

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ÜÇ RAY KAYMA DENEYİ İLE RİJİT KÖPÜKLERİN KAYMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Tuğçe SARGIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAYIS 2018

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ÜÇ RAY KAYMA DENEYİ İLE RİJİT KÖPÜKLERİN KAYMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Tuğçe SARGIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAYIS 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ RAY KAYMA DENEYİ İLE RİJİT KÖPÜKLERİN KAYMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Tuğçe SARGIN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAYIS 2018

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ RAY KAYMA DENEYİ İLE RİJİT KÖPÜKLERİN KAYMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

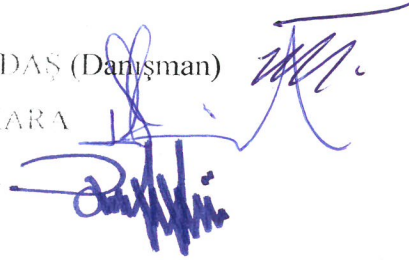
Tuğçe SARGIN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 02/05/2018 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ (Danışman)

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Dr. Öğr. Üyesi Rifat TÜR



ÖZET

ÜÇ RAY KAYMA DENEYİ İLE RİJİT KÖPÜKLERİN KAYMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Tuğçe SARGIN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Mayıs 2018; 46 sayfa

Sandviç yapıların yapısal davranışlarını daha iyi anlayabilmek ve performanslarını arttırmak için, kullanılan çekirdek malzemelerinin kayma modülü ve kayma dayanımı değerlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu nedenle bu çalışmada, hafif bir polistren köpük (PK) çekirdek malzemesinin ilgili malzeme düzlemlerindeki kayma modülleri ve kayma dayanımı değerleri, üç ray kayma deneyi (ÜRKD) yapılarak elde edilmiştir.

Öncelikle rijit bir ÜRKD düzeneği imal edilmiştir. Kuvvetli düzlem için üç ve zayıf düzlem için üç olmak üzere toplam altı adet deney yapılmıştır. Elde edilen deney neticeleri kullanılarak sayısal ve analitik modeller vasıtasıyla PK çekirdek malzemesinin kayma modülü değerleri yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Sayısal model, ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuş ve analitik model için kayma deformasyonunun dahil edildiği klasik kiriş teorisi kullanılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ÜRKD'nin kayma modüllerini belirlemede kullanılabileceği ama kayma dayanımının belirlenmesinde ihmal edilemeyecek oranda hatalı sonuçlar verdiğinden bu maksatla kullanımının uygun olmadığını göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Kayma dayanımı, Kayma modülü, Rijit köpük, Üç ray kayma deneyi

JÜRİ: Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Dr. Öğr. Üyesi Rıfat TÜR

ABSTRACT

DETERMINATION OF SHEAR PARAMETERS OF RIGID FOAMS WITH THREE RAIL SHEAR TEST

Tuğçe SARGIN

MSc. Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

May 2018; 46 pages

In order to better understand the structural behavior of sandwich structures and to increase their performance, the shear modulus and shear strength values of the core materials used have to be determined accurately. Therefore in this study, the shear modulus and shear strength values of a lightweight polystyrene foam (PF) core material in the relevant material planes are obtained by performing three rail shear test (TRST).

First, a rigid TRST apparatus had been manufactured. A total of 6 experiments had been performed; 3 for the strong plane and 3 for the weak plane. Using the experimental results obtained, the shear module of the PF core material are approximately calculated using the numerical and analytical models. ANSYS program is used for the numerical model and the classical beam theory is used for the analytical model, where shear deformation is also considered.

The results obtained in this study show that TRST may be used to obtain the shear module but it should not be used to obtain the shear strength as the shear strength values obtained using this test are grossly in error.

KEYWORDS: Rigid foam, Shear modulus, Shear strength, Three rail shear test.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Asst. Prof. Dr. Rıfat TÜR

ÖNSÖZ

Desteęi ve yardımcı için danışmanım Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ, doktora öğrencisi Arş. Gör. Melis TAŞKIN, İnş. Müh. Böl. yüksek lisans öğrencileri Refik ALİYEV, Umut HEKİM, İsmail Selçuk YILMAZ ve yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda olan aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOD	5
3.1. Kullanılan Malzemeler	5
3.2. Polistren Köpük Malzemesinin Basma Deneyleri.....	6
3.3. Deneysel Çalışma	7
3.3.1. Üç ray kayma deneyi kurulumu.....	9
3.3.2. Numunelerin üretimi ve deney düzeneğine yerleştirilmesi	9
3.3.3. Üç ray kayma deneyinin yapılması.....	10
3.4. Sayısal Modellemelerin Yapılması	10
3.5. Analitik Çözüm Bulunması	10
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	13
4.1. Üç Ray Kayma Deneyi Sonuçlarından Kayma Modüllerinin ve Kayma Dayanımlarının Hesaplanması	13
4.2. Ansys Workbench Programıyla Kayma Modüllerinin Bulunması.....	16
4.2.1. Kuvvetli yöndeki numunenin modellenmesi	17
4.2.2. Zayıf yöndeki numunenin modellenmesi	24
4.3. Kayma Deformasyonunun Dahil Edildiği Kiriş Teorisine Göre Kayma Modüllerinin Bulunması	26
4.3.1. Kuvvetli yön için çekirdeğin kayma modülünü hesaplama.....	26
4.3.2. Zayıf yön için çekirdeğin kayma modülünü hesaplama	27
5. SONUÇLAR	28
6. KAYNAKLAR	29
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Üç Ray Kayma Deneyi İle Rijit Köpüklerin Kayma Parametrelerinin Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

02/05/2018

Tuğçe Sargın

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

I	: Atalet momenti
ε	: Birim şekil değiştirme
X_C	: Çekirdek malzemesinin basınç dayanımı
b_c	: Çekirdek malzemesinin genişliği
t_c	: Çekirdek malzemesinin kalınlığı
L_c	: Çekirdeğin uzunluğu
dk	: Dakika
δ	: Delta
δ_b	: Eğilme deformasyonu
E	: Elastisite modülü
σ	: Gerilme
γ	: Kayma birim şekil değiştirmesi
S	: Kayma dayanımı
δ_s	: Kayma deformasyonu
τ	: Kayma gerilmesi
G	: Kayma modülü
A	: Kesit alanı
V	: Kesme kuvveti
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapascal
m	: Metre
mm	: Milimetre

ms : Milisaniye

M : Moment

N : Newton

s : Saniye

P : Yük

Tezde kullanılan ondalık yazımda ondalık ayraç olarak nokta kullanılmıştır.

Kısaltmalar

PK : Polistren Köpük

RKD: Üç Ray Kayma Deneyi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kullanılan tutkal malzemesi	5
Şekil 3.2. Üç yönde yapılan basma deneyi ile bulunan polistren köpüğün gerilme- birim şekil değiştirme eğrileri	6
Şekil 3.3. Kayma deneyinin şematik görünüşü a) Deneyin ön görünüşü; b) A-A kesiti; c) B-B kesiti	8
Şekil 3.4. Deney kurulumu	9
Şekil 3.5. Sıcak tel kesici	9
Şekil 3.6. Numunenin hazırlanması	10
Şekil 3.7. Çekirdeğin eğilme, kesme ve toplam deformasyonlarının şematik görünüşü	11
Şekil 3.8. Numuneye etkiyen uç eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri	11
Şekil 4.1. Deforme olmuş numunelerin şematik görünümü	13
Şekil 4.2. a) Zayıf düzlemde test edilen numunelerin P_x - δ eğrileri; b) Kuvvetli düzlemde test edilen numunelerin P_x - δ eğrileri	13
Şekil 4.3. Zayıf düzlemde test edilen üçüncü numunenin a) deney öncesindeki görüntüsü; b) deney sonundaki deforme olmuş görüntüsü	14
Şekil 4.4. Kuvvetli düzlemde test edilen üçüncü numunenin a) deney öncesindeki görüntüsü; b) deney sonundaki deforme olmuş görüntüsü	14
Şekil 4.5. a) Zayıf düzlemde test edilen numunelerin τ - γ eğrileri; b) Kuvvetli düzlemde test edilen numunelerin τ - γ eğrileri	15
Şekil 4.6. Zayıf yönde test edilen ikinci numunenin kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirmesi eğrisinden eğri uydurma yöntemiyle kayma modülünün bulunması	16
Şekil 4.7. Kuvvetli yönde modellenecek sonlu eleman modeli	17
Şekil 4.8. Ansys Workbench'e malzeme özelliklerinin girilmesi	17

Şekil 4.9. Ansys Workbench’de analiz tipinin iki boyutlu yapılması	18
Şekil 4.10. Ansys Workbench’de modelin geometrisinin oluşturulması ve ardından yüzey yapılması	18
Şekil 4.11. Ansys Workbench’de düzlem gerilme elemanının seçili olmasına bakılması	19
Şekil 4.12. Ansys Workbench’de modellenen elemana kalınlık değerinin girilmesi	19
Şekil 4.13. Ansys Workbench’de oluşturulan modelin malzeme atamasının yapılması	20
Şekil 4.14. Ansys Workbench’de oluşturulan modele 4x4 8 düğümlü mesh tanımlanması	20
Şekil 4.15. Ansys Workbench’de toplam yük adım sayısının ve deneyde yük değeri okunan zaman değerlerinin girilmesi	21
Şekil 4.16. Ansys Workbench’de kuvvet tanımlama ve deneyde okunan yük değerlerinin kuvvet olarak girilmesi	21
Şekil 4.17. Ansys Workbench’de oluşturulan modele atanan sınır şartlarının ve kuvvetin görüntülenmesi	22
Şekil 4.18. Ansys Workbench’de oluşturulan modelde analiz yapılmadan önce istenilen çözümün eklenmesi	22
Şekil 4.19. Ansys Workbench’de analiz sonucunda modelin alt ucunda oluşan deformasyonların görüntülenmesi	23
Şekil 4.20. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan normal gerilmelerin görüntülenmesi	24
Şekil 4.21. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan kayma gerilmelerinin görüntülenmesi	24
Şekil 4.22. Zayıf yönde modellenecek sonlu eleman modeli	24
Şekil 4.23. Ansys Workbench’de malzeme özelliklerinde elemanın düzlemine	

göre değişiklik yapılması	25
Şekil 4.24. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan normal gerilmelerin görüntülenmesi	25
Şekil 4.25. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan kayma gerilmelerinin görüntülenmesi	26



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kullanılan tutkal malzemesinin teknik özellikleri	6
Çizelge 3.2. Polistren köpük malzemesinin mekanik özellikleri	7



1. GİRİŞ

Sandviç paneller hafiflik, hızlı montaj, ısı yalıtımı, yüksek mukavemet, az maliyet vb. birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle, ülkemizde sandviç panel kullanımı özellikle yapı inşaatında giderek yaygınlaşmaktadır.

Sandviç yapısının performansını en üst düzeye çıkarmak ve yük taşıma kapasitesini tam olarak kullanmak için, çekirdeğin kesme davranışını tam olarak anlamak gerekir (Mostafa vd. 2013c). Bu nedenle bu çalışmada, piyasadan temin edilmiş bir polistren köpük (PK) malzemenin kayma modülü ve kayma dayanımı değerleri ilgili malzeme düzlemleri için elde edilmiştir.

Isı yalıtımı, yüksek mekanik dayanım vb. sahip olduğu özelliklerinden ve yaygın olarak kullanılan bir malzeme olmasından dolayı sandviç panellerde genelde çekirdek malzemesi olarak PK kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada test edilecek çekirdek malzemesi olarak PK seçilmiştir.

Sandviç panel düzlemlerine dik etkiyen dış yükler, çekirdek malzemesinde özellikle kayma gerilmesi oluşturur ve kesme kuvvetinin neredeyse tamamını çekirdek taşıyacaktır. Çekirdek, atalet momentini artırarak yüksek eğilme rijitliği sağlamasının yanı sıra çekmeye maruz dış yüzey ile basınca maruz dış yüzey arasındaki kesmenin iletilmesi için kritik önem taşır (Mostafa vd. 2013c).

Çekirdeğin malzeme parametreleri genellikle dış plakaların parametrelerinden daha büyük sapmalar sergiler (Chuda-Kowalska 2010). Bu parametreler, plakanın yer değiştirmelerini çok etkiler ve sıkıştırılmış dış plakanın yerel stabilitesinde (buruşma) belirleyici rol oynarlar (Chuda-Kowalska 2010). Bu yüzden çekirdek malzemesinin mekanik özellikleri tasarım ve kalite kontrol için önemlidir.

Sandviç yapıların genellikle çekirdeğin kesilmesi veya çekirdek-dış yüz ayrışması sebebi ile göçtükleri gözlemlenmiştir (Mostafa vd. 2013c). Ancak, yaygın olan göçme türü çekirdeğin kesilmesidir (Gdoutos 2002). Bu sebeple, çekirdek malzemesinin kayma dayanımının hassas olarak belirlenmesi gerekir. Panelin kayma dayanımını ise çekirdeğin kayma dayanımı belirlemektedir. Çekirdek, düşük kayma dayanımına sahipse çekirdeğin kusuru ani olabilir (Mostafa vd. 2013c). Öte yandan çekirdek, yüksek kayma dayanımına sahipse çekirdek ile dış yüzey plakaları arasındaki yapışma başarısız olabilir (Mostafa vd. 2013c).

Sandviç panellerde kayma gerilmelerine bağlı deplasman, eğilmeye bağlı deplasmandan çok daha fazladır. Kayma gerilmelerine bağlı deplasman ise neredeyse tamamen çekirdeğin kayma modülüne bağlıdır. Kayma modülü ayrıca panel genişliği ve derinliği gibi sandviç paneller ile ilgili önemli tasarım parametrelerinin belirlenmesinde de çok önemli bir rol oynar.

Yukarıdaki paragraflarda bahsedilen nedenlerden dolayı çekirdek malzemesinin kayma parametrelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada çekirdek malzemesinin kayma modül ve dayanım değerlerinin deneysel, analitik ve sayısal yöntemler ile belirlenmesi konusu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, göz önünde bulundurulmuş malzemenin literatürde bulunan değerler ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, PK çekirdek malzemesinin kayma modülleri ve dayanım değerlerini belirlemek için, basitliği, eksantrik yükten kaynaklanan istenmeyen deformasyonu ortadan kaldırması, gerilme dağılımının saf kaymaya yakın olacağının tahmin edilmesi gibi sebeplerden dolayı üç ray kayma deneyi (ÜRKD) seçilmiştir.

Öncelikle, kullanılan köpük çekirdek malzemesi için her üç malzeme eksen düzleminde elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Rijit köpüğün malzeme özellikleri, içeriğindeki kimyasal bileşenlere, karıştırma metoduna (el karışımı veya makine karışımı), ve hücre yapısına bağlıdır (Hakmi 1988). Bu nedenle yapısal analiz gerçekleştirilmeden önce çekirdek malzemesi mekanik özellikleri belirlenmelidir.

Daha sonra, rijit bir ÜRKD düzeneği imal edilmiştir. Üçü kuvvetli düzlem ve üçü zayıf düzlem için olmak üzere, toplam altı adet deney yapılmıştır. Deneylerden elde edilen yük-deplasman eğrilerinin doğrusal kısımları kullanılarak sayısal ve analitik modeller vasıtasıyla PK çekirdek malzemesinin kayma modülü değerleri yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Sayısal model, ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuş ve karşılaştırma maksadıyla kullanılmış olan analitik model için de kayma deformasyonunun dahil edildiği klasik kiriş teorisinden faydalanılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Rijit köpüklerin kayma parametreleri, ASTM C273 (BS 4370, DIN 53427 ve ISO 1922), ASTM C393 ve EN 12090 standartlarına uygun kayma deneyleri uygulanarak elde edilebilir.

ASTM C393 standartına göre kayma modülü, üç veya dört nokta yükleme maruz bırakılan sandviç kiriş numuneleri ile yaklaşık olarak elde edilebilir. Dört nokta yükleme deneyi, Hakmi (1988) ve Mäkeläinen ve Holmijoki (1983) tarafından kullanılmıştır.

Çekirdek kayma dayanımı ve kayma modülünün, sandviç yapı tasarımı üzerinde yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılan deney yöntemi ASTM C273 ile en iyi şekilde belirlendiği ASTM C393'de belirtilmiştir. Ayrıca Mitra (2010)'da ve Mostafa vd. (2013a, b, c)'de de bu belirtilmiştir. ASTM C273'e göre, rijit köpüklerin kayma özellikleri, 50 mm'den daha az olmayan bir genişliğe sahip olan ve uzunluk/kalınlık oranı 12'den yüksek olan ince numunelerin iki karşıt yüzüne rijit bağlanan çelik plakalara zıt düzlemde uygulanan çekme gerilmesi veya basınç (çift ray kayma deneyi) ile elde edilebilir. Bu yüksek uzunluk/kalınlık oranının kullanılmasının gerilme yığılmalarını azalttığı ASTM C273'de belirtilmiştir. Bununla birlikte Hakmi (1988) ve Tajbakhsh (1992), yükleme çizgisinin çelik plakaların karşı köşelerinden geçmesi gerektiğini belirtmişlerdir. BS 4370, DIN 53427 ve ISO 1922'ye göre çift ray kayma deneyinde ise yükleme çizgisinin, numunenin merkez çizgisinden geçmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca Mäkeläinen ve Holmijoki (1983) tarafından sunulan grafiklerde çekirdeğin farklı türleri için farklı laboratuvarlardan ISO standartına göre yapılan çift ray kayma deneyleri arasında iyi bir uyuma olduğu görülmüştür (Hakmi 1988). O yüzden Hakmi (1988) ve Tajbakhsh (1992) çift ray kayma deneyini kalite kontrol deneyi olarak tavsiye etmiştir. Bu yöntemle benzer ray kayma deneyi Daniel ve Cho (2011) tarafından da kullanılmıştır. Bununla birlikte Grédiac ve Dufort (2002) ve Yoshihara vd. (2016), Deney yöntemi ASTM C273'de ortaya çıkan olumsuz etkileri araştırmışlar ve deney sırasında çekirdek malzemede saf kayma halinin bulunmadığını belirtmişlerdir. O'Connor (1989)'da sandviç çekirdeklerin kayma özellikleri için ASTM C273 ve BS 4370 deneyleri eleştirel olarak incelenmiştir.

Standart EN 12090'da tanımlanan 3 ray kayma deneyi (ÜRKD) de bazı çalışmalarda kullanılmıştır (Kilar vd. 2014; Wada vd. 2013). Kilar vd. (2014)'de bina altında ısı yalıtım tabakası olarak kullanılacak olan ekstrüde polistren malzemesinin ÜRKD ile monoton (değişmeyen) kesme yükleme deneyleri ve döngüsel kesme yükleme deneyleri yapılmıştır. Wada vd. (2013)'de ÜRKD ile çekirdek uzunluğunu ve çekirdek kalınlığı değiştirilerek çekirdek malzemesinin geometrisinin, üst tabaka malzemenin ve yükleme hızının kayma modülüne etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte Wada vd. (2013), bu yöntemle eksantrik yükün etkisi ortadan kaldırıldığını belirtmişlerdir ve ÜRKD sırasında önemli eğilmelerin meydana geldiğini göstermişlerdir. Ayrıca Davies (2001) tarafından bildirildiğine göre; Jungbluth ve Berner (1986) ve Hakmi (1988) tarafından bildirildiğine göre; Basu (1976) ÜRKD'nin, tam saf kayma olmaması nedeniyle düşük kayma modülü değerleri verdiğini belirtmişlerdir.

Literatürde alternatif ve standartlaşmış olmayan deney yöntemleri de bulunmaktadır. Yoshihara vd. (2016), XPS'nin elastisite modülünü ve kayma modülünü belirlemek için numuneler üzerinde uzunlamasına ve eğilmeli titreşim yöntemleri geliştirmişlerdir. Benzer bir titreşim deneyi tanımlanmıştır ve diğer deney yöntemleri ile karşılaştırma Hakmi (1988) tarafından bildirildiğine göre; Basu (1976) tarafından yapılmış ve titreşim çok kısa olduğu için önerilen titreşim deneyinin en yüksek kayma modülü değerini verdiği gösterilmiştir.

Penzien ve Didriksson (1964), "4 mafsallı çerçeve kayma deneyi" geliştirmişlerdir. Bu deney farklı çekirdek malzemeleri için Basu (1976), Davies (2001), Hakmi (1988) ve Tajbakhsh (1992) tarafından kullanılmıştır. Hakmi (1988), köşelerdeki yerel başarısızlığı (kusuru) önlemek için çekme kuvvetleri yerine basınç kuvvetleri uygulamanın daha iyi olacağını ve basınç yükleri iki köşegen karşıt köşesinden geçen kendi hareket çizgileriyle uygulandığında çekirdeğin saf kayma deformasyonu elde edildiğini bulmuştur. Ayrıca bu deney yöntemi için Hakmi (1988) tarafından bildirildiğine göre; Basu (1976) saf kaymanın yalnızca deneyin başlangıcında olduğunu belirtmiştir yani gerilmenin küçük değerleri için çekirdeğin gerçek kayma özelliklerini verdiğini belirtmiştir. Bu nedenle 4 mafsallı çerçeve kayma deneyi yöntemi yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Kayma modülünü elde etmek için burulma deneyi de düşünülmüştür (Roy ve Camping 2003; Chuda-Kowalska vd. 2010). Ancak silindirik numuneler gerektirmesinden ötürü burulma testi yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Gdoutos vd. (2002), ASTM C273'ün kusurlarını ortadan kaldıran Iosipescu deney bağlantı düzeneğine benzer Arcan deney düzeneği olarak adlandırılan bir deney düzeneği kullanmıştır. Ancak çentikler etrafında gerilme yığılmaları oluşacağından, bu testin iyi netice vermeyeceği değerlendirilmektedir.

Hücre sel malzemelerin kayma modülünü elde etmek için yardımcı olabilecek mikromekanik yaklaşımlar yapılmıştır (Subramanian ve Sankar 2012).

Yukarıda bahsedilen deney yöntemlerine göre basitliği, eksantrik yükten kaynaklanan istenmeyen deformasyonu ortadan kaldırması, gerilme dağılımının saf kaymaya yakın olacağını tahmin edilmesi sebebi ile ÜRKD'nin kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Malzemeler

Kullanılan polistren köpük (PK) malzemesi, 50 mm kalınlığında bir PK paneldir (model: Wallboard). 6 mm kalınlığında delikleri olan ahşap plakalar kullanılmıştır. Kullanılan iki parçalı tutkal Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılan tutkal malzemesi

Kullanılan tutkalın üretici firma tarafından verilmiş olan özellikleri aşağıda verilmiştir:

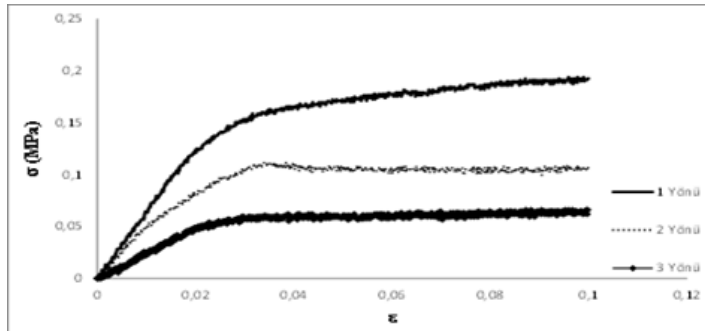
- Ağırlıkça 6 kısım poliüretan bazlı reçine (poliol) ve 1 kısım sertleştirici (katalizör) homojen ve tek bir renk olana kadar iyice karıştırılmalıdır.(1/6 oranında)
- Hazırlanan karışım 30 dakika içerisinde kullanılmalıdır.
- Uygulanacak yüzey temiz, yağsız ve kuru olmalıdır.
- Karışım tarakla veya spatula vasıtası ile yüzeye tatbik edilir.
- Kuruma veya dokunabilme kürlenmesi süresi 5-7 saattir, ortam sıcaklığına bağlı olarak bu süre değişebilir.
- Mekanik dayanıklılık 12-14 saat.
- Kimyasal dayanıklılık 7 gün sonradır.
- Kullanım miktarı $900-1200 \text{ gr/m}^2$ (zeminin düzgünlüğüne göre değişebilir).
- Reçine ve sertleştirici kısmı inceltilmez. Net:(A+B)=7 kg ürün ihtiva eder.

Çizelge 3.1. Kullanılan tutkal malzemesinin teknik özellikleri

Sertlik	75-80
Malzeme Yapısı	Çift bileşenli poliüretan reçine ve sertleştirici
Bağlayıcı Madde	Poliüretan reçine
Yoğunluk	Ana malzeme 1.60 gr/cm ³ / sertleştirici 1.22 gr/cm ³
Karışım Oranı	6/1 kg ağırlıkça
Uygulama Süresi (23 °C) de	30 Dakika
Katılma Başlangıcı	25 °C /+40 °C ısısında 45. Dakika
Isı dayanıklılığı	-40 °C/+280 °C
Kürünü Tamamlama (20 °C)	5-7 saat
Çevreye uyum	Çevreye olumsuz etkisi yok
Sağlığa uygunluk	Sağlığa zararlı değildir
UV Işınlara	UV dayanıklıdır

3.2. Polistren Köpük Malzemesinin Basma Deneyleri

PK malzemesine BS-EN826 standartına göre her üç malzeme düzlemi için yapılan basma deneyi ile bulunan σ - ϵ eğrileri Şekil 3.2’de ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



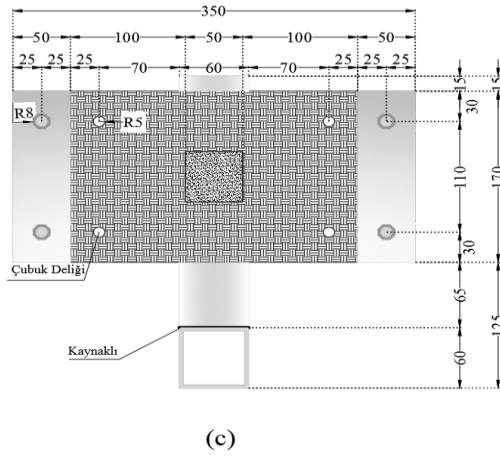
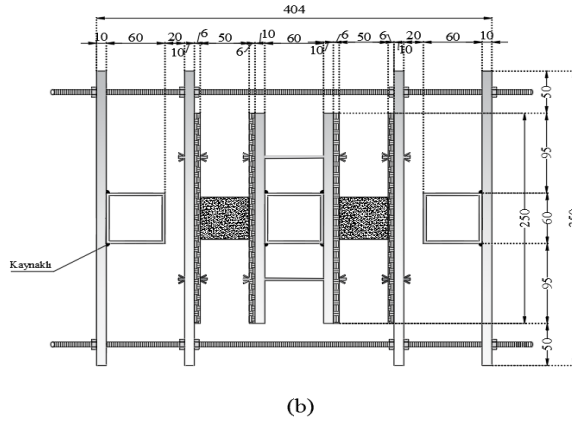
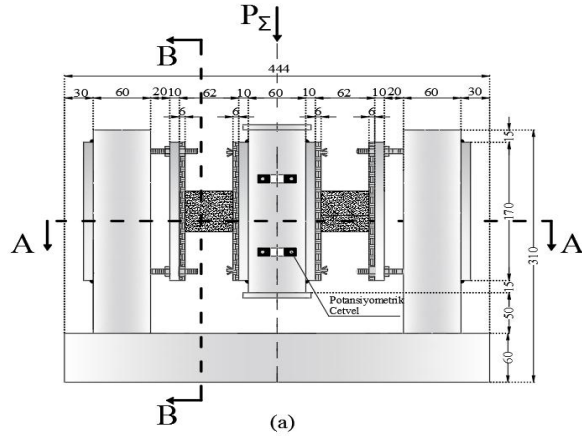
Şekil 3.2. Üç yönde yapılan basma deneyi ile bulunan polistren köpüğün gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Cagdas ve Taskin 2018)

Çizelge 3.2. Polistren köpük malzemesinin mekanik özellikleri (Cagdas ve Taskin 2018)

Mekanik Özellik	Tanım	Değer
ρ (kg/m ³)	Yoğunluk	23.40
E_1^{XPS} (MPa)	1 (köpük yükselme) yönündeki elastisite modülü	6.33
E_2^{XPS} (Mpa)	2 yönündeki elastisite modülü	4.41
E_3^{XPS} (Mpa)	3 yönündeki elastisite modülü	2.40
$X_{C,1}^{XPS}$ (Mpa)	1 yönündeki basınç dayanımı	0.19
$X_{C,2}^{XPS}$ (Mpa)	2 yönündeki basınç dayanımı	0.11
$X_{C,3}^{XPS}$ (Mpa)	3 yönündeki basınç dayanımı	0.07
G_{12}^{XPS} (Mpa)	1-2 düzlemi için kayma modülü	4.32
G_{23}^{XPS} (Mpa)	2-3 düzlemi için kayma modülü	3.31
S_{12}^{XPS}	1-2 düzlemi için kayma dayanımı	0.16
S_{23}^{XPS}	2-3 düzlemi için kayma dayanımı	0.10

3.3. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, PK çekirdek malzemesinin kayma modülü ve kayma dayanımı değerlerini bulmak için üç ray kayma deneyi (ÜRKD) kullanılmıştır. Şekil 3.3'te kayma deneyi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kayma deneyinin şematik görünüşü **a)** Deneyin ön görünüşü; **b)** A-A kesiti; **c)** B-B kesiti

3.3.1. Üç ray kayma deneyi kurulumu

Deneyde kullanılan deplasman kontrollü elektromekanik deney makinesine (model: RANTEK-100) uygun, Şekil 3.4'te gösterilen rijit bir çelik çerçeve oluşturulmuştur. Çerçevenin en dıştaki çelik plakaları, deney makinesinin üzerine dayanan bir taban profiline kutu profillerle kaynak yaptırılarak tutturulmuştur. Daha sonra farklı numune boyutuna göre ayarlanabilmesi ve numunelerin yük uygulanmayan dış kısımlarında büyük eğilme deformasyonları oluşmaması için en dıştaki çelik plakalara tijle bağlanmış çelik plaka çifti yerleştirilmiştir. Bu yerleştirilen çelik plakalar ve en dıştaki çelik plakalar birbirine tek tijle bağlanmıştır. Bu sayede deney düzeneğinde, tutturma sisteminin gerçek davranışları yansıtılmıştır. En içte merkezdeki çelik plakalar ise tijle çerçevenin üstündeki yük hücresine monte edilmiştir. 100 kN kapasiteli bir yük hücresi (model: Puls Elektronik HT1-W) ve 0.01 mm doğruluk ve 100 mm hareket değerine sahip doğrusal bir potansiyometrik cetvel (model: Opkon), 8 kanallı veri kaydediciye (model: TESTART-Testbox 1001) bağlanmıştır. Yükleme hızı, atalet etkilerini ortadan kaldırmak için 2.2 mm / dk olarak seçilmiştir.



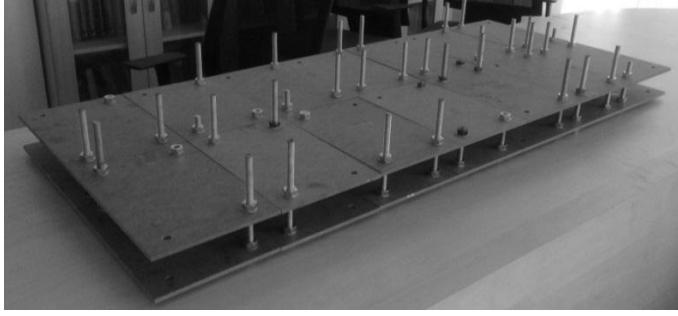
Şekil 3.4. Deney kurulumu

3.3.2. Numunelerin üretimi ve deney düzeneğine yerleştirilmesi

Kalınlık yönü, PK kartı için köpük yükselme yönüdür. Numuneler, $b_c=50$ mm ve $h_c=50$ mm olacak şekilde numunelerin zarar görmesini önlemek amacıyla Şekil 3.5'te gösterildiği gibi bir sıcak tel kesici kullanılarak kesilmiştir. Sonra bu kübik numunelerin deney çerçevesine bağlanması için Şekil 3.6'daki gibi PK'yı eritmeyen bir poliüretan esaslı yapıştırıcıyla deliklere sahip ahşap plakalara yapıştırılmıştır ve çelik çubuklarla sabitlenmesi sağlanmıştır. Kürünü aldıktan sonra bu numuneler tijlerle deney çerçevesine bağlanmıştır. Böylece içteki çelik plakadan (raydan) ahşap plaka'ya aktarılan basınç yükü, sürtünme ile kesme kuvveti olarak PK'ya aktarılmıştır.



Şekil 3.5. Sıcak tel kesici



Şekil 3.6. Numunenin hazırlanması

3.3.3. Üç ray kayma deneyinin yapılması

Orta çifte basınç uygulanmıştır. Yük hücresi ve dönüştürücüler vasıtasıyla uygulanan basınç yükü (P) ve yüzeyler arasındaki bağıl deplasman (δ) ölçülmüştür. Ölçülen deney verileri 0.125 s (125 ms) zaman aralığında TestLAB Basic statik veri toplama yazılımı aracılığıyla kişisel bir bilgisayara kaydedilmiştir. $b_c=50$ mm ve $h_c=50$ mm olan kübik PK numuneleri üzerinde üçü kuvvetli ve üçü zayıf düzlem (sırasıyla 1-2 ve 2-3 düzlemi) için olmak üzere toplam altı deney yapılmıştır. Yük-deplasman verileri orantılı olup G_{12} değeri G_{13} değerine yakın olduğundan 1-3 düzleminde deney yapılmamıştır.

3.4. Sayısal Modellemelerin Yapılması

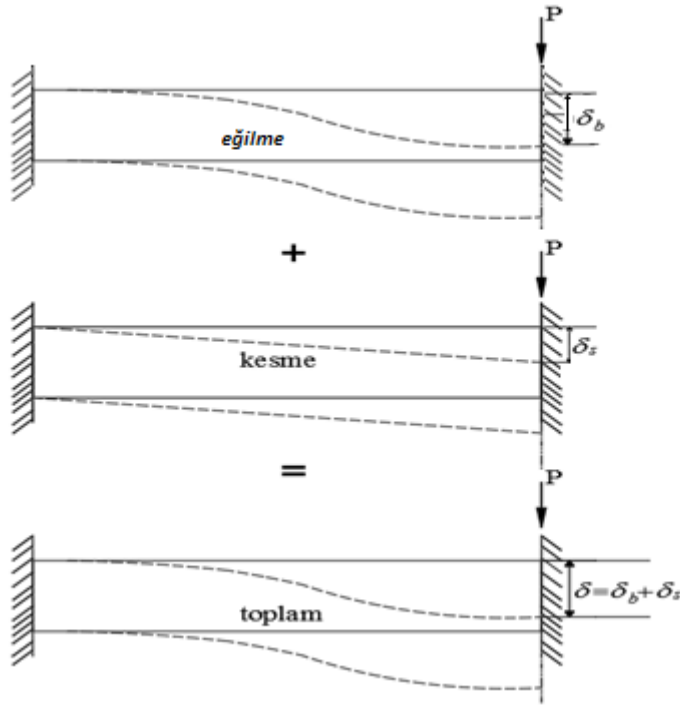
Sonlu elemanlar analizi belirli yüklere maruz kalan fiziksel problemi, matematiksel probleme dönüştürerek çözer (Bathe 2016). Doğruluk ölçütleri karşılanmazsa yeterli doğruluk ulaşana kadar değiştirilmiş çözüm parametreleriyle (mesela daha fazla eleman kullanarak) tekrarlar (Bathe 2016).

Sonlu elemanlar analizi için “Ansys Workbench Free Student Product” programı kullanılmıştır. Test edilen numuneler simetrik olduğundan, sonlu elemanlar analizinde bir numune modellenmiştir. Deneyden elde edilen P - δ eğrilerinin doğrusal kısımları kullanılarak sayısal modelden zayıf ve kuvvetli düzlemlerdeki kayma modülleri hesaplanmıştır.

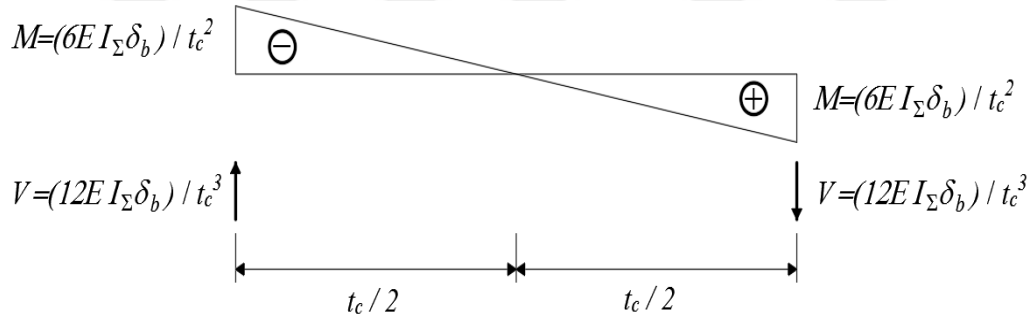
3.5. Analitik Çözüm Bulunması

Wada vd. (2013)’de de yararlanılmış olan ve basitliğinden dolayı seçilen giriş teorisinden yararlanılarak PK’nın kayma modülleri hesaplanmaya çalışılmıştır.

Çekirdeğin deformasyonu, Şekil 3.7’de şematik olarak gösterildiği gibi eğilme deformasyonu (δ_b) ve kayma deformasyonunun (δ_s) toplamı olacaktır, ancak bu şekil kalınlık yönünde abartılmıştır.



Şekil 3.7. Çekirdeğin eğilme, kesme ve toplam deformasyonlarının şematik görünüşü



Şekil 3.8. Numuneye etkiyen uç eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri

Şekil 3.8’de gösterildiği gibi bulunan kesme kuvveti formülünden eğilme deformasyonu çekildiğinde aşağıdaki (3.1)’deki formül elde edilmiştir:

$$\delta_b = \frac{Pt_c^3}{12E_{c0}I_c} \quad (3.1)$$

Burada P yük, t_c çekirdek kalınlığı, E_{c0} elastisite modülü ve I_c atalet momentidir.

$$I_c = \frac{t_c L_c^3}{12} \quad (3.2)$$

L_c , çekirdek malzemesinin uzunluğudur.

Kayma deformasyonu (δ_s) aşağıdaki formülden bulunur:

$$\delta_s = \frac{Pt_c}{b_c L_c G_{c0}} \quad (3.3)$$

b_c , çekirdek malzemesinin genişliği ve G_{c0} ise kayma modülüdür.

Toplam deformasyon ise aşağıdaki formülden bulunur:

$$\delta = \delta_b + \delta_s \quad (3.4)$$

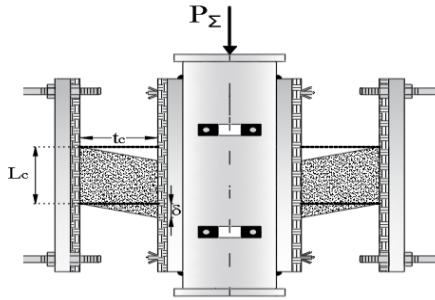
Deneyden elde edilen P - δ eğrilerinin doğrusal kısımları kullanılarak analitik modelden zayıf ve kuvvetli düzlemlerdeki kayma modülleri hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Polistren köpüğün (PK) kayma modülleri, üç ray kayma deneyinden (ÜRKD) bulunan P - δ eğrileri kullanılarak ANSYS programı ve kiriş teorisi vasıtasıyla hesaplanmıştır. PK'nın kayma dayanımları ise deneyden yaklaşık olarak bulunmuştur.

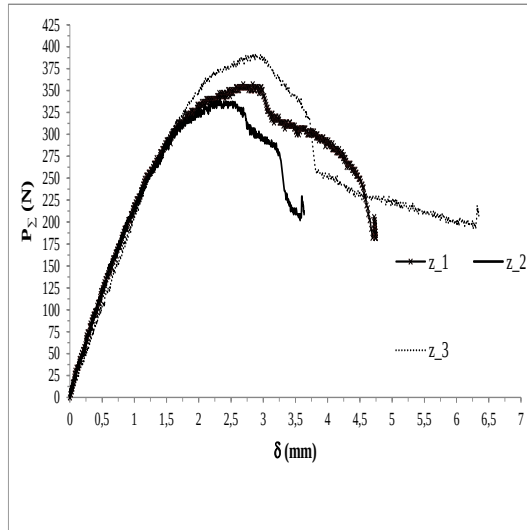
4.1. Üç Ray Kayma Deneyi Sonuçlarından Kayma Modüllerinin ve Kayma Dayanımlarının Hesaplanması

Aşağıdaki Şekil 4.1'de gösterildiği gibi deney sonucunda iki numuneye de etkiyen toplam yük (P_{Σ}) ve numunelerin en içte merkezdeki çelik plakalara bağlanmış taraflarında alt uçlarındaki deplasman (δ) değerleri ölçülmüştür.

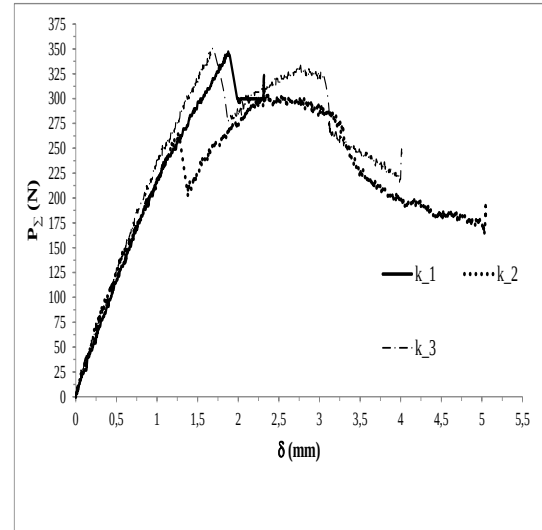


Şekil 4.1. Deforme olmuş numunelerin şematik görünümü

Deney sonucunda ölçülen yük-deplasman eğrileri aşağıda sunulmuştur. Grafikte her bir numune çiftinden kayma modülleri yüksek olanlar çizdirilmiştir.



(a)



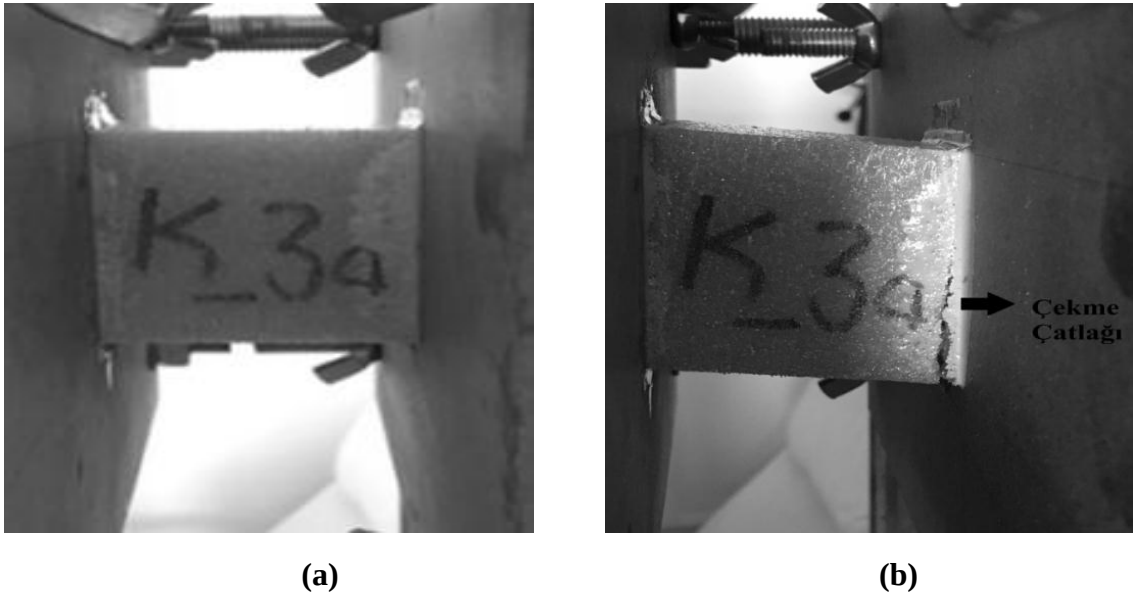
(b)

Şekil 4.2. a) Zayıf düzlemde test edilen numunelerin P_{Σ} - δ eğrileri; b) Kuvvetli düzlemde test edilen numunelerin P_{Σ} - δ eğrileri

Zayıf düzlemde test edilen numunelerde ortalama 250 N'a kadar neredeyse doğrusallık bozulmadan yük-deplasman değerleri artmıştır ve bu yük değeri için $\delta \approx 1.2$ mm'dir. Kuvvetli düzlemde test edilen numunelerde de bir numune çifti hariç ortalama 262 N'a kadar neredeyse doğrusallık bozulmadan yük-deplasman değerleri artmıştır ve ortalama $\delta \approx 1.2$ mm'dir. Başarısız olan numune çiftinin başarısızlığı numune üretiminden kaynaklı olabilir. Zayıf düzlemde test edilen numuneler biraz daha sünek davranmıştır (Şekil 4.2 a).



Şekil 4.3. Zayıf düzlemde test edilen üçüncü numunenin **a)** deney öncesindeki görüntüsü; **b)** deney sonundaki deforme olmuş görüntüsü



Şekil 4.4. Kuvvetli düzlemde test edilen üçüncü numunenin **a)** deney öncesindeki görüntüsü; **b)** deney sonundaki deforme olmuş görüntüsü

Benzer sonuçlar gösterdiğinden kuvvetli ve zayıf yönde test edilen numunelerden bir tanesinin görüntüleri sunulmuştur. Deney sırasında, numunelerin yan yüzeylerinin birinde düşey yönde çatlakların oluşmasından sonra yük seviyesinde ani azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca numunede saf kayma durumu olmadığı anlaşılmıştır.

Bulunan yük-deplasman eğrileri, aşağıda verilen (4.1) ve (4.2) formülleriyle Şekil 4.5'deki kayma gerilmesi (τ)-kayma birim şekil değiştirmesi (γ) eğrilerine dönüştürülmüştür:

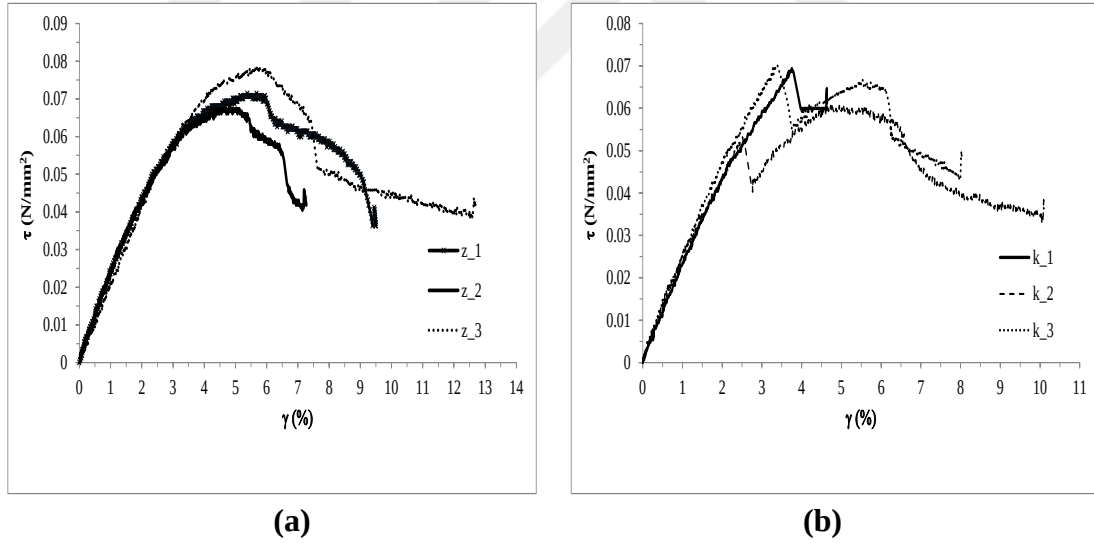
$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{P_z}{2L_c b_c} \quad (4.1)$$

Burada τ kayma gerilmesi, V kesme kuvveti ve A kesit alanıdır. Ayrıca P_z , L_c ve b_c sırasıyla toplam yük, çekirdek malzemesinin uzunluğu ve genişliğidir.

$$\gamma = \frac{\delta}{t_c} \quad (4.2)$$

γ kayma birim şekil değiştirmesi, δ deplasman ve t_c ise çekirdek kalınlığıdır.

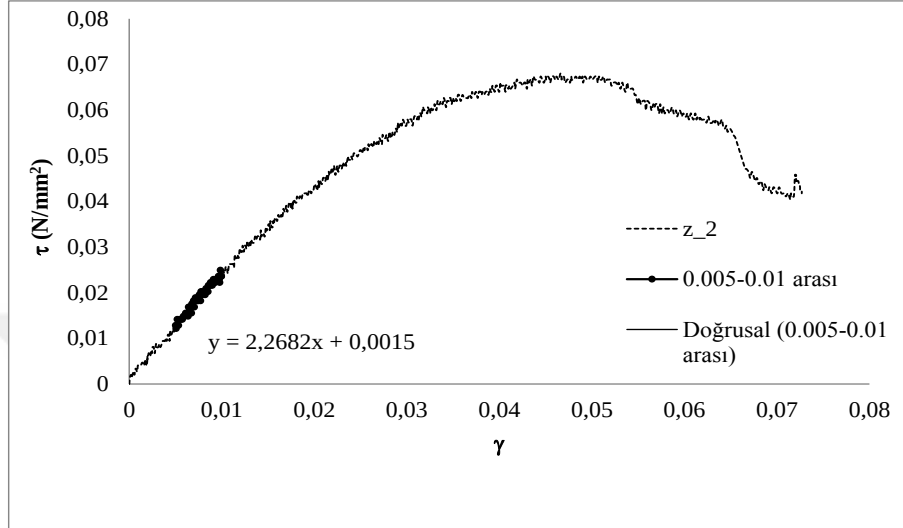
Bulunan kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirmesi eğrileri aşağıda sunulmuştur:



Şekil 4.5.a) Zayıf düzlemde test edilen numunelerin τ - γ eğrileri; **b)** Kuvvetli düzlemde test edilen numunelerin τ - γ eğrileri

$$G_c = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.3)$$

Çekirdeğin kayma modülü, (4.3) formülünden görüldüğü gibi kayma gerilmesi (τ)-kayma birim şekil değiştirmesi (γ) eğrisinin elastik bölgedeki lineer kısmının eğiminden bulunabilir. τ - γ eğrisinin başlangıç kısmında numunenin ezilmesinden kaynaklı nonlineer davranış olabileceğinden dolayı burada kayma modülü değerleri, $\gamma=0.005$ ile 0.01 arasındaki kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirmesi eğrilerine eğri uydurma yöntemiyle eğimden bulunmuştur.



Şekil 4.6. Zayıf yönde test edilen ikinci numunenin kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirmesi eğrisinden eğri uydurma yöntemiyle kayma modülünün bulunması

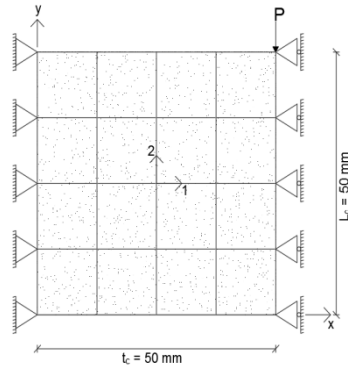
Test edilen zayıf yöndeki numune için çekirdeğin ortalama kayma modülü 2.18 MPa bulunmuştur. Test edilen kuvvetli yöndeki numune için çekirdeğin ortalama kayma modülü ise 2.19 MPa bulunmuştur.

Kayma dayanımı, malzemenin kalıcı deformasyon olmadan veya kopmadan önce taşıyabileceği maksimum kayma gerilmesidir. Test edilen zayıf yöndeki numune için çekirdeğin kayma dayanımı 0.07 MPa bulunmuştur. Test edilen kuvvetli yöndeki numune için çekirdeğin kayma dayanımı ise 0.07 MPa bulunmuştur. Ancak sayısal modelden de görüleceği gibi kayma gerilmesi dağılımlarının uniform olmamasından ve numune köşelerinde gerilme yığılmalarının meydana gelmesinden dolayı bu deneysel olarak elde edilen kayma dayanımı değerleri yaklaşık değerlerdir.

4.2. Ansys Workbench Programıyla Kayma Modüllerinin Bulunması

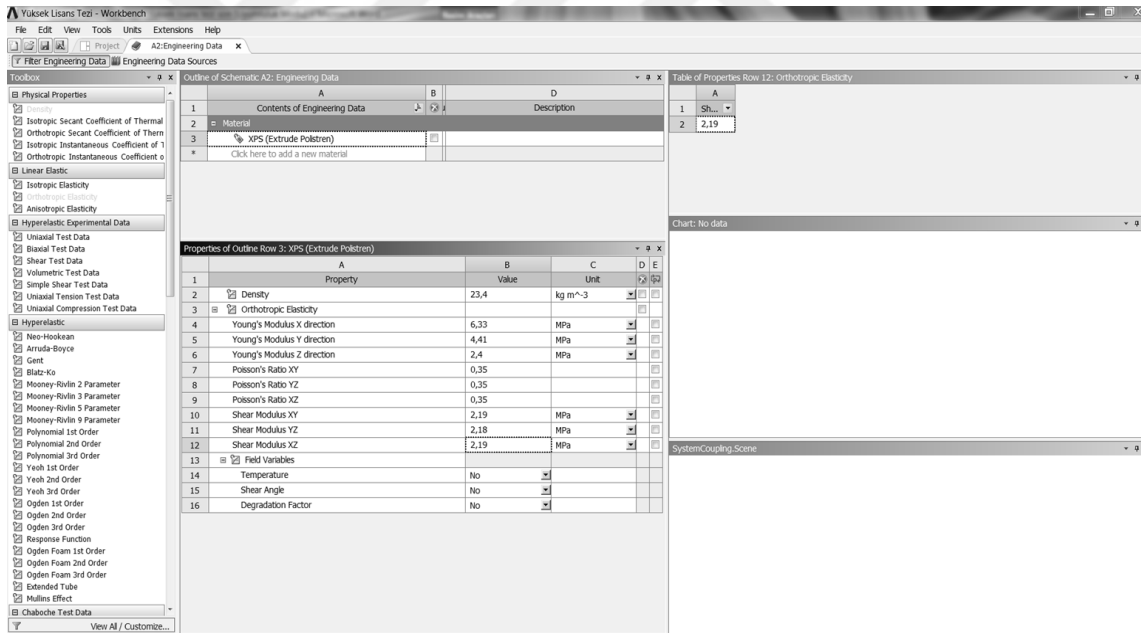
Kuvvetli ve zayıf yönde test edilen numune, ANSYS programında düzlem gerilme elemanı olarak ayrı ayrı modellenmiştir.

4.2.1. Kuvvetli yöndeki numunenin modellenmesi



Şekil 4.7. Kuvvetli yönde modellenecek sonlu eleman modeli

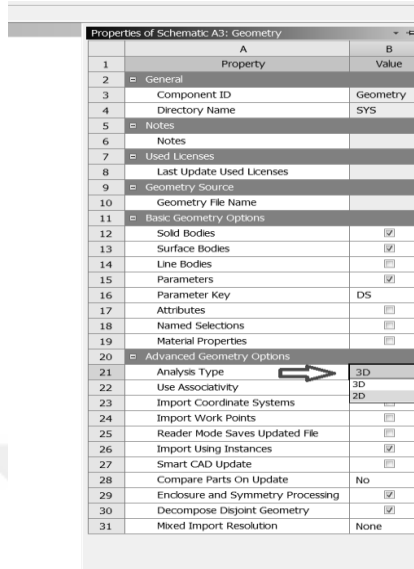
Yukarıdaki Şekil 4.7’de gösterilen model tanımlanmıştır. Malzeme simetrisi olduğundan Ansys Workbench’te Static Structural > Engineering Data’da çekirdek malzemesi ortotrop malzeme olarak aşağıdaki Şekil 4.8’de gösterildiği gibi malzeme girdileri girilmiştir.



Şekil 4.8. Ansys Workbench’e malzeme özelliklerinin girilmesi

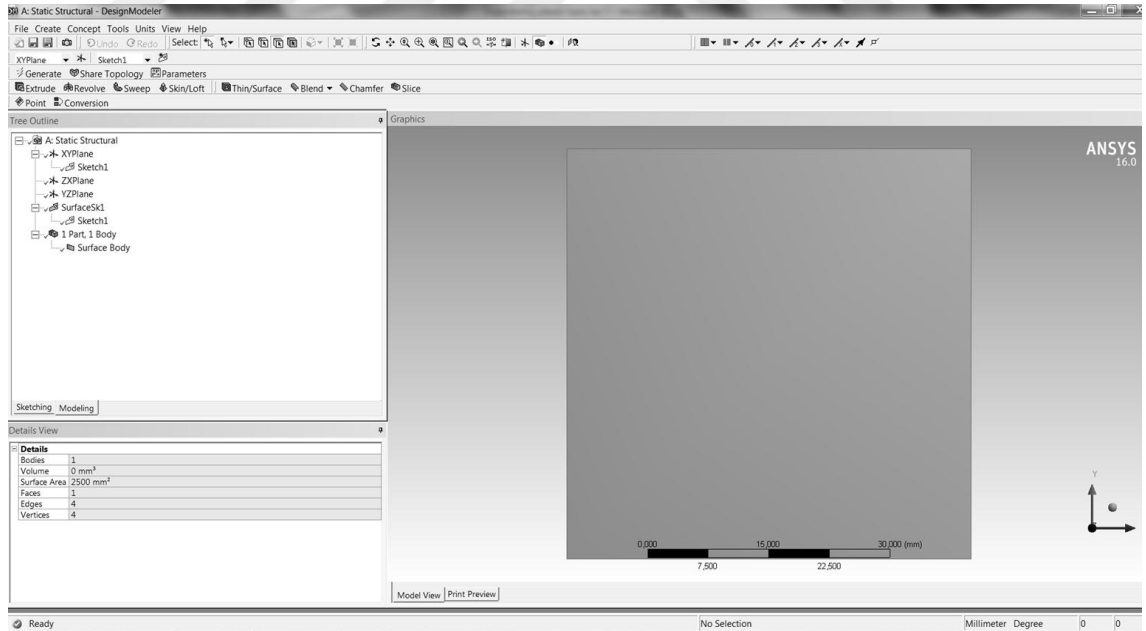
Elastisite modülleri, basma deneyi ile bulunan σ - ε eğrisinden hesaplanmıştır. Girilen kayma modülü değerleri de ÜRKD ile bulunan sonuçlardır. Ancak amaç deneyden bulunan P - δ değerlerine uydurarak kayma modüllerini bulmak olduğundan daha sonra kayma modülü değerleri değiştirilmiştir. Poisson oranı etkisi, elastisite modülü ve kayma modülünü belirlemede önemli değildir (Yoshihara vd. 2016). O yüzden Gdoutos vd. (2002) tarafından yapılmış bir çalışma referans alınarak Poisson oranı 0.35 alınmıştır.

Static Structural > Geometry (sağ tuş) > Properties'den sağ tarafta açılan Properties Of Schematic A3: Geometry'den Advanced Geometry Options sekmesi altındaki Analysis Type 2D yapılmıştır.



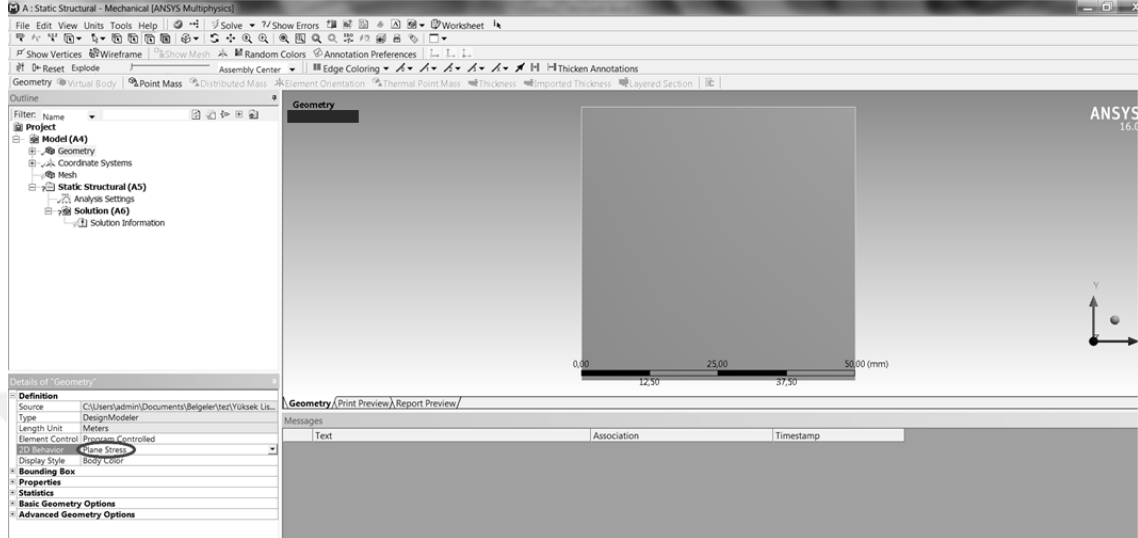
Şekil 4.9. Ansys Workbench'de analiz tipinin iki boyutlu yapılması

Static Structural > Geometry'de sırayla geometri daha sonra ise yüzey oluşturulmuştur.



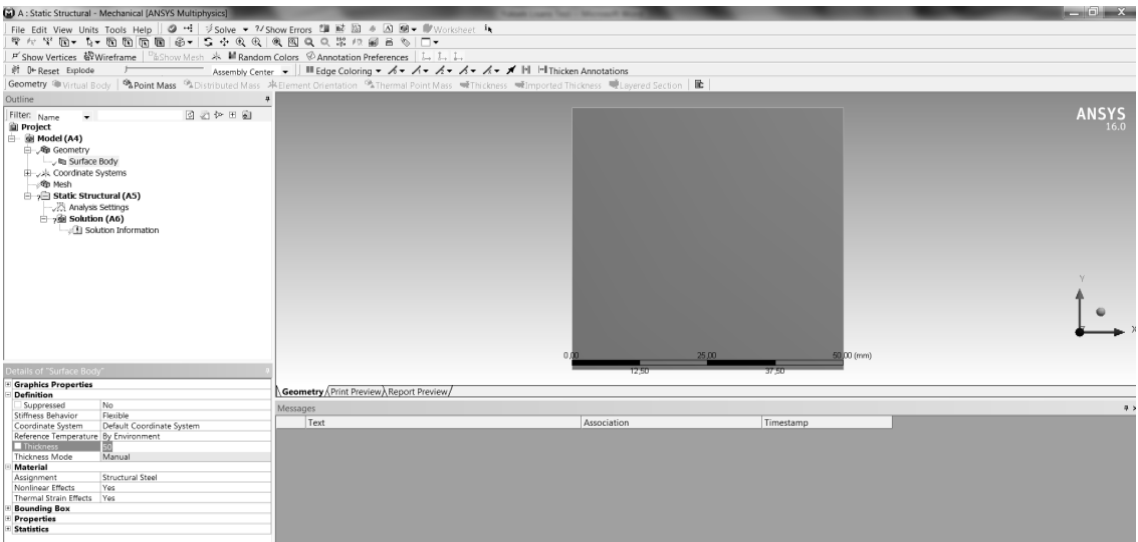
Şekil 4.10. Ansys Workbench'de modelin geometrisinin oluşturulması ve ardından yüzey yapılması

Static Structural > Model’den Mechanical sayfası açıldıktan sonra Outline kısmındaki Project > Model (A4) > Geometry’e tıklanıp sağ alt kısımda ekrana gelen Details of Geometry > Definition > 2D Behavior’da (iki boyutlu davranış) Plane Stress’in (düzlem gerilme) seçili olduğuna dikkat edilmelidir.



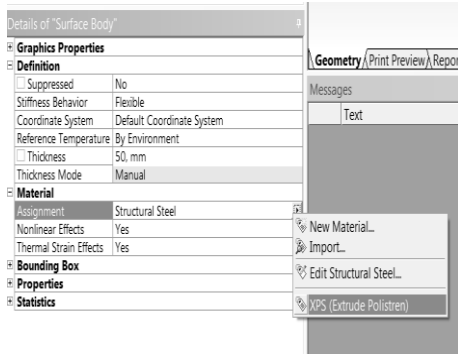
Şekil 4.11. Ansys Workbench’de düzlem gerilme elemanın seçili olmasına bakılması

Kalınlık değerinin girilmesi için Surface Body’e tıklanarak ekrana gelen sol alt kısımdaki Details of Surface Body > Definition sekmesi altındaki Thickness’a değer girilmiştir.



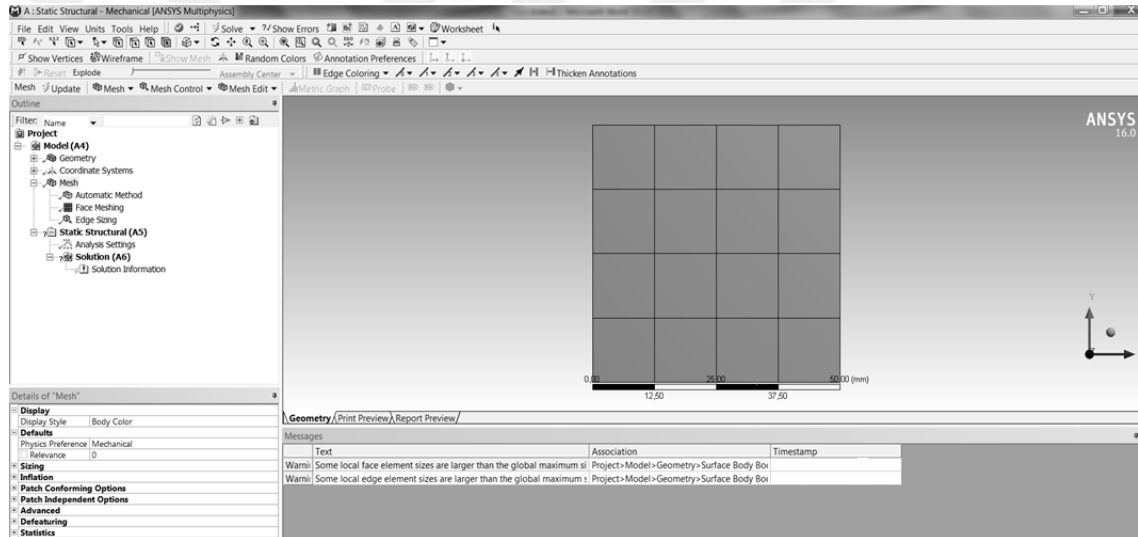
Şekil 4.12. Ansys Workbench’de modellenen elemana kalınlık değerinin girilmesi

Oluşturulan modelin malzeme atamasını yapmak için yine Details of Surface Body > Material altındaki Assignment’ta ok işaretine basılarak tanımlanmış olan malzeme seçilmiştir.



Şekil 4.13. Ansys Workbench’de oluşturulan modelin malzeme atamasının yapılması

Analizde yüksek doğruluğu nedeniyle mesh sekmesinde 4x4 mesh 8 düğümlü izoparametrik ikinci dereceden dörtgen düzlem gerilme sonlu elemanı tanımlanmıştır. Modellemede kullanılan sonlu elemanların ayrıntılı formülasyonu Bathe (2016)’da bulunabilir.

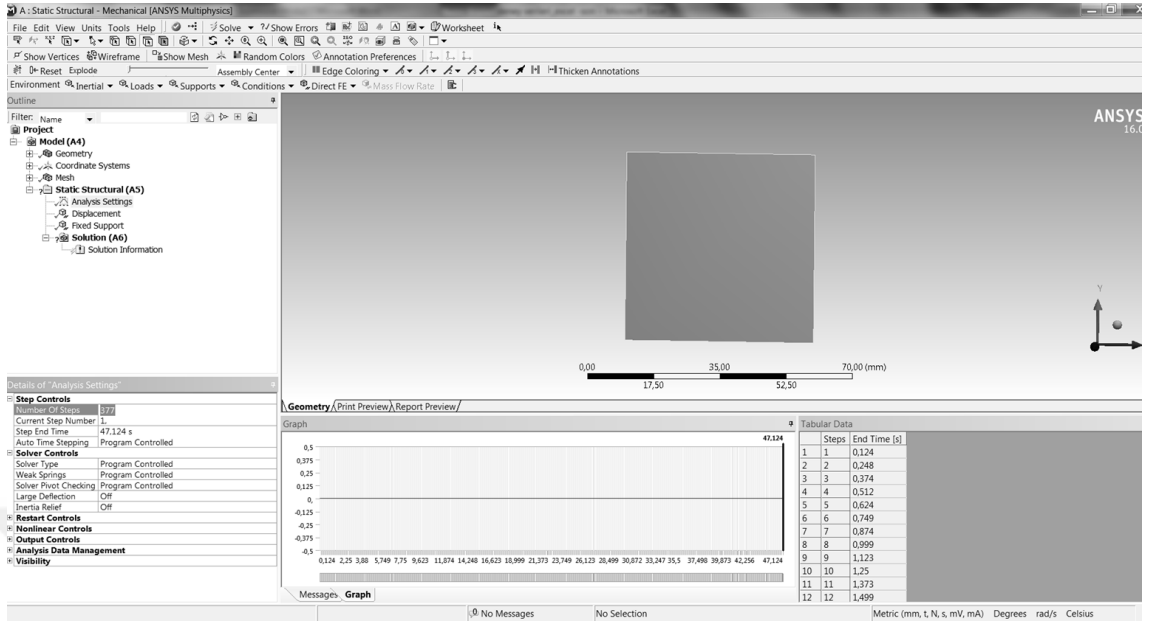


Şekil 4.14. Ansys Workbench’de oluşturulan modele 4x4 8 düğümlü mesh tanımlanması

Outline penceresinin altındaki Static Structural’a fare ile sağ tuş yapılarak Insert > Fixed Support ve Insert > Displacement’ten modelin ilgili kenarlarına sırasıyla sabit mesnet ve hareketli mesnet (x component=0 ve y component=free) tanımlanmıştır.

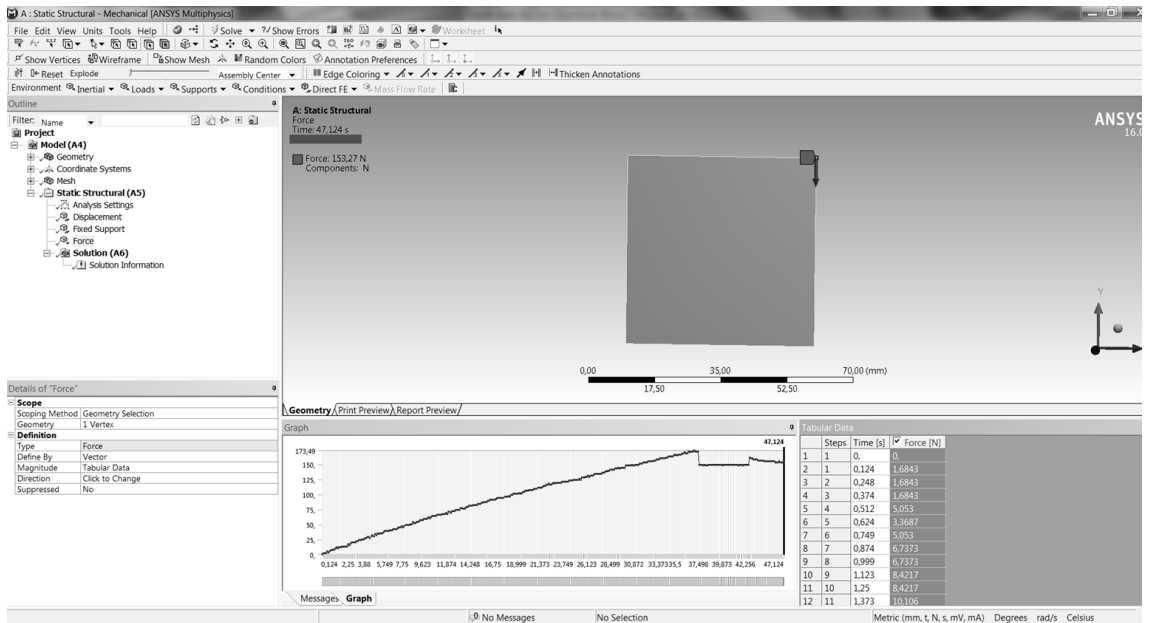
Kuvvet tanımlanmadan önce, deneydeki yükün okunduğu zaman değerlerini girmek için Details of Analysis Settings’de Step End Time’a (adım bitiş zamanı) zaman değerlerinden daha büyük bir sayı değeri Şekil 4.15’de görüldüğü gibi girilmiştir. Ardından yine Şekil 4.15’de görüldüğü gibi Number of Steps yani toplam yük adım sayısına deneyde okunan adım sayısı girilmiştir. Sağ tarafta yer alan Tabular Data’ya (tablo verisine) zaman değerleri kopyalanılmıştır. Lineer ve nonlinear analiz, küçük yer değiştirmeler için benzer sonuçlar verdiğinden kayma modülünün bulunması için lineer analiz yapılmıştır. Lineer analiz yapıldığından diğer analiz ayarlarında değişiklik

yapılmamıştır.

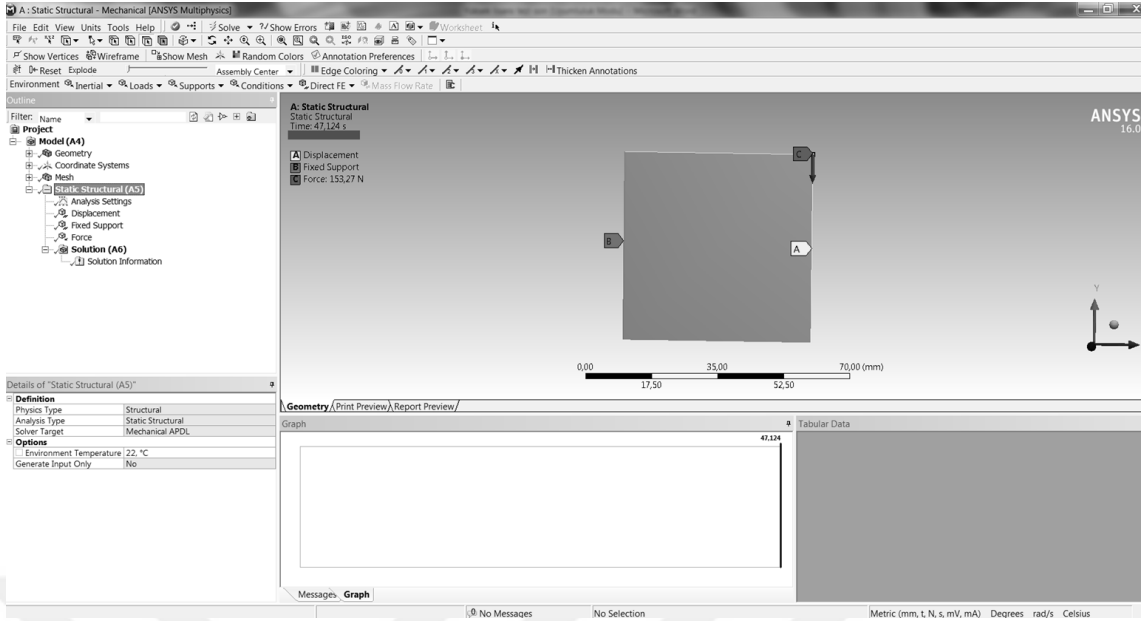


Şekil 4.15. Ansys Workbench’de toplam yük adım sayısının ve deneyde yük değeri okunan zaman değerlerinin girilmesi.

Insert > Force’den kuvvet tanımlanmıştır. Details of Force’da Şekil 4.16’da görüldüğü gibi yükün uygulandığı köşe noktası ve yükün yönü seçilmiştir. Ayrıca sağ tarafta yer alan Tabular Data’ya deneyden bulunan yük değerlerinin yarısı kopyalanılmıştır. Çünkü deneyden bulunulan yük değerleri iki numuneye etkiyen toplam yük olduğu için sayısal modelde yarısı alınmıştır.

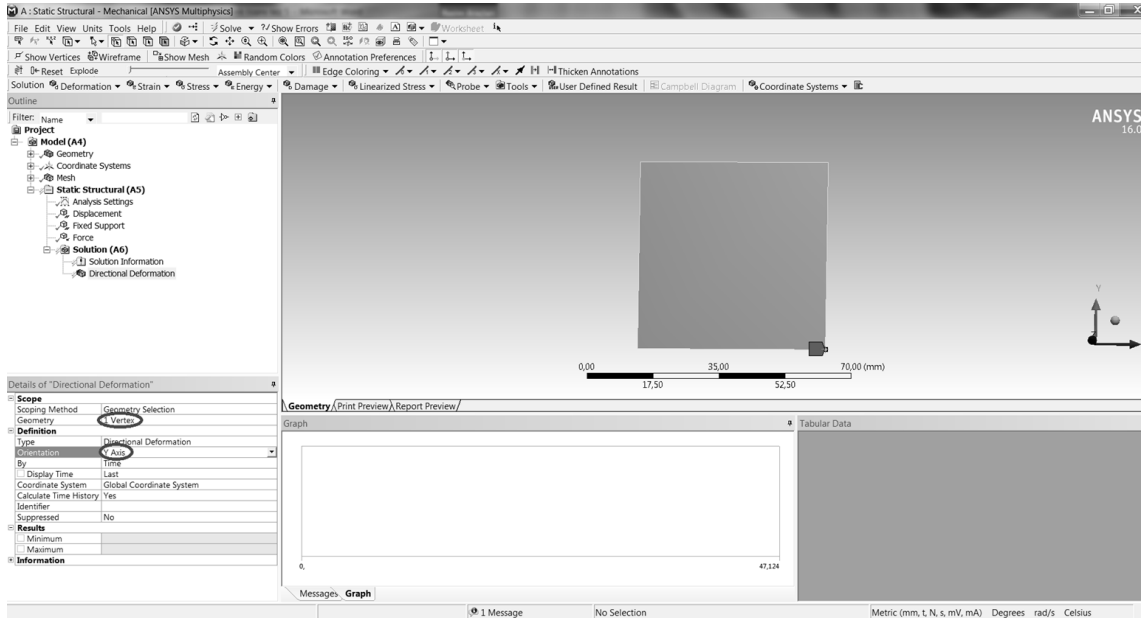


Şekil 4.16. Ansys Workbench’de kuvvet tanımlama ve deneyde okunan yük değerlerinin kuvvet olarak girilmesi.



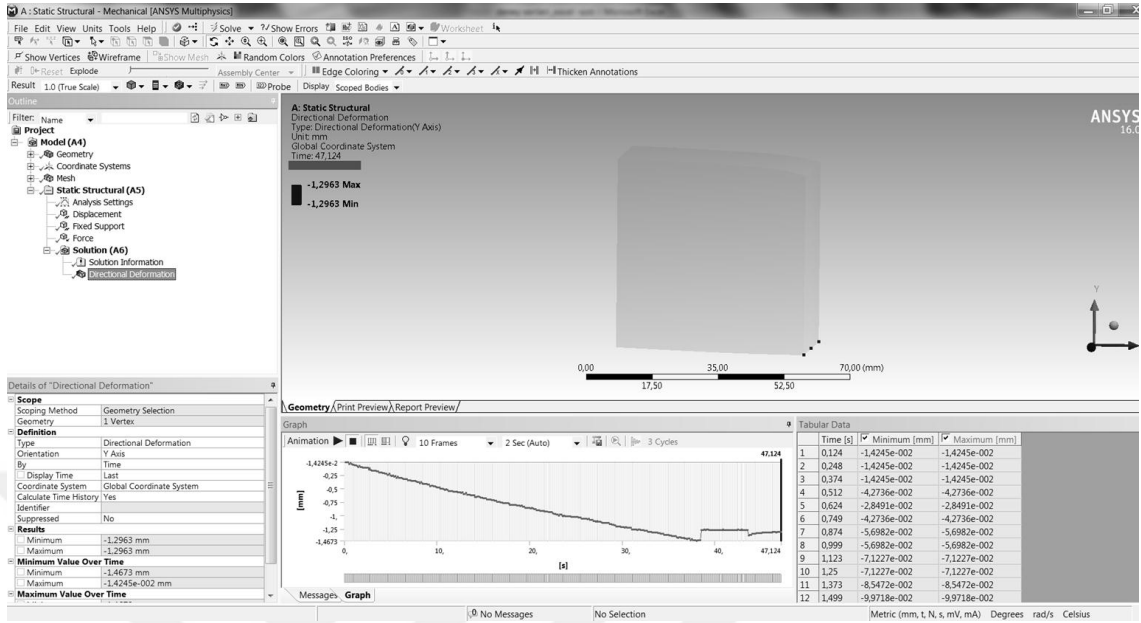
Şekil 4.17. Ansys Workbench’de oluşturulan modele atanan sınır şartlarının ve kuvvetin görüntülenmesi.

Çözüm yapılmadan önce Solution kısmında Solution (sağ tuş) > Insert > Deformation > Directional seçilmiştir. Sol alt kısımda yer alan Details of Directional Deformation’da Geometry, yukarıdaki üst menüden Vertex/Node tıklanılarak deformasyonun okunacağı hareketli mesnet tanımlı kenarın alt ucu cisim üzerinde seçilmiştir ve Apply’den kabul edilmiştir. Ayrıca Orientation’da Y Axis seçilmiştir.



Şekil 4.18. Ansys Workbench’de oluşturulan modelde analiz yapılmadan önce istenilen çözümün eklenmesi.

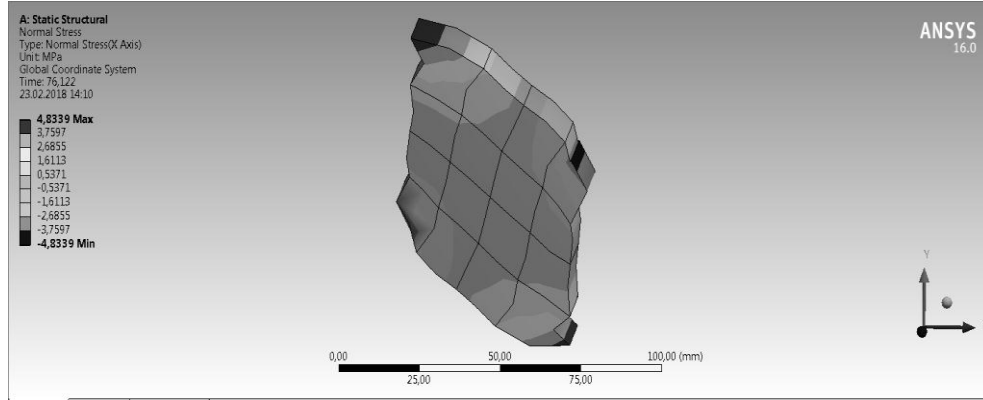
Solve komutuyla çözüm yaptırılmıştır. Analizden çıkan deformasyon değerleri aşağıda gösterilmiştir:



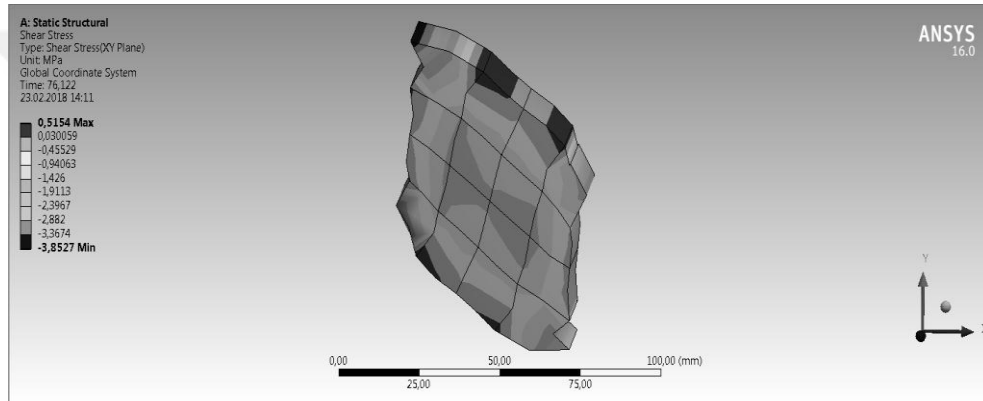
Şekil 4.19. Ansys Workbench’de analiz sonucunda modelin alt ucunda oluşan deformasyonların görüntülenmesi.

Şekil 4.19’da görüldüğü üzere sağ altta yer alan Tabular Data’daki analizden bulunan deformasyon değerleri kopyalanılıp ANSYS’de girilmiş olan yük-zaman değerlerine ait deneyden bulunan P - δ eğrisiyle excelde karşılaştırılmış ve $\delta = 0.25$ - 0.5 aralığında çakışmadığı görülmüştür. Sayısal model, düzlem gerilme elemanı olarak modellendiğinden kayma modüllerinden sadece x-y düzlemindeki kayma modülü, analiz sonucunu değiştirecektir. x-y düzlemindeki kayma modülü değiştirilerek, deneyden elde edilen P - δ eğrisine $\delta = 0.25$ - 0.5 mm aralığında karşılaştırılmaya çalışılıp kayma modülü değeri bulunmaya çalışılmıştır. Ve bu diğer deney sonuçlarında da gerçekleştirilerek x-y (1-2) düzlemi yani kuvvetli yön için ortalama kayma modülü değeri yaklaşık 2.75 MPa bulunmuştur.

Ayrıca çözüme Solution (sağ tuş) > Insert > Normal Stress (Orientation X Axis) ve Solution (sağ tuş) > Insert > Shear Stress eklenilerek modelin üzerinde oluşan normal gerilmelere ve kayma gerilmelerine bakılabilir. Sonlu elemanlar modelinde yükün sağ üst köşe yerine sağ kenar boyunca yayılı olarak tatbik edilmesinin gerilme dağılımının daha doğru olarak elde edilebilmesi için daha uygun olacağı düşünülmektedir.



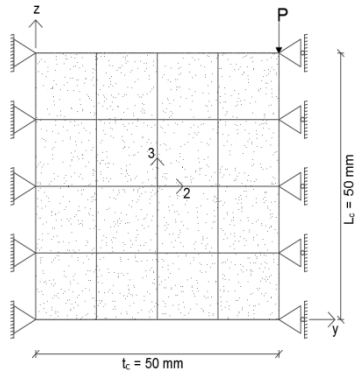
Şekil 4.20. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan normal gerilmelerin görüntülenmesi.



Şekil 4.21. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan kayma gerilmelerinin görüntülenmesi.

Görüldüğü gibi yine numune köşelerinde gerilme yığılmalarının meydana gelmesinden ve kayma gerilmesi dağılımlarının üniform olmamasından dolayı kayma dayanımları bulunmamıştır.

4.2.2. Zayıf yöndeki numunenin modellenmesi



Şekil 4.22. Zayıf yönde modellenecek sonlu eleman modeli.

Şekil 4.22’de gösterilen model tanımlanmıştır. Zayıf yöndeki numune y-z düzleminde. Ancak 2D analizde model, x-y düzleminde olmalıdır. O yüzden bu eksen değişikliği Engineering Data’da yansıtılmalıdır. Ama Engineering Data haricinde 4.2.1’de oluşturulan modelden farklı olmadığı için Duplicate seçilerek model girdileri kopyalanmıştır.

Engineering Data’da aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi değerler değiştirilmiştir.

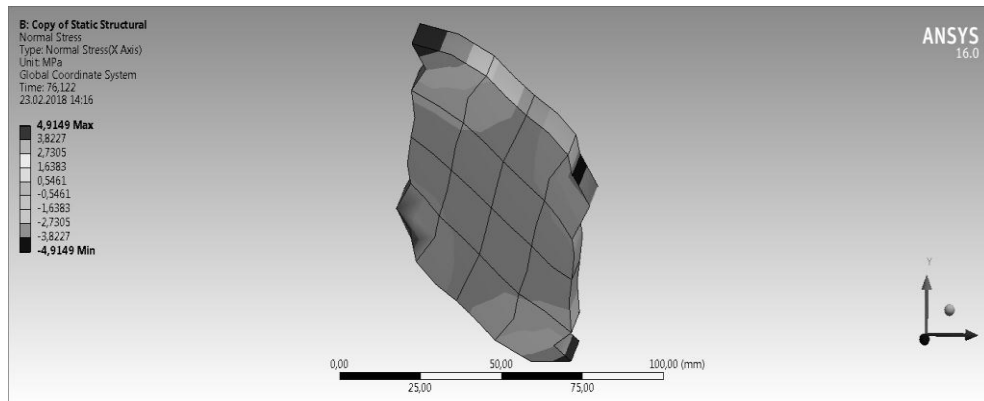
Properties of Outline Row 3: XPS (Extrude Polystren)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	☒ Density	23,4	kg m ⁻³	☒
3	☒ Orthotropic Elasticity			☒
4	Young's Modulus X direction	4,41	MPa	☒
5	Young's Modulus Y direction	2,4	MPa	☒
6	Young's Modulus Z direction	6,33	MPa	☒
7	Poisson's Ratio XY	0,35		☒
8	Poisson's Ratio YZ	0,35		☒
9	Poisson's Ratio XZ	0,35		☒
10	Shear Modulus XY	2,23	MPa	☒
11	Shear Modulus YZ	2,75	MPa	☒
12	Shear Modulus XZ	2,75	MPa	☒
13	☒ Field Variables			☒
14	Temperature	No		☒
15	Shear Angle	No		☒
16	Degradation Factor	No		☒

Şekil 4.23. Ansys Workbench’de malzeme özelliklerinde elemanın düzlemine göre değişiklik yapılması.

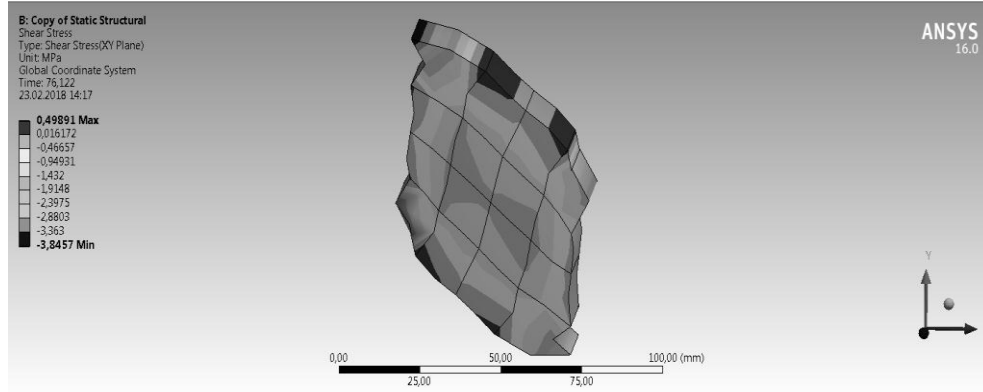
Modelde tanımlanacak olan girdiler kopyalandığı için direkt Model tıklanıp Solve ile çözdürülmüştür.

Sayısal modelden bulunan P - δ eğrileri, deneyden bulunan P - δ eğrileriyle $\delta=0.25-0.5$ aralığında karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Eksen değişikliği yapıldığı için yine kayma modüllerinden sadece x-y düzlemindeki kayma modülü, analiz sonucunu değiştirecektir. x-y (2-3) düzlemi yani zayıf yön için ortalama kayma modülü değeri 2.52 MPa bulunmuştur.

Yine analizden çıkan model üzerinde oluşan normal gerilmeler ve kayma gerilmelerine bakılabilir:



Şekil 4.24. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan normal gerilmelerin görüntülenmesi.



Şekil 4.25. Ansys Workbench’de analizden çıkan modelin üzerinde oluşan kayma gerilmelerinin görüntülenmesi.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.24’de görüldüğü gibi normal gerilme dağılımında yükün uygulandığı sağ üst uçta ve sol alt uçta maksimum basınç gerilmeleri gözlemlenebilir. Ayrıca sol üst uçta ve sağ alt uçta ise maksimum çekme gerilmeleri olduğu gözlemlenebilir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.25’de maksimum kayma gerilmelerinin, sol uçta olduğu gözlemlenebilir.

Görüldüğü gibi yine numune köşelerinde gerilme yığılmalarının meydana gelmesinden ve kayma gerilmesi dağılımlarının üniform olmamasından dolayı kayma dayanımları bulunmamıştır. Kuvvetli numunelerde de görüldüğü üzere, sonlu elemanlar modelinde yükün sağ üst köşe yerine sağ kenar boyunca yayılı olarak tatbik edilmesinin gerilme dağılımının daha doğru olarak elde edilebilmesi için daha uygun olacağı düşünülmektedir.

4.3. Kayma Deformasyonunun Dahil Edildiği Kiriş Teorisine Göre Kayma Modüllerinin Bulunması

Kuvvetli ve zayıf yönde test edilen numunenin, kiriş teorisine göre ayrı ayrı kayma modülleri hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal model sonuçlarından görüldüğü üzere numune köşelerinde gerilme yığılmalarının meydana gelmesinden dolayı analitik model ile kayma dayanımları bulunmamıştır.

4.3.1. Kuvvetli yön için çekirdeğin kayma modülünü hesaplama

İlk başta deneyde okuma alınan yüklerin yarısına göre bölüm 3.5’te verilmiş olan (3.1)-(3.4) formülleriyle deformasyonlar hesaplanmıştır. Çünkü deneyden bulunan yük değerleri iki numuneye etkiyen toplam yük olduğu için analitik modelde yarısı alınmıştır. Kuvvetli yön için E_{c0} , eğilme etkisinden dolayı basınç deneyinden E_1 ve G_{c0} ise 1-2 düzleminde olduğu için deneyden bulunan G_{12} alınmıştır. Yine burada da G_{12} değeri değiştirilerek analitik çözümden bulunan $P-\delta$ eğrileri, deneyden bulunan $P-\delta$ eğrileri ile $\delta = 0.25-0.5$ mm aralığında karşılaştırılıp kayma modülü bulunmaya çalışılmıştır. Kuvvetli yön için ortalama kayma modülü 4.14 MPa bulunmuştur.

4.3.2. Zayıf yön için çekirdeğin kayma modülünü hesaplama

Deneyden okuma alınan yüklerin yarısına göre (3.1)-(3.4) formülleriyle deformasyonlar hesaplanmıştır. Ancak zayıf düzlem için E_{c0} , eğilme etkisinden dolayı basınç deneyinden E_2 ve G_{c0} ise 2-3 düzleminde olduğu için deneyden bulunan G_{23} alınmıştır. G_{23} değiştirilerek analitik çözümden bulunan P - δ eğrileri, deneyden bulunan P - δ eğrileri ile $\delta = 0.25$ - 0.5 aralığında karşılaştırılarak zayıf yön için çekirdeğin ortalama kayma modülü 4.83 N/mm^2 bulunmuştur.

5. SONUÇLAR

Elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- Yapılan üç ray kayma deneyleri (ÜRKD) numunelerde saf kayma hali olmadığını göstermiştir.
- Elde edilen deneysel verilerden polistren köpük (PK) çekirdek malzemesinin 1-2 düzlemi için PK malzemesinin ortalama kayma modülü yaklaşık 2.19 MPa ve kayma dayanımı yaklaşık 0.07 MPa olarak elde edilmiştir. 2-3 düzlemi için ise ortalama kayma modülü yaklaşık 2.18 MPa ve kayma dayanımı yaklaşık 0.07 bulunmuştur. Deneysel neticeler, Çizelge 3.2’de verilen değerler ile kıyaslandığında ÜRKD’nin kayma parametreleri için çok düşük değerler verdiği anlaşılmıştır.
- Deney neticeleri ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile oluşturulmuş olan sayısal modelden elde edilen neticeler ile de mukayese edilmiştir. Sayısal modelden elde edilen $P-\delta$ (yük-deplasman) eğrileri, deneyden bulunan $P-\delta$ eğrileriyle $\delta = 0.25-0.5$ aralığında karşılaştırılarak kayma modülü değerleri bulunmuştur. 1-2 düzlemi için PK malzemesinin kayma modülü 2.75 MPa ve 2-3 düzlemi için PK malzemesinin kayma modülü ise 2.52 MPa bulunmuştur. Benzer şekilde, elde edilen kayma parametrelerinin çok düşük olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, sayısal model ile numune içinde ve özellikle numune köşelerine yakın noktalarda gerilme dağılımının saf kaymadan çok uzak olduğu belirlenmiştir.
- Analitik yöntem ile elde edilen $P-\delta$ eğrileri, deneyden bulunan $P-\delta$ eğrileriyle $\delta = 0.25-0.5$ aralığında karşılaştırılarak kayma modülü değerleri bulunmaya çalışılmıştır. 1-2 düzlemi için PK malzemesinin kayma modülü 4.14 MPa ve 2-3 düzlemi için PK malzemesinin kayma modülü 4.83 MPa bulunmuştur. Wada vd. (2013)’de de yararlanılmış olan analitik çözümün kuvvetli düzlem için iyi netice verdiği fakat zayıf düzlem için çok yüksek neticeler verdiği belirlenmiştir.
- Numune köşelerinde gerilme yığılmalarının meydana gelmesi ve kayma gerilmesi dağılımlarının üniform olmamasından dolayı elde edilecek kayma dayanımı değerlerinin anlamsız olacağı görülmüştür. Bu yüzden sayısal ve analitik modelden kayma dayanımları elde edilememiştir.

Yukarıdaki maddelerden anlaşılacağı üzere ÜRKD’nin, numune içinde saf kayma hali oluşmamasından ötürü gerçeğe yakın netice vermediği ortaya çıkmıştır. Bu problemin, numunenin eğilmeye karşı güçlendirilmesi ile ortadan kalkacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- ASTM C273 / C273M-16. 2016. Standard test method for shear properties of sandwich core materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/Standards/C273.htm> [Son erişim tarihi: 03.02.2018].
- ASTM C393 / C393M-16. 2016. Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/Standards/C393.htm> [Son erişim tarihi: 03.02.2018].
- Basu, A.K. 1976. The manufacture and behaviour of sandwich panels made of material combination of steel sheets and polyurethane foams. PhD Dissertation, Technischen Hochschule Darmstadt, Germany.
- Bathe, K.J. 2016. Finite Element Procedures. United States of America, 1065 s.
- BS-EN826:2013. 2013. Thermal insulating products for building applications. Determination of compression behavior. BSI.
- BS 4370-2:1993. 1993. Methods of test for rigid cellular materials - Methods 7 to 9. BSI.
- Cagdas, I. ve Taskin, M. 2018. A modified three rail shear test procedure for rigid foamed materials. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi* (yayınlanmamış).
- Chuda-Kowalska, M. Pozorski, Z. and Garstecki, A. 2010. Experimental determination of shear rigidity of sandwich panels with soft core. 10th International Conference Modern Buildings Materials, Structures and Techniques, pp. 56-63, 19-21 May, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania.
- Daniel, I.M. and Cho, J.M. 2011. Characterization of anisotropic polymeric foam under static and dynamic loading. *Experimental Mechanics*, 51 (8): 1395-1403.
- Davies, J.M. 2001. Lightweight Sandwich Construction. Blackwell Science Ltd, Londra, pp. 316-319.
- DIN 53427:1986-11. 1986. Determination of shear strength of rigid cellular materials sandwiched between metal plates.
- EN 12090. 2013. Thermal insulating products for building applications - Determination of shear behavior. CEN (European Committee for Standardization).
- Gdoutos, E.E. Daniel, I.M. and Wang, K.A. 2002. Failure of cellular foams under multiaxial loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33 (2): 163-176.
- Grédiac, M. and Dufort, L. 2002. Experimental evidence of parasitic effects in the shear test on sandwich beams. *Experimental Mechanics*, 42 (2): 186-193.
- Hakmi, M.R. 1988. Local buckling of sandwich panels. PhD Dissertation, University of Salford, England, 63 p.
- ISO 1922:2012. 2012. Rigid cellular plastics - Determination of shear strength. ISO/TC 61/SC 10 Cellular plastics Technical Committee.

- Jungbluth, O. and Berner, K. 1986. Verbund- und Sandwichtragwerke. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Kilar, V. Koren, D. and Bokan-Bosiljkov, V. 2014. Evaluation of the performance of extruded polystyrene boards—implications for their application in earthquake engineering. *Polymer Testing*, 40: 234-244.
- Mäkeläinen, P. and Holmijoki, O. 1983. Shear Strength Characteristics and Shear Creep Modelling Of Low Density Rigid Polyurethane Foam. Polymer Processing and Properties, pp. 271-278, 13-16 June, Capri, Italy.
- Mitra, N. 2010. A methodology for improving shear performance of marine grade sandwich composites: sandwich composite panel with shear key. *Composite Structures*, 92 (5): 1065-1072.
- Mostafa, A. Shankar, K. and Morozov, E.V. 2013. a. Effect of shear keys diameter on the shear performance of composite sandwich panel with PVC and PU foam core: FE study. *Composite Structures*, 102: 90-100.
- Mostafa, A. Shankar, K. and Morozov, E.V. 2013. b. Influence of shear keys orientation on the shear performance of composite sandwich panel with pvc foam core: numerical study. *Materials & Design*, 51: 1008-1017.
- Mostafa, A. Shankar, K. and Morozov, E.V. 2013. c. Insight into the shear behaviour of composite sandwich panels with foam core. *Materials & Design*, 50: 92-101.
- O'Connor, D.J. 1989. A comparison of test methods for shear properties of the cores of sandwich constructions. *Journal of Testing and Evaluation*, 17 (4): 241–246.
- Penzien, J. and Didriksson, T. 1964. Effective shear modulus of honeycomb cellular structure. *AIAA Journal*, 2 (3): 531-535.
- Roy, A.K. and Camping, J.D. 2003. Development of a portable shear test fixture for low modulus porous (foam) materials. *Experimental Mechanics*, 43 (1): 39-44.
- Subramanian, N. and Sankar B.V. 2012. Evaluation of micromechanical methods to determine stiffness and strength properties of foams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 14 (4): 431-447.
- Tajbakhsh, S. 1992. Developments in sandwich construction. PhD Dissertation, University of Salford, England, 357 p.
- Wada, A. Kawasaki, T. Minoda, Y. Kataoka, A. Tashiro, S. and Fukuda, H. 2003. A method to measure shearing modulus of the foamed core for sandwich plates. *Composite Structures*, 60 (4): 385-390.
- Yoshihara, H. Ataka, N. and Maruta, M. 2016. Measurement of the Young's modulus and shear modulus of extruded polystyrene foam by the longitudinal and flexural vibration methods. *Journal of Cellular Plastics*, 0 (0): 1-18.

ÖZGEÇMİŞ

TUĞÇE SARGIN
tugcesargn@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2013-2018	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2009-2013	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta