

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LAMİNE AHŞAP KİRİŞLERİN LİFLİ
POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN
SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Dilan ÇANKAL

Temmuz, 2021

İZMİR

LAMİNE AHŞAP KİRİŞLERİN LİFLİ POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Dilan ÇANKAL

Temmuz, 2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

DİLAN ÇANKAL, tarafından **DOÇ. DR. GÖKHAN ŞAKAR** yönetiminde hazırlanan **“LAMİNE AHŞAP KİRİŞLERİN LİFLİ POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Doç. Dr. Gökhan ŞAKAR

Yönetici

.....
Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

Jüri Üyesi

.....
Dr. Öğr. Üyesi
Çağlar YALÇINKAYA

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tezimin tüm aşamasında destekte bulunan, tez konumun şekillenmesinde büyük emeği geçen, bu süreçte bilgi ve deneyimleri ile yönlendiren, elinden gelen tüm anlayışı gösteren ve benim için en önemlisi akademik kariyerime başlamamda bana manevi destek veren danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan ŞAKAR'a en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik kariyerimin başladığı günden bu yana her konuda bana yardımcı olan, yol gösteren, umutsuzluğa düştüğümde beni motive eden ve kendisiyle çalışmaktan son derece mutluluk duyduğum Sayın Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimin her anında bana sabırla destekte bulunan, her daim yanımda bulunan, yaptığım çalışmalarda zora düştüğümde beni cesaretlendiren sevgili dostlarım Öyküm BAŞGÖZ, Hüseyin DAŞTAN ve Hilal ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her konuda destekte bulunan, beni bugünlere getiren ve sahip olduğum için gurur duyduğum canım annem, babam ve kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dilan ÇANKAL

LAMİNE AHŞAP KİRİŞLERİN LİFLİ POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

ÖZ

Son yıllarda artan yapılaşma ihtiyacı beraberinde beton ve çelik yapı malzemelerinin kullanımı gittikçe artmaktadır. Çevresel açıdan zararlı ve üretimde çok fazla enerji gerektiren bu yapı malzemelerine bir alternatif olabilecek ahşap ve lamine ahşap elemanlar ülkemizde pek tercih edilmemektedir. Özellikle büyük yapıların inşaatında lamine ahşap elemanların kullanımı hem çevresel açıdan hem de teknik açıdan oldukça avantaj sağlamaktadır. Orman bakımından oldukça zengin olan ülkemizde ahşap ve lamine ahşap elemanların tercihi yerel ekonomileri desteklediği gibi aynı zamanda ülke ekonomisine, çevre sağlığına ve mimari açıdan çeşitlilik yaratılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu tez kapsamında lamine ahşap elemanın en çok tercih edildiği eleman türü olarak kullanıldığı kiriş elemanlar araştırılmıştır. Bu elemanların hasar alma durumunda güçlendirilme alternatifleri veya üretimi sırasında daha iyi dayanım özelliklerine sahip olabilmesi için lifli polimerler ile takviyeleri incelenmiştir. Tez konusu ile ilgili araştırmaların yapıldığı çalışmanın ilk bölümlerinde farklı alternatifler sunularak güçlendirme yöntemleri ve çeşitleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında ise lamine ahşap kirişlerin lifli polimerler ile güçlendirildiği iki grup kiriş üzerinde lifli polimerin alanındaki artışın kirişlerin taşıyabileceği maksimum yük, yük taşıma kapasitelerindeki artış ve eğilme rijitlikleri üzerindeki etkileri analitik bir model ile hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin esas alındığı ABAQUS programı ile de elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Lamine ahşap kiriş, lifli polimerler, güçlendirme, sayısal analiz, sonlu elemanlar yöntemi

INVESTIGATION OF STRENGTHENING LAMINATED TIMBER BEAMS WITH FIBER POLYMERS USING NUMERICAL METHODS

ABSTRACT

In recent years, the use of concrete and steel building materials is increasing with the increasing need for construction. Timber and laminated timber elements, which can be an alternative to these building materials that are environmentally harmful and require a lot of energy in production, are not preferred in our country. The use of laminated timber elements, especially in the construction of large buildings, provides a great advantage both from an environmental and technical point of view. In our country, which is very rich in forests, the preference of timber and laminated timber elements will not only support local economies, but also contribute to the national economy, environmental health and architectural diversity.

Within the scope of this thesis, beam elements in which laminated timber element is used as the most preferred element type were investigated. In order for these elements to be strengthened in case of damage or to have better strength properties during production, fibrous polymers and reinforcements have been examined. In the first parts of the study, in which research on the subject of the thesis was carried out, different alternatives were presented and the strengthening methods and types were comprehensively evaluated. In the continuation of the study, the effects of the increase in the area of the fibrous polymer on the maximum load that the beams can carry, the increase in the load carrying capacity and bending stiffness on two groups of beams on which the laminated timber beams are reinforced with fibrous polymers were calculated with an analytical model. The results obtained with the ABAQUS program based on the finite element method were also compared.

Keywords: Laminated timber beam, fibrous polymers, reinforcement, numerical analysis, finite element method

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
BÖLÜM İKİ - AHŞAP VE LAMİNE AHŞAP	5
2.1 Yapısal Ahşap Eleman	5
2.1.1 Ahşabın Sınıflandırılması	7
2.1.2 Ahşabın Özellikleri	8
2.1.2.1 Ahşabın Fiziksel Özellikleri	8
2.1.2.2 Ahşabın Kimyasal Özellikleri.....	10
2.1.2.3 Ahşabın Mekanik Özellikleri	10
2.1.3 Ahşabın Değerlendirilmesi	12
2.2 Yapısal Lamine Ahşap Eleman	15
2.2.1 Lamine Ahşabın Üretimi	16
2.2.2 Lamine Ahşabın Değerlendirilmesi.....	19
2.2.3 Lamine Ahşap Giriş.....	20
BÖLÜM ÜÇ - AHŞAP YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ	24
3.1 Lifli Polimer (LP) Malzemeler.....	27
3.1.1 Lif Bileşeni	28
3.1.2 Matris Bileşeni.....	30
3.1.2.1 Termoset Reçineler	31
3.1.2.2 Termoplastik Reçineler.....	32

3.1.3 LP Üretim Yöntemleri	33
3.2 Lamine Ahşap Kirişlerin LP ile Güçlendirilmesi	35
3.3 Lamine Ahşap Kirişlerin LP ile Güçlendirme Konfigürasyonları	38
3.3.1 Dış Yüzeyde Takviye	40
3.3.2 Yüzeye Yakın Takviye	44
3.3.2.1 Çubuk Formunda Takviye	45
3.3.2.2 Katman Formunda Takviye	48
3.4 Lamine Ahşap Kirişlerin Farklı Tip Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesi	50
3.4.1 Karbon Lifli Polimerler (KLP) ile Güçlendirme	51
3.4.2 Cam Lifli Polimerler (CLP) ile Güçlendirme	52
3.4.3 Bazalt Lifli Polimerler (BLP) ile Güçlendirme	53
3.4.4 Aramid Lifli Polimerler (ALP) ile Güçlendirme	54
3.5 Lamine Ahşap Kirişlerin LP ile Güçlendirilmesinin Değerlendirilmesi	54
BÖLÜM DÖRT - MATERYAL VE METOT	55
4.1 Lamine Ahşap Kiriş Özellikleri	56
4.2 Lifli Polimer Özellikleri	58
4.3 Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Lamine Ahşap Kirişler	58
4.4 Analitik Model Yaklaşımı	60
BÖLÜM BEŞ - SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ	63
5.1 ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı	65
5.2 Modelin Oluşturulması	66
5.3 Analiz Sonuçları	75
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Masif ahşap eleman.....	6
Şekil 2.2 Haydarpaşa Garı'nın çatısından çekilmiş bir fotoğraf.....	15
Şekil 2.3 En birleştirme çeşitleri	17
Şekil 2.4 Boy birleştirme çeşitleri	17
Şekil 2.5 Laminasyon işlemleri.....	18
Şekil 2.6 Bazı yanlış ve doğru lamine kat düzenlemeleri	18
Şekil 2.7 Amerika'nın Araba Müzesi, Tacoma.....	22
Şekil 2.8 Taşıyıcı iskelet sistemi lamine ahşap olan Mjos Tower, Norveç.....	22
Şekil 3.1 Lifli polimerin dayanım ve şekil değiştirme grafiği	28
Şekil 3.2 Karbon lifler.....	28
Şekil 3.3 Cam lifler	29
Şekil 3.4 Bazalt lifler	29
Şekil 3.5 Aramid lifler	30
Şekil 3.6 Lifli polimerler ve çeliğin gerilme birim şekil değiştirme eğrileri	30
Şekil 3.7 Güçlendirme konfigürasyon örneği-1	41
Şekil 3.8 Güçlendirme konfigürasyon örneği-2	42
Şekil 3.9 Güçlendirme konfigürasyon örneği-3	43
Şekil 3.10 Güçlendirme konfigürasyon örneği-4	44
Şekil 3.11 Güçlendirme konfigürasyon örneği-5	46
Şekil 3.12 Güçlendirme konfigürasyon örneği-6	46
Şekil 3.13 Güçlendirme konfigürasyon örneği-7	47
Şekil 3.14 Güçlendirme konfigürasyon örneği-8	48
Şekil 3.15 Güçlendirme konfigürasyon örneği-9	49
Şekil 3.16 Güçlendirme konfigürasyon örneği-10	50
Şekil 3.17 Lamine ahşap kirişin olası güçlendirme şeması.....	55
Şekil 4.1 1. Grup kirişlerin görünüşü	57
Şekil 4.2 2. Grup kirişlerin görünüşü	58
Şekil 4.3 Güçlendirilmiş kirişlerin görünüşü	59
Şekil 4.4 Güçlendirilmemiş kirişlerin eğilme deneyi düzeneği	60
Şekil 4.5 Güçlendirilmiş kirişlerin eğilme deneyi düzeneği	60

Şekil 4.6 KLP ile güçlendirilmiş kirişlerin idealize edilmiş gerilme ve şekil değiştirme dağılımları	61
Şekil 5.1 Sonlu elemanlar yöntemi ile modellemenin akış şeması	65
Şekil 5.2 Ahşap için kullanılan sonlu eleman modeli	66
Şekil 5.3 Ahşap eleman için yerel koordinat sistemi	67
Şekil 5.4 Lamine ahşabın idealize edilmiş gerilme şekil değiştirme grafiği	68
Şekil 5.5 Cohesive davranışın rijitlik değerleri.....	71
Şekil 5.6 Hasar gelişimi için kullanılan normal ve kayma gerilmeleri	71
Şekil 5.7 Hasar tanımlaması için kullanılan toplam yer değiştirme değeri	72
Şekil 5.8 Mesnet ve yük noktaları tanımlanmış kiriş	73
Şekil 5.9 Çözüm ağlarına ayrılmış lamine ahşap kiriş	73
Şekil 5.10 KLP plakanın idealize edilmiş gerilme şekil değiştirme grafiği.....	75
Şekil 5.11 1. Grup kirişin yük orta nokta deplasman grafikleri	77
Şekil 5.12 2. Grup kirişin yük orta nokta deplasman grafikleri	78
Şekil 5.13 1. Grup kirişin eşdeğer plastik şekil değiştirme gerinimleri	79
Şekil 5.14 2. Grup kirişin eşdeğer plastik şekil değiştirme gerinimleri	80

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Sınıflandırılmış ahşap malzemelerin emniyet gerilme değerleri	7
Tablo 3.1 Belirlenmiş yıllara göre göçme modlarının yüzdesel dağılımları.....	26
Tablo 3.2 LP ve çelik özelliklerinin kıyaslaması	37
Tablo 4.1 Ahşabın mekanik özellikleri	56
Tablo 4.2 Karbon lifli polimer plakanın özellikleri	58
Tablo 4.3 Analiz edilen tüm kirişler	59
Tablo 4.4 Analitik hesaplamaların sonuçları	62
Tablo 5.1 Kullanılan birim sistemi.....	66
Tablo 5.2 Ahşap kiriş eleman değerleri	68
Tablo 5.3 KLP plakanın ABAQUS değerleri	74
Tablo 5.4 Sonlu elemanlar analizi sonuçları	75
Tablo 6.1 Analitik model ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarının kıyaslanması ...	81

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

İnsanlar var oluşundan bu yana barınma ihtiyacını karşılamak için doğal bir malzeme olan ağaçları şekil vererek kullanmışlardır. Hammaddesi ağaç olan ahşap estetik nedenlerle, işlenebilme kolaylığı ve hafifliği sebebiyle yapı malzemesi olarak eskiden beri tercih edilmektedir. Geçmişte meydana gelen doğal afetler ve dışarıdan gelecek tehlikelere karşı korunabilmek adına insanlar barınaklarını ahşap direkler üzerine kurmaya başlamışlardır. Bu düşünceyi daha da geliştiren insanlar ağaçlardan yaptığı yapı ve barınaklarla büyük bir yol almışlardır. Bu yapılarda ahşap; kaplama, iskelet sistemi, tavan ve çatı örtüsü elemanı gibi işlevsel birçok şekilde kullanılmıştır. Hatta eski ahşap yapılarda kullanılan bazı tekniklerin halen günümüzde kullanıldığını görmekteyiz. Daha sonraları ahşabın en önemli olumsuz özelliklerinden biri olan neme karşı hassasiyetine çözüm olarak güneşte doğal yolla kurutmak gibi geleneksel bir yöntem yerine daha hızlı ve etkili olan suni kurutma yöntemleri ile uygun koşullarda ahşap kurutulmuştur. Böylelikle ahşap malzeme, geniş bir ürün yelpazesi içerisinde kullanıma sahip olmuş ve önemli bir yapı malzemesi haline gelmiştir.

Ahşap malzeme tutkalın keşfi ve gelişmesiyle beraber daha fonksiyonel bir kullanıma sahip olmuştur. Ancak, ahşap malzeme sahip olduğu morfolojik yapısından ötürü kusurları ve düzensiz davranışları sebebiyle sınırlamalara sahip bir malzeme olarak uzun yıllar masif şekilde kullanılmıştır. Bu sınırlamalara kusurlar, budaklar, reçine cepleri ve düzensiz yaş halkaları gibi ahşabın yapısı gereği varolan özellikler sebep olmaktadır. Küçük masif ahşap parçaların tutkal gibi yapıştırıcılar ile lamine edilerek yapıştırılmasıyla bu kusurlar dağıtılarak daha iyi mukavemet özelliklere sahip nihai ürün elde edilir. Lamine edilmiş bu ürünler masif ahşaba göre çok daha büyük boyutlara sahip olabilmektedir. Laminasyon tekniği ile lamine ahşap eleman oluşturmak, ahşabın doğal büyüme sürecinin olumsuz yönlerini azaltarak sahip olduğu daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler sayesinde ahşap malzemenin değerini önemli ölçüde arttırmıştır. Ahşabın iyileştirilmesiyle ortaya çıkan sonuçlar ahşap malzeme hakkında yapılan çalışmaların daha da kapsamlı olup geliştirilmesi için uyarıcı bir etken olmuştur. Lamine ahşabın alt elemanı olarak üretilen lamine ahşap kiriş, taşıyıcı

eleman olarak en sık kullanılan çeşididir. Kiriş olarak kullanılan lamine ahşap elemanların kullanımı popülerleştikçe daha büyük elemanlara ihtiyaç duyulan yapılarda kullanımında dayanım ve rijitlik konusunda zorluklar getirmiştir. Bu tür yapıların tercihinde karşılaşılan zorluklarla birlikte yapılarda kullanılan ahşap elemanların daha dayanıklı olması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda gittikçe artan mevcut ahşap yapıların onarımı veya yapısal iyileştirme gereklilikleri ile birlikte ahşap malzemenin daha rijit bir malzeme ile güçlendirilme ihtiyacı da bir yandan artmıştır. Böylelikle yapılarda güçlendirme yapılması mevcut ahşap yapıların yıkım ve yeniden yapım maliyeti yerine güçlendirilerek varlığını daha iyi bir şekilde devam ettirilmesi sağlanmıştır. Kullanılacak malzeme ve güçlendirme tekniği, ahşap elemanda hangi özelliklerin ne derece iyileştirilmesinin amaçlandığına bağlıdır. Çelik ve alüminyum gibi metaller başlangıçta ahşap ve lamine ahşap malzemenin güçlendirilmesi için kullanılmışlardır. Ancak bu malzemelerin bazı yetersiz özellikleri güçlendirme elemanı olarak kullanımlarını sınırlamıştır. Daha yakın zamanlarda, lifli polimer (LP) malzemeler bu yetersiz özelliklere çözüm olarak kullanılmaya başlanmıştır. LP'lerin üretim yöntemlerinin çeşitliliği ve yapısal özelliğini etkileyen bileşenlerindeki alternatiflerin artmasıyla bu kompozit malzemeler istenilen özelliklerde elde edilebilmektedir. Bu sebeple, LP'ler hem yeni yapıların yapılmasında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde önemli bir yere sahiptir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Ahşap, dünya çapında yaygın olarak bulunan doğal bir kaynaktır ve bu kaynaklar doğru yönetilirse ahşap temini için dünyada sonsuz potansiyel bulunmaktadır. Ahşabın üretimi için gereken düşük enerji, düşük kirlilik ve atık oluşumu sayesinde ekolojik olarak beton ve çelik gibi diğer yapı malzemelerine göre ahşap çok daha az zararlı etkiye sahiptir.

Gelişmiş ülkelere bakıldığında, sürdürülebilir ormancılık politikalarıyla ahşap endüstrisini de destekleyerek birçok ahşap yapının yapıldığı ve daha da geliştirmek için çalışmaların devam ettiği görülmektedir. Orman bakımından oldukça zengin olan ülkemizde ne yazık ki ahşap yapılar yeterince ilgi görmemektedir. Ahşap yapıların çevresel olarak sürdürülebilir özelliklerini korumak ve ahşap türevi her türlü

malzemenin güçlendirilmesi için nispeten yeni alternatiflerden biri olan LP'lerin özelliklerinin iyi anlaşılması, lamine ahşap kirişlerin kritik yükleme durumlarının araştırılması, kirişlerin göçme modlarına uygun LP sistem konfigürasyonlarının seçimi, LP malzeme özelliklerinin değişiminin kirişlerin kapasitesini ne derece arttırdığının bilinmesi oldukça önemlidir.

Lamine ahşap elemanlar yapıların taşıyıcı sistemlerinde farklı türde yüklemeye maruz kalacak şekilde tasarlanabilirler. Ancak uygulamada daha çok kiriş elemanı olarak kullanımına rastlanmaktadır ve göçme modları da daha çok eğilmede gözlenmektedir. Yani bu kirişler daha çok eğilme etkisine maruz kalacak şekilde tasarlanmakta ve güçlendirilmektedir. Eğilme etkisinde ahşabın göçmesi kırılğan, gelişigüzel ve tahmin edilmesi zordur. Kullanılacak malzeme ve güçlendirme yöntemi, lamine ahşap kirişin hangi özelliklerinin geliştirilmesinin amaçlandığına göre değişkenlik gösterse de LP sistemler çoğunlukla ahşap malzemenin en zayıf bölümüne yani çekme bölgesine takviye edilmektedir. Böylece, lamine ahşap kirişin mukavemet özellikleri, ahşabın yetersiz özelliklerinin varlığına daha az bağımlı olur ve beklenen dayanımların standart sapmaları azalır.

Tez kapsamında LP ile güçlendirilmiş lamine ahşap kirişlerin davranışlarını ve dayanım özelliklerini belirleyen lifli polimerin alanı ve lamine ahşap kirişin en boyutundaki değişimin etkileri araştırılacaktır. Bu kapsamda “ABAQUS” sonlu elemanlar bilgisayar analiz programı ile modellemeler yapılarak elde edilen bu değişimler daha önceden sunulmuş ve deneysel sonuçlarla da yakınlık gösteren bir analitik modelle karşılaştırılarak sonuçların benzerliği sayısal olarak sunulup yorumlanacaktır.

Türkiye’de ahşap yapıların üretiminin az olmasının sebeplerinden biri olan bilgi yetersizliğine ve düşük mukavemet özelliklerine bir çare olarak LP ile güçlendirilmiş lamine ahşap kirişler hakkında yapılmış çalışmaları incelemek ve bu konuda ileride yapılacak çalışmalara bir katkı sunulması hedeflenmektedir. Malzeme ve yöntem açısından farklı değişkenler kullanılarak güçlendirmede alternatif oluşturma açısından

faydalı olacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda bu çalışma mevcut tarihi ahşap yapıların onarım ve güçlendirmesine de katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM İKİ

AHŞAP VE LAMİNE AHŞAP

2.1 Yapısal Ahşap Eleman

Canlı bir malzeme olan ahşap lifli bir yapıya sahiptir. İnce kristal lifleri bir arada tutan reçineli bir maddenin varlığı heterojen bir yapı yaratır. Liflere paralel ve dik yönde basınç, çekme ve eğilme dayanımları gibi mekanik özelliklerin farklılık göstermesi izotropik olmayan bir malzeme olduğunun göstergesidir (Saral, 2016).

Ahşap, bir yapı malzemesi olarak düşünüldüğünde, her türlü yapı elemanı olarak karşımıza çıkabilmektedir. Bunlardan bazıları kiriş, çatı, cephe, merdiven, iç mekân elemanları, dikme ve payandalardır. Yenilenebilir bir kaynak olan ormanlardan yapı elemanı olarak kullanımına kadar geçen süreçte ahşabın gördüğü işlemler kullanım yerine ve amacına göre değişkenlik göstermektedir. Yapılan işlemler mühendislik himayesinde kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmelidir (Falk, 2009).

Ahşabın yoğunluğu çelik ve betona nazaran oldukça düşük olsa da taşıma gücü yüksektir. Yoğunluğu düşük, taşıma gücü yüksek bir yapı malzemesinin kullanıldığı yapılara gelen deprem kuvvetleri daha az olmaktadır. Bununla beraber yoğunluğun düşük olması ahşaba şekil verilebilme kolaylığı açısından da avantaj sağlamaktadır. Bu tür olumlu özellikler mühendislik ve mimari bakış açılarından ahşap malzemeyi cazip kılar (Herzog ve diğer., 2012).

İnsanlığın var olmasından bu zamana kadar kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olan ahşap, belirli işlemlerden geçerek günümüzde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ahşabın üretimi kolay olmakla beraber, üretimi için harcanan enerji beton, çelik, tuğla, gazbeton gibi diğer yapı malzemelerinin elde edilmeleri için harcanan enerji miktarlarına göre oldukça düşüktür (Bilici, 2006). Ağaç kesilme işleminden sonra budaklarından ve dallarından ayrılıp yontularak tomruk biçimine getirilir. Tomruklar mevcut şekilde yapı elemanı olarak kullanıma uygun haldedir. Bu şekilde kullanımına insanlığın ilk zamanlarından beri rastlanmaktadır. İnsanlığın gelişimiyle beraber bu tomruklar biçildikten sonra kurutularak veya

kurutulmadan kullanılmaya başlanmıştır. Bu şekilde doğrudan ağaçtan öğütülmüş malzemeye masif ahşap denir (Şekil 2.1). Masif ahşap ile beraber ahşabın taşıyıcı özelliği daha çok ortaya çıkan fonksiyonel ve estetik yapılar inşa edilmeye başlanmıştır (Ramage ve diğer., 2017).



Şekil 2.1 Masif ahşap eleman (Suhud, 2018)

Yapı malzemelerinin ilk kullanımından Sanayi Devrimi'ne kadar olan süreçte ahşap çeşitli formlarda kullanılmıştır. Sanayi Devrimi'nin bir sonucu olarak yapı malzemelerinde çeşitlilik artmıştır. Yapılarda çimento, taş ve tuğla gibi ürünler kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla çelik ve betonarme yapı sistemlerinin uygulanmasıyla yapı sektöründe ahşap malzeme kullanımında bir azalma görülmüştür. Sanayi Devrimi sonrası malzeme alanındaki yeniliklerin artması estetik algıların gelişmesini sağlamıştır. Mimari açıdan daha üretken bir ortamın varlığı yapı malzemesi olarak ahşabın tekrardan kullanımına teşvik etmiştir. I. Dünya Savaşı'na kadar bu dinamik sürmüştür. Ancak savaşın etkisiyle çeliğin yapı malzemesi yerine daha çok silah yapımında hammadde olarak kullanılmaya başlanması ahşabın yapı malzemesi olarak yeniden kullanımına itici bir etken olmuştur. Ardından II. Dünya Savaşı'nın da etkisiyle tüm yapı sektöründe yaşanan bir durgunluk sonrası yapı ihtiyacı artmaya başlamış, dolayısıyla ahşap yapıların üretiminde de bir artış gözlenmiştir. Aynı zamanda, II. Dünya Savaşı sırasında nem ve sıcaklığa dayanıklı olan yapay reçine tutkalın icadı ve bunun ahşap yapı eleman birleşimlerinde kullanılması ahşap yapıların varlığını daha da arttırmıştır. Bu süreçte, ahşap yapıların

tasarım ilkelerinin Avrupa’da yönetmeliklerde yer alarak yapıların taşıyıcı iskelet sisteminde kullanılmaya başlanması bu durumu daha da desteklemiştir (Çalışkan ve diğer., 2019; Kurt, 2006).

2.1.1 Ahşabın Sınıflandırılması

Yapı elemanı olarak kullanılacak ahşabın önemli bir kısmı çam, sedir, selvi ve köknar gibi iğne yapraklı; meşe, kayın, ceviz, dişbudak ve kavak gibi geniş yapraklı ağaçlardan elde edilmektedir. Ağaçların her birinin kendine has özellikleri vardır. Nem oranları, budak, lif ve kusurların varlıkları mekanik özelliklerinin her zaman beklenen sonucu vermemesine sebep olmaktadır. Bu nedenle ahşabın özellikle nem içeriği göz önünde bulundurularak kalitelerine göre sınıflandırılması yapılmıştır. Yapılan sınıflandırma ahşap elemanın boyutlandırılması taşıyıcı, destek ya da mimari eleman olarak seçilmesi gibi durumlarda kolaylık sağlamaktadır. TS 647’ye göre sınıflandırılmış bazı ahşapların emniyet gerilme değerleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir (Saral, 2016). Avrupa’da ahşap yapı malzemesi daha çok çam türü ağaçlardan elde edilir. Avrupa ve Türkiye’de ahşap malzeme 3 sınıfa ayrılırken oldukça fazla ahşap yapı yoğunluğuna sahip Amerika’da 6 sınıfa ayrıldığı görülmektedir (Kayakıran ve Kışalı, 2019).

Tablo 2.1 Sınıflandırılmış ahşap malzemelerin emniyet gerilme değerleri

(MPa)	I. Sınıf		II. Sınıf		III. Sınıf	
	Çam	Kayın, Meşe	Çam	Kayın, Meşe	Çam	Kayın, Meşe
Çekme (Liflere dik)	3	3	2,2	2,5	1,5	2
Çekme (Liflere paralel)	105	110	85	100	-	-
Basınç (Liflere dik)	65	120	50	100	40	70
Basınç (Liflere paralel)	2	3	2	3	2	3
Eğilme	90	120	65	90	50	70

2.1.2 Ahşabın Özellikleri

Ahşabın anatomik yapısı, iklim, güneşlenme, toprak durumu, ormanın sıklığı ve ahşabın kusurları (budaklar, yarıklar vs.) gibi özellikler ahşabın teknik özelliklerini etkilemektedir. Ahşap canlı bir malzeme olduğu için içerisinde türlü mikroorganizmalar, mantarlar, böcekler ve bakteriler bulunması mümkündür. Bu canlılar ahşabın içerisinde bulunan bir takım dayanım özelliklerini belirleyen lignin ve selüloz maddeleri ile beslenir. Bu da ağacın yapısal formlarında bozulmalara sebep olur (Ali, 2011). Ahşap malzemeyi daha iyi tanıyabilmek için fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir.

2.1.2.1 Ahşabın Fiziksel Özellikleri

Ahşabın Nem İçeriği

Ahşabın nem içeriği, fırın kuru ağırlığının içerisinde var olan suyun ağırlığının yüzde ifadesidir. Kesilmiş bir ağacın içerisindeki nem %60 civarındadır. Ahşap nemli bir ortamda nemi hapseden (higroskopik) bir malzeme olmasından ötürü nem içeriğine göre fiziksel ve mekanik özellikleri farklılık gösterebilmektedir (Ekinci ve Arpacıoğlu, 2004). Ahşabın nem içeriğinin azalması, ahşabın büzülmesine neden olarak hücre duvarının yapısında bulunun selüloz molekül zincirlerinin birbirine yaklaşmasıyla birlikte çekim kuvvetlerinin güçlenmesine sebep olur ve bu da direncin artmasını sağlar.

Ahşabın maruz kalabileceği biyolojik saldırılarda (mantar ve böcek gibi) nem içeriği oldukça önemlidir. Ahşabın bu saldırılardan korunabilmesi için lif doygunluk noktasının altında bir nem içeriğine sahip olması gerekir. Ahşabın nem içeriği cinsine göre değişkenlik göstermekle beraber genelde %30 civarındadır (Karagüler ve Kaya, 2017). Ancak ahşabın yapı malzemesi olarak kullanımında, her türlü nem içeriği lif doygunluk noktasında daha düşük olacağı için biyolojik saldırılar önlenmiş olmaktadır. Ahşaptan iyi bir verim sağlayabilmek için kontrollü bir kurutma işlemi gerçekleştirilmelidir. Ahşabın kullanım amacına göre uygun nem içeriği değişkenlik

gösterse de birçok mühendislik uygulamasında ahşabın özellikleri %12-15 nem içeriğinde belirlenmektedir.

Ahşabın Yoğunluğu

Ahşap yoğunluğu düşük fakat direnci oldukça yüksek bir malzemedir. Ahşap malzemenin yoğunluğu birim hacmin içerdiği net odun miktarıdır. Yoğunluk ahşabın dayanım özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğu için önemli bir özelliktir. Ahşabın yoğunluğu da nem içeriği ile ilişkilidir. Bu yüzden, yoğunluğu ifade ederken nem içeriğinin de ifade edilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır. Aynı zamanda bu durum ham halde %12 nem içeriğinde, mutlak kuru ağırlık ve temel yoğunluk kavramlarını doğurmuştur (Desch ve Dinwoodie, 2016).

Ahşabın Elektriksel İletkenliği

Ahşabın içerisindeki su ne kadar fazla ise elektriksel iletkenliği o kadar yüksektir. Ahşap kurutuldukça elektriksel iletkenlik azalır ve kaybolur. Hatta kurutulmuş ahşap eleman alçak gerilim hatlarında izolasyonda kullanılmaktadır. Elektriksel iletkenliği etkileyen bir diğer faktör de liflerin yerleşimidir (Şenkal, 1996).

Ahşabın Isıl Özelliği

Ahşabın hafif ve gözenekli bir yapıya sahip olması ısıyı iyi depolamasını sağlar. Ayrıca içerisinde bulunan selüloz ısıyı iletmeyen bir maddedir. Ahşabın türüne ve içerdiği nem miktarına göre ısı özellikleri farklılık gösterebilir. Isıl iletkenlik katsayısı çok düşük olduğu için iyi sayılır bir yalıtım özelliği olup yapı sektöründe kaplama malzemesi olarak kullanımı görülmektedir (Şenkal, 1996).

Ahşabın Ses Yalıtımı ve Akustik Özelliği

Yalıtım özelliğinin malzemelerin kütlesi ile orantılı olduğunu düşünülürse, ahşabın hafif bir malzeme olmasından ötürü ses yalıtımı için mükemmel bir tercih olduğu

söylenemez. Ancak, sesi emerek yankı ve gürültüyü engelleyebildiği için iç mekanlarda pek çok kullanımı vardır (Caniato ve diğer., 2017).

2.1.2.2 Ahşabın Kimyasal Özellikleri

Ahşap, homojen olmayan ve lifli bir yapıya sahip olup, bu lifler doğrultusunda farklı özellik gösteren anizotrop ve organik bir malzemedir. Ahşabın doğal bir madde olması nedeniyle her bir parçanın kimyasal özellikleri nem, toprak, hava ve biyolojik faktörler gibi çevre koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Ahşabın bünyesinde bulunan selüloz, eğilme ve çekme dayanımını belirleyen maddedir. Ahşabın basınç dayanımını ise içerisinde bulunan lignin belirler (Balkan, 2019).

2.1.2.3 Ahşabın Mekanik Özellikleri

Ahşabın mekanik özellikleri liflerin doğrultusuna göre değişkenlik göstermektedir. Ahşap, liflere göre üç farklı durumda değerlendirilmelidir. Bunlar; özünden dışa doğru olan radyal yön, liflerin yönüne paralel olan ve yıllık halkalara paralel olan teğet yöndür. Bu bağlamda ahşabın yapı elemanı olarak kullanılması istenildiğinde öngörülen ahşap malzemenin mekanik özelliklerinin bu yönlerde nasıl değiştiğinin iyi bilinmesi ideal bir tasarım açısından çok önemlidir. Ahşabın mekanik özellikleri liflerin doğrultusu, nem içeriği, özgül ağırlık ve yıllık halkalarının genişliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Ross, 2010).

Ahşabın Elastisitesi

Herhangi bir kuvvet etkisi altında şekil değiştirmesi ve etki eden kuvvet kalktığında eski haline geri dönmesi zor olan cisimlerin elastisitesi düşüktür (Kaplan, 2013). Diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında ahşap orta ölçekte elastisiteye sahip bir malzemedir. Ahşabın elastisite modülünün sayısal değeri liflere paralel doğrultuda en fazla, radyal yönde daha küçük, teğetsel yönde ise en düşük değere sahiptir (Desch ve Dinwoodie, 2016).

Ahşabın yoğunluğu azaldıkça elastisitesi de azalır. Nem içeriğinin artması belli bir doygunluğa kadar ahşabın elastisitesini azaltır. Ahşabın davranışını belirleyebilmek için özellikle malzemeye ait elastisite modülünün yanı sıra poisson oranının da bilinmesi gerekmektedir. Poisson oranı eksenel sıkıştırma miktarına bölünen enine genişleme miktarı olarak tanımlanır (Dinwoodie, 1975).

Ahşabın Eğilme Dayanımı

Ahşap tasarım ve uygulamalarına bakıldığında, ahşap elemanların yükleme durumlarının çoğunda liflere dik yönde eğilme dayanımı esastır. Bu sebeple eğilme dayanımı ahşap için önemli bir özellik olmaktadır. Ayrıca, ahşabın eğilme dayanımı %3-5 nem oranında en fazla eğilme dayanımına sahip iken, nem içeriğinin bu orandan sonra artması eğilme dayanımını azaltır (Aydın ve diğer., 2007).

Ahşabın Çekme Dayanımı

Kuvvetin etki yönü ile lif açısı arasındaki ilişkinin çekme direnci üzerinde etkisi çok fazladır. Lif açısı arttıkça çekme dayanımı, basınç ve eğilme dayanımlarına nazaran çok daha fazla azalma göstermektedir (Kaya, 2017).

Ahşapta liflere dik (radyal) yönde budak ve kusurların olması bu yönde çekme dayanımının liflere paralel yöndeki çekme dayanımından daha düşük olmasının nedenlerindendir. Liflere paralel yönde sahip olduğu çekme dayanımı ahşabın diğer tüm dayanımlarına göre en yüksek olanıdır. Çekme dayanımına etki eden en önemli parametre uygulanan kuvvetin yönü ile liflerin doğrultusu arasındaki açıdır. Bu açıdaki artış, çekme dayanımında diğer dayanımlara göre daha çok değişkenliğe sebep olmaktadır (Gustafsson, 2003).

Ahşabın Basınç Dayanımı

Ahşabın liflere dik yönde basınç dayanımı çok düşük olduğu için ahşap yapı elemanı kolon gibi bir düşey eleman olarak kullanılacaksa liflere paralel yönde basınç kuvvetine maruz kalacak şekilde tasarlanmalıdır (Aydın ve diğer., 2007).

Ahşabın Makaslama Dayanımı

Birbirine yapışık olan iki kesitin ayrılması için uygulanan kuvvete ahşabın gösterdiği direnç makaslama dayanımını ifade eder. Makaslama dayanımı ahşap malzemelerin birleşim yerlerinde önem arz etmektedir. Makaslama kuvvetinin etki ettiği yön ile liflerin yönü arasındaki açı arttıkça makaslama dayanımı azalmasından ötürü liflere dik yönde en düşük değere sahiptir (Kaplan, 2013).

Ahşabın Yarılma Dayanımı

Yarılma dayanımı ahşap bir malzemenin lifleri arasına belirli bir kuvvetin girmesi ile ahşabın bu yarma işlemine gösterdiği dirençtir. Genel anlamda ahşap malzemenin yarılma dayanımı düşüktür. Yarılma dayanımı ahşapların çivi ve vida bağlantılarında özellikle önem arz etmektedir. Yıllık halkalara paralel yönde dik yöne göre daha yüksek değerdedir (Erkoç, 2004).

Ahşabın Aşınma Dayanımı

Bir kuvvet etkisiyle ahşabın içerisine girmeye çalışan yabancı cisimlere karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Ahşabın sertlik özelliği ile ilişkilidir. Ahşabın sertliği yoğunluğu arttıkça ve nem oranı azaldıkça artar. Liflerin doğrultusu da sertliği etkileyen bir parametredir. Aynı cins ağaçtan elde edilmiş ve aynı nem içeriğine sahip ahşabın liflerine dik doğrultuda sertliği fazladır (Thelandersson ve Larsen, 2003).

2.1.3 Ahşabın Değerlendirilmesi

Ahşabın doğal ve yenilenebilir bir kaynağa sahip olduğu açıktır. Ancak unutulmamalıdır ki, ahşabın üretimi için hasat edilen ağaçların yerine yeni ağaçlar dikildiği takdirde, ahşap yapıların kaynağı tükenmeyecektir. Ahşap dünyanın hemen her yerinde işlenir ve genellikle üretildiği yerin yakınında kullanılır. Bu durum, yerel ekonomileri destekler ve ahşabın uzun mesafelere taşınması için gerekli enerjiyi azaltır (Lamb, 1998).

Ahşabın yapı elemanı olarak kullanılması birçok açıdan enerji tasarrufu sağlayacaktır. Ahşap, çelik ve beton gibi diğer taşıyıcı eleman olarak kullanılan yapı malzemelerinin üretiminde olduğu gibi çok yüksek sıcaklık gerektiren imalat süreçlerine sahip olmadığı için çok fazla enerji harcamaz. Ahşap yapı malzemesinin üretiminin hiçbir aşamasında çevreye ciddi zarar verilmez (Khamsini, 2019).

Ahşap yapıların yapımı betonarme yapılara göre daha az zahmetli ve hızlıdır. Ancak yapım sonrasında bakıma daha sık ihtiyaç duyarlar. Ahşabın ısı yalıtımının iyi olması evlerin enerji kullanımının azalmasını sağlar. Daha iyi yalıtılmış bir evi ısıtmak veya soğutmak için daha az enerji gerektirmesinin yanı sıra daha az fosil yakıt kullanılarak çevresel açıdan da bir avantaj sağlayabilmektedir. Ahşap yapının ekonomik ömrünü tamamlaması halinde yıkımında da enerji tasarrufu sağlanır. Ayrıca geri dönüşüm potansiyeli yüksek atıklar meydana gelmektedir (Švajlenka ve Kozlovská, 2020).

Ahşabın diğer yapı malzemelerine göre ve boşluklu bir yapıya sahip olmasına rağmen nispeten yüksek mukavemeti vardır ve yük taşıyıcı eleman olarak işlev gören sistemler halinde tasarlanabilmektedir. Çok büyük açıklıklı elemanların yapımı için çelik ve betonarmeye göre daha iyi bir alternatif olmaktadır. Bu durum aynı zamanda yapının ağırlığının az olmasını, dolayısıyla deprem sırasında daha güvenli bir ortam yaratılmasını sağlamaktadır. Buchanan ve diğer. (2011) çalışmalarında 2011 yılında Yeni Zelanda'da meydana gelen deprem sonrasında hafif ahşap çerçeveli evlerin genellikle çok iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Betonarme taşıyıcı sistemlerde gözlenen çökme tipinde hasar yerine, ahşap yapılarda binaları sadece kullanılamaz hale getiren hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir.

Ahşabın nem içeriği malzemeden alınan verim açısından çok önemli bir parametredir. Doğru bir şekilde kurutulduğunda bazı zararlı canlılar tarafından bozulmaya maruz kalmaz. Ayrıca kimyasal sıvılarla işlenerek, kaplanarak veya boyanarak ahşap malzemenin bu olumsuz özelliği ortadan kaldırılabilir (Dalton, 2017). Ahşabın kolay işlenebilmesi, boyanabilmesi ve kaplanabilmesi ahşap yapı malzemesini mimari açıdan çekici kılar. İşçiliğinin kolay olması, imalat aşamasında basit ekipmanlara ihtiyacın olması ve taşınma durumu söz konusu olduğunda demontajından sonra yeniden kullanılabilir bir yapı malzemesi olması olumlu özelliklerindendir. Ancak ahşap elemanların montajı esnasında meydana gelen bir hatadan etkilenme potansiyeli daha fazla olmaktadır. Bu yüzden kalifiyeli bir ekip ve dikkat gerektirir (Copaland, 2020).

Taşıyıcı sistem elemanı olarak yapılarda kullanılan çelik, ısının artmasıyla genişir ve taşıma kapasitesini yitirir. Çeliğin aksine ahşap malzeme tutuşabilmesi kolay ve belli bir sınır değerine kadar ısının artmasıyla kuruyup daha da güçlenen bir malzemedir. Ahşabın genişlediği tek zaman, nem seviyesinin %0'ın altında olduğu zamandır. Pratikte ahşabın nem oranı en kurak iklimde bile %5'in altına pek düşmez. Sanılanın aksine gerekli koruma sağlanır ise ahşap yapıların yangına dayanımı oldukça fazladır. Ahşabın yangında kömürleşme özelliği ve ısıyı yalıtabilmesi sayesinde beton ve çeliğe nazaran yangına dayanımı daha fazladır (Özen, 2021). 1953 yılında New York'ta bir kazein fabrikasında gerçekleşen yangında ahşabın yangın dayanımının oldukça iyi olduğu görülmüştür (Rowell ve Susan, 2005). Daha yakın bir zamanda (2010 yılı) ülkemizde bulunan Haydarpaşa Garı'nda meydana gelen yangın sonucunda çekilmiş bir fotoğraf yapısal ahşabın yangın dayanımının ne kadar iyi olduğunu kanıtlar niteliktedir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi yangında çelik malzeme taşıma gücünü tamamen yitirmiş ve boyutsal stabilizesini kaybetmiştir.



Şekil 2.2 Haydarpaşa Garı'nın çatısından çekilmiş bir fotoğraf (Erdoğan, 2018)

2.2 Yapısal Lamine Ahşap Eleman

Ahşabın doğasında var olan kusurları en aza indirmek, başka bölgelere yayılmasını sağlamak veya gidermek, büyük ebatlara sahip yapı elemanları olarak kullanımını sağlamak, daha iyi özelliklerde ve farklı formlarda bir yapı elemanı oluşturabilmek adına masif ahşap elemanlara laminasyon işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem genellikle lif yönleri birbirlerine paralel olarak sıralanmış ahşap parçaların tutkal gibi özel bağlayıcılarla tabakalar halinde basınç kuvveti ile yapıştırılarak gerçekleştirilir. Bu işlem sonucu oluşan malzemeye lamine ahşap denir. Lamine ahşap, kullanım amacına bağlı olarak tek tip ahşap kullanılarak veya farklı derecelerde ahşaptan oluşabilir.

Bir malzemenin katmanlaşması malzeme özellikleri açısından önemlidir. Ahşap endüstrisinde, malzemenin katmanlaşması daha fazla homojenlik sağlayarak yükleme altında kritik alanlardaki malzemeye zarar veren kısımların etkisini azaltır. Bu işlem aynı zamanda, dış katmanlarda daha kaliteli ağaç türleri ile malzemenin daha az gerilmeye maruz kaldığı orta katmanlarda daha düşük kaliteli ağaç türlerinin kullanımını sağlamaktadır (Gáborik ve diğer., 2016).

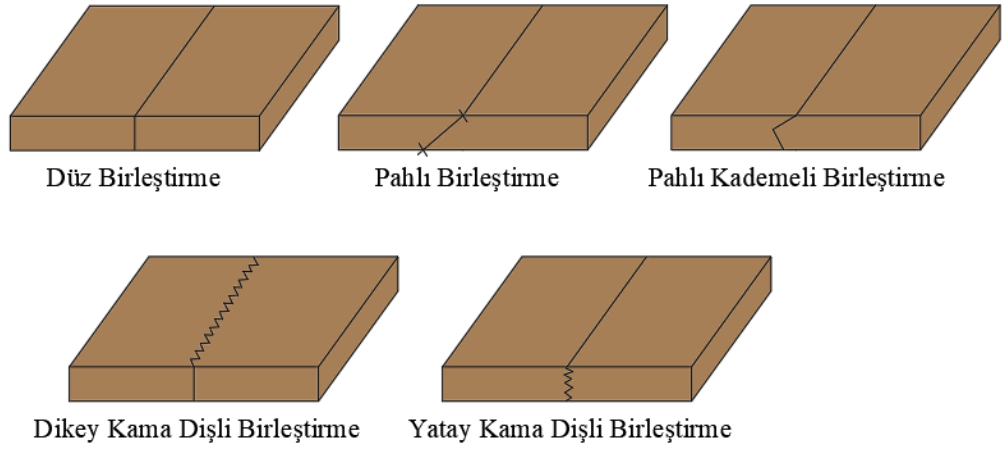
1900'lerin başında İsviçre ve Almanya başta olmak üzere tüm Avrupa'da lamine ahşap üretimi ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Hangar yapılarında, kilise ve köprülerin yapımında kullanımı karşımıza çıkmaktadır. Özellikle 2000'den itibaren yapıstırıcı

kalitelerinde ve üretim süreçlerinde gerçekleşen yeniliklerle beraber Avrupa’da artan bir hızla lamine ahşabın kullanılması yaygınlaşmıştır. 2006 yılından bu yana da Avrupa Birliği küresel ısınma ve iklim değişikliğine çare olarak ahşap kullanımını yaygınlaştırma çalışmaları gerçekleştirmektedir (Kayakıran ve Kishalı, 2019). Ülkemiz açısından yapısal lamine ahşabın geçmişini değerlendirmek gerekirse, Avrupa ve diğer gelişmiş ülkeler kadar yapı sektöründe diğer yapı elemanları kadar yer edinememiştir.

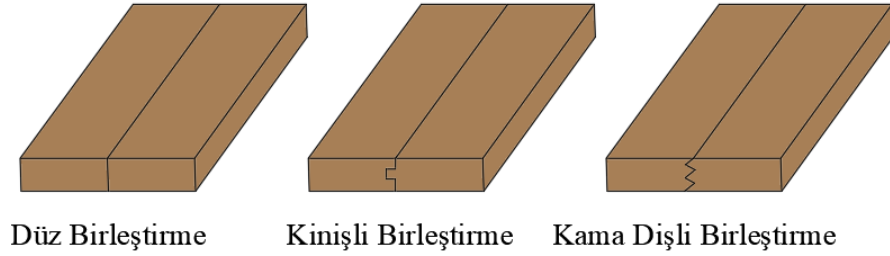
2.2.1 Lamine Ahşabın Üretimi

Lamine edilecek ahşap elemanlar uygun nem içeriğine sahip olana kadar kurutma işlemine tabi tutulurlar. Lamine ahşap elemanı oluşturacak parçaların tutkallanmasından önce emprenye işlemi gerçekleştirilir. Lamine işlemleri tamamlandıktan sonra da emprenye yapılabilir. Ancak boyutları büyük ve farklı kesitlere sahip elemanların emprenyelenme işlemi zor olabilmektedir. Bu nedenle lamine ahşabı oluşturacak ahşap elemanların önceden emprenye edilmesi en uygunudur. Bu işlem ile ahşabın içerisine su veya yağ bazlı kimyasallar emdirilerek ahşabın zararlı dış etkenlere karşı korunması sağlanır. Emprenye işleminde seçilen yöntem ve malzemelerin cinsi ahşap elemanların tutkal ile yapışma direnci üzerinde etkilidir. Bu yüzden bu işlemde dikkatli olunmalıdır (Yörür ve diğer., 2010).

Lamine ahşap elemanın hangi amaçla kullanılacağını belirlemek için önce görsel olarak derecelendirilmesi yapılır. Hemen ardından elastisite modülünün tespiti için mekanik olarak değerlendirilip sınıflandırması gerçekleştirilir. Sınıflandırıldıktan sonra lamine edilecek parçaları oluşturmak için şekilde görülen en veya boy birleşim yöntemlerinden uygun olan biri seçilir ve bu elemanların her bir uç bağlantı noktaları test edilip birleşimleri yapılır. Daha sonrasında üretimi gerçekleştirecek eleman için gereken kalite kombinasyonuna göre lamine uzunluklarının düzenlenmesi gerçekleşir. Her bir lamine katmanı planyalanarak pürüzsüz bir yüzey elde edilir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te bazı en ve boy birleştirme çeşitleri verilmiştir.

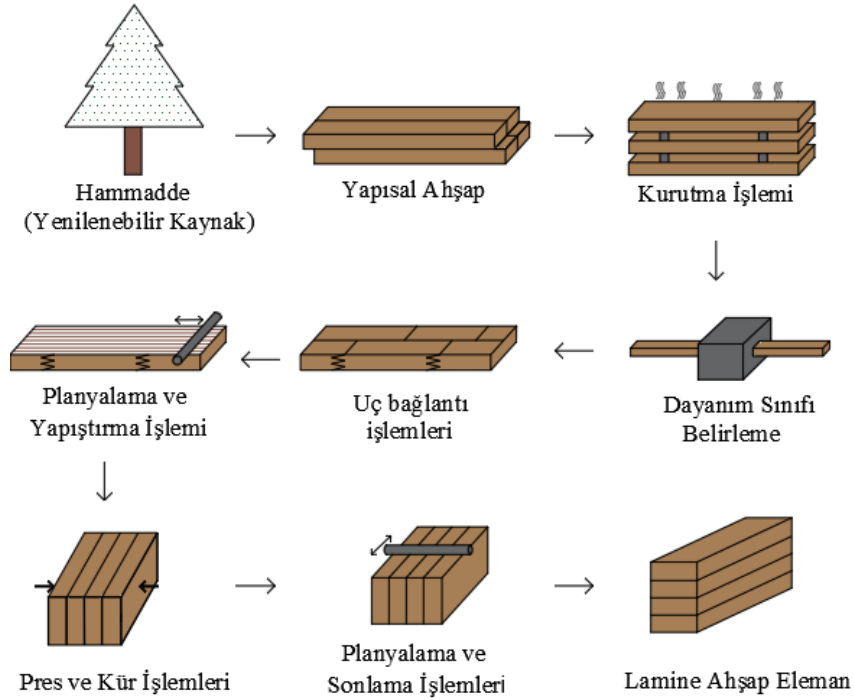


Şekil 2.3 En birleştirme çeşitleri



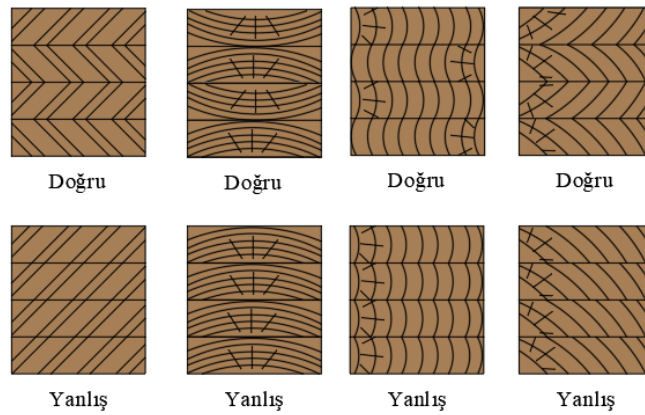
Şekil 2.4 Boy birleştirme çeşitleri

Lamine katmanları arasına yapıştırıcı sürüldükten sonra preslenerek istenilen konfigürasyonlar elde edilir. Tutkallama işlemi sonrasında laminelerin birleşimlerinden taşan tutkalların temizlenmesi için tekrardan planyalama işlemi yapılır ve lamine ahşap istenilen boyuta göre kesilip kullanıma hazır hale getirilmiştir olur (Mengeloğlu ve Kurt, 2004). Şekil 2.5'te laminasyon işlem adımları görülmektedir (Şakar ve Çelik, 2021). Eğri ve farklı en kesitli elemanlar elde etmek için de hidrolik veya manuel olarak çalıştırılan kelepçeler, elemanın etrafına yerleştirilir ve istenen eğriliği veya modeli sağlamak için desteklere önceden sabitlenmiş çelik aparatlarla temas ettirilir. Basınç uygulaması yapıldığında, laminasyonlar uygun hizalama için ayarlanıp kullanıma hazır hale getirilir.



Şekil 2.5 Laminasyon işlemleri

Lamine ahşap üretiminde lamine edilecek katların doğru bir şekilde düzenlenmesi özellikle ileri zamanlardaki dayanımı ve dayanıklılığı açısından çok önemlidir. Bu aşamada yapılan bir hatanın daha sonra düzeltilmesi mümkün değildir. Lamine katları yaş halkalarının konumuna göre düzenlenmelidir. Çünkü ahşap malzeme yaş halkalarına teğet veya radyal yönde farklı özellikler gösterir (Karayılmazlar ve diğer., 2007). Lamine katların birleşimlerinde yanlış ve doğru düzenlemelerden bazıları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Bazı yanlış ve doğru lamine kat düzenlemeleri

2.2.2 Lamine Ahşabın Değerlendirilmesi

Masif ahşap için “2.1.3 Ahşabın Değerlendirilmesi” başlığı altında belirtilmiş olan olumlu özellikler lamine ahşap için de geçerlidir. Laminasyon işleminde ahşap malzemede var olan kusurlardan arındırılarak daha etkili bir şekilde kullanılabilir. Mukavemeti olumsuz etkileyen düğümler, yarıklar ve eğimli taneler gibi kusurlar, bileşen boyunca rastgele dağıtılır ve bu da lamine ahşabın aynı sınıfa sahip masif ahşaptan daha yüksek gerilmelere göre tasarlanmasına olanak tanır (Usman ve Sugiri, 2015). Çeşitli birleştirme yöntemleri kullanılarak küçük ebatlardaki ahşap malzemelerin değerlendirilebilmesi açısından ekonomik ve kavisli elemanlar elde edilerek de mimari açıdan faydalar sağlayabilmektedir.

Laminasyon işlemi ile masif ahşaptan elde etmenin mümkün olmadığı daha büyük kesitli düzlemsel ve uzaysal yapı elemanları elde edilebilmektedir. Bu durum mimari perspektiften bakıldığında farklı tipte kesitlerin kullanımına olanak sağlayarak estetik yapıların üretimine katkı sağlamaktadır (Kasal ve diğer., 2010). Ancak bazen çok büyük ebatlara sahip lamine ahşap elemanların lojistiğinde sorunlar yaşanabilmektedir.

Laminasyon işleminde tabakalar arasına sürülen tutkalın su itici bir özelliğe sahip olması aynı özelliklere sahip masif ahşaba göre daha az nem tutmasını sağlar. Bu durum, boyutsal açıdan daha stabil bir durum yaratır. Tutkalın kalitesi lamine ahşabın dayanımını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Tutkalın kalitesi ve ilave kalifiyeli işçilik lamine ahşap malzemenin maliyetini arttırmaktadır. Lamine ahşabın maliyetini arttıran bir diğer etmen de lamine edilecek katlar arasındaki nem farklılıklarını önlemek adına yapılan kurutma işlemidir (Perçin, 2007).

Geleneksel yöntemler ile masif ahşaptan yeterli mekanik özelliklerin elde edilemediği yapı elemanlarına çözüm olarak geliştirilmiş laminasyon işlemi daha dayanıklı elemanların üretimini sağlamıştır. Masif ahşap yerine lamine ahşabın kullanımı yapıların kullanım ömrünü de uzatmaktadır. Aynı zamanda beton ve çelik gibi yapı elemanları ile birlikte kullanımına da olanak tanıyarak estetik ve teknik açıdan üstün taşıyıcı yapı elemanları üretilebilmektedir. Ayrıca kullanımı uygun

olmayan düşük sınıf ahşap elemanların en iyi şekilde değerlendirilmesine imkân vererek hammadde kaynaklarının daha etkin şekilde kullanımına katkı sağlamaktadır.

Yapılarda taşıyıcı sistem elemanı olarak betonarme veya çelik yerine lamine ahşap elemanların kullanımı toplam enerji tüketiminin daha az olduğu, daha uzun ömürlü ve çevreci yapıların üretimini mümkün kılmaktadır. Bu da inşaat sektörünün çevreye verdiği zararlar düşünüldüğünde oldukça önemlidir. Özellikle son yıllarda inşaat sektörü çok fazla atık oluşumuna sebep olmakta ve hammadde kaynaklarını hızla tüketmektedir. Geçmişte bir malzemenin üretim sürecinde aranan özellikler kolaylık, uygunluk ve fiyat esaslarına dayanırken artan çevresel kaygılarla beraber bu durum değişmiştir. Artık çevresel zararların ve enerji tüketiminin en az olacağı yöntemlerin seçimi ve geliştirilmesi malzemelerin tercihinde önemli olmaktadır. Geri kazanımı yüksek ve ekolojik yapı malzemelerin seçimi sürdürülebilir ve daha temiz bir çevre için tercih edilmeye başlanmıştır. Bu bağlamda son yıllarda ürün seçiminin kapsamlı değerlendirilmesinin yapılmasını sağlayan yaşam döngüsü analizi çalışmaları da artmaktadır (Erdin, 2003). Yaşam döngüsü boyunca ele alındığında, ahşap ve lamine ahşap yapıların, çelik ve betonarme yapılara nazaran daha az CO₂ emisyonu gerçekleştirdiği, daha az enerji tüketimi ile önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği birçok çalışmada kanıtlanmıştır (Asdrubali ve diğer., 2017).

2.2.3 Lamine Ahşap Kiriş

Ticari adı tabakalı ağaç malzeme (TAM) olarak da bilinen tutkallı lamine ahşap kirişler, (GLULAM = Glued Laminated Timber), büyük boyutlara sahip yapı malzemesi üretmek için belirli kalınlık sınırlarındaki (2,54- 5,08 cm) ahşapların uç uca, yan yana, alt alta ve üst üste eklenmesi suretiyle elde edilir (Sizüçen, 2008).

Lamine ahşap kirişlerin üretiminde aynı yüksekliğe sahip ancak farklı lamine kalınlıklarından ve kat sayısından elde edilmiş lamine ahşap kirişlerin performanslarının da farklı olması beklenmektedir. Ancak bu konuda yapılan çalışmalara bakıldığında, lamine kat kalınlığının veya tutkal hatlarının değişiminin eğilme dayanımları ve rijitliği önemli ölçüde etkilemediği sonucuna varılabilir.

Kılınçarslan ve Şimşek Türker (2019), en ve boy uzunlukları aynı h yüksekliğinde lamine ahşap kirişleri 3 farklı gruba ayırarak test etmişlerdir. Lamine kat kalınlıkları ($h/4$, $h/6$, $h/8$) veya tutkal hatlarının sayısındaki değişimin rijitlik ve eğilme dayanımları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ancak elastisite modülü değerlerinde farklılıklar gözlenmiştir. En düşük elastisite modülü değerleri en yüksek lamine kat kalınlığına sahip kirişlerde gözlenirken, en yüksek tabaka kalınlığına sahip numunelerde de yaklaşık aynı sonuca ulaşılmıştır. Orta kalınlıktaki lamine kat kalınlığına sahip kirişte de en yüksek elastisite modülü değeri elde edilmiştir. Bu durumda, daha yüksek lamine kat kalınlığına sahip numunelerin tercih edilmesi daha avantajlı olabilmektedir. Çünkü katman sayısının azalması daha az tutkal kullanımına olanak sağlayarak işçilik, zamandan tasarruf ve ekonomik açıdan kar sağlamaktadır.

Lamine ahşap kirişin izin verilen mukavemet özellikleri genellikle masif ahşaptan üstündür. Masif ahşabın özelliklerinin yetersiz olduğu durumlarda lamine ahşap kiriş yaygın olarak aşıklar, başlık kirişi ve kafes kiriş olarak otoyol köprüleri, çatı malzemesi, spor salonu, tribün ve havuz gibi yapıların büyük boyutlu eleman gerektirdiği tasarımlarda kullanılmaktadır (Karayılmazlar ve diğer., 2008). 2012 yılında açılmış ve Şekil 2.7’de gösterilen Amerika’nın Araba Müzesi buna güzel bir örnektir. Yatay mimarinin yanı sıra yüksek katlı mimaride de çok fazla tercih edilmektedir. Lamine ahşap elemanlar kullanılarak inşa edilmiş dünyanın en uzun ahşap gökdeleni olan ve Şekil 2.8’de gösterilen The Mjos Tower 85,4 metre yüksekliktedir.



Şekil 2.7 Amerika'nın Araba Müzesi, Tacoma (Kayakıran ve Kishalı, 2019)



Şekil 2.8 Taşıyıcı iskelet sistemi lamine ahşap olan Mjos Tower, Norveç (Çağlayan, 2020)

İki tür yapıştırılmış lamine ahşap kirişin veya tek tür yapıştırılmış lamine ahşap kirişin farklı mukavemet sınıflarının kombinasyonu ve laminasyonlarından elde edilen yapısal avantajlar uzun zamandır iyi bilinmektedir. Düşük kaliteli ahşap nötr eksene yakın, gerilim seviyesinin daha az olduğu, kaliteli ahşaplar da daha yüksek mukavemet gerektiren bölgelerde kullanılabilir. Bu tür kirişlerin üretimi birçok ülkede mevcuttur. Bu kirişlerin tasarım ilkeleri Amerikan Ahşap Yapı Enstitüsü ve Avrupa

Standartları'nda yer almaktadır (Toması ve diğeri., 2009). Bir lamine hşap kirişin basınç bölgesinde daha düşük kaliteye sahip ahşap malzemenin kullanılması kirişin sünekliğini arttırmaktadır. Bu tasarım kriterlerinin ve daha sonra endüstri tarafından bir spesifikasyonun geliştirilmesi, yüksek mukavemetli kirişlerde köknar ve ladin gibi daha düşük mukavemetli türlerin daha çok kullanılmasını sağlamaktadır.

Lamine ahşap kirişin malzemenin kaynaklı performansını etkileyen en önemli unsurlardan biri lamine katları arasında kullanılan tutkalın mukavemet özellikleridir. Farklı tutkallar kullanılarak yapıştırılmış lamine ahşapta tutkalın yapışma direnci lif doğrultusunda çekme, basınç ve yarıma direnci değerlerini etkilemektedir (Dilik, 1999). Perçin ve diğeri. (2009), ayrı ayrı sarıçam ve kayın ağaçlardan elde edilen ahşapları üç farklı tür tutkal ile yapıştırarak üretilen lamine ahşap elemanlara eğilme, basınç ve yapışma deneyleri yaparak incelemişlerdir. Yapışma dayanımları açısından ahşap cinsinin etkisi önemli bir farklılık yaratmazken tutkal ve ahşap etkileşimi istatistiksel açıdan önemli farklılıklara sebep olmuştur. Kayın ağacından elde edilen lamine ahşap malzemenin sarıçamdan elde edilmiş lamine ahşap malzemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği de belirtilmiştir.

Mohamad ve diğeri. (2011), Malezya tropikal ormanlarından elde edilen farklı dayanım gruplarına ait ağaç türleri kullanılarak üretilen lamine ahşap kirişlerin eğilme direnci davranışlarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Kullanılan ahşapların sınıflandırmaları yapıldıktan sonra gerekli nem içeriğine göre kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerekli işlemlerin yapıldığı ahşaplar Fenol Resorsinol Formaldehit türü bir yapıştırıcı ve bir tür sertleştirici ile eklem birleşimleri ve lamine katları yapıştırılmıştır. Lamine ahşap kirişlerin eğilme mukavemeti değerleri, eğilme altındaki ahşap için izin verilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Lamine ahşap kirişler 10 katmandan oluşmuş ve her lamine 3 cm kalınlığındadır. Çalışmada farklı mukavemet gruplarından numuneler kullanılmasına rağmen eğilme mukavemeti değerlerinde anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda hasarların ahşaptan kaynaklı olması üretim uygulamasının yani tutkal performansının iyi olduğunu göstermektedir. Tutkal performansının iyi olması ahşabın dayanım sınıflarının farklılıklarını telafi edebileceğini göstermektedir.

BÖLÜM ÜÇ
AHŞAP YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİ

Geçmişten günümüze kadar taşıyıcı sistem elemanlarında kullanım ömürleri boyunca bir dizi hasar gözlenmiştir. Bu hasarların sebeplerinin doğru tespit edilmesi oldukça önemlidir. Tespit sonrasında onarımı, güçlendirilmesi veya gerekli ise yeniden yapımı söz konusu olabilmektedir. Hasarların boyutlarına, yapıda yarattıkları ve yaratması muhtemel etkilere göre yapılacak müdahaleler değişkenlik gösterebilmektedir. Taşıyıcı sistemi betonarme ve çelik olan yapıların çoğunlukta olması bu alanlarda yapılan çalışmalarda tespit, yöntem ve tekniklerin daha çok olmasını, bu da araştırmalardan elde edilen verilerin daha gerçekçi yorumlanabilmesini sağlamıştır. Frühwald ve diğer. (2007) tarafından hazırlanan bir rapora göre birçok yapının sebepleriyle beraber hasar tespitleri ayrıntılı bir şekilde derlenmiştir. Bu çalışma sonucunda yapı malzemesi olarak ahşabın kullanıldığı yapıların hepsinin irdelenmemiş olma durumuna dikkat çekilmiştir. Yine de bu çalışma ahşap yapı ile ilişkili riskin diğer malzemeler için olduğundan daha yüksek olmadığını göstermektedir.

Dröge ve Dröge (2003), ahşap yapılarda inceledikleri 31 durum neticesinde meydana gelen ve gelmesi olası teknik hasar nedenlerini sınıflandırmıştır. Bu hasarlar aşağıda listelenmiştir:

- Birleşim yerlerinde yetersiz davranış
- Neme maruz kalmanın etkileri (gerilme, büzülme)
- Kötü dayanıklılık performansı
- Yapısal sistemin tasarımında yetersizlik
- Malzemedeki kaynaklı yetersiz performanslar
- Yüklerin yetersiz takdir edilmesi

Frese ve Blaß (2007) tarafından Almanya'daki ahşap yapıların hasar sebepleri üzerine gerçekleştirilen çalışma, sınıflandırılan ana hasar türlerinin dağılımına iyi bir genel bakış sağlamaktadır. Hasar sebepleri %38 yapısal ve fiziksel, %36 biyolojik, %9

mekanik, %5 kimyasal ve %12 diğer sebepler olarak sınıflandırılmıştır. Hansson (2011) çalışmasında hasar tespit sebeplerini diğer çalışmaları destekler nitelikte açıklamıştır. Göçme modlarını zaman (1-3 yıl) ile ilişkilendirmiştir. Sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Belirlenmiş yıllara göre göçme modlarının yüzdesel dağılımları

	<1 yıl	1-3 yıl	>3 yıl
Eğilme	0	5	22
Çekme	6	3	0
Basınç	0	0	4
Kesme	6	10	6
Tanelere Dik Çekme	0	13	11
Bağlantı Elemanlarının Gevşemesi	6	3	0
Kuruma Çatlakları	0	12	7
Burkulma	63	17	24
Sapma	0	17	4
Diğer	19	20	14
TOPLAM	100	100	100

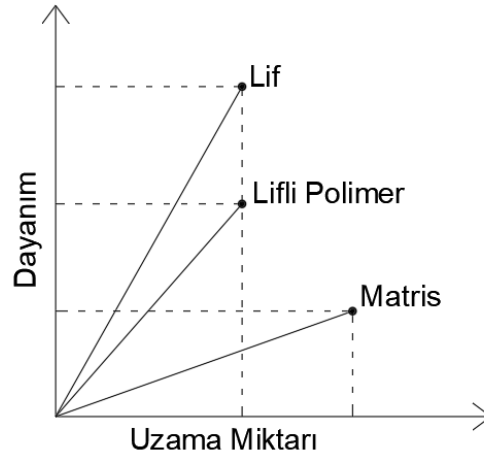
Literatürde genel olarak bina yapıları ve tüm yapısal malzemeler için çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Bu tür çalışmalardan elde edilen genel bir sonuç, neredeyse hasarların büyük bir kısmının insan hatalarından kaynaklandığıdır. Yapısal hataların insan faktörü dışarıda bırakıldığında, belirtilen hatalardan malzeme kaynaklı yetersiz performanslara çözüm bulabilmek ve ahşap malzemeden daha iyi yapısal formlar elde edebilmek için ahşap çeşitli malzemelerle güçlendirilebilmektedir. Hem ahşap hem de takviye elemanlarının avantajlarını bir araya getiren içlerinde takviye elemanları içeren ahşap yapı elemanlara kompozit veya hibrit ahşap malzeme denir. Takviye elemanı, zayıf bölgelerin erken bozulmasını önlediği için kompozit eylem, enine kesitin daha iyi kullanılmasına izin verir.

Yük taşıyan kompozit yapı malzemelerinin güçlendirilmesine veya daha iyi özelliklere sahip yapı malzemesi üretimine yönelik artan ekonomik ve çevresel talepler

yeni ve yüksek mukavemetli takviye malzemelerinin araştırılmasına teşvik etmektedir. Bu yenilikçi malzemelerin lamine ahşap malzeme ile takviyesi sonucu oluşan nihai kompozit ürünün başarılı özellikleri eski ahşap yapıların devamının sağlanmasına, güçlendirilmesine ve yeni yapıların arttırılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır. Düşük kaliteli lamine ahşap kirişlerin güçlendirilme performanslarının incelendiği bir çalışmada (Basterra ve diğer., 2017), güçlendirilmiş ahşap elemanda heterojenliğin ve kusurların etkisinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Bu durumda daha iyi karakteristik özelliklere sahip yapısal bir eleman elde edilebilmektedir.

3.1 Lifli Polimer (LP) Malzemeler

Kimyasal etkenlere, dış ortamın değişken koşullarına karşı dayanıklılığı iyi ve yoğunluğu düşük olan lif içeren kompozit malzemeler lifli polimer (LP) olarak tanımlanabilir. LP malzemeler, lif bileşeninin sürekli faz olarak da adlandırılan bir matris bileşeni tarafından tutulması prensibi ile üretilmektedir. LP malzemelerde bulunan lifler esas olarak yükü taşıma görevini üstlenirken, matris kısmı da lifleri bir arada tutmak, lif oryantasyonunu korumak ve malzemede oluşan gerilmeleri bu liflere aktarma görevini üstlenir (Teng ve diğer., 2002). LP'lerin tasarımlarında malzeme veya süreçteki bir değişiklik LP'nin özelliklerinin değişmesine sebep olacaktır. Bu durum malzemenin özelliklerinde istenilen yönde optimizasyon olanağı tanımaktadır. Şekil 3.1'de LP kompozit malzemeyi oluşturan lif, matris ve nihai LP'nin dayanım ve uzama miktarı grafiği verilmiştir. Bu bağlamda LP'nin dayanımının etkileyen lif ve matris bileşenlerinin çeşitlerinden bahsetmekte fayda vardır.

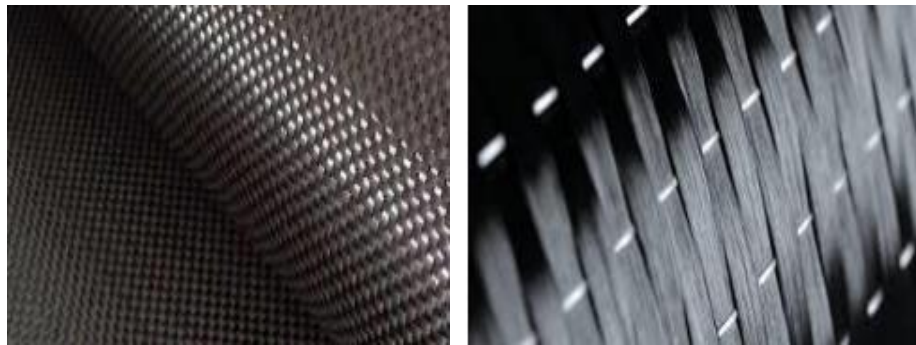


Şekil 3.1 Lifli polimerin dayanım ve uzama miktarı grafiği (Aygün, 2020)

3.1.1 Lif Bileşeni

İnşaat mühendisliği uygulamalarında LP malzemelerde sıklıkla kullanılan lif çeşitleri karbon, cam, aramid ve bazalt liflerdir.

Karbon lifler yüksek içerikli karbon öncü materyallerin yüksek sıcaklıkta oksidasyon, karbonizasyon ve grafitleştirme ile elde edilir (Şekil 3.2). Liflerin çapı 5 ile 15 μm arasında değişen karbon lifler, çok yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Grafitleme işlemi sırasında sıcaklığın değişmesiyle, yüksek dayanımlı veya yüksek elastisite modüllü lifler üretilebilir. Kullanımları uzun süre havacılık gibi alanlarla sınırlıyken, son yıllarda inşaat sektörü ve birçok alanda kullanılmaktadır. Karbon liflerin üretim süreçleri, cam liflere kıyasla çok daha yüksek mekanik, termal ve kimyasal özelliklere izin vermektedir (Buckley ve Edie, 1993).



Şekil 3.2 Karbon lifler (Karasu, 2016)

Cam lifler kum, kaolin, kalker ve kolemanitin birlikte harmanlanması ile elde edilir (Şekil 3.3). Bileşenlerin miktarlarındaki değişiklik, farklı türlerde cam liflerin (E, C, R, S ve T gibi) meydana gelmesine yol açar. Cam liflerin türleri farklı özelliklere ve dolayısıyla farklı kullanım alanlarına sahiptir. E-tipi cam lifler, iyi mekanik özellikleri ve nispeten düşük maliyetleri sayesinde birçok alanda çoğunlukla kullanılmaktadır (Wallenberger ve diğer., 2007).



Şekil 3.3 Cam lifler (Karasu, 2016)

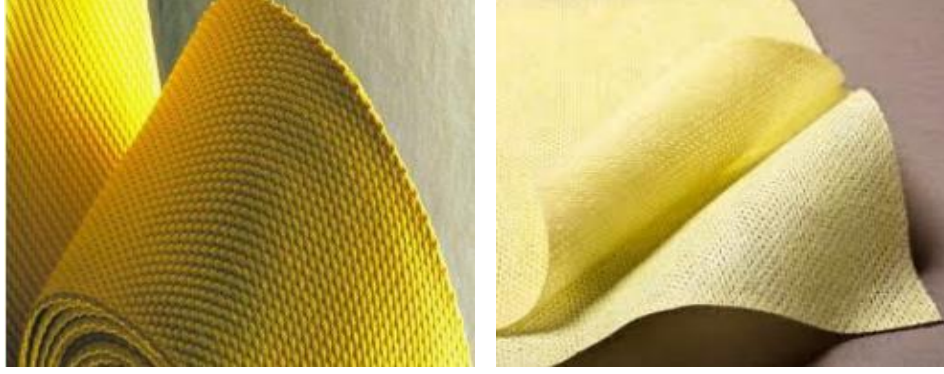
Bazalt lifler volkanik bir kayaç olan bazaltın yüksek sıcaklıklarda eritilmesi suretiyle belirli devrelerden itilerek oluşturulur (Şekil 3.4). Üretim süreçlerinin hiçbir aşamasında katkı maddesi veya öncü maddeye gerek olmadığı için çevreye az zarar verirler ve maliyetleri düşük olur. Bazalt lifler, E-cam lifler ile benzer performanslara sahip ve karbon liflere göre daha ucuz bir alternatif olabilmektedir (Ross, 2006).



Şekil 3.4 Bazalt lifler (Sharma, 2016)

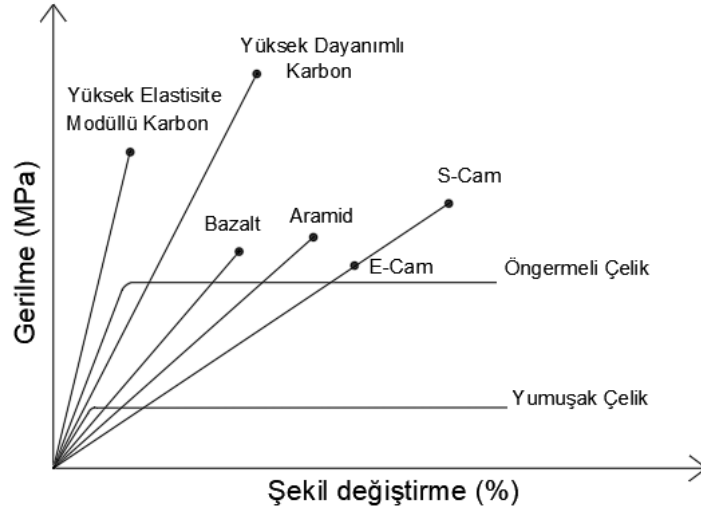
Aramid lifler diğer liflere göre düşük özgül ağırlığa sahip olmasına rağmen en yüksek gerilme dayanım-ağırlık oranına sahiptirler (Şekil 3.5). Çekme mukavemeti,

elastisite modülü ve darbeye karşı iyi direnç gösterme gibi çok yüksek mekanik özelliklere sahiptirler. Aynı zamanda aşınmaya, darbeye, kimyasallara ve termal bozulmaya karşı iyi bir dirence sahiptirler.



Şekil 3.5 Aramid lifler (Karasu, 2016)

Şekil 3.6’da yukarıda belirtilen liflerin ve çeliğin gerilme şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 3.6 Lifli polimerler ve çeliğin gerilme birim şekil değiştirme eğrileri (Aygün, 2020)

3.1.2 Matris Bileşeni

LP kompozitleri üretmek için matris bileşeni mekanik özellikleri açısından yüksek nihai dayanım ve sertliğe sahip olup LP’yi sünek kırılmaya teşvik etmelidir. Lifler ve matris arasındaki bağlanma verimli yük aktarımı sağlamak, bağların açılmasını veya

çatlakları önlemek için yeterince iyi olmalıdır. Ayrıca, her türlü zararlı dış etkenlere karşı iyi direnç göstermeli ve boyutsal stabilize özellikleri iyi olmalıdır (Doğanay ve Ulcay, 2007).

Matris bileşeni reçine, dolgu ve katkı maddesinden oluşmaktadır. Dolgu maddesi (kalsiyum karbonat, kaolin, çeşitli mineraller vs.) daha çok LP'nin fiyatını düşürmek ve profil formunu oluşturmaya yardımcı olmak için kullanılırken, katkı maddeleri istenilen özellikleri sağlamak ve nihai ürünün performansını iyileştirmek için kullanılır (Topsakal ve Özel, 2013). Matris bileşenin ana ögesi olan reçineler, termoset ve termoplastik reçineler olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

3.1.2.1 Termoset Reçineler

Termoset reçineler, LP'nin üretimi için en yaygın kullanılan matrislerdir. Genellikle oda sıcaklığında akışkan veya macun kıvamında kısmen polimerize halde bulunurlar. Uygun bir reaktif ile etkileşiminde katı ve camsı bir materyal haline gelmek üzere polimerleşirler (Solmaz, 2007). Etkileşimi, sıcaklık ayarlanarak hızlandırılabilir. Kurlenme esnasında çapraz bağlanma olarak adlandırılan üç boyutlu molekül zincirleri meydana getirirler. Çapraz bağların olması sebebiyle moleküller esnek olmamaktadır. Bu yüzden tekrardan eritilip şekil verilemezler. Çok sayıda çapraz bağlanmalar daha sert ve termal açıdan daha kararlı bir malzeme olmasını sağlar. Termoset reçineler düşük viskozite, iyi yapışkan özellikleri, oda sıcaklığında polimerizasyon özellikleri ve kimyasal maddelere karşı iyi direnç gibi çeşitli olumlu özelliklere sahiptirler (Mazumdar, 2001). Termosetler doğası gereği kırılmandır ve genellikle bir çeşit dolgu ve takviye ile kullanılır. Kırılmaya karşı zayıf tokluk özellikleri ve pahalı olmaları da olumsuz özellikleridir (Schweitzer, 2006). İnşaat mühendisliği uygulamalarında termoset reçinelerden en yaygın olarak epoksi, polyeşter ve vinileşter reçineler kullanılmaktadır.

Epoksi reçineler yüksek mukavemet özelliklere sahip, nem ve kimyasal maddelere karşı iyi bir direnç ile karakterize edilirler. Mükemmel yapışma kombinasyona sahip olan bu reçinenin bazı formülasyonları ısı veya basınç olmadan bile kurlenebilir.

Genelde yavaş kürlenirler ve tamamen kürlendikten sonra oldukça kırılıgandırılar. Teknolojik gereksinimlere ve hedeflenen nihai özelliklere göre hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda uygulanabilir.

Polyester reçineler epoksi reçinelere kıyasla daha düşük bir viskoziteye sahiptirler. Bu da kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Mekanik dayanımları ve yapışma özellikleri epoksi reçinelere göre daha düşüktür ve kalıplamada büzülmesi de daha fazladır. Ayrıca, cam liflerle kullanımı popülerdir ve epoksi reçinelere göre fiyatı daha ucuzdur (Ateş, 2006).

Vinil ester reçineler hem yüksek sıcaklıklar hem de kimyasal olarak agresif çevre uygulamaları için sıklıkla kullanılırlar. Geleneksel polyester reçinelerin performansı ile epoksi reçinelerin performansı arasında bir dengeyi temsil ettiği söylenebilir. Vinil ester reçineler, bir epoksi reçinesi ve doymamış bir karboksilik asitin sentezlenmesiyle üretilirler. Farklı uygulamalarda farklı vinil ester reçine çeşitleri tercih edilir (Kartal ve diğer., 2019).

Fenolik reçineler ahşap kompozit endüstrisi için ağırlıklı olarak kullanılan yapıştırıcılardan biridir. Bu sebeple, fenolik reçine kullanılarak üretilen LP'lerin ahşap kompozit malzemelerle daha uyumlu olduğu görülmektedir. Fenolik reçineler genellikle boyutsal olarak sıcaklığa karşı kararlı yapıdadırlar. Oldukça iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptirler. Aynı zamanda yapışma özelliği bakımından da iyi sayılırlar. Fenol-resorsinol formaldehit reçineler, LP için bir reçine matrisi olarak ve diğer birçok uygulamada bir bağlayıcı olarak çok popüler kullanılırlar (Gardziella ve diğer., 2013).

3.1.2.2 Termoplastik Reçineler

Termoplastik reçineler, polimerik matrislere sahip lif takviyeli kompozit malzemelerde termoset reçineler kadar sık olmasa da yine de kullanımı mevcuttur. Isıyla sertleşen reçinelere göre kullanımı farklı teknikler gerektirir. Termoplastikler ısıtılarak eritilebilir ve soğutularak katılaştırılabilir. Termoplastik moleküller çapraz bağlanmadıkları için esnek ve yeniden biçimlendirilemezler (Özer, 2015).

Termoplastikler genellikle yüksek sıcaklıklarda zayıf sünme direnci gösterir ve çözücülere karşı savunmasızdırlar. Termoplastik malzemeler, termoset polimerlerden daha sert ve daha az kırılabilir olma eğilimindedir, bu nedenle dolgu maddelerinin dahil edilmesine gerek kalmadan kullanılabilirler. Bununla birlikte, tüm termoplastikler bu kategoriye girmez. Bazıları kolayca çatlamaya meyillidir, bu nedenle her durum kendi özelliğine göre değerlendirilmelidir. Temel yapıları sayesinde termoplastikler, ısıyla sertleşen polimerlerden daha az boyutsal ve termal olarak kararlı iken üretim maliyetleri daha düşüktür (Çelik, 2013).

Polietilen ticari bir polimer olmasına rağmen, uygun şekilde tasarlandığı takdirde yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda performans gösterebilir. İyi kimyasal dirence sahip, işlenmesi kolay, sertlik özelliği iyi ve ucuz bir reçine türüdür. Orta ve yüksek yoğunluğa sahip polietilen çeşitleri daha güçlü ve daha sert yapıdadırlar (Peacock, 2000).

Polipropilen düşük yoğunluklu, polietilen ile aynı jenerik grubun parçası olan, oda sıcaklığının üzerinde serttir ve kalıplanması çok kolaydır. Oldukça iyi yorulma direnci ve gerilme çatlağı direncine sahip bir reçinedir (Coran ve Patel, 1980).

3.1.3 LP Üretim Yöntemleri

LP malzemelerin üretiminde kaliteyi doğrudan etkileyen kritik aşamalardan biri lifler ile matris malzemenin birleştirilmesi aşamasıdır. Üretim yöntemlerinden biri olan elle kalıplama yöntemi ile levha ve boru gibi malzemeler üretilebilmektedir. Hazırlanan kalıba, kaliteli bir yüzey oluşturmak için pekiştirici kalıptan önce jel tabakası serilir. Pekiştirici tabaka kalıba yerleştirildikten sonra yüzeyine reçine sürülüp tabakaların arasında hava boşlukları kalmayacak şekilde kalıplama işlemi tamamlanır. Bu yöntemde düşük bütçe ile istenilen büyüklükte ve çeşitlilikte ürünlerin üretilebilmesi avantajları olarak kabul edilebilir. Kalıplamayı yapan kişinin işin ehli olup olmaması hem çıkan ürünün kalitesinin hem de belli bir standartın elde edilme zorluğu ve düşük viskozite sebebiyle işlenebilme zorluğu dezavantaj olarak kabul edilebilir (Pop ve Gheorghe, 2010).

Püskürtme ya da diğer bir deyişle spreycalılıma yönteminde lifler bir el tabancasında kırılarak kısa lifler haline getirilir ve sertleştirici ile karıştırılan bu lifler bir kalıba püskürtülerek üretim tamamlanır. Püskürtme yöntemi daha karmaşık ve kıvrımlı yapıların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem düşük maliyetinin yanı sıra uygulama hızı yüksek olduğundan kısa sürede uygulama imkânı sağlamaktadır. Öte yandan, düşük viskozite ve kısa lifli yapıdan dolayı mekanik özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir. Vakumlu paketleme yöntemi ise elle kalıplama yöntemi ile benzerdir. Aralarındaki fark reçine sürölme işleminin vakum ortamında gerçekleşmesidir. Vakumlama elle kalıplama yönteminden daha avantajlı ve güvenilir özelliklere sahiptir. Vakumlama yöntemi ile üretilen malzemenin daha yüksek lif oranı, daha az hava boşluklarına sahip olduğu gözlenmektedir. Vakumlama yönteminin bir önemli avantajı ise reçinenin homojen olarak dağılması yapının mukavemetinin daha stabil ve yüksek olmasını sağlamaktadır. Ancak ilave işlemler gerektirdiği için daha maliyetli olmaktadır. Betonarme ve ahşap gibi kompozit malzemelerin onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan LP malzemeler bu yöntemle daha çok üretilmektedir (Mağdala, 2009).

Dairesel ve oval şekilli yapıların üretimi için uygun bir yöntem olan filaman (lif) sarma yöntemi de LP üretim yöntemlerinden biridir. Reçine içerisine daldırılmış lifin, yüzeyine ayırıcı sürölmüş dönen bir kalıba sarılma esasına dayanır. Beton üretiminde kullanılan silolar bu yöntemle üretilebilmektedir. Pultrüzyon veya çekme adıyla anılan bir diğer yöntemde, lifler uygun bir reçineyle birleştirilip sıcak bir kalıptan çekilerek oluşturulur. Bu yöntem kalıpla çekme işlemi ile yapıldığından en hızlı metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca çekilen malzemeler hafif olmakla birlikte yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmaktadır. LP profil çubuklar, ankraj sistemleri, borular, ön germe çubukları ve donatılar bu yöntemle üretilmektedir (Keskin, 2005).

Preste kalıplama yönteminde reçine ve pekiştirici iki parçadan oluşan kalıplarda ısı ve basınç etkisiyle şekillendirilir. Bu yöntem ile üretilen malzemeye bakıldığında, tüm parçaların homojen kalitede üretilmesi, yüksek basınç nedeniyle iyi özelliklere sahip olduğu ve hızlı bir üretimin gerçekleştiği görölmektedir. Onarım ve güçlendirmede

kullanılan kumaşlar bu yöntemle üretilmektedir (Mathur, 2006). Bir diğer kullanılan yöntemlerden biri olan otoklav yönteminde malzemenin içindeki hava boşluklarını yok etmek için ısı ve basınç uygulanması gerekebilir. Bakıldığında vakumlama yöntemiyle benzer bir yöntemdir. Otoklav kullanılarak yüksek kalitede bir malzeme üretmek mümkün olsa da süre ve maliyet açısından daha dezavantajlı olduğu bilinmektedir.

Bu anlatılan yöntemlerin dışında enjeksiyon, savurma kalıplama ve reçine transfer kalıplama gibi çeşitli yöntemler de bulunmaktadır. Ancak bu tez kapsamında ahşap ve lamine ahşap yapıların güçlendirilmesinde kullanılan LP çeşitlerinin üretim yöntemlerinden daha detaylı bahsedilmiştir.

3.2 Lamine Ahşap Kirişlerin LP ile Güçlendirilmesi

Önceleri takviye elemanı olarak alüminyum ve çelik gibi metalik elemanlardan üretilmiş çubuk ve plaka formları kullanılmaktaydı. Silker (1962), seçili laminasyonlar arasına yerleştirilen alüminyum plakalar ile hem yatay hem de dikey olarak lamine edilmiş ahşap kirişleri güçlendirmiştir. Sertlikte ortalama %40-50 artış olsa da nihai moment kapasitesinde yalnızca küçük artışlar gözlemlemiştir. Ayrıca ahşabın nem etkisinden dolayı ahşap ve alüminyum bağlarında bir miktar tabakalaşma olmuştur. Ahşap yapılar için çelik takviyesinin araştırıldığı birçok çalışma, çeliğin yapısal olarak alüminyumdan daha etkin ve verimli bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Bulleit ve diğer., 1989; Lantos, 1970).

20. Yüzyıl'ın sonlarına doğru çelikten daha düşük yoğunluğa sahip LP malzemeler inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. LP malzemelerin ahşap kompozitlerle uyumluluğunun metallerden daha iyi olduğu düşünülmektedir. LP malzemeler, ahşaptan 70 kat daha fazla tasarım çekme dayanımlarına ve 10 kat daha fazla çekmede elastisite modülüne sahiptirler (Martin ve diğer., 2000). Ahşap malzemeye LP malzemelerin takviyesinde öncelikli amaç onarım ve yapısal iyileştirme (güçlendirme) çalışmalarıydı. Sonrasında ahşaptan daha dayanıklı ve yeni bir yapı elemanı üretme hedefi ile yapıya montajı öncesinde LP takviye edilmiş ahşap kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Büyük açıklık uygulamalarında sapmaların kontrol edilmesi

ve estetik amaçlar için yapı elemanının boyutlarının sınırlandırılmasında, kesiti daha rijit bir malzeme ile güçlendirmek iyi bir çözümdür (Haiman ve Žagar, 2002). LP malzemeler, yoğunluklarının düşük olmasından dolayı yapı elemanının ağırlığını ve kesitini fazla arttırmadan dayanım özelliklerinin yanı sıra dayanıklılık özelliklerinin de geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

İyi mekanik özelliklere sahip olan LP takviyelerinin rolü, ahşabın mekanik özelliklerini yerel olarak iyileştirmenin yanı sıra yerel yırtılmayı sınırlamak ve çatlak açıklığını durdurmaaktır. LP malzemelerin bugüne kadar olan uygulamalarının çoğu, kiriş çekme bölgesine uygulanan farklı formlarda LP kullanarak ahşap kirişlerin tümünü güçlendirmek olsa da yerel kusurların etkisini azaltmak için küçük LP malzemelerin takviye uygulamaları nispeten sınırlıdır. Corradi ve diğer. (2021), LP plaka kullanılarak güçlendirilmeden önce ve sonra statik yüklere maruz kalan küçük ahşap kirişlerin eğilme direncinin değerlendirilmesini ele almıştır. Bu çalışmada, kusurların kaydedildiği yerlerde LP plakalar yerel olarak uygulanmıştır. Yerel olarak güçlendirilmiş ahşap elemanların eğilme yüküne maruz kaldığında yapısal tepkisi bir dizi deney yapılarak incelenmiştir. Hasarlı ahşap kirişlerin eğilme kapasitesinin, çalışmada önerilen takviye yönteminin uygulanmasıyla kısmen eski haline getirilmesinin mümkün olduğunu gösterilmiştir.

Zamanla LP malzemelerdeki çeşitlilik, gelişmeler ve sentetik liflerin artan kullanılabilirliği, lifli polimerlerin ahşap malzemeye takviyesinde çelikten daha iyi bir alternatif haline gelmiştir. Çelik ve LP ile güçlendirme çalışmalarının incelenmesi sonucunda kıyaslamaları Tablo 3.2’de özetlenmiştir (Garzon Barragán ve Jacob, 2007; Issa ve Kmeid, 2005). Ancak LP özellikleri çok fazla değişkenlik gösterdiği için bu kıyaslama genel olarak bu şekilde olsa da bazı durumlarda farklılıklar olabilmektedir. Örneğin karbon lif takviyeli polimerlerin çoğu durumda elastisite modülü çelikten büyüktür.

Tablo 3.2 LP ve elik özelliklerinin kıyaslaması

zellikler	LP	elik
Düşük yoğunluk	+	
Yüksek Elastisite Modülü		+
Korozyona Dayanıklılık	+	
Yüksek Çekme Dayanımı	+	
Yüksek Yarıılma Dayanımı	+	
Düşük Isı İletkenliğı	+	
Düşük Manyetik Geçirgenlik	+	
Değışken Hava Koşullarına Uyumluluk	+	
Montajda Uzmanlık Gerektirme	+	
Bağılantı ve Birleşim Kolaylığı		+
Yangına Dayanıklılık		+
Düşük Maliyet		+
İzotropik zellik		+
Gevrek Göçme	+	

Güncel alışmalar incelendiğinde, ahşap ve lamine ahşap kirişlerin LP ile güçlendirmesinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Wang ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada LP ile güçlendirilmiş bir ahşap sistemdeki olası hasar türlerini sınıflandırmıştır:

- Ahşap çatlağı
- Ahşap ve yapışkan arayüz hatası
- Kohezif hasar (yapışkan katman hatası)
- LP ve yapışkan arayüz hatası
- LP delaminasyonu (bazı liflerin reçine matrisinden ayrılması)
- LP kopması

Kılınçarslan ve Şimşek Türker (2020), uygulaması kolay ve basit olan LP kumaşların masif ahşap kirişin eğilme davranışına etkisini araştırmışlardır. LP uygulaması ile masif ahşap kirişin yük taşıma kapasitesi, sarılmamış masif ahşap kirişe göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca LP takviyesinin yer değıştirme miktarını önemli ölçüde arttırarak başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Sonlu eleman

modelleme ve statik analiz sonuçları, bu iki analiz arasında yüksek korelasyon sağlanmıştır. Modelleme ile birlikte LP ile sarılan karaçam (Larix) kirişinin simülasyonu sağlanarak eğilme özellikleri analiz edilmiştir.

Amerika’da az kullanılan köknara benzer bir çam ağacından elde edilen düşük, orta ve yüksek kaliteli ahşaplardan üretilmiş lamine ahşap kirişlerin LP ile güçlendirilmesi araştırılmıştır. Kirişlerin çekme bölgelerinde %1,1-3,1 LP takviyesi mukavemette %56’ya kadar, dayanımda ve sertlikte %37’ye kadar önemli kazanımlar göstermiştir. Dayanımdaki en büyük artış, daha düşük ahşap sınıflarında elde edilmiştir. Bu nedenle, bu teknolojiye kaynaklanan en yüksek katma değerli faydaların daha düşük ahşap sınıflarında gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Bunun nedeni, LP takviyesi eklenerek iyileştirilebilen bağıl çekme/basınç dayanım değerlerinde daha büyük bir farka sahip olan daha düşük ahşap sınıflarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Dagher ve diğer., 1996).

3.3 Lamine Ahşap Kirişlerin LP ile Güçlendirme Konfigürasyonları

Lifli polimerler ve yapıştırıcılar uzun yıllardır yapısal elemanların onarımı ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. LP’lerin takviye teknikleri genel olarak şantiyede yapısal yapıştırıcıların kullanımına dayanan ve çok yaygın hale gelen diğer güçlendirme prosedürlerin bir uzantısı olarak uygulanmaktaydı. Bir dönem mühendis ve uygulayıcılar için mevcut olan yerleşik tasarım kuralları ve yapıştırıcıların yetersiz özellikleri geleneksel tekniklere veya ahşap parçaların tamamen değiştirilmesi tercih edilebilir bir seçenek olarak birçok durumda farklı kullanımları önemli ölçüde kısıtlamıştır (Schober ve diğer., 2015). Ancak, son on yılda yapılan çalışmalar LP takviyelerinin kullanımının yapıda yarattığı etkilerin daha iyi anlaşılmasına, farklı tekniklerin geliştirilmesine ve uygulanmasına vesile olmuştur.

LP’ler çeşitli formlarda mevcut yapıların yerinde gerçekleşen uygulamalarında mukavemet özelliklerini iyileştirmek için kritik konumlara veya hasarlı kiriş uçları kesilip yeni elemanla değiştirilerek yük aktarımı için takviye edilebilirler. Özellikle ağır yüklere maruz kalan yapısal uygulamalarda ahşap ürünlerinin kullanımındaki bir

sonraki adım olan yeni güçlendirme teknolojileri de değerlendirilerek LP ile lamine ahşap kirişlerin güçlendirilme konfigürasyonları ele alınacaktır.

Lamine ahşap genellikle beton ve çelik gibi diğer yapı malzemeleri ile kıyaslandığında nispeten düşük eğilme dayanımına ve sertliğe sahiptir. Lamine ahşap malzemeler de uygulamada taşıyıcı eleman olarak daha çok kiriş formunda kullanılmaktadır. Bu yüzden lamine ahşap kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi yerinde bir yaklaşım olmaktadır. Kirişler eğilme, kesme ve hem kesme hem de eğilmeye karşı güçlendirilebilmektedir. LP ile güçlendirme yöntemlerinde yapı elemanı pozitif bir moment aldığı anda, daha çok çekmeye maruz kalan lamine ahşabın alt bölgelerine LP takviye edilerek bu bölgeler olası kuvvetlere karşı güçlendirilmiş olur. Ancak pozitif ve negatif bir moment aldığı anda çekme ve basınç bölgelerinin her ikisinde de takviye verilmelidir (Usman ve Sugiri, 2015).

Eğilmede test edilen lamine ahşap kirişler genellikle düğüm noktalarında, kusurların yakınında, parmak eklem birleşim yerlerinde veya maksimum gerilimli bölgede yani çekme bölgesinde hasar alırlar. Daha öngörülebilir plastik bir göçme modu elde etmek için bu bölgelerde LP uygulaması yapılır. Eğilmede test edilen güçlendirilmiş lamine ahşap kirişler, kırılma davranış sergileyen güçlendirilmemiş kirişlere göre daha sünek davranış sergilerler (Issa ve Kmeid, 2005). LP takviyeler, eğilmede test edildiğinde lamine ahşap kirişin sertliğini de arttıracaktır (Alhayek ve Svecova, 2012). Böylece başarısız bir ahşap yapının ya da yeni yapılacak lamine ahşap yapıların hasar anında tahliye süresi de arttırılmış olacaktır.

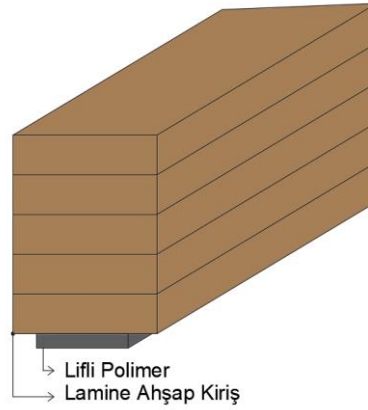
Geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip, göçme modunun daha iyi kontrol edilebildiği lamine ahşap kirişlerin güçlendirmesini araştıran projeler uzun yıllardır yapılmaktadır. Araştırmacılar tarafından ahşap ve lamine ahşap kirişler farklı LP çeşitleri, yapıştırıcılar ve konfigürasyonlar kullanılarak güçlendirilmiştir (Wangaad, 1964). Bu bölümde eğilme etkisi altında kalan ahşap ve lamine ahşap kirişlerde en çok önerilen ve kullanılan LP takviye konfigürasyonları ele alınacaktır. Bu yöntemler dış yüzeyde ve dış yüzeye yakın takviye olarak iki ana başlık altında kategorize edilmiştir.

Bu kısımdan sonra Şekil 3.7 ile Şekil 3.16 arasındaki konfigürasyonlarda gösterilen lamine ahşap kirişlerde LP'ler kesit boyunca sürekli olarak devam etmektedir. Şekiller tam bir ölçü içermeksizin esas bir yöntemi sözel olarak ifade ederken ve incelenen literatür çalışmalarına atıflarda bulunurken daha iyi anlaşılabilmesi için sembolize edilmişlerdir. LP'lerin kirişe göre konumları, genişlikleri, kalınlıkları, boyları, çapları ve adetleri değişkenlik gösterebilmektedir. Belirtilen yöntemler esas alınarak veya bahsedilenlerin dışında farklı şekillerde tasarlanabilecek her bir konfigürasyon da birer alternatif oluşturabilmektedir.

3.3.1 Dış Yüzeyde Takviye

Harici olarak bağlanmış takviye olarak da bilinen bu yöntem genellikle hasar görmüş veya dayanımı yeterli olmayan mevcut ahşap ve lamine ahşap yapıların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem, kirişin dış yüzeyine kumaş veya plaka (levha) şeklinde, sürekli veya süreksiz bir yapıştırıcı yardımıyla takviyesini gerektirir. Daha çok estetik kaygının olmadığı hasarlı elemanların mukavemetinin artırılması gerektiğinde tercih edilmektedir. Bu tip takviyelerde tek veya çift yönlü LP kumaşlar, plakalar farklı şekillerde kirişi sararak uygulanır. Hasarın derecesine bağlı olarak LP katmanları üst üste birden fazla uygulanarak takviye oranları artırılabilir. Bu uygulama yönteminde kirişin yüzeyinde yapıştırıcı öncesi hazırlık LP ve yapıştırıcı arasındaki bağın kalitesi açısından önemlidir.

1. Alternatif: Şekil 3.7'de görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinin en çok zorlandığı orta hattından kesit genişliği boyunca istenilen uzunluk kadar LP kumaş veya levhalar yapıştırılarak uygulanır. Bu yöntemde kirişin eni tamamen sarılmaz. Hesaplamalar sonucu yeterli görülen genişlik kadar takviye uygulanır.



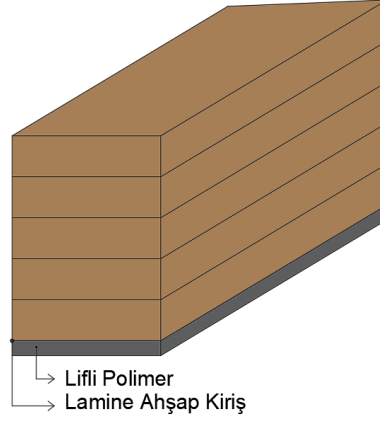
Şekil 3.7 Güçlendirme konfigürasyon örneği-1

Thorhallsson ve diğer. (2017), 65x167x3200 mm boyutlarında 12 adet GL32h, 12 adet GL30c dayanıklılık sınıfına ait toplam 24 adet lamine ahşap kirişi test etmişlerdir. Kirişlere Şekil 3.7’deki gibi CLP, BLP ve ön germeli BLP takviye edilerek 4 noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları, basınç kuvveti altında doğrusal elastik ve plastik davranışını dikkate alarak oluşturulan sayısal model ile karşılaştırılmıştır. İlave lif kumaş tabakaları şeklinde artan takviye oranı hem mukavemet hem de sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. LP’nin ön gerilmesi, gevşek LP güçlendirmesine kıyasla daha çok mukavemet ve rijitlik artışı sağlamıştır. Kirişler CLP veya BLP ile güçlendirildiğinde, mukavemette %37 ile %57 arasında artışlara sahip iken ön germeli BLP kullanıldığında %64’e kadar artış gözlenmiştir.

Yusof ve Rahman (2017), Şekil 3.7’de verilen yönteme uygun olarak LP genişliklerinin (kiriş yatay eksen doğrultusunda) değişmesi ile kirişlerin davranışlarını incelemişlerdir. Karbon lifli polimer (KLP) plakalar kullanılarak güçlendirilmiş 10x20x300 cm boyutlarında 5 adet ahşap kirişin eğilme davranışı araştırılmıştır. 1 adet güçlendirilmemiş kiriş ve diğer kirişlerde 25, 30, 50, 60 mm kalınlıklarında KLP takviye edilerek kirişlere 4 noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. Güçlendirilmiş kirişlerin nihai ve servis yüklerinde KLP alanı artışına bağlı olarak %27,1 ile %80 arasında artışlar görülmüştür. Ahşap kirişlerin KLP ile güçlendirilmesi rijitlikte de %32,6 ile %87,6 arasında artmıştır.

2. Alternatif: Şekil 3.8’de görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinde en kesit genişliğinin tamamı dıştan LP kumaş veya levha ile sarılarak uygulanır. Bu yöntemde

kirişin kapasitesinin yetersiz kaldığı bazı durumlarda üst üste istenilen adette katman olacak şekilde takviye oranı arttırılarak uygulanabilmektedir.

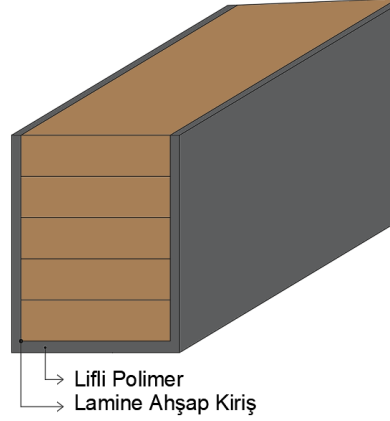


Şekil 3.8 Güçlendirme konfigürasyon örneği-2

Donadon ve diğer. (2020), yaptıkları çalışmada düşük mukavemete sahip bir ahşap, yüksek mekanik özelliklere sahip sentetik bir termoplastik lif olan Vectran liflerden elde edilmiş LP ve epoksi yapıştırıcı kullanarak üretilen kompozit lamine ahşap kirişleri test etmişlerdir. LP kumaşlar Şekil 3.8’de verilen yöntem gibi farklı katlarda takviye edilmişlerdir. Nihai LP kalınlıkları 3 mm ile 9 mm arasında değişmektedir. Bu güçlendirilmiş lamine ahşap kirişler takviyesiz benzer kirişlere kıyasla hem rijitlikte %19,48 ile %34,95 hem de nihai yükte %7 ile %40 arasında artış sağladığı görülmüştür. LP’nin yapısal güçlendirme olarak uygulanması, gevrek göçme modundan daha sünek kırılmaya modifiye etmiştir. Ayrıca, kirişin sertlik değerlerinin standart sapmasının azaldığı görülmüştür. Takviyeli yapıştırılmış lamine ahşap kirişlerin kullanılması, nihai yüklerde daha az değişiklik yaratarak, daha yüksek kalite kontrollü yapısal bir malzeme elde etmeyi mümkün kılmış ve böylece ahşap esaslı kompozit malzemelerdeki ahşabın kusurlarını azaltmıştır.

3. Alternatif: Şekil 3.9’da görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinin tamamı sarılıp eğilmeye karşı, kiriş yüksekliği de her iki taraftan sarılarak kesmeye karşı güçlendirilir. Kirişin hem eğilmeye karşı hem de kesmeye karşı güçlendirilmesini sağlayan bu yöntem U şeklindedir. Bu yöntemde kiriş yüksekliği boyunca olan uzunluklar uygulamaya göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bazı durumlarda kirişin yüksekliğinin yarısına kadar veya kirişin en alt lamine katlarından birkaçını içine

alacak şekilde sarıldığı uygulamalar görülmektedir. Bu yöntemde LP kumaşlar kirişin yatay ve düşey ekseninin birleşim hattındaki uygulama kolaylığı sebebiyle tercih edilmektedir.



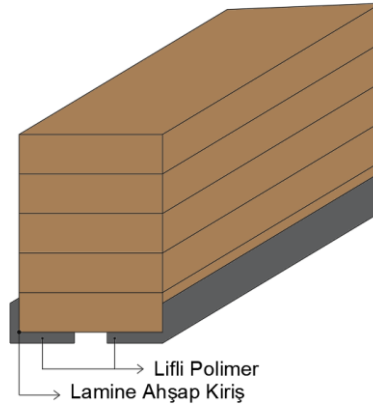
Şekil 3.9 Güçlendirme konfigürasyon örneği-3

Johns ve Racine (2001), ahşabın çekme bölgesine kiriş yüksekliğinin belli bir kısmını sarılarak Şekil 3.9'daki gibi U şeklinde takviye edilen CLP'nin kat ve uzunluk etkisini araştırmışlardır. Küçük ölçekli numunelerde çift katlı, büyük ölçekli numunede de tek katlı CLP takviyesi yapılmıştır. Takviyesiz kontrol kirişlerine kıyasla KLP uzunluğuna bağlı olarak %40 ile %70 arasında mukavemet artışları elde edilmiştir. Çoğu hasarın kompozit malzemeden ziyade ahşap malzemenin plastik deformasyonu sonucu meydana geldiği belirtilmiştir. Ahşaba takviye edilen KLP, düşük kaliteli ahşabın davranışı üzerinde bir etkiye sahip olduğu doğrulanmaktadır. Oluşan çatlakların genişlemesi engellenmiş, kusurların etrafındaki gerilme yoğunlukları azalmış ve yayılmanın durduğu yorumları yapılmıştır.

Buell ve Saadatmanesh (2005), mevcut büyük elemanlı köprü kirişlerinin yük taşıma kapasitesini artırmak için mevcut ahşap kirişleri güçlendirmek için LP malzemelerin nasıl kullanılabileceğini araştırmışlardır. Şekil 3.9'daki yöntem esas alınarak farklı uzunluklarda kirişi saran çift yönlü KLP kumaşların kiriş performanslarına etkisi değerlendirilmiştir. Bazı kirişlerin basınç bölgesine de farklı uzunluklarda KLP dahil edilerek güçlendirilmiştir. Sonuçlar, ahşap kirişlerin eğilme ve kesme kapasitesinde önemli artışlar ve kirişlerin rijitliğinde de artışlar sağladığını göstermektedir.

Lacroix ve Doudak (2018), hem tek yönlü hem de çift yönlü CLP kullanılarak U şeklinde farklı formlarda güçlendirilmiş tam ölçekli lamine ahşap kirişleri hem statik hem de dinamik yükler altında test etmişlerdir. Tek yönlü LP kullanımında pik sonrası dirençte önemli bir katkı sağlanmazken, çift yönlü LP kullanımında pik sonrası dirençte önemli bir katkı sağlanmıştır.

4. Alternatif: Şekil 3.10’da görüldüğü gibi kirişin en ve boyunun birleştiği köşe hatlarından başlayarak istenilen ve yeteri kadar süreklilik göstermesi esasına dayanır. Bu yöntemde eğilmeye karşı güçlendirmesine ek olarak kirişler kısmen kesmeye karşı da güçlendirilmiş olmaktadır. LP alt lamine yüksekliği boyunca istenilen uzunlukta devam ettirilebilir.



Şekil 3.10 Güçlendirme konfigürasyon örneği-4

Borri ve diğer. (2005), yüksek çekme dayanımlı karbon liflerden elde edilmiş tek yönlü takviye kumaşlarını bir epoksi reçine ile ahşap kirişlere takviye etmiş ve eğilme testi gerçekleştirmişlerdir. KLP kumaşlar kirişin çekme bölgesini ortalayarak Şekil 3.7’deki gibi ve kirişin alt köşelerinin bir kısmını sararak Şekil 3.10’daki gibi takviye edilmiştir. Güçlendirme oranları (%0,082) aynı olan kirişlerin kıyaslamasında kirişin ortasında olan KLP takviyesinde maksimum yük artışı ve rijitliği sırasıyla %42,3 ve %22,5 iken, diğer yöntemde bu artışlar %55 ve %30,3 olmuştur.

3.3.2 Yüzeye Yakın Takviye

Yüzeye yakın takviye yüksek verimliliği nedeniyle eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilecek elemanlarda oldukça kullanılan bir yöntemdir. Ahşap veya lamine

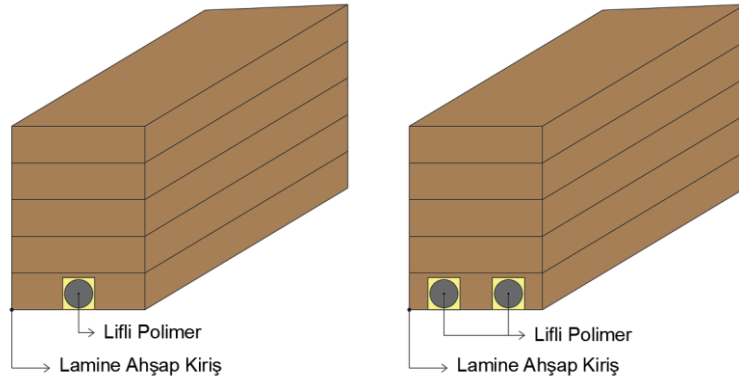
ahşap kirişlerin güçlendirilmesi için bu yöntemde, kirişin uzunluğu boyunca yüzeye yakın olacak şekilde farklı formlarda güçlendirme elemanları ile gerçekleştirilir. Genel olarak LP malzemeyi yerleştirmek için lamine ahşap kiriş yüzeyinde dikdörtgen veya dairesel yivler açılır. Daha sonra LP çeşitli yapıştırıcılar yardımıyla açılan yivlere takviye edilerek yüzeye sıfırlanır. Bu takviyeler enine kesit veya boyuna kesitte farklı uzunluk ve kalınlıklarda olabilir. Eğer LP lamine katları arasına yerleştirilecekse lamine ahşap kirişlerin üretimi sırasında takviye edilerek uygulanmaktadır.

Yüzeye yakın güçlendirmenin en büyük avantajlarından biri yapının estetiğini neredeyse hiç değiştirmeden güçlendirmeye olanak sağlamasıdır. Harici olarak bağlanmış LP takviyesi ile karşılaştırıldığında, yiv açma dışında yüzey hazırlığı gerekli olmadığı için saha montaj işi miktarının da azaltılması mümkün olmaktadır. Eğer takviye lamine katları arasına yerleştirilecekse yiv açma işlemi de gerekmeyecek ve bu yöntemde özellikle yangın güvenliği açısından da avantaj sağlanabilmektedir. Yüzeye yakın takviyeleri çubuk formunda ve levha formunda takviye olarak iki şekilde incelenmiştir.

3.3.2.1 Çubuk Formunda Takviye

Bu yöntemde kirişin yüzeyine yakın veya lamine katları arasına LP takviyeleri yapılabilir. Kirişlerin çekme bölgesinde güçlendirme amacının yanı sıra çubuklar ahşap bağlantı elemanları olarak da kullanılmaktadır. İki farklı ahşap elemanda açılan ankraj deliklerine veya açılan yivlere yerleştirilen LP çubuklar ile bağlantısı yapılabilir.

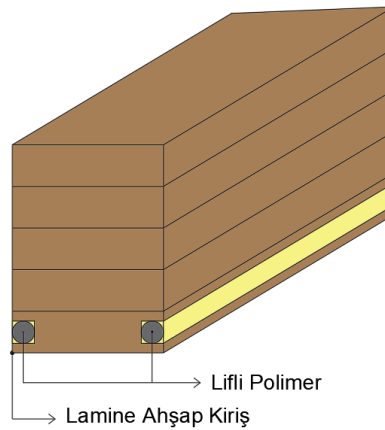
1. Alternatif: Şekil 3.11’de görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinin en çok zorlanan lamine katında ve en alt yüzeyine yakın şekilde LP çubuk ve çubuklar takviye edilir. Takviye edilecek LP yerine önce yiv açılır ve yapıştırıcı ile çubuklar yerleştirilir. Bu çubukların çapları ve adetleri değişkenlik gösterebilmektedir. Genel olarak kirişin çekme bölgesinin merkezinden simetrik olarak iki adet çubuk takviye edilir.



Şekil 3.11 Güçlendirme konfigürasyon örneği-5

Yang ve diğer. (2016), Şekil 11'deki gibi yapıştırılmış CLP çubuklar kullanarak güçlendirilmiş lamine ahşap kirişlerin eğilmede takviyelerini inceleyen deneysel bir test programı ve teorik analiz çalışması yapmışlardır. %0,5 güçlendirme oranına sahip bir adet CLP çubuk ve %1 oranında olacak şekilde iki adet çubuk kullanılarak güçlendirilmiş lamine ahşap kirişlerin moment kapasitesinde sırasıyla %11,3 ve 12,7 artış meydana gelmiştir.

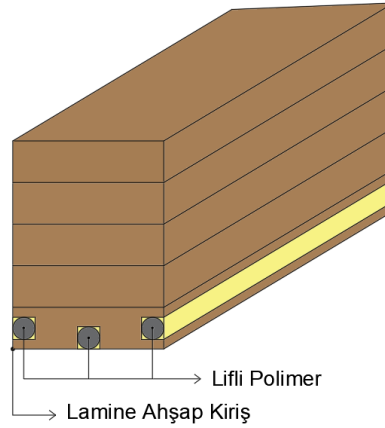
2. Alternatif: Şekil 3.12'de görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesine en yakın olan alt lamine katında kirişin yan yüzeylerine yakın simetrik şekilde öncesinde oluklar açılarak istenilen çaplarda LP çubuklar yapıştırıcı ile takviye edilir. Bu şekilde kirişler eğilmenin yanı sıra kısmen kesmeye karşı da güçlendirilmiş olurlar.



Şekil 3.12 Güçlendirme konfigürasyon örneği-6

Raftery ve Kelly (2015), Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’deki gibi BLP ve CLP çubuklarla takviye edilmiş düşük dereceli yapıştırılmış lamine ahşap kirişlerin eğilme performanslarını deneysel bir test programı ile araştırmışlardır. %1,4’lük bir donatı yüzdesi kullanılarak, genel ve yerel ölçümler için sırasıyla %8,4 ve %10,3 ortalama sertlik iyileştirmeleri sağlanmıştır. Takviyesiz kirişlere göre %23 moment kapasitesinde artış elde edilmiştir. Donatının nötr eksene olan mesafesinin kirişlerin performansı üzerinde oldukça etkili olduğu da gösterilmiştir.

3. Alternatif: Bu yöntem 2. Alternatife benzemektedir. İlave olarak kirişin orta kısmına da Şekil 3.13’deki gibi LP takviye edilir. Böylelikle eğilmeye karşı güçlendirilmesi daha iyi bir şekilde desteklenmiş olur.

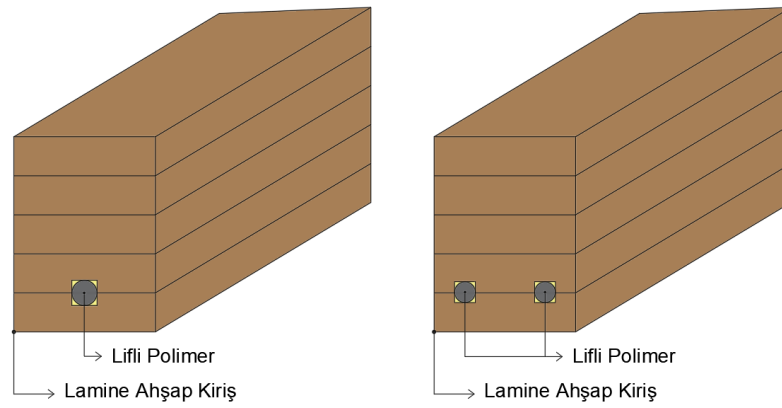


Şekil 3.13 Güçlendirme konfigürasyon örneği-7

Wdowiak-Postulak (2021), düşük ve ortalama kaliteli ahşaptan GL20 sınıfı yapıştırılmış lamine ahşap kiriş tasarımları benimsenerek elde edilmiş kirişleri 10 mm çaplı BLP donatılar ile Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’deki gibi takviye etmiştir. Sonuçlar neticesinde, donatı oranındaki artışla birlikte kırılma yükünün önemli ölçüde arttığı görülmüştür. BLP takviyeli lamine ahşap kirişlerin yük taşıma kapasitesinin referans kirişlere göre sırasıyla sadece yanlardan çubuk takviye edildiğinde %13, kirişin en altında da ilave donatı olması durumunda %20 daha fazla, rijitliklerinin ise sırasıyla %9,99 ve %17,13 arttığı bulunmuştur. Ayrıca, BLP donatı takviyesinin heterojen ahşap yapıyı çok iyi bir şekilde telafi ettiği, kalitesiz ve ortalama kalitedeki keresteler için ideal bir uygulama olduğu görülmüştür. BLP takviyesi, ahşaptaki yerel kusurları

nötrleştirerek çatlakların yayılmasını engeller veya sınırlar. Doğrudan takviye ve ahşap arasına yerleştirilen 2 mm kalınlığındaki epoksi tabaka, tüm test süresi boyunca kalitesini iyi korumuş ve ahşap hasarından önce LP ile ahşap arasında erken bir delaminasyon tespit edilmediği belirtilmiştir.

4. Alternatif: Bu yöntemde kirişin en çok zorlanan en alt lamine kat arasına Şekil 3.14'deki gibi LP çubuk ve çubuklar takviye edilir. Bu yöntem lamine kirişin üretimi sırasında takviye edilmektedir.



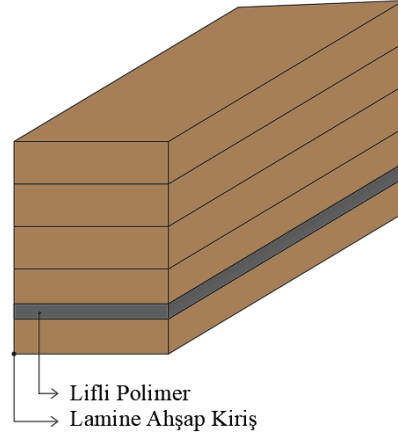
Şekil 3.14 Güçlendirme konfigürasyon örneği-8

Fossetti ve diğer. (2015), pultrüde çubuklar yerine Şekil 3.14'de görüldüğü gibi yerleştirilen ikişer tane olmak üzere bazalt, cam ve karbon dokulardan elde edilmiş LP kordonların kullanımını içeren bir takviye tekniğinin uygunluğunu doğrulamayı amaçlayan lamine ahşap kirişler üzerinde deneysel bir araştırma yapmışlardır. Elde edilen deneysel sonuçlardan önerilen tekniğin etkinliği, kordonların uygun olmayan şekilde ıslatılması ve fazla reçineden dolayı beklenenden daha az artışlar elde edildiği belirtilmiştir. Fazla reçine miktarının takviye kuvvetinin elastisite modülünü düşürerek mukavemet artışını etkilediği düşünülmektedir. Ancak yine de takviye konfigürasyonu göçme modunu değiştirebilmiştir. BLP kordonlarda güçlendirilmiş numuneler hem mukavemet hem de süneklik açısından daha iyi performans göstermiştir. Takviyesiz örneklerle karşılaştırıldığında BLP kordon takviyeli kirişlerin ortalama mukavemet artışı yaklaşık %25 iken, sünekliğin ortalama artışı yaklaşık %40 olmuştur.

3.3.2.2 Katman Formunda Takviye

Bu yöntemde çubuk yerine katman formunda LP kirişe eğer lamine katları arasına uygulanacaksa üretim sırasında takviye edilir. Lamine ahşap kirişe çekme bölgesinde yatay ve düşey şekilde takviye edilebilmektedir.

1. Alternatif: Şekil 3.15'te görüldüğü gibi genellikle lamine ahşap kirişin en çok zorlandığı ve kritik kısmı olan en son lamine katına LP takviyesi uygulanır. Bu yöntemde LP takviyesi lamine ahşap kirişin üretimi sırasında kumaş veya levha olarak gerçekleştirilebilmektedir.



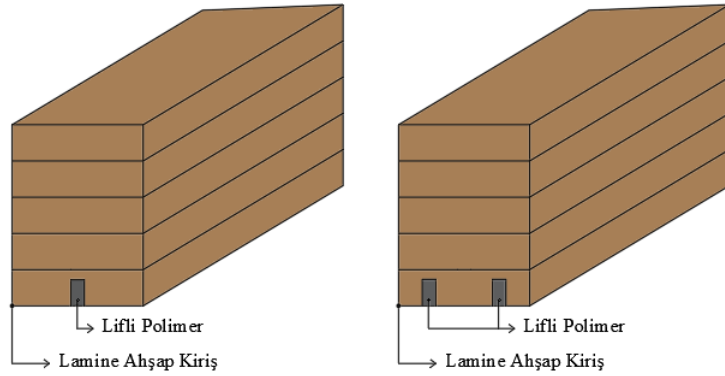
Şekil 3.15 Güçlendirme konfigürasyon örneği-9

Lindyberg (2001), 13,01x30,48x671 cm boyutlarında, yarısı Western Hemlock Lamstock ve diğer yarısı da Douglas köknar ağaçlarından yapılmış 90 adet lamine ahşap kiriş test etmişlerdir. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi kirişlerin çekme bölgesinde lamel katlarının en zayıf olduğu tutkal hattına güçlendirme oranları %1,1 ve %3,3 olacak şekilde LP takviye edilmiştir. Dayanım ve rijitlikteki artışın yatırımı haklı çıkarmadığından, %3,3'ün üzerindeki takviyenin ekonomik olmadığını belirtmiştir.

Romani ve Blaß (2001), çekme bölgesinde Şekil 3.8 ve Şekil 3.15'teki gibi LP takviye edilmiş lamine ahşap kirişlerin yük taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin hesaplanması için basınç kuvveti etki eden kirişin plastik davranışı dikkate alınarak bir model türetmişlerdir. Önerilen bu model, güçlendirilmemiş bir lamine ahşap kirişin

tasarım değerlerine dayalı olarak herhangi bir tekrarlama adımı gerçekleşmeden kolay bir yöntem ile hesaplamaya izin veren sayısal bir çözüme dayanmaktadır.

2. Alternatif: Şekil 3.16’da görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinin en alt yüzeyinden lamine katlarına dik şekilde (düşeyde) dikdörtgen şeklinde açılan yiv veya yivlere simetrik şekilde istenilen kalınlık ve uzunlukta kiriş derinliği boyunca LP levhalar yapıştırıcı ile takviye edilir.



Şekil 3.16 Güçlendirme konfigürasyon örneği-10

Bakalarz ve diğer. (2020), 45x200x3400 mm boyutlarında lamine ahşap kaplamadan (LVL) yapılmış tam ölçekli kirişler üzerinde eğilme testleri yapmışlardır. Şekil 3.16’da görüldüğü gibi kirişlerin tabanında açılmış dikdörtgen şeklindeki yivlere epoksi reçinesi ile ikişer tane KLP plakalar yapıştırılmıştır. Referans kirişlerin hasarına, ahşabın gerilme mukavemetinin aşılması neden olmuştur. Oluklara yapıştırılan %0,62’lik KLP plakalarla takviye, esas olarak kirişlerin maksimum eğilme momentinde bir artışa neden olmuştur. Eğilmede elastisite modülünde %11, rijitlikte de %7 artış gözlenmiştir.

3.4 Lamine Ahşap Kirişlerin Farklı Tip Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesi

Hali hazırda mevcut LP sistemlerinin özellikleri, spesifik formülasyonlarına, bileşenlerine ve üretim yöntemlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. LP kompozit malzemelerinin özellikleri genellikle LP malzemesinin ve ürünlerinin deneysel olarak

test edilmesiyle elde edilir. Lamine ahşap kirişlerin LP ile güçlendirilmesinde en önemli parametrelerden biri de farklı lifli polimerlerin tercih edilmesidir.

3.4.1 Karbon Lifli Polimerler (KLP) ile Güçlendirme

Kim ve Harries (2010) tarafından yapılan parametrik bir çalışmadaki değişkenler; ahşap cinsi, KLP elastisite modülü ve güçlendirme oranları seçilmiştir. KLP malzemenin elastisite modülünün değişmesi ahşap kirişlerin kırılma yüklerini önemli ölçüde etkilememiştir. Çünkü, kirişlerin göçme modlarını ahşabın özellikleri belirlemiştir. Bu durumda bahsedilen çalışma için ahşap türlerinin özellikleri kirişlerin göçmesini etkileyen baskın bir faktör olmuştur. %1,9'a kadar KLP oranındaki artış, güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesinde artma eğilimi göstermiştir. Fakat, bu değerden sonraki artışta mukavemet artışı devam etmemiştir.

Andor ve diğer. (2015) çalışmalarında çeşitli oranlarda tek katlı KLP kumaş ile takviye edilmiş Norveç ladininden elde edilmiş ahşap kirişler üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiş ve ardından istatistiksel bir analiz yapılmıştır. Yük taşıma kapasitesi ve süneklikte yaklaşık %30 bir artış sağlanırken elastik rijitlikte ise yaklaşık %16'lık bir artış elde edilmiştir. Ayrıca yapılan istatistiksel analiz neticesinde, güçlendirilmiş kirişlerin performansının ahşap malzemedeki kusurların varlığından etkilendiğini de göstermiştir.

Vahedian ve diğer. (2019), güçlendirilmiş lamine ahşap kirişler üzerinde yapılan deneysel çalışmanın sonuçları, eğilme mukavemetini ve harici olarak bağlanmış KLP plaka ile güçlendirilmiş lamine ahşap kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesini etkileyen potansiyel parametreleri araştırmak için kullanmışlardır. KLP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş sekiz tam ölçekli lamine ahşap kiriş, KLP takviyesinin bağlanma uzunluğu, genişliği ve kalınlığının KLP ile güçlendirilmiş kirişler için değiştiği yerlerde test etmişler. Elde ettikleri sonuçları, gerilme konsantrasyonlarının azaltılmasının güçlendirilmiş kirişlerin mekanik performansını artırabildiğini göstermiştir. Nihai yük taşıma kapasitesi ve güçlendirilmiş kirişlerin eğilme mukavemeti, bağ uzunluğu ve bağ genişliği arttıkça önemli ölçüde gelişmiştir.

Güçlendirilmiş ahşap kirişin nihai eğilme kapasitesini hesaplayabilmek için sayısal bir model sunulmuş ve hesaplanan ile öngörülen sonuçlar arasında iyi bir korelasyon sağlanmıştır.

3.4.2 Cam Lifli Polimerler (CLP) ile Güçlendirme

Gentile ve diğer. (2002), çekme bölgesinde düzenlenmiş farklı çaplara sahip yüzeye yakın bir şekilde takviye edilmiş CLP çubuklarla güçlendirilmiş lamine ahşap kirişleri test etmişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerde takviye oranları %0,27 ile %0,82 arasında değişmektedir. Önerilen deneysel tekniğin kullanılmasının göçme modunu değiştirdiğini ve eğilme mukavemetinin %18 ile %46 arasında artışların olduğunu göstermiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, yüzeye yakın CLP takviyesinin ahşaptaki yerel kusurları telafi ederek takviye edildiği bölümün homojenize bir şekilde çalışmasına izin verdiğini göstermiştir.

Svecova ve Eden (2004), bazı örneklerde gözlenen çekme bölgesindeki hasarları kontrol etmek için kesme takviyesi olarak CLP dübel çubuklarla güçlendirilmiş ahşap kirişleri ve eğilme çubuklarını test etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan kirişler, tam boyutlu ahşap köprü kirişlerinden kesilerek elde edilmiştir. Kesilme işleminden sonra numunelerin sadece alt ve üst yüzeylerine kreozot işlemi uygulanmıştır. Testler sonucunda, kesit derinliğine eşit dübel aralığı en uygun maliyetli olarak belirlenmiş ve kopma modülünde %33'lük bir artış gözlenmiştir. Hem eğilme hem de kesme bölgesinde takviye ile güçlendirilmiş ahşap kirişlerin kopma modüllerinde %47 ile %52 arasında artış gözlenmiştir.

Gentry (2011), lamine ahşap kirişlerin kesme kapasitesini arttırmayı amaçlayan deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kesme dayanımını arttırmak için, bir dizi CLP pim, lamine ahşap kiriş üretildikten sonra lamine katları ve LP şeritler boyunca enine olarak açılan deliklere epoksi ile yapıştırılmıştır. Test sonuçları, sabitlenmiş kirişlerin kayma mukavemeti dağılımının sabitlenmemiş örneklerle kıyasla önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Önceki araştırmalarda, ahşap ve LP katları arasındaki bağlanmanın potansiyel uzun vadeli dayanıklılık sorunlarına sahip olduğu

gözlenmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen sabitleme durumu LP katlarının lamine katlara doğrudan bağlanmasını sağlamıştır. Bu davranış hem enine kesme takviyeleri hem de uzunlamasına LP katları ile daha büyük ölçekli numunelerin test edilmesiyle gösterilmiştir.

Basterra ve diğer. (2017), çalışmalarında CLP ile dahili olarak güçlendirilmiş düşük dereceli lamine ikili ahşap kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar rijitlik ve nihai moment taşıma kapasitesinde artışlarla, güçlendirilmiş kirişlerin eğilme dayanımlarında da bir artış olduğunu göstermektedir. Çekme bölgesinde %1,07 ve %1,6 arasında değişen güçlendirme oranları kullanılarak rijitlikte ortalama %12,1 ve %14,7 arasında değişen iyileşme ve moment kapasitesinde %23'e varan artış gözlenmiştir.

3.4.3 Bazalt Lifli Polimerler (BLP) ile Güçlendirme

Gand ve diğer. (2018), donatı şeklinde ahşabın içerisine yapıştırılan BLP ile güçlendirilen ahşap kirişleri test etmişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerinde artış meydana gelmiştir. Ortalama %16'lık bir artış elde edilirken maksimum yüzde 60'lık bir artış elde edilmiştir. Yüklenen ahşap kirişin orta açıklığının yakınında bulunan düğümlerin bir sonucu olarak basit ve çapraz lif gerilme hatalarından bazı başarısız sonuçlar elde edilmiştir. Göçme modunun ahşabın mukavemetine bağlı olduğu, ancak bazı kirişlerin yapışkan tutkal hatlarında da çatlama işaretleri gözlemlenmiştir.

Thorhallsson ve diğer. (2017), bazalt ve cam lifli polimerler ile güçlendirilmiş lamine ahşap kirişlere eğilme testi uygulamışlar ve sonuçları moment kapasitesini tahmin etmek için analitik bir modelle karşılaştırmışlardır. Sayısal modelde, ahşabın doğrusal elastik ve basınç altındaki plastik davranışı dikkate alınmıştır. LP' nin önceden gerilmesi dayanım ve rijitlikte artış sağlamıştır. Bazalt ile güçlendirilmiş lamine ahşap kiriş için optimum donatı oranının %0,5 ile %2 arasında olduğu belirtilmiştir. Kirişler, bazalt lifli ya da cam lifli polimer kumaşlar ile takviye edildiğinde, mukavemetinde %37 ve %57'lik bir artış meydana geldiğini ve ön gerilme

metotları kullanılarak %64'ten daha fazla moment kapasitesi elde edilebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.4.4 Aramid Lifli Polimerler (ALP) ile Güçlendirme

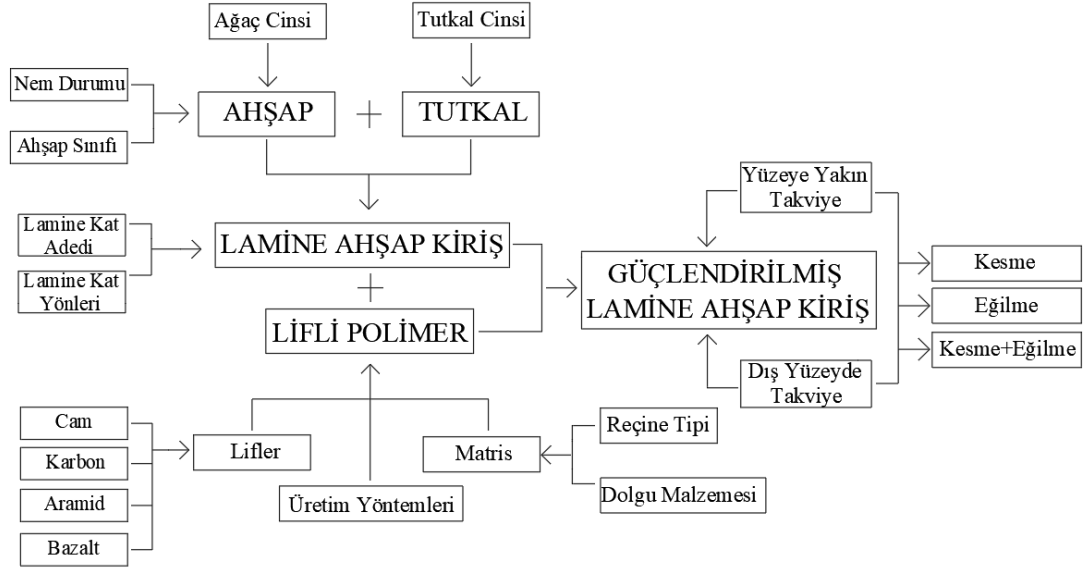
Yahyaee-Moayyed ve Taheri (2011), tek yönlü aramid lif takviyeli polimer (ALP) levha ile güçlendirilmiş güney sarıçam ve Douglas-kökknar ağaçlarından elde edilen ahşap kirişlerin kısa dönem ve sünme performanslarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. ALP ile güçlendirilmiş ahşap kirişlerin sünme tepkisini hesaplamak için doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Analizin sonuçlarının ALP ile güçlendirilmiş numuneler üzerinde yürütülen deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Ahşap kirişlerin ALP ile güçlendirilmesinin hem mukavemet hem de rijitlikte gelişme sağladığı ve ayrıca ahşap kirişlerin sünme deformasyonunu etkili bir şekilde azaltabileceği sonucuna varılabilir.

Bakalarz ve Kossakowski (2019), tüm uzunluğu boyunca alt yüze yapıştırılan ve U şeklinde yüksekliğin yarısı sarılmış şekilde olmak üzere ALP ve CLP levhalar ile güçlendirilmiş lamine kaplamalı ahşap kirişler test edilmiştir. CLP levhalarla güçlendirilen kirişlerin güçlendirme oranları, birinci ve ikinci güçlendirme düzenlemeleri için sırasıyla %0,3 ve %1; ALP levhaları ile güçlendirilmiş kirişler için bu oranlar sırasıyla %0,2 ve %0,64 olarak belirlenmiştir. Deneysel veriler sonucunda, güçlendirilmiş elemanların hem eğilme dayanımında hem de rijitliğinde bir artış olduğu ve göçme modlarının güçlendirme konfigürasyonunun türüne göre farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

3.5 Lamine Ahşap Kirişlerin LP ile Güçlendirilmesinin Değerlendirilmesi

LP ile güçlendirilmiş ahşap ve lamine ahşap kirişlerin araştırıldığı literatür çalışmalarının sonucunda güçlendirilmiş kirişlerde daha sünek bir kırılma gerçekleşerek kirişlerin performanslarının arttığı görülmüştür. Lamine ahşap kirişlerin katları arasındaki tutkalın çeşitliliği, lamine ahşap ile LP malzemenin arayüzünün etkileşimi, farklı türde LP ve konfigürasyonların seçimi, ortam şartları, üreticiden

kaynaklı gibi birçok parametrenin değişiminde kirişlerin performansı da değişmektedir. Literatür çalışmasından elde edilen sonuçlar neticesinde genel hatlarıyla Şekil 3.17’de özet şeklinde sunulmuştur.



Şekil 3.17 Lamine ahşap kirişin olası güçlendirme şeması

BÖLÜM DÖRT

MATERYAL VE METOT

Lifli polimerler ile güçlendirilmiş lamine ahşap kirişlerin performansları deneysel ve çeşitli sayısal yöntemler kullanılarak değerlendirilebilir. Yapılan çalışmalar genel olarak deneysel çalışmalara ve deney sonuçlarının analitik bir çözüm ile hesaplanması ve bu analitik çözümlerin geliştirilmesi esasına dayanmaktadır. Ancak bazı durumlarda özellikle parametrik çalışmalarda tamamen deneysel çalışma yapmak zaman alıcı ve pahalı olabilmektedir. Bu durumda ilerlemenin en iyi yolu, sayısal modeller geliştirmek ve işlemleri optimize etmek için doğrulanmış modelleri uygulamaktır. Analitik yöntemler, sınır koşullarının ve geometrik kısıtlamaların çeşitlendirilmesindeki zorluklar nedeniyle genelde basit elemanları modellemek için

tercih edilmektedir. Karmaşık problemlerin çözümünde en yaygın kullanılan sayısal yöntemlerden biri de sonlu elemanlar yöntemidir.

Bu tez kapsamında kullanılacak sonlu elemanlar yöntemi ile analizin öncesinde bir kıyaslama yapılabilmesi için daha önceden kullanılmış, deneysel sonuçlarla tatmin edici benzerlikler bulunmuş, Glišović ve diğer. (2016) tarafından önerilen analitik model ve aynı malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri çok sayıda numuneye uygulanan deneyler neticesinde ortalama değerlerin hesaplanması ve bu değerlerden elde edilen değişim katsayıları ile birlikte verilmiştir. Değişim katsayıları aynı özellikteki çok sayıda numuneye uygulanan deney sonuçlarından elde edilen değerlerin standart sapmasının aritmetik ortalamaya bölünmesi ile yüzde olarak bulunan bir değerdir. Değişim katsayısının büyük olması, elde edilen değerlerin ortalamaya oranla büyük oranda uzaklaştığını ifade eder. Özellikle ahşabın çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi değerlerin değişim katsayısı nispeten diğer malzeme özelliklerine göre daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi ahşap ve lifli polimerler gibi anizotropik özellik gösteren malzemeler ile çalışılması ve bu malzemelerde, özellikle ahşapta, kusurların çok fazla olmasından ve özelliklerin yönler boyunca çok fazla değişkenlik gösterebilmesidir. Bu bölümde malzeme özellikleri ile birlikte kirişlerin moment taşıma kapasitesi, kırılma yükü ve eğilme rijitlikleri hesapları doğrusal analiz ile yapılacaktır. Doğrusal davranış, yükleme boyunca yük-şekil değiştirme ilişkisinin sabit kalması ile tanımlanabilir. Bu davranış, yapı riitliğinin her yük adımında sabit kalması, yani geometri ve malzeme özelliklerinin doğrusal olması ile mümkün olmaktadır.

4.1 Lamine Ahşap Kiriş Özellikleri

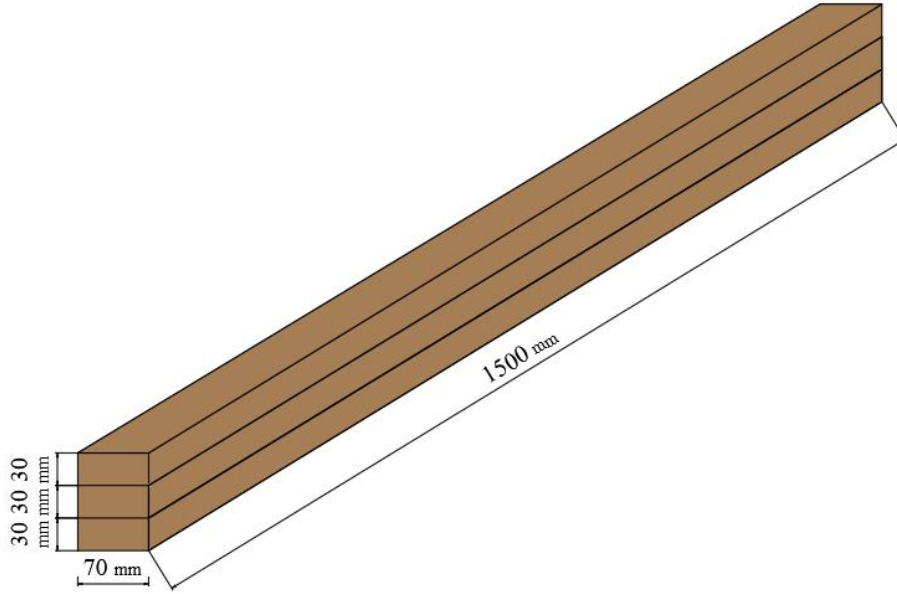
Lamine ahşap kirişi oluşturan ahşap elemanlar ladin türü ağaçtan elde edilmiş ve bazı mekanik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Ahşabın mekanik özellikleri

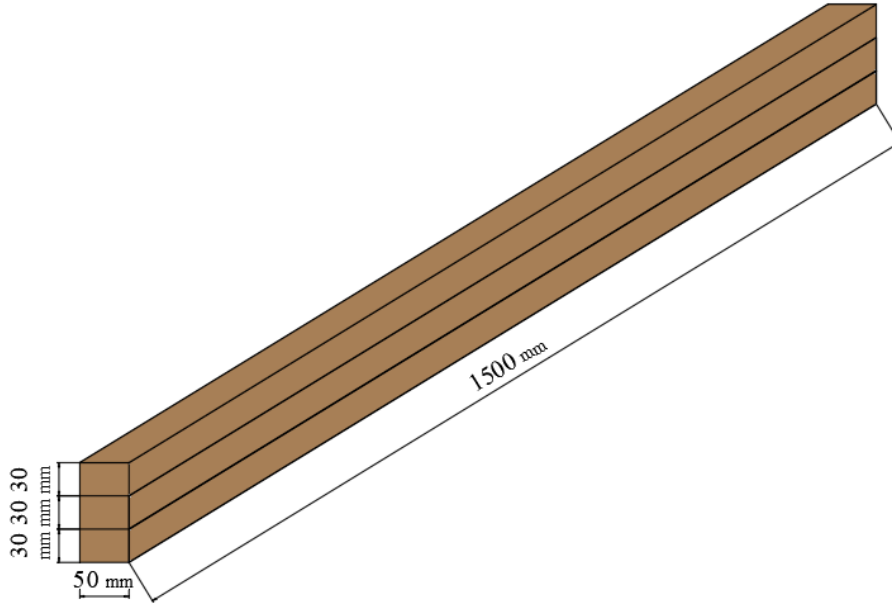
Özellik	Değer	Değişim Katsayısı
---------	-------	-------------------

Liflere paralel çekme dayanımı	27,8 MPa	%25,2
Liflere paralel basınç dayanımı	36,3 MPa	%9,8
Liflere paralel elastisite modülü	11080 MPa	%12,6
Eğilme dayanımı	42,5 MPa	%20,6
Yoğunluk	427 kg/m ³	

Analiz edilecek kirişler iki gruba ayrılmıştır. 1. Grup lamine ahşap kiriş 70x90x1500 mm ölçülerindedir (Şekil 4.1). 2. Grup lamine ahşap kiriş 50x90x1500 mm ölçülerindedir (Şekil 4.2). İki grup kirişinde malzeme özellikleri, lamine kat yüksekliği, lamine adetleri, yükseklik ve boyları aynıdır. Sadece kirişlerin genişliği değiştirilerek en kesitlerinde farklılık oluşturularak kirişin enini saran lifli polimerin alanının etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.1 1. Grup kirişlerin görünüşü



Şekil 4.2 2. Grup kirişlerin görünüşü

4.2 Lifli Polimer Özellikleri

Güçlendirme elemanı olarak mekanik özellikleri oldukça iyi olan karbon lifli polimer (KLP) plakalar kullanılmıştır ve özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

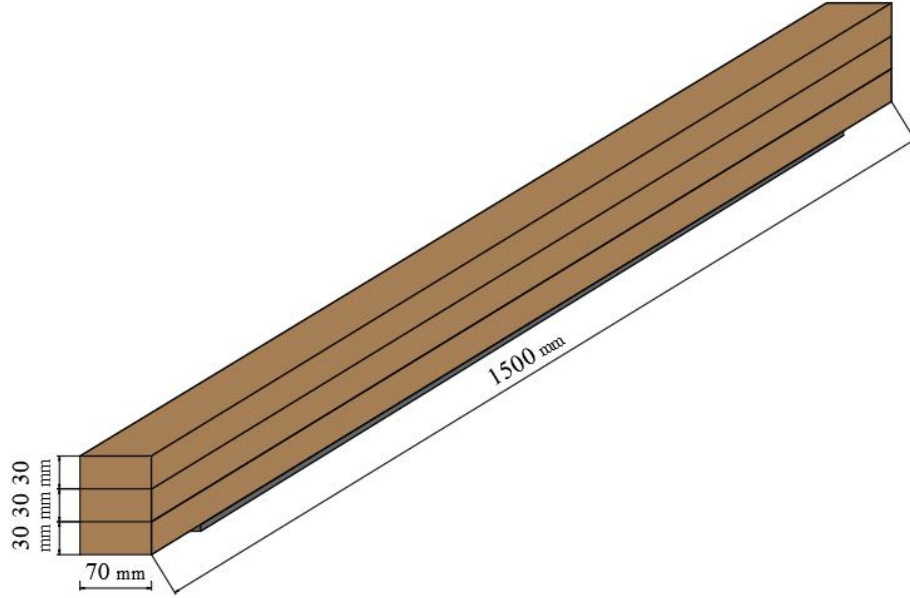
Tablo 4.2 Karbon lifli polimer plakanın özellikleri

Özellik	Değer	Değişim Katsayısı
Çekme dayanımı	2846 MPa	%4,5
Elastisite modülü	165543 MPa	%2,8
Kopmada şekil değiştirme	1,73 %	%12,6
Yoğunluk	1,6 g/cm ³	

4.3 Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Lamine Ahşap Kirişler

Çalışma kapsamında seçilmiş analitik yöntemde kirişlerin çekme bölgesinde tek kat yapıştırılmış LP etkisi değerlendirilebilmektedir. Bu çözüm yöntemine uygun şekilde KLP plakalar lamine ahşap kirişlere takviyesi Şekil 4.3’de gösterilmiştir. 1. Grup ve 2. Grup kirişlere farklı kalınlık ve genişliklere sahip KLP takviyeleri uygulanacaktır.

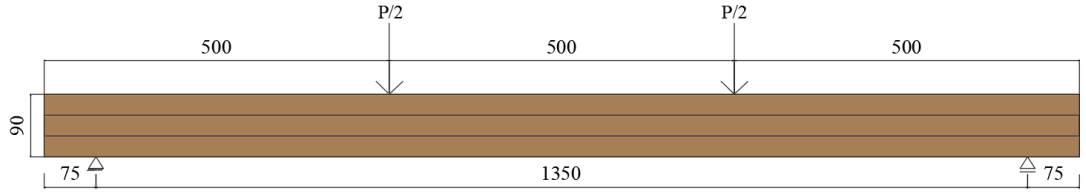
Tablo 4.3'te analiz edilecek tüm kirişler ölçüleriyle birlikte verilmiştir. Kirişlerin performansları 4 noktalı eğilme etkisinde analiz edilecektir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).



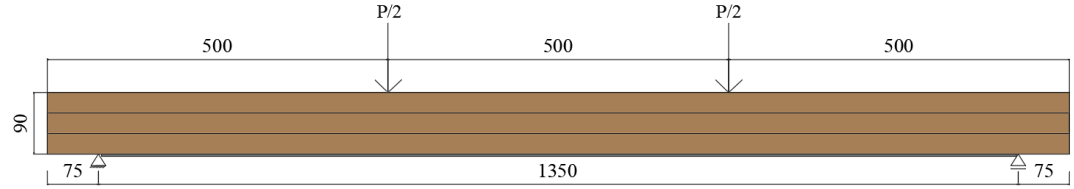
Şekil 4.3 Güçlendirilmiş kirişlerin görünüşü

Tablo 4.3 Analiz edilen tüm kirişler

Kiriş İsimlendirmeleri	Lamine Ahşap Kiriş En (mm)	Lamine Ahşap Kiriş Yükseklik (mm)	KLP Genişlik (mm)	KLP Kalınlık (mm)	KLP En Kesit Alanı (mm ²)
Ref-T70	70	90	0	0	0
K35-T70	70	90	35	0,5	17,5
K70-T70	70	90	70	0,5	35
Ref-T50	50	90	0	0	0
K20-T50	50	90	20	1	20
K35-T50	50	90	35	1	35



Şekil 4.4 Güçlendirilmemiş kirişlerin eğilme deneyi düzeneği



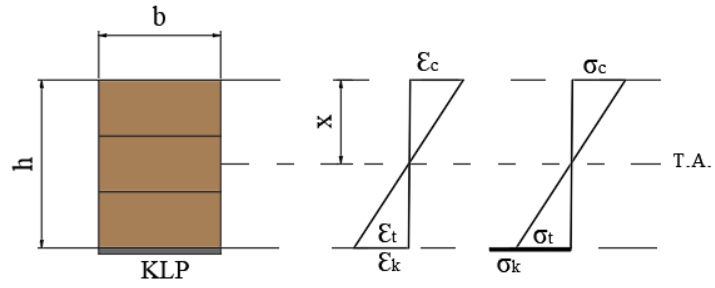
Şekil 4.5 Güçlendirilmiş kirişlerin eğilme deneyi düzeneği

4.4 Analitik Model Yaklaşımı

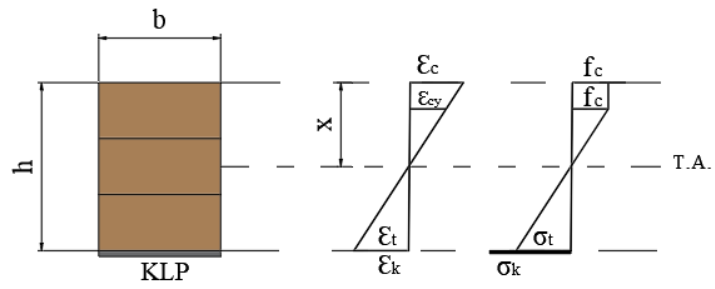
Modelin temel varsayımları aşağıdaki şekilde listelenmiştir (Glišović ve diğer. 2016).

- Kirişin tüm yüksekliği boyunca şekil değiştirme dağılımı doğrusaldır. Dik kesitler, eğilme sonrasında dikliklerini korurlar.
- Ahşaplar arasında ve ahşap ile lifli polimer plaka arasında kayma olmadığı ve bu bağların çok kuvvetli olduğu varsayılmıştır.
- Ahşap için çekmede gerilme şekil değiştirme ilişkisi doğrusal elastiktir ve maksimum gerilme değeri eğilme dayanımına karşılık gelmektedir.
- Basınçta ahşap için gerilme şekil değiştirme ilişkisi doğrusal elastik-mükemmel plastiktir ve maksimum gerilme değeri eksenel basınç dayanımına karşılık gelir.
- Lifli polimer malzeme için gerilme şekil değiştirme ilişkisi doğrusal elastiktir.
- Kesitin çekme ve basınç bölgesinde ahşabın elastisite modülü aynıdır. Modelin basitleştirilmesi için kirişler basınç bölgesindeki plastikleşme derecesine bağlı olarak iki aşamalı gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.6'da bu aşamalar ve bunlara karşılık gelen gerilme şekil değiştirme durumları gösterilmektedir.



Doğrusal elastik durum



Plastik durum

Şekil 4.6 KLP ile güçlendirilmiş kirişlerin idealize edilmiş gerilme ve şekil değiştirme dağılımları

Ahşabın basınç dayanımı (σ_c) maksimum dayanıma (f_c) ulaşmadan önce en dıştaki ahşaptaki çekme dayanımı (σ_t), nihai dayanıma (f_m) ulaştığında kesitte hasar meydana gelir. Burada nötr eksenin derinliği (x), homojenleştirilmiş enine kesitin atalet momenti (I) ve nihai moment (M_u) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x = \frac{1}{bh + nA_f} \left(\frac{bh^2}{2} + nA_f h \right) \quad (4.1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - x \right)^2 + nA_f (h - x)^2 \quad (4.2)$$

$$M_u = f_m \frac{I}{h - x} \quad (4.3)$$

Her bir kiriş için nihai moment hesaplandıktan sonra,

$$M_u = \frac{P}{2} \frac{l}{3} = \frac{Pl}{6} \quad (4.4)$$

l kiriş açıklığı olmak üzere maksimum uygulama yükü (P) Denklem 4.4 kullanılarak hesaplanır. Hesaplamalar sonucu kirişlerin moment taşıma kapasiteleri ve eğilme rijitlikleri (EI) Tablo 4.4'te verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken KLP takviyeli kirişlerde ahşabın eğilme dayanımı 1,25 ile artırılarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4 Analitik hesaplamaların sonuçları

Kiriş İsimleri	n ($E_{klp} / E_{ahşap}$)	I (mm^4)	x (mm)	M_u (kNm)	Maksimum P analitik (kN)	EI ($N.mm^2$) $\times 10^{11}$
Ref-T70	14,94	4252500	45,00	4,02	17,85	0,47
K35-T70	14,94	4760863,13	46,79	5,85	26,02	0,53
K70-T70	14,94	5230264,15	48,45	6,69	29,72	0,58
Ref-T50	14,94	3037500	45,00	2,87	12,75	0,34
K20-T50	14,94	3604920,04	47,80	4,54	20,17	0,40
K35-T50	14,94	3986180,52	49,68	5,25	23,35	0,44

Elde edilen sonuçlar neticesinde kirişlerin Ref-T70 kirişlerine göre 0,5 mm kalınlığında KLP plakanın kirişin en kesitinin yarısına takviye edildiği durumda moment kapasitelerindeki artış yaklaşık %46; en kesitin tamamı sarıldığı durumda %66,5 artış gözlenmiştir. Bunun yanı sıra eğilme rijitliğindeki artışlar sırasıyla yaklaşık %12 ve %23'tür. Ref-T50 kirişlerine göre 1 mm kalınlığında KLP plakanın kirişin en kesitinin %40'ına takviye edildiği durumda moment kapasitelerindeki artış yaklaşık %58; en kesitin %70'ine takviye edildiği durumda %83,1 artış gözlenmiştir. Bunun yanı sıra eğilme rijitliğindeki artışlar sırasıyla yaklaşık %18,68 ve %31,23'tür.

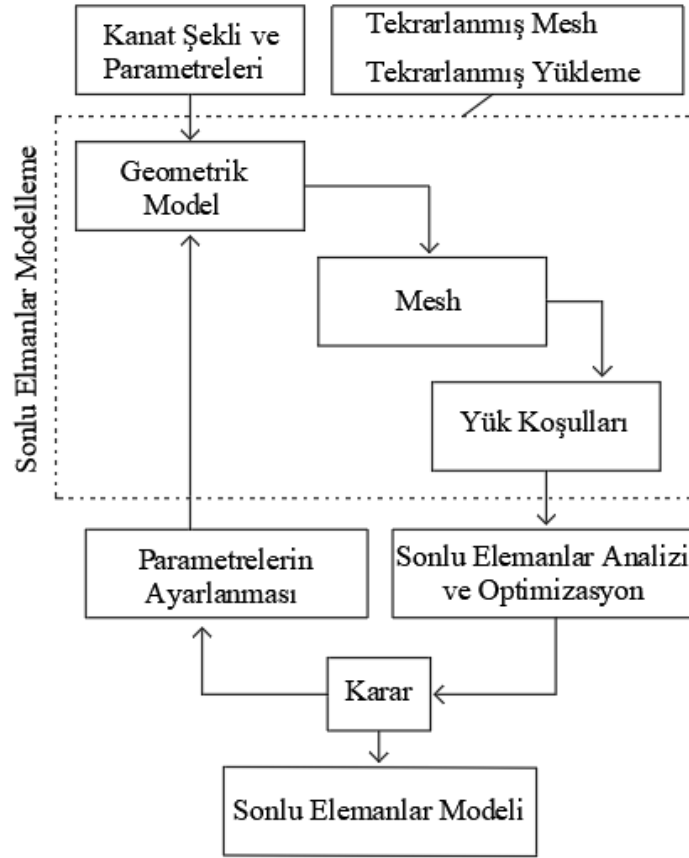
BÖLÜM BEŞ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ

Sonlu elemanlar yöntemi bir matematik problemin aritmetik işlemlerle çözülebilmelerini sağlayacak şekilde diferansiyel denklemlerle formülize edildiği sayısal bir çözüm tekniğidir. Sayısal yöntemler, mühendislik uygulamalarında analitik yöntemlerle imkânsız veya zor olan karmaşık denklem sistemlerinin çözümlenmesi için geliştirilmiş kabul edilebilir yaklaşımlarla sonuçlar sunan yöntemlerdir. Sonlu elemanlar yönteminde malzeme istenilen boyutlarda çok küçük parçalara ayrılarak her bir parçanın kendi içerisinde çözülmesini sağlayıp problemin tümevarım ile analizi gerçekleştirilir. ABAQUS gibi sonlu elemanlar yöntemine dayanan bilgisayar

programları ile çeşitli elemanlar ve sistemler sanal ortamda hızlı bir şekilde test edilebilmektedir.

Bu programlar sistemin temel prensibi geometrik modelinin oluşturulup malzeme özelliklerinin atanmasıyla başlar. Daha sonra oluşturulan eleman küçük parçalara ayrıştırılır. Son olarak yapısal bir analiz için gerilme, deformasyon, yer değiştirme ve kuvvetler belli sınır koşullarında değerlendirilir. Bu yöntemde analizi yapılan eleman ve sistemde parametrelerin değiştirilmesi kolaylıkla yapılabilir. Bu sebeple, yapılan çalışmada oldukça yaygın kullanılan ABAQUS programı, geniş malzeme ve eleman seçimine olanak sağlayarak modelleyebilme kolaylığı sayesinde sayısal analiz için tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar yönetiminde modellemenin akış şeması (Kaplanlıoğlu ve Gemalmayan, 2015) Şekil 5.1’de verilmiştir. Lamine ahşap ve lifli polimerler gibi anizotropik malzemelerin parametrik çalışmalarında bilgisayar ortamında simüle edilerek değerlendirilmesi maliyet, zaman ve kolaylık açısından avantajlı bir yöntemdir.



Şekil 5.1 Sonlu elemanlar yöntemi ile modellemenin akış şeması

Tez kapsamında yapılan modellemelerde tanımlanan malzeme özellikleri literatürde yapılmış çalışmalardan baz alınmıştır. Malzeme modelleri, modellemede kolaylık sağlamak adına idealleştirilmiştir. Modellemede kullanılan malzemelerdeki kusurların varlığı dikkate alınmamıştır.

5.1 ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı

ABAQUS otomotiv, makine, havacılık ve inşaat sektörü gibi birçok alanda sıklıkla tercih edilen sonlu elemanlar yönteminin esas alındığı bir bilgisayar programıdır. ABAQUS programı tek bir arayüz içerisinde tüm işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. ABAQUS programında belli bir birim sistemi yoktur. Herhangi bir modeli tanımlamak için çalışmaya başlamadan önce kullanılacak birim sisteminin kullanıcı tarafından seçilmesi gerekir. Tez kapsamında SI (mm) birim sistemi ile çalışılmış ve kullanılan birim sistemi Tablo 5.1’de verilmiştir. Seçilen birim sistemine

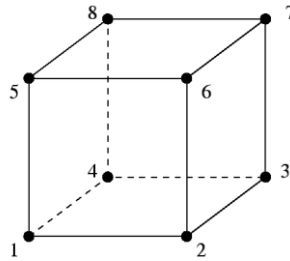
uygun olarak sayısal değerlerin girilmesi doğru sonuçların elde edilmesi açısından oldukça önemlidir.

Tablo 5.1 Kullanılan birim sistemi

Miktar	SI (mm)
Uzunluk	mm
Yük	N
Kütle	Tonne (10^3 kg)
Zaman	s
Gerilme	MPa(N/mm ²)
Enerji	mJ (10^{-3} J)
Yoğunluk	Tonne/mm ³

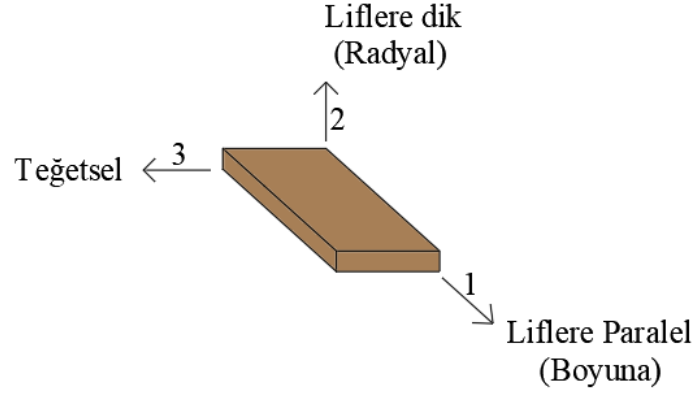
5.2 Modelin Oluşturulması

ABAQUS sonlu elemanlar programında model oluşturmak bir ön işlem aşaması gerektirmektedir. Çalışma kapsamında öncelikle lamine ahşap kirişlerin modeli oluşturulup analiz işlemleri gerçekleştirilmiş, daha sonra lifli polimer takviyeli kirişlerin modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada ilk olarak 3 boyutlu katı modeli oluşturan malzemelerin geometrileri “Part” bölümünden oluşturulmuştur. Tüm ahşap elemanlar 8 düğüm noktalı lineer geometrik hekzahedral katı elemanlar ile (C3D8) modellenmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Ahşap için kullanılan sonlu eleman modeli

Bu geometrik elemanlara “Property” bölümünden elastik ve plastik malzeme özellikleri atanır. Ahşabın anizotropik özelliklerinin modellenmesinde 3 farklı yön esas alınır ve Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.3 Ahşap eleman için yerel koordinat sistemi

Glišović ve diğer. (2017) tarafından ahşaba yapılmış boyuna (liflere paralel) doğrultuda deney sonucunda elastisite modülü (E_{11}) belirlenmiştir. Daha sonrasında Bodig ve Jayne (1982) tarafından önerilen genel ilişkiler, enine yönlerde ve kesme düzlemlerinde modülleri hesaplamak için kullanılmıştır. E_{11} , E_{22} ve E_{33} boyuna, radyal ve teğet yönlerdeki elastisite modülleri; G_{12} , G_{13} ve G_{23} ortotropik düzlemlerdeki kayma modülleri olmak üzere değerler arasında kabul edilen sayısal ilişkiler aşağıda verilmiştir.

$$E_{11} : E_{22} : E_{33} \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (5.1)$$

$$G_{12} : G_{13} : G_{23} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (5.2)$$

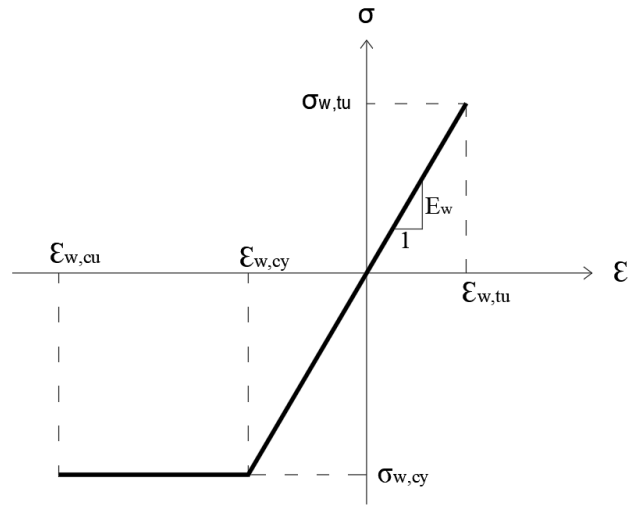
$$E_{11} : G_{12} \approx 14 : 1 \quad (5.3)$$

Yapılan sayısal ilişkilendirme sonucu elde edilen ahşap elemanların elastik özellikleri Tablo 5.2’ de verilmiştir.

Tablo 5.2 Ahşap kiriş eleman değerleri

Elastisite Modülü (MPa)	
E_{11}	11080
E_{22}	886
E_{33}	554
Kayma Modülü (MPa)	
ν_{12}	791
ν_{13}	744
ν_{23}	79
Poisson Oranı (-)	
G_{12}	0,37
G_{13}	0,42
G_{23}	0,47

Oluşturulan modelde malzeme karakterizasyonları analitik modelde de olduğu gibi ahşap için şekil değiştirme davranışı çekme bölgesinde doğrusal-elastik ve basınç bölgesinde doğrusal elastik-tam plastik olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.4, modellemede kullanılan idealleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisini göstermektedir.



Şekil 5.4 Lamine ahşabın idealize edilmiş gerilme şekil değiştirme grafiği

$\sigma_{w,t}$ ahşabın çekme gerilmesi, $\sigma_{w,c}$ ahşabın basınç gerilmesidir. E_w , ahşabın elastisite modülü, $\epsilon_{w,t}$ ahşabın çekmede şekilde değiştirmesi, $\epsilon_{w,c}$ ahşabın basınçtaki şekil değiştirmesidir. $\sigma_{w,cy}$ akma dayanımındaki şekil değiştirmesi $\epsilon_{w,cy}$ dir.

Basınç bölgesindeki lamine ahşapların beklenen plastik davranışı, anizotropik plastisite teorisi kullanılarak modellenmiştir. Malzemenin davranışında plastik duruma geçiş koşulu olarak Hill'in ortotropik malzemeler için kriteri kullanılmıştır. Bu kriter malzemenin mukavemetinin anizotropisini dikkate alan von Mises'in akma kriterinin genelleştirilmiş bir versiyonunu temsil eder. Üç ortogonal yön için normal basınç akma gerilmelerinin yanı sıra üç kesme düzlemindeki akma kesme gerilmeleri kriteri karşılamaktadır.

$$\sigma_{w,t} = E_w \cdot \varepsilon_{w,t} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{w,c} = E_w \cdot \varepsilon_{w,c} \quad \text{if } \varepsilon_{w,c} \leq \varepsilon_{w,cy} \quad (5.5)$$

$$\sigma_{w,c} = \sigma_{w,cy} \quad \text{if } \varepsilon_{w,c} > \varepsilon_{w,cy} \quad (5.6)$$

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra “Assembly” bölümü seçilerek lamine ahşap kirişi oluşturan her bir eleman birleştirilir. Daha sonra birleştirilen elemanlar arasındaki yüzeylerin bağlantı çeşitleri “Interaction” bölümünden tanımlanır. Ahşaplar arası bağlantıda kullanılan parametreler Tran ve diğer. (2014) tarafından yapılmış çalışmadan alınarak “Cohesive Zone Model” olarak modellenmiştir.

“Cohesive Zone Model”, başlangıçta doğrusal elastik davranışı, ardından hasarın başladığını ve geliştiğini varsayar. İlk elastik davranış 2 boyutlu durumda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{nt} \\ K_{nt} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (5.7)$$

Normal gerilme (σ_n) ve kayma gerilmesi (σ_t) olmak üzere δ_n ve δ_t ise normal ve teğet yönlerine karşılık gelen hasar anında yapıştırıcının ahşap yüzeylerinden mm olarak ayrıldığı değerlerdir. Aşağıdaki ikinci dereceden kritere uyan maksimum gerilmenin bir hasar başlatma kriteri seçilmiştir:

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n^c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t^c}\right)^2 = 1 \quad (5.8)$$

Hasar gelişimini kontrol etmek için doğrusal bir yer değiştirmeye dayalı yumuşatma seçilmiştir. Maksimum gerilme kriterine ulaşıldığında yapışkan sertliği, aşamalı yapışkan hasarını simüle etmek için etkili ayırma ile ilgili bir skaler hasar değişkeni (D) tarafından azaltma gerçekleştirilir. Tek bir hasar parametresine dayalı bir hasar modelinin kullanılması, yapıştırıcıdaki hasarın monoton olduğunu varsayar. Böylece gerilme bileşenleri, aşağıdakilere göre hasar değişkeninden etkilenir:

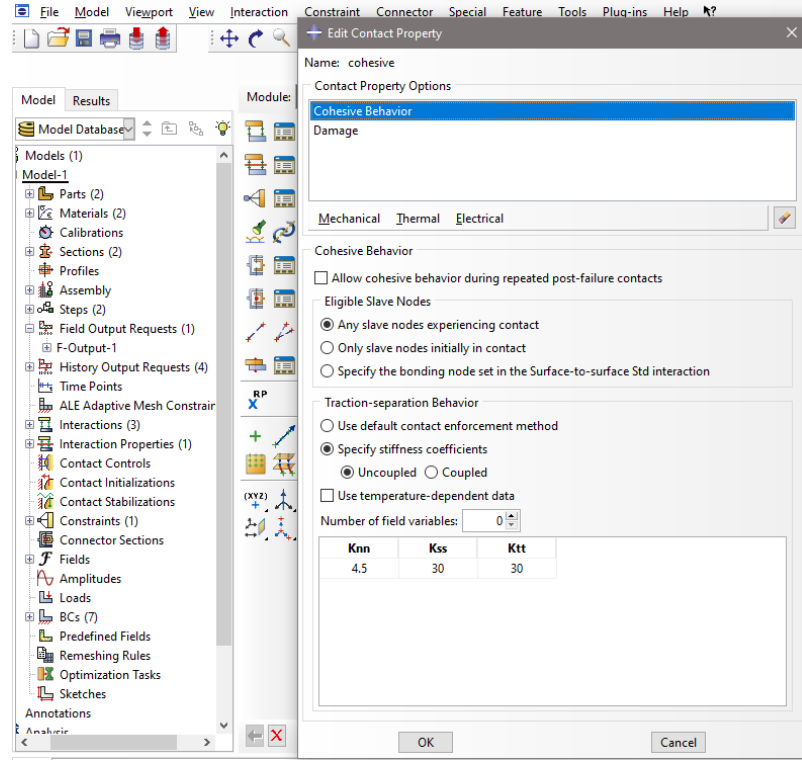
$$\sigma_n = \begin{cases} (1 - D)\bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n \geq 0 \\ \bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n \leq 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\sigma_t = (1 - D)\bar{\sigma}_t \quad (5.10)$$

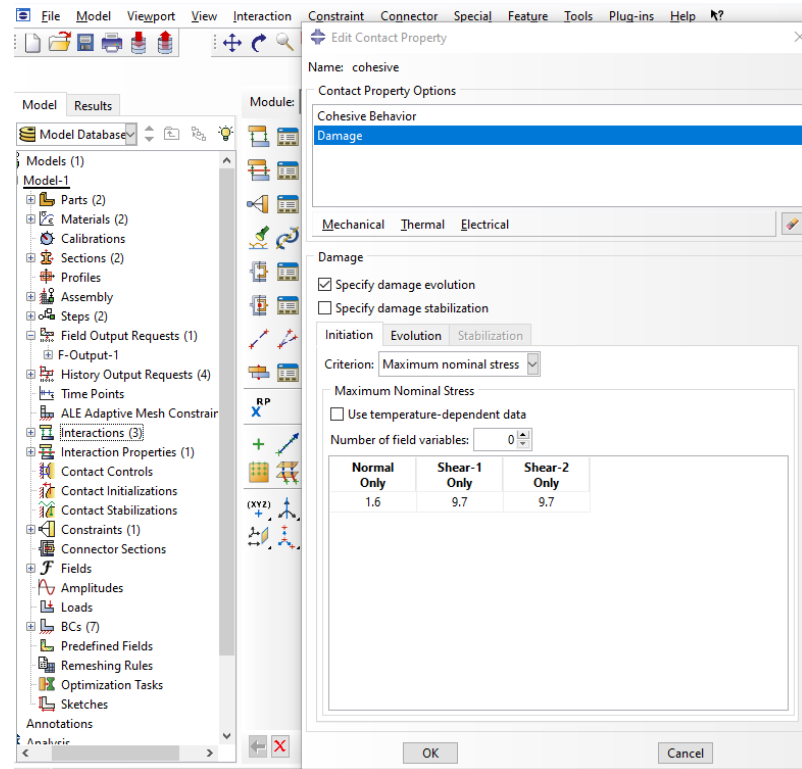
$\bar{\sigma}_n$ ve $\bar{\sigma}_t$ sırasıyla hasarsız akım ayrımları için elastik çekme-ayırma yasası tarafından hesaplanan normal ve teğetsel gerilim bileşenleridir. Doğrusal yumuşama için hasar parametresi olan D, normal ve kesme gerilmelerini birleştiren karışık mod altında genel hasar durumları için kullanılan $\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_t^2}$ (2 boyutlu durumda) efektif yer değiştirmeye dayanır. δ_m^0 ve δ_m^f , sırasıyla ilk hasar ve tam hasar durumunda etkin yer değiştirmelerdir ve D değeri Denklem 5.11 kullanılarak hesaplanır.

$$D = \frac{\delta_m^f(\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max}(\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (5.11)$$

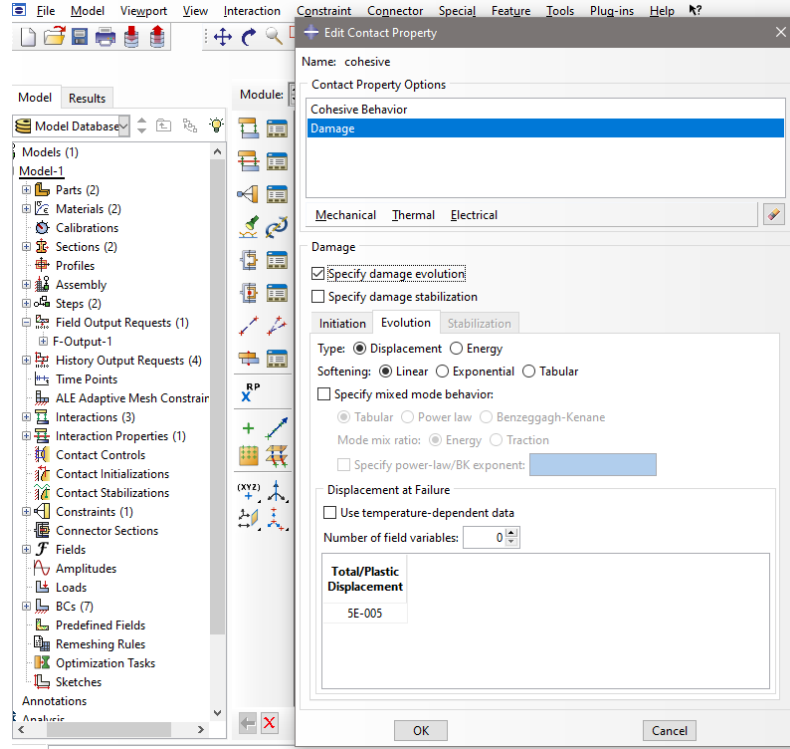
Yapılan işlemler sonrasında bulunan parametreler ABAQUS programında Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de görülen ekranlara değerler girilmiştir.



Şekil 5.5 Cohesive davranışın rijitlik değerleri



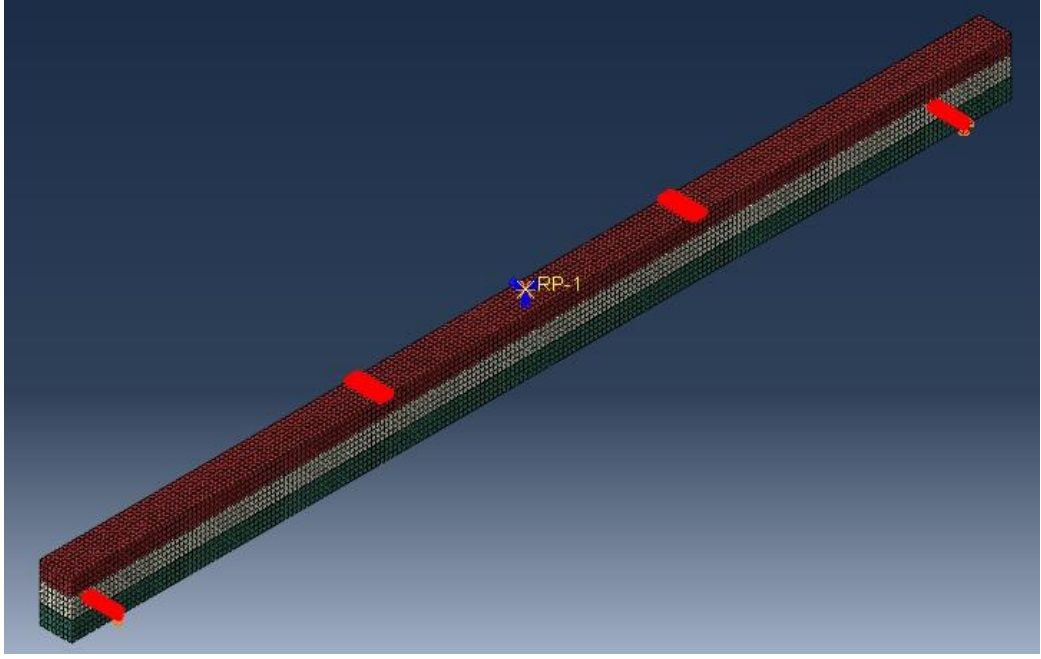
Şekil 5.6 Hasar gelişimi için kullanılan normal ve kayma gerilmeleri



Şekil 5.7 Hasar tanımlaması için kullanılan toplam yer değiştirme değeri

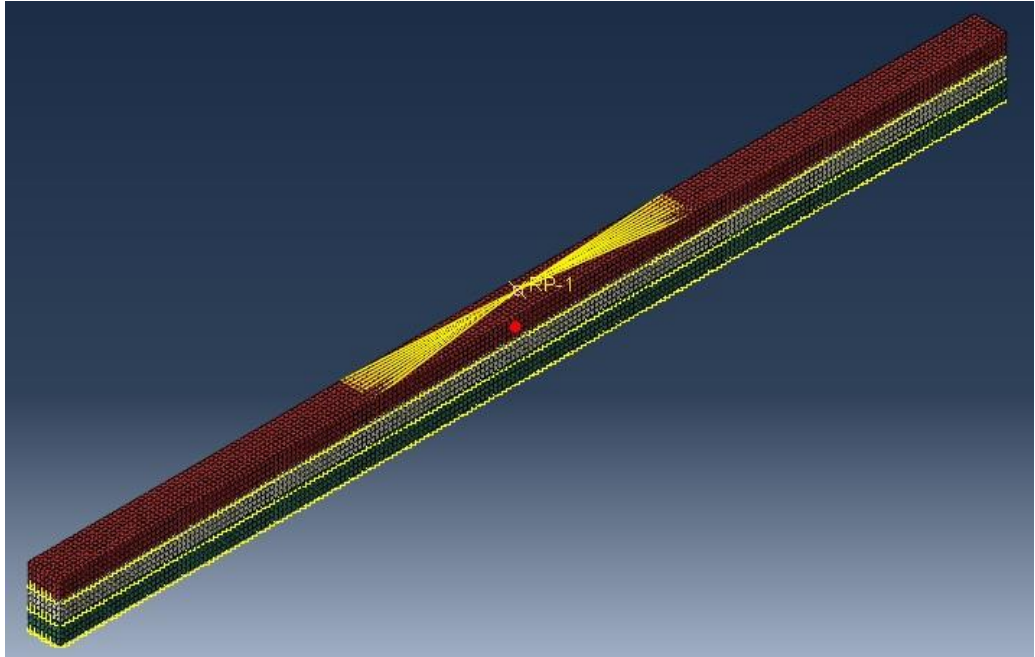
“Step” bölümünde analiz türü, adımları, istenen çıktılar ve hangi zaman aralığında verilerin okunacağı gibi tanımlamalar yapılmaktadır. Modellemenin “Static, General” ve doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. “Field Output” kısmından da istenilen verilerin seçimi yapılmıştır.

“Load” bölümünden lamine ahşap kirişe uygulanacak 4 noktalı eğilme deneyinin mesnet sınır koşulları belirlenir. Mesnetlerin sınır koşulları biri sabit diğeri hareketli mesnet koşullarına uygun şekilde tanımlanmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Mesnet ve yük noktaları tanımlanmış kiriş

“Mesh” bölümünde oluşturulmuş kirişin çözüm ağı yapısı istenilen boyutlara bölünerek oluşturulur. Şekil 5.9’da çözüm ağlarına ayrılmış lamine ahşap kiriş gösterilmiştir.



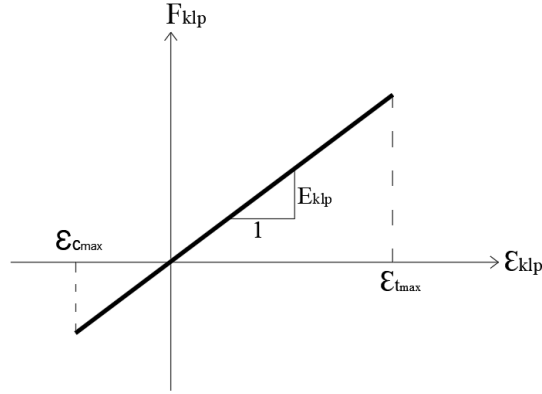
Şekil 5.9 Çözüm ağlarına ayrılmış lamine ahşap kiriş

Ön işlem adımları tanımlandıktan sonra “Job” bölümünden lamine ahşap kirişin analizi gerçekleştirilir. “Visualization” bölümü ile de analiz sonuçları görüntülenir. Böylelikle 2 grubun referans kirişlerinin sonuçları da elde edilmiş olur. Ardından benzer işlem adımlarıyla lifli polimer plakaların malzeme geometrisi ve özellikleri tanımlanır. Lifli polimer plakalar ahşap elemanlar ile aynı 8 düğümlü lineer geometrik hekzahedral katı elaman (C3D8) olarak modellenmiştir. KLP yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu için hasarın ahşap elemandan başlayarak ilerlediği varsayılmıştır. Bu sebeple plakanın kopması dikkate alınmamış ve malzemenin sadece elastik özellikleri tanımlanmıştır. KLP plakalar için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 5.3’te verilmiştir. Ahşap eleman ile KLP plakalar arasındaki bağlantı “Tie constraint” olarak modellenmiştir.

Tablo 5.3 KLP plakanın ABAQUS değerleri

Elastisite Modülü (MPa)	
E ₁₁	165543
E ₂₂	10000
E ₃₃	10000
Poisson Oranı (-)	
ν_{12}	0,3
ν_{13}	0,3
ν_{23}	0,03
Kayma Modülü (MPa)	
G ₁₂	5000
G ₁₃	5000
G ₂₃	1000

Kullanılan KLP’lerin hepsi gevrek göçme modu ile doğrusal elastik olarak idealize edilmiş ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 KLP plakının idealize edilmiş gerilme şekil değiştirme grafiği

5.3 Analiz Sonuçları

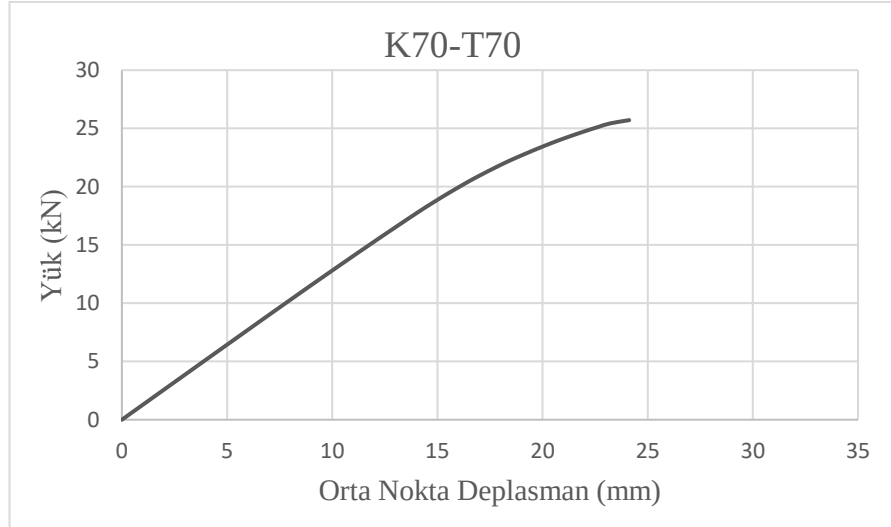
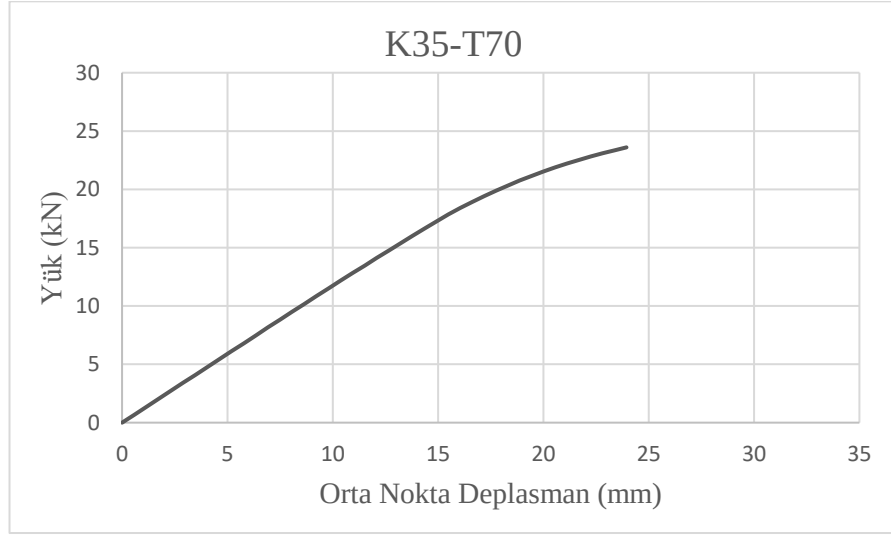
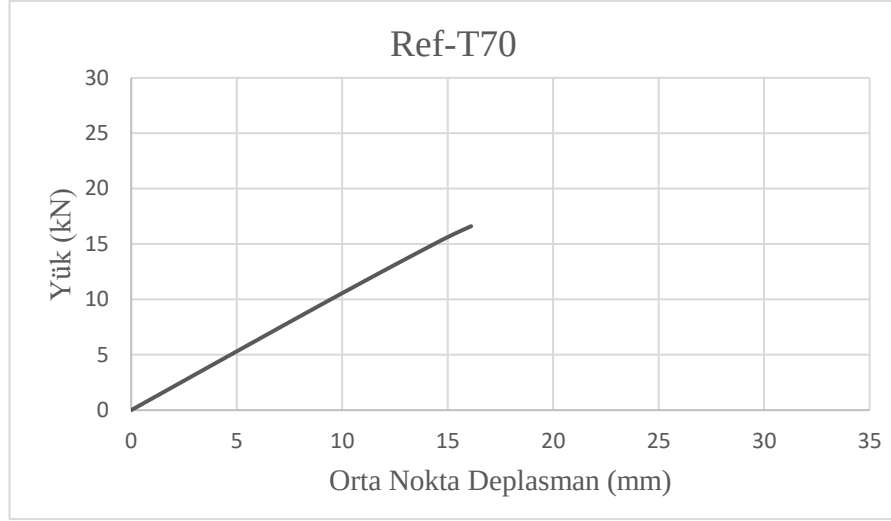
Yapılan analizler sonucu 2 gruba ait tüm kirişlerin maksimum taşıyacağı yükler ve bu yüklere karşılık gelen deplasman miktarı bulunmuştur. Tüm kirişlerin sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar neticesinde kirişlerin yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir.

Tablo 5.4 Sonlu elemanlar analizi sonuçları

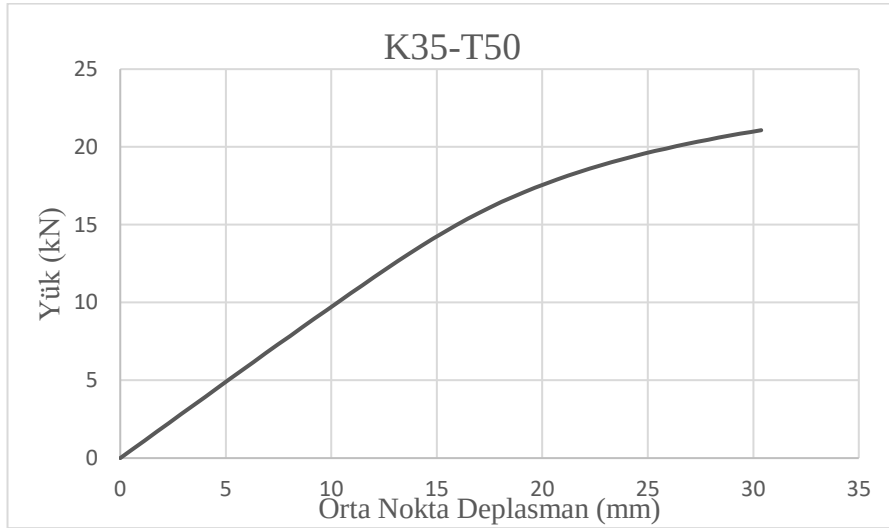
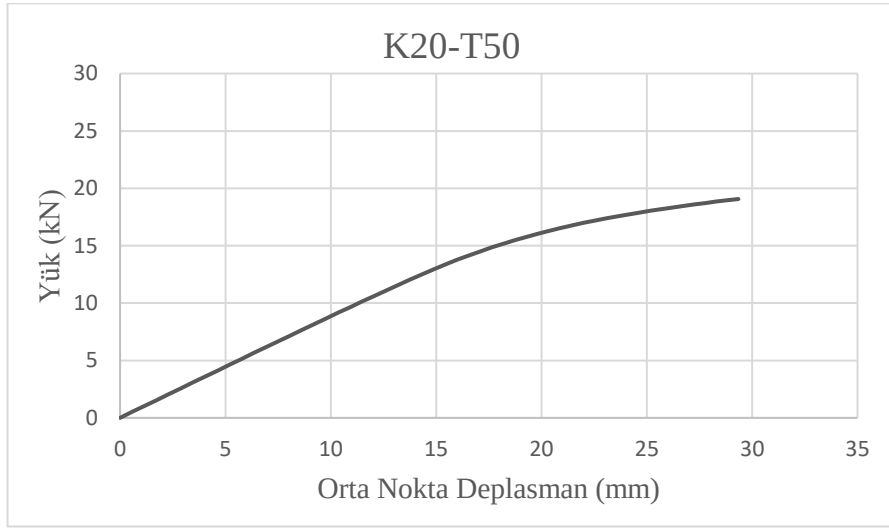
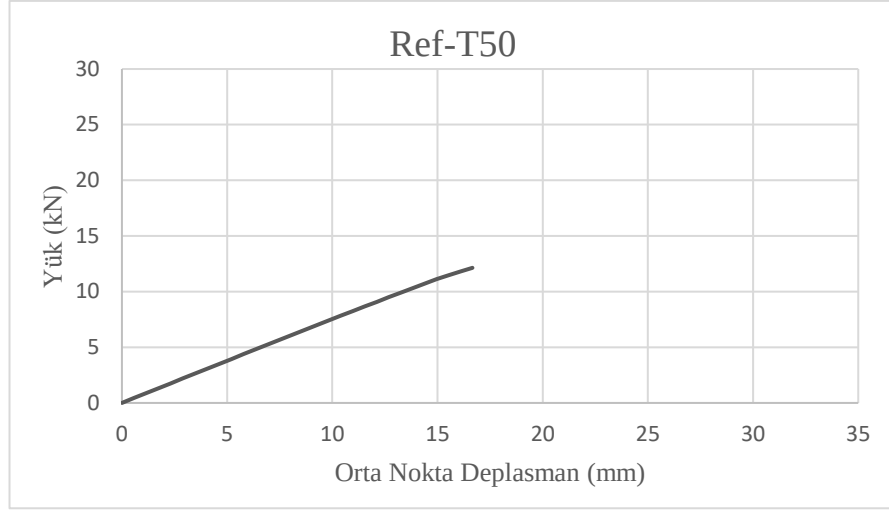
Kiriş İsimleri	Maksimum P (kN)	Maksimum Orta Deplasman (mm)
Ref-T70	16,60	16,11
K35-T70	23,60	23,94
K70-T70	25,71	24,12
Ref-T50	12,14	16,67
K20-T50	19,07	29,35
K35-T50	21,07	30,37

Kirişlerin taşıyabileceği maksimum yük-orta nokta deplasman grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de 1.Grup ve 2. Grup kirişler ayrı ayrı verilmiştir. Her iki grup kirişin referans kirişlerinin grafiklerine bakıldığında, yük taşıma kapasitelerine kadar plastik bölge çok küçük bir alanda sınırlı kalmış ve neredeyse doğrusal bir davranış söz

konusudur. Ancak KLP plaka takviyeli kirişlerde ahşap belirgin bir plastik bölgede iken yük taşıma devamlılığını sürdürmüştür. Bu durumda ahşaptan KLP plakaya bir yük transferi gerçekleşerek yani KLP plaka yükü ahşaptan kendi üzerine alarak doğrusal olmayan bir davranış ile kirişlerin yük taşıma kapasitelerini arttırdığı söylenebilir.

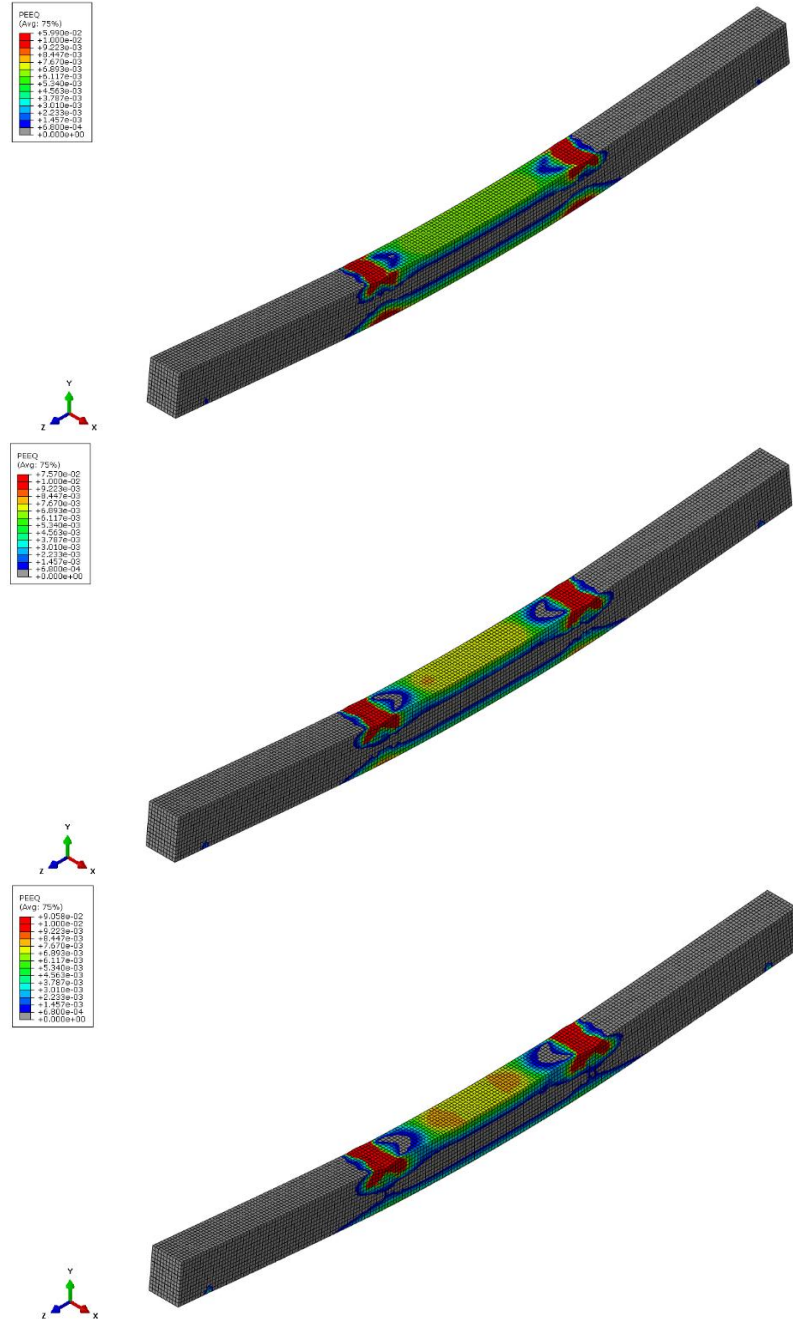


Şekil 5.11 1. Grup kirişin yük orta nokta deplasman grafikleri

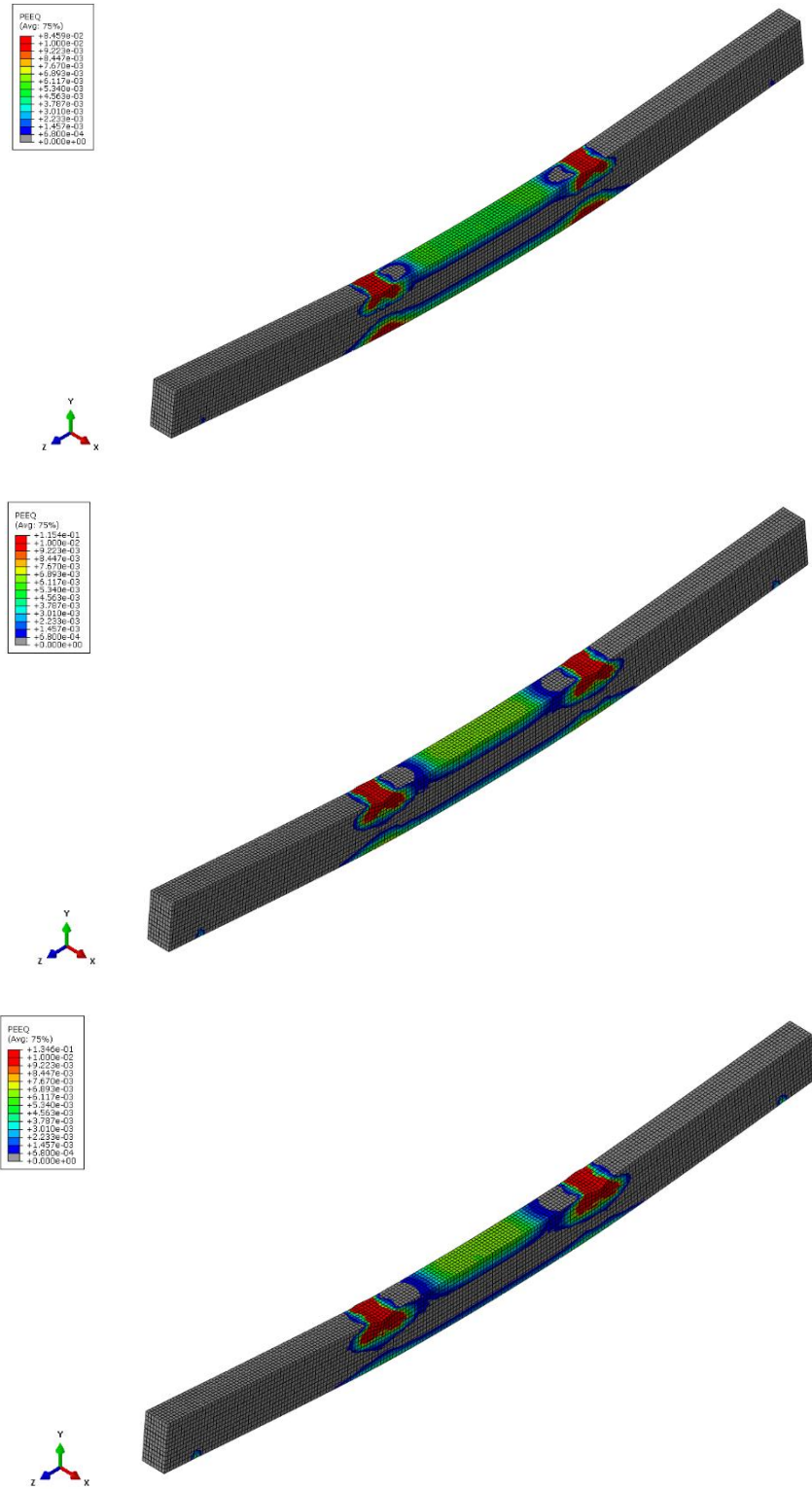


Şekil 5.12 2. Grup kirişin yük orta nokta deplasman grafikleri

Eşdeğer plastik şekil değiştirme gerinimi (PEEQ), dış yükler nedeniyle parçada meydana gelen kalıcı şekil değiştirmenin bir karşılığı olarak kullanılmaktadır. 1. Grup kirişlerin (Ref-T70, K35-T70, K70-T70) ve 2. Grup kirişlerin (Ref-T50, K20-T50, K35-T50) PEEQ değişimleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te sırasıyla verilmiştir. Elde edilen görüntülerden sistemin rijitliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.13 1. Grup kirişin eşdeğer plastik şekil değiştirme gerinimleri



Şekil 5.14 2. Grup kirişin eşdeğer plastik şekil değiştirme gerinimleri

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan analitik ve sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı sonucunda elde edilen maksimum taşıyabilecekleri yükler Tablo 6.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İki yöntemden de elde edilen sonuçlar birbirlerine yakınsamaktadır. Yapılan sayısal yaklaşımlar sonucunda çekme bölgesine takviye edilmiş KLP plakaların her iki yöntemde de referans kirişlere nazaran taşıyabilecekleri maksimum yüklerde artış meydana gelmiştir. Aynı zamanda sonuçlara bakıldığında KLP takviyesi ile daha küçük kesitli kirişlerin daha büyük kesitli kirişlerin yük taşıma kapasitelerinden ödün vermeden veya çok az bir kayıp ile kullanımına olanak sağladığı görülmektedir. Örneğin Ref-T70 kirişi ile elde edilen yük taşıma kapasitesi ile K20-T50 kirişinin yük taşıma kapasiteleri sonuçları yakındır. KLP takviyeleri bu şekilde hem mimari açıdan hem de teknik açıdan elaman seçiminde alternatif sağlamaktadır.

Tablo 6.1 Analitik model ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarının kıyaslanması

Kiriş İsimleri	Maksimum Yük P analitik (kN)	Maksimum Yük P sonlu elemanlar (kN)	P analitik/ P sonlu elemanlar
Ref-T70	17,85	16,60	1,08
K35-T70	26,02	23,60	1,10
K70-T70	29,72	25,71	1,16
Ref-T50	12,75	12,14	1,05
K20-T50	20,17	19,07	1,06
K35-T50	23,35	21,07	1,11

Yapılan iki yöntem de sayısal yaklaşımlar yöntemidir ve bu yöntemler gerçek sonucu tahmin etmek için kullanılırlar. Yapılan sonlu elemanlar yönteminde lamine ahşap kirişi oluşturan ahşap elemanlar arasındaki modellemede analitik yöntemdeki hesap kriterlerine göre daha fazla hasar alma durumu ve kaymaların olduğu varsayıldığı için daha düşük kırılma yüklerine sebep olduğu düşünülmektedir. Her iki modelde de KLP takviyesinin referans kirişlerde sebep olduğu kapasite artışları benzerdir. Bu da KLP ile ahşap arasındaki ara yüzey modellemesinde her iki modelin

yaklaşımının benzer olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak ahşaplar arasındaki bağlantıdaki modellemeden dolayı KLP takviyesi ile kapasite artışı nispeten sonlu elemanlar çözümü ile analitik çözüme göre daha az artış sağlamıştır. Analitik modelin hesap kriterlerinde doğrusal olarak hesap yapılırken sonlu elemanlar yönteminde doğrusal olmayan bir analiz yapılması bu artıştaki farklılığa sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca lineer olmayan analizlerin gerçek sonuca daha yakın olacağı düşünüldüğünde deneysel sonuçlarla bu çalışmada bulunan sonuçların karşılaştırılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Alhayek, H. ve Svecova, D. (2012). Flexural stiffness and strength of GFRP-reinforced timber beams. *Journal of Composites for Construction*, 16(3), 245-252.
- Ali, A. C. (2011). *Physical-mechanical properties and natural durability of lesser used wood species from Mozambique*. Doktora Tezi, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Andor, K., Lengyel, A., Polgár, R., Fodor, T. ve Karácsonyi, Z. (2015). Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. *Construction and Building Materials*, 99, 200-207.
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L. ve Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114, 307-332.
- Ateş, E. (2006). Epoksi ve polyester reçinelı polimer betonda granölometri ve bağlayıcı oranları değişimiyle eğilme dayanımı optimizasyonu. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 8(1), 41-52.
- Aydın, S., Yardımcı, M. Y. ve Ramyar, K. (2007). Mechanical properties of four timber species commonly used in Turkey. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 31(1), 19-27.
- Aygün, B. (2020). Lifli polimerler ile yapıların depreme karşı güçlendirilmesi, basit hesap teknikleri ve şantiyedeki kalite kontrolü. *Deprem Güçlendirme Derneği Uzaktan Eğitim Seminerleri*, 1 Temmuz 2021, <https://www.deguder.org.tr/wp-content/uploads/2020/06/01-Bayram-Aygün-Lifli-polimerler-ile-yapıların-depreme-karşı-güçlendirilmesi.pdf>.

- Bakalarz, M. ve Kossakowski, P. (2019). The flexural capacity of laminated veneer lumber beams strengthened with AFRP and GFRP sheets. *Technical Transactions*, 116(2), 85-95.
- Bakalarz, M., Kossakowski, P. G. ve Tworzewski, P. (2020). Strengthening of bent LVL beams with Near-Surface Mounted (NSM) FRP reinforcement. *Materials*, 13(10), 2350.
- Balkan, S. (2019). *Ahşap lamine malzemenin konut üretimi için değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Basterra, L., Balmori, J., Morillas, L., Acuña, L. ve Casado, M. (2017). Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 154, 914-920.
- Bilici, S. (2006). *Ahşap konut üretim sistemleri: Almanya örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Bodig, J. ve Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Borri, A., Corradi, M. ve Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), 143-153.
- Buchanan, A., Carradine, D. ve Beattie, G. M., Hugh. (2011). Performance of houses during the Christchurch earthquake of 22 February 2011. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 342-357.
- Buckley, J. D. ve Edie, D. D. (1993). *Carbon-carbon materials and composites* (1st ed.). Noyes, Park Ridge: William Andrew.

- Buell, T. W. ve Saadatmanesh, H. (2005). Strengthening timber bridge beams using carbon fiber. *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 173-187.
- Bulleit, W. M., Sandberg, L. B. ve Woods, G. J. (1989). Steel-reinforced glued laminated timber. *Journal of Structural Engineering*, 115(2), 433-444.
- Caniato, M., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C. ve Fausti, P. (2017). Thermal and acoustic performance expectations on timber buildings. *Building Acoustics*, 24(4), 219-237.
- Copaland (2020). *All about wood construction: Advantages & disadvantages*. 1 Temmuz 2021, <https://mtcopeland.com/blog/all-about-wood-construction-advantages-disadvantages/>.
- Coran, A. Y. ve Patel, R. (1980). Rubber-thermoplastic compositions. Part I. EPDM-polypropylene thermoplastic vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*, 53(1), 141-150.
- Corradi, M., Mouli Vemury, C., Edmondson, V., Poologanathan, K. ve Nagaratnam, B. (2021). Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 258, 113363.
- Çağlayan, E. S. (2020). *Ahşap yapılar ve Türkiye’de inşaat mühendislerinin / ağaç işleri endüstri mühendislerinin çok katlı ahşap yapılara yönelik görüşleri*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Çalışkan, Ö., Meriç, E. ve Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dün, bugün ve yarın. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 109-118.
- Çelik, D. (2013). *Fonksiyonel ketonik reçinelerin sentezi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Dagher, H. J., Kimball, T. E., Shaler, S. M. ve Abdel-Magid, B. (1996). National Conference on Wood Transportation Structures. *General Technical Report FPL-GTR-94*. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 207-214.
- Dalton, A. (2017). *10 benefits of using timber frame building*, 5 Temmuz 2021, <https://www.buildersmerchantsnews.co.uk/10-benefits-of-using-timber-frame-building/44552>.
- Desch, H. E. ve Dinwoodie, J. M. (2016). *Timber: Structure, properties, conversion and use*. Londra: Macmillan International Higher Education.
- Dilik, T. (1999). Lamine ağaç malzemeden pencere profili üretimi ve bazı kalite özelliklerinin belirlenmesi. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 49(1), 59-82.
- Dinwoodie, J. (1975). Timber—a review of the structure-mechanical property relationship. *Journal of Microscopy*, 104(1), 3-32.
- Doğanay, S. ve Ulcay, Y. (2007). Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 12(2), 85-95.
- Donadon, B. F., Mascia, N. T., Vilela, R. ve Trautwein, L. M. (2020). Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. *Engineering Structures*, 202, 109818.
- Dröge, G. ve Dröge, T. (2003). *Schäden an Holztragwerken*. Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verlag.

- Ekinci, S. ve Arpacioğlu, Ü. (2004). Geleneksel ahşap yapılarda yapı fiziği ve malzeme sorunlarının taşıyıcı sisteme etkileri. 2. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, 1-9.
- Erdin, N. (2003). Ağaç malzeme kullanımı ve çevreye etkisi. *Türkiye Mühendislik Haberleri (THM)*, 427-2003/5, 96-100.
- Erdoğan, E. (2018). *Ahşap: Hurafeler ve gerçekler*, 5 Temmuz 2021, <https://docplayer.biz.tr/110898322-Ahsap-hurafeler-ve-gercekler-emine-erdogmus.html>.
- Erkoç, E. (2004). *Günümüz teknolojisiyle üretilen ahşap konutların tasarım-uygulama-kullanım üçgeninde değerlendirilmesi (İstanbul örnekleri)*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Falk, R. H. (2009). Wood as a sustainable building material. *Forest Products Journal*, 59(9), 6-12.
- Fossetti, M., Minafò, G. ve Papia, M. (2015). Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords. *Construction and Building Materials*, 95, 54-64.
- Frese, M. ve Blaß, H. (2007). *Failure analysis on timber structures in Germany- A contribution to COST action E55*. In 1st Workshop, Graz University of Technology, Austria.
- Frühwald, E., Serrano, E., Toratti, T., Emilsson, A. ve Thelandersson, S. (2007). *Design of safe timber structures- How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber?*, Report TVBK-3053, 5-32. Division of Structural Engineering, Lund University.

- Gáborík, J., Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., Kašíčková, V. ve Sikora, A. (2016). Adhesive as a factor affecting the properties of laminated wood. *BioResources*, 11(4), 10565-10574.
- Gand, A., Yeboah, D., Khorami, M., Olubanwo, A. ve Lumor, R. (2018). Behaviour of strengthened timber beams using near surface mounted Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) rebars. *Engineering Solid Mechanics*, 6(4), 341-352.
- Gardziella, A., Pilato, L. A. ve Knop, A. (2013). *Phenolic resins: Chemistry, applications, standardization, safety and ecology* (2nd ed). Heidelberg, NY: Springer.
- Garzon Barragán, O. ve Jacob, J. (2007). *Flexural strengthening of glued laminated timber beams with steel and carbon fiber reinforced polymers*. Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Gentile, C., Svecova, D. ve Rizkalla, S. H. (2002). Timber beams strengthened with GFRP bars: Development and applications. *Journal of Composites for Construction*, 6(1), 11-20.
- Gentry, T. R. (2011). Performance of glued-laminated timbers with FRP shear and flexural reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 861-870.
- Glišović, I., Pavlović, M., Stevanović, B. ve Todorović, M. (2017). Numerical analysis of glulam beams reinforced with CFRP plates. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(7), 868-879.
- Glišović, I., Stevanović, B., Todorović, M. ve Stevanović, T. (2016). Glulam beams externally reinforced with CFRP plates. *Wood Research*, 61(1), 141-154.
- Gustafsson, P. J. (2003). Fracture perpendicular to grain—structural applications. *Timber Engineering*, 103-130.

- Haiman, M. ve Žagar, Z. (2002). Strengthening timber glulam beams with FRP plates. *Wood in Construction Industry: Prospectives of Reconstruction. International Conference Proceedings*, 25-34.
- Hansson, E. F. (2011). Analysis of structural failures in timber structures: Typical causes for failure and failure modes. *Engineering Structures*, 33(11), 2978-2982.
- Herzog, T., Natterer, J., Schweitzer, R., Volz, M. ve Winter, W. (2012). *Timber construction manual*. Almanya: Walter de Gruyter.
- Issa, C. A. ve Kmeid, Z. (2005). Advanced wood engineering: Glulam beams. *Construction and Building Materials*, 19(2), 99-106.
- Johns, C. K. ve Racine, P. (2001). Composite reinforcement of timber in bending. *International Association for Bridge and Structural Engineering Symposium Report*, 85(2), 61-66.
- Kaplan, B. (2013). *Geleneksel Osmanlı mimarisine sahip ahşap yalılarının deprem kuvvetleri altında incelenmesi ve güçlendirme teknikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kaplanlıoğlu, B. ve Gemalmayan, N. (2015). Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemler kullanılarak bulunan gerilmelerin karşılaştırılması. *Mühendis ve Makina*, 56(665), 62-72.
- Karagüler, M. E. ve Kaya, G. (2017). The effect of relative humidity and moisture to the durability of spruce and laminated timber. *ITU Journal of Faculty of Architecture*, 14(1), 103-110.
- Karasu, B. (2016). *Karbon lifler ile güçlendirilmiş kompozit kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.

- Karayılmazlar, S., Çabuk, Y., Atmaca, A. ve Aşkın, A. (2007). Orman ürünleri endüstrisinde laminasyon tekniği ve önemi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 9(11), 78-86.
- Karayılmazlar, S., Çabuk, Y., Tümen, İ. ve Atmaca, A. (2008). Laminasyonlu ahşap kirişlerin çeşitli yapılarda kullanımı. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 10(14), 13-21.
- Kartal, I., NAYCI, G. ve Demirer, H. (2019). Cam ve bambu lifleriyle takviyelendirilmiş vinilester kompozitlerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(1), 34-37.
- Kasal, A., Hasan, E. ve Dizel, T. (2010). Masif ve lamine edilmiş ağaç malzemelerde eğilme direnci ve elastikiyet modülünün belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 183-190.
- Kaya, T. G. (2017). *Masif ve lamine ahşabın durabilitesi ve mekanik özelliklerine ortam şartlarının etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kayakıran, S. ve Kishalı, E. (2019). Düünden bugüne tutkallı tabakalı ahşap yapı elemanların incelenmesi ve yapılarda taşıyıcı olarak kullanılması üzerine öneriler. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi (MBUD)*, 4(1), 34-50.
- Keskin, E. (2005). *Betonarme yapıların onarımı, güçlendirilmesi ve lifle güçlendirilmiş polimerler*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Khamsını, F. M. (2019). *Ahşap yapı elemanlarında laminasyon tekniği uygulamasının deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

- Kılınçarslan, Ş. ve Şimşek Türker, Y. (2019). The effect of different parameters on strength properties of glulam timber beams. *ICCENSEN-2019, Antalya-Turkey*, 23-27.
- Kılınçarslan, Ş. ve Şimşek Türker, Y. (2020). Physical-mechanical properties variation with strengthening polymers. *Acta Physica Polonica A*, 137(4), 566-568.
- Kim, Y. J. ve Harries, K. A. (2010). Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. *Engineering Structures*, 32(10), 3225-3234.
- Kurt, Ş. (2006). *Emprenye edilmiş lamine ağaç malzemelerin deniz ortamında bazı teknolojik özelliklerinin değişimi*. Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- Lacroix, D. ve Doudak, G. (2018). FRP reinforced glulam beams under high strain-rates DM17-1-DM17-10, *Building Tomorrow's Society*.
- Lamb, D. (1998). Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands: The potential role of timber plantations. *Restoration Ecology*, 6(3), 271-279.
- Lantos, G. (1970). The flexural behavior of steel reinforced laminated timber beams. *Wood Science*, 2(3), 136-143.
- Lindyberg, R. F. (2001). *ReLAM: A nonlinear probabilistic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending*. Yüksek Lisans Tezi, University of Maine, Maine.
- Mağdala, M. Ö. (2009). *Isı kalkanları için kalıplanabilir karbon fenolik kompozit üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Martin, Z., Stith, J. and Tingley, D. (2000). *Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology*, 1 Temmuz 2021, <https://www.yumpu.com/en/document/read/34994826/commercialization-of-frp-reinforced-glulam-beam-technology>.
- Mathur, V. (2006). Composite materials from local resources. *Construction and Building Materials*, 20(7), 470-477.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering*. USA: CRC Press.
- Mengeloğlu, F. ve Kurt, R. (2004). Mühendislik ürünü ağaç malzemeler 1 Tabakalanmış Kaplama Kereste (TAK) ve Tabakalanmış Ağaç Malzeme (TAM). *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 39-44.
- Mohamad, W. H. W., Razlan, M. A. ve Ahmad, Z. (2011). Bending strength properties of glued laminated timber from selected Malaysian hardwood timber. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 11(4), 7-12.
- Özen, R. (2021). *Wood as a building material: It's benefits and disadvantages*, 5 Temmuz 2021, <https://www.ktb.gov.tr/EN-98769/wood-as-a-building-material-it39s-benefits-and-disadvan-.html>.
- Özer, H. (2015). *Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Peacock, A. (2000). *Handbook of polyethylene: Structures, properties and applications*, Texas: Exxon Chemical Company.
- Perçin, O. (2007). *Lamine edilmiş ahşap malzemeye deniz suyunun etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

- Perçin, O., Özbay, G. ve Mustafa, O. (2009). Farklı tutkallarla lamine edilmiş ahşap malzemelerin mekaniksel özelliklerinin incelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19, 109-120.
- Pop, P. ve Gheorghe, B. (2010). Manufacturing process and applications of composite materials. *Annals of the Oradea University Fascicle of Management and Technological Engineering*, 19(9), 2010/2.
- Raftery, G. M. ve Kelly, F. (2015). Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Composites Part B: Engineering*, 70, 9-19.
- Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Densley-Tingley, D. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 333-359.
- Romani, M. ve Blaß, H. J. (2001). Design model for FRP reinforced glulam beams. *Paper presented at the Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Working Commission W18 Timber Structures*, Meeting in Italy, CIB-W18/34-12-3, 1-10.
- Ross, A. (2006). Basalt fibers: Alternative to glass?, *Composites Technology*, 12(4), 44-48.
- Ross, R. J. (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material. *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190*, 2010, 190 (1), 509.
- Rowell, R. M. ve Susan L., (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites* (6th ed). Boca Raton: CRC Press.

- Saral, Ö. F. (2016). *Çelik çubuk takviyeli ahşap kirişlerin taşıyıcı performansının deneysel ve analitik yöntemle incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Schober, K.-U., Harte, A. M., Kliger, R., Jockwer, R., Xu, Q. ve Chen, J.-F. (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, 106-118.
- Schweitzer, P. A. (2006). *Corrosion of polymers and elastomers*. Boca Raton: CRC Press.
- Sharma, P. (2016). An introduction to basalt rock fiber and comparative analysis of engineering properties of BRF and other natural composites. *International Journal of Research in Applied Science & Engineering Technology*, 4(1), 141-147.
- Silker, A. (1962). Reinforced wood laminated beams. *Forest Products Journal*, 12(2), 91-96.
- Sizüçen, H. (2008). *Titrek kavak yongalarından üretilen (LSL, LVL, PSL) lamine ağaç malzemelerin direnç özelliklerinin belirlenmesi*. Bilim Uzmanlığı Tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Solmaz, M. Y. G., Mustafa. (2007). Tabakalı kompozit plakalarda takviye malzemesi ve oryantasyon açısının gerilme analizine etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 16-25.
- Suhud, H. (2018). *The differences between solid wood and engineered wood*, 1 Temmuz 2021, <https://custommebel.com/en/2018/04/24/the-differences-between-solid-wood-and-engineered-wood/>.
- Švajlenka, J. ve Kozlovská, M. (2020). Evaluation of the efficiency and sustainability of timber-based construction. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120835.

- Svecova, D. ve Eden, R. (2004). Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars-an experimental investigation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(1), 45-55.
- Şakar, G. ve Çelik, H. K. (2021). Solutions of solid timber and glulam bridge example with different approaches in Turkey. *European Journal of Technique (EJT)*, 11(1), 13-18.
- Şenkal, F. (1996). *Konutlarda diinden bugüne ahşap kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Teng, J., Chen, J.-F., Smith, S. T. ve Lam, L. (2002). *FRP: Strengthened RC structures*, New York: John Wiley & Sons.
- Thelandersson, S. ve Larsen, H. J. (2003). *Timber engineering*. İngiltere: John Wiley & Sons.
- Thorhallsson, E. R., Hinriksson, G. I. ve Snæbjörnsson, J. T. (2017). Strength and stiffness of glulam beams reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B: Engineering*, 115, 300-307.
- Tomasi, R., Parisi, M. A. ve Piazza, M. (2009). Ductile design of glued-laminated timber beams. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 14(3), 113-122.
- Topsakal, A. ve Özel, C. (2013). Faz malzeme oranının polimer beton özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2013, 9(1), 16-28.
- Tran, V.-D., Oudjene, M. ve Méausoone, P.-J. (2014). FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 52, 40-47.

- Usman, A. P. ve Sugiri, S. (2015). Analysis of the strength of timber and glulam timber beams with steel reinforcement. *Journal of Engineering and Technological Sciences ITB*, 47(6), 601-611.
- Vahedian, A., Shrestha, R. ve Crews, K. (2019). Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. *Composites Part B: Engineering*, 164, 377-389.
- Wallenberger, F. T., Hicks, R. J., Simcic, P. N. ve Bierhals, A. T. (2007). New environmentally and energy friendly fibreglass compositions (E-glass, ECR-glass, C-glass and A-glass)—advances since 1998. *Glass Technology-European Journal of Glass Science and Technology Part A*, 48(6), 305-315.
- Wang, Z., Li, H., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O. ve Fang, C. (2020). Review on bond properties between wood and fiber reinforced polymer. *Journal of Renewable Materials*, 8(8), 993.
- Wangaad, F. (1964). Elastic deflection of wood-fiberglass composite beams. *Forest Prod. J.*, 14(6), 256-260.
- Wdowiak-Postulak, A. (2021). Basalt fibre reinforcement of bent heterogeneous glued laminated beams. *Materials*, 14(1), 51.
- Yahyaei-Moayyed, M. ve Taheri, F. (2011). Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. *Composite Structures*, 93(2), 616-628.
- Yang, H., Liu, W., Lu, W., Zhu, S. ve Geng, Q. (2016). Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, 106, 550-563.

Yörür, H., Aydemir, D. ve Uysal, B. (2010). Emprenye edilmiş ahşap malzemenin yapışma direncini etkileyen faktörler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 12(18), 99-106.

Yusof, A. ve Rahman, A. (2017). Flexural strengthening of timber beams using carbon fibre reinforced polymer. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(3), 348-358.