine bu kompozitlerin yaygın türlerindedir (Triantafillou, 1997; Daniel ve Abot, 2000, Betts vd., 2017).

Sandviç elemanlarda farklı yüz malzemelerinin kullanımı bazı durumlarda sınırlandırılmaktadır. Örneğin, ısı etkilerine maruz elemanlarda, alt ve üst yüzlerin aynı ısı genleşme katsayısına sahip olması istenmektedir (Niu, 1997).

### **2.2.2. Çekirdek malzemeleri**

Sandviç kirişlerde çekirdeğin birincil görevi, alt ve üst yüzlerdeki levhaların kararlılığını sağlamak ve kiriş derinliği boyunca kesme kuvvetlerini taşımaktır. Bu işlevlerin sandviç kavramına uygun olarak etkin şekilde sağlanması için çekirdek malzemesinin yeterli rijitliğe sahip ve hafif olması istenmektedir. Ayrıca çekirdeğin, maruz kalacağı çevresel etkiler (yüksek nem, sıcaklık değişiklikleri vb.) altında ilgili özelliklerinin kalınlık boyunca düzgün dağılım göstermesi beklenmektedir (Marshall, 1998).

Sandviç çekirdeği temel olarak 4 grupta incelenmektedir. Şekil 2.5a-d’de sırasıyla, gövdeli (oluklu, düz vb.), bal peteği, köpük (polimer, metal vb.) ve ahşap (balsa) çekirdekler gösterilmektedir (Carlsson ve Kardomateas, 2011).



Şekil 2.5. Tipik çekirdek malzemeleri (a) oluklu (b) bal peteği (c) köpük (d) ahşap (Carlsson ve Kardomateas, 2011)

Cahyano vd. (2016) bal peteği çekirdek ve hibrit (karbon-cam lifli) kompozit yüzlerden meydana gelen sandviç paneli incelemişler ve farklı malzeme hacim oranlarına sahip elemanları test ederek en uygun maliyet/etkinlik oranını elde etmeyi amaçlamışlardır. Böylece genellikle karbon fiberden üretilen elektrik aletlerinin gövde kısımları için bal peteği çekirdekli hibrit yüzlerden oluşan alternatif çözüm sunmuşlardır.

Bernard ve Lagace (1989) tarafından yapılan çalışmada, kompozit yüzülü sandviç plağın darbe direnci incelenmiş; farklı malzemelerde bal peteği tipi (alüminyum, nomex) çekirdek kullanılmıştır.

Bal peteği çekirdek malzemesinin sahip olduğu yüksek rijitlik/ağırlık oranına karşın, hücrenel köpük çekirdeğin düşük maliyet, yüksek nem direnci ve kolay uygulama tekniği gibi avantajları sayesinde birçok endüstriyel uygulama alanında köpük çekirdek tercih edilmektedir (Shipsha, 2001). Köpük çekirdeğin bir diğer avantajı da, yüz levhasına yapıştırılarak temas (destek) yüzeyi arttırılan çekirdeğin, yapısal sönüme katkı sağlamasıdır (Caprino ve Teti, 1994; Bhuiyan vd., 2009).

Hücrenel çekirdek malzemeler polimer esaslı olmakla beraber farklı içeriklere sahiptirler ve bir veya daha fazla fazın bir ara gelmesiyle üretilmektedirler. Genel kullanım alanı ısı yalıtımı olan polimer esaslı köpük malzemelere olan ilgi son yıllarda giderek artmıştır (Mahfuz vd., 2005; Mamalis vd., 2008; Thiyagasundaram vd., 2010).

Bu durum hücrenel yapıya sahip olan bu malzemelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Isı yalıtım köpüklerinin malzeme özellikleri onların ham maddesi olan polimer esaslı malzemelere göre değişkenlik göstermekle birlikte üretim tekniğine bağlı olarak da değişmektedir. Bunun sonucu olarak da açık veya kapalı hücre yapılı, sert veya esnek köpükler olarak çeşitli köpük türleri üretilmektedir (Davies, 2001).

Sandviç elemanın çekirdeğinde sıklıkla kullanılan sert plastik köpüklerin, poliüretan köpük, fenolik köpük, genişleyen veya kabaran polistren (EPS ve XPS) köpük olduğu bilinmektedir (Davies, 2001; Wang vd., 2016). Hücrenel yapıdaki bu malzemelerin mikro boyutta incelenmesi ve detaylı özellikleri, Gibson ve Asby (1997) tarafından sunulmuştur.

Bir diğer çekirdek malzemesi olsan ahşap ise en eski ve geleneksel malzemelerden olup, geçmişten bugüne sandviç yapılarda sıklıkla kullanılmıştır (Marshall, 1998). Atas ve Sevim (2010) PVC ve ahşap (balsa) çekirdekli sandviç numunelerin darbe yükleri altında göçme durumunu karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Osei-Antwi vd. (2013), ahşap çekirdeğin kayma parametrelerinin belirlenmesi için deneysel çalışma yapmışlardır. Toson vd. (2014) ahşap çekirdekli sandviç elemanların çeşitli yükler altındaki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemiştir.

### 2.2.3. Yapıştırıcı malzemeler

Yapıştırıcı malzemenin temel işlevi yüz levhası ve çekirdek arasındaki yük transferini sağlamaktır (Wang, 2016). Yapıştırıcı malzeme kesme ve çekme gerilmelerine maruz kalır ancak bu gerilmeler oldukça karmaşıktır (Aydıncak, 2007). Bu nedenle, genellikle yapıştırıcının çekirdekteki kayma gerilmelerine eşit gerilmeler taşıdığı düşünülmektedir (Davies, 2001). Genel olarak yapıştırıcı üretiminde kullanılan kimyasallar aşağıda listelenmiştir (Marshall, 1998).

- Nitril Fenolik
- Vinil Fenolik
- Epoksi
- Üretan
- Polyamid

Poliüretan yapıştırıcılar, sahip olduğu üretim kolaylığı sayesinde, birçok uygulama alanına sahiptir. Otomobil sanayisinde, yatlarda, kayak tahtası, bisiklet, raket vb. araç gereçlerin kaplama malzemelerinde reçine olarak kullanılmaktadır (Loureiro vd., 2010; Sung vd., 2016).

Poliüretan birçok farklı yolla üretilmesi bakımından diğer plastik tiplerinden ayrılan özel bir grup polimer malzemedir (Akindoyo vd., 2016). Poliüretanın keşfedilmesi 1937'li yıllara dayanır ve alman bilim adamı Otto Bayer'in diizosiyanatı bulmasıyla elde edilmiştir. Poliüretan en genel anlamda poliol ve hızlandırıcı izosiyanatın bir araya gelmesiyle oluşur (Sharmin ve Zafar, 2012).

Poliüretanın benzer uygulamalarda kullanılan epoksi ve polyester gibi yapıştırıcılara göre üstünlükleri,

- hızlı kür alma,
- daha iyi yorulma ve darbe direnci,
- çevreye ve sağlığa uyumluluk,
- kolay üretim ve uygulama,

olarak özetlenmektedir (Chattopadhyaya ve Raju, 2007). Ayrıca poliüretanın farklı kimyasal içeriklerle üretilmiş sağlığa ve çevreye uyumlu uygulamaları da son yıllarda ilgi odağı haline gelmiştir (Deka ve Karak, 2011).

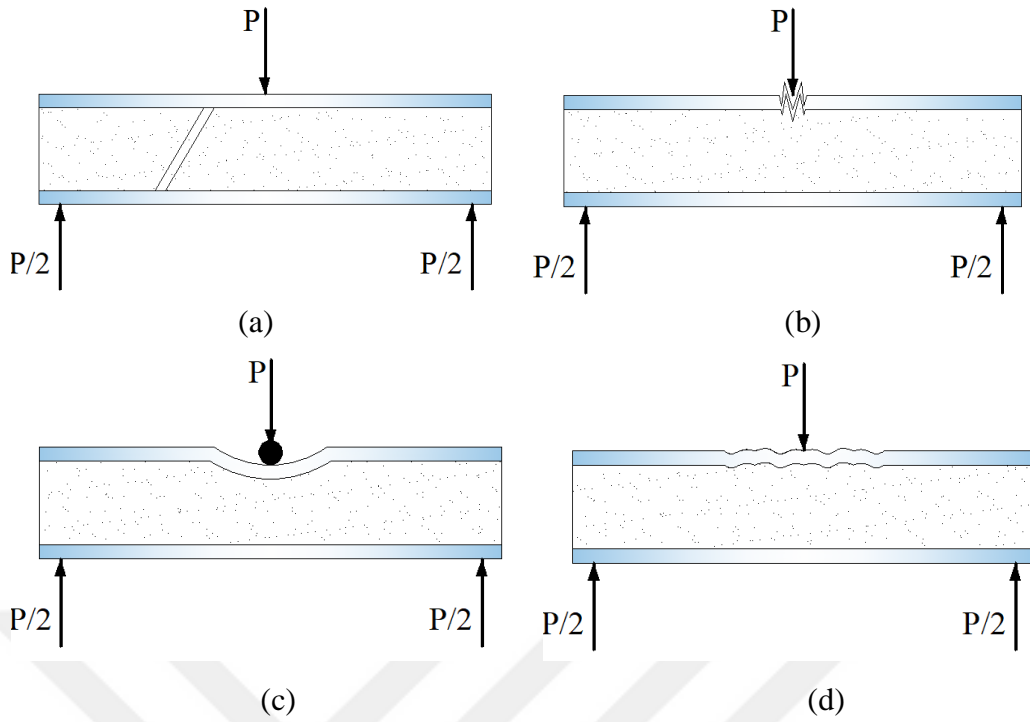
### **2.3. Sandviç Kirişlerin Göçme Modları**

Sandviç kirişler maruz kaldıkları yüklere ve bileşenlerinin özelliklerine göre farklı göçme davranışları sergilemektedir. Bu durum dikkate alınarak sandviç kiriş göçme mekanizmaları farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Marshall, 1998; Daniel vd., 2002; Steeves ve Fleck, 2004b).

Triantafillou ve Gibson (1987) yaptıkları çalışmada metal yüzü köpük çekirdekli sandviç kirişlerin göçme haritasını belirlemişler ve bu haritayı kullanarak sandviç kirişlerin minimum ağırlık ilkesine göre tasarımını yapmışlardır.

Daniel vd. (2002) kompozit yüzü alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç kirişlerin göçme mekanizmaları üzerinde detaylı bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada her bir göçme durumu için deneyler yürütülmüş; elde edilen sonuçlar analitik öngörülerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, göçme durumlarının kiriş geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme tipine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Sandviç kirişin üç nokta eğilme testi sırasında gözlenen tipik göçme mekanizmaları Steeves ve Fleck (2004b) tarafından Şekil 2.6a-d'de gösterildiği şekilde sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.6. Sandviç kiriş göçme modları (a) çekirdek kayma göçmesi (b) yüz levhasının plastikleşmesi (c) batma göçmesi (d) yüz levhasının buruşması göçme durumu (Steeves ve Fleck, 2004b).

Buna göre Şekil 2.6a'da sandviç kirişin çekirdek kayması sonucu oluşan göçme durumu sunulmuştur. Bu göçme durumu, sandviç kirişlerde görülen en baskın göçme tipi olduğundan oldukça fazla araştırılmıştır (Hall ve Robson, 1984; Mostafa vd., 2013).

Şekil 2.6b'de gösterilen, çekme veya basınç yükleri altında sandviç kirişin yüz levhasında meydana gelen eğilme nedeniyle oluşan çekme veya basınç etkileri altında plastik dayanıma ulaşması ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır (Daniel vd., 1999; Daniel ve Abot, 2000).

Sandviç kirişlerde tekil yük etkisi altında gözlenen göçme durumlarından bir diğeri de Şekil 2.6c'de gösterilen batma göçmesidir. Bu göçme durumu ince yüz tabakasına sahip sandviç yapılarda daha fazla görülmektedir. Bu nedenle ince yüzlü sandviç kiriş tasarımında batma göçmesi yükünün doğru şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Batma göçmesi yükünün belirlenmesi birçok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Yapılan kaynak incelemelerinde batma probleminin çözümü için

birçok deneysel ve analitik çalışma yapıldığı görülmüştür (Zenkert vd., 2004; Mohan vd., 2007; Flores-Johnson ve Li, 2011; Xie vd., 2012; Cagdas ve Taskin, 2018).

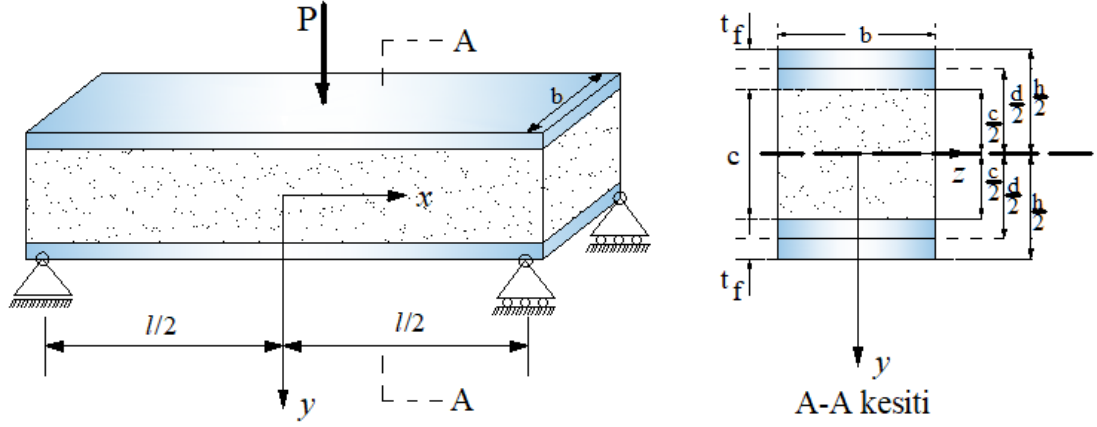
Cagdas ve Taskin (2018) ince galvanizli sac yüzü köpük çekirdekli sandviç kirişin batma deneyleri gerçekleştirmiş ve ön batma yükünü veren analitik ifade geliştirmişlerdir. Geliştirilen analitik ifadeden elde edilen sonuçlar, farklı basma parçası boyu kullanılarak tekrarlanan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve önerilen ifadenin ön batma yükü değerini verdiğini göstermişlerdir.

Şekil 2.6d'de verilen göçme durumu genellikle sandviç kolonlarda basınç, sandviç kirişlerde ise tekil etkisinde sıklıkla görülmektedir. Sandviç yapı elemanlarında genellikle köpük çekirdek malzemenin kullanıldığı durumlarda görülen yüz levhasının buruşması göçme durumu, sandviç fikrinin uygulanmaya başlandığı dönemlerden beri inceleme konusu olmuştur (Hoff ve Mautner, 1945; Gdoutos vd., 2003; Jasion vd., 2012).

#### **2.4. Sandviç Kiriş Teorisi**

Sandviç kirişin tasarımı yapılırken, çeşitli yükleme durumları ve sınır koşullarında farklı deformasyon ve gerilme ifadeleri elde edilmesine karşın, en temel anlamda klasik kiriş teorisi kullanarak kirişin eğilme etkisindeki gerilmeleri ve deformasyonları bulunabilmektedir. Basit eğilme probleminin çözümü için önerilen klasik kiriş teorisi kullanılarak, tekil yük etkisi altındaki basit bir kirişin sehim ve en büyük gerilme ifadeleri elde edilmektedir (Allen, 1969).

Şekil 2.7'de basit mesnetli tipik sandviç kirişin yükleme koşulları ve ilgili geometrik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 2.7. Tekil yük etkisi altında basit mesnetli kiriş ve kesitinin şematik gösterimi (Allen, 1969)

Sandviç kiriş çözümü için basit kiriş ifadelerinden yararlanarak, kirişin eğilme momenti ( $M$ ) ve eğrilik yarıçapı ( $R$ ) arasındaki ilişki,

$$M = -\frac{1}{R} \quad (2.4)$$

olarak yazılabilir. Homojen izotrop bir kirişin eğilme rijitliği  $EI$  olarak ifade edilmektedir. Buna göre sandviç kirişin eşdeğer eğilme rijitliği  $D$  sembolü ile tanımlanmak üzere yüzler ve çekirdeğin eğilme rijitlikleri toplamına eşittir. Sırasıyla yüzlerin ve çekirdeğin eğilme rijitliği,

$$(EI)_f = E_f \times 2 \left( \frac{1}{12} b t_f^3 + b t_f \frac{d^2}{4} \right) \quad (2.5)$$

$$(EI)_c = E_c \frac{1}{12} b c^3 \quad (2.6)$$

olarak elde edilir. Burada  $E_f$  ve  $E_c$  sırasıyla başlık ve çekirdeğin elastisite modülleri,  $b$  kiriş genişliği,  $t_f$  yüz levhası kalınlığı,  $d$  alt ve üst yüz levhalarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafe ve  $c$  ise çekirdek derinliğidir. Sandviç kiriş derinliği  $h$  olmak üzere,

$$d = \frac{h+c}{2} \quad (2.7)$$

Denklem 2.5 ve 2.6 toplanırrsa, sandviç kiriş kesitinin eşdeğer eğilme rijitliği,

$$D = E_f \frac{bt_f^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (2.8)$$

olarak elde edilir. Denklem 2.8'de verilen ifadenin üçüncü terimi olan çekirdeğin eğilme rijitliğinin, kiriş eşdeğer eğilme rijitliğine katkısı %1 den az ise yani,

$$6 \frac{E_f}{E_c} \frac{t_f}{c} \left( \frac{d}{c} \right)^2 > 100 \quad (2.9)$$

eşitsizliği geçerli ise üçüncü terim ihmal edilebilir. Bu durum, tasarımda zayıf çekirdek ile güçlü yüz levhası kullanıldığını göstermektedir.

Sandviç kiriş problemi elde edilen ifadeler kullanılarak, klasik kiriş teorisi ile çözüldüğünde sırasıyla başlık ve çekirdekte meydana gelen en büyük normal gerilme ifadeleri,

$$(\sigma_f)_{\max} = \pm \frac{ME_f}{D} \times \frac{h}{2} \quad (2.10)$$

$$(\sigma_c)_{\max} = \pm \frac{ME_c}{D} \times \frac{c}{2} \quad (2.11)$$

olarak elde edilir. Klasik kiriş eğilme teorisinde  $xy$  düzlemindeki kayma gerilmesinin ifadesinin,

$$\tau_{xy} = \frac{V_{xy} Q}{I_z b} \quad (2.12)$$

olarak tanımlandığı bilinmektedir. Burada  $V_{xy}$ ,  $xy$  düzlemindeki kesme kuvveti;  $Q$ , statik alan momenti,  $I_z$ ;  $z$  eksenine göre kirişin atalet momentidir. Sandviç kirişler için  $I=D/E$  olmak üzere Denklem 2.12'da verilen bu ifade düzenlenerek,

$$\tau_{xy} = \frac{V_{xy}}{Db} \sum(QE) \quad (2.13)$$

şeklinde elde edilir. Kiriş kesitinin herhangi bir  $y$  mesafesinde  $\sum(QE)$  ifadesi hesaplanırsa,

$$\sum(QE) = E_f \frac{bt_f d}{2} + \frac{E_c b}{2} \left( \frac{c}{2} - y \right) \left( \frac{c}{2} + y \right) \quad (2.14)$$

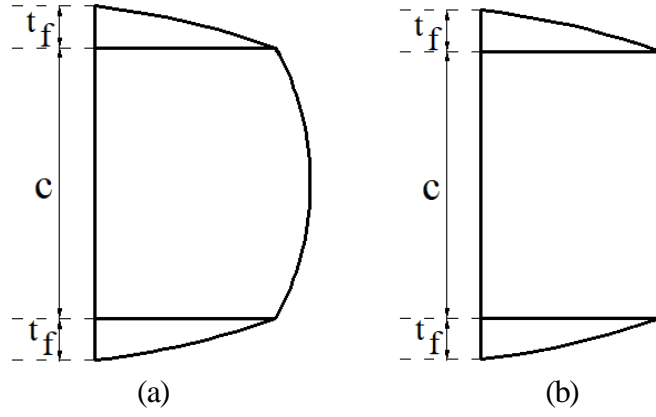
olarak elde edilir. Denklem 2.14, 2.13'de yerine yazılırsa kiriş kesitindeki kayma gerilmesi ifadesi  $y$ 'ye bağlı olarak,

$$\tau_{xy} = \frac{V_{xy}}{D} \left\{ E_f \frac{t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \left( \frac{c^2}{4} - y^2 \right) \right\} \quad (2.15)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem incelendiğinde kayma gerilmesi dağılımının kiriş yüksekliğine bağlı olarak parabolik değiştiği Şekil 2.8a'da görülmektedir. Ancak,

$$4 \frac{E_f}{E_c} \frac{t_f}{c} \frac{d}{c} > 100 \quad (2.16)$$

eşitsizliği sağlanıyorsa, kayma gerilmesi dağılımının sabit olduğu kabul edilebilir. İnce yüzlü sandviç kirişlerde  $d/c$  oranı genellikle 1'e yakın olduğundan Denklem 2.9 ve 2.16 aynı etkiyi göstermektedir. Sonuç olarak, zayıf çekirdek malzemesine sahip sandviç kirişlerde çekirdeğin kirişin eğilme rijitliğine katkısı çok düşük olduğundan Şekil 2.8b'de gösterildiği gibi, kiriş derinliği boyunca kayma gerilmesinin sabit olduğu kabul edilebilir (Allen, 1969).



Şekil 2.8. Sandviç kiriş kayma gerilmesi dağılımı (a) Gerçek kayma gerilmesi (b) sabit dağılım varsayımı (Allen, 1969)

Zayıf çekirdek kabulü neticesinde Denklem 2.15 yeniden düzenlenirse kayma gerilmesi ifadesi,

$$\tau_{xy} = \frac{V_{xy}}{D} \frac{E_f t_f d}{2} \quad (2.17)$$

olarak elde edilir (Allen, 1969).

## 2.5. Sandviç Kiriş Deneyleri

Sandviç kirişleri oluşturan bileşenlerin mekanik özelliklerinin bilinmesinin sandviç kiriş davranışının bilinmesinde oldukça önemli olduğu, bu durum dikkate alınarak kiriş bileşenlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ilgili deneylerin yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Özellikle sandviç kiriş çekirdek malzemesinin mekanik özelliklerinin bilinmesi, sandviç kiriş tasarımında öncelikli ve önemli adımlardandır.

Sandviç kirişin maruz kaldığı yükler ve kullanılan malzeme özellikleri gibi değişkenlere bağlı olarak farklı göçme davranışları gösterdiği bilinmektedir. Bu göçme davranışlarından biri de genellikle ince yüz levhali sandviç kirişlerin üç nokta eğilme deneyleri sırasında gözlenen batma göçmesi durumudur.

Batma problemi için birçok deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır (Ashby vd., 2000, Berthelot ve Lolive, 2002; Pitarresi ve Amorim, 2011; Cagdas ve Taskin, 2018). Ayrıca batma deney yöntemi sandviç giriş malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır (Miller, 2000).

Çekirdek malzemesinin mekanik özelliklerinden kayma modülünün belirlenmesi çeşitli araştırmacıların ilgi odağı olmuş ve bu amaçla sıklıkla kullanılan deneysel yöntemleri uygulamışlardır.

Lingaiah ve Suryana (1989) kompozit yüzlü farklı çekirdek malzemesine sahip (alüminyum bal peteği ve poliüretan köpük çekirdek) sandviç girişin üç nokta ve dört nokta yükleme testlerini, giriş eğilme rijitliğini bulmak amacıyla yapmışlardır. Elde edilen sonuçları analitik ifadelerle karşılaştırmışlar. Genellikle dört nokta yükleme testinden bulunan sonuçların üç nokta eğilme testinden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır.

Caprino ve Langella (2000) polimer esaslı köpük çekirdekli, metal yüzlü sandviç girişin kayma modülü belirlemek amacıyla üç nokta eğilme testini geliştirerek uygulamışlardır.

Fukuda vd. (2001), 3 farklı tipte karbon fiber lifli kompozit yüzlü köpük çekirdekli sandviç panellerin üç nokta eğilme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada test sonuçları çekirdek malzemesinin mekanik özelliklerinin bulunması amacıyla kullanılmış ayrıca mesnetler arası açıklık ve yükleme başlığı geometrisi gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen köpük çekirdek kayma modülünün üretici firma tarafından verilen katalog değerinden büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin, yapıştırıcı uygulamasının hücreli yapıya sahip köpük çekirdeğin gözeneklerine nüfuz etmesi sonucu çekirdeği rijitleştirmesi olabileceği yorumu yapılmıştır.

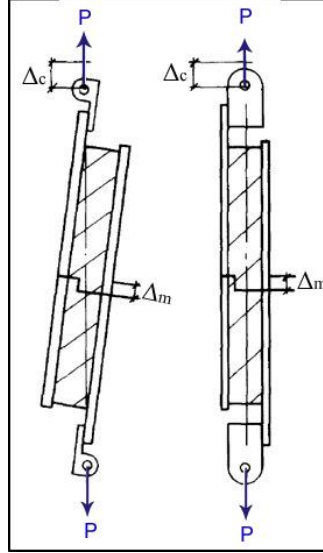
Mujika (2006) dört nokta ve üç nokta eğilme testi yapmış ve yük ve mesnetler arası açıklığın elastisite modülünün belirlenmesindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre dört nokta yükleme testi sonuçlarının açıklık değişiminden daha fazla

etkilendiğini görmüştür. Gdoutos ve Daniel (2008) üç nokta eğilme testi sırasında oluşan göçme mekanizmalarını deneysel ve karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Blok kayma testi standartlarından olan ASTM C273 (2016) yöntemi (tek blok) kullanılarak birçok çalışma yapılmış ve test sonucunda çekirdek kayma modülü ve kayma dayanımı değerlerinin elde edilebildiği görülmüştür (Reis ve Silva, 2009; Koissin ve Shipsha, 2009; Mostafa vd., 2013a;). Ancak, iki paralel rijit plak arasında yer alan numunenin tutulu yüzlerindeki plaklara çekme veya basınç uygulanması sonucu numunenin serbest yüzlerinde gerilmeler oluştuğu gözlenmiştir (Coker, 1912; Garcia vd., 1980, Juntikka ve Hallström, 2007).

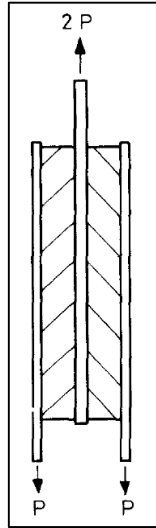
Coker (1912) tarafından yapılan fotoelastik deneysel çalışma sonucu, serbest yüzde meydana gelen gerilme etkilerinin, numunenin boy/kalınlık oranı artırılarak en aza indirilebileceği ve buna bağlı olarak saf kayma dağılımına yakın dağılım elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ilk baskısı 1950'li yıllarda yapılan ASTM C273 (2016) standardına kaynak olmuş ve standartta numunelerin boy/kalınlık oranının en az 12 olması koşulu yer almıştır. İkincil gerilmelerin önlenmesi amacıyla getirilen bu limite rağmen yapılan çalışmalarda tek blok kayma testi neticesinde, numune yüzlerine yapıştırılmış çelik yükleme plaklarının numune köşelerinde büyük gerilmelere neden olmasıyla birlikte karmaşık erken göçme durumlarının gözlemlendiği belirtilmiştir (Whitney vd., 1971).

ASTM C273'e göre tek blok kayma testi, iki yüzünden metal plaklara sabitlenmiş, boy/kalınlık oranı 12'den büyük olan ince numuneye, plakalar aracılığıyla çekme ve basınç yükleri uygulanarak gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. ASTM C273 test düzeneği-tek blok kayma testi (O'Connor, 1984)

ASTM C273 (2016) standardının boy/kalınlık oranı limitine uygun olan narin numunelerin üretilmesi ve test edilmesindeki zorluklar ve numune kenarlarında oluşan ikincil gerilmeler gibi dezavantajlar göz önünde bulundurulduğunda, ısı yalıtım malzemelerinin kayma davranışının belirlenmesi için EN 12090 (1997) standardında önerilen diğer blok testi yöntemi alternatif olarak kullanılmaktadır. Çift blok kayma düzeneği Şekil 2.10'da sunulmuştur.



Şekil 2.10. EN 12090 test düzeneği-üç ray kayma testi (O'Connor, 1984)

Bu test yönteminde numuneler çift blok kayma yüklemesine maruz kalmakta ve numune boyutları boy/kalınlık oranı 12'den küçük değerlerde kullanılmaktadır.

Numune boyutu sınırlamasının olmaması ve numune üretim kolaylığı nedeniyle üç ray kayma testi yöntemi araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmıştır. Ancak standart üç ray kayma testi yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalarda, test sırasında numune köşlerinde eğilme gerilmeleri meydana geldiği ve bunun sonucu olarak da numunenin kayma kapasitesine ulaşmadan göçtüğu, bu nedenle deney sonuçlarından düşük kayma modülleri elde edildiği belirtilmiştir (Davies, 2001; Hakmi, 1988; Wada vd., 2003; Sargın, 2018).

şekil 2.9 ve 2.10'da gösterilen kayma bloğu testi yöntemlerinin dışında standarda girmemiş test yöntemleri bulunmaktadır. Bu test yöntemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Penzien ve Didrikson (1964), rijit kayma çerçevesi yöntemi kullanarak deneysel ve analitik çalışmalar yapmış ve bu çalışmalar sonucu hücre sel pal peteği malzemenin kayma modülünü bulmuşlardır.

Roy ve Camping (2003), köpük çekirdek (karbon köpük) malzemelerin kayma parametrelerini belirlemek için yeni bir test düzeneği önermişlerdir. Silindir numuneler için geliştirilen test düzeneğinde, numune uçlarından burulma yüklerinin uygulandığı burulma testi düzeneği önerilmiştir.

Yoshihara ve Yoshinobu (2015), polimer esaslı köpük çekirdeğin kayma modülünün belirlenmesi için tahribatsız test yöntemlerinden olan titreşim test tekniği geliştirmişlerdir. Benzer titreşim testleri daha önceki çalışmalarda da yapılmış ve standart yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda titreşim testi yönteminin daha yüksek kayma modülü değerini verdiği görülmüştür (Hakmi, 1988).

Bahsedilen çalışmalar ve standartlar incelenmesi sonucunda, bu tezde çekirdek malzemesinin kayma modülünün belirlenmesi için numune üretim kolaylığı ve mevcut yükleme düzeneğinin büyük numuneler için elverişli olmaması dikkate alınarak, üç ray kayma testi yönteminin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

## 2.6. Sandviç Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözülmesi

Mühendislikte, problemleri tanımlayan temel denklemlerin ve/veya bu problemlerin başlangıç ve sınır şartlarının içerdiği karmaşıklık sebebiyle tam çözümün analitik olarak elde edilemediği durumlarda, sayısal yaklaşımlar kullanılmaktadır. Sistemi oluşturan bütün noktalar için analitik olarak tanımlanan çözümlere karşılık, sayısal yöntemlerde sadece düğüm noktaları olarak adlandırılan belirli noktaların çözümleri elde edilir. Bu temel yaklaşıma dayanan sayısal yöntemlerden biri de sonlu elemanlar yöntemidir (Moaveni, 2008).

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), gerilme analizi, ısı transferi, elektro-manyetik gibi mühendislik problemlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Günümüz sonlu elemanlar yönteminin başlangıcı, sürekli olarak adlandırılan ortamın ayırık eşdeğer elastik çubuklar ile yaklaşık olarak çözüldüğü 1900'lü yıllara dayanmaktadır. Ancak sonlu elemanlar terimi ilk kez 1960'lı yıllarda Clough tarafından kullanılmıştır (Zienkiewicz, 1979). Bu yöntem uygulamaları özellikle 1980'den sonra hızla gelişen bilgisayar teknolojileriyle birlikte gelişerek artmış ve birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur.

SEY birçok alanda olduğu gibi sandviç yapıların sayısal analizlerinde de sıklıkla kullanılan elverişli yöntemlerden biridir (Meraghni vd., 1999; Borsellino vd., 2004; Aydınca, 2007; Altenbach vd., 2013; Boersma, 2017).

Borsellino vd., (2004) köpük çekirdekli, cam elyaf takviyeli kompozit yüzölçümlü sandviç kirişin basınç, kayma ve eğilme testlerini yapmış ve bu testlerden elde edilen mekanik özellikleri ANSYS (2008) paket programı aracılığıyla sayısal modellerde kullanmışlardır. Elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Manet (2012), ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak basit mesnetli sandviç kirişin düzgün yayılı basınç yükü etkisi altında karşılaştırmalı modellerini yapmıştır.

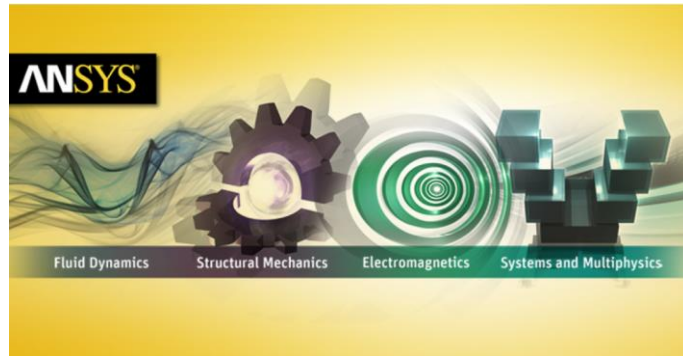
Magnucki, vd. (2013) tabakalı sandviç kirişte eğilme etkisiyle oluşan sehim değerlerinin bulunması amacıyla analitik ve sayısal analizler yapmışlardır. Kalınlık

boyunca mekanik özellikleri değişen 5 tabakalı sandviç kiriş için önerilen analitik ifade sonuçları ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Li vd. (2017), oluklu kafes çekirdekli sandviç kirişin üç nokta eğilme deneylerini yapmışlardır. Üç nokta eğilme deneylerinden elde edilen kayma deformasyonları için düzeltme faktörü önermişler ve bu öneriyi ANSYS paket programıyla yapılan sayısal analiz sonuçlarını kullanarak doğrulamışlardır.

Sargın (2018) tarafından sert köpük çekirdeğin kayma parametrelerinin üç ray kayma testiyle bulunması amacıyla deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Deney numuneleri ANSYS paket programı kullanılarak modellenmiş ve üç ray kayma testi sırasında karmaşık gerilme durumu gözlemlendiği sonucuna varılmıştır.

İlgili kaynakların incelenmesi sonucu sandviç yapıların analizlerinde sonlu elemanlar yönteminin etkin bir şekilde kullanıldığı görülmüştür. İlk kez 1971 yılında kullanılmaya başlanan ANSYS paket programı geniş kullanım olanaklarına sahip genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Program statik, dinamik, termal, akışkan ve elektromanyetik analizleri yapabilen alt analiz sistemlerine sahiptir. Sahip olduğu güçlü analiz araçları sayesinde 30 yıldan fazla zamandır gelişerek kullanılmaya devam etmektedir (Moaveni, 2008). Programın sahip olduğu bu avantajlar ve yaygın olarak kullanılması dikkate alınarak, bu çalışmada sayısal analizler için ANSYS 18.1 (2008) versiyonu kullanılmıştır. Şekil 2.11'de ANSYS paket programının sahip olduğu analiz olanaklarının sembolize eden program simgesi sunulmuştur.



Şekil 2.11. ANSYS paket programının analiz araçlarının gösterimi (ANSYS, 2008)

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Bu tezde, üst ve alt yüzeylerinden sac levhalara yapıştırılmış, bir doğrultuda kabaran polistren köpük çekirdekli sandviç kirişlerde çekirdek malzemenin kayma parametrelerini belirlemek amacıyla, deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmıştır. Sandviç kiriş için seçilen malzemeler hakkında bilgiler ve uygulanan deneysel ve sayısal yöntemler bu bölümde anlatılmıştır. Bunun yanı sıra deneysel çalışmalar sırasında kullanılan numunelerin üretim aşamaları ile deney düzeneği ve ölçüm sistemi hakkında ayrıntılı bilgi de yine bu bölümde sunulmaktadır.

#### **3.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzemeler**

Tez çalışması kapsamında yapılan sandviç kiriş deneylerinde, yüz levhası olarak galvanizli sac levhalar, çekirdek malzemesi olarak bir doğrultuda kabaran polistren köpük kullanılmıştır. Bu iki sandviç kiriş bileşeninin yapıştırma işlemi için ise çift fazlı poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcı seçilirken polistren köpüğü eritmeyecek özellikte olmasına dikkat edilmiştir.

##### **3.1.1. Galvanizli sac**

Bu tezde galvanizli paslanmaz çelik levhalar sandviç kirişin yüz levhası olarak kullanılmıştır. Avrupa'da metallerin galvanizle kaplanması işlemi olan EN 10142 (düşük karbonlu çelik) ve EN 10147 (yapı çeliği) yönetmelikleri temel alınarak yapılmaktadır. Çeliğin galvanizle kaplanmasının en temel nedeni korozyona karşı koruma sağlamaktır. Bu amaçla farklı kaplama malzemeleri kullanılmakla birlikte son yıllarda en sık kullanılan kaplamalar organik kaplama malzemeler olmuştur (Davies, 2001).

Uygulamada tipik olarak kullanılan galvanizli çelik sac kalınlığı 0.5~1.5mm arasında değişmektedir. Bu çalışmada da 0.5mm kalınlığında galvanizli sac kullanılmıştır. Kullanılan galvanizli sac malzemesinin mekanik özellikleri üretici firmadan alınmış ve Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Galvanizli sacın mekanik özellikleri

| Mekanik Özellikler                      | Değer             |
|---|-------------------|
| Yoğunluk ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> ) | 7850              |
| Elastisite modülü ( $E_f$ , MPa)        | 2x10 <sup>5</sup> |
| Akma dayanımı ( $\sigma_f$ , MPa)       | 120               |

### 3.1.2. Bir doğrultuda kabaran polistren köpük

Bu tezde, sandviç kiriş çekirdek malzemesi olarak bir doğrultuda kabaran polistren köpük (XPS) kullanılmıştır. Polistren ilk olarak 1839 yılında keşfedilmesine rağmen 1930'lu yıllara kadar ticari bir malzeme olarak kullanılmamıştır. Takip eden yıllarda polistren köpük kullanımında artış olmuş ve bu köpüğün üretimini yapan önemli firmalar kurulmuştur. Örneğin, Amerika'da kurulan Dow Kimyasalları firması bugün pratikte strafor olarak bilinen markayı geliştirmiş ve polistren köpük malzemesi üretiminde önemli bir yer edinmiştir (Tajbaksh, 1992).

Rijit plastik köpükler, sahip oldukları düşük ısı geçirgenlik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, nem yalıtımı gibi özellikleri sayesinde sandviç yapı uygulamalarında gün geçtikçe daha fazla tercih edilmektedir. Sandviç yapı uygulamalarında genellikle kapalı hücreli rijit köpükler kullanılmaktadır. Bu köpüklerde yaygın olarak kullanılan malzemeler aşağıda listelenmiştir (Davies, 2001).

- Poliüretan (PUR)
- Genişleyen veya kabaran polistren (EPS ve XPS)
- Fenolik reçine (PF)

Bu tezde, sandviç kiriş çekirdek malzemesi olarak seçilen XPS köpük *Isı yalıtım mamülleri-binalar için-ekstrüzyonla imal edilen polistren köpük* TS EN 13164 (2010) standardına göre üretilmektedir. Bu standarda göre XPS köpüğün üretimi, katı polistren kristallerin özel katkı maddeleri ve gözenekli yapısını kazandıran şişme (kabarma) kimyasalları ile karıştırılması ve oluşan karışımın özel karıştırıcılar içerisine dökülmesiyle başlar. Daha sonra karıştırıcı içerisindeki karışım yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında eritilerek akışkan viskoz hale getirilir. Elde edilen

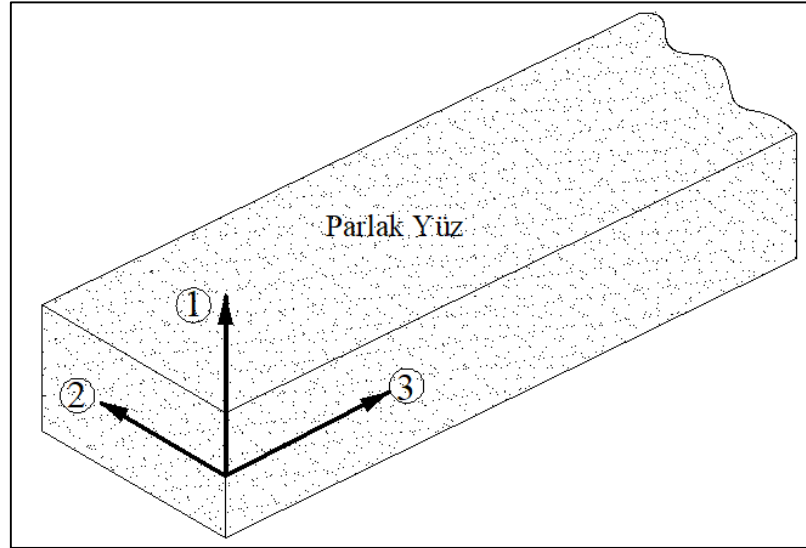
akışkan form özel kalıplara dökülerek sıkışmaya zorlanır. Sıkıştırılan malzeme kalıptan çıktıkça genişler. Şekillendirme ve soğuma işlemleriyle XPS köpüğün üretimi tamamlanır. Köpük malzemesinin içerisinde bulunan kimyasalların çeşidi ve miktarı ürünün kullanım alanının ihtiyaçlarına göre belirlenir. Bu nedenle uygulama alanları göz önünde bulundurularak farklı fiziksel özelliklere sahip XPS köpükler üretilmektedir (Antoniadou vd., 2015).

Üretim aşamasında kalıplamanın etkili olduğu ve buna bağlı olarak elde edilen XPS köpüğün malzeme özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Ayrıca mikro boyutta incelendiğinde, içerisine katılan kimyasalların gaz salınımıyla kabarması sonucu gözenekli-hücreli yapı kazanan malzemenin hücre duvarlarının boyu ve sayısına bağlı olarak XPS'in mekanik özellikleri değişmektedir. Bu durum, hücreli yapıya sahip XPS köpüğün hücre yapısı, hücre boyutu, hücre sayısı gibi özellikleri bakımından birçok araştırmacının ilgi odağı olması durumunu beraberinde getirmiştir ve bu alanda önemli çalışmalar yapılmıştır (Gibson vd., 1982; Gibson ve Ashby, 1982; Onck vd., 2001; Andrews vd., 2001; Diebels ve Steeb, 2002; Tekoglu ve Onck, 2005).

Genel olarak hücre boyut etkisi, hücre duvarı yapısı ve sayısı gibi özelliklerin hücreli malzemelerin mekanik davranışına etkilerinin incelendiği bahsi geçen çalışmaların farklı bir alanının konusu olduğu ve malzemenin mikro boyuttaki yapısını inceleyen disiplinlerin ilgi alanına girdiği yapılan literatür araştırmaları sonucu görülmüştür.

Ancak bu çalışmaların incelenmesinden sonra, tez çalışmasında kullanılan köpük malzemenin mekanik özelliklerinin köpük malzemenin hücre duvarı boyuna ve sayısına bağlı olduğu ve hücreli yapı özelliklerinin üretim tekniğinden etkilendiği görülmüştür.

Buna göre kullanılan XPS köpüğün kabarma ve ona dik iki doğrultusunun ve panelin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Polistren köpük panel üzerinde doğrultularının şematik gösterimi

Şekil 3.1’de verilen doğrultular,

- 1 → Kabarma doğrultusu, kuvvetli doğrultu
- 2 → Kabarmaya dik enine doğrultu, en zayıf doğrultu
- 3 → Kabarmaya dik boyuna doğrultu, zayıf doğrultu

olarak adlandırılmıştır. Ayrıca XPS köpük 1 doğrultusunda kabarıırken üretim bandındaki kalıplara temas ettiğinden bu doğrultuya dik olan yüzünün parlak olduğu bilinmektedir. Diğer yüzler ise pürüzlü tanecikli olarak üretilmektedir.

Köpük malzemenin özellikleri hücre yapısına ve hücreleri oluşturan duvarların malzeme özelliklerine göre değiştiğinden, homojen izotrop malzemeler için geçerli olan elastisite ve kayma modülü bağıntıları köpük malzemeler için geçerli değildir (Gibson ve Ashby, 1997).

XPS köpüğün genel kullanım alanının ısı yalıtımı olması basınç dayanımı, elastisite modülü, kayma modülü gibi mekanik özelliklerin üretici firmalardan temin edilememesi güçlüğünü ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen hücresel yapının mekanik özelliklerinin bilinen bağıntılarla hesaplanamaması da göz önünde bulundurulurken, tezde kullanılan çekirdek malzemenin mekanik özelliklerin bulunması için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

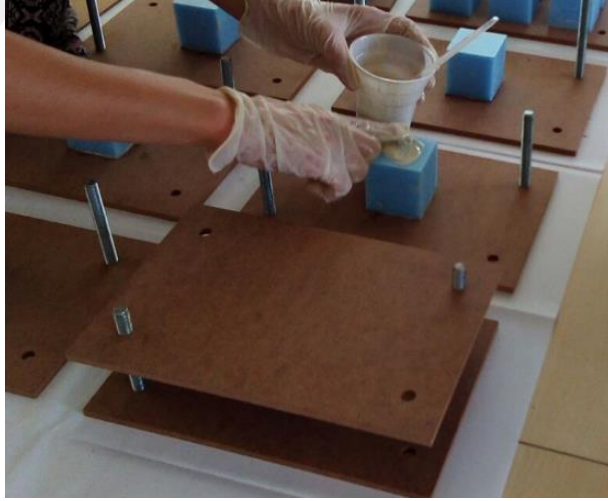
### 3.1.3. Poliüretan yapıştırıcı

Bu tezde hazırlanan sandviç kiriş numunelerinde poliüretanın yapıştırıcı olarak tercih edilirken sahip olduğu,

- uygulama ve kür sırasında sitren gazı yayılımı olmaması,
- kolay kür alması
- epoksi gibi yapıştırıcılarla karşılaştırıldığında ekonomik olması

gibi avantajları göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, tercih edilen poliüretan yapıştırıcı suya dayanıklıdır ve iç ve dış mekanlarda uygulanabilmektedir.

Poliüretanın seçilmesindeki bir diğer önemli unsur da polistren köpük çekirdeği eritmeyen kimyasal içeriğe sahip olmasıdır. İlgili firmadan temin edilen poliüretan (Mikrokim) yapıştırıcı çift fazlı olarak satın alınmış ve üretici firmanın verdiği bilgiler doğrultusunda hazırlanarak uygulanmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Deneysel ortamda kullanılan çift fazlı poliüretan yapıştırıcının uygulanması

Tezde kullanılan poliüretan yapıştırıcının uygulama adımları ve dikkat edilmesi gereken hususlar,

- ağırlıkça 6 kısım reçine (poliol) ve 1 kısım sertleştirici (izosiyanat) tek renkli olana kadar karıştırılır,

- uygulama yüzeyi kuru ve temiz olmalıdır,
- hazırlanan karışım 30 dakika içerisinde uygulama yüzeyine spatula yardımıyla sürülmelidir,
- ilk kürleme süresi yaklaşık olarak 5~7 saattir,
- mekanik dayanıklılık yaklaşık olarak 12~14 saat içinde kazanılır,
- kimyasal dayanıklılık yaklaşık olarak 7 gün sonra kazanılır
- reçine ve sertleştirici inceltilmemelidir,

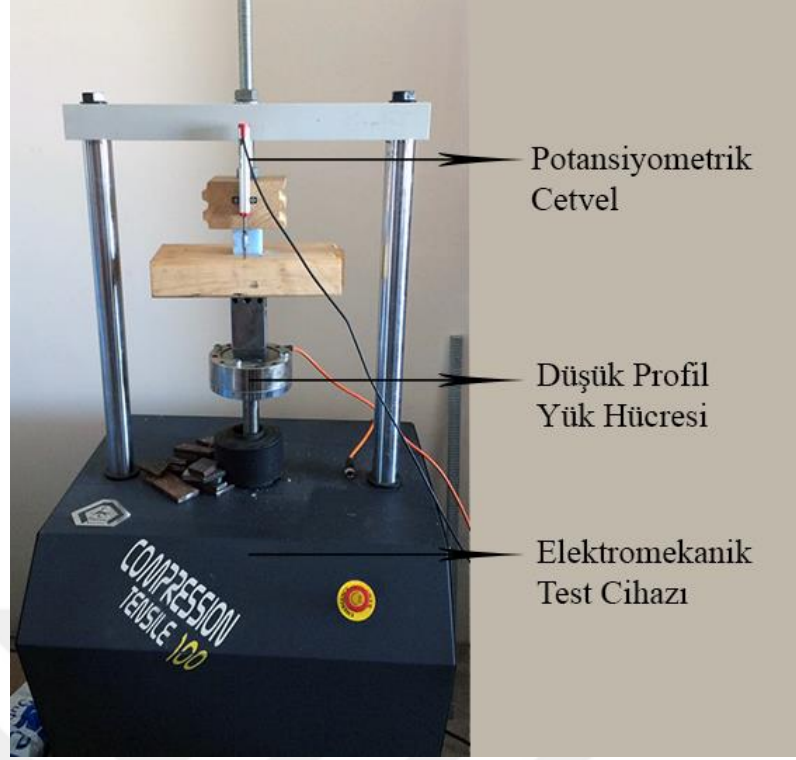
şeklinde listelenmiştir (URL-1).

### **3.2. Köpük Malzemenin Basınç Deneyleri**

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneyler Akdeniz üniversitesinde gerçekleştirilmiş olup, deneylerde,

- yükleme deplasman kontrollü elektromekanik 100kN kapasiteli basınç test cihazı,
- yükleme sırasında düşük profil yük hücresi
- yer değiştirme ölçümlerinde 0.01mm hassasiyetli 100mm açılma kapasitesine sahip doğrusal potansiyometrik cetvel
- Yük hücresi ve potansiyometrik cetvel ölçümlerinin bilgisayar ortamına aktarılması için 8 kanallı veri toplayıcısı

kullanılmıştır. Şekil 3.3'te tipik test düzeneği sunulmuştur.



Şekil 3.3. Tipik test düzeneği

Hücresel yapıya sahip polistren köpüğün kesim işlemleri için yapılan ön çalışmalarda, kesim sırasında hücre parçalanması olduğu gözlenmiştir. Bu problemin çözümü için rezistans telinin ısınması prensibiyle ısıtılabilir kesim işleminin yapılabildiği ve el kullanımına uygun Şekil 3.4’te gösterilen bir XPS kesme cihazı üretilmiştir.



Şekil 3.4. XPS kesme cihazı

Bir doğrultuda kabaran polistren köpük (XPS) çekirdek malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, sandviç kiriş tasarımı için oldukça önemlidir. Düşük yoğunluklu köpük malzemeler genellikle yalıtım uygulamalarında kullanıldığından, üretici firmalardan malzemelerin mekanik özellikleri detaylı olarak temin edilememektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak hücreli yapıya sahip bir doğrultuda kabaran polistren köpük (XPS) çekirdeğin elastisite modülü ve basınç dayanımının bulunması için tez çalışmanın ilk adımı olarak basınç testleri yapılmıştır.

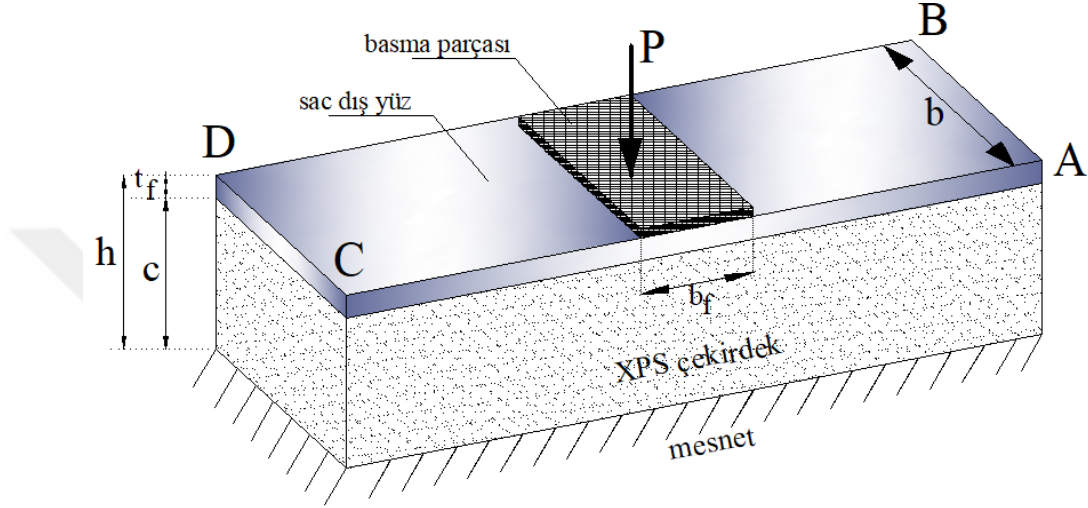
Genel işlevi ısı yalıtımı olan köpük çekirdeğin basınç testleri yalıtım malzemeleri basınç testi standardı olan EN 826 göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Köpük çekirdek numuneleri, doğru kesim işlemi yapılabilmesi amacıyla üretilen rezistans telli köpük kesme cihazıyla kesilerek hazırlanmıştır. Numune boyutları standartta belirtildiği gibi 50x50x50mm olarak ayarlanmıştır. Hazırlanan numunelerin basınç deneyleri, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi basit iki rijit parça arasına yerleştirilen numunelerin aksenal basınç yüküne maruz kalmasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. XPS köpüğün basit basınç testi düzeneği

### 3.3. Batma Deneyleri

İnce yüzölçü sandviç kirişlerin batma probleminin çözümü için ince galvanizli sac yüzölçü köpük çekirdekli sandviç kirişlerin batma deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.6'da tipik batma deneyi numunesinin şematik gösterimi verilmiştir. Verilen şekilde kirişi tanımlayan değişkenler sembolik olarak ifade edilmiştir.



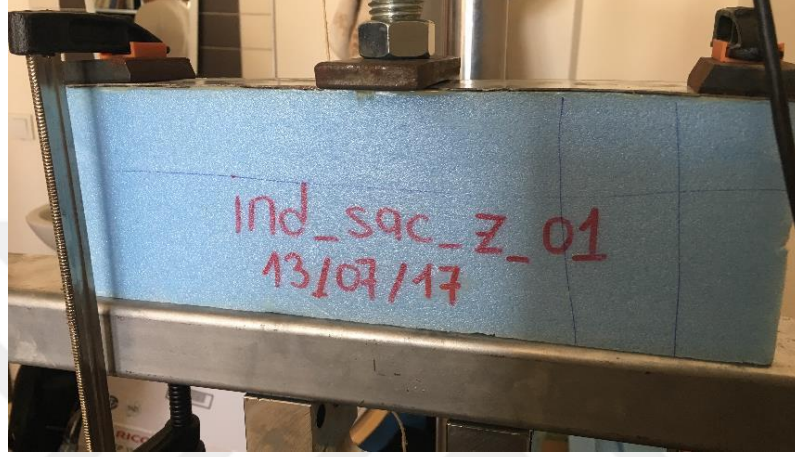
Şekil 3.6. Batma deneyi numunesinin şematik gösterimi (Cagdas ve Taskin, 2018)

Şekil 3.6'da verilen şematik kiriş gösterimine göre,  $l$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $t_f$  ve  $b_f$  sırasıyla numune boyunu, genişliğini, toplam yüksekliği, çekirdek yüksekliğini, yüz tabakasının kalınlığını ve basma parçası uzunluğunu ifade etmektedir. Şematik gösterimi verilen ve Cagdas ve Taskin (2018) tarafından kullanılan test düzeneği, farklı araştırmacılar tarafından da benzer şekilde kullanılmıştır (Koissin vd., 2004; Zhang vd., 2016; Xie, 2018).

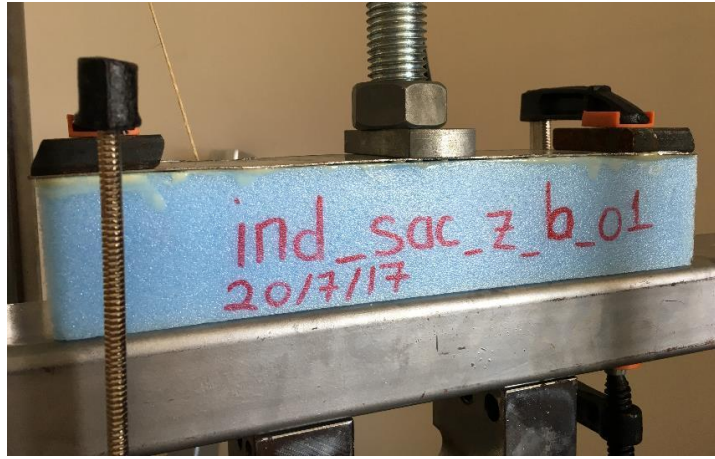
İnce galvanizli sac yüzölçü sandviç kiriş numuneler için  $l=240\text{mm}$  ve  $l=300\text{mm}$  olmak üzere iki farklı uzunluk seçilmiştir. Ayrıca  $l=240\text{mm}$  olan numunenin çekirdek kalınlığı  $c=50\text{mm}$ ,  $l=300\text{mm}$  olan numuneler içinse  $c=100\text{mm}$  olarak belirlenmiştir. Batma deneyleri yapılan tüm numunelerin genişliği  $b=50\text{mm}$  olarak alınmıştır. Köpük malzemesi XPS kesme cihazıyla istenen boylarda kesilerek hazırlanmıştır. Benzer şekilde yüz levhası olarak kullanılacak kalınlığı  $0.5\text{mm}$  olan sac köpük çekirdeğe uygun ölçülerde kesilerek, köpük çekirdeği eritmeyen çift fazlı poliüretan yapıştırıcı ile çekirdeğe yapıştırılmıştır. Yapıştırılan numuneler yüz levhaları ile

köpük çekirdek arasında kür sırasında kayma olmaması için ilk kürünü aldıktan 3~5 saat sonra mengenerler kullanılarak sabitlenmiştir.

Şekil 3.7 ve 3.8’de sırasıyla, ince galvanizli batma numunelerinin farklı boy ve kalınlıktaki örnekleri verilmiştir. Numune test edilmeden önce test sırasında uçların yukarı hareketinin önlenmesi amacıyla kenarlardan tutulmuştur.



Şekil 3.7. İnce galvanizli sac yüzü 300x100mm boyutlarındaki batma numunesi



Şekil 3.8. İnce galvanizli sac yüzü 240x50mm boyutlarındaki batma numunesi

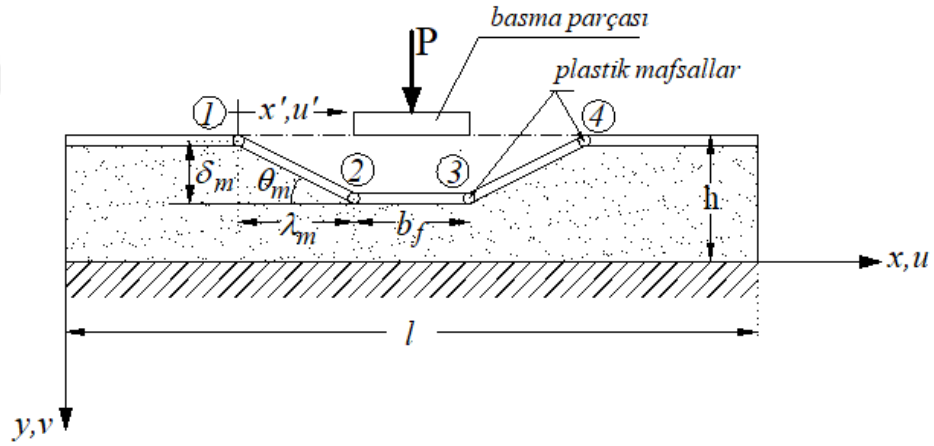
Batma testi için yükleme hızı yaklaşık olarak 3,6 mm/dakika olarak hesaplanmıştır. Basma parçası boyu  $b_f$ , 25, 38 ve 50mm alınarak toplamda 9 adet batma deneyi yapılmış ve basma parçası boyunun ön batma yüklerine etkisi incelenmiştir.

İlk olarak batma yükü ifadesi ile ilgili daha önce önerilmiş ifadeler özetlenmiş, daha sonra bu ifadeler batma deneylerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileriyle birlikte Bölüm 4’te sunularak karşılaştırma yapılmıştır.

Sandviç kirişlerde gözlenen batma göçmesi pek çok deneysel çalışmaya konu olduğu gibi analitik ifadelerin geliştirilmesi konusunda da birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur.

Ashby vd. (2000) batma bölgesinin sınırlarının Şekil 3.9’da gösterildiği gibi dört plastik mafsallı tarafından belirlendiği ve bu bölgede çekirdek malzemesinin tamamen plastik olduğunu varsayımlardır. Ashby vd. (2000), inceledikleri metal çekirdekli ve metal yüzü sandviç kiriş için üst sınır yaklaşımı ile batma yükü için aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir.

$$P_{Ashby} = 2bt_f \sqrt{\sigma_f \sigma_{cy}} \quad (3.1)$$



Şekil 3.9. Dört plastik mafsallı batma numunesinin şematik gösterimi (Cagdas ve Taskin)

Denklem 3.1’deki terimlerden:  $\sigma_{cy}$ , çekirdek malzemesinin akma dayanımı,  $\sigma_f$  ise yüz malzemesinin basınç dayanımını ifade etmektedir. Yüz levhasının plastik momentinin

$$M_p = \sigma_f \frac{bt_f^2}{4} \quad (3.2)$$

olduğu bilindiğinden, Denklem 3.1,  $M_p$  cinsinden Denklem 3.3'teki gibi ifade edilebilir:

$$P_{Ashby} = 4\sqrt{M_p \sigma_{cy} b} \quad (3.3)$$

Ashby vd. (2000) tarafından önerilen bu ifade Bart-Smith vd. (2001) tarafından basma parçası boyu  $b_f$  dikkate alınarak geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ifade aşağıdaki gibi aşağıdaki şekilde sunulmuştur.

$$P_{B-S-I} = P_{Ashby} + \sigma_{cy} b b_f \quad (3.4)$$

Önerilen bu ifade, Ashby vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi üst sınır batma yükü için geçerlidir.

Steeves ve Fleck (2004b) sandviç yapıların göçme durumlarını inceledikleri çalışmada batma yükü için, analitik bir ifade önermişlerdir. Sandviç kirişler için önerilen bu ifadede çekirdek plastik davranış gösterirken yüz levhasının elastik kaldığı varsayılmıştır. Steeves ve Fleck (2004b) tarafından önerilen elastik batma yükü ifadesi Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$P_{SF-E} = b t_f \left( \frac{\pi^2 \sigma_{cy}^2 E_f (t_f + c)}{3l} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

Cagdas ve Taskin (2018) tarafından yapılan çalışmada ön batma yükünü veren yeni bir analitik ifade geliştirilmiştir. Bu ifadede basma parçası boyu dikkate alınmış ve üç farklı basma parçası boyu seçilerek hesaplamalar tekrarlanmıştır. Çalışmada Şekil 3.9'da şematik gösterimi verilen dört mafsallı batma modeli kullanılmıştır. Ancak önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, batma yüklemesi sırasında basma parçası altındaki çekirdeğin akma dayanımına ulaştığı bunun yanında basma parçasının köşelerinden uzaklaştıkça (1-2 ve 3-4 mafsalları arasında kalan bölge) çekirdek malzemesinin elastik olduğu varsayımı yapılmıştır.

Cagdas ve Taskin (2018) tarafından önerilen ön batma yükü ifadesi Denklem 3.6'da sunulmuştur.

$$P_{CT2018} = \frac{4}{3} \sqrt{3M_p \sigma_{cy} b + \sigma_{cy} b b_f} \quad (3.6)$$

Rijit zemine oturmuş ince galvanizli sac yüzü, polistren köpük çekirdekli sandviç kirişin batma deneyleri basma parçası boyu ve polistren köpük çekirdeğin doğrultuları değiştirilerek üç ayrı grupta gerçekleştirilmiştir. Her bir grup için üçer deney yapılarak yük-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Deneyleri yapılan numunelerin ilgili özellikleri ve adlandırılması Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. İnce galvanizli sac yüzü numunelerin özellikleri ve adlandırılması

| Numune ismi | $b_f$ (mm) | $l$ (mm) | $c$ (mm) | XPS doğrultusu       |
|-------------|------------|----------|----------|----------------------|
| IGSY/25_Z   | 25         | 240      | 50       | Zayıf (3ekseni)      |
| IGSY/38_Z   | 38         | 300      | 100      | Zayıf (3 eksteni)    |
| IGSY/50_K   | 50         | 300      | 100      | Kuvvetli (1 eksteni) |

### 3.4. Üç Nokta Eğilme Deneyleri

Tez çalışmasının bu bölümünde, sandviç kiriş çekirdek malzemesinin kayma modülü değerinin belirlenmesi üç nokta eğilme test yöntemi uygulanmıştır. Çekirdeğin kayma parametrelerinin belirlenmesi için ASTM C393, ASTM C273 (veya BS 4370) ve EN 12090 standartlarında test yöntemleri tanımlanmıştır. ASTM C273 ve EN 12090 standartlarındaki kayma testlerinin dışında kayma modülü belirlenmesi için ASTM C393 standardında tanımlanan üç nokta eğilme testi sandviç kiriş çalışmalarında sıklıkla kullanılmıştır (Sideridis ve Papadopoulos, 2004; Soares vd., 2008; Yan vd., 2014; Wesolowski vd., 2017).

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında üç nokta eğilme testinin sandviç kiriş çekirdeğinin kayma modülünün belirlenmesinde kullanılabilir bir yöntem olduğu görülmüştür. Ayrıca bu test yöntemi numune hazırlığı ve test düzeneği bakımından uygulamaya kolaylığı avantajına sahiptir.

Üç nokta eğilme testi için gerekli kiriş numuneleri, mesnetler arası mesafe 600mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Çekirdek malzemesi olarak bir doğrultuda kabaran polistren köpük malzemesi kullanılmıştır. Köpük malzemesinin kesim işlemi için XPS kesme cihazı kullanılmıştır. Köpük çekirdek boyutları  $l \times b \times h$ -600x50x50mm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Daha sonra üst yüz levhası için 0.5mm kalınlıklı galvanizli sac 600x50mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.10). Kesimi tamamlanan numuneler yüzeyleri temizlenerek yapıştırma işlemi için hazır hale getirilmiştir. Yapıştırıcı olarak polistren köpüğü eritmeyen çift fazlı poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra kirişler üzerlerine ağırlıklar konularak kür almaları için en az bir hafta bekletilmiştir.



Şekil 3.10. Üç nokta eğilme testi için kesilmiş köpük ve sac

Bu çalışmada çekirdeğin kabarma doğrultusu (1-3 düzlemi) ve bu doğrultuya dik doğrultuda (2-3 düzlemi) üçer numune olmak üzere toplam 6 numunenin testi yapılmıştır. Üç noktama eğilme testi düzeneği için Şekil 3.11’de gösterilen çelik kutu profil ve biri kayıcı biri sabit olacak şekilde FYL2016-1424 Akdeniz Üniversitesi BAP projesi kapsamında üretilmiş mesnetler kullanılmıştır. Yükleme hızı 3.6mm/dk olarak belirlenmiştir. Basma parçası uzunluğu  $b_f$ , tüm kiriş deneylerinde batma göçmesi olmadan eğilme deneylerinin yapılabilmesi için 100mm olarak alınmıştır.

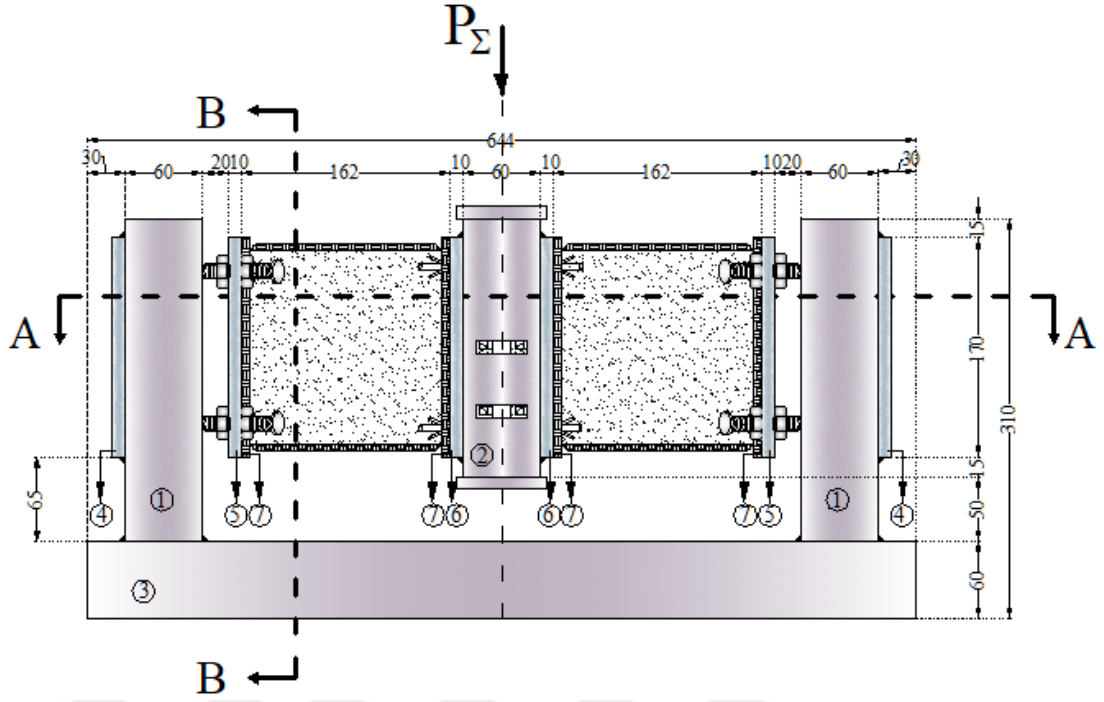


Şekil 3.11. Üç nokta eğilme testi düzeneği

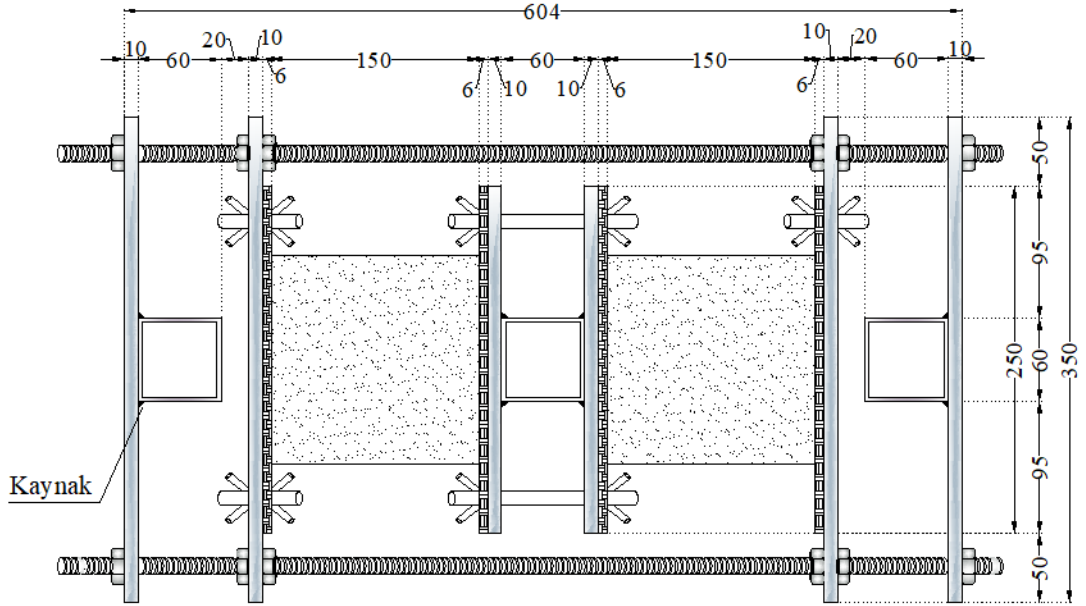
### 3.5. Üç Ray Kayma Deneyleri

Standart üç ray kayma testi düzeneğine prensipleri dikkate alınarak, Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14'te çizim detayları verilen üç ray kayma testi düzeneği FYL2016-1424 Akdeniz Üniversitesi BAP projesi kapsamında geliştirilmiş ve üretilmiştir.

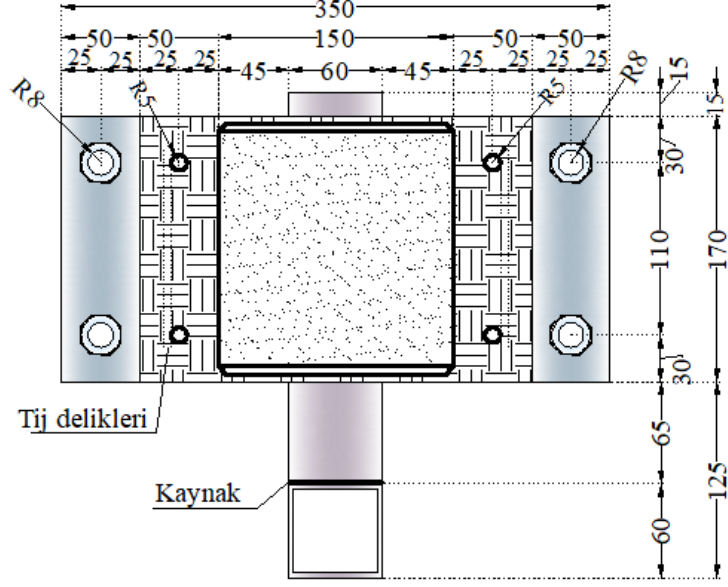
Kayma düzeneği tasarımında, farklı boyuttaki numunelerin de test edilebilmesini sağlamak için tijler aracılığıyla hareket kolaylığı sağlanmıştır. Ayrıca, yapılan deneylerde montaj kolaylığı sağlaması bakımından, numune üretimindeki iş yükünü hafifletecek MDF levhalar çelik çerçeve levhalarına tijler aracılığıyla eklenmiştir. Tekrar eden testlerde numuneler bu MDF plakalar aracılığıyla ana düzeneğe monte edilmiş ve test sonunda sökülerek kolaylıkla düzeneden ayrılmıştır.



Şekil 3.12. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneğinin önden görünüşü



Şekil 3.13. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneğinin A-A kesitinden görünüşü



Şekil 3.14. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneğinin B-B kesitinden görünüşü

### 3.5.1. Güçlendirilmemiş numune deneyleri

Bölüm 3.5'te tanıtılmış olan üç ray kayma testi düzeneği Sargın (2018) tarafından XPS köpüğün kayma modülün bulunması için kullanılmıştır. Bu çalışmada kuvvetli ve zayıf doğrultularda üçer test olmak üzere toplam 6 adet test yapılmıştır. Testlerde numune köşelerinde oluşan ikincil gerilme etkileri nedeniyle, numunelerin kayma modülü değerlerinin bulunması için anlamlı olmayan sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Sargın (2018) tarafından yapılan çalışmada, güçlendirilmemiş numunelerin deney öncesi ve sonrası fotoğrafları karmaşık gerilmeler nedeniyle oluşan göçme durumları hakkında fikir vermesi bakımından sırasıyla kuvvetli ve zayıf doğrultular için Şekil 3.15 ve 3.16'da sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.15. Güçlendirilmemiş numune 1-3 düzlemi (a) test öncesi (b) göçtükten sonra (Sargın, 2018)



(a)



(b)

Şekil 3.16. Güçlendirilmemiş numune 2-3 düzlemi (a) test öncesi (b) göçtükten sonra (Sargın, 2018)

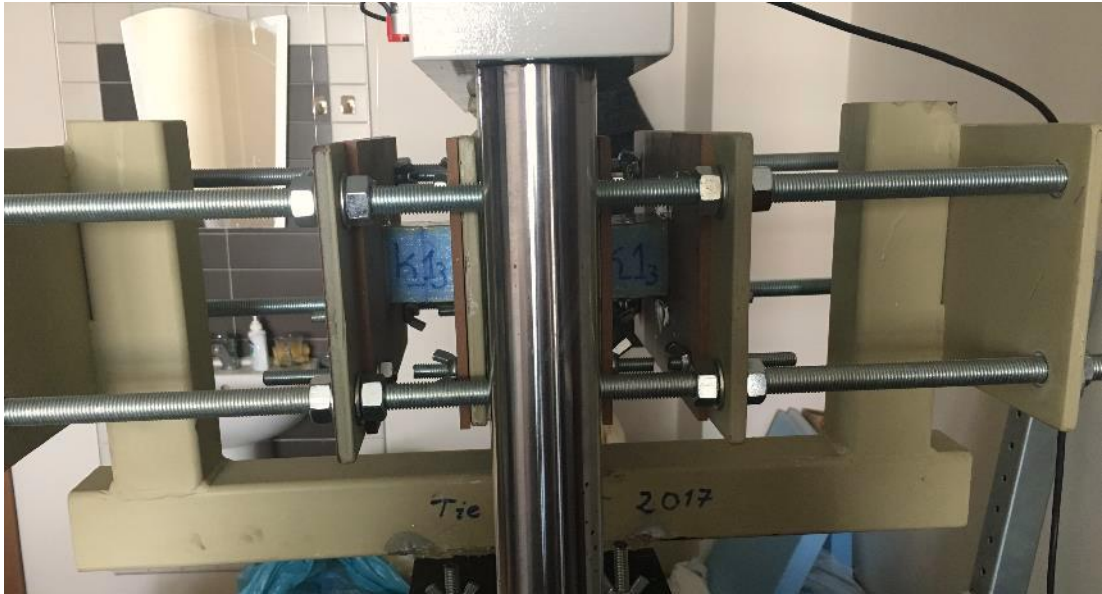
Sargın (2018) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan ÜRKT yöntemiyle ilgili yapılmış çalışma sonuçlarına benzer olarak, ÜRKT yönteminin küçük numuneler için elverişli olmadığını göstermiştir. İkincil gerilme etkilerinin en aza indirilmesi için standartlarda ve yapılan çalışmalarda belirtildiği

gibi ince uzun numunelerin kullanılması gerekmektedir. Ancak tez çalışmasının deneysel aşamasının yürütüldüğü laboratuvar koşullarının bu tür büyük numunelerin test edilmesine uygun olmaması nedeniyle, ayrıca numune üretiminin oldukça zor olduğu göz önünde bulundurularak, köpük çekirdek malzemesinin kayma parametrelerinin bulunması için numune güçlendirmesi çözümü düşünülmüştür.

### 3.5.2. Üç ray kayma testi numunelerinin eğilmeye karşı güçlendirilmesi

İkincil gerilme etkilerini en aza indirerek, saf kaymaya yakın gerilme dağılımı elde edilmesi amacıyla kayma numunelerinin güçlendirilmesi önerilmiş; ilgili deneyler bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla numune güçlendirilmesi alt ve üst yüzlere rijit çelik parçalar yapıştırılarak yapılmıştır

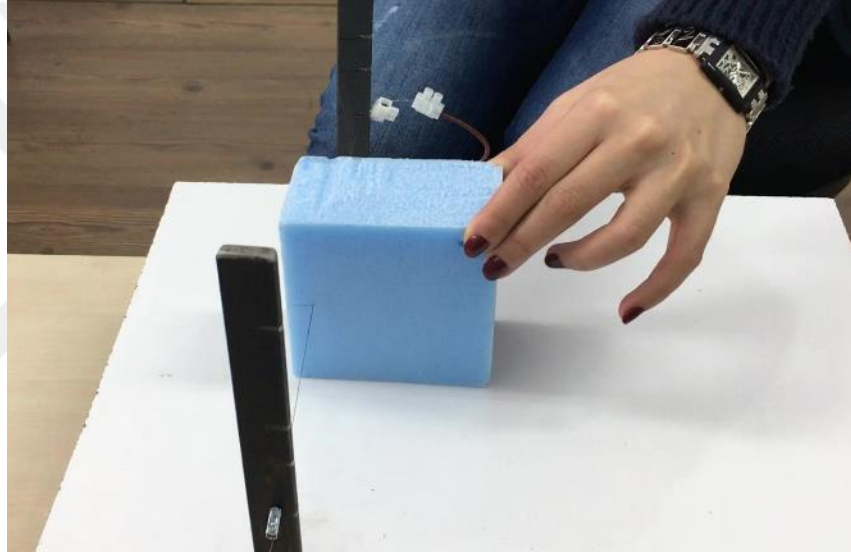
Kuvvetli (1-3) ve zayıf (2-3) düzlemlerde farklı kayma modülü ve kayma dayanımı değerlerine sahip olan XPS malzemesinin ilgili kayma modüllerinin ( $G_{13}$ ,  $G_{23}$ ) belirlenmesi aşamasında, her bir düzlem için üçer test ve ikişer numune olması gerektiğinden,  $3 \times 2 \times 2 = 12$  adet numune üretilmiş ve  $3 \times 2 = 6$  adet test yapılmıştır. Test düzeneğinin elektromekanik yükleme cihazının içine yerleşimini gösteren fotoğraf Şekil 3.17’de sunulmuştur.



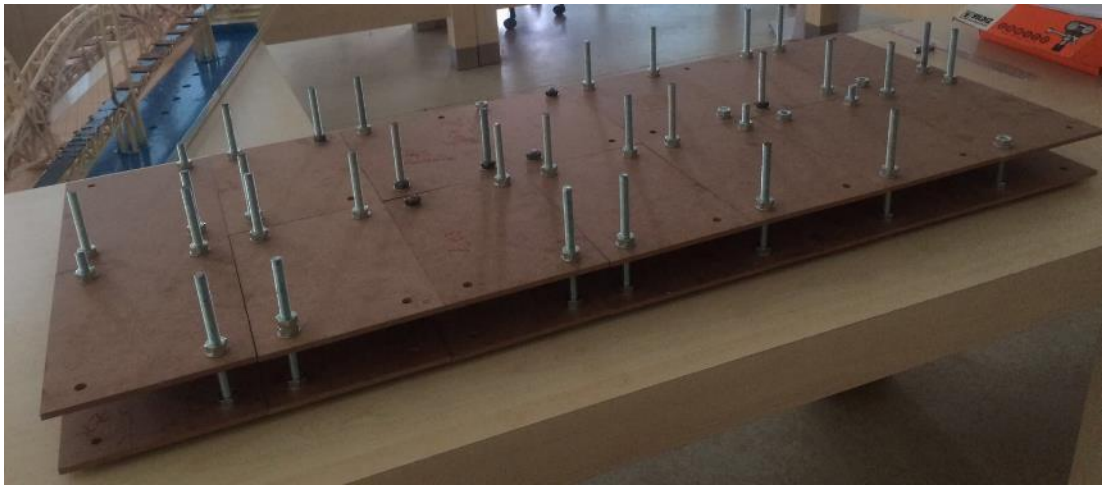
Şekil 3.17. Geliştirilmiş üç ray kayma testi düzeneği

Üç ray kayma testi numunelerin hazırlanırken ilk olarak 50mm kalınlığında polistren köpük (XPS) küpler her bir yükleme için ikişer numune olacak şekilde polistren köpük kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir (Şekil 3.18a). Daha sonra her bir küpün iki yanına, dört köşesinden delikler açılmış 6mm kalınlığında MDF plaklar, köpük malzemesini eritmeyecek nitelikte poliüretan yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır.

Yapıştırılan her bir numune kür alması için bırakılmadan önce MDF plaklardaki deliklerden geçirilen tijler yardımıyla sıkılarak sabitlenmiş; böylece numunelerin kür süresi boyunca, yapışması için belirlenen konumlarından kaymaları engellenmiştir (Şekil 3.18b)



(a)



(b)

Şekil 3.18. Numunelerin hazırlanması (a) ısl kesim işlemi (b) toplu üretilmiş numuneler

Toplu halde üretimi yapılan numuneler en az bir hafta kür almaları için beklendikten sonra numunelerin güçlendirilmesi işlemine geçilmiştir. Güçlendirme işlemi için ilk olarak, kayma numunelerinin alt ve üst yüzlerine 3mm kalınlığında MDF parçalar yapıştırılmasına karar verilmiştir. Ancak geliştirilmiş üç ray kayma deneyinin pilot testlerinde, elle üretim kusuru olarak bazı numunelerde MDF başlıkların, montaj için numune yanlarına yapıştırılmış MDF plakalara temas ettiği ve davranışı bozduğu görülmüştür. Bu nedenle MDF parçaların güçlendirme başlığı olarak kullanılmasından vazgeçilmiştir. Bunun yerine köpük çekirdeğe göre oldukça rijit olan ince galvanizli sac parçaların güçlendirme başlığı olarak kullanılmasını karar verilmiştir. Öncelikle sac levhalar tek parça halinde yapıştırılmış ancak köşelere temas etmesi problemi ortaya çıkmıştır. Bu problemin çözümü için numunenin orta noktasında eğilme momentinin sıfır olduğu göz önünde bulundurularak sac parçalar ortasından kesilerek 2.5mm'lik iki eşit parçaya bölünmüş (Şekil 3.19a) ve kürünü almış numunelerin alt-üst yüzlerine yapıştırılmıştır (Şekil 3.19b).



(a)



(b)

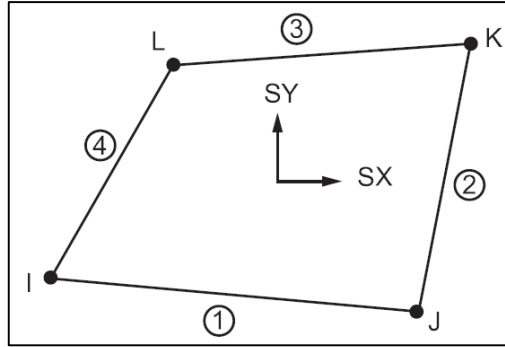
Şekil 3.19. (a) Güçlendirme parçası çiftleri (b) Güçlendirilmiş numuneler

Hazırlıkları tamamlanan numunelerin geliştirilmiş üç ray kayma testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında, geliştirilmiş üç ray kayma testin sayısal modelleri kurulmuştur.

### 3.6. Deney Numunelerinin Sayısal Modellenmesi

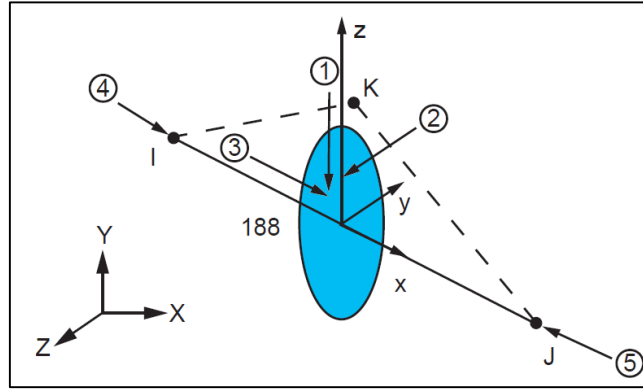
Tez çalışmasında yapılan sayısal analizlerde ANSYS 18.1 paket programı ve bu programın eleman kütüphanesinde yer alan PLANE182, BEAM188 eleman modelleri kullanılmıştır.

PLANE182 elemanı iki boyutlu katı modeller için kullanılmaktadır. Eleman düzlem gerilme ve düzlem gerinme elemanı olarak farklı uygulamalarda kullanım olanağı sağlamaktadır. Şekil 3.20’de geometrisi verilen eleman dört noktalı düzlem elemanı olarak tanımlanmıştır. Her bir düğüm noktasında  $x$  ve  $y$  doğrultuları olmak üzere iki serbestliği vardır. PLANE182 elemanı birçok malzeme modeliyle birlikte kullanılmaya elverişlidir (ANSYS, 2008). PLANE182 elemanı tezde yapısal sayısal modellerde, bir doğrultuda kabaran köpük çekirdeğin modellenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.20. PLANE182 elemanının geometrisi (ANSYS, 2008)

BEAM188 eleman modeli narin ve görece kalın kiriş elemanların modellenmesi için uygundur. Kiriş elemanı kayma etkilerini içeren *Timoshenko* kiriş teorisine dayanmaktadır (ANSYS, 2008). Eleman geometrisi ve düğüm noktaları tanımı Şekil 3.21’de sunulmuştur. BEAM 188 elemanı yapılan tüm sayısal modellerde, ince galvanizli sac yüz levhasının modellenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.21. BEAM188 elemanın geometrisi (ANSYS, 2008)

### 3.6.1. Batma deney numunelerinin sayısal modellenmesi

Batma problemi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların kıyaslanması amacıyla ANSYS 18.1 programı kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Üç gruba ayrılan deney numunelerine benzer şekilde üç ayrı batma numunesi modeli yapılmıştır. Oluşturulan modellerin doğrusal statik analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar deney sonuçlarının doğrusal kısmı ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarının tamamının temsil edilmesi için doğrusal olmayan analizlerin de yapılmasının gerektiği bilinmesinin yanı sıra daha karmaşık ve zaman alıcı olması nedeniyle doğrusal olmayan modeller çalışma kapsamına alınmamıştır.

İnce galvanizli sac yüzü batma numunelerinin analizleri iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.6'da anlatıldığı gibi köpük çekirdek için dört düğüm noktalı düzlem gerilme elemanı PLANE182, ince galvanizli sac için ise iki düğüm noktalı kiriş elemanı BEAM188 kullanılmıştır.

İki boyutlu problemde düzlemi oluşturan eksenlerden, yükleme doğrultusu  $y$  eksenine buna dik doğrultu  $x$  eksenine olarak seçilmiştir. Deney numunelerinden ilk iki gruptaki numunelerin zayıf doğrultuda, diğer numunelerin ise kuvvetli doğrultuda yüklendiği göz önünde bulundurulmuştur. Doğrusal analiz yapıldığından, malzeme modeli olarak program kütüphanesinde yer alan doğrusal elastik malzeme modelleri kullanılmıştır. Eksenlere göre mekanik özellikleri değişen köpük çekirdek malzemesinin davranışına benzer davranış elde edilebilmesi için çekirdek malzemesi

için doğrusal elastik ortotropik malzeme modeli seçilmiştir. Bunun yanı sıra, galvanizli sac için doğrusal elastik izotropik malzeme modeli kullanılmıştır.

Köpük çekirdek malzemenin mekanik özelliklerinden elastisite modülleri her üç eksen için yapılmış olan basınç testlerinden elde edilmiştir. Poisson oranı basınç testlerinde de bahsedildiği gibi her üç düzlem için eşit kabul edilmiştir (Gdoutos vd., 2002; Yoshihara vd., 2016). Kayma modülü değerleri ise üç nokta eğilme eğilme testlerinden elde edilen yer değiştirme değerlerini, tezde geliştirilen analitik ifade yerine yazılarak hesaplanmasıyla bulunmuştur. Kayma modüllerinin bulunması ve geliştirilen analitik ifade ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.3'te sunulmaktadır. Çizelge 3.3'te sayısal modeller oluşturulurken kullanılan mekanik özelliklerin değerleri sunulmuştur.

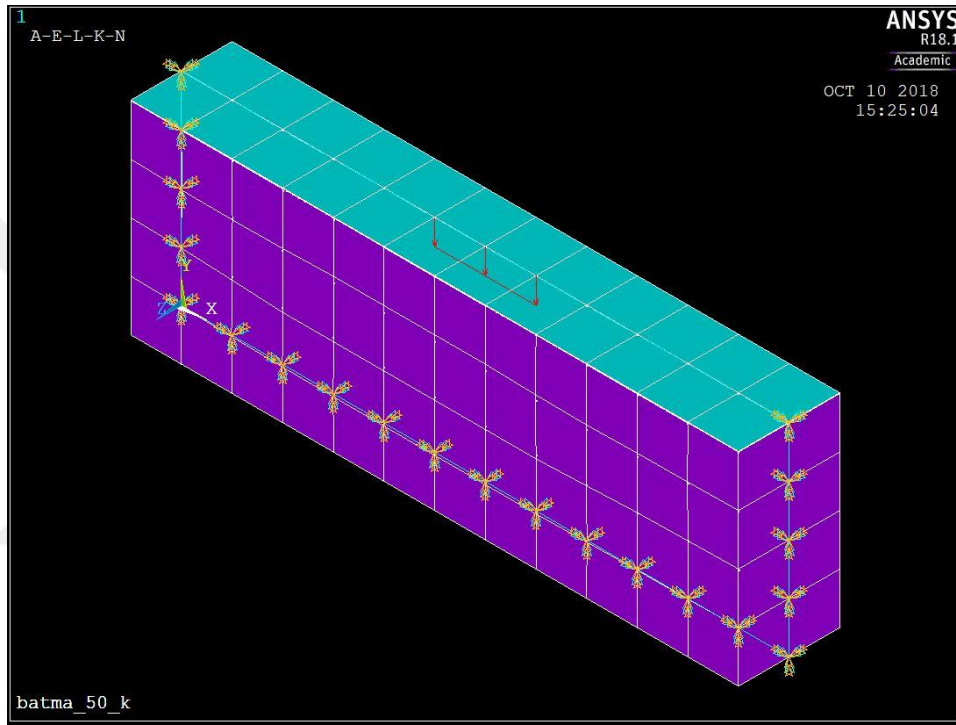
Çizelge 3.3. Batma deneyi numunelerinin sayısal modellerinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

| Malzeme        | Mekanik Özellik                | Değer |
|----------------|--------------------------------|-------|
| XPS            | $E_1$ (MPa)                    | 7.02  |
|                | $E_2$ (MPa)                    | 2.97  |
|                | $E_3$ (MPa)                    | 5.15  |
|                | $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ | 0.35  |
|                | $G_{13}$ (MPa)                 | 5.88  |
|                | $G_{32}$ (MPa)                 | 3.97  |
|                | $G_{12}$ (MPa)                 | 4.90  |
| Galvanizli Sac | $E$ (GPa)                      | 200   |
|                | $\nu$                          | 0.3   |

Eleman ve malzeme modelleri belirlendikten sonra geometrik özellikler ile basma parçası boyu değiştirilerek üç ayrı batma numunesi modeli yapılmıştır. Her bir modelin bölüntülenmesinde (meshleme) karmaşık olmayan düzgün geometriye sahip bölüntüler elde edilmesi amacıyla basit bir bölüntüleme işlemi yapılmıştır. Mesnet şartları alt yüzünden ve her iki ucundan ankastre mesnetli olarak modellenmiştir. Daha sonra BEAM188 kiriş elemanına deney numunelerinde kullanılan basma

parçası boyunca yayılı basınç yükleri uygulanmış ve statik analizler yapılarak en büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

Şekil 3.22’de batma deneylerinin analizi için oluşturulan sayısal modelin yükleme öncesi hali gösterilmektedir. Her bir numune grubu için ayrı model yapılmış olmakla birlikte ancak tüm deneylerde Şekil 3.22’de gösterilen benzer eleman yerleşimi ve sınır şartları uygulanmıştır.



Şekil 3.22. Batma deneylerinin sayısal modeli

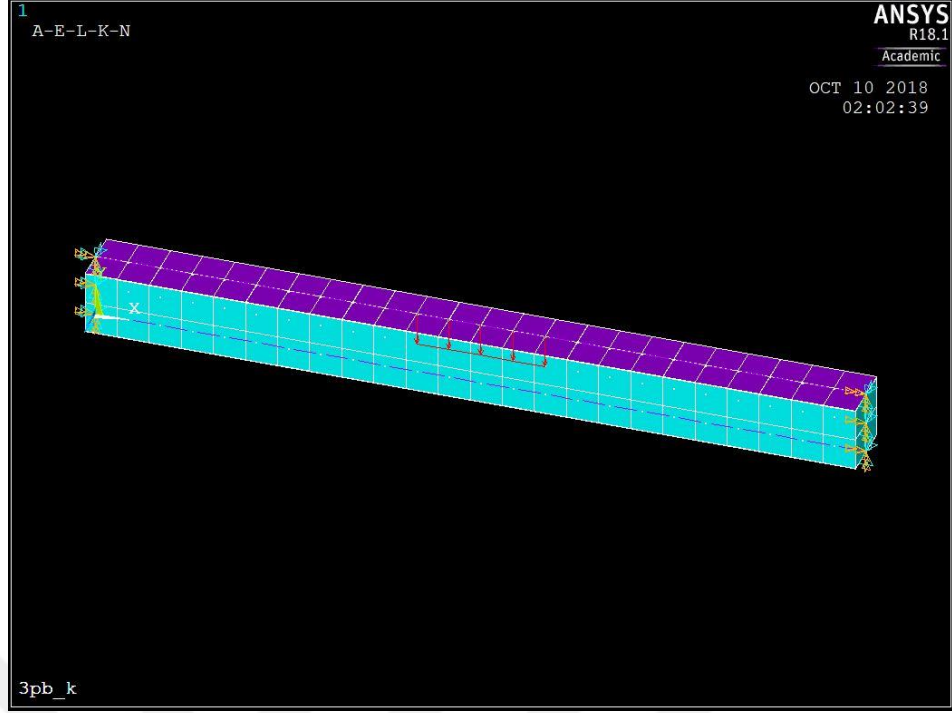
### 3.6.2. Üç nokta eğilme deney numunelerinin sayısal modellenmesi

Üç nokta eğilme testleri gerçekleştirildikten sonra, deney sonuçlarının karşılaştırmalı şekilde yorumlanması amacıyla ANSYS programı kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modeller, deney numunelerinde olduğu gibi iki ayrı grupta incelenmiştir. Kirişlerin yükleme doğrultularına bağlı olarak sayısal modellerde, malzemeyi tanımlayan mekanik özelliklerin değerli değiştirilmiştir. Üç nokta eğilme deney numunelerinin sayısal modellerindeki malzemelerin mekanik özellikleri, batma deney numunelerinin sayısal modellerinde kullanılan mekanik özelliklere (Çizelge 3.3) eşit alınmıştır.

Sayısal modellerde köpük çekirdek için iki boyutlu düzlem gerilme elemanı olan PLANE182 elemanı kullanılmıştır. Eleman seçildikten sonra özelliklerine, kalınlık fonksiyonu eklenerek numunelerin kalınlıkları da modele eklenmiştir. Kirişlerin alt ve üst yüzlerine yapıştırılmış ince galvanizli sacı temsil etmek için ise BEAM188 elemanı kullanılmıştır. Eleman modelleri seçildikten sonra malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Doğrusal analiz yapıldığından, bu analiz tipine uygun malzeme modellerinden ortotropik (köpük çekirdek) ve izotropik (galvanizli sac) malzeme modelleri seçilmiştir.

Eleman ve malzeme özelliklerinin tanımlanmasından sonra, geometrinin oluşturulması için ikincil düğüm noktaları (keypoint) tanımlanmıştır. İkincil düğüm noktaları yalnızca geometrinin oluşturulması için yardım noktalar olarak tanımlanmaktadır. Yani düğüm noktası (node) tanımından farklı olarak bu noktaların sınır şartlarını temsil eden serbestlikleri yoktur. İkincil düğüm noktalarıyla sınırları oluşturulan geometri sırasıyla çizgi ve alan tanımları yapılarak deney numunesi geometrisi oluşturulmuştur.

Modelin alan olarak tanımlanmış bölümü, sonlu elemanlar yöntemi gereğince parçalara bölünmüştür. Bölüntüleme (meshleme) işlemi sırasında, daha önce belirlenmiş eleman ve malzeme modelleri, alan ve çizgi olarak oluşturulmuş ilgili geometrilere atanarak sayısal model oluşturulmuştur. Son olarak sınır şartları basit kiriş sınır şartlarını temsil edecek şekilde bir ucundan basit mesnetli diğer ucundan kayısı mesnetli olarak tanımlanmıştır. Basma parçası boyu uzunluğuna etki ettirilen düzgün yayılı yük uygulanarak yükleme gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğilme testi için oluşturulan tipik sayısal bir model Şekil 3.23'te sunulmuştur.



Şekil 3.23. Üç nokta eğilme testi numunesinin sayısal modeli

Şekil 3.23'te sayısal modeli gösterilen kuvvetli doğrultuda yüklenmiş numunenin, deney öncesi görüntüsü Şekil 3.24'te sunulmuştur. Şekilde kiriş uçlarına yerleştirilen mesnetlerin detayları görülmektedir.



Şekil 3.24. Üç nokta eğilme testi numunesinin mesnet ve yüklenme detayı

### 3.6.3. Üç ray kayma deney numunelerinin sayısal modellenmesi

Üç ray kayma deneyler gerçekleştirildikten sonra, deney sonuçları ile karşılaştırma yapılması amacıyla üç ray kayma deney numunelerinin sayısal modelleri kurulmuştur.

Sayısal modellerde köpük çekirdek için önceki modellere benzer şekilde PLANE182 düzlem gerilme eleman modeli kullanılmıştır. Güçlendirilmiş numunelerin güçlendirme başlığı olan galvanizli sac plakalar ise kiriş elemanı olarak düşünülmüş ve BEAM188 eleman modeli ile temsil edilmiştir.

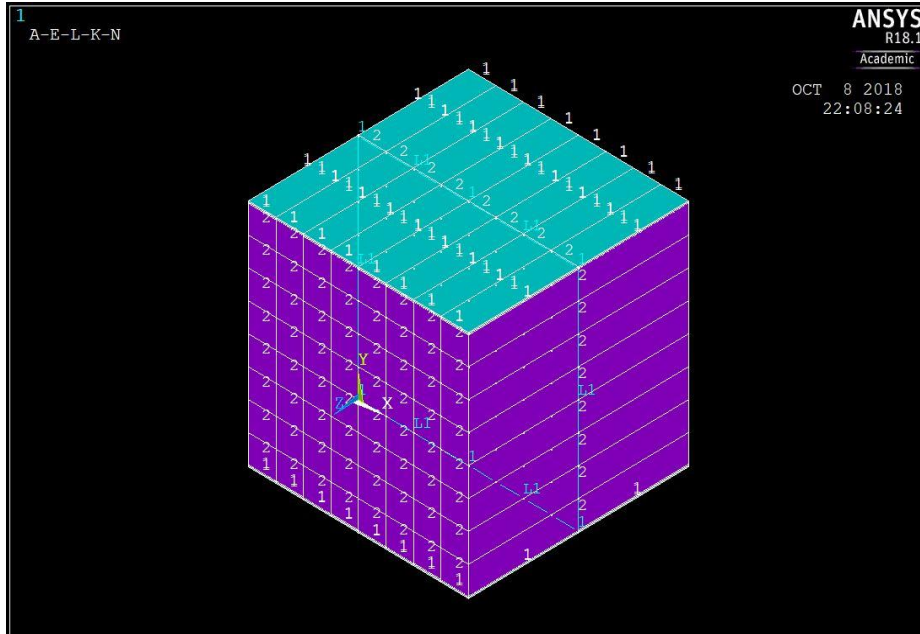
Üç ray kayma deneyi numunelerinin tanımlanmasında, önceki modellere benzer malzeme modelleri seçilmiştir. Ancak köpük çekirdeğin kayma modülü tanımlanırken, güçlendirilmiş numune deneylerinden elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan kayma modülü değerleri kullanılmıştır. Üç ray kayma deneyi numunelerinin sayısal modellerinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Üç ray kayma deneyi numunelerinin sayısal modellerinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

| Malzeme        | Mekanik Özellik                | Değer |
|----------------|--------------------------------|-------|
| XPS            | $E_1$ (MPa)                    | 7.02  |
|                | $E_2$ (MPa)                    | 2.97  |
|                | $E_3$ (MPa)                    | 5.15  |
|                | $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ | 0.35  |
|                | $G_{13}$ (MPa)                 | 4.32  |
|                | $G_{32}$ (MPa)                 | 3.31  |
|                | $G_{12}$ (MPa)                 | 3.82  |
| Galvanizli Sac | $E$ (GPa)                      | 200   |
|                | $\nu$                          | 0.3   |

Sayısal modellerin sınır şartları tanımlanırken, yürütülen deneylerin sınır şartları göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre sayısal modellerde; kayma numunelerinin, üç ray kayma testi düzeneğindeki yükleme bloğu tarafından yüzlerinden düşey doğrultuda yer değiştirdiği, ancak diğer yüzlerinden düzener levhalarına rijit yapıştırıldığı bilindiğinden, bir yüzünden tüm serbestliklerde tutulu, diğer yüzünden ise sadece y doğrultusunda serbest olacak şekilde sınır şartları tanımlanmıştır. Sınır şartlarının tanımlanmasından sonra yükleme aşamasına geçilmiştir ve y doğrultusunda serbest olan yüze -y yönünde kesme kuvveti uygulanmıştır. Yükler uygulanırken, deneylerdeki yük değerlerinin yarısı alınmıştır. Bunun nedeni, üç ray kayma testinin çiftli kayma durumu olduğu bilindiğinden, her bir numuneye  $P_{\Sigma}$  değerinin yarısının etki etmesidir.

Modelleme aşamaları kuvvetli ve zayıf eksenlerinden yüklenen numuneler için benzer şekilde yapıldığından, her iki test grubunu temsil eden sonlu elemanlar görüntüsü Şekil 3.25'te sunulmuştur. Görüntüde verilen numaralandırmalar eleman numaralarını temsil etmektedir.



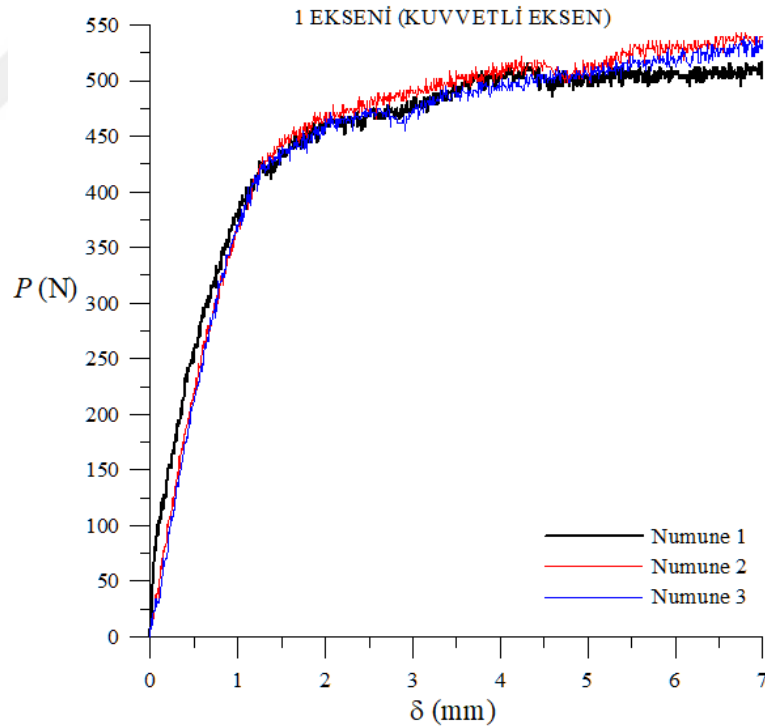
Şekil 3.25. Üç ray kayma testi sayısal modelinin genel görünümü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

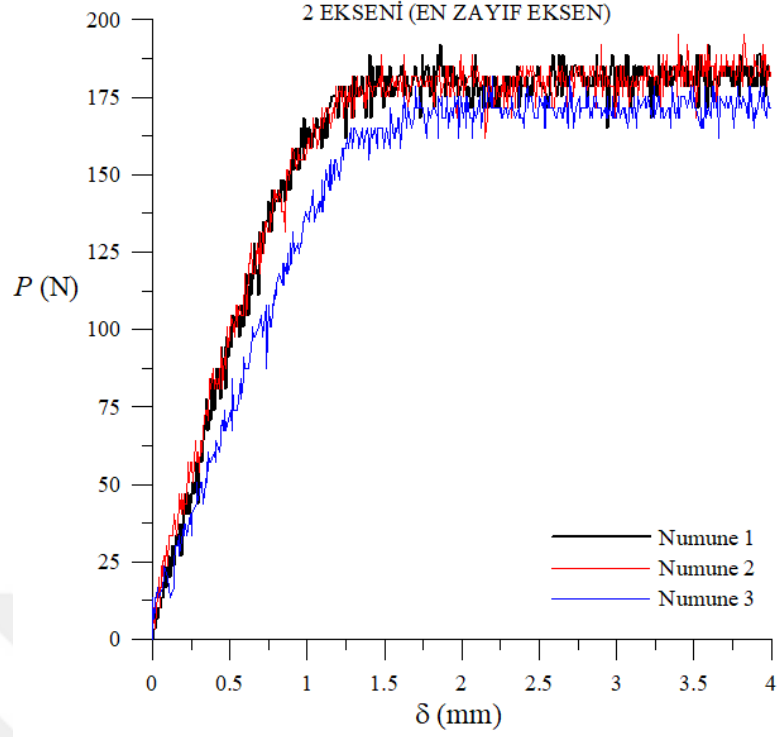
Bu bölümde tez çalışmasının temel amacı olan köpük çekirdek kayma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Deneylelerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak deney elemanlarının ANSYS programı kullanılarak sayısal modelleri oluşturulmuş; sayısal yöntemden elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

##### 4.1. Köpük Çekirdeğin Basınç Deneyleleri Sonuçları

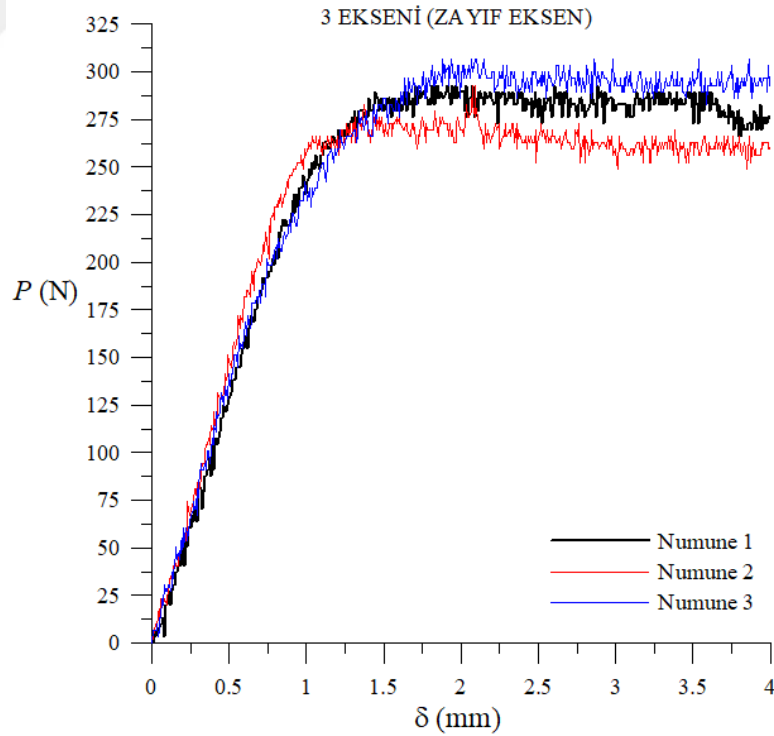
Basınç deneyleleri her üç asal eksen için üçer numune test edilerek gerçekleştirilmiştir. Basınç deneylelerinden elde edilen yük-yer değıştirme grafikleri köpük malzemenin üç asal eksenini için Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.1. Basınç testi yük-yer değıştirme sonuçları, 1 ekseninde yükleme



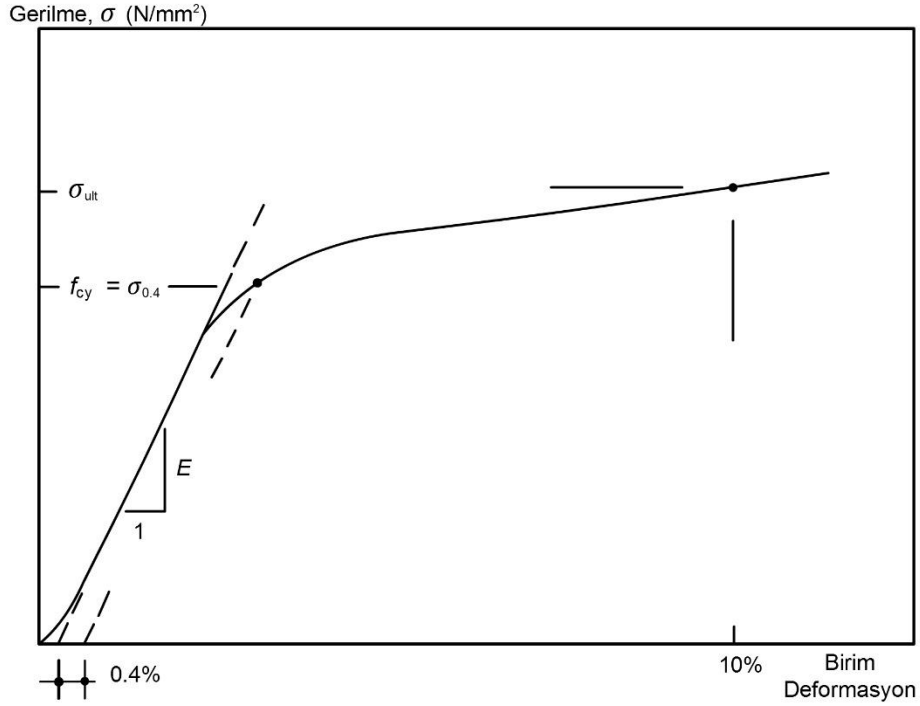
Şekil 4.2. Basınç testi yük-yer değiştirme sonuçları, 2 ekseninde yükleme



Şekil 4.3. Basınç testi yük-yer değiştirme sonuçları, 3 ekseninde yükleme

Yük, yer değiştirme değerleri bilinen sert plastik köpüklerin tipik gerilme-birim deformasyon eğrisi Şekil 4.4'te verilmiştir. Sert plastik köpüklerin basınç ve kayma

deneyleri yapılırken kopma olmaksızın önemli ölçüde doğrusal olmayan davranış sergiledikleri görülmektedir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi %0.4'lük kalıcı deformasyona karşılık gelen basınç gerilmesi 'akma gerilmesi', EN 826'da da belirtildiği gibi %10 luk birim deformasyona karşılık gelen basınç gerilmesi ise 'basınç dayanımı' olarak tanımlanmaktadır (Davies, 2001).



Şekil 4.4. Rijit plastik köpüklerin tipik gerilme-birim deformasyon eğrisi (Davies, 2001)

Yük yer değiştirme grafikleri elde edilen köpük çekirdeğinin her üç asal eksen için elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri literatür bilgileri ve EN 826 (2013) standardında verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır. EN 826 (2013) da elastisite modülünün hesabı için,

$$E = \sigma_e \frac{d_0}{X_e} \quad (4.1)$$

eşitliği verilmiştir. Burada  $\sigma_e$ : elastik basınç gerilmesi,  $d_0$ : numunenin deforme olmadan önceki kalınlığı,  $X_e$  ise elastik basınç gerilmesine karşılık gelen yer

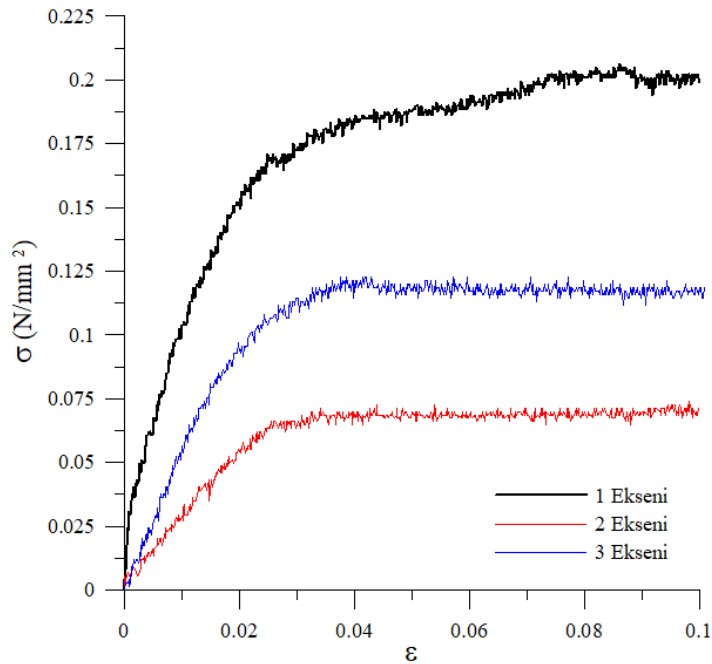
değiştirme olarak tanımlanmaktadır. EN 826 (2013) da verilen tanımlamada, numunenin elastik davranıştan ayrıldığı andaki elastik basınç yükü  $F_e$  olmak üzere, elastik basınç gerilmesi;

$$\sigma_e = 10^3 \frac{F_e}{A_0} \quad (4.2)$$

olarak kPa cinsinden hesaplanmaktadır. Burada  $A_0$ : numunenin başlangıçtaki kesit alanıdır ve birimi  $\text{mm}^2$  cinsindedir. Numunenin %10 birim deformasyon değerindeki basınç gerilmesi olarak tanımlanan basınç dayanımı,

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0} \quad (4.3)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada  $F_{10}$ : %10 birim deformasyona göre basınç yüküdür ve birimi Newton'dur. EN 826'da verilen formüller kullanılarak her bir deney numunesinin yük-yer değiştirme değerlerinden, gerilme-birim deformasyon değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.5'te her bir eksen için birer deney numunesi seçilerek tipik gerilme birim deformasyon eğrileri sunulmuştur.



Şekil 4.5. Tipik gerilme-birim deformasyon eğrisi

Numunelerin mekanik özellikleri, gerilme-birim deformasyon eğrilerinin doğrusal elastik bölgesi kullanılarak belirlenmiştir. Bu doğrusal bölge belirlenirken, yüklemenin başında yükleme başlığı ve numunenin tam temas etmesine kadar geçen sürede kaydedilen anlamsız veriler dikkate alınmamıştır. Buna göre, her bir numune için oluşturulan doğrusal grafiklerde birim deformasyonun 0.001~0.02 olduğu aralık kullanılmıştır. Daha sonra belirlenen bu aralıktaki değerler dikkate alınarak Denklem 4.1'deki eşitlik hesaplanarak aranan elastisite modülleri elde edilmiştir. her bir asal eksen için üçer numune test edildiğinden hesaplanan elastisite modülü değerlerinin ortalaması alınarak, asal eksenin elastisite modülü değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Basınç deneyi numunelerinin her bir eksen için elastisite modülleri

| <b>Numunelerin elastisite modülü</b> | <b>1 eksen</b> | <b>2 eksen</b> | <b>3 eksen</b> |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| $E_{1.Numune}$ (MPa)                 | 6.33           | 3.28           | 5.16           |
| $E_{2.Numune}$ (MPa)                 | 7.16           | 3.04           | 5.43           |
| $E_{3.Numune}$ (MPa)                 | 7.56           | 2.60           | 4.86           |
| <b><math>E_{ort}</math> (MPa)</b>    | <b>7.02</b>    | <b>2.97</b>    | <b>5.15</b>    |

Basınç dayanımı değerleri ise benzer şekilde her asal eksen için test edilen üç numunenin %10 birim defromasyona karşılık gelen basınç gerilmesi değerlerinin ortalaması alınarak, ortalama basınç dayanımları bulunmuştur. Basınç dayanımı değerleri her asal eksen için test edilen üç numunenin gerilme-birim deformasyon eğrilerinde birbirine çok yakın değerler olduğu görüldüğünden, her bir numune için değerler ayrı ayrı sunulmamıştır. Bunun yerine, tezde yapılan basınç deneylerinden hesaplanan mekanik özellikleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. XPS malzemesinin mekanik özellikleri.

| Tanım  | Değer |
|--|-------|
| Yoğunluk ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )                  | 30.00 |
| Elastisite modülü 1 doğrultusu ( $E_1$ , MPa)            | 7.02  |
| Elastisite modülü 2 doğrultusu ( $E_2$ , MPa)            | 2.97  |
| Elastisite modülü 3 doğrultusu ( $E_3$ , MPa)            | 5.15  |
| 1 doğrultusundaki basınç dayanımı ( $\sigma_{c1}$ , kPa) | 200   |
| 2 doğrultusundaki basınç dayanımı ( $\sigma_{c2}$ , kPa) | 71    |
| 3 doğrultusundaki basınç dayanımı ( $\sigma_{c3}$ , kPa) | 110   |

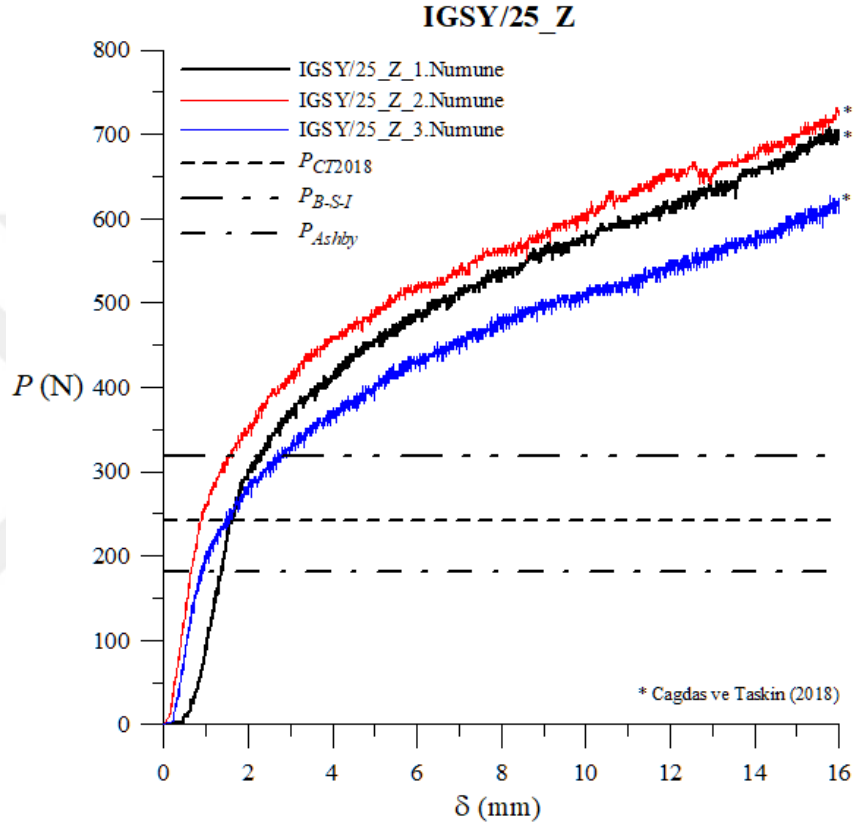
Çalışmada, hücresel yapıdaki rijit plastik köpüklerin hücre şekli, hücre duvarı boyutu, hücre duvarı sayısı gibi özellikleri mikro mekanik alanın konusu olduğundan, hücre yapısı detayları dikkate alınmadan, deneylerle mekanik özellikleri belirlenmiştir. Malzemenin mekanik özelliklerinden Poisson oranının bulunması için de basınç deneyleri yapılmış basınç etkisi altında oluşan enine ve boyuna deformasyonlar fotoğraf kareleme yöntemi kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak yapılan denemeler sonucu hücresel yapıya sahip köpük malzemenin Poisson oranının belirlenmesinin oldukça zor olduğu görülmüştür. Bu nedenle hücresel köpük malzemeler ile ilgili önceki çalışmalardan faydalanarak, bu çalışmalarda belirtilen değerler kullanılmıştır. Buna göre her üç eksen için Poisson oranı  $\nu=0,35$  olarak alınmıştır (Gdoutos vd., 2002; Yoshihara vd., 2016).

#### 4.2. Batma Deneyi Sonuçları

Sac yüzü köpük çekirdekli 9 adet sandviç kiriş için yürütülen batma deneyleri sonuçları yük ve yer değiştirme değerleri okunarak elde edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, hem literatürde bulunan Bölüm 3'te özetlenmiş batma yükü ifadeleriyle, hem de ANSYS 18.1 programı kullanılarak yapısal sayısal modellerin doğrusal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

#### 4.2.1. Batma deneyi sonuçlarının literatürdeki analitik ifadelerle karşılaştırılması

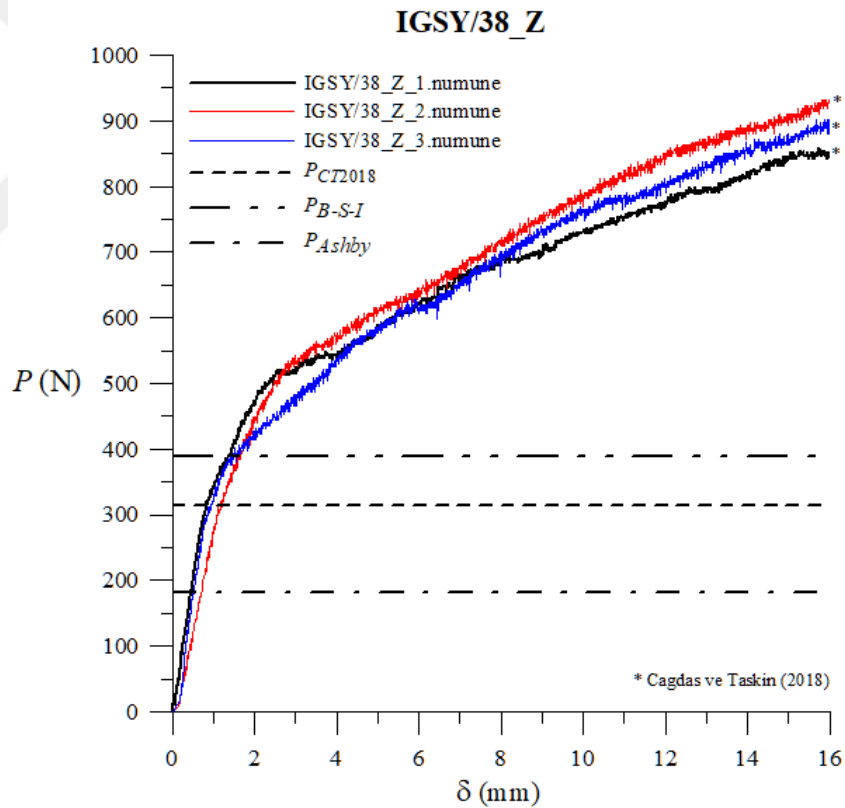
Yapılan batma deneyleri sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri sırasıyla, IGSY/25\_Z numuneleri için Şekil 4.6'da, IGSY/38\_Z numuneleri için Şekil 4.7'de ve IGSY/50\_K numuneleri için Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.6. IGSY/25\_Z numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.6'da basma parçası boyu 25mm olan ve köpük çekirdeğin zayıf doğrultusunda (3 eksen) yüklenmiş batma deneyi numunesinin yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Verilen yük-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde 3. numunenin diğer iki numuneye göre daha önce rijitliğini kaybettiği, ancak diğer iki numunenin yaklaşık olarak  $P_{deney}=250\sim300N$  değerine kadar rijitliğini koruduğu görülmektedir. Her üç numunenin de batmanın artmasıyla, köpük çekirdekte oluşan ezilme nedeniyle yük taşımaya devam ettiği ancak ikinci bölgede daha düşük rijitliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Literatürde verilen analitik ifadelerden elde edilen sonuçlara göre Ashby vd. (2000) tarafından önerilen ve basma parçası boyunun dikkate alınmadığı ifadeden batma yükü  $P_{Ashby}=181.66N$  olarak bulunmuştur. Buna karşın Barth-Smith vd. (2001) tarafından önerilen eşitlikten batma yükü  $P_{B-S-I}=319.2N$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar dikkate alındığında, basma parçası boyu parametresini içeren eşitlikten elde edilen batma yükü değerinin deney sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Ancak,  $P_{B-S-I}$  değerinin deney sonuçlarına yakın olmakla birlikte deneyden elde edilen batma yükünden büyük olduğu, buna karşın Cagdas ve Taskin (2018) tarafından önerilen eşitlikten elde edilen batma yükü değerinin  $P_{CT2018}=242.4N$  olduğu ve deney sonuçlarının altında kaldığı görülmüştür. Cagdas ve Taskin (2018) tarafından geliştirilen ve deney sonuçlarının altında kalan  $P_{CT2018}$  değerinin güvenli tarafta kalarak deneysel sonuçlara alt limit oluşturduğu söylenebilir.

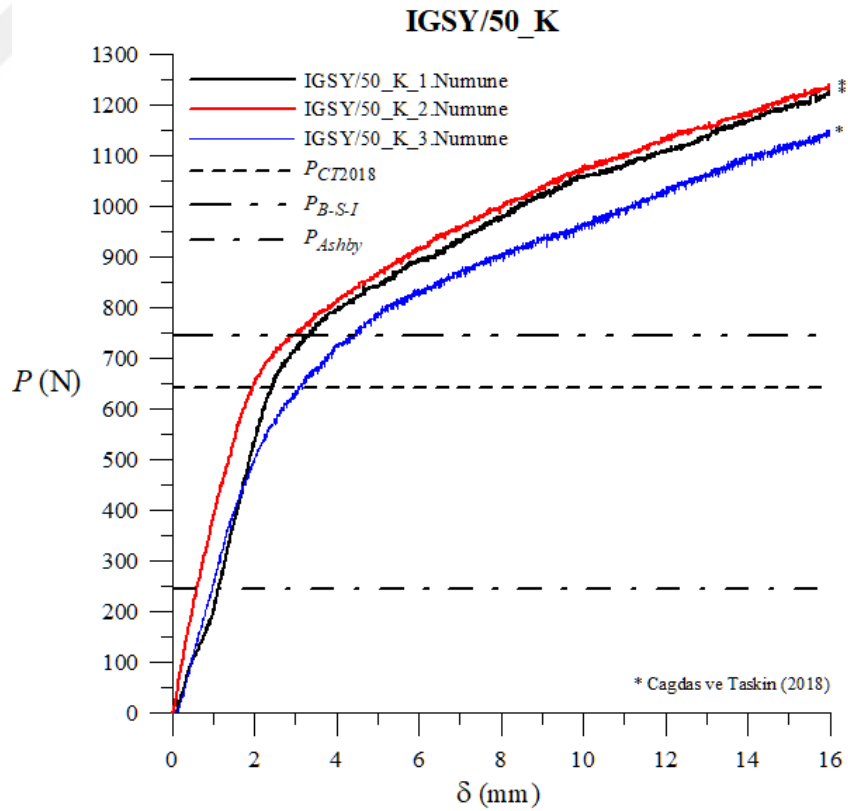


Şekil 4.7. IGSY/38\_Z numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.7’de basma parçası boyu 38mm olan ve zayıf doğrultuda (3 eksen) yüklenmiş 3 adet batma deney numunesinin yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde  $\delta_m=2mm$  değerine kadar yük-yer değiştirme

değerlerinin doğrusal arttığı bu değerden sonra batma deformasyonlarının artmasıyla rijitlik kaybı olduğu gözlemlenmektedir. Numunelerin yaklaşık  $P_{deney}=400N$  değerinden sonra rijitliklerinin azalmaya başladığı görülmektedir. Bu değerden sonra numunelerin batma parçası altında kalan bölgede çekirdeklerinin ezildiği ve parçanın uçlarından mesnetlere doğru gidildikçe, yüz levhasının eğilmesi ve çekirdek ezilmesi deformasyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. Deney, köpük çekirdek malzemesinde meydana gelen hücre duvarlarının ezilmesi sonucu basma parçası altında köpük çekirdeğin sıkışması durumu dikkate alınarak  $\delta_m=16mm$ 'de sonlandırılmıştır

Deneysel sonuçları ile karşılaştırılmak üzere hesaplanan analitik değerlerden en düşüğü  $P_{Ashby}=181.66N$  olarak bulunmuştur. Basma parçası boyunun dikkate alınmadığı Ashby vd. (2000) tarafından önerilen eşitlikten elde edilen batma yükü değeri beklenildiği gibi, basma parçası boyu 25mm olan IGSY/25\_Z numunesi için hesaplanan batma yükü değeriyle eşit bulunmuştur.  $P_{B-S-I} =390.66N$  olarak hesaplanmış, ön batma yükü  $P_{CT2018} =313.89N$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. IGSY/50\_K numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.8’de basma parçası boyu 50mm olan ve kuvvetli doğrultuda (1 eksen) yüklenmiş batma deney numunelerinin yük-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde,  $\delta_m=2\text{mm}$  değerine kadar yük-yer değiştirme değerlerinin doğrusal arttığı bu değerden sonra batma deformasyonlarının artmasıyla rijitlik kaybı olduğu gözlemlenmektedir. Rijitlik azalmasının başladığı batma yükü değerinin yaklaşık olarak  $P_{\text{deney}}=650\sim 700\text{N}$ ’dur. Bu değerden sonra yüklemeye devam edildikçe çekirdekte meydana gelen hücre duvarı ezilmelerinin başlık parçası altından mafsallara doğru arttığı gözlemlenmiştir.

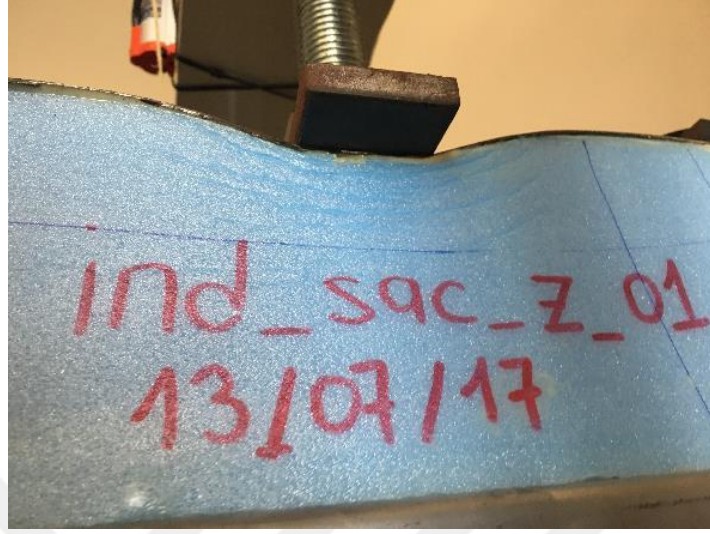
Deneysel sonuçlara ek olarak analitik ifadelerden,  $P_{\text{Ashby}}=244.95\text{N}$ ,  $P_{\text{B-S-I}}=744.95\text{N}$  olarak hesaplanmış, buna karşılık ön batma yükü  $P_{\text{CT2018}}=641.42\text{N}$  olarak bulunmuştur. Basma parçası boyunun dikkate alınmadığı batma yükü değerlerinin, tüm batma deneylerinde olduğu gibi, bu deney grubunda da deney sonuçlardan elde edilen batma yükü değerinin çok altında kaldığı görülmektedir.

Batma problemi ile ilgili yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar analitik ifadelerle karşılaştırıldığında Cagdas ve Taskin (2018) tarafından sunulmuş ifadenin yükü değerinin tüm deneylerde alt sınır değeri verdiği görülmüştür.

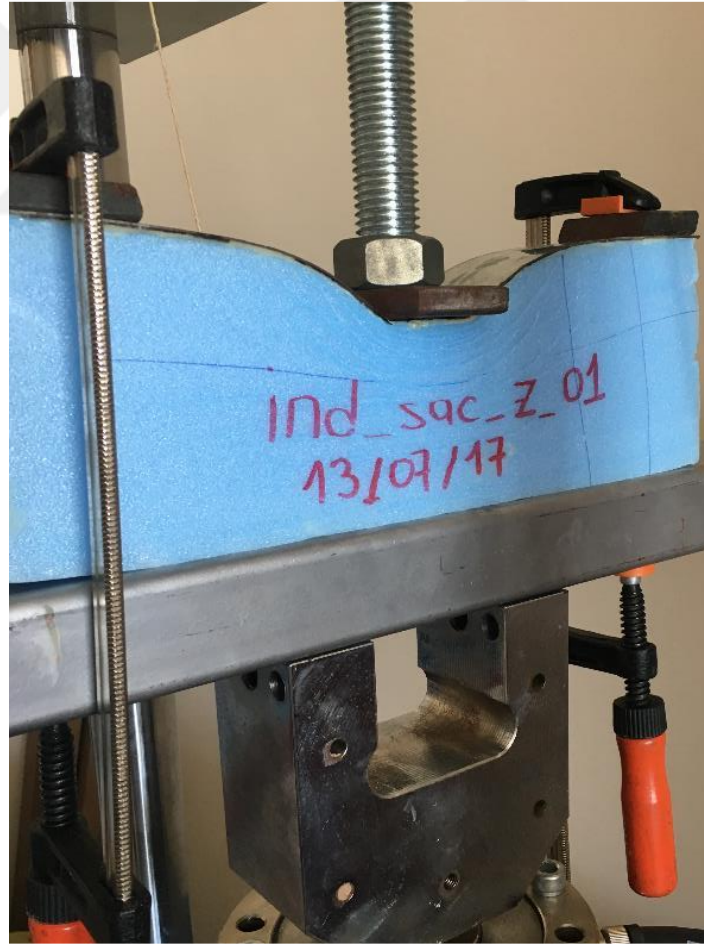
Yapılan batma deneyleri neticesinde, literatürde bulunan 3 farklı analitik ifadenin farklı değerler verdiği, basma parçası boyunun, batma yükü değerinin hesaplanmasında dikkate alınmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Basma parçası boyu ve yükleme doğrultusu değiştirilerek yürütülen batma deneylerinin tümü  $\delta_m=16\text{mm}$  yer değiştirme değerine kadar sürdürülmüş ve grafik olarak sunulmuştur. Aynı yer değiştirmeye sahip ancak farklı geometrik özellikteki üç ayrı deney grubundan, yükleme doğrultusu aynı olan IGSY/25\_Z VE IGSY/38\_Z batma deneyi numuneleri test sonuçları karşılaştırıldığında: batma yükü değerlerinin beklendiği gibi, basma parçası boyu arttığında arttığı görülmektedir. IGSY/50\_K numuneleri için, hem yükleme doğrultusu hem de basma parçası boyu aynı anda değiştiğinden, iki parametrenin de etkisiyle basma yükü değerinin oldukça büyük değerlere ulaştığı söylenebilir.

Yürütülen deneylerde, batma numunelerinin benzer göçme moduna sahip olması göz önünde bulundurularak, numunenin deney sırasındaki ve deney sonrasındaki deforme

olmuş geometrisi IGSY/38\_Z batma numunelerinden biri seçilerek Şekil 4.9'da sunulmuştur.



(a)

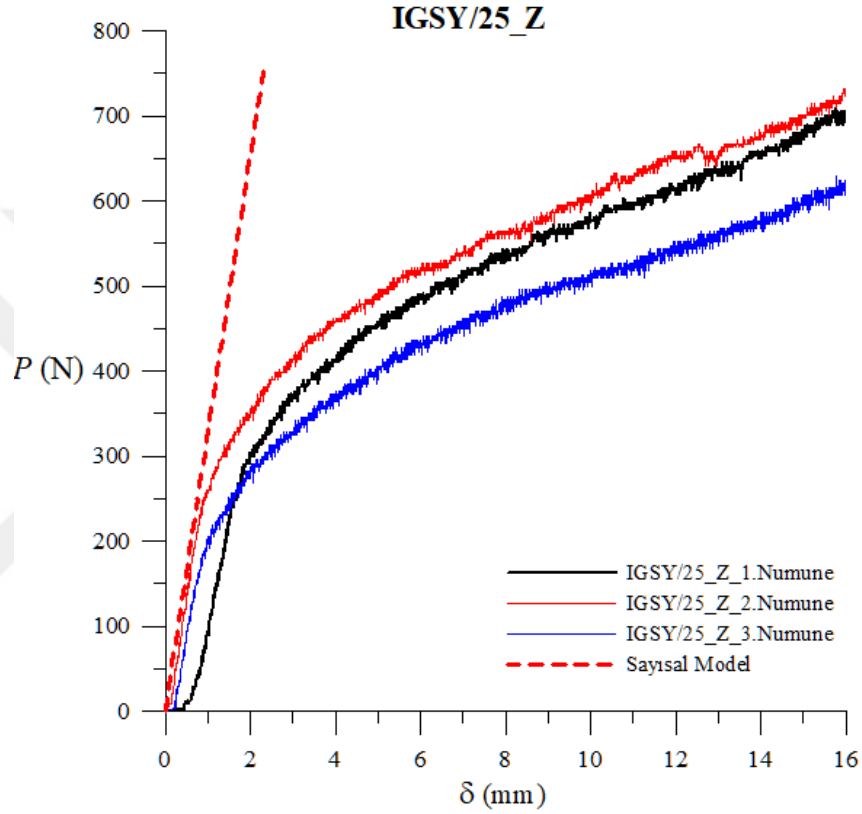


(b)

Şekil 4.9. IGSY/38\_Z numunesinin (a) yükleme sırasında yakından (b) deney sonrası görüntüsü

#### 4.2.2. Batma deneyi ve sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

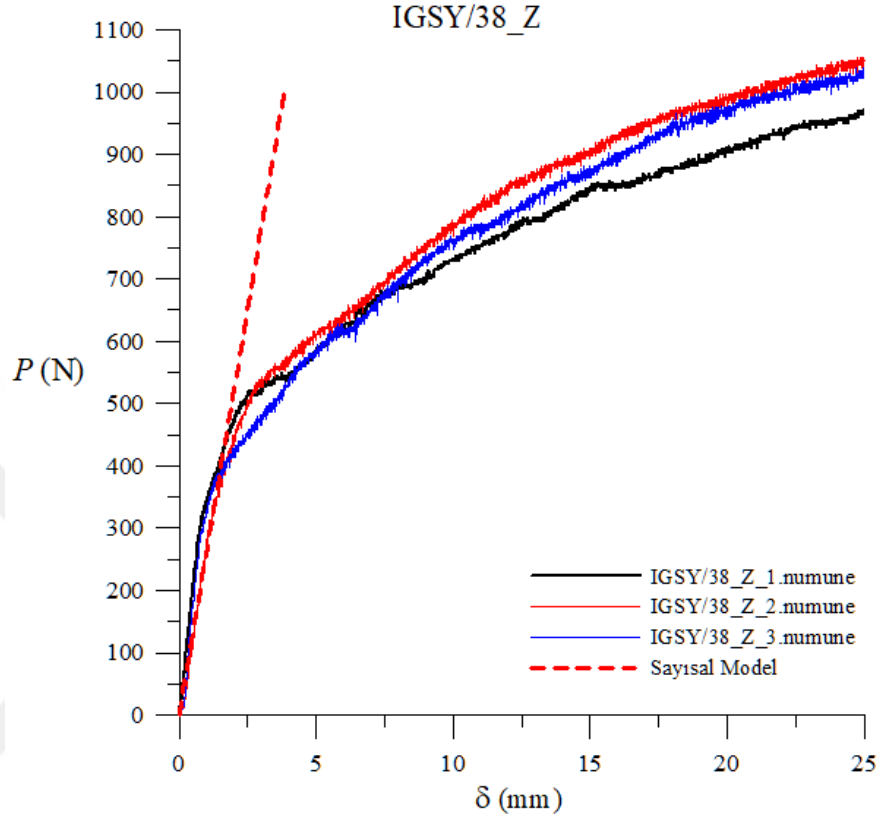
Bölüm 3'te sayısal modelleme aşamaları detaylı olarak verilmiş batma numunelerinin sayısal modellerinin doğrusal analiz sonuçları yük-yer değiştirme değerleri cinsinden elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.10. IGSY/25\_Z numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları

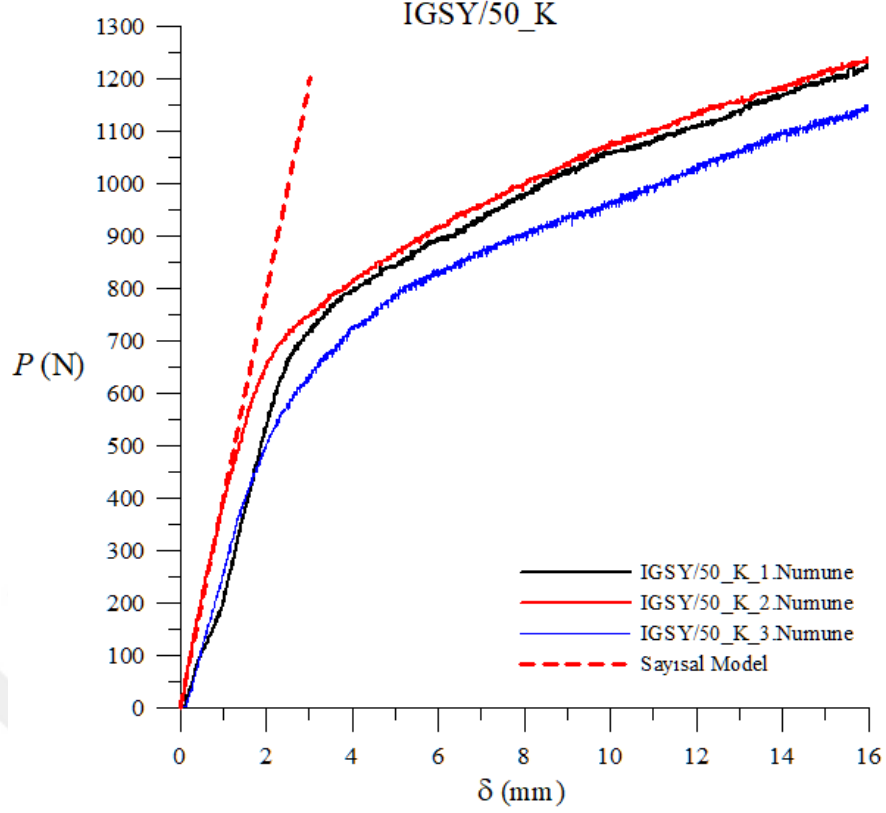
Şekil 4.10'da basma parçası boyu 25mm ve yükleme doğrultusu 3 eksenli olan batma numunelerinin deneysel ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Buna göre, 2. ve 3. numuneler ile sayısal modelden elde edilen sonuçların doğrusal bölgede oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak 1 numaralı numunenin doğrusal bölgede sayısal model sonuçlarıyla uyumlu olmadığı bununla birlikte doğruların birbirine paralel olduğu görülmektedir. Numune ile sayısal model arasında oluşan farklılığın yüklemenin ilk safhalarında yükleme plakası ile numune arasındaki temasın istenilen şekilde sağlanamamasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Sayısal modelin en yakın sonuç verdiği 2 numaralı

numunenin,  $P \sim 250\text{N}$  değerinden sonra rijitliğini kaybettiği dikkate alındığında, bu değerden sonra sayısal model sonuçlarının karşılaştırma amaçlı kullanımı anlamsız hale gelmektedir.



Şekil 4.11. IGSY/38\_Z numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları

Şekil 4.11’de basma parçası boyu 38mm olan zayıf doğrultuda yüklenmiş batma numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları verilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarının  $P \sim 200\text{N}$  değerine kadar deneylerin tümüyle uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle 2. numaralı numune ile oldukça uyumlu sonuçlar veren sayısal modelden  $P \sim 400\text{N}$  değerine karşılık  $\delta_{model}=1.54\text{mm}$  bulunurken aynı yük değeri için deneyden  $\delta_{deney}=1.64\text{mm}$  bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde oluşturulan sayısal modelin doğrusal bölge için batma deneylerini temsil ettiği düşünülmektedir.



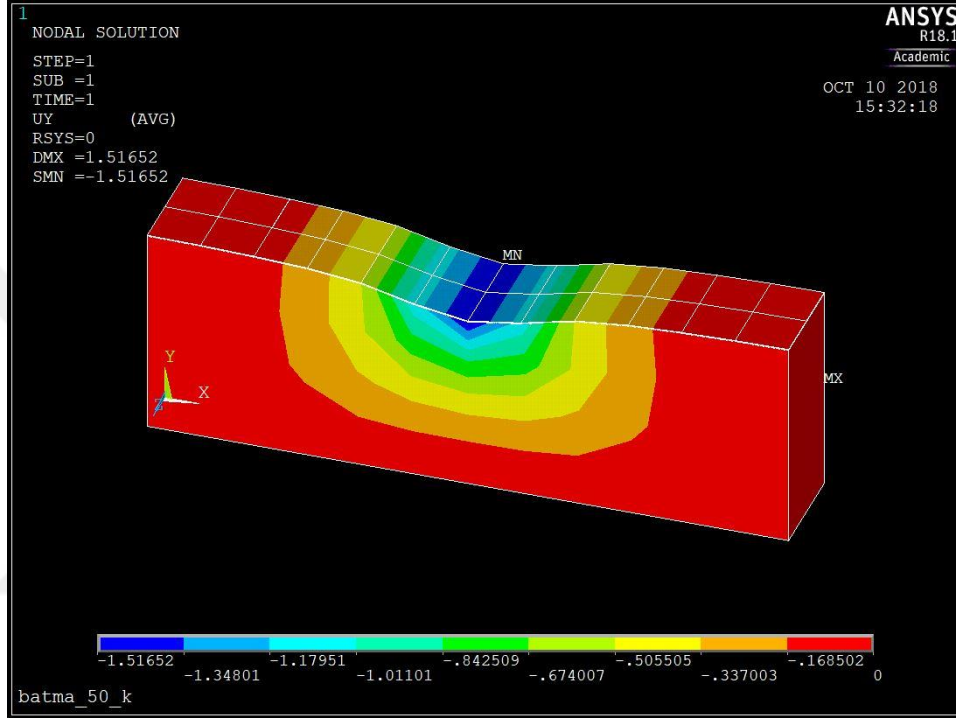
Şekil 4.12. IGSY/50\_K numunelerinin deneysel ve sayısal sonuçları

Şekil 4.12’de basma parçası boyu 50mm olan kuvvetli doğrultuda yüklenmiş numunelerin yük-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur. Sunulan grafikler incelendiğinde sayısal modelin 2 numaralı numuneyi rijitliğinin yüksek olduğu bölgede doğru şekilde temsil ettiği ancak diğer iki numunenin deneysel sonuçlarının sayısal sonuçlardan biraz farklı olduğu görülebilmektedir. Sayısal analizden ve 2.numunenin deney sonuçlarından,  $P \sim 500\text{N}$  değerinde  $\delta_{model}=1.27\text{mm}$ ,  $\delta_{deney}=1.38\text{mm}$  batma değerleri elde edilmiştir. Daha büyük yük değerlerinde numunelerin çekirdek ezilmesi nedeniyle deformasyonlarının arttığı, bu nedenle sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırma amaçlı kullanılamayacağı açıktır.

Batma probleminin çözümü için yapılan tüm deneylerde, geometrik özellikleri aynı olan deney numuneleri için elde edilen yük yer değiştirme eğrilerinde arasında, başlangıç rijitliği veya rijitliğin azalmaya başladığı basma değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların numunenin genel davranışında belirleyici olan düşük yoğunluklu köpük çekirdeğin, üretim amacının yalıtım malzemesi olduğu düşünülerek düşük kalitede üretilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üretimden kaynaklı kusurlar göz önünde bulundurulduğunda, sayısal model ile bazı deney elemanları arasında görülen farklılıkların, sayısal modelin doğrusal olmayan analizleri yapılarak mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.13’de IGSY/50\_K batma numunesinin sayısal modelinin deforme olmuş şekli sunulmuştur. Diğer numunelerin de deforme olmuş şekilleri benzerdir.



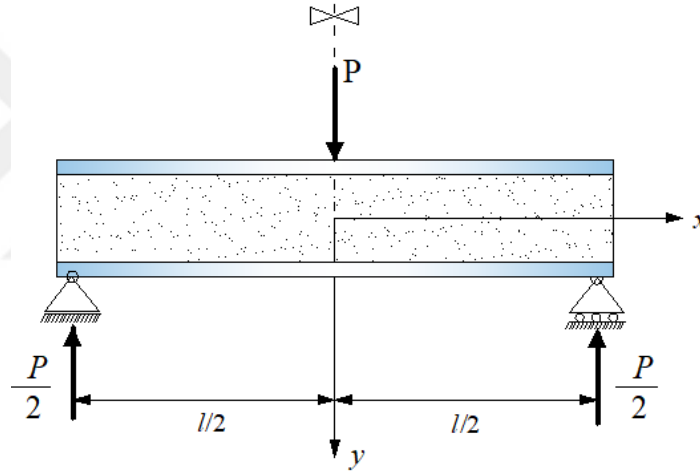
Şekil 4.13. Sayısal analiz sonucu elde edilen deformasyon dağılımı

Şekil 4.13’te deformasyon dağılımının düğüm noktalarına göre çizimi verilen batma numunesi sayısal modelinde, deformasyonların deney sonrası fotoğraflarda da görüldüğü gibi basma parçası altından kenarlara doğru azaldığı, orta noktada ezilmeden kaynaklı deformasyonlar olduğu görülmektedir. Ancak çalışma kapsamında batma deneyleri için basit doğrusal analizler yapılmış, basma parçasıyla numunenin teması veya malzemenin hücresel yapısı gibi doğrusal olmayan analiz gerektiren hususlar gelecek çalışmalarda yapılmak üzere çalışma kapsamına dahil edilmemiştir. Buna rağmen yapılan modellerin, numunelerin elastik davranışını temsil ettiği görülmüştür.

### 4.3. Köpük Çekirdek Kayma Modülünün Üç Nokta Eğilme Testleri Sonuçları Kullanılarak Elde Edilmesi İçin Basit Bir Formülün Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında sandviç çekirdeğinin kayma modülünün bulunması amacıyla seçilen ilk deney yöntemi, üç nokta eğilme testi yöntemidir. Literatürde üç nokta eğilme testi yöntemi kullanılarak sandviç kirişlerin çekirdek malzemesinin kayma parametrelerinin bulunması konusunda yapılan çalışmalarda, genellikle sandviç kirişin klasik orta nokta çökmesi ifadesinin kullanıldığı bilinmektedir (Li vd., 2017; Wesolowski vd., 2017).

Literatürde sıklıkla kullanılan, tekil yük etkisi altındaki basit sandviç kirişin şematik gösterimi Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Basit mesnetli sandviç kirişin şematik gösterimi

Şekil 4.14'te verilen sandviç kirişin eğilme ve kayma etkileri sonucu orta noktasındaki meydana gelen en büyük yer değiştirme,

$$\delta = \frac{Pl^3}{48(EI)_{eş}} + \frac{Pl}{4(AG)_{eş}} \quad (4.4)$$

olarak ifade edilmektedir (Allen,1969). Burada,  $P$ , tekil yük,  $l$ , sandviç kiriş uzunluğu,  $EI_{eş}$  ve  $AG_{eş}$  sırasıyla eşdeğer eğilme ve kayma rijitliklerini ifade etmektedir.

Klasik ifadede uygulanan tekil yük  $P$ , basma parçası boyu  $b_f$  dikkate alınarak  $P=qxb_f$  eşitliğiyle yayılı yüke dönüştürülürse Denklem 4.4,

$$\delta = \frac{(qb_f)l^3}{48(EI)_{eş}} + \frac{(qb_f)l}{4(AG)_{eş}} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $q$ , yayılı yüküdür.

Tez çalışmasında, köpük çekirdeğin kayma parametrelerinin bulunması için yürütülen deneylerin sonuçları kullanılarak hesaplamaların yapılacağı, kiriş açıklığının ortasındaki yer değiştirmeyi veren basit bir formül geliştirilmiştir. Bu formül geliştirilirken, kiriş açıklığının ortasına uygulanan tekil yükün çoğu zaman bir basma parçası ile kirişe aktarıldığı bilindiğinden, basma parçasının boyu da dikkate alınmıştır. Yapılan analitik çalışmada enerji yöntemlerinden olan Castigliano teoremi (Ugural ve Fenster, 2003) kullanılmıştır.

İtalyan matematikçi Carlo Alberto Castigliano tarafından 1879 yılında geliştirilen Castigliano teoremi, özellikle statikçe belirsiz yapı elemanlarının deformasyonlarını içeren birçok probleme uygulanması bakımından yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ugural ve Fenster, 2003)

Çeşitli kuvvetlerin etkisinde kalan elastik bir cisim için birim deformasyon enerjisi  $U$ ,

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k P_i \delta_i \quad (4.6)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada  $P_i$ , etki eden tüm dış kuvvetleri,  $\delta_i$ , tüm dış kuvvetler etkisinde oluşan deformasyonları ifade etmektedir. En genel halde birim deformasyon enerjisi,

$$U = \int \frac{N^2}{2AE} dx + \int \frac{M^2}{2EI} dx + \int \frac{\alpha V^2}{2AG} dx + \int \frac{T^2}{2JG} dx \quad (4.7)$$

eşitliği ile sunulmuştur (Ugural ve Fenster,2003). Burada  $N$ , normal kuvvet,  $M$ , eğilme momenti,  $V$ , kesme kuvveti,  $T$ , burulma momentidir. Ayrıca  $AE$ , uzama rijitliği,  $EI$ , eğilme rijitliği,  $AG$ , kayma rijitliği ve  $GJ$ , burulma rijitliğidir. Denklem 4.7'deki üçüncü terimde yer alan  $\alpha$ , kayma deformasyonları sonucu kesitte meydana gelen çarpılma etkilerini temsil eden kayma şekil faktörüdür. Dikdörtgen kesitler için  $\alpha=6/5$  olarak hesaplanmıştır (Ugural ve Fenster, 2003).

Castigliano teoremine göre, birim deformasyon enerjisinin herhangi bir noktadaki kuvvete göre kısmi türevi, o noktadaki deformasyonu verir Buna göre Castigliano'nun birinci teoremi,

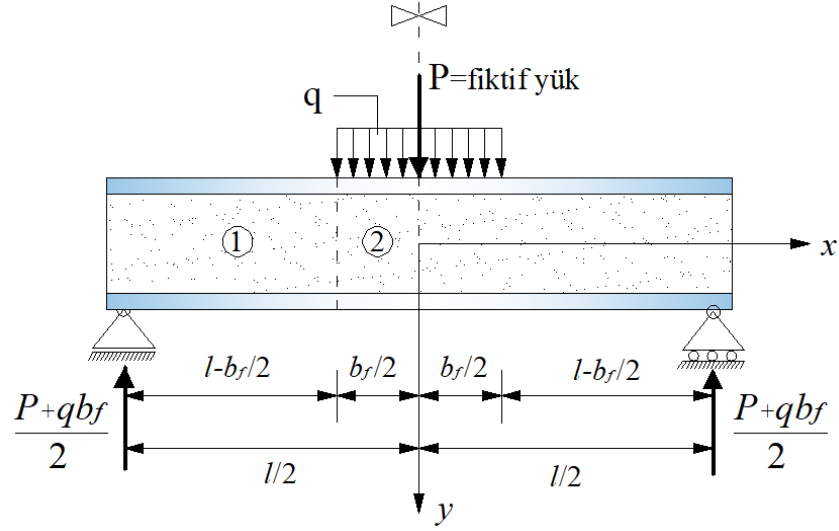
$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial P_i}, \quad \theta_j = \frac{\partial U}{\partial M_j}, \quad \phi_j = \frac{\partial U}{\partial T_j} \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilir (Beer ve Johnston, 2003). Denklem 4.7, 4.8'de yerine yazılıp türevde zincir kuralı uygulanırsa tüm dış yüklerin etkisi altında yer değiştirme,

$$\delta = \int \frac{N}{AE} \frac{\partial N}{\partial P} dx + \int \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P} dx + \int \frac{\alpha V}{AG} \frac{\partial V}{\partial P} dx + \int \frac{T}{JG} \frac{\partial T}{\partial P} dx \quad (4.9)$$

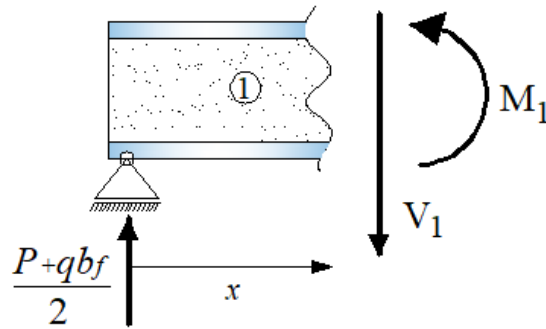
olarak ifade edilebilir. Denklem 4.9'da verilen eşitlik Castigliano'nun ikinci teoremi olarak adlandırılır.

Üç nokta eğilme testinde tekil yükün basma parçası kullanılarak uygulandığı durumu dikkate alınarak giriş problemi Şekil 4.15'de gösterildiği gibi temsil edilmiştir.



Şekil 4.15. Üç nokta eğilme testi numunesinin yüklenmesi

Şekil 4.15'te verilen kirişin orta noktasının sehiminin Castigliano teoremi ile elde edilmesi için, deformasyonun arandığı noktada düşey doğrultuda etki eden kuvvet olması gereği göz önünde bulundurularak, ilgili noktaya sanal (fiktif) tekil yük uygulanmıştır. Mesnet tepkileri bulunduktan sonra kiriş 1 ve 2. bölgelerinden kesilerek (Şekil 4.15) sırasıyla iç kuvvetler elde edilmiştir. Şekil 4.16'da 1. bölgeden yapılan kesim işlemi ve iç kuvvetler gösterilmiştir.



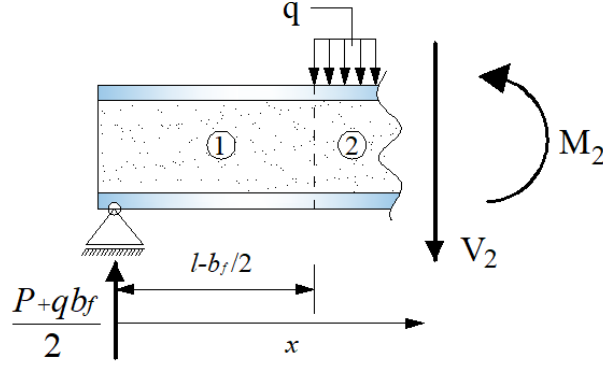
Şekil 4.16. Birinci bölgeden kesilen kirişte oluşan iç kuvvetler

İlk kesim işlemi sonucu oluşan kesme kuvveti ve moment fonksiyonları sırasıyla,

$$V_1 = \frac{P}{2} + \frac{qb_f}{2} \quad (4.10)$$

$$M_1 = \frac{P}{2}x + \frac{qb_f}{2}x \quad (4.11)$$

olarak elde edilmiştir. Daha sonra yayılı yükün etki ettiği ikinci bölgeden kesim işlemi yapılmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. İkinci bölgeden kesilen kirişte oluşan iç kuvvetler

İkinci kesim işlemi sonucu oluşan kesme kuvveti ve eğilme momenti ifadeleri sırasıyla,

$$V_2 = \frac{P}{2} + \frac{qb_f}{2} - q(x - l^*) \quad (4.12)$$

$$M_2 = \frac{P}{2}x + \frac{qb_f}{2}x - \frac{q(x - l^*)^2}{2} \quad (4.13)$$

şeklinde elde edilmiştir. Burada  $l^* = (l - b_f)/2$  olarak tanımlanmıştır. İç kuvvetlerin elde edilmesinden sonra Denklem 4.9'da verilen eşitlik kullanılarak 1. ve 2. bölgeler için sırasıyla moment ve kesme kuvvetleri nedeniyle kirişin orta noktasında oluşan yer değiştirmeler,

$$\delta_{1m} = \int_0^{l^*} \left( \frac{qb_f}{2EI} x \right) \frac{x}{2} dx \quad (4.14)$$

$$\delta_{1k} = \int_0^{l^*} \frac{qb_f}{2A'G} \frac{1}{2} dx \quad (4.15)$$

$$\delta_{2m} = \int_{l^*}^{l/2} \left( \frac{qb_f}{2EI} x - \frac{q(x-l^*)^2}{2EI} \right) \frac{x}{2} dx \quad (4.16)$$

$$\delta_{2k} = \int_{l^*}^{l/2} \left( \frac{qb_f}{2A'G} - \frac{q(x-l^*)}{A'G} \right) \frac{1}{2} dx \quad (4.17)$$

olmak üzere, toplam sehim,

$$\delta = 2 \left[ \int_0^{l^*} \left( \frac{qb_f}{2EI} x \right) \frac{x}{2} dx + \int_0^{l^*} \frac{qb_f}{2A'G} \frac{1}{2} dx + \int_{l^*}^{l/2} \left( \frac{qb_f}{2EI} x - \frac{q(x-l^*)^2}{2EI} \right) \frac{x}{2} dx + \int_{l^*}^{l/2} \left( \frac{qb_f}{2A'G} - \frac{q(x-l^*)}{A'G} \right) \frac{1}{2} dx \right] \quad (4.18)$$

olarak elde edilmiştir. Burada kayma deformasyonları sonucu oluşan alan,  $A'=A/\alpha$  ( $\alpha=6/5$ ) eşitliğiyle hesaplanmıştır. Ayrıca,  $\delta_{1m}$ , 1. bölgede eğilme momenti sebebiyle oluşan sehimi,  $\delta_{1k}$ , 1. bölgede kesme kuvveti sebebiyle oluşan sehimi,  $\delta_{2m}$ , 2. bölgede eğilme momenti sebebiyle oluşan sehimi,  $\delta_{2k}$ , 2. bölgede kesme kuvveti sebebiyle oluşan sehimi vermektedir. Her bir sehim ifadesinden  $x$ 'e göre integral alınırsa,

$$\delta_{1m} = \frac{qb_f(l-b_f)^3}{12EI} \quad (4.19)$$

$$\delta_{1k} = \frac{qb_f(l-b_f)}{8A'G} \quad (4.20)$$

$$\delta_{2m} = \frac{qb_f^2(24l^2 - 28lb_f + 9b_f^2)}{768EI} \quad (4.21)$$

$$\delta_{2k} = \frac{qb_f^2}{16A'G} \quad (4.22)$$

yer değiştirmeler elde edilir. Hesaplanan yer değiştirmeler toplanarak kirişte meydana gelen en büyük sehimi bulunur. Kiriş orta noktasının sehimini veren geliştirilmiş ifade,

$$\delta_{Gelistirilmis} = 2 \left[ \frac{qb_f (l-b_f)^3}{12EI} + \frac{qb_f (l-b_f)}{8A'G} + \frac{qb_f^2 (24l^2 - 28lb_f + 9b_f^2)}{768EI} + \frac{qb_f^2}{16A'G} \right] \quad (4.23)$$

olarak elde edilir. Böylece kiriş orta nokta sehimi ifadesini veren basit bir ifade elde edilmiştir. Elde edilen bu ifade c nokta eğilme testleri yapıldıktan sonra sandviç kiriş çekirdeğinin kayma modülünün bulunması amacıyla kullanılmıştır. Klasik ifadeden ve Denklem 4.23'ten elde edilen değerler, kuvvetli ve zayıf doğrultularda yüklenmiş 6 adet adet numune için, izelge 4.3'te sunulmuştur. Burada K\_1, 2, 3 numuneleri 1 eksenini doğrultusunda yüklenmiş, 1-3 düzleminde kayma modülü değerini veren kuvvetli numunelerdir. Z\_1, 2, 3 isimli numuneler ise 3 eksenini doğrultusunda yüklenmiş, 2-3 düzleminde kayma modülünü veren zayıf numunelerdir. c nokta eğilme deneyleri ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. XPS'in klasik ve geliştirilmiş analitik ifadelerden elde edilen kayma modülü değerleri

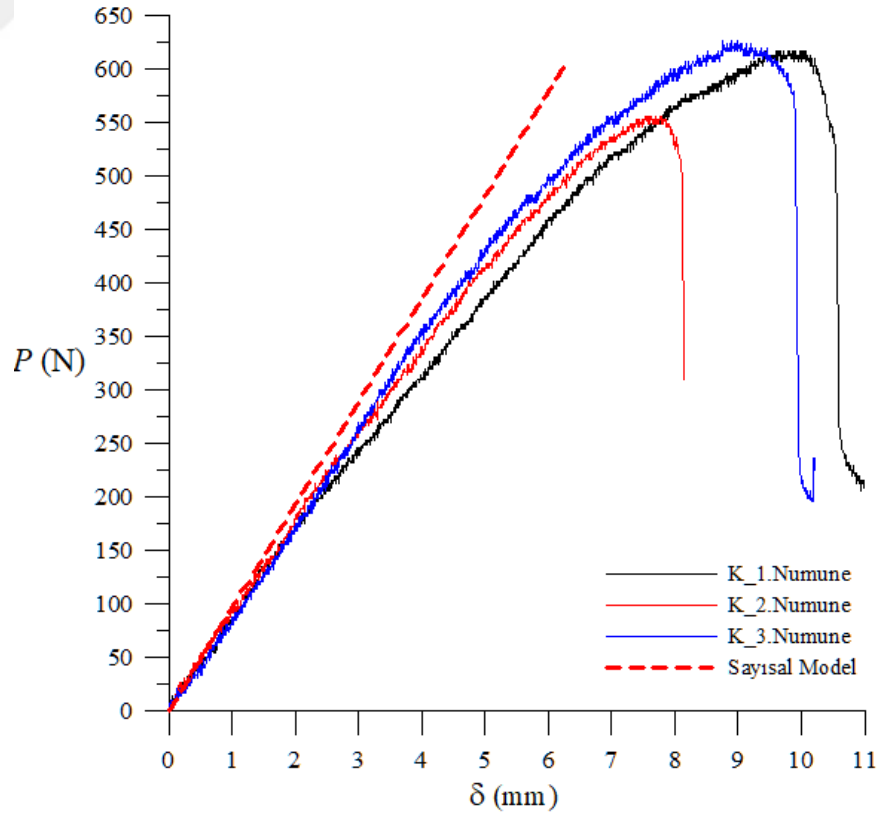
| Numune İsmi | $G_{Klasik}^{XPS}$ (MPa) | $G_{Gelistirilmis}^{XPS}$ (MPa) |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|
| K_1         | 6.10                     | <b>5.57</b>                     |
| K_2         | 6.65                     | <b>6.08</b>                     |
| K_3         | 6.56                     | <b>6.00</b>                     |
| K_ort       | 6.44                     | <b>5.88</b>                     |
| Z_1         | 4.46                     | <b>4.08</b>                     |
| Z_2         | 4.37                     | <b>4.00</b>                     |
| Z_3         | 3.75                     | <b>3.43</b>                     |
| Z_ort       | 4.19                     | <b>3.87</b>                     |

Çizelge 4.3'te verilen değerler incelendiğinde, klasik ifadeden elde edilen değerlerin, geliştirilmiş analitik ifade sonuçlarından büyük olduğu görülmektedir. Tekil yük

etkisi altında orta nokta yer değiştirmesinin eşdeğer yayılı yük etkisindeki yer değiştirmeden büyük olacağı göz önünde bulundurularak, aynı yer değiştirme değerinde tekil yük uygulanan kirişin daha büyük kayma modülü değerine sahip olması gerektiği bilinmektedir. Buna göre geliştirilmiş analitik ifadede, deneylere benzer şekilde yayılı yük uygulanması durumunun dikkate alınması, gerçek koşulları daha iyi temsil ettiğinden, köpük çekirdeğin gerçek kayma modülü değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği düşünölmektedir.

#### 4.4. Üç Nokta Eğilme Deneyi ve Sayısal Analiz Sonuçları

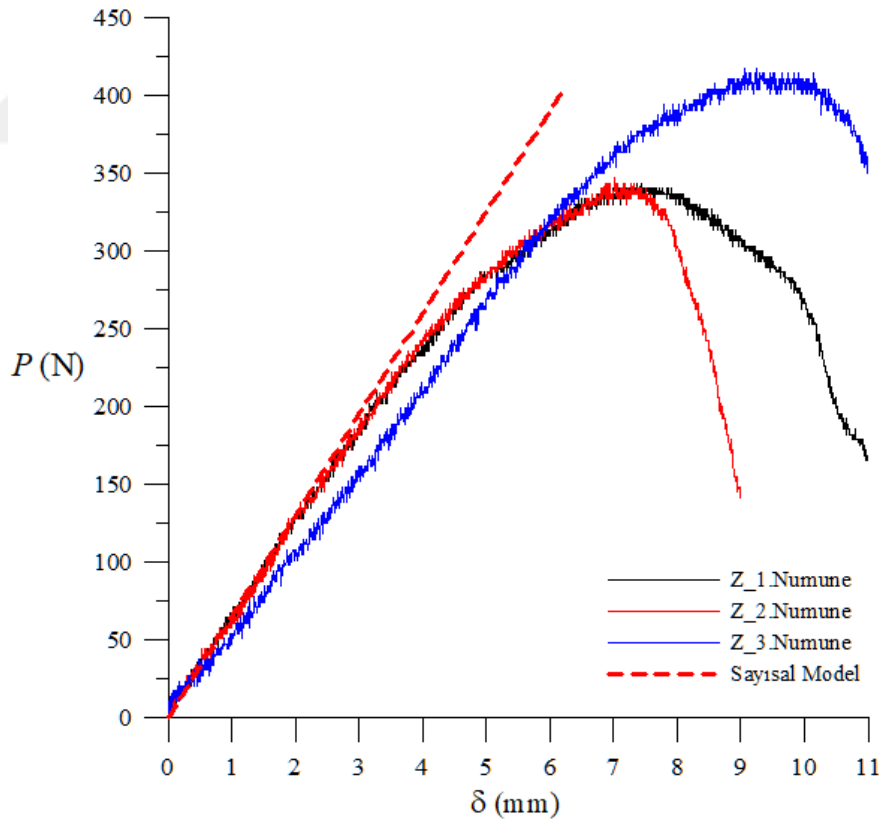
Köpük çekirdeğin kayma modülünün bulunması amacıyla seçilen ilk deney yöntemi olan üç nokta eğilme yönteminin, deney sonuçları ve ANSYS programı ile oluşturulan üç nokta eğilme deneyi numunelerinin sayısal modellerinin doğrusal analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.18 ve 4.19'da sunulmuştur.Şekil 4.18'de kuvvetli doğrultuda yüklenmiş numunelerin üç nokta eğilme deneylerinden ve sayısal analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri sunulmuştur.



Şekil 4.18. Kuvvetli doğrultuda yüklenen kirişlerin deneysel ve sayısal sonuçları

Şekil 4.18’de verilen grafiklere göre, sayısal modelden elde edilen sonuçların  $P=200\sim 250\text{N}$  değerlerine kadar deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, K\_2 numunesinin, gruptaki diğer iki numuneden daha düşük bir yükte ( $P=500\sim 550\text{N}$ ) göçtüğü gözlenmiştir. Erken göçme probleminin numune üretiminden kaynaklı kusurlardan veya köpük çekirdek malzemesinin içyapısındaki hücresel kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Her bir doğrultu için 3’er numune test edilerek bu tip kusurlardan kaynaklanacak beklenmeyen göçme durumlarının göz ardı edilebilir olması sağlanmıştır. Ancak erken göçme problemi gözlenmiş olsa da K\_2 numunesi de doğrusal bölgede sayısal modelle uyum sağlamış ve sandviç kiriş kayma parametrelerinin belirlenmesi için gerekli değerlerin elde edilmesini sağlamıştır.

Şekil 4.19’da zayıf doğrultuda yüklenmiş sandviç kirişlerin deneysel ve sayısal sonuçları grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 4.19. Zayıf doğrultuda yüklenen kirişlerin deneysel ve sayısal sonuçları

Zayıf doğrultuda yüklenmiş numunelerin deneysel ve sayısal sonuçlarının verildiği Şekil 4.19'da sayısal modelden elde edilen sonuçların  $P=200\sim 250\text{N}$  değerlerine kadar  $Z_1$  ve  $Z_2$  numunelerinin sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Buna karşın 3 numaralı numune sonuçlarının hem sayısal model sonuçlarından hem de diğer iki numunenin deney sonuçlarından farklı olduğu gözlemlenmektedir.  $Z_3$  numunesi, doğrusal bölgedeki rijitliği daha düşük olmasına rağmen  $P=425\text{N}$  değerlerine kadar yük taşımaya devam etmiştir.  $Z_3$  numunesinin sonuçlarındaki farklılıklar göz önünde bulundurularak sayısal modelden elde edilen sonuçların 1 ve 2 numaralı numuneler ile karşılaştırılmasının daha anlamlı olduğu düşünülmektedir. Buna göre  $Z_1$  ve  $Z_2$  için,  $P=200\text{N}$  değerinde sayısal analizden sırasıyla, elde edilen yer değiştirme değerleri,  $\delta_{model}=3.08\text{mm}$ ,  $\delta_{Z_1}=3.26\text{mm}$  ve  $\delta_{Z_2}=3.28\text{mm}$  olarak bulunmuştur.

Şekil 4.20a ve 4.20b'de kuvvetli doğrultuda yüklenmiş kiriş numunesinin sırasıyla deney öncesi ve deney sonrası deforme olmuş görüntüsü sunulmaktadır. Sunulan fotoğrafta, kiriş eğilme testi sonucunda yüz levhasının çekirdek malzemesinden ayrılmasıyla göçtüğü görülmektedir. Bu göçme durumu, daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi üç nokta eğilme testleri sırasında sıklıkla görülen göçme durumlarından yüz burkulması (wrinkling) göçme durumudur.



(a)



(b)

Şekil 4.20. Kuvvetli doğrultuda yüklenen kirişin (a) deney öncesi (b) göçme durumu

Şekil 4.21a ve 4.21b’de zayıf doğrultuda yüklenmiş sandviç kirişin sırasıyla deney öncesi ve deney sonrası görüntüsü sunulmuştur. Kuvvetli doğrultuda yüklenen numunelerde olduğu gibi zayıf doğrultuda yüklenen numunelerin de yüz burkulması sebebiyle göçtüğü gözlemlenmiştir.



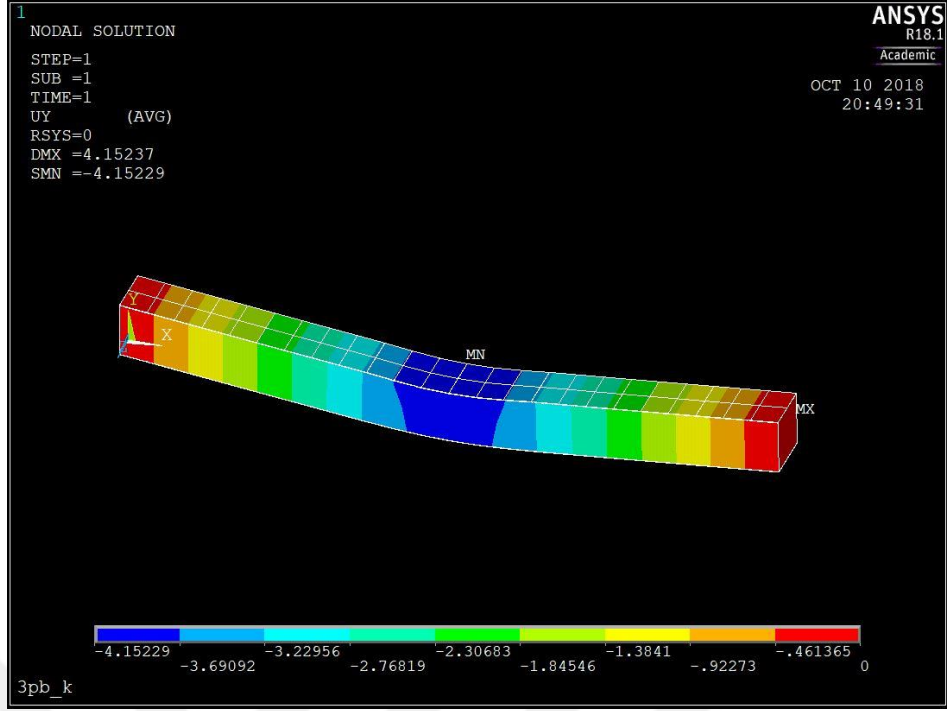
(a)



(b)

Şekil 4.21. Zayıf doğrultuda yüklenen kirişin (a) deney öncesi (b) göçme durumu

Şekil 4.22’de kuvvetli doğrultuda yüklenmiş sandviç kirişin tipik sayısal model sonucu verilmiştir. Zayıf doğrultuda yüklenmiş kirişler için yapılan sayısal analiz sonuçlarından elde edilen deforme olmuş geometri de kuvvetli doğrultuda yüklenmiş numunelerin deforme olmuş geometrileriyle benzer olduğundan, yalnızca bir doğrultu için elde edilen sayısal analiz sonucu sunulmuştur.



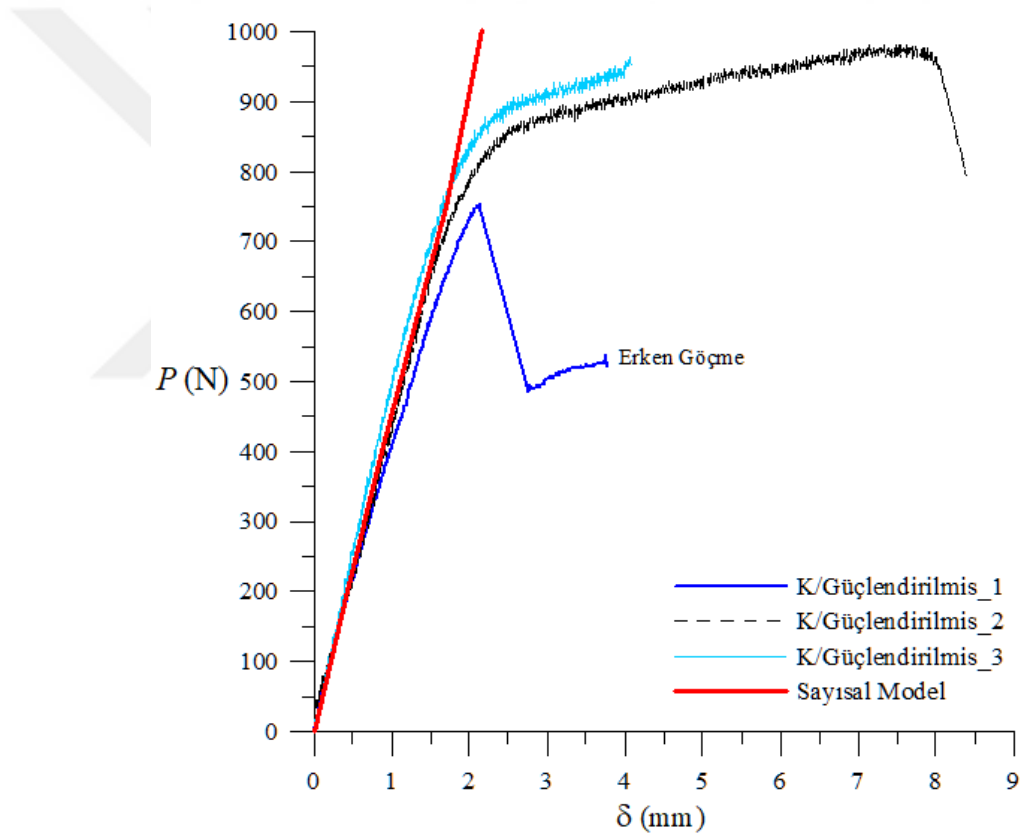
Şekil 4.22. Kuvvetli doğrultuda yüklenen kirişin tipik deforme olmuş görüntüsü

Şekil 4.22’de  $y$  doğrultusundaki yer değiştirmelerin, düğüm noktalarındaki değerlerini gösteren deforme olmuş geometri verilmiştir. Basma parçası boyu  $b=100\text{mm}$  olan modelde, basma parçasının tüm yükleme sırasında kiriş yüz levhasına temas halinde olduğu varsayımı yapılmıştır.

Tez çalışmasının bu aşamasında yapılan sandviç kirişlerin üç nokta eğilme testleri sırasında baskın göçme durumunun yüz burkulması olduğu görülmüş, bunun sonucu olarak da numunelerin yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra aniden taşıma kapasitelerini yitirdikleri gözlemlenmiştir. Yüz burkulması davranışının, yük değerleri arttıkça ince galvanizli sac levhaya etkiyen eğilme gerilmelerinin tetiklendiği düşünülmektedir. Oluşturulan sayısal modeller, ayrıca üç nokta eğilme etkisindeki kirişin orta nokta çökme değerinin bulunması için geliştirilmiş analitik ifade kullanılarak elde edilen köpük çekirdeğin kayma modülü değerlerinin doğrulanması bakımından da önemlidir. Geliştirilmiş analitik ifadeden elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan sayısal analiz sonuçlarının doğrusal bölgede deney sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, geliştirilmiş analitik ifadeden bulunan değerlerin köpük çekirdeğin gerçek kayma modülü değerlerine yakın olduğu söylenebilir.

#### 4.5. Güçlendirilmiş Numunelerin Üç Ray Kayma Deneyi ve Sayısal Analiz Sonuçları

Bu tezde ilgili standartlar ve yapılan çalışmalar incelenerek, köpük malzemesinin kayma testi için geliştirilmiş bir 3 ray kayma deneyi numunesi önerilmiştir ve geliştirilmiş numunenin kayma testleri ve sayısal modelleri yapılmıştır. Modeli oluşturulan numunelerin, statik analizleri yapılarak doğrusal bölge için yük-yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.23’de kuvvetli doğrultuda yüklenmiş numunelerin sayısal analizlerinden elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla birlikte sunulmuştur.



Şekil 4.23. Kuvvetli doğrultuda yüklenen numunelerin deneysel ve sayısal sonuçları

Sayısal analizden elde edilen sonuçların,  $P=700\sim 800\text{N}$  değerlerine kadar, özellikle 2 ve 3 numaralı numunelerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde ise benzer şekilde 2 ve 3 numaralı numunelerin  $P=800\sim 900\text{N}$ ’a kadar yük taşıma kapasitesinin doğrusal arttığı ancak bu değerlerden sonra kayma deformasyonları nedeniyle rijitlik kaybına uğradıkları görülmektedir. 1 numaralı

numunede üretim kusurlarından kaynaklandığı düşünülen erken göçme davranışı gözlenmiştir. Şekil 4.24a-c’de kuvvetli doğrultuda yüklenen numunelerin deney öncesi, deney sırasında ve sonrasındaki görüntüleri sunulmuştur.

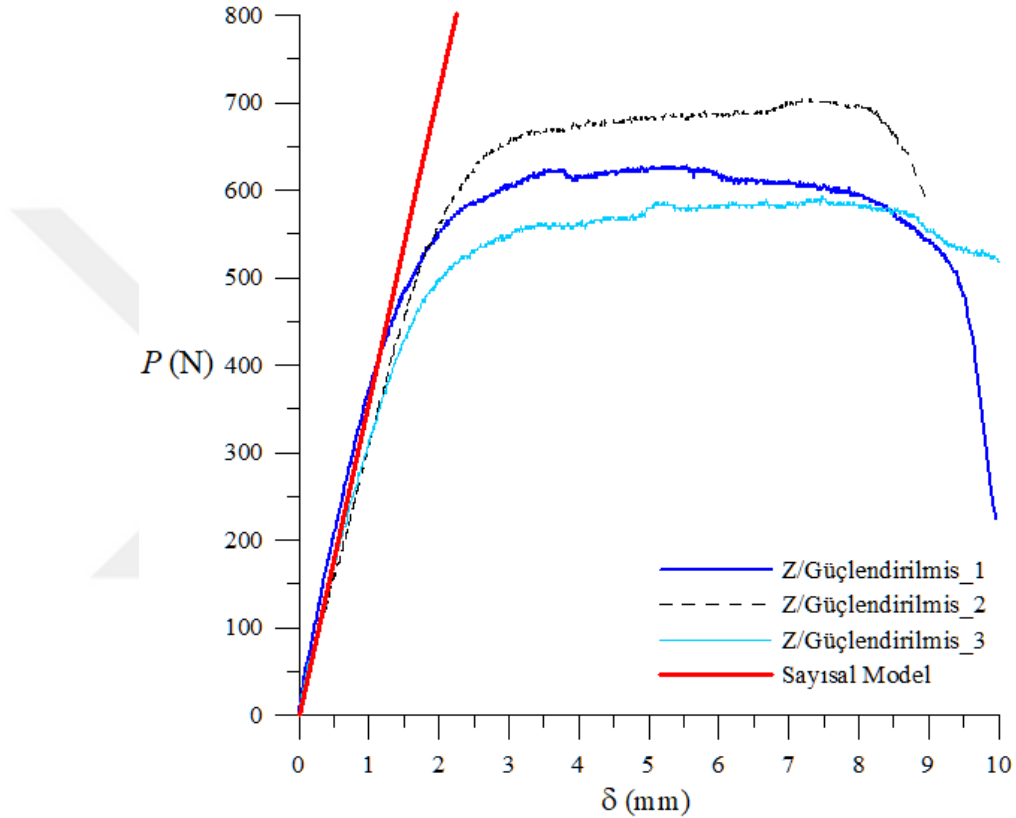


Şekil 4.24. K/Güçlendirilmiş\_3 numunesinin (a) test öncesi (b) test sırasında (c) göçme sonrası görüntüleri

Şekil 4.24c’de deforme olmuş geometrisi verilen kuvvetli doğrultuda (1-3 düzlemi) yüklenmiş numunenin, eğilme deformasyonu göstermeden, kesme kuvveti etkisinde yer değiştirdiği görülmektedir. Bu durum güçlendirme başlıklarının çekirdek malzemesinde oluşacak eğilme etkilerini en aza indirdiğini göstermektedir. Numunelerin güçlendirilmemiş numunelerde gözlenen, kenarlardan ayrılarak göçme

davranışı yerine numune üzerinde oluşan kesme çatlaklarının etkisinde göçtüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 4.25'te zayıf doğrultuda yüklenmiş numunelerin deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur.

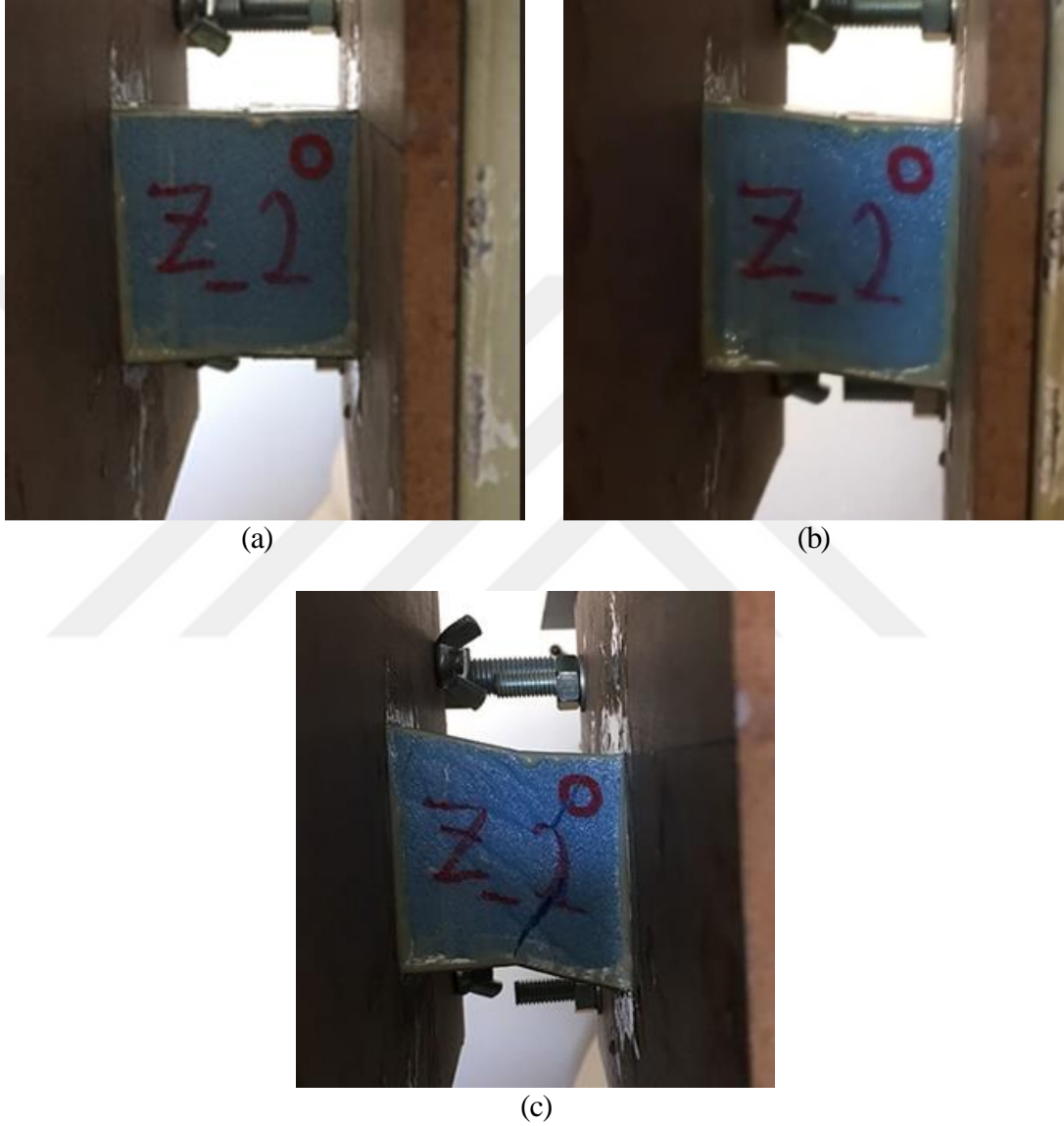


Şekil 4.25. Zayıf doğrultuda yüklenen numunelerin deneysel ve sayısal sonuçları

Şekil 4.25'te kuvvetli doğrultuda test edilmiş güçlendirilmiş numunelerin deney sonuçları ile bu sonuçlar kullanılarak oluşturulan sayısal analiz sonuçları verilmiştir. Sayısal analizden elde edilen sonuçların,  $P=300\sim 350\text{N}$  değerlerine kadar, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde ise 2 ve 3 numaralı numunelerin  $P=350\sim 400\text{N}$ 'a kadar rijitliklerinin çok yakın olduğu ancak bu değerden sonra 3 numaralı numunenin taşıma kapasitesine ulaştığı gözlemlenmektedir. Zayıf doğrultudaki bahsi geçen numunelerin doğrusal bölgelerindeki eğimlerinin benzer olmasına rağmen artan yük değerlerinde birbirlerinden farklı davranış sergiledikleri görülmektedir. Bunun nedeninin hüresel

yapıya sahip çekirdek malzemenin zayıf doğrultuda hücresel özelliklerinin üretimden kaynaklanan düzensizlikler içermesi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.26a-c'de zayıf doğrultuna yüklenen güçlendirilmiş numunelerin deney öncesinde, deney sırasında ve sonrasındaki görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.26. Z/Güçlendirilmiş\_2 numunesinin (a) test öncesi (b) test sırasında (c) göçme sonrası görüntüleri

Kuvvetli doğrultuda yüklenen numunelerde olduğu gibi, zayıf doğrultuda (2-3 düzlemi) yüklenen numunelerin de güçlendirme etkileri sayesinde eğilme deformasyonu göstermeden, kesme kuvveti etkisinde yer değiştirdikleri Şekil 4.26b'de görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.26c'de numunede oluşan kayma etkileri nedeniyle kesme çatlakları oluştuğu, numunenin eğilme etkileri gözlenmeden kesme

kuvvetleri nedeniyle göçtüğü gözlemlenmektedir. Bu durum numunenin kayma kapasitesine yaklaştığını ve elde edilen deney sonuçlarından bulunacak kayma parametrelerinin gerçeğe yakın sonuçlar olacağını göstermektedir.

Her iki deney grubundan elde edilen sonuçlar kayma parametrelerinin hesabında kullanılmıştır. Kayma modülü hesaplanırken  $P_{\Sigma} - \delta$  grafiğinden elde edilen  $\tau - \gamma$  grafiklerinin doğrusal bölgelerindeki değerler kullanılmıştır. Bu değerler yükleme başlangıcında doğrusal olmayan kısmın dikkate alınmaması gerektiği düşünülerek,  $\gamma=0.002\sim 0.01$  aralığı için hesaplanmıştır.

Gdoutos vd. (2002), kayma dayanımının, ilgili doğrultulardaki basınç dayanımlarının ortalamasına eşit olduğunu belirtmişlerdir. Buna göre kuvvetli doğrultu için Gdoutos vd. (2002) tarafından önerilen formülden hesaplanan kayma dayanımı değeri, 150kPa olarak bulunmuştur. Buna karşılık güçlendirilmiş kuvvetli numunelerin geliştirilmiş ÜRKT sonucu ortalama kayma modülü ve kayma dayanımı değerleri sırasıyla  $G_{13}^{ort}=432\text{kPa}$  ve  $S_{13}^{ort}=164\text{kPa}$  olarak hesaplanmıştır.

Benzer hesap yöntemi kullanılarak zayıf doğrultuda yüklenmiş numunelerin ortalama kayma modülü ve kayma dayanımı değerleri sırasıyla  $G_{23}^{ort}=3.31\text{MPa}$  ve  $S_{23}^{ort}=117\text{kPa}$  olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Gdoutos vd. (2002) tarafından önerilen ifade kullanılarak da zayıf numuneler için kayma dayanımı 90kPa olarak bulunmuştur. üç ray kayma testi sonuçlarından her bir numune için elde edilen kayma modülü ve kayma dayanımı değerleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. XPS'in üç ray kayma testi sonuçlarından elde edilen kayma modülü ve kayma dayanımı değerleri

| Numune İsmi        | $G_{13}$<br>(MPa) | $S_{13}$<br>(kPa) | $G_{23}$<br>(MPa) | $S_{23}$<br>(kPa) | $G_{13}^{ort}$<br>(MPa) | $S_{13}^{ort}$<br>(kPa) | $G_{23}^{ort}$<br>(MPa) | $S_{23}^{ort}$<br>(kPa) |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| K/Güçlendirilmiş_1 | 4.17              | 149               | -                 | -                 | <b>4.32</b>             | <b>164</b>              | -                       | -                       |
| K/Güçlendirilmiş_2 | 4.48              | 169               | -                 | -                 |                         |                         | -                       | -                       |
| K/Güçlendirilmiş_3 | 4.32              | 175               | -                 | -                 |                         |                         | -                       | -                       |
| Z/Güçlendirilmiş_1 | -                 | -                 | 3.93              | 117               | -                       | -                       | <b>3.31</b>             | <b>117</b>              |
| Z/Güçlendirilmiş_2 | -                 | -                 | 2.98              | 126               | -                       | -                       |                         |                         |
| Z/Güçlendirilmiş_3 | -                 | -                 | 3.02              | 107               | -                       | -                       |                         |                         |

Tezde bulunması amaçlanan köpük çekirdeğin kayma modülü değerleri her iki kayma düzlemi için de elde edilmiştir. Kullanılan iki deney yöntemi; üç nokta eğilme testi (ÜNET) ile üç ray kayma testi (ÜRKT) yöntemlerinden elde edilen kayma modülü değerleri Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. XPS'in ÜNET ve ÜREK testlerinden elde edilen kayma modülü değerleri

| Tanım                               | $G_{13}^{\text{ÜNET}}$ | $G_{13}^{\text{ÜRKT}}$ |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 1-3 düzlemindeki kayma modülü (MPa) | 5.88                   | 4.32                   |
| 2-3 düzlemindeki kayma modülü (MPa) | 3.87                   | 3.31                   |

Çizelge 4.5'te sunulan değerler karşılaştırıldığında kiriş eğilme testinden bulunan değerlerin kayma deneyinden bulunan değerlerden büyük olduğu görülmektedir. Hücreli yapıya sahip köpük çekirdeğin mekanik özelliklerinin numune içerisinde yer alan hücre sayısından etkilendiği bilindiğinden, bu farkın test edilen numune boyutlarının farklı olmasından kaynaklandığı söylenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, iki ayrı numune tipi için değerlendirildiğinde, sandviç kiriş numunesi testlerinde, eğilme testi sonuçlarının daha uygun olduğu, ancak küp geometrisine sahip numunelerle yapılacak testlerde, üç ray kayma testi sonuçlarının kullanılmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, günümüzde pek çok mühendislik uygulamasında sıkça kullanılan sandviç kirişlerin çekirdek malzemesi olarak kullanılan bir doğrultuda kabaran rijit polistren köpüğün mekanik özelliklerinden, özellikle kayma parametrelerinin, bulunması ile ilgili deneysel ve sayısal analizler yapılmıştır. Çalışma, ilerleyişi ve kazanımları bakımında üç aşamada ele alınmıştır. Tezin ana hatlarını oluşturan bu aşamalara geçilmeden önce, sandviç kiriş çekirdeği olarak kullanılan XPS malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin öncelikli adım olduğu ve çalışmanın devamında yapılacak tüm deneysel, sayısal ve analitik çalışmalarda bu mekanik özelliklerin kullanılacağı öngörüldüğünden, öncelikli olarak köpük çekirdeğin basınç testleri yapılmıştır. Yapılan bu basınç testlerinden XPS'in elastisite modülü ve basınç dayanımı her üç asal eksen için hesaplanmıştır. Mekanik özellikler belirlendikten sonra tezin asıl ama olan kayma parametrelerinin belirlenmesi için ilk deneysel çalışma aşamasına geçilmiştir.

Tezin ilk deneysel aşamasında, kayma parametrelerinin belirlenmesi için sıklıkla kullanılan üç nokta eğilme testi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların ilk aşamasında üç nokta eğilme testlerinde görülen batma probleminin çözümü için ince galvanizli sac yüzü sandviç kiriş deneyleri yapılmıştır. Deneyler, tekil yükün uygulanması sırasında kullanılan basma parçası boyu parametresi dikkate alınarak üç ayrı grupta toplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda batma parçası boyuna bağlı olarak batma yükü değerlerinin doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür.

Batma problemiyle ilgili deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürdeki batma yükü ifadelerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve deney sonuçlarının analitik ifadelerin limitleri arasında kaldığı görülmüştür. Batma problemi ile ilgili son olarak, sayısal modeller oluşturulmuştur. Sayısal modelde, batma probleminin doğrusal olmayan analizlerinin yapılmasının oldukça karmaşık olduğu göz önünde bulundurularak, doğrusal analiz uygulanmıştır. Doğrusal analizden elde edilen yük-yer değiştirme eğrisinin, her bir deney grubu için elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin doğrusal kısmı ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, deneylerden elde edilen sonuçların modelle doğrulandığını da göstermektedir.

Batma problemi ile ilgili yapılan çalışmalardan sonra üç nokta eğilme testlerine geçilmiştir. Bu aşamada deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak köpük çekirdeğin kayma modülünün belirlenmesi için analitik bir ifade geliştirilmiştir. Geliştirilen analitik ifadede klasik orta nokta çökmesi ifadesinden farklı olarak basma parçası boyu dikkate alınarak yayılı yük etkisi altında basit mesnetli sandviç kiriş problemi çözülmüştür. Analitik ifadenin elde edilmesinden sonra üç nokta eğilme testleri kuvvetli ve zayıf doğrultular için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapılmasından sonra, kuvvetli ve zayıf doğrultuda yüklenmiş sandviç kirişlerin sayısal modelleri oluşturulmuş, sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırıldığında her bir deney grubunda en az bir numune için sayısal analizlerin oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlar modelleme için belirlenen eleman ve malzeme modellerinin doğrusal analizler için yeterli derecede uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca sayısal modellerin uyumlu sonuçlar vermesi, hücresel yapıya sahip köpük çekirdek malzemesinin, iki boyutlu doğrusal analizlerde ortotrop malzeme olarak modellenmesi yaklaşımının geçerli olduğunu göstermektedir.

Üç nokta eğilme deneylerinden elde edilen yük-yer değiştirme değerleri, geliştirilen sandviç kirişin orta noktasının çökmesi ifadesinde yerine yazılarak çekirdek malzemesinin kayma modülü değerleri her iki düzlem için elde edilmiştir. Benzer yolla deney sonuçları klasik analitik ifade de yerine yazılarak kayma modülleri bulunmuş ve klasik analitik ifade sonuçlarının, geliştirilmiş analitik ifade sonuçlarından büyük olduğu görülmüştür. Geliştirilmiş analitik ifadede bulunan kayma modülleri, sayısal modellemede kullanılmış ve model sonuçlarının deneyleri temsil ettiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, yayılı yük etkilerini dikkate alan ve tezde geliştirilen analitik ifadenin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

Tez çalışmasının son aşamasında XPS çekirdeğin kayma parametrelerinin belirlenmesi için yaygın şekilde kullanılan standart üç ray kayma testi düzeneği temel alınarak, geliştirilmiş üç ray kayma testi yöntemi önerilmiştir. Standart test yönteminde, kayma numunesinin boyutlarının saf kaymaya yakın kayma dağılımı elde edilmesi amacıyla uzun ve ince (narin eleman) olacak şekilde tasarlanması gerektiği bilinmektedir. Ayrıca yakın zamanda yapılan bir çalışmada standart üç ray kayma testi sırasında numune üzerinde karmaşık gerilme dağılımları oluştuğundan

elde edilen kayma parametrelerinin gerçeğe yakın olmadığı belirtilmiştir. Bu amaçla, karmaşık gerilme etkilerinin en aza indirilmesi ve numunede saf kaymaya yakın gerilme dağılımı elde edilmesi için, numunenin serbest yüzlerinin rijit plakalar yapıştırılarak güçlendirilmesi önerilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, güçlendirilmiş numunelerin göçme davranışında kesme kuvvetlerinin etkili olduğu ve numune üzerinde oluşan çapraz çatlaklarla numunelerin göçtüğü görülmüştür. Deneysel sonuçlar elde edildikten sonra iki ayrı grupta test edilen numunelerin sayısal modelleri yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve deneylerden elde edilen kayma modülü değerlerinin, köpük çekirdeğin kayma davranışı uyumlu şekilde temsil ettiği görülmüştür.

Kayma modülünün belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen her iki test yönteminden de çekirdek kayma modülü değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler karşılaştırıldığında, üç nokta eğilme testinden elde edilen sonuçların daha büyük değerler verdiği görülmüştür. Bunun nedeninin, hücreli yapıya sahip çekirdek malzemesinin boyut etkisine bağlı olarak değişen mekanik davranışı olduğu düşünülmektedir.

Geliştirilmiş üç ray kayma testi yönteminden bulunan kayma parametrelerinin, boyut etkileri düşünüldüğünde köpük çekirdek malzeme davranışını küp geometriye sahip numuneler için daha iyi temsil edebileceği düşünülmektedir. Ancak diğer taraftan deney düzeneği ve numune hazırlığı bakımından üç ray kayma testi yönteminin oldukça ağır iş yükü olduğu görülmüştür. Bu nedenle üç nokta eğilme testinin uygulama açısından daha elverişli olduğu söylenebilir. Ek olarak, üç ray kayma testi sırasında yapılan güçlendirme çözümünün büyük boyutlu numune kısıtlamasına alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Tez çalışmasında çekirdek malzemesinin kayma modülünün belirlenmesi amacıyla uygulanan test yöntemlerinin, pratikte hangi yükleme koşullarına ve geometrik özelliklere sahip elemanlar kullanılacağı durumu göz önünde bulundurularak tercih edilmesinin gerçeğe yakın kayma modülü değerleri bulunmasında daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma sonuçları dikkate alınarak ileride yapılması önerilen çalışmalar:

- Deneyle yapılan kiriş ve çekirdek malzemelerin doğrusal olmayan sayısal analizlerinin yapılması
- Hüresel yapıya sahip köpük çekirdeğin doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanılarak sayısal analizlerin yapılması
- Farklı çekirdek ve yüz malzemesi kullanılarak sandviç kiriş tasarımı yapılması
- Tezde geliştirilen analitik ifadenin farklı çekirdek ve yüz malzemeleri için kullanılabilirliğinin kontrolünün yapılması

olarak özetlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Abot, J. L., Daniel, I. M., Gdoutos, E. E., 2002. Contact Law for Composite Sandwich Beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 4(2), 157-173.
- Akindoyo, J. O., Beg, M., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., Yuvaraj, A. R., 2016. Polyurethane Types, Synthesis and Applications—A Review. *Royal Society of Chemistry Advances*, 6(115), 114453-114482.
- Allen, H. G., 1969. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels: The Commonwealth and International Library: Structures and Solid Body Mechanics Division*. Elsevier.
- Andrews, E. W., Gioux, G., Onck, P., Gibson, L. J., 2001. Size Effects In Ductile Cellular Solids. Part II: Experimental Results. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(3), 701-713.
- ANSYS, I., 2008. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. ANSYS Inc.
- Antoniadou, P., Giama, E., Boemi, S. N., Karlessi, T., Santamouris, M., Papadopoulos, A. M., 2015. Integrated Evaluation of The Performance of Composite Cool Thermal Insulation Materials. *Energy Procedia*, 78, 1581-1586.
- Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., Gibson, L. J., 2000. *Metal Foams: A design guide*. Elsevier.
- ASTM C393 / C393M-16, 2016. *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C273 / C273M-16, 2016. *Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- Atas, C., Sevim, C., 2010. On the Impact Response of Sandwich Composites with Cores of Balsa Wood and PVC Foam. *Composite Structures*, 93(1), 40-48.
- Aydincak, I., 2007. *Investigation of Design and Analyses Principles of Honeycomb Structures*. Master of Science Project Thesis, Middle East Technical University.
- Banghai, J., Zhibin, L., Fangyun, L., 2015. Failure Mechanism of Sandwich Beams Subjected to Three-Point Bending. *Composite Structures*, 133, 739-745.
- Bart-Smith, H., Hutchinson, J. W., Evans, A. G., 2001. Measurement and analysis of the Structural Performance of Cellular Metal Sandwich Construction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(8), 1945-1963.

- Bernard, M. L., Lagace, P. A., 1989. Impact Resistance of Composite Sandwich Plates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 8(5), 432-445.
- Berthelot, J. M., Lolive, É., 2002. Non-linear Behaviour of Foam Cores and Sandwich Materials, Part 1: Materials and Modelling. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 4(3), 219-247.
- Betts, D., Sadeghian, P., Fam, A., 2017. Structural Behaviour of Sandwich Panels Constructed of Foam Cores and Flax FRP Facings. *Canadian Society for Civil Engineering*.
- Bhuiyan, M. A., Hosur, M. V., Jeelani, S., 2009. Low-velocity Impact response of Sandwich Composites with Nanophased Foam Core and Biaxial ( $\pm 45^\circ$ ) Braided Face Sheets. *Composites Part B: Engineering*, 40(6), 561-571.
- BS4370., 1973. British Standard Methods of Test for Rigid Cellular Materials. Part 2, British Standards Institution, London.
- Cahyono, S. I., Widodo, A., Anwar, M., Diharjo, K., Triyono, T., Hapid, A., Kaleg, S., 2016. Light-weight sandwich Panel Honeycomb core with Hybrid Carbon-Glass Fiber Composite Skin for Electric Vehicle Application. In *American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings* 1(1717), 040025. American Institute of Physics Publishing.
- Cagdas, I. U., Taskin, M., 2018. A Modified Analytical Expression to Determine the Quasi-Static Pre-Indentation loads of Metal-faced Sandwich Beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, DOI:1099636218785829.
- Caprino, G., Teti, R., 1994. Impact and Post-Impact Behavior of Foam Core Sandwich Structures. *Composite Structures*, 29(1), 47-55.
- Caprino, G., Langella, A., 2000. Study of a Three-Point bending Specimen for Shear Characterisation of Sandwich cores. *Journal of Composite Materials*, 34(9), 791-814.
- Carlsson, L. A., Kardomateas, G. A., 2011. *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites* (121). Springer Science & Business Media.
- Chattopadhyay, D. K., Raju, K. V. S. N., 2007. Structural Engineering of Polyurethane Coatings for High Performance Applications. *Progress in Polymer science*, 32(3), 352-418.
- Coker, E. G., 1912. An Optical Determination of the Variation of Stress in a Thin Rectangular Plate Subjected to Shear. *Proceedings of the Royal Society of London. A*, 86(587), 291-319.
- Crupi, V., Montanini, R., 2007. Aluminium Foam Sandwiches Collapse Modes Under Static and Dynamic Three-Point Bending. *International Journal of Impact Engineering*, 34(3), 509-521.

- Daniel, I. M., Abot, J. L., Wang, K. A., 1999. Testing and Analysis of Composite Sandwich Beams. In Proceedings of International Conference on Computational Methods (12).
- Daniel, I. M., Abot, J. L., 2000. Fabrication, Testing and Analysis of Composite sandwich Beams. *Composites Science and Technology*, 60(12-13), 2455-2463.
- Daniel, I. M., Gdoutos, E. E., Wang, K. A., Abot, J. L., 2002. Failure Modes of Composite Sandwich Beams. *International journal of damage mechanics*, 11(4), 309-334.
- Davies, J. M. (Ed.), 2001. *Lightweight Sandwich Construction*. John Wiley & Sons.
- Deka, H., Karak, N., 2011. Bio- based Hyperbranched Polyurethane/Clay Nanocomposites: Adhesive, Mechanical, and Thermal Properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 22(6), 973-980.
- Deshpande, V. S., Fleck, N. A., 2001. Collapse of Truss Core Sandwich Beams in 3-Point Bending. *International Journal of Solids and Structures*, 38(36-37), 6275-6305.
- Diebels, S., Steeb, H., 2002. The Size Effect in Foams and Its Theoretical and Numerical Investigation. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 2028 (458)*, 2869-2883. The Royal Society.
- Donga, A., 2011. *Application of Sandwich Beam in Automobile Front Bumper for Frontal Crash Analysis*. Wichita State University, Doktora Tezi.
- EN 12090., 1997. *Thermal Insulating Products for Building Applications - Determination of Shear Behaviour*. CEN, European Committee for Standardization, European Standard.
- Fathi, A., Keller, J. H., Altstaedt, V., 2015. Full-Field Shear Analyses of Sandwich Core Materials Using Digital Image Correlation (DIC). *Composites Part B: Engineering*, 70, 156-166.
- Flores-Johnson, E. A., Li, Q. M., 2011. Experimental Study of the Indentation of Sandwich Panels with Carbon Fibre-Reinforced Polymer Face Sheets and Polymeric Foam Core. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1212-1219.
- Garcia, R., Weisshaar, T. A., McWithey, R. R., 1980. An Experimental and Analytical Investigation of the Rail Shear-Test Method as Applied to Composite Materials. *Experimental Mechanics*, 20(8), 273-279.
- Gabr, M.A., Gamsy, R., Abdellatif, M.H., 2016. Mechanical Properties of Metallic and Hybrid Polyurethane Foam Sandwich Composites. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 7(12), 975-983.

- Gdoutos, E. E., Daniel, I. M., Wang, K. A., 2002. Failure of Cellular foams Under Multiaxial Loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(2), 163-176.
- Gdoutos, E. E., Daniel, I. M., Wang, K. A., 2003. Compression Facing Wrinkling of Composite Sandwich Structures. *Mechanics of Materials*, 35(3-6), 511-522.
- Gdoutos, E., Daniel, I. M., 2008. Failure Modes of Composite Sandwich Beams. *Theoretical and Applied Mechanics*, 35(1-3), 105-118.
- Ghugal, Y. M., Shikhare, G. U., 2015. Bending Analysis of Sandwich Beams According to Refined Trigonometric Beam Theory. *J Aerospace Engineering & Technology*, 5(3), 27-37.
- Gibson, I. J., Ashby, M. F., 1982. The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A*, 382(1782), 43-59.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S., Robertson, C. I., 1982. The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A*, 382(1782), 25-42.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., 1997. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press.
- Grayley, M. E., 1966. Shear Stiffness of Sandwich Panels A Review of Test Methods. *The Aeronautical Journal*, 70(670), 950-951.
- Gullberg, O., Olsson, K. A., 1990. Design and Construction of GRP Sandwich Ship Hulls. *Marine structures*, 3(2), 93-109.
- Hakmi MR., 1988. Local Buckling of Sandwich Panels. University of Salford, Doktora Tezi.
- Hall, D. J., Robson, B. L., 1984. A Review of the Design and Materials Evaluation Programme for the GRP/Foam Sandwich Composite Hull of the RAN Minehunter. *Composites*, 15(4), 266-276.
- Howe, S., Thirsk, I., 1999. *De Havilland Mosquito. An Illustrated History*, Crécy.
- Juntikka, R., Hallstrom, S., 2007. Shear Characterization of Sandwich Core Materials Using Four-Point Bending. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 9(1), 67-94.
- Kawasaki, T., Zhang, M., Wang, Q., Komatsu, K., Kawai, S., 2006. Elastic Moduli and Stiffness Optimization in Four-Point Bending of wood-Based Sandwich Panel for Use as Structural Insulated Walls and Floors. *Journal of wood science*, 52(4), 302-310.

- Kelsey, S., Gellatly, R. A., Clark, B. W., 1958. The Shear modulus of Foil Honeycomb Cores: A Theoretical and Experimental Investigation on Cores Used in Sandwich Construction. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 30(10), 294-302.
- Koissin, V., Shipsha, A. 2009., Residual In-Plane Mechanical Properties of Transversely Crushed Structural Foams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(2-3), 199-211.
- Kuenzi, E. W. 1959. *Structural Sandwich Design Criteria*.
- Lingaiah, K., Suryanarayana, B. G., 1991. Strength and Stiffness of Sandwich Beams in Bending. *Experimental mechanics*, 31(1), 1-7.
- Loureiro, A. L., Da Silva, L. F., Sato, C., Figueiredo, M. A. V., 2010. Comparison of the Mechanical Behaviour Between Stiff and Flexible Adhesive Joints for the Automotive Industry. *The Journal of Adhesion*, 86(7), 765-787.
- Magnucki, K., Smyczyński, M., and Jasion, P., 2013. Deflection and Strength of a Sandwich Beam with Thin Binding Layers Between Faces and a Core. *Archives of Mechanics*, 65(4), 301-311.
- Mahfuz, H., Uddin, M. F., Rangari, V. K., Saha, M. C., Zainuddin, S., Jeelani, S., 2005. High Strain Rate Response of Sandwich Composites with Nanophased Cores. *Applied Composite Materials*, 12(3-4), 193-211.
- Mamalis, A. G., Spentzas, K. N., Pantelelis, N. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., 2008. A New Hybrid Concept for Sandwich Structures. *Composite Structures*, 83(4), 335-340.
- Marshall A. C., 1998. *Sandwich Construction*. Peters, S. T. (Ed.), *Handbook of Composites*, 254-290, Chapman & Hall, 1117, London.
- Moaveni, S., 2008. *Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS*. Prentice-Hall, 868, New Jersey.
- Mohan, K., Yip, T. H., Sridhar, I., Seow, H. P., 2007. Effect of Face Sheet Material on the Indentation Response of Metallic Foams. *Journal of Materials Science*, 42(11), 3714-3723.
- Mostafa, A., Shankar, K., Morozov, E. V., 2013a. Insight into the Shear Behaviour of Composite Sandwich Panels with Foam Core. *Materials & Design*, 50, 92-101.
- Mujika, F., 2006. On the Difference Between Flexural Moduli Obtained by Three-Point and Four-Point Bending Tests. *Polymer testing*, 25(2), 214-220.
- Niu, M. C. Y., 1997. *Airframe Stress Analysis and Sizing*. Hong Kong: Conmilit Press, 795.

- O'Connor, D. J., 1984. An Evaluation of Test Methods for Shear Modulus of Sandwich Cores. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(1), 3-12.
- Onck, P. R., Andrews, E. W., Gibson, L. J., 2001. Size Effects in Ductile Cellular Solids. Part I: Modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(3), 681-699.
- Osei-Antwi, M., De Castro, J., Vassilopoulos, A. P., Keller, T., 2013. Shear Mechanical Characterization of Balsa Wood as Core Material of Composite Sandwich Panels. *Construction and Building Materials*, 41, 231-238.
- Palkowski, H., Lange, G., 2005. Austenitic Sandwich Materials in the Focus of Research. *Metalurgija*, 11(3), 215-224.
- Pitarresi, G., Amorim, J., 2011. Indentation of Rigidly Supported Sandwich Beams with Foam Cores Exhibiting Non-Linear Compressive Behaviour. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13(5), 605-636.
- Pokharel, N., Mahendran, M., 2003. Experimental Investigation and Design of Sandwich Panels Subject to Local Buckling Effects. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(12), 1533-1552.
- Reis, L., Silva, A., 2009. Mechanical Behavior of Sandwich Structures Using Natural Cork Agglomerates as Core Materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(6), 487-500.
- Russell, B. P., Liu, T., Fleck, N. A., Deshpande, V. S., 2011. Quasi-static Three-Point Bending of Carbon Fiber Sandwich Beams with Square Honeycomb Cores. *Journal of Applied Mechanics*, 78(3), 031008.
- Sargin, T., 2018. Üç Ray Kayma Deneyi ile Rijit Köpüklerin Kayma Parametrelerinin Belirlenmesi. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- Sharmin, E., Zafar, F., 2012. Polyurethane: an Introduction. In *Polyurethane*. InTech.
- Shipsha, A., 2001. Failure of Sandwich Structures with Sub-Interface Damage. Institutionen För Flygteknik, Doktora Tezi.
- Šliseris, J., Rocēns, K., 2013. Optimization of Multispan Ribbed Plywood Plate Macrostructure for Multiple Load Cases. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(5), 696-704.
- Sokolinsky, V. S., Shen, H., Vaikhanski, L., Nutt, S. R., 2003. Experimental and Analytical Study of Nonlinear Bending Response of Sandwich Beams. *Composite Structures*, 60(2), 219-229.
- Steeves, C. A., Fleck, N. A., 2004a. Material Selection in Sandwich Beam Construction. *Scripta Materialia*, 50(10), 1335-1339.

- Steeves, C. A., Fleck, N. A., 2004b. Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-Point Bending. Part I: Analytical Models and Minimum Weight Design. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(4), 561-583.
- Studziński, R., Pozorski, Z., Garstecki, A., 2009. Optimal Design of Sandwich Panels with a Soft Core. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 47(3), 685-699.
- Sung, G., Gwon, J. G., Kim, J. H., 2016. Characteristics of Polyurethane Adhesives with Various Uretonimine Contents in Isocyanate and Average Alcohol Functionalities. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(31).
- Tajbakhsh, S., 1992. Developments in Sandwich Construction. University of Salford, Doktora Tezi, Greater Manchester.
- Tagarielli, V. L., Fleck, N. A., Deshpande, V. S., 2004. Collapse of Clamped and Simply Supported Composite Sandwich Beams in Three-Point Bending. *Composites Part B: Engineering*, 35(6-8), 523-534.
- Tekoglu, C., Onck, P. R., 2005. Size Effects in the Mechanical Behavior of Cellular Materials. *Journal of Materials Science*, 40(22), 5911-5917.
- Thiyagasundaram, P., Sankar, B. V., Arakere, N. K., 2010. Elastic Properties of Open-Cell Foams With Tetraikadecahedral Cells Using Finite Element Analysis. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 48(4), 818-828.
- Toson, B., Viot, P., Pesqué, J. J., 2014. Finite Element Modeling of Balsa Wood Structures Under Severe Loadings. *Engineering Structures*, 70, 36-52.
- Triantafillou, T. C., Gibson, L. J., 1987. Failure Mode Maps for Foam Core Sandwich Beams. *Materials Science and Engineering*, 95, 37-53.
- Triantafillou, T. C., 1997. Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(2), 65-69.
- Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 2003. *Advanced Strength and Applied Elasticity*. Prentice Hall PTR.
- URL-1, 2018. Erişim Tarihi: 8.10.2018. <https://www.tutkalmarket.com/hali-saha-tutkali-poliuretan6-1-kg-7>.
- Wada A, Kawasaki T, Minoda Y, Kataoka A, Tashiro S, Fukuda H., 2003. A Method to Measure Shearing Modulus of the Foamed Core for Sandwich Plates. *Compos Struct*, 60(4), 385-390.
- Wang, H., Ramakrishnan, K. R., Shankar, K., 2016. Experimental Study of the Medium Velocity Impact Response of Sandwich Panels with Different Cores. *Materials & Design*, 99, 68-82.

- Whitney, J. M., Stansbarger, D. L., Howell, H. B., 1971. Analysis of the Rail Shear Test-Applications and Limitations. *Journal of Composite Materials*, 5(1), 24-34.
- Xie, Z., Zheng, Z., Yu, J., 2012. Localized Indentation of Sandwich Beam with Metallic Foam Core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 14(2), 197-210.
- Yan, J. B., Liew, J. Y. R., Zhang, M. H., Wang, J. Y., 2014. Ultimate Strength Behaviour of Steel–Concrete–Steel Sandwich Composite Structures, Part 1: Experimental and Analytical Study. *Steel Composite Structures International Journal*, 17(6), 907-927.
- Zenkert, D., Shipsha, A., Persson, K., 2004. Static Indentation and Unloading Response of Sandwich Beams. *Composites Part B: Engineering*, 35(6-8), 511-522.
- Zienkiewicz, O.C., 1979. *The Finite Element Method*. McGraw-Hill, 787. New Delhi.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Melis TAŞKIN

Doğum Yeri ve Yılı : Kocaeli, 1986

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : melistskn@gmail.com, melistaskin@sdu.edu.tr



### Eğitim Durumu

Lise : Gebze Anadolu Lisesi, 2004

Lisans : Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat  
Mühendisliği Bölümü, 2009

Yüksek Lisans : Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat  
Mühendisliği Bölümü, 2013

### Mesleki Deneyim

Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Araştırma Görevlisi :2012-Halen

### Yayınlar

Cagdas, I.U., and Taskin, M., 2018. A modified analytical expression to determine the quasi-static pre-indentation loads of metal-faced sandwich beams. Journal of Sandwich Structures and Materials, DOI:1099636218785829.

Aliyev, R., Cagdas, I.U., Sargin, T., Taskin, M., 2018. A modified three rail shear test procedure for rigid foamed materials. Journal of Cellular Plastics, submitted.