# YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI VE ÇARPIŞMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

**Emre BİRİNCİ**

**2021**
**DOKTORA TEZİ**
**ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı**
**Doç.Dr. Hüseyin YÖRÜR**

# YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI VE ÇARPIŞMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

**Emre BİRİNCİ**

**T.C.**
**Karabük Üniversitesi**
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**
**Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında**
**Doktora Tezi**
**Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı**
**Doç. Dr. Hüseyin YÖRÜR**

**KARABÜK**
**Şubat 2021**

Emre BİRİNCİ tarafından hazırlanan "YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI VE ÇARPIŞMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ" başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hüseyin YÖRÜR .....
Tez Danışmanı, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim YUMRUTAŞ .....
İkinci Danışman, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 19/02/2021

| Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu) | İmzası |
|---|---|
| Başkan : Prof. Dr. Şeref KURT (KÜ) | ..... |
| Üye : Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN (İTÜ) | ..... |
| Üye : Doç. Dr. Hüseyin YÖRÜR (KBÜ) | ..... |
| Üye : Doç. Dr. Suat ALTUN (KBÜ) | ..... |
| Üye : Doç. Dr. Alperen KAYMAKCI (KÜ) | ..... |
| Üye : Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim YUMRUTAŞ (KBÜ) | ..... |
| Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şemsettin DORUK (KBÜ) | ..... |

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*"Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim."*

Emre BİRİNCİ

# ÖZET

**Doktora Tezi**

## YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI VE ÇARPIŞMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

**Emre BİRİNCİ**

**Karabük Üniversitesi**
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**
**Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**
**Doç. Dr. Hüseyin YÖRÜR**
**Şubat 2021, 165 sayfa**

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de başlıca ölüm sebeplerinden biri trafik kazalarıdır. Trafik kazalarına ait istatistikler incelendiğinde kaza yapan aracın yoldan çıkarak bariyerlere çarpması sonucu meydana gelen ölüm veya yaralanma oranı, bariyerlerin sahip olduğu tasarım, üretim, malzeme gibi karakteristik özelliklerin etkisine bağlı olduğu bilinmektedir. Dünya genelinde kullanılan bariyer türleri çelik, beton, ahşap ve plastik malzemelerden üretilmektedir. Bu tip bariyerlerin birbirlerine karşı birtakım avantaj ve dezavantajları vardır.

Bariyer tasarımlarında genellikle öncelikli olarak güvenlik ve yapısal gerekliliklerin dikkate alınmasından dolayı estetik yaklaşım göz ardı edilmiştir. Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), Karayolu Teknik Şartnamesinde (2013) sadece çelik ve beton bariyerler için malzeme ve uygulama standartları verilmiştir. Yine aynı şekilde KGM Karayolu Tasarım El Kitabı'nda (2005) beton ve çelik bariyer

gereksinimi ve yerleşimine ilişkin bilgiler verilmiş olup ahşap bariyerlere ilişkin herhangi bir yönetmelik bulunmamaktadır.

Literatürde genellikle üç tip ahşap bariyer kullanılmaktadır. Bunlar; ilk olarak ana gövdesi ahşap ve dikmeleri çelik olan, ikinci olarak dikmeler ahşap ancak ana gövde çelik olan ve üçüncü olarak tamamen ahşap olan bariyerlerdir. Literatür ve bariyer üretim endüstrisi incelendiğinde; ahşap bariyerlerin darbe enerjisini, ses ve ışığı absorbe etme yeteneğini ve estetik etkisini bir arada değerlendiren yeterli bir ahşap bariyer tasarımı henüz bulunmamaktadır.

Literatüre ve sektöre yön vermesi düşünülen bu çalışmada, ahşap malzeme ve kum kullanılarak tamamen masif olan bariyerlere göre daha ekonomik, hafif, estetik, sesi ve darbe enerjisini absorbe edebilen "yenilenebilir hibrit bariyerler" tasarlanmıştır. Yenilenebilir olması organik ve çevre dostu olan ahşap malzeme kullanılmasıyla, hibrit olması ise kum ile takviye edilmesiyle sağlanmaktadır. Tasarlanan edilen bariyerin diğer bariyerlere kıyasla ortaya koyduğu en önemli yenilik, çarpışma esnasında ortaya çıkan darbe kuvvetlerini absorbe etmek için çelik/beton yerine kum ile takviye edilerek kullanılması ve ahşabın sadece mukavemetinden değil binlerce yıldır kullanıldığı gibi estetik görünümünden faydalanılmasıdır. Yüksek şok absorpsiyonuna sahip olan ahşap malzeme ve kumun birlikte kullanımının hibrit bariyerin darbe absorpsiyonunu önemli ölçüde arttıracağı ve dolayısıyla çarpışma sonrası araçta meydana gelecek olan hasarı, yaralanma ve ölüm olasılığını azaltacağı düşünülmektedir. Bariyerlerde kum kullanımı, bariyerlerin yapısal özelliklerine katkı sağlamaktadır. Ayrıca kum maliyet düşürücü ve tedarik kolaylığı açısından oldukça önemli bir materyaldir.

Yenilenebilir hibrit bariyerleri diğer bariyerlerden ayıran en önemli özelliklerinden biri ahşap kullanımı ile birlikte ağaç malzemede depolanan karbonun doğaya geri dönüşümünün geciktirilmesidir. Bu şekilde küresel iklim değişiminin yavaşlatılmasına katkıda bulunulacaktır.

Tasarlanan bariyerin şekli F tipi New Jersey bariyer olarak belirlenmiştir. Bunun temel nedeni üretilecek olan hibrit bariyerin etkinliğini mevcut bir bariyer sistemi ile

karşılaştırabilmektir. Yeni üretilecek olan bariyerin verimliliği kanıtlandıktan sonra muhtelif şekillerde tasarımlar yapılabilecektir.

Yeni bir bariyer tasarımının yol kenarlarında kullanılabilmesi için dünyada var olan standartlarda belirtilen çarpışma testlerinden başarı ile geçmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında EN 1317 standardı esas olarak alınmıştır. Ülkemizde gerçek zamanlı bir çarpışma merkezi bulunmamaktadır. Yurt dışındaki test merkezlerinde ilgili çarpışma testlerinin gerçekleştirilmesinin oldukça maliyetli olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçek zamanlı çarpışma testlerinin yürütülebilmesi için gerçeğe en yakın deneysel çarpışma sistemi simüle edilerek tasarlanmış ve uzun uğraşlar sonucu kurulmuştur. Tasarımda EN 1317 standardı, TB 31 kabul şartlarında belirtilen araç ağırlığı (1500 kg) ile aynı ağırlıkta bir pandül kullanılmıştır.

Deneysel çarpışma sisteminde gerçekleştirilen testlerin ardından Ls Dyna simülasyon ortamında optimizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon testlerinde deneysel çarpışma sistemi ve yenilenebilir hibrit bariyer sisteminin modelleri doğrulanmıştır. Bu aşamanın ardından TB31 test kriterlerine uygun şekilde yenilebilir hibrit bariyer hattı oluşturulmuş ve National Crash Analysis Center (NCAC) tarafından doğrulanmış 1500 kg'lık bir araç ile çarpışma testleri yürütülmüştür.

Deneysel çarpışma testi sonuçları ile Ls Dyna simülasyon testi sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. TB31 simülasyon testi sonuçlarına göre hesaplanan ASI (çarpışma şiddeti) değerinin B sınıfında yer aldığı görülmüştür. Çalışma genişliklerinin ise W2 sınıfında yer aldığı ortaya çıkmıştır. Gerçekleştirilen tüm testlerde aracın bariyeri terk ettiği çıkış açısının bariyere çarptığı açının %60'ından daha az olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca araç çıkış kutusu içerisinde kalarak bariyer hattını güvenli bir şekilde terk etmiştir. Bariyer yüzeyinde bulunan ahşap keresteler sadece çarpma noktasında deforme olmuştur. Yerinde bakım ve onarım kolaylığı sağlaması açısından ahşap, kerestelerin hızlı bir şekilde değiştirilmesi ile bariyerlerde güvenli bir şekilde kullanılabilecektir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları, bir sonraki adımda hedeflenen, dünya genelinde akredite olmuş test merkezlerinde büyük ölçekli tam zamanlı çarpışma testlerinin gerçekleştirilmesine ve ilgili kurumların standartlaşma çalışmalarına bir altlık teşkil edecektir.

**Anahtar Sözcükler :** Bariyer, Çarpışma, Simülasyon, LS-DYNA, Ahşap, Kum
**Bilim Kodu :** 120406

## ABSTRACT

**PhD Thesis**

**RENEWABLE HYBRID BARRIER DESIGN AND DETERMINATION OF CRASH PERFORMANCE**

**Emre BİRİNCİ**

**Karabuk University**
**Institute of Graduate Programs**
**Department of Forest Industry Engineering**

**Thesis Advisor:**
**Assoc. Prof. Dr. Hüseyin YÖRÜR**
**February 2021, 165 pages**

As in the world, one of the main causes of death in our country is traffic accidents. When the statistics of traffic accidents are examined, the rate of deaths or injuries caused by the accident of the car crashing the barriers depends on some characteristics of the barriers. Barrier types used worldwide are produced from steel, concrete, wood and plastic materials. These types of barriers have several advantages and disadvantages against each other.

Aesthetic appearance features have remained in the background due to the fact that security and structural requirements are generally taken into account in barrier designs. In our country, General Directorate of Highways (KGM) gives material and application standards for only steel and concrete barriers in the Highways Technical Specification (2013). Likewise, information on the concrete and steel barrier

requirement and placement is given in the KGM Highway Design Handbook (2005), and there are no instructions regarding wooden barriers.

Three types of wooden barriers are generally used in the literature. These; First, the main body is wooden, and the posts are steel, secondly the posts are wooden but the main body is steel and thirdly, the barriers are all wooden. There is not yet an adequate wood barrier design that evaluates the impact energy, sound and light absorption ability and aesthetic effect of wooden barriers together.

In this study, "renewable hybrid barriers" that are more economical, light, aesthetic, able to absorb sound and impact energy than other barriers were designed using wood and sand. Its renewability is explained by the use of wood material, and its hybridity is explained by the reinforcement with sand. The most important innovation of the designed barrier compared to other barriers is to use it by reinforcing with sand instead of steel / concrete to absorb the impact forces arising during the crash and to benefit from the aesthetic appearance of wood. It is thought that the use of wood, which has high impact absorption, and sand will significantly increase the impact absorption of the hybrid barrier, thus reducing the possibility of damage, injury and death after crash. In addition, the use of sand in barrier production significantly reduces the cost.

With the use of wood in renewable hybrid barriers, forest products will gain new usage areas. In addition, delaying the recycling of carbon stored in forest products to nature will be ensured. In this way, it will contribute to slowing down global warming.

The shape of the designed barrier is determined as New Jersey F shape barrier. The main reason for this is to compare the effectiveness of the hybrid barrier to be produced with an existing barrier system. It was decided that it would be more appropriate to consider the shape concern after proving the efficiency of the new barrier to be produced.

In order for a new barrier design to be used on the roadside, it must successfully pass the crash tests specified in the standards existing in the world. Within the scope of this study, EN 1317 standard was taken as the basis. There is no crash centre in our country.

It is known that carrying out relevant crash tests in test centres abroad is quite costly. Within the scope of this study, an experimental crash system has been designed to conduct crash tests. In the design, a pendulum of the same weight as the vehicle weight (1500 kg) specified in the EN 1317 standard, TB 31 acceptance conditions was used.

After the tests performed in the experimental crash system, optimization tests were carried out in the Ls Dyna simulation. Experimental crash system and renewable hybrid barrier system models have been verified in optimization tests. After this stage, an edible hybrid barrier line was created in accordance with TB31 test criteria and crash tests were carried out with a 1500 kg car that was verified by NCAC.

It has been observed that the experimental crash test results and Ls Dyna simulation test results are compatible with each other. It was seen that the ASI value calculated according to the TB31 simulation test results was in B class. It has been found out that the working widths are in the W2 class. In all tests performed, it was understood that the exit angle at which the car left the barrier was less than 60% of the angle when it hit the barrier. In addition, the car left the barrier line safely, remaining in the exit box. The wooden timbers on the barrier surface are deformed only at the point of impact. In order to provide on-site maintenance and repair convenience, the barriers can be reused after the crash by quickly changing the wooden timbers.

The optimization studies carried out within the scope of this study will constitute the basis for the realization of large-scale crash tests in accredited test centres worldwide and the standardization studies of the relevant institutions.

**Key Word** **:** Barrier, Crash, Simulation, LS-DYNA, Wood, Sand
**Science Code :** 120406

# TEŞEKKÜR

"Yenilenebilir Hibrit Bariyer Tasarmı ve Çarpışma Performansının Belirlenmesi" isimli bu tez çalışmasının yürütülmesinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, kendi mesaisinden ödün vererek yardımını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışmanım Doç.Dr. Hüseyin YÖRÜR'e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışma fikrinin oluşmasından TÜBİTAK projesi haline getirilmesine, çalışmanın yürütülmesinden bilimsel makalelerin yayınlanmasına kadar titizlikle yardımcı olan ve katkı sağlayan II. danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Halil İbrahim YUMRUTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitesinde yer alan ve çalışmanın nihai hale getirilmesinde büyük katkıları bulunan Prof.Dr. Ali Osman ATAHAN ve Doç.Dr. Suat ALTUN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez savunma jürisinde yer alarak bilimsel birikimlerinden faydalandığım Prof.Dr. Şeref KURT, Doç.Dr. Alperen KAYMAKCI ve Dr.Öğr.Üyesi Şemsettin DORUK'a teşekkür ederim.

Doktora tez çalışması için atölye imkanlarından faydalandığım Doç.Dr. Önder TOR'a teşekkürlerimi sunarım. Ls Dyna simülasyon testlerinin yürütülmesinde yardımını esirgemeyen Dr.Öğr.Üyesi Sedat ÖZCANAN'a; tez çalışmasının 4'üncü bölümünün oluşturulmasındaki katkılarından ötürü Dr.Öğr.Üyesi Ahmet DUYAR'a; teknolojik imkanlarından faydalandığım Dr.Öğr.Üyesi Ramazan ERDEM'e; yardımsever ve ilgili yaklaşımları ile tez çalışmasına katkıları bulunan Dr.Öğr.Üyesi Mustafa ERER ve Arş.Gör. Ahmet AÇIL'a ve desteklerinden ötürü Araç Rafet Vergili Meslek Yüksekokulu mesai arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim. Bu tez 118M753 numaralı proje ile bu tezi destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Desteğini daima yanımda hissettiğim hayat arkadaşıma, aileme, kızıma ve oğluma…

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv
ABSTRACT ..... viii
TEŞEKKÜR ..... xi
İÇİNDEKİLER ..... xii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... xxii

BÖLÜM 1 ..... 1
GİRİŞ ..... 1

BÖLÜM 2 ..... 7
YOL KENARI BARİYERLERİ ..... 7
2.1. BARİYER TANIMI ..... 7
2.2. İDEAL BARİYER ..... 8
2.3. BARİYER TİPLERİ ..... 11
2.3.1. Çelik Bariyerler ..... 11
2.3.2. Beton Bariyerler ..... 13
2.3.3. Plastik Bariyerler ..... 14
2.3.4. Ahşap Bariyerler ..... 14

BÖLÜM 3 ..... 19
YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI ..... 19
3.1. KENT MOBİLYASI ..... 19
3.2. AHŞAP MALZEME ..... 20
3.2.1. Odun Koruma Yöntemleri ..... 23
3.2.2. YHB Üretiminde Kullanılan Ahşap Malzeme Özellikleri ..... 25
3.2.2.1. Köknar Odununun Fiziksel Özellikleri ..... 26
3.2.2.2. Köknar Odununun Mekanik Özellikleri ..... 31

3.2.3. Ahşap Birleştirme Yöntemleri ..... 35
3.2.4. YHB Üretiminde Kullanılacak Ahşap Birleştirme Yönteminin Belirlenmesi ..... 38
3.2.5. YHB Üretiminde Kullanılacak Vidaların Tipinin Seçimi ..... 42
3.3. KUMUN ENERJİ ABSORPSİYON ÖZELLİĞİ ..... 43
3.4. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI VE ÜRETİMİ ..... 46

BÖLÜM 4 ..... 63
YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERE EKOLOJİK YAKLAŞIM ..... 63
4.1. GİRİŞ ..... 63
4.2. YOL KENARI BARİYERLERİ ..... 65
4.3. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERİN KARBON EMİSYONU AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 67
4.4. ODUN KORUMA YÖNTEMLERİ VE HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA TESTİNİN ODUNDAKİ KARBON MİKTARI ÜZERİNE ETKİSİ ..... 71
4.5. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER ÜRETİMİNDE KULLANILAN ODUNUN ORMANLARDAKİ BİYOKÜTLE EŞDEĞERİ VE KARBON STOK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ ..... 75

BÖLÜM 5 ..... 79
BARİYER PERFORMANSININ BELİRLENME KRİTERLERİ ..... 79
5.1. EN 1317 STANDARDI TEST KRİTERLERİ ..... 80
5.1.1. Çalışma Genişliği (W) ..... 82
5.1.2. Çarpma Şiddeti (ASI) ..... 83
5.1.3. Teorik Başa Darbe Hızı (THIV) ..... 84

BÖLÜM 6 ..... 86
DENEYSEL ÇARPIŞMA SİSTEMİNİN TEORİSİ VE TASARIMI ..... 86
6.1. DENEYSEL ÇARPIŞMA SİSTEMİNİN TASARIMI ..... 89
6.2. DENEYSEL ÇARPIŞMA SİSTEMİNİN İNŞA EDİLMESİ ..... 92

BÖLÜM 7 .....100
DENEYSEL (PANDÜL) ÇARPIŞMA TESTLERİ.....100
7.1. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERİN ÇALIŞMA GENİŞLİĞİ SINIFLARI .....104
7.2. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERİN ASI SINIFLARI .....108
7.3. YHB'NİN MALİYET ANALİZİ.....110

BÖLÜM 8 .....112
LS DYNA SİMÜLASYON TESTLERİ.....112
8.1. OPTİMİZASYON TESTLERİ .....113
8.2. LS DYNA MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI.....114
8.2.1. Deneysel Çarpışma Sisteminin Modellenmesi .....115
8.2.2. Yenilenebilir Hibrit Bariyerlerin Modellenmesi.....117
8.2.3. TB31 Çarpışma Testlerinde Kullanılan Araç Modeli .....118
8.3. PANDÜL SİSTEMİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN SİMÜLASYON TESTLERİ.....119
8.3.1. "2 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında Pandül Çarpışma Testi.....119
8.3.2. "4 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında Pandül Çarpışma Testi.....123
8.4. EN 1317 / TB31 ŞARTLARINA GÖRE GERÇEKLEŞTİRİLEN SİMÜLASYON TESTLERİ.....126
8.4.1. "2 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında TB31 Çarpışma Testi.....126
8.4.2. "4 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında TB31 Çarpışma Testi.....131
8.4.3. B1K2, B1K4 ve Beton Bariyerlerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında Gerçekleştirilen TB31 Çarpışma Testi Sonucuna göre THIV Kıyaslaması....136

BÖLÜM 9 .....140
SONUÇLAR.....140

KAYNAKLAR.....144

EK AÇIKLAMALAR A. ..... 155
LS DYNA TANIMLAMA KARTLARI ..... 155

ÖZGEÇMİŞ ..... 165

## ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa**

Şekil 2.1. EN 1317'ye göre yol güvenlik sistemlerinin sınıflandırılması. ..... 7
Şekil 2.2. Çelik bariyerlerde ortaya çıkan güvenlik sorunlarına örnekler.....12
Şekil 2.3. Amerika ve İtalya'da kullanılan masif bariyer örnekleri. .....16
Şekil 2.4. Bariyer türlerinin şiddet endeksi ve defleksiyon karakteristikleri .....17
Şekil 3.1. Schimadzu AGIC/20/50KN Universal Test Cihazı .....32
Şekil 3.2. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü test örnekleri.....32
Şekil 3.3. Liflere paralel çekme direnci test örnekleri.....35
Şekil 3.4. Düz birleştirme (a); lambalı birleştirme (b); yabancı çıtalı kinişli birleştirme (c); kendinden çıtalı kinişli birleştirme (d); kavelalı birleştirme (e); yabancı zıvanalı en birleştirme (f); kırlangıç kuyruğu geçmeli birleştirmeler (g); özel birleştirmeler (h).....37
Şekil 3.5. Düz birleştirme (a); lambalı birleştirme (b); makine birleştirme (c); kendinden çıtalı kinişli birleştirme (d); yabancı çıtalı kinişli birleştirme (e).....39
Şekil 3.6. Test örneklerinin iki ucunun vida ile sabitlenmesi .....40
Şekil 3.7. Amsler tipi şok direnci test cihazı.....40
Şekil 3.8. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü testi. .....41
Şekil 3.9. YHB üretiminde kullanılan 3,5 x 50 mm'lik vidalar. .....43
Şekil 3.10. Kaya koruma tünelinde kum yastık kullanımı.....45
Şekil 3.11. Lambalı en birleştirme.....52
Şekil 3.12. Herhangi bir işlem uygulanmamış (a), emprenye işlemi uygulanmış (b) ve ısıl işleme maruz bırakılmış (c) keresteler. .....54
Şekil 3.13. YHB'lerin altında yer alan prefabrik beton tabla ölçüleri.....54
Şekil 3.14. Beton tablaların kalıplarının hazırlanması.....55
Şekil 3.15. Metal ızgara ve boyutları.....56
Şekil 3.16. Metal ızgaraların birbirlerine bağlanmasını sağlayan birleştirme tipi.....57
Şekil 3.17. YHB'ler içerisine yerleştirilen kum torbaları. .....58
Şekil 3.18. Köknar kerestelerin su havuzuna yerleştirilmesi. .....58
Şekil 3.19. Metal ızgaraların prefabrik beton üzerine yerleştirilmesi.....59
Şekil 3.20. YHB'nin köknar keresteler ile kapatılması. .....60
Şekil 3.21. YHB'lerin kenarlarının köknar keresteler ile kaplanması.....60
Şekil 3.22. YHB'lerin kısımları (a) ve karayolu üzerindeki görünüşü (b) .....61

Şekil 4.1. F tipi New Jersey bariyer şeklindeki yenilenebilir hibrit bariyer (a) ve ana iskelet yapısı (b).....66
Şekil 4.2. F tipi New Jersey beton bariyer. .....66
Şekil 4.3. W kirişli çelik bariyer. .....67
Şekil 4.4. YHB'lerin yaşam döngüsü süreçleri .....69
Şekil 4.5. Emprenye, ısıl işlem ve yaşlandırma işlemine tabi tutulan numune boyutları .....72
Şekil 4.6. Ağaçtan keresteye dönüşüm .....76
Şekil 5.1. Defleksiyon ve çalışma genişliği arasındaki fark. .....82
Şekil 5.2. Çarpışma sırasındaki araç içerisindeki yolcunun baş pozisyonu.....85
Şekil 6.1. Mersin İli'nden getirilen pandül sistemi.....87
Şekil 6.2. EN 1317 standardına göre kabul testlerinde ortaya çıkan çarpışma enerjileri. .....87
Şekil 6.3. TB31 nolu çarpışma testi örneği. .....88
Şekil 6.4. Arabalı vinç tipi pandül sistemi (a), ABD'deki bir pandül örneği (b). .....89
Şekil 6.5. Pandül sisteminin çalışma mantığı.....90
Şekil 6.6. Kontrol odası (a), pandül sisteminin kurulacağı zeminin hazırlanışı (b,c).93
Şekil 6.7. Pandül sisteminin ana iskeletinin zemine sabitlenebilmesi için yapılan hazırlık çalışmaları.....94
Şekil 6.8. Pandül sisteminin ana iskeleti. .....95
Şekil 6.9. Pandülü taşıyacak mil ve yatakları.....96
Şekil 6.10. Çarpışma tokmağı olarak kullanılacak olan tanka demir tozunun doldurulması. .....97
Şekil 6.11. Pandül görselleri.....97
Şekil 6.12. 2 ton kapasiteli vinç.....98
Şekil 6.13. Direkler ile güçlendirilmiş gerçek zamanlı çarpışma sistemi. .....99
Şekil 7.1. EN 1317'ye göre test esnasında kamera yerleşimi. .....101
Şekil 7.2. Pandül çarpışma testi referans ölçekleri. .....101
Şekil 7.3. Pandül sistemi kullanılarak gerçekleştirilen deneme çarpışmaları. .....102
Şekil 7.4. YHB'lerin pandül çarpışma testleri sonrası görüntüleri.....103
Şekil 7.5. Image J programı ile ölçümü yapılan test görüntüleri.....104
Şekil 7.6. Sadece kum kullanılarak üretilen bariyerin çarpışma testi. .....105
Şekil 7.7. Sadece ahşap kullanılarak üretilen bariyerin çarpışma testi. .....106
Şekil 7.8. Pandül çarpışma testleri sırasında YHB'lerin ivme-zaman grafikleri; I. grup (a), II. Grup (b), III. Grup (c) ve bağlantı noktası testi (d).....109
Şekil 8.1. "Solidworks" programı kullanılarak çizilmiş gerçek zamanlı çarpışma (pandül) sistemi. .....115

Şekil 8.2. NCAC tarafından doğrulanmış 1500 kg ağırlığındaki araç modeli .....119
Şekil 8.3. B1K2 grubu YHB'nin gerçekleştirilen simülasyon ve gerçek zamanlı test karşılaştırması. .....120
Şekil 8.4. B1K2 grubu YHB üzerinde çarpışma sonrası kırılan köknar keresteler. .121
Şekil 8.5. B1K2 grubu YHB'nin çarpışma sonrası çalışma genişliğinin ölçülmesi .121
Şekil 8.6. B1K2 grubu YHB'nin gerçek zamanlı (a) ve Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında pandül yavaşlama ivmesi / zaman grafiği. .....122
Şekil 8.7. B1K4 grubu YHB'nin gerçekleştirilen simülasyon ve gerçek zamanlı test karşılaştırması .....123
Şekil 8.8. B1K4 grubu YHB üzerinde çarpışma sonrası kırılan köknar keresteler. .124
Şekil 8.9. B1K4 grubu YHB'nin çarpışma sonrası çalışma genişliğinin ölçülmesi .125
Şekil 8.10. B1K4 grubu YHB'nin gerçek zamanlı (a) ve Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında pandül yavaşlama ivmesi / zaman grafiği. .....125
Şekil 8.11. B1K2 grubu YHB'lerin EN1317 / TB31 kabul şartlarına göre Ls Dyna simülasyon çarpışma testi.....127
Şekil 8.12. Aracın bariyer hattını terketme açısı .....128
Şekil 8.13. EN 1317 standardında belirtilen çıkış kutusu .....128
Şekil 8.14. Aracın bariyer hattını terkettiği anda oluşan çıkış kutusu .....129
Şekil 8.15. Çarpışma sonrası 2 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin deformasyon .....129
Şekil 8.16. B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sonucunda oluşan çalışma genişliği .....130
Şekil 8.17. B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında oluşan X yönündeki araç yavaşlama ivmesi / zaman grafiği. .....131
Şekil 8.18. B1K4 grubu YHB'lerin EN1317 / TB31 kabul şartlarına göre Ls Dyna simülasyon çarpışma testi.....132
Şekil 8.19. Aracın bariyer hattını terketme açısı .....133
Şekil 8.20. Aracın bariyer hattını terkettiği anda oluşan çıkış kutusu .....133
Şekil 8.21. Çarpışma sonrası 4 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin deformasyonu .....134
Şekil 8.22. B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sonucunda oluşan çalışma genişliği .....135
Şekil 8.23. B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında oluşan X yönündeki araç yavaşlama ivmesi / zaman grafiği. .....136
Şekil 8.24. B1K2, B1K4 ve beton bariyerler ile çarpışan araçların Ls Dyna simülasyon testi sonrasındaki son durumları.....138
Şekil Ek A.1. Deneysel çarpışma sisteminin "part" tanımlamaları. .....156
Şekil Ek A.2. Deneysel çarpışma sistemindeki metal konstrüksiyon kısmının et kalınlığının girilmesi. .....156

Şekil Ek A.3. Deneysel çarpışma sistemindeki metal konstrüksiyon kısmının malzeme tanımı.....157
Şekil Ek A.4. Deneysel çarpışma sistemindeki ivme ölçer kısmının malzeme tanımı .....157
Şekil Ek A.5. Deneysel çarpışma sistemindeki zincir kısımlarının malzeme tanımı .....158
Şekil Ek A.6. Deneysel çarpışma sistemi modelindeki temas tanımlamaları. .....158
Şekil Ek A.7. Deneysel çarpışma sistemindeki pandül kısmına hız tanımlanması. .159
Şekil Ek A.8. YHB'lerin "part" tanımlamaları. .....159
Şekil Ek A.9. YHB modelinde ahşap ve metal kısımlarına kalınlık verilmesi. .....160
Şekil Ek A.10. YHB modelinde metal kısımlara malzeme tanımlanması. .....160
Şekil Ek A.11. YHB modelinde beton kısımlara malzeme tanımlanması. .....161
Şekil Ek A.12. YHB modelinde kum kısmına malzeme tanımlanması. .....161
Şekil Ek A.13. YHB modelinde kullanılan vida ve tij kısımlara malzeme tanımlanması.....162
Şekil Ek A.14. YHB modelinde ahşap kısımlara malzeme tanımlanması. .....162
Şekil Ek A.15. YHB modelinde temasların tanımlanması.....163
Şekil Ek A.16. YHB'lerin alt kısmına rijit bir zemin tanımlanması.....163
Şekil Ek A.17. YHB modelinde yeniden numaralandırma işleminin yapılması. .....164

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa**

Çizelge 2.1. Bariyerleri çalışma prensibine göre karşılaştırma.....10
Çizelge 2.2. Taşıt cinslerine göre ölümlü ve yaralanmalı trafik kaza sayıları .....12
Çizelge 3.1. Bazı maddelerin ses dalga rezistansı değerleri .....22
Çizelge 3.2. Birleştirme yöntemlerinin mekanik direnç değerleri.....42
Çizelge 3.3. Bariyerlerin kriter ve gereksinimlerinin karşılaştırılması.....47
Çizelge 3.4. Bariyer özelliklerinin kıyaslanması.....49
Çizelge 3.5. Üretilmesi planlanan YHB tipleri. .....51
Çizelge 4.1. 1,25 metre uzunluğundaki YHB, beton ve çelik bariyerlerin üretimi sürecinde kullanılan malzeme miktarları .....68
Çizelge 4.2. Kullanılan malzemelerin ve işlemlerin sera gazı emisyon değerleri.....68
Çizelge 4.3. YHB, beton ve çelik bariyer üretiminde doğaya salınan toplam sera gazı emisyon değerleri.....71
Çizelge 4.4. Retensiyonun ve yaşlandırma işleminin karbon oranı üzerine etkisi.....74
Çizelge 5.1. NCHRP R350 ile EN 1317 standardına göre nitel test kriterlerinin kıyaslanması .....79
Çizelge 5.2. EN 1317 standardına göre çarpışma test kriterleri. .....80
Çizelge 5.3. EN 1317 standardına göre kabul testleri.....81
Çizelge 5.4. EN 1317'ye göre çalışma genişliği sınıfları. .....82
Çizelge 5.5. EN 1317'ye göre çarpma şiddeti düzeyleri.....83
Çizelge 7.1. YHB'lerin çalışma genişliği sınıfları.....105
Çizelge 7.2. YHB'lerin ASI değerleri.....108
Çizelge 7.3. YHB'nin maliyet analizi.....110
Çizelge 7.4. 1250 mm uzunluğundaki YHB, F tipi New Jersey beton bariyer ve çift taraflı W kirişli çelik bariyerlerin maliyet analizlerinin kıyaslanması.....111
Çizelge 8.1. Modelleme esnasında kullanılan birimler.....115
Çizelge 8.2. B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna test sonuçlarına göre araç ivme değerleri.....130
Çizelge 8.3. B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna test sonuçlarına göre araç ivme değerleri.....135
Çizelge 8.4. B1K2, B1K4 ve Beton bariyerlerin TB31 simülasyon testi sonucuna göre THIV değerleri.....136

Çizelge 8.5. B1K2, B1K4 ve Beton bariyerlerin TB31 simülasyon testi sonucuna göre araç içerisindeki yolcuya ait Tv değerleri. .....137
Çizelge 8.6. Simülasyon sonuçları özet tablosu .....139

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

| | |
|---|---|
| $CH_2O$ | : Formaldehit |
| $CO_2$ | : Karbondioksit |
| $COCH_3$ | : Asetil grubu |
| $C_5H_4O_2$ | : Furfural |
| $C_6H_6O_3$ | : Hidroksimetilfurfural |
| O=CH- | : Aldehitler |

**KISALTMALAR**

| | |
|---|---|
| AASHTO | : American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Karayolları Birliği) |
| AB | : Avrupa Birliği |
| ABD | : Amerika Birleşik Devletleri |
| ASI | : Acceleration Severity Index (Yaralanma İndeksi) |
| EN | : European Norm (Avrupa Normu) |
| ETSC | : European Transport Safety Council (Avrupa Ulaştırma Güvenlik Konseyi) |
| KGM | : Karayolları Genel Müdürlüğü |
| LULUCF | : Land Use, Land Use-Change and Forestry (Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık) |
| LSTC | : Livermore Software Technology Corporation |
| NCAC | : National Crash Analysis Center (Kaza Analiz Merkezi) |
| OECD | : Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı) |
| TÇMB | : Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği |
| TS | : Türk Standardı |
| TÜİK | : Türkiye İstatistik Kurumu |
| W | : Working Width (Çalışma Genişliği) |
| YDA | : Yaşam Döngüsü Analizi |
| YHB | : Yenilenebilir Hibrit Bariyer |

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

İnsanlar yaklaşık 4000 yıl önce bulundukları yerden hareket etmek için hayvanları kullanmışlardır. Tekerleğin icadının ardından Romalıların tekerlekli vagon buluşu ile hareketliliğin artması, berberinde ölüm ve yaralanmaları da getirmiştir. İlkel trafik yoğunluğunun oluşması nedeniyle trafik denetleme hizmetleri ilk olarak Romalılar tarafından başlatılmıştır. Ölüm ve yaralanmaların artmasını takiben Julius Sezar, gün içerisinde tekerlekli taşıtların Roma'ya girmesini yasaklamıştır. Bu olay tarihteki ilk trafik düzenlemesi olarak bilinmektedir. Yaya ile araç trafiğinin ayrılmasını ve yayalar için kaldırım yapılmasını ilk olarak 1500'lü yıllarda Leonardo da Vinci önermiştir. 1800'lü yıllarda Avrupa'da tek yönlü karayolları yapılmaya başlanmıştır. Ayrıca bazı cadde ve sokaklara park yasakları getirilmiştir. Türkiye'de ise yollar ilk olarak I. Meşrutiyet döneminde devlet ve il yolları olarak sınıflandırılmış ve planlanmalar yapılmıştır [1–3].

Dünya Sağlık Örgütü, her yıl trafik kazalarında 1,2 milyon kişinin öldüğünü ve 50 milyon kişinin de yaralandığını tahmin etmektedir. Avrupa'da 2017 yılında kişisel yaralanmaya bağlı toplam 10 milyon trafik kazasında 25,300 kişinin öldüğü kaydedilmiştir [4,5].

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de başlıca ölüm sebeplerinden biri trafik kazalarıdır. Ülkemizde karayolu üzerinde 2020 yılında toplam 325 bin 634 adet trafik kazası meydana gelmiştir. Kazaya karışan tarafların kendi aralarında kaza tespit tutanağı tazim ettikleri trafik kazaları bu sayıya TÜİK tarafından eklenmemiştir. Trafik kazalarından maddi hasarlı olanları 191 bin 827 adet, ölümlü yaralanmalı kaza olanı ise 133 bin 805 adettir. Bu kazalarda toplam 1008 kişi ölmüş ve 204 bin 587 kişi de yaralanmıştır. AB ülkelerinde 2018 yılında toplam 1 milyon 99 bin 75 adet kaza gerçekleşmiş ve bu kazalarda toplam 25 bin 651 kişi ölmüştür [6]. İspanya'da 2011 ile 2018 yılları arasında ölümcül veya ciddi trafik kazalarının sayısı önceki yıllara nazaran önemli derecede artış göstermiştir. 2011 yılında yaklaşık 83.000 ölümlü kaza

gerçekleşmişken 2015 yılında bu sayı 102.000'i aşmıştır. 2017 yılında 113.000 otomobil, 28.000 motosiklet ve 12.000 diğer araçlar kazaya karışmıştır [7].

Murray ve Lopez'in yaptığı bir çalışmada (1996), 1990'lı yıllarda dünyanın en büyük ölüm nedenleri arasında trafik kazaları 9'uncu sırada yer alırken 2020'li yıllarda 6'ncı sırada yer alacağı öngörülmektedir [9]. Indiana Üniversitesi'nin ABD'de yapmış olduğu bir araştırmaya göre tek araçların sabit bir nesneye çarpmasıyla meydana gelen ölümcül kazaların çoğunluğunun kent dışı yollarda meydana geldiği belirlenmiştir. Bu çarpışmaların %55'i sabit nesnelerden, %15'i ağaçlardan, %11'i yolun şevinden, %10'u trafik işaretleri ve direklerinden ve %9'u ise yol kenarı bariyerlerinden kaynaklanmaktadır [10].

Yoldan çıkan araçların yol kenarında bulunan nesnelerle (ağaçlar, direkler, yol işaretleri ve sokak lambaları vb.) çarpışması uluslararası çapta önemli bir karayolu güvenliği sorunudur. AB ülkelerinde gerçekleşen ölümcül trafik kazalarının %18 – 42'si bu tip çarpışmalardan kaynaklanmaktadır. Bu kazaların gerçekleşmesine neden olan en önemli etkenlerin başında yol kenarlarında bulunan nesnelerin uygunsuz yerleşimleri gelmektedir. Finlandiya'da 1991 ve 1995 yılları arasında yol kenarındaki nesnelere çarpılması sonucunda meydana gelen trafik kazaları bu ülkedeki tüm ölümcül trafik kazalarının %24'ünü oluşturmaktadır. 1995 yılında Fransa'daki yol kenarı nesneleri ile olan çarpışmalar, ölümle sonuçlanan tüm kazaların %31'idir [11,12].

KGM'nin yapmış olduğu bir araştırmaya göre Türkiye'de 2018 yılında gerçekleşen ölümlü ve yaralanmalı trafik kazalarının %37'si, yoldan çıkan ve/veya yol kenarındaki engellerle çarpışan araçlardan kaynaklanmaktadır. Yoldan çıkma ve/veya yol kenarındaki engellerle çarpışma sonucu meydana gelen kazalar sonucunda ölen ve yaralananlar tüm kazalarda ölenlerin %31'ini, tüm yaralıların %36'sını kapsamaktadır [13].

1997 yılında İsveç'te yapılan bir araştırmada her dört sürücü ve yolcudan birinin aracın yol kenarı nesnelerine çarpması suretiyle meydana gelen kazalarda öldüğü tespit edilmiştir. Çarpılan nesnelerin %50'sini ağaçlar, %20'sini bariyerler, %10'unu

aydınlatma direkleri, % 10'unu diğer direkler ve geriye kalan %10'unu ise diğer cisimler oluşturmaktadır [14]. Ölüm ile sonuçlanan kazaların %60'ı sadece bir araç ile gerçekleşmiştir. Bu kazaların %70'inde kaza yapan araç yolu terk etmiş ve yol kenarına devrilerek ya da sabit bir cisim ile çarpışarak durmuştur [15].

Yol kenarı güvenlik sistemlerinin uygun olmayan tasarımı, motosiklet kazalarının şiddetini sınırlamada önemli bir rol oynamaktadır. Yol kenarı sistemleri ile gerçekleşen çarpışmalar, motosiklet sürücüleri için diğer araçların kullanıcılarına göre çok daha şiddetlidir. Bunun nedenlerinin başında yol kenarı bariyerleri tasarlanırken motosiklet sürücülerinin ihtiyaçları genellikle göz ardı edilmesi gelmektedir [16]. Araştırmacılar, motosiklet sürücülerinin trafik kazalarında ölüm oranının araç sürücülerine nazaran 16 kat daha fazla olduğunu, yaralanma oranının ise 4 kat fazla olduğu ortaya koymuştur. Bu sebeple yol kenarı güvenlik önlemlerinin uygunluğu motosiklet kullanıcıları açısından daha çok önem arz etmektedir [17].

Türkiye'de son 10 yılda toplam 2.525.877 adet taşıt kazaya karışmıştır. Kazaya karışan taşıtların 1.309.634 adeti otomobil, 68.980 adeti otobüs, 83.859 adeti minibüs, 146.235 adeti kamyon, 404.648 adeti kamyonet, 384.791 adeti motosiklet ve 128.000 adeti ise diğer sınıfında yer almaktadır [18].

Yol kenarı güvenlik araştırmaları son 40 yılda önemli ölçüde ilerleme göstermiştir. 1960'lı yıllarda yapılan bir çalışmada, korunaksız yol kenarlarının bir sorun olduğu ve mühendislik tasarımı kullanılarak yolların güvenliğini artırmanın mümkün olduğu vurgulanmıştır [19]. Yol kenarı nesneleri ile çarpışmalarda yolcuların korunması sorunu hakkında hazırlanan bir rapor 1975'te OECD tarafından kabul edilmiştir [20]. Raporda koruma için dört ana ilke belirlenmiştir:

1. Gereksiz engellerin ortadan kaldırılması;
2. Engelleri yol kenarından uzaklaştırmak;
3. Engellerin yapısını değiştirmek;
4. Engelleri, yeni güvenlik aygıtları ile izole etmek [12].

Son yıllarda trafikte güvenlik kavramı, aktif ve pasif olarak sınıflandırılmaktadır. Aktif güvenlikte temel prensip kazanın ortaya çıkmamasını sağlamakken pasif güvenlikte ise temel prensip kaza durumunda ortaya çıkabilecek muhtemel zararların asgari düzeye indirilmesidir [21,22].

Karayollarının kenarlarında ve orta kısımlarında kullanılan ve bariyer olarak isimlendirilen pasif güvenlik yapıları, herhangi bir nedenden dolayı yoldan çıkan araçları, yol platformu içerisinde tutarak yol dışındaki tehlikelere karşı korumak için tasarlanmaktadır. Bariyerlerin en temel amacı kazayı önlemekten çok meydana gelen kazanın şiddetini azaltmak ve kaza sonucu oluşabilecek zararı en aza indirmektir [23]. Bariyerler çarpışma esnasında ortaya çıkan enerjinin bir kısmını absorbe ederek kontrolden çıkmış araçların yavaşlamasını ve yolda kalmasını sağlamaktadır [9,24,25].

Araştırmacılar bugüne kadar genellikle çarpışma esnasında ortaya çıkacak büyük boyuttaki darbe yüklerine karşı koyabilecek yeterlilikte bariyer geliştirmişlerdir. Ancak, estetik kaygılar sadece güvenlik ve yapısal gerekliliklerin dikkate alınmasından dolayı gölgede kalmıştır. Mühendisler genellikle bu yapıların peyzaj üzerindeki etkisini, özellikle tarihi, turistik ve doğal alanlardaki önemini fark etmekte zorlanmışlardır [26]. Bu nedenle hem estetik açıdan hem de güvenlik açısından ihtiyaçları karşılayacak bir bariyer tasarlanması önem arz etmektedir.

Literatürde beton, çelik, plastik ve ahşap olmak üzere çeşitli türde bariyerler kullanılmaktadır. Her bariyer türünün bir diğerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [27,28]. Genel olarak beton bariyerlerin rijit yapıda olması, çelik bariyerlerin ise keskin yüzeyler içermesi nedeniyle çarpma anında hem araç hem de yolcularda istenmeyen sonuçlar doğmasına sebep olmaktadır.

Ahşap bariyerler incelendiğinde ise literatürde genellikle üç tip ahşap bariyer üzerinde durulduğu görülmektedir. Bunlar; İlk olarak ana gövdesi ahşap olup dikmeleri çelik olan, ikinci olarak dikmeler ahşap ancak ana gövde çelik olan ve üçüncü olarak tamamen ahşap olan bariyerlerdir. Bunlara ilave olarak ahşap bariyerlerin çelik veya birtakım güçlendiriciler ile birlikte kullanıldığı da görülmektedir.

Bu tezde ahşap malzeme ve kum kullanılarak, diğer bariyer tiplerine göre daha ekonomik, estetik, darbe enerjisini ve trafik gürültüsünü absorbe edebilen yeni bir bariyer türü olarak "yenilenebilir hibrit bariyerler" (YHB) tasarlanmıştır. Yenilenebilir olması ahşap malzeme kullanılmasıyla, hibrit olması ise kum ile takviye edilmesiyle açıklanabilir. Tasarlanan YHB'nin diğer bariyer türlerine kıyasla ortaya koyduğu en önemli yenilik, çarpışma esnasında ortaya çıkan darbe kuvvetlerini absorbe etmek için ahşabın kum ile takviye edilerek kullanılması ve estetik görünümünden faydalanılmasıdır. Yüksek şok absorpsiyonuna sahip olan ahşap malzeme ve kum kullanımının YHB'lerin darbe absorpsiyonunu önemli ölçüde arttıracağı ve dolayısıyla çarpışma sonrası araçta meydana gelecek olan hasarı, yaralanma ve ölüm olasılığını azaltacağı düşünülmektedir. Buna ek olarak, bariyer üretiminde kum kullanımı maliyeti önemli ölçüde düşürecektir.

YHB'lerin üst kısmında çeşitli her dem yeşil bitki türlerinin yetiştirilebilmesi için bitkisel toprak ile doldurulmuş bir kısım yer alacaktır. Bitkiler görselliğe ilave olarak karşı yönden gelen araçların farlarından çıkan ışık etkisini engellemeye yardımcı olacaktır. Tüm bu şartlarda üretilecek olan YHB'ler kent mobilyası sınıfında yer alacak olup aynı zamanda tarihi/turistik bölgelerde ve doğa yollarında doku ile uyum sağlayarak bir katma değer oluşturacaktır. Diğer yandan orman ürünlerine yeni kullanım alanı kazandırarak orman ürünlerinde depolanan karbonun doğaya geri dönüşümünün geciktirilmesi hedeflenmektedir. Bu şekilde küresel iklim değişiminin azaltılmasına katkıda bulunulacaktır.

YHB tasarımı ile, bariyerlere çarpma neticesinde ortaya çıkan ve istatistiklerle ortaya konulan ölüm ve yaralanmaların azaltılacağı düşünülmektedir. Tasarlanan YHB'lerin şekli F tipi New Jersey bariyer olarak belirlenmiştir. Bunun temel nedeni üretilecek olan YHB'lerin etkinliğini mevcut bir bariyer sistemi ile mukayese edebilmek, daha önce var olan ve test edilen bariyerlerin referans modeli olarak kullanılabilmesini sağlamaktır. Şekil kaygısı ve buna bağlı olarak estetik görünüm yeni üretilecek olan YHB'lerin verimliliği kanıtladıktan sonra dikkate alınması gerekmektedir.

Yeni tasarımın EN 1317 standartlarına göre bir dizi testten geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada öncelikle üretilecek YHB'leri standart kriterleri karşılaması için

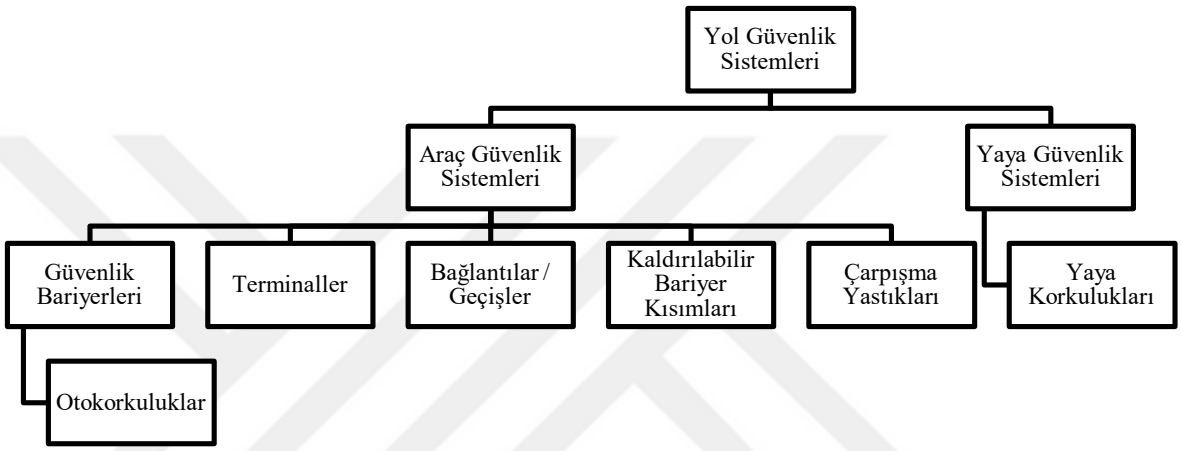
LS-DYNA simülasyon ortamında çarpışma testleri gerçekleştirilecektir. Ülkemizde büyük ölçekli tam zamanlı çarpışma testi gerçekleştirilebilecek bir merkez bulunmadığından dolayı farklı çalışmalarda yapılan muadil testlere benzer gerçek çarpışma testleri uygulanacaktır. Bu testlerdeki performans özellikleri belirlenecektir.

Ülkemizde sadece çelik ve beton bariyerler için standart niteliğinde talimat bulunmaktadır. Bu çalışma ahşap ve ahşap esaslı bariyerler için yeni bir standart niteliği taşıyacaktır. KGM'nin 2013 yılında yayınladığı "Karayolları Teknik Şartnamesi" kitabında belirtildiği üzere bir bariyer sisteminin karayollarında kullanılabilmesi için TS EN 1317 standardı kapsamında çarpışma testi sertifikası, çarpışma testleri sonuç raporları ve montaj el kitabı bulunması zorunludur [29]. Bu nedenle tasarlanan YHB'lerin karayollarında kullanılabilir duruma gelmesi için standartlarda belirtilen gerekli şartlar asgari düzeyde yerine getirilecektir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilecek optimizasyon çalışmaları bir sonraki adımda hedeflenen büyük ölçekli tam zamanlı çarpışma testlerine ve standartlaşma çalışmalarına bir altlık teşkil edecektir.

# BÖLÜM 2

# YOL KENARI BARİYERLERİ

Yol güvenlik sistemleri araç, yol ve yolcuların güvenliğinin sağlanabilmesi için kullanılan sistemler olarak tanımlanabilir. EN 1317'ye göre yol güvenlik sistemleri Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılmıştır.




Şekil 2.1. EN 1317'ye göre yol güvenlik sistemlerinin sınıflandırılması.

## 2.1. BARİYER TANIMI

Araçların yol kenarı nesneleriyle çarpışması ve/veya yoldan çıkması ile meydana gelen kazaların önlenmesi için en ideal çözümün tüm araçların kaza sonrası karayolu platformu üzerinde kalmalarını sağlamak olduğu bilinmektedir. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde araçların herhangi bir sebepten dolayı yoldan çıkmaları durumunda daha ileri boyutta sonuçlar doğuracak kazaların meydana gelmesi kaçınılmaz olacaktır. Önemli olan bu kazalarda meydana gelecek kayıpları mühendislik yöntemleri kullanarak asgari düzeye indirmektir [30]. Son yıllarda trafikte güvenlik kavramı, aktif ve pasif olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif güvenlik, yol güvenlik tedbirleri ve araçları olarak ele alınırken aktif güvenlik ise sürüş dinamik güvenliği, sürüş davranışı, algılama/görüş, ergonomi ve sürüş şartları (klima, konfor vb.) olarak ele alınmaktadır. Aktif güvenlikte temel prensip kazanın ortaya

çıkmamasını sağlamakken, pasif güvenlikte temel prensip kaza durumunda ortaya çıkabilecek muhtemel zararların asgari düzeye indirilmesidir [10].

Karayollarının kenarlarında ve orta kısımlarında kullanılan ve bariyer olarak isimlendirilen pasif güvenlik yapıları, herhangi bir nedenden dolayı yoldan çıkan araçları, yol platformu içerisinde tutarak yol dışındaki tehlikelere karşı korumak için tasarlanmaktadır. Bariyerlerin en temel amacı kazayı önlemekten çok meydana gelen kazanın şiddetini azaltmak ve kaza sonucu oluşabilecek zararı en aza indirmektir [23,31]. Bariyerler çarpışma esnasında ortaya çıkan enerjinin bir kısmını absorbe ederek kontrolden çıkmış araçların yavaşlamasını ve yolda kalmasını da sağlamaktadır [9,24,25,30]. Ayrıca psikolojik bir etki olarak sürücülerin dikkatini daha çok yola vermelerini sağlamalarına yardımcı olmakta ve kaza olasılıklarını azaltmaktadır. Bariyerler aynı zamanda yol kenarı nesneleri (ağaçlar, direkler, kaya yüzeyleri, dik şevler vb.) ile oluşacak muhtemel çarpışmalarda ortaya çıkacak yaralanmaların şiddetini önemli ölçüde azaltmaktadır [9].

## 2.2. İDEAL BARİYER

İdeal bir bariyer, çarpışma esnasında yol, yolcu ve diğer araçların güvenliği için çarpan aracı dar bir açıyla yeniden yola doğru yönlendirmelidir. Böylece çarpan araç bariyer hattını takip ederek devrilme, takla atma gibi olumsuz sonuçlar doğurabilecek durumlardan korunmaktadır. Ayrıca araç içindeki yolcuların yaralanma ve ölüm riskini de azaltmaktadır [32]. Bariyerlerin çarpışma esnasında kırılması ve aracın içine nüfuz etmesi sürücü ve/veya yolcuların ölümüne/yaralanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle bariyerlerin çarpışma esnasında kırılarak araç içerisine geçmeyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir [33]. Bariyerlerin çok rijit ve/veya hafif olmaları çarpışma anında oluşan darbe enerjisinin absorbe edilmesini engeller. Bu durum kazada araç içerisinde olan yolcuların zarar görmesini önlemekten ziyade yaralanmalarına veya ölümlerine neden olabilir [34,35].

Bariyerlerin yoldan ne derece uzak olacağı ve yol kenarı nesneleri ile bariyer arasında bırakılacak mesafe, bariyer tipine göre değişmektedir. Bu tamamen bariyerin defleksiyon karakterine bağlı olarak değişir. Rijit bariyerlerde defleksiyon yok

denecek kadar azdır. Ancak yarı rijit ve esnek bariyerlerde defleksiyon miktarı değişiklik göstermektedir. Daha önce yapılan araştırmalardaki kaza verilerine dayanarak, bariyer kazalarının %50-60'ında yaralanma ya da ölüm meydana gelmektedir [36]. Bu açıdan bakıldığında, bariyerler yol kenarlarına uygun bir şekilde yerleştirilmezlerse ve enerji absorbe etme kabiliyetleri dikkate alınmazsa tehlikeli olabilirler [37]. Hollanda'da yapılan bir araştırmaya göre, otoyollarda meydana gelen ölümcül kazaların yaklaşık % 20'sini bariyerler ile çarpışan araçlar oluşturmaktadır [38].

Herhangi bir aracın bariyerlere çarpması sırasında çarpılan bariyerin deformasyonu ve/veya ötelenmesi söz konusudur**.** Yanal deformasyon (defleksiyon) ne kadar az olursa araç içindeki yolculara gelen darbe enerjisi o kadar yüksek olur. Defleksiyonun gereğinden fazla olması ise aracın yol platformu içerisinde kalmasını riske atar, stabilitesini ve hareket doğrultusunu olumsuz olarak etkiler. Tüm bu nedenlerden dolayı bariyerlerde gerçekleşecek olan deformasyonların mümkün olduğu kadar ideal şekilde optimize edilmesi önemlidir [39]. Otomobil üreticileri, bariyer tasarımcıları/üreticileri ve yol otoriteleri için temel sorun, bir aracın bariyer sistemine çarptığında hava yastığının gereksiz yere açılması ve/veya aracın devrilmesidir. Bu noktada bariyerlerin yapısı (esnekliği / rijitliği) ve çarpışma esnasında ortaya çıkan enerjiyi absorbe etmeleri önemli rol oynamaktadır. İdeal bir esneklikte ve enerji absorbe etme düzeyinde bariyer tasarlanması sorunun çözümüne yardımcı olacaktır [32].

Mevcut bariyer sistemleri; binek araçlar, minibüs, otobüs, kamyon, kamyonet gibi araç gruplarını dikkate alarak uygulanmaktadır. Ülkemizde trafikte çıkan her 100 aracın 15'i motosiklet kullanıcısı olmasına rağmen bariyer tasarımında dikkate alınmamaktadır. Bu bariyerler olası bir kaza halinde, motosiklet kullanıcılarını koruyamadığı gibi, daha fazla tehlike arz etmektedir [17]. Bariyer deformasyonu çarpışma hızı ve açısı, aracın tipi ve ağırlığına bağlıdır [23]. Bariyerlere çarpma suretiyle meydana gelen kazalarda motorlu araç kullanan sürücülerin yaralanması, diğer çarpışma türlerine göre daha sıktır. Durma mesafesinin olmaması ya da kısa olması, kazazedelerin aldığı devasa yavaşlama kuvveti, araç içerisine yabancı nesnelerin girmesi (özellikle ağaçlar, direkler ve kopan bariyer parçaları gibi)

yaralanma ve/veya ölüm ihtimalini artırmaktadır. Meydana gelen hasarın şiddeti aracın hızı ve çarpılan sabit nesnenin şekli, ebadı ve sertliğinden etkilenir [12]. Bu nedenle üretilen YHB'ler ideal rijitlikte olacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Dolayısıyla çarpışmadan doğan enerjiyi gerekli ölçüde absorbe edebilecek ve yeterli defleksiyona sahip olabilecektir. Bariyerlerin çalışma prensiplerine göre avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1'de görülebilmektedir.

Çizelge 2.1. Bariyerleri çalışma prensibine göre karşılaştırma [40].

| Tip | Avantajlar | Dezavantajlar |
|---|---|---|
| **Enerji Absorbe Eden Bariyerler** | · Çarpışmadan sonra yol üzerinde çok az veya hiç atık oluşmaz.<br>· Çarpışma sonrasında bakım kolaylığı olması.<br>· Bazı sistemler, çarpışmadan sonra kısmi zayıflatma kapasitesini korur.<br>· Darbeyi absorbe ederek cebe girme tehlikesine karşı koruması<br>· Çok dar tehlikeli yerlere uyarlanabilir. | · Kurulum maliyetleri yüksektir.<br>· Önemli saha hazırlığı (ör. Tampon, yedekleme yapısı, montaj cıvataları veya çapalar) gerektirmektedir.<br>· Yapısal genleşme derzlerini kaplamak için uygun değildir.<br>. Planlarda özel ayrıntılar gereklidir. |
| **Momentum Aktaran Bariyerler (Kum Modülleri)** | . Nispeten düşük kurulum maliyeti vardır.<br>. Kurulumu kolaydır.<br>. Çok yönlü geniş alanları kaplamak için kullanılabilir. | . Bir birim çarpışmadan sonra hatırı sayılır döküntü oluşabilmektedir.<br>. Genel olarak önemli bir çarpışmadan sonra atık zayıflatma kapasitesi yoktur.<br>. Darbe enerjisini absorbe etme ve defleksiyon özellikleri çok azdır ya da hiç yoktur.<br>. Bakım için önemli envanter ve alan gereklidir. |
| **Momentum Aktaran Bariyerler (Su ile dolu)** | . Nispeten düşük kurulum maliyeti vardır.<br>. Kurulumu kolaydır.<br>. Kurulum yeri hazırlığı çok azdır ya da hiç yoktur.<br>. Döşeme tabanına ankraj gerektirmez.<br>. Dar ve tehlikeli yerlere uyarlanabilirler.<br>. Çarpışma sonrasında su tankı hızla geri yüklenebilir. | . Çarpışma sonrasında su zemine hızla yayılır.<br>. Soğuk hava şartları için çevre dostu antifiriz katkısı gerektirir.<br>. Farklı sistemlere geçse de sadece beton bariyerlere bağlanabilir.<br>. Genel olarak önemli bir çarpışmadan sonra atık zayıflatma kapasitesi yoktur.<br>. Defleksiyon yapmadığından ihtiyaç duyulan noktanın ötesine yerleştirilmelidir. |

Günümüzde "Enerji sönümleyici" bariyer olarak sınıflandırılan bariyer tipleri gelişmiş ülkelerde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu bariyerler trafik kazalarında meydana gelen can ve mal kaybını önemli ölçüde azaltmaktadırlar. Enerji sönümleyici bariyerlerin yeni tasarımları, farklı mühendislik uygulamaları ve modernizasyonu, çarpışma esnasından oluşan enerjinin absorbe edilebilme kapasitesini artırarak meydana gelecek kazalarda hem araç hem de yolcu açısından oluşacak zararları en aza indirecektir.

## 2.3. BARİYER TİPLERİ

Bariyerler çarpma anındaki defleksiyon karakteristiğine bağlı olarak esnek, yarı rijit ve rijit sistemler olarak sınıflandırılmaktadır [10,41]. Günümüzde birçok değişik bariyer tipi bulunmaktadır. Bariyerler kullanım yerlerine göre beton, çelik, plastik veya ahşap malzemeden yapılmış olabilir. Bu çalışmada yenilenebilir hibrit adı verilen yeni bir bariyer sisteminin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Gerek yurtdışında gerekse ülkemizde yaygın olarak kullanılan bariyer tipleri çelik yapı elemanlarından imal edilen bariyer tipleridir.

### 2.3.1. Çelik Bariyerler

Çelik bariyerler, düşük maliyetli olması, yüksek enerji absorbe etme kapasitesine sahip olması, nakliye ve kurulum kolaylığının olması, diğer bariyer tiplerine göre hafif ve esnek olması nedeniyle tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır [27,28,42]. Çelik bariyerler diğer bariyer türlerine göre daha ekonomiktir. Fakat çelik bariyerlerin en ufak kazalarda bile deforme olması, bakım gerektirmesi başlıca dezavantajıdır. Çoğu çelik bariyerlerin alt kısmında kalan boşluklar özellikle motosiklet kazalarında motosikletin bu kısma sıkışmasından dolayı ölümcül sonuçlar doğurmaktadır [38,43].

Çelik bariyerler ayrıca rutin bakıma ihtiyaç duyduklarından dolayı yerinde bakım maliyeti yüksektir. Kurulumları, bakım ve onarım işleri için mesleki işçilik gerektirmeleri bir diğer dezavantaj olarak belirtilebilir. Çeliğin yapısı nedeniyle çelik bariyerlerin ses titreşimlerini yeterince absorbe edememesi otoyollardaki gürültüyü önlemesi bakımından yetersiz kaldığını göstermektedir. Karşı yönden gelen araçların far ışığını engellemede yetersiz kalması sebebiyle sürüş güvenliğini azaltıcı rol oynamaktadır. Ayrıca özellikle başlangıç ve bitiş noktaları karayolu güvenliği açısından tehlike arz etmektedir. Başka bir yere taşınamazlar. Küçük bir çarpışmada bile önemli derecede deforme olmaktadırlar [28].

Çelik bariyerler motosikletler için büyük risk taşımaktadır. W-kirişli çelik bariyerlerle ilgili kazalarda, motosikletler bariyerlere dar bir açı yaparak çarpma eğilimi gösterirler. Bariyerlere çarptıklarında direklerin tabanlarına çarpıp dururlar ve çarpma

kuvvetiyle birlikte bariyerin alt kısmına sıkışırlar. Şekil 2.2'de çelik bariyerlerde görülebilen güvenlik sorunlarına örnekler verilmiştir. Bunun yanında oluklu metal kirişin kenarları aşırı kesici olduğundan dolayı yaralanmalara ve ölüm riskine neden olabilmektedir [44].



Şekil 2.2. Çelik bariyerlerde ortaya çıkan güvenlik sorunlarına örnekler.

Çizelge 2.2'de verilen 2018 tarihli KGM Trafik Kazaları Özetlerine göre ölümlü ve yaralanmalı toplam kaza sayısının %14'ü motosiklet kazası olmasına rağmen, ölümlerin %26,8'i bu kazalarda meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, motosiklet kazalarının şiddet derecesinin yüksekliğinin ve bu problemin uygun bir mühendislik yaklaşımı ile çözülmesi gerektiğinin bir göstergesidir [45].

Çizelge 2.2. Taşıt cinslerine göre ölümlü ve yaralanmalı trafik kaza sayıları [6].

| Taşıt Cinsi | Trafiğe Kayıtlı Taşıt Sayısı | Ölümlü/Yaralanmalı Kazaya Karışan Taşıt Sayısı | | Ölen Sürücü Sayısı | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Toplam | % | Toplam | % |
| **Toplam** | 22.865.921 | 300.704 | 100 | 2.865 | 8,6 |
| **Otomobil** | 12.398.190 | 159.832 | 53,2 | 1.107 | 38,6 |
| **Minibüs** | 487.527 | 4.399 | 3,1 | 31 | 1,1 |
| **Otobüs** | 218.523 | 6.597 | 2,2 | 19 | 0,7 |
| **Kamyonet** | 3.755.580 | 46.105 | 15,3 | 306 | 10,7 |
| **Kamyon** | 845.462 | 7,292 | 2,4 | 93 | 3,2 |
| **Çekici** | 218.523 | 6.820 | 2,3 | 77 | 2,7 |
| **Motosiklet** | 3.211.328 | 42.533 | 14,1 | 767 | 26,8 |
| **Traktör** | 1.885.952 | 3.174 | 1,1 | 222 | 7,7 |
| **Diğer** | 63.359 | 19.155 | 6,1 | 243 | 8,6 |

### 2.3.2. Beton Bariyerler

Beton bariyerler ilk kez 1940'larda ABD'de kullanılmıştır. Bu bariyerin üretilmesindeki esas amaç, yoldan çıkan araçların sayısını en aza indirgemek ve bakımı daha maliyetli olan bariyerlerin yerini almaktır. Rijit bariyer sınıfına giren beton bariyerler farklı şekillerde üretilebilmektedir [32,46]. En sık kullanılan beton bariyer tipi olan F tipi New Jersey bariyerler, dar bir açı ile vurulduğunda araç hasarını en aza indirmek üzere tasarlanmıştır. Bu bariyerler ilk olarak 1955 yılında New Jersey'de kurulmuştur [19]. F tipi New Jersey bariyerlerin yatay yapısı (alt kısmındaki eğim açısı daha fazladır) araç lastiklerinin üzerine binmesi durumunda kaza yapmaması ve yeniden yönlendirilmesi içindir. F tipi New Jersey bariyerler eğim açılarına, boyut farklıklarına ve kullanım yerlerine göre değişik sınıflara ayrılmaktadır. Beton bariyerler içerisinde en çok kullanılan tür F tipi beton bariyerlerdir [32].

Beton bariyerler rijit olmaları sebebiyle ağır darbelerde araç içindeki yolcular için tehlikeli olduğu kanıtlanmıştır. Bir aracın beton bariyere yüksek bir açıyla çarpması durumunda beton bariyerin yüksek sürtünmeli sert yüzeyi ve oluşan darbe kuvveti genellikle araçların ve içinde bulunan insanların zarar görmesine neden olmaktadır [37]. Çelik ve beton bariyerler ile ilgili yapılan araştırmalar çarpışma esnasında araç içindeki yolcuların yaralanma riskinin çelik bariyerlere kıyasla betonda daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca çelik bariyerlerin keskin kenarları, beton bariyerlerin rijit olan sürekli yüzeyleri özellikle motosiklet kazalarında yaralanma – ölüm riskini artırmaktadır [32,46]. Çelik bariyerlere kıyasla üretim maliyetleri yüksektir. Ancak servis ömrü ve yerinde bakım ve kaza sonrası onarım maliyetleri hesaba katıldığında uzun vadede maliyetinin daha az olduğu söylenebilir. Özellikle İngiltere ve Danimarka'da sistematik olarak uygulanan bu bariyerlerin faydalarının maliyetlerinden daha çok olduğu ifade edilmektedir [12].

Beton bariyerler darbe esnasında çok az plastik deformasyon gösterir, bu da güvenlik bariyerleri için istenmeyen bir özelliktir [47]. Beton bariyerlerin taşınabilir olması ve istenilen her yere kolaylıkla yerleştirilmesi, diğer bariyerlere kıyasla en uzun hizmet ömrüne (40-50 yıl) sahip olması, sık bakıma ihtiyaç duymaması, kaza sonrasında yerinde bakım maliyetinin düşük olması avantajları arasında yer alır.

Almanya'da DEKRA adındaki bir güvenlik test merkezi 57 adet gerçek zamanlı kaza analizi gerçekleştirmiştir. Bu kazalarda %51'inde motosikletler yol yüzeyine dik şekilde seyrederken %45'inde kayarak bariyerlere çarptığı görülmüştür. Yapılan araştırmaya göre motosikletlerin çelik veya beton bariyerlere dik açıyla çarpması sonucunda yaralanma riskinin düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Motosikletlerin kayarak bariyerlere çarpması sonucunda ise özellikle sürücülerin baş bölgesinden ağır şekilde yaralandığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak motosikletlerin bariyerlere kayarak çarpması sonucunda ölüm ve yaralanma riskinin çok yüksek olduğu anlaşılmıştır.

### 2.3.3. Plastik Bariyerler

Esnek bariyerler sınıfında yer alan plastik bariyerler; ilk olarak karayolu işlerinde çalışan işçilerin korunması için üretilmiştir. İçi su dolu plastik bariyerler ilk kez 1990'lı yılların başında Avustralya'da kullanılmaya başlanmıştır. Şekilleri genellikle F şeklindeki New Jersey tipi beton bariyerlere dayanmaktadır. Hafif olması, kolay montajı, taşınabilirliği ve oldukça düşük olan maliyeti bu bariyerin en önemli avantajlarındandır. Ayrıca fiziksel yer değiştirmesini ve suyun çalkantılı etkisini kullanarak yoldan çıkan araçların çarpma sonrası davranışını emniyetli bir şekilde kontrol etmede yararlıdır. Genellikle yüksek yoğunluklu polietilenden yapılan plastik bariyerlerin görünüşü, çarpışma sırasında aracın yeniden yönlendirilmesindeki başarısızlığı ve çarpışma sırasında oluşan darbe enerjisini yeterince absorbe edememesi başlıca dezavantajlarıdır [34]. Grzebieta vd. [32], yapmış olduğu çalışmada içi su dolu F tipi New Jersey bariyer şeklindeki plastik bariyerler yapılan çarpışma testleri sonucunda yeterli başarı gösterememiştir. Test esnasında araç ya bariyerleri aşarak takla atmış ya da bariyeri parçalayıp yoldan çıkmıştır.

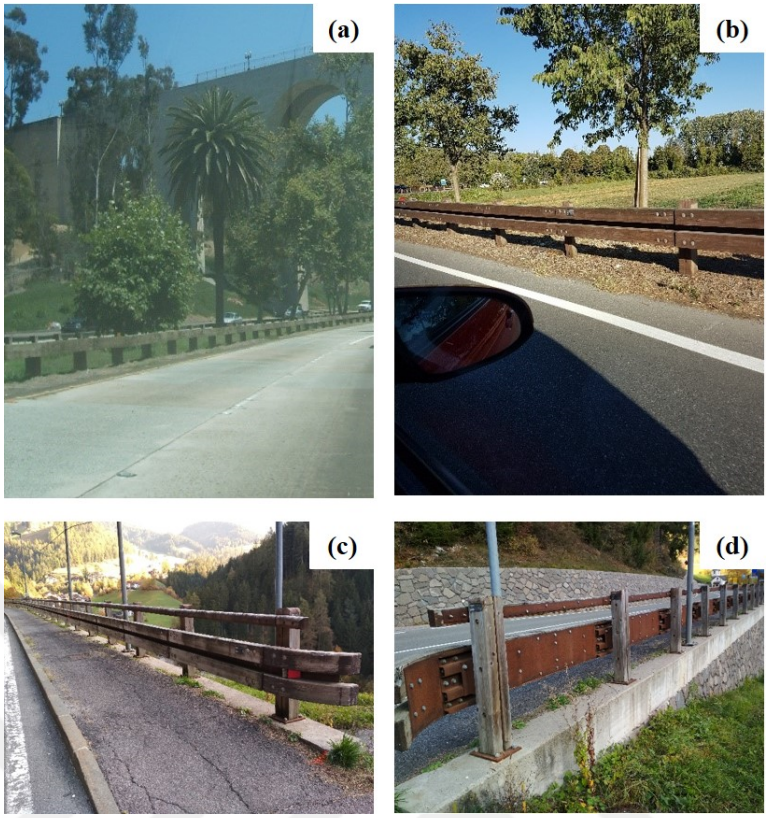
### 2.3.4. Ahşap Bariyerler

Ahşap ilk çağlardan beri kullanılan bir yapı malzemesidir. Son yıllarda, çelik ve beton gibi diğer yapı malzemeleri ahşabın kullanım dışı kalmasını sağlamıştır. Ancak uzun bir süre sonra ahşap bu alanda yeniden ön plana çıkmaktadır. Yalıtım, hafiflik, esneklik, estetik ve birçok özelliğinden, doğal bir malzeme olan ahşabın dünyadaki

önemi giderek artmakta olup, sürdürülebilir inşaatta önemli bir yeri olacaktır [23]. Japonya'da son yıllarda inşaat mühendisliği için ahşap kullanımı teşvik edilmektedir. Odaklanılan temel konuların başında ahşap bariyer gelmektedir [48,49].

Literatürde genellikle üç tip ahşap bariyer kullanılmaktadır. Bunlar; İlk olarak ana gövdesi ahşap olup dikmeleri çelik olan, ikinci olarak dikmeler ahşap ancak ana gövde çelik olan ve üçüncü olarak tamamen ahşap olan bariyerlerdir. Ahşap bariyerlerin darbe enerjisini, ses ve ışığı absorbe etme yeteneğini ve estetik etkisini bir arada değerlendiren yeterli bir ahşap bariyer tasarımı henüz bulunmamaktadır [37]. Zhang vd. [52], çalışmasında beton ve yuvarlak tomruk ile yeni bir yol güvenlik bariyeri tasarlanmış ve çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir. Ahşabın kullanılmasının temel nedeni darbeyi absorbe edebilme kabiliyetinin bulunmasıdır. Yeni bariyer sistemi aracın çarpma etkisine dayanıklı, darbe enerjisini absorbe eden ve aracı yeniden yönlendirmek için yeterli yapısal kapasiteye sahip olan sonuçlar vererek bu testlerden başarı ile geçmiştir.

Bazı ülkelerde bariyerler estetik görünüşleri dolayısıyla ahşaptan üretilmektedir. Ahşap bariyerler; estetik açıdan hoş bir alternatif olarak kabul edilir. Genellikle ulusal parklarda doğal görünüm sağlamak için kullanılmaktadır. ABD'de doğa yollarında iğne yapraklı ağaçlardan oluşan "Merritt Parkway" ismi verilen ahşap bariyerler kullanılmaktadır [26]. Ahşap bariyerler genellikle büyük boyutlu biçilmiş kereste kullanılarak üretilmeleri nedeniyle ekonomik değildir. Kurulum için büyük işçilik gerektirir [27,51]. Bariyer uygulamalarında özellikle sahil yol kenarlarında çelik bariyerlere göre korozyona karşı direnç özelliğinin daha iyi olmasından dolayı ahşap malzeme tercih edilmiştir. Şekil 2.3'te ahşap bariyer kullanılan farklı ülkelerin karayollarından örnekler verilmiştir.

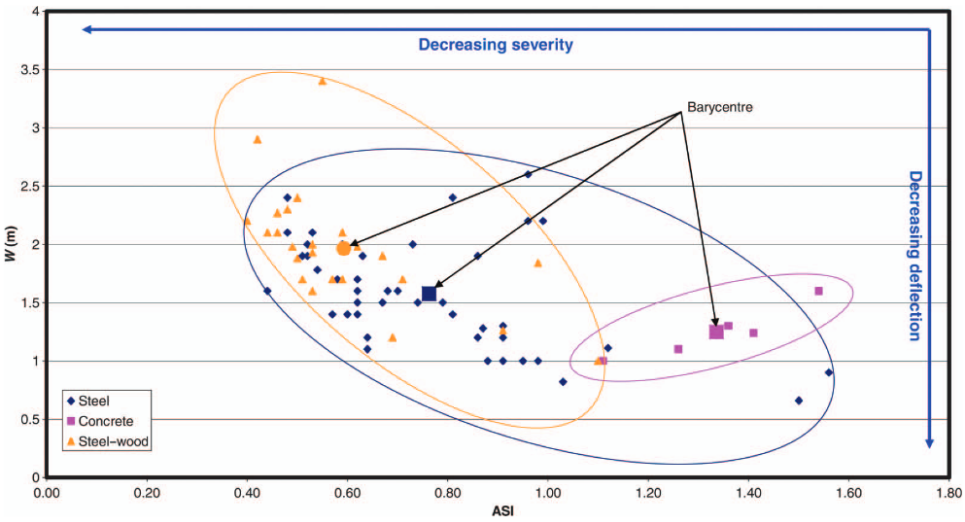



Şekil 2.3. Amerika ve İtalya'da kullanılan masif bariyer örnekleri.

Almanya Ulaştırma, Bayındırlık ve Su işleri Bakanlığı talebi ile Alman Kereste Merkezi ve Delft Üniversitesi tarafından tamamen ahşap kullanılarak yeni bir bariyer üretilmiştir. Toprak içine 1 metre gömülmüş ahşap dikmeler üzerine metal bağlantı elemanları kullanılarak buharla bükülmüş ahşap parçalar sabitlenmiştir. Buharla bükülen bu parçaların kullanılmasının temel amacı darbe esnasında oluşan enerjinin bir kısmını absorbe etmektir. Tasarlanan bariyer EN 1317'deki şartlara göre gerçek zamanlı ve LS-Dyna simülasyon çarpışma testleri başarı ile sonuçlanmıştır [51].

Federal Alanlar Karayolu Ofisi tarafından ABD'de doğal alanlarda estetik görünüşlü çelik destekli ahşap bariyer geliştirilmiştir. Fransız özel bir firma ise ahşabın darbe yüklerini absorbe etme ve yüksek çekme direnci gösterme özelliklerine dayanarak çelik kanal ve keresteden bariyer sistemi geliştirmiştir. Yapılan testler geliştirilen ahşap bariyerlerin aracın çarpma etkisine karşı dayanıklı, çarpışma sırasında ortaya çıkan darbe enerjisini absorbe edebilen ve aracı yeniden yola yönlendirebilen yapısal kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir [52]. Genel olarak ahşap bariyerlerin estetik bir değeri olduğu kabul edilir. Bu nedenle çoğunlukla şehir içi yollarda, dağlık

arazilerde, doğa yollarında, turistik bölgelerde ve peyzaj amacıyla uygun yerlerde tercih edilirler. EN 1317 / N2 test seviyesinde kullanılan araçlara odaklanıldığında, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi çeşitli bariyer türleri arasındaki farkların önemli olduğu görülmektedir [45].




Şekil 2.4. Bariyer türlerinin şiddet endeksi ve defleksiyon karakteristikleri [45].

Beton bariyerler bir yandan yüksek değerli şiddet endeksiyle diğer yandan düşük defleksiyon ile karakterize edilir. Çelik ürünler ile ahşap-çelik ürünleri arasındaki farklılıklar azdır ancak pek istenmeyen bir durum olarak çalışma genişliği daha büyüktür. Ahşap gibi ürünler genellikle daha düşük şiddet endeksine sahiptir [46]. Şekil 2.4'te verilen istatistik sonuçlarına göre tamamen çelik bariyer türlerinde defleksiyon miktarı ve şiddet endeksi orta seviyelerde, beton bariyerlerde defleksiyon miktarı çok az olmasına rağmen şiddet endeksi çok yüksek olmakta, çelik-ahşap karışımı bariyerlerde ise defleksiyon miktarı biraz artış göstermekle birlikte istenen bir durum olarak şiddet endeksi en düşük değere sahip türdür [45]. Bu durum pasif güvenlik tertibatlarından olan bariyerlerde ahşap kullanımının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Dünyanın gelişmiş ülkelerinde kullanımı giderek yaygınlaşan "enerji sönümleyici" bariyerlerin, trafik kazalarında meydana gelen can ve mal kayıplarını azaltıcı etkileri yapılan araştırmalar doğrultusunda kanıtlanmıştır. Karayollarında hâlihazırda kullanılan bariyerlerin, gelişmiş ülkelerde tercih edilen ve uygulanan yeni tasarımlar

ışığında modernizasyonunun sağlanması ve böylece bariyerlerin dahil olduğu trafik kazalarında, araçların, hızlarına paralel olarak artan kinetik enerjilerinin, geliştirilmiş "enerji-sönümleyici" tasarıma sahip bariyerler tarafından absorpsiyonu ve bu suretle de kazaların hem yolcu hem de araç açısından mümkün olan en az zayiatla sonuçlanması mümkün olacaktır [53].

# BÖLÜM 3

# YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI

Pasif güvenlik elemanları olarak sınıflandırılan yol kenarı bariyerlerinin belirli şartları karşılaması istenmektedir. Beton bariyerlerin rijit yapıda olması, çarpışma esnasında ortaya çıkan enerjiyi absorbe etme kabiliyetinin olmaması en büyük dezavantajlarındandır. Diğer yandan çarpışma esnasında defleksiyon karakteristiği oldukça düşüktür. Çelik bariyerler sürekli bir yüzeye sahip değildirler. En büyük dezavantajı çarpışma esnasında koparak araç içerisine girmesidir. Motosiklet kazalarındaki başlıca dezavantajı ise sürücünün bariyerlerin alt kısmındaki boşluklara sıkışması ve bariyerin keskin kenarları sayesinde uzuvlarının kopmasına sebep olmasıdır. Mevcut bariyer tiplerinin üretiminde doğaya salınan sera gazı miktarı oldukça fazladır. Tüm bu dezavantajların ortadan kaldırılabilmesi ve / veya minimum seviyeye indirilebilmesi için yeni bir bariyer tasarlanması kaçınılmaz hale gelmiştir. Ayrıca tüm bariyer türlerinde araç/yolcu güvenliği öncelikli parametre olarak dikkate alındığı için estetik kaygılar ihmal edilmiştir.

## 3.1. KENT MOBİLYASI

Kent mobilyaları, kente ait tüm açık alanlarda, kentsel mekânlarda yetkili kurumlarca yerleştirilmiş, kamunun sorumluluğunda olan, kullanımı herkese açık ve kullanıcının güvenlik, eğlenme, bilgi edinme, dinlenme, konfor gibi ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde tasarlanıp konumlandırılmış ve çevrenin sağlıklı gelişmesine katkıda bulunan sistemlerdir. Kent mobilyaları ilk olarak ortaya çıktıklarında ihtiyaç dahilinde tek tek üretilmekteydiler. Zamanla kent mobilyalarına olan ihtiyacın artması seri üretime geçme zorunluluğunu getirmiştir. Günümüzde kent mobilyalarının üretimi endüstrileşmiş, tasarımı ve yer seçimi ile ilgili hususların belirlenmesi zamanla önem kazanmıştır [54].

Kent mobilyaları insanların ihtiyaçları ve kültürlerindeki farklılıklara göre; sağlıklı, estetik değerlere sahip, sanatsal öğelerin ağırlıkta olduğu kentler oluştururlar [55,56].

Toplumsal alanlarda insanların hayatını kolaylaştıran, güvenlik sağlayan ve toplumsal yaşama büyük ölçüde katkıda bulunan tüm nesneler kent mobilyası olarak tanımlanırlar. Günümüzde en sık karşılaşılan kent mobilyalarına telefon kulübeleri, yer döşemeleri, otobüs durakları, gölgelikler, trafik lambaları, bordürler, sokak lambaları, parkmetreler, oyun düzenekleri, çeşmeler, posta kutuları, oturma grupları, çöp kutuları, büfeler, reklam – ilan panoları, anıtlar, yangın muslukları ve umumi tuvaletler örnek olarak verilebilir.

Kent mobilyalarının tasarımında çevresel faktörler de dikkate alınmalıdır. Kent mobilyaları dış etkenlere karşı dayanıklı olmalı ve bu faktörlerden etkilenmeyecek ya da çok az etkilenebilecek malzemelerden üretilmeli ve konumlandırılmalıdırlar. Teknolojinin gelişmesi ile büyüyen otomotiv sektörü ve nüfus artışı ile çoğalan sürücü sayısı göz önünde bulundurulduğunda yol güvenliğinin artırılması için yeni tasarım sistemlerine ve yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerde yüksek performans, kullanım ömrünün uzun olması, kolay montaj, düşük maliyet ve yerinde bakım kolaylığı gibi bazı kriterler aranmaktadır. Kent mobilyalarının tasarımında belirli bir modifikasyon sonucunda oluşacak görüntü, bir yandan bulunduğu çevre ile entegre olabilmeli diğer yandan da günümüz yaşantısına uyum sağlayarak zaman mekân ilişkisi bağlamında görsel açıdan anlam kazandırmalıdır. Bu nedenle kent mobilyalarının tasarımları bulundukları kent ya da kent parçası ile bağ kurmalıdır [56].

Üretilecek bariyerlerin tarihi ve turistik bölgelerde aynı zamanda şehirlerde kent mobilyası olarak kullanılmasının birçok önemli avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle tarihi dokuya uygun doğal ve estetik görünümü nedeniyle YHB'ler tercih edilmesi beklenmektedir.

### 3.2. AHŞAP MALZEME

Teknolojinin gelişmesi ile yaşam alanlarında kullanılan malzeme türleri de değişmiştir. Ancak çok sayıda yeni malzemenin ortaya çıkmasına rağmen ahşap malzeme sahip olduğu eşsiz özellikleri nedeni ile tercih edilmeye ve kullanımı teşvik edilmeye devam etmektedir. Hafifliğine oranla direncinin yüksek olması, kolay işlenebilmesi, iyi boya ve cila kabul etmesi, ısı ve ses yalıtımının iyi olması, estetik

görünüşünün sıcak ve hoş bir hava oluşturması, doğaya geri dönüşümünün hızlı olması, yenilenebilir bir malzeme olması, karbon hapsedebilen bir malzeme olması gibi birçok avantajları nedeni ile tercih edilmeye devam edecektir.

Ağaç haricindeki bitkilerin bağladıkları karbon insanlar ya da hayvanlar tarafından tüketilerek veya çürüyerek çok kısa bir sürede (3 – 9 ay) doğaya geri dönmektedir. Bu biyokütleler kuru ot biçiminde saklansalar dahi mera bitkileri tarafından bağlanan karbon en fazla 1 yıl içerisinde karbondioksit olarak atmosfere geri dönmektedir. Ahşap malzemeye bağlanan karbon, odunun kullanım yeri ve üretim süresine bağlı olarak ancak 3 – 4 yüzyılda $CO_2$ şeklinde doğaya geri dönebilmektedir. ABD'de yapılan bir çalışmaya göre orman ürünleri içinde stoklanan karbonun her yıl %2 oranında azaldığı tahmin edilmektedir. Bu durum küresel iklim değişiminin engellenmesi açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Dünyada karbon dengesine katkıların artırılması yaklaşımlarından birisi ormanlardan sağlanan biyokütlenin kullanım yerinin artırılmasıdır. Bu nedenle $CO_2$ emisyonlarının azaltılabilmesi için orman ürünlerinin talebinin artırılması gerekmektedir [57].

Orman ürünleri endüstrisi sürekli olarak gelişmektedir. Günümüzde odun ve atıklarından karbonu uzun zaman depolayacak yeni mühendislik ürünleri geliştirilmektedir. Üretiminde en az enerji harcanan yapı malzemesi ahşaptır. Ahşap üretimi için 5 kWh/ML enerji gerekirken beton için 45 kWh/ML ve çelik için 550 kWh/ML enerji gerekmektedir. Ahşap malzemenin beton, alüminyum ve çelik yerine kullanılması bu malzemelerin üretiminde kullanılan fosil yakıtların tüketimini de azaltacaktır. Ahşap malzemenin bu malzemeler yerine ikame edilmesi karbonun doğrudan ahşap malzemeye depolanmasından daha etkili olabilir [57]. Literatürdeki çalışmaların tamamı ahşap malzemenin sera gazı emisyonunu düşürücü etkisinden dolayı diğer malzemelerin yerini alması gerektiğini belirtmektedir [49]. Ahşap, karbon deposu bir malzeme olduğundan dolayı küresel iklim değişimini hafifletebilir. Ahşap malzeme çelik ve alüminyum gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında üretim maliyeti, enerji tüketimi ve sera gazı üretimi açısından diğerlerine kıyasla çok daha üstündür [58]. Ağaç malzemenin en önemli özelliklerinin başında özgül ağırlığının düşük olmasına karşın yüksek dirence sahip olması gelmektedir. Bu özelliği dolayısıyla ağaç malzeme yer üstü ve yer altı yapılarda yaygın olarak

kullanılabilmektedir [59]. Ağaç malzeme binalarda ses izolasyonu ve akustik sağlamak amacıyla kullanılabilmektedir. Ağaç malzeme, uzun süreli düşük sıcaklıklara maruz kaldığında kohezyon gücünü korumakta ve beton gibi zarar görmemektedir [60].

Kurşun hariç diğer metallerin ses hızları ile ahşap malzemede liflere paralel yöndeki ses hızı eşit sayılabilir. Günümüzde kullanılan metallerin yoğunlukları odundan yaklaşık olarak 10 – 20 kat daha fazladır. Bu sebepten dolayı ses dalga rezistansı odun ve metaller için farklıdır. Ses dalga rezistansı, bir madde içinde ses dalgalarının yayılmasına karşı gösterilen dirençtir. Bazı maddelerin ses dalga rezistansları Çizelge 3.1'de verilmiştir [59].

Çizelge 3.1. Bazı maddelerin ses dalga rezistansı değerleri (dyne saniye / cm)

| Madde Cinsi | Ses Dalga Rezistansı |
|---|---|
| **Çelik** | 394 x $10^4$ |
| **Dökme demir** | 258 x $10^4$ |
| **Bronz** | 168 x $10^4$ |
| **Beton** | 84,8 x $10^4$ |
| **Teak** | 37,5 x $10^4$ |
| **Kayın** | 30 x $10^4$ |
| **Köknar** | 22 x $10^4$ |
| **Su** | 14 x $10^4$ |
| **Lastik** | 1 x $10^4$ |
| **Hava** | 0,004 x $20^4$ |

Çizelge 3.1'deki ses dalga rezistansları incelendiğinde YHB'lerin özellikle şehir içinde trafik sebebiyle ortaya çıkan gürültü kirliliğinin azaltılmasına diğer bariyer türlerine nazaran daha ileri düzeyde faydalı olacağı öngörülebilir.

Ahşap malzemenin özellikle metallere kıyasla ses iletim hızı ile birlikte şok direnci bağlamında da üstün özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Şok direnci saniyenin binde biri gibi çok küçük bir zaman dilimi içinde meydana gelen bir direnç çeşididir. Yüksek şok direnci esnekliği, düşük şok direnci ise gevrekliği temsil etmektedir. Katı bir maddenin şok direnci onun doğrudan doğruya enerjiyi absorbe etme yeteneğine bağlıdır. Bundan dolayı ani yüklemelere karşı direnç gösteren materyal, şok direnci

açısından gevrek olan materyale göre daha üstündür. Ağaç malzeme iyi bir enerji emicidir. Ahşap yapıların dinamik yükler altında kaldığında gösterdiği dinamik eğilme direnci (şok direnci), statik yüklere karşı koymasından iki kat daha fazladır. Bu durum benzer koşullar altında kullanılan çelik ve betondan farklıdır. Ağaç malzeme çelikten en az 9 kat daha iyi enerji absorbe eden bir malzeme olduğundan depreme ya da ani yüklere karşı tasarlanmış yapılarda önemli bir mukavemet ve ekonomik avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla ağaç malzemenin çeliğin aksine mükemmel titreşim absorbe etme özelliğine sahip olması, dinamik yüklere konu olan deprem bölgelerindeki yapılarda, köprülerde ve diğer yapılarda kullanılmasını ön plana çıkarmaktadır [61].

Ağaç malzemenin su miktarı belirli sınırlar arasında direnç özellikleri, elastikiyet modülü, sertlik üzerine etkili olmaktadır. Ağaç malzeme bulunduğu ortamın bağıl nemine göre uyum sağlamaktadır. Bu nedenle değişken rutubet dereceleri ve dolayısı ile değişken mukavemet değeri göstermektedir. Üretilmesi planlanan YHB'ler zaman içinde dış hava koşullarında %8 ile %120 arasındaki rutubet derecelerine sahip olacaktır. Bu nedenle YHB performansının farklı rutubet derecelerinde test edilmesi planlanmaktadır.

Açık havada ahşap malzeme daima kuru kalmayacaktır. Rutubet miktarı yükseldikçe mantar ve böcek gibi biyolojik zararlılar için hedef haline gelecektir. Ayrıca lif doygunluğu noktası (LDN) altındaki rutubet alışverişlerinde boyutlarında değişim meydana gelecektir. Bu nedenle ahşap malzemenin emprenye, modifikasyon, üst yüzey işlemleri ve benzeri gibi çeşitli yöntemlerle korunarak ve boyutsal stabilitesinin artırılarak kullanılması gerekmektedir.

### 3.2.1. Odun Koruma Yöntemleri

Biyolojik bir malzeme olan ahşap malzeme, açık hava şartlarında çeşitli etkilere maruz kaldığında yapısında bozunmalar meydana gelebilmektedir. Açık hava etkileri altında kalan ahşap, güneşin UV ışınları, rüzgâr, yağmur, kar, don, havanın bağıl nemi, soğuk ve sıcak hava gibi atmosfer şartları altında zamanla degredasyona uğramaktadır. Ahşap malzemenin kullanım yerlerinde istenmeyen özelliklerini bertaraf edebilmek

için literatürde birçok odun koruma yöntemi bulunmaktadır. Odunun masif bütünlüğünü bozmadan kullanım yerlerinde istenmeyen özelliklerini iyileştirici odun koruma yöntemlerinin en yaygın kullanılanları kurutma, emprenye ve ısıl işlemdir.

Ağaç malzemenin kurutularak kullanılmasının önemi binlerce yıl önce anlaşılmıştır. Açık hava şartlarında en ilkel yöntem ile kurutma (doğal kurutma) işlemi gerçekleştirilmekteydi. 1920'li yıllarda ilk defa kurutma işlemi işlem için birtakım esaslar ortaya koyulmuştur. İyi bir kurutma işleminde kurutulacak malzemenin kalitesinin korunması, kurutma süresinin mümkün olduğu kadar kısa olması ve kurutma giderlerinin en düşük düzeyde tutulması gerektiği belirtilmiştir. Kurutma işlemi ile ağaç malzemeye birçok iyi özellik kazandırılmaktadır. Ağaç malzemenin rutubet derecesinin LDN altındaki rutubet derecelerine indirilmesi biyolojik zararlıların oduna arızını güçleştirmektedir. Kullanım yerinde çatlama, çarpılma, dönme vb. kusurların görülme olasılığı düşer. Kurutulmuş ağaç kurutulmamış olana göre daha iyi işlenebilir. Planya freze, lamba-zıvana açma, delik açma, zımparalama vb. gibi işlemlerde daha düzgün yüzey elde edilir. Ayrıca tutkallama ve yapışma kabiliyeti artış gösterir. Çivi ve vida tutma kabiliyetini artırır [62].

Ağaç malzeme bitkisel ve hayvansal zararlılara ve yanmaya karşı dayanıklı değildir. Bu faktörlerden dolayı ağaç malzemenin kullanım ömrü kısalmaktadır. Ağaç malzemeden rasyonel bir şekilde faydalanabilmek için modern koruma yöntemlerinin kullanılması kaçınılmazdır. Bu yöntemlerden sıklıkla kullanılan emprenye işlemi yüzyıllardır farklı metotlarla ahşap malzemeye uygulanmaktadır. Emprenye, çeşitli metotlar kullanılarak ağaç malzeme içerisine farklı birçok kimyasalın emdirilmesi suretiyle ağaç malzemenin yanmaya, bitkisel ve hayvansal zararlılara karşı direncini artırarak kullanım ömrünü uzatan bir yöntemdir. Emprenye işlemi ile ağaç malzeme mantar ve böceklere karşı direnç kazanmakta, yangın risklerini azaltmaktadır. Böylece ülke genelinde ağaç malzeme üretim ve tüketim arasındaki ilişkiyi ayarlamakta ve yıllık tüketim miktarını azaltmaktadır. Bu nedenle ekonomik olarak oldukça önemlidir [63].

Isıl işlem temel olarak ağaç malzemenin 150 – 240 °C arasındaki bir sıcaklığa belirli sürelerde maruz bırakılması işlemidir. Isıl işlem ağaç malzemenin fiziksel ve kimyasal

yapısında önemli değişikliklere neden olmaktadır [64]. Isıl işlem ile odunda ilk olarak higroskopik özellikteki hemiselülozlar degredasyona uğramaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak ısıl işleme tabi tutulmuş odunun mekanik özelliklerinde kayıplar meydana gelmekte ancak özellikle mantarlar için uygun besin ortamının kısmen ortadan kalkması ile odun biyolojik dayanıklılık kazanmaktadır. Hemizelülozların depolimerizasyonu ile hücre duvarındaki erişilebilir hidroksil gruplarının sayısında önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir. Bu durum odunun higroskopik özelliğini azaltmakta ve oduna boyutsal stabilite kazandırmaktadır [65]. Isıl işlem sonrası odun daha gevrek bir yapı almakta ve şok direncinde düşüş yaşanmaktadır.

### 3.2.2. YHB Üretiminde Kullanılan Ahşap Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamında Kastamonu İl'inden temin edilen köknar türü (*Abies nordmanniana* subsp. Equi-trojani) kullanılmıştır. Köknar odununun makroskobik özellikleri incelendiğinde diri odununa nazaran daha koyu renkte bir öz odunu bulundurmaz ancak bazen merkeze doğru biraz kül rengimsi kırmızımtırak bir renk öz odunu görülebilmektedir. Odununun esas rengi sarımsı beyaz veya kırmızı beyaz olup yaz odunu tabakası ilkbahar odunu tabakasına göre daha koyu renkte ve kırmızımsı veya morumsu kahverengi şeritler halindedir. Yaz odununun iç tarafa yani ilk bahar odununa bakan sınırı oldukça keskindir. Yıllık halka sınırları bariz olup tam bir daire yuvarlaklığındadır. Odunu genellikle ladin odununa benzemektedir. Reçine kanallarının olmayışı, yapısının daha kaba oluşu ve aynı zamanda renginin donuk ve daha ziyade kırmızımsı olması ile ladin odunundan ayırt edilebilmektedir. Ladin odununun rengi sarımsı beyaz olup genel olarak daha açıktır. Köknar odunu donuk, hafif, yumuşak olup kolay ve düzgün satıhlar halinde yarılır. Öz ışınları çıplak gözler görülemez. Kabuğu köşeli, uzunluğuna yarıkları ve pulları olup beyazımsı kül rengindedir [66].

Köknar odununun kullanılış yerleri ladin ile benzerlik göstermektedir. Bunlar bina yapı dülgerliği ve marangozluğu (yağlı boya ile örtülecek kapı, pencere çerçeveleri ve duvar kaplamaları; kül rengi bir renk alması, siyah budaklı, halka çatlaklı ve pürüzlü satıhlı olmasından dolayı ladin kadar makbul olmayan zemin döşeme tahtaları), su ve toprak inşaatı (su içinde dayanıklı), mobilyacılık (özellikle kaplama altlığı),

pedavracılık, müzik aletleri üretimi (ladin kadar tercih edilmemektedir), ladinden sonra ikinci derecede kağıt ve selüloz odunu, ambalaj sandıkları ve ambalaj talaşı olarak sıralanabilir [67].

### 3.2.2.1. Köknar Odununun Fiziksel Özellikleri

Çalışma kapsamında köknar odununun hava kurusu ve tam kuru yoğunlukları belirlenmiştir. Ayrıca hacim-ağırlık değeri, lif doygunluğu noktası, daralma-genişleme yüzdeleri ve köknar odununun içerisine alabileceği maksimum su miktarı belirlenmiştir. Hazırlanan tüm numuneler %65 bağıl nem ve 20±2°C sıcaklıkta 2 hafta süre ile Kastamonu Üniversitesi, Orman Fakültesi iklimlendirme kabininde bekletilmiştir.

Hava kurusu yoğunluk ($D_{12}$) değerinin belirlenmesinde TS 2471 standardında belirtilen esaslar uygulanmıştır. Bu kapsamda 10 adet 20x20x25 mm (RxTxB) boyutlarında köknar numuneleri hazırlanmıştır. Daha önceden %65 bağıl nem ve 20±2°C sıcaklıkta bekletilerek %12 rutubet derecesine getirilen köknar numunelerin radyal, teğet ve boyuna yöndeki uzunlukları 0,001 mm hassasiyetteki Mitutoyo C/N293 marka bir mikrometre kullanılarak belirlenmiştir. Ağırlıkları ise 0,001 gr hassasiyetteki Schimadzu TW-423L marka bir terazi kullanılarak ölçülmüştür. Bu veriler ışığında köknar odununun hava kurusu yoğunluğu ($D_{12}$) Eşitlik 3.1'deki formüle göre hesaplanmıştır.

$$D_{12} = \frac{W_{12}}{V_{12}}\ gr/cm^3 \qquad (3.1)$$

Burada;

$D_{12}$ : %12 rutubetteki yoğunluğu (g/cm$^3$)

$W_{12}$ : %12 rutubetteki ağırlığı (g)

$V_{12}$ : %12 rutubetteki hacmi (cm$^3$) ifade eder.

Eşitlik 3.1'deki denkleme göre köknar odununun hava kurusu yoğunluğu 0,57 gr/cm$^3$ olarak hesaplanmıştır.

Hava kurusu yoğunluğun belirlenebilmesi için kullanılan 10 adet örnek öncelikli olarak 50 °C, daha sonra 80 °C ve 103± 2 °C sıcaklıklara getirilen Nüve KD200 marka bir fırında ağırlıkları değişmez ağırlığa getirilene kadar kurutulmuştur. Kurutma dolabından çıkarılan örnekler desikatörde bekletilerek soğutulmuş ve daha sonra ağırlıkları ve üç yöndeki boyutları ölçülmüştür. Köknar odununu tam kuru yoğunluğu ($D_0$) Eşitlik 3.2'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_0 = \frac{W_0}{V_0}\ gr/cm^3 \tag{3.2}$$

Burada;

$D_0$ : Tam kuru rutubetteki yoğunluğu (g/cm$^3$)

$W_0$ : Tam kuru rutubetteki ağırlığı (g)

$V_0$ : Tam kuru rutubetteki hacmi (cm$^3$) ifade eder.

Eşitlik 3.2'deki denkleme göre köknar odununun tam kuru yoğunluğu 0,52 gr/cm$^3$ olarak hesaplanmıştır.

Dikili halde veya taze haldeki 1 cm$^3$ odunda kaç gr tam kuru odun maddesi bulunduğu hacim-ağırlık değeri (R) kullanılarak belirlenebilmektedir. Hacim-ağırlık değeri TS 2472 standardı kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda 20x20x25 mm (RxTxB) ebatlarında 10 adet kusursuz numune hazırlanmıştır. Bu örnekler saf su içerisinde ağrılıları değişmez hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Tam yaş hale gelen numunelerin üç yöndeki boyutları ve ağırlıkları belirlenmiştir. Köknar odununun hacim-ağırlık (R) değeri Eşitlik 3.3'teki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$R = \frac{W_0}{V_t}\ gr/cm^3 \tag{3.3}$$

Burada;

$R$ : Hacim ağırlık değerini (g/cm$^3$)

$W_0$ : Tam kuru rutubetteki ağırlığı (g)

$V_t$ : Tam yaş haldeki hacmi (cm$^3$) ifade eder.

Eşitlik 3.3'teki denkleme göre köknar odununun hacim ağırlık değeri 0,47 gr/cm$^3$ olarak hesaplanmıştır.

Lif doygunluğu noktası (LDN), hücre çeperinin tamamen su ile dolduğu, hücre boşluklarında ise hiç suyun bulunmadığı andaki rutubet derecesini ifade eder [68]. Lif doygunluğu rutubet derecesi Eşitlik 3.4'teki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$LDN = \frac{\beta_v}{R} \tag{3.4}$$

Burada;

$LDN$ : Lif doygunluğu rutubetini (%)

$\beta_v$ : Hacmen daralma yüzdesini (%)

$R$ : Hacim ağırlık değerini (g/cm$^3$) ifade eder.

Eşitlik 3.4'teki denkleme göre köknar odununun lif doygunluğu rutubeti %20.734 olarak hesaplanmıştır.

Ağaç malzemenin boyutsal stabilitesinin artırılabilmesi ve mantarlara karşı dayanıklılığının iyileştirilebilmesi için gerçekleştirilen emprenye işlemlerinde, ağaç malzemenin içerisine alacağı maksimum su miktarının bilinmesi önemlidir. Emprenye çözeltisinin hazırlanması aşamasında, odunun içerisine alabileceği en yüksek su miktarına göre çözelti miktarı ayarlanabilmektedir [69,70].

Köknar odununun içerisine alabileceği en yüksek su miktarı, Eşitlik 3.5'teki denklemden faydalanarak hesaplanmaktadır. Hesaplamalar sırasında tam kuru hücre çeperi yoğunluğu 1,50 gr/cm³ olarak kabul edilmiştir.

$$r_{max} = LDN + \frac{D'_0 - D_0}{D'_0 \, x \, D_0} \; x100 \tag{3.5}$$

Burada;

$r_{max}$ : Odunun içerisine alabileceği en yüksek su miktarını (%)

$LDN$ : Lif doygunluğu rutubetini (%)

$D'_0$ : Hücre çeperinin tam kuru yoğunluğunu (g/cm³)

$D_0$ : Tam kuru yoğunluğu (g/cm$^3$) ifade eder.

Eşitlik 3.5'teki denkleme göre köknar odununun içerisine alabileceği en yüksek su miktarı %146,375 olarak hesaplanmıştır.

Radyal, teğet ve boyuna yöndeki daralma TS 4083 standardına, genişleme TS 4084 standardına, hacmen daralma yüzdesi TS 4085 standardına ve hacmen genişleme yüzdesi TS 4086 standardına göre belirlenmiştir. Köknar odununun radyal, teğet ve boyuna yöndeki daralma ve genişleme yüzdelerinin hesaplanabilmesi için 20x20x25 mm (RxTxB) boyutlarında numuneler hazırlanmıştır.

Saf su içerisinde ağırlığı değişmez hale gelene kadar bekletilen köknar numunelerin üç yöndeki boyutsal ölçümleri mikrometre yardımı ile yapılmış ve ardından 103±2 ºC'deki kurutma fırınına alınmıştır. Kurutma fırınında tam kuru hale gelinceye kadar bekletilen köknar numuneler bir desikatörde soğutuluncaya kadar bekletilmiştir. Bu aşamanın ardından tekrar mikrometre ile üç yöndeki boyutları ölçülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak Eşitlik 3.6'daki formüle göre radyal, teğet ve boyuna yöndeki daralma yüzdeleri hesaplanmıştır. Hacmen daralma yüzdesi Eşitlik 3.7'deki formüle belirlenmiştir.

$$\beta = \frac{l_r - l_0}{l_r} \, x \, 100 \tag{3.6}$$

Burada;

$\beta$ : Daralma yüzdesini (%)

$l_r$ : Tam yaş haldeki numune boyutunu (mm)

$l_0$ : Tam kuru haldeki numune boyutunu (mm) ifade eder.

$$\beta_v = \beta_r + \beta_t + \beta_b \tag{3.7}$$

Burada;

$\beta_v$ : Hacmen daralma yüzdesini (%)

$\beta_r$ : Radyal yöndeki daralma yüzdesini (%)

$\beta_t$ : Teğet yöndeki daralma yüzdesini (%)

$\beta_b$ : Boyuna yöndeki daralma yüzdesini (%) ifade eder.

Eşitlik 3.6'daki denkleme göre köknar odununun hacmen daralma yüzdesi %9.745 olarak hesaplanmıştır. Radyal, teğet ve boyuna yönde daralma yüzdeleri sırasıyla %3.413, %5.760 ve %0.572 olarak belirlenmiştir.

103±2 ºC'deki fırında tam kuru hale getirilmiş olan köknar numunelerin üç yöndeki boyutları ölçülmüştür. Daha sonra numuneler saf su içerisinde ağırlıkları değişmez hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Tamamen suya doygun hale gelen numunelerin üç yöndeki boyutları mikrometre ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Eşitlik 3.8'deki formüle göre köknar numunelerin radyal, teğet ve boyuna yöndeki genişleme yüzdeleri hesaplanmıştır. Hacmen genişleme yüzdesi Eşitlik 3.9'daki formüle belirlenmiştir.

$$\alpha = \frac{l_r - l_0}{l_0} \, x \, 100 \tag{3.8}$$

Burada;

$\alpha$ : Genişleme yüzdesini (%)

$l_r$ : Tam yaş haldeki numune boyutunu (mm)

$l_0$ : Tam kuru haldeki numune boyutunu (mm) ifade eder.

$$\alpha_v = \alpha_r + \alpha_t + \alpha_b \tag{3.9}$$

Burada;

$\alpha_v$ : Hacmen genişleme yüzdesini (%)

$\alpha_r$ : Radyal yöndeki genişleme yüzdesini (%)

$\alpha_t$ : Teğet yöndeki genişleme yüzdesini (%)

$\alpha_b$ : Boyuna yöndeki genişleme yüzdesini (%) ifade eder.

Eşitlik 3.9'daki denkleme göre köknar odununun hacmen genişleme yüzdesi %10.221 olarak hesaplanmıştır. Radyal, teğet ve boyuna yönde genişleme yüzdeleri sırasıyla %3.534, %6.112 ve %0.575 olarak belirlenmiştir.

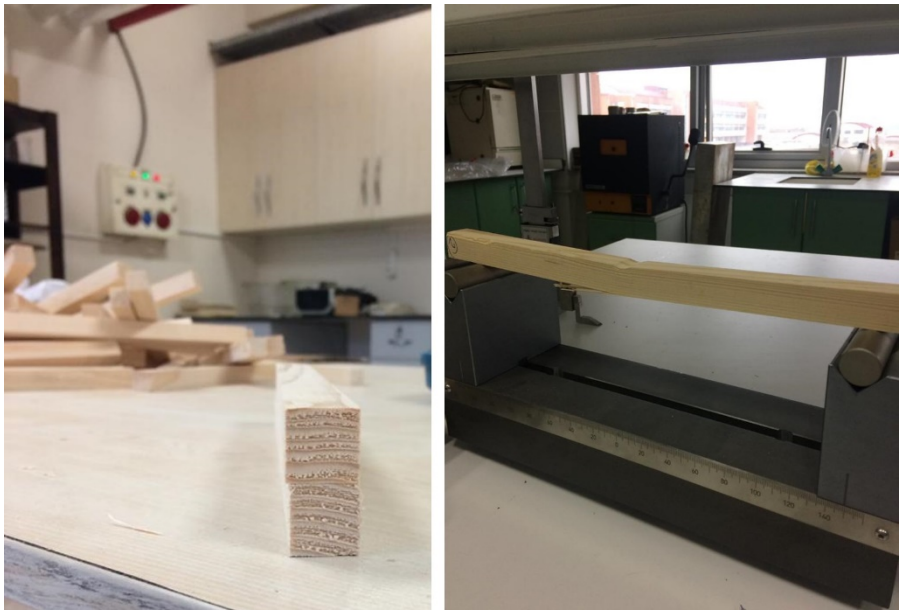
#### 3.2.2.2. Köknar Odununun Mekanik Özellikleri

Çalışma kapsamında köknar odununun eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, liflere paralel çekme direnci ve liflere paralel basınç direnci belirlenmiştir. Hazırlanan tüm numuneler %65 bağıl nem ve 20±2°C sıcaklıkta 2 hafta süre ile Kastamonu Üniversitesi, Orman Fakültesi iklimlendirme kabininde bekletilmiştir. Mekanik testlerin tamamı Schimadzu AGIC/20/50KN marka üniversal test makinesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).




Şekil 3.1. Schimadzu AGIC/20/50KN Universal Test Cihazı

Eğilme direnci (TS 2474) ve eğilmede elastikiyet modülü (TS 2478) testlerinin gerçekleştirilebilmesi için 20x20x360 mm boyutlarına numuneler hazırlanmıştır. Numune hazırlama esnasında yıllık halkaların kesit yüzeyine dik olmasına, numuneler üzerine herhangi bir kusur bulunmamasına özen gösterilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü test örnekleri

Universal test makinesinde mesnetler arası açık 300 mm olarak ayarlanmıştır. Eğilme direnci Eşitlik 3.10'daki ve eğilmede elastikiyet modülü Eşitlik 3.11'deki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{bw} = \frac{3\ x\ P_{max}\ x\ l}{2\ x\ b\ x\ h^2}\ N/mm^2 \qquad (3.10)$$

Burada;

$\sigma_{bw}$ : Eğilme direncini (N/mm$^2$)

$P_{max}$ : Kırılma anında uygulanan maksimum yükü (N)

$l$ : Mesnetler arası açıklığını (mm)

$b$ : Deney numunesinin yıllık halkalara dik yöndeki genişliğini (mm)

$h$ : Deney numunesinin yıllık halkalara teğet yöndeki genişliğini (mm) ifade eder.

$$E_w = \frac{P\ x\ l^3}{4\ x\ b\ x\ h^3\ x\ f}\ N/mm^2 \qquad (3.11)$$

Burada;

$E_w$ : Eğilmede elastikiyet modülünü (N/mm$^2$)

$P$ : Elastik deformasyon bölgesinde yüklemenin alt ve üst limitlerinin aritmetik ortalamaları arasındaki farka eşit kuvveti (N)

$l$ : Mesnetler arası açıklığını (mm)

$b$ : Deney numunesinin yıllık halkalara dik yöndeki genişliğini (mm)

$h$ : Deney numunesinin yıllık halkalara teğet yöndeki genişliğini (mm)

$f$ : Net eğilme alanındaki sehim, yüklemenin alt ve üst limitlerinde ölçülen sehimlere ait sonuçların aritmetik ortalamaları arasındaki farkı (mm) ifade eder.

Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11'deki denklemlere göre köknar odununun eğilme direnci 72,92 N/mm$^2$ (σ: 6,69) olarak, eğilmede elastikiyet modülü 9691,27 N/mm$^2$ (σ: 362,60) olarak hesaplanmıştır.

Liflere paralel basınç direnci testleri TS 2595 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 20x20x30 mm (RxTxB) boyutlarında kusursuz numuneler hazırlanmıştır. Liflere paralel basınç direnci Eşitlik 3.12'deki formüle göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_w = \frac{P_{max}}{a\ x\ b}\ N/mm^2 \qquad (3.12)$$

Burada;

$\sigma_w$ : Liflere paralel basınç direncini (N/mm$^2$)

$P_{max}$ : Maksimum yükü (N)

$a$ : Deney numunesinin yıllık halkalara teğet yöndeki genişliğini (mm)

$b$ : Deney numunesinin yıllık halkalara dik yöndeki genişliğini (mm) ifade eder.

Eşitlik 3.12'deki denkleme göre hava kurusu köknar numunelerin liflere paralel basınç direnci 51,29 N/mm$^2$ (σ: 0,50), tam yaş köknar numunelerin liflere paralel basınç direnci 20,51 N/mm$^2$ (σ: 0,36) olarak hesaplanmıştır. Burada rutubet içeriği ile liflere paralel basınç direncinin ters orantılı bir ilişkisinin olduğu görülebilmektedir.

Liflere paralel çekme direnci testleri TS 2475 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 10 adet çekme test numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde herhangi bir kusurun bulunmamasına ve yıllık halka gidişatının düzgün olmasına özen gösterilmiştir. Numunelerin boyları 450 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Çekme bölgesindeki numune kalınlığı 7 mm, genişliği ise 20 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Çekme bölgesi uzunluğu ise 150 mm olarak şekillendirilmiştir. Çekme başlıklarının tutacağı baş kısımların kalınlığı 15 mm, genişliği 50 mm ve uzunluğu 120 mm olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.3). Liflere paralel yönde çekme direnci Eşitlik 3.13'teki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_w = \frac{P_{max}}{b\ x\ h}\ N/mm^2 \quad (3.13)$$

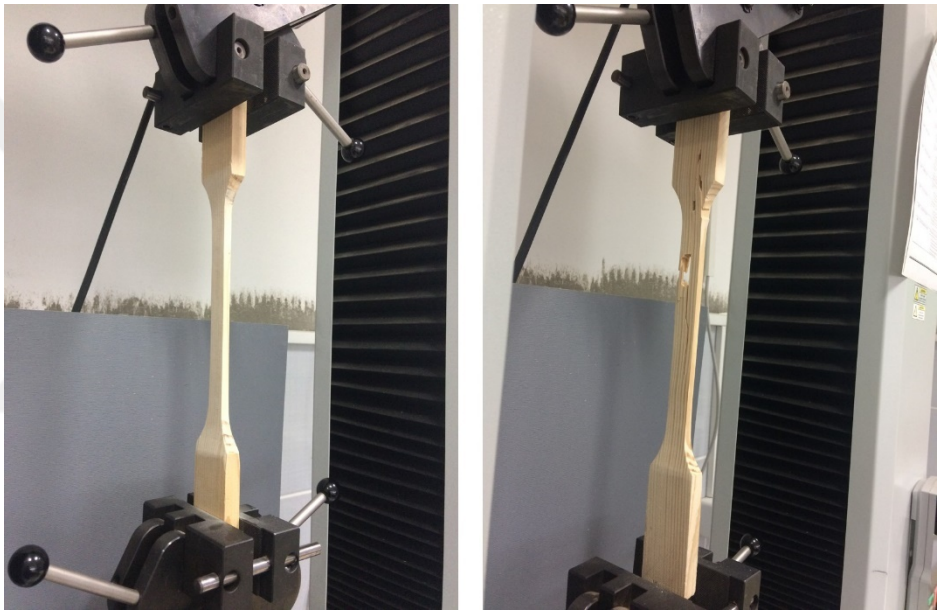
Burada;

$\sigma_w$ : Liflere paralel çekme direncini (N/mm$^2$)

$P_{max}$ : Maksimum yükü (N)

$b$ : Deney numunesinin yıllık halkalara dik yöndeki genişliğini (mm)

$h$ : Deney numunesinin yıllık halkalara teğet yöndeki genişliğini (mm) ifade eder.



Şekil 3.3. Liflere paralel çekme direnci test örnekleri

Eşitlik 3.13'teki denkleme göre köknar numunelerin liflere paralel çekme direnci 51,84 N/mm$^2$ (σ: 0,89) olarak hesaplanmıştır.

### 3.2.3. Ahşap Birleştirme Yöntemleri

İki ya da daha fazla malzemenin bir bütün olacak duruma getirilmesi için yapılan işlemlere birleştirme denilmektedir. Ağaç malzemelerin yan yana getirilerek çeşitli yöntemler ile birleştirilmesine en birleştirme denilmektedir [71]. En birleştirilme yöntemleri şu şekilde sıralanabilir [61,72];

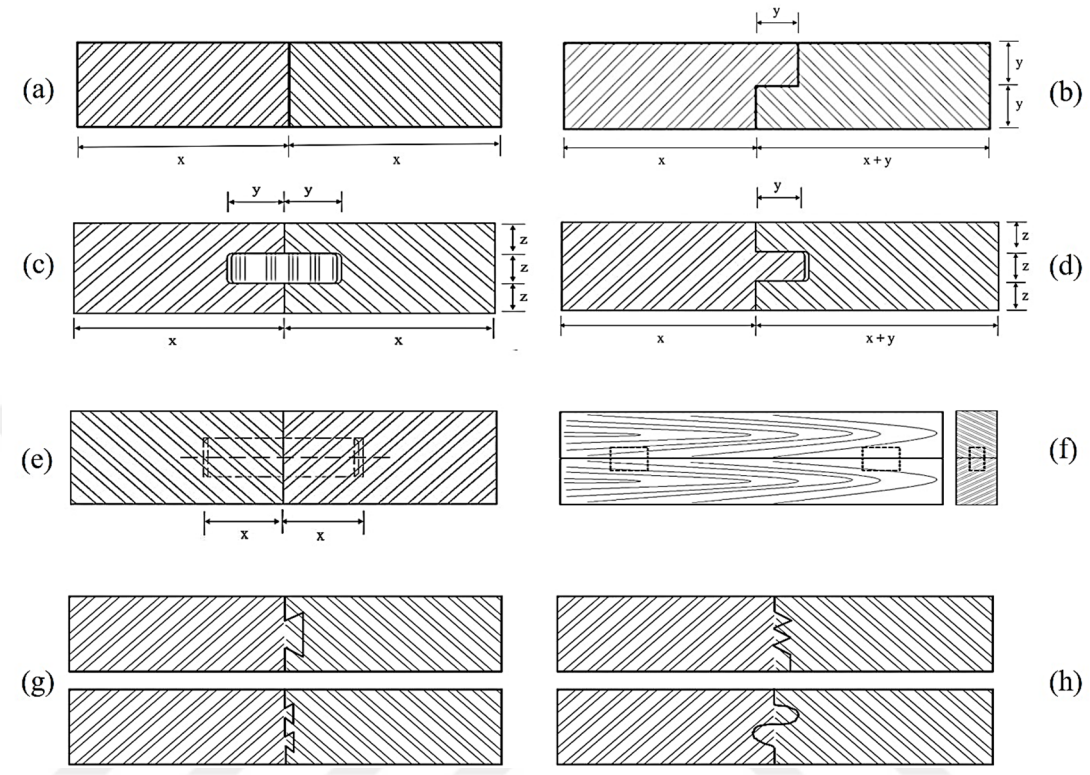
1. Düz birleştirme
2. Lambalı birleştirme
3. Yabancı çıtalı kinişli birleştirme
4. Kendinden çıtalı kinişli birleştirme
5. Kavelalı birleştirme
6. Yabancı zıvanalı en birleştirme
7. Kırlangıç kuyruğu geçmeli birleştirme
8. Kırlangıç kuyruğu ve özel kertme çıtalı birleştirme
9. Özel freze bıçakları birleştirmeleri

Düz birleştirmeler yapımı en kolay ve dayanımı en düşük olan en birleştirme yöntemidir. Aynı zamanda marangozlukta en sık kullanılan en birleştirme şeklidir. Bu işlem genellikle tabla yapımında kullanılmaktadır. Düz birleştirme basit ve ekonomik değeri yüksek olmayan işler için yaygın olarak kullanılır. Seri üretimde aynı kalınlıktaki masif malzemeler bıçakları keskin olan bir planya yardımı ile cumba cumbaya alıştırılırlar. Tutkallama işlemi gerçekleştirilir. Alıştırılmış parçalar renk bütünlüğü ve doğru yıllık halka deseni oluşturacak şekilde yan yana sıraya konulur (Şekil 3.4-a). Tutkalın fazla kıvamlı olmaması gerekmektedir. Tutkallamada parçalar arasında açıklık veya tutkal çizgisinin kalmamasına özen gösterilmelidir [61,71].

Lambalı birleştirme genel olarak doğramacılıkta taban döşemelerinde kullanılmaktadır. Şekil 3.4-b'de görülen lambalar genellikle freze bıçakları yardımı ile açılır. Lamba genişliği ve derinliği kullanılan malzeme kalınlığının yarısı kadardır. Yan yana eklendiklerinde düz birleştirmeden daha mukavemetli olan bir birleştirme tekniğidir [61].

Yabancı çıtalı kinişli birleştirme cumba cumbaya düz olarak alıştırılmış parçalara kiniş açarak yapılmaktadır. Kinişler parça kalınlığının $\frac{1}{3}$'ü kadar genişlikte ve $\frac{1}{2}$'si kadar derinlikte freze yardımı ile açılmaktadır (Şekil 3.4-c). Ardından kiniş açılan parçaların lif yönü ile dik olacak şekilde yabancı çıta oluşturulur. Yabancı çıta genişliği toplam kiniş genişliğinden 1 mm kadar kısa olmalıdır. Tutkallanmış yabancı çıta ile parçalar birleştirilir. Tutkal, bu birleştirme şekli için zaruri değildir. Tutkal kullanmadan

yapılacak olan yabancı çıtalı kinişli birleştirmede yabancı çıtanın lif yönünün parçalardaki lif yönü ile aynı olması gerekmektedir [61,71].




Şekil 3.4. Düz birleştirme (a); lambalı birleştirme (b); yabancı çıtalı kinişli birleştirme (c); kendinden çıtalı kinişli birleştirme (d); kavelalı birleştirme (e); yabancı zıvanalı en birleştirme (f); kırlangıç kuyruğu geçmeli birleştirmeler (g); özel birleştirmeler (h) [71].

Kendinden çıtalı kinişli birleştirme, yabancı çıtalı kinişli birleştirmenin başka bir versiyonudur (Şekil 3.4-d). Bu birleştirme tipi tutkallı veya tutkalsız olarak kullanılabilmektedir. Parçaların cumba kısımlarının birine erkek bir diğerine de dişi kiniş açılarak yan yana birleştirilmesi suretiyle uygulanmaktadır. Erkek ve dişi kinişin genişlikleri parça kalınlığının $\frac{1}{3}$'ü kadardır. Dişi kinişin derinliği parça kalınlığının yarısı kadar, erkek kinişin derinliği ise parça kalınlığının yarısından 1 mm kadar daha kısadır [61,72].

Kavelalı birleştirme için cumba cumbaya alıştırılan parçalara 20-25 cm aralıklarla kavela delikleri açılır. Kavela çapı parça kalınlığının $\frac{1}{3}$'ünde daha kalın olmalıdır.

Kavelaların parça yüzü ile arasındaki mesafe 4 – 5 mm'den az olmamalıdır (Şekil 3.4-e). Bunun nedeni birleştirmenin dayanaklığını artırmaktır. Bu birleştirme şekli tutkallı ve tutkalsız olarak uygulanabilmektedir [71,72].

Şekil 3.4-f'de gösterilen yabancı zıvanalı en birleştirme yönteminde cumba cumbaya alıştırılmış olan parçalara öncelikle freze makinesinde zıvana deliği açma işlemi uygulanır. Uygulamada kavelalı birleştirme yöntemine nazaran daha zordur ancak mukavemeti daha yüksektir. Zıvana için kullanılacak çıta genişliği parça kalınlığının $\frac{1}{3}$'ü kadar olmalıdır. Çıta genişliği 4 – 5 cm, derinliği ise 3 cm civarında olmalıdır [61,72].

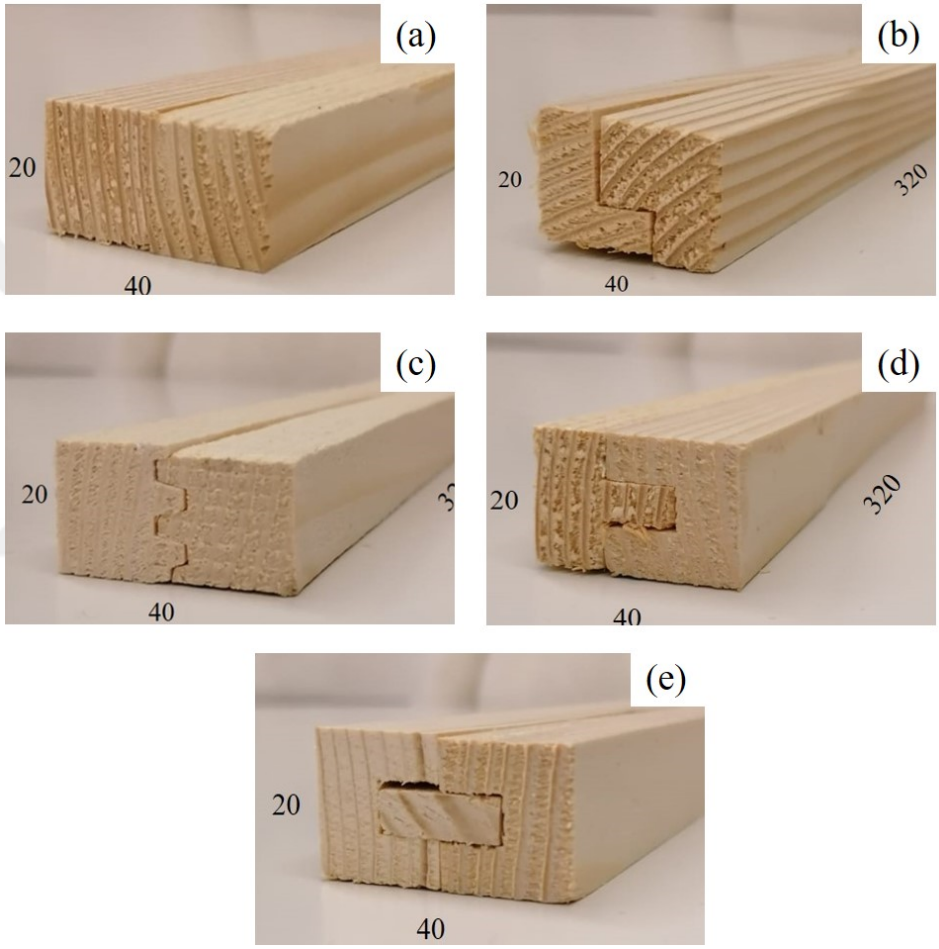
Kırlangıç kuyruğu geçmeli birleştirme yöntemi en az kinişli ve diğer birleştirme yöntemleri kadar mukavemetli bir birleştirme yöntemidir. Tek veya çift geçmeli olarak yapılabilmektedir (Şekil 3.4-g). Freze makinesi veya özel kırlangıç kuyruğu açma makinesinde yapılabilmektedir.

Kırlangıç kuyruğu ve özel kertme çıtalı birleştirmeler özel olarak yapılmış makineler veya kırlangıç kuyruğu olarak düz kalem ile yapılmaktadır. Özel birleştirmeler ise seri üretimde en çok kullanılan ahşap birleştirme yöntemlerine verilen genel bir isimdir. Mukavemetleri oldukça yüksek, tutkallanmaları kolay ve diğer birleştirme yöntemlerindekilere göre daha az zaman harcayan birleştirmelerdir. Şekil 3.4-h'de özel freze bıçakları kullanılarak oluşturulan birleştirme şekilleri görülebilmektedir [61,72].

### 3.2.4. YHB Üretiminde Kullanılacak Ahşap Birleştirme Yönteminin Belirlenmesi

Ahşap birleştirme yöntemlerinden düz en birleştirme, lambalı en birleştirme, makine birleştirme, kendinden çıtalı kinişli birleştirme ve yabancı çıtalı kinişli birleştirme yöntemleri arasından en ideal yöntemin (üretim, maliyet, zaman, malzeme, mukavemet vb.) birleştirmeyi etkileyecek kriterleri göz önüne alınarak seçilmesi kararlaştırılmıştır.

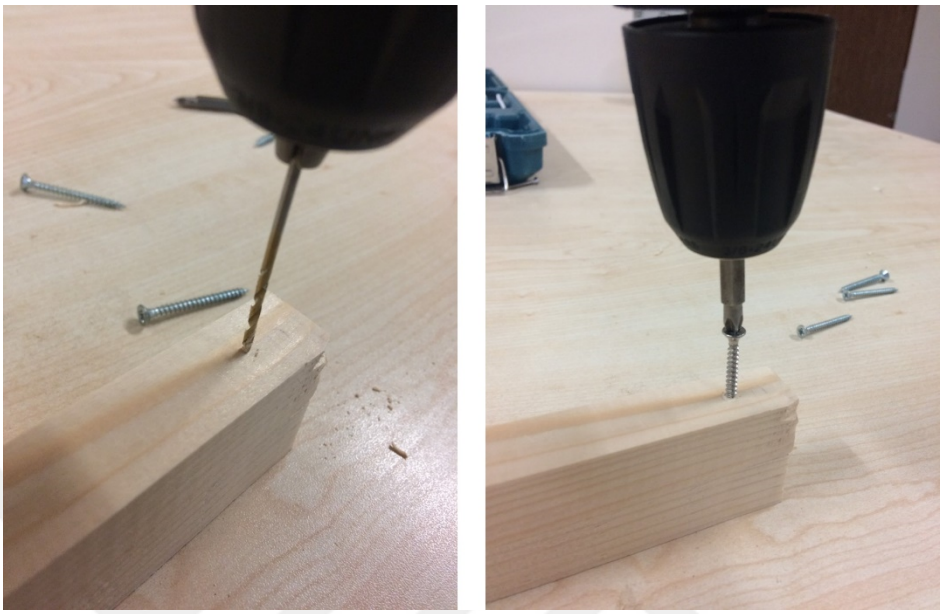
YHB'lere uygulanacak olan pandül çarpışma testleri esnasında köknar keresteler üzerinde darbe enerjisi oluşacaktır. Bu nedenle seçilmesi planlanan birleştirme yöntemlerinin şok etkisine karşı dayanımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun yanında statik yüklere karşı dayanımlarının da irdelenmesi kararlaştırılmıştır. Bu maksatla birleştirme yöntemlerinin üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin yürütülebilmesi için numuneler Şekil 3.5'teki ölçülerde hazırlanmıştır.




Şekil 3.5. Düz birleştirme (a); lambalı birleştirme (b); makine birleştirme (c); kendinden çıtalı kinişli birleştirme (d); yabancı çıtalı kinişli birleştirme (e)

Test örnekleri şekillerde belirtilen ölçülere göre yıllık halka gidişatları muntazam olacak şekilde hazırlanmıştır. Örnekler üzerinde budak, lif kıvrıklığı, mantar / böcek zararları, ur ve benzeri kusur bulunmamasına azami dikkat gösterilmiştir. Hazırlanan ve alıştırılan birleştirme yeri örnekleri test öncesi iki uç noktadan 3.0x40 mm boyutlarındaki sunta vidası ile sabitlenmiştir (Şekil 3.6). Vidalama işleminden önce

örnekler üzerine vida kalınlığının yaklaşık %80'i çapında kılavuz delikleri açılmış ve numunelerin test öncesi olası deformasyonunun önüne geçilmiştir.



Şekil 3.6. Test örneklerinin iki ucunun vida ile sabitlenmesi

Şok direnci testleri Amsler tipi bir test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Test esnasında cihazdaki çekicin örneğin tam ortasına etki etmesine özen gösterilmiştir. Her bir test için elde edilen iş miktarı cihazdaki göstergeden okunmuştur. Şok direnci, kırılma anında harcanan iş ile numunenin kesit alanının oranlanması ile elde edilir (Eşitlik 3.14).




Şekil 3.7. Amsler tipi şok direnci test cihazı.

$$\sigma_{ED} = \frac{W}{a\ x\ b} \tag{3.14}$$

Burada;

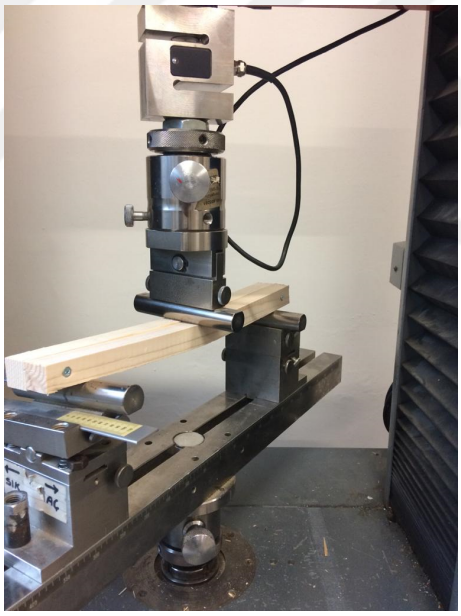
$\sigma_{ED}$ : Dinamik eğilme (şok) direncini (kgm/cm$^2$),

W : Kırılma anında harcanan işi (kgm),

a : Numune kalınlığını (cm),

b : Numune genişliğini (cm) ifade eder.

Üç nokta eğilme direnci testleri Karabük Üniversitesi, Orman Fakültesi'nde bulunan Zwick Roell marka üniversal test makinesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Mesnetler arası açıklık 280 mm olacak şekilde testler yürütülmüştür.



Şekil 3.8. Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü testi.

Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri sırasıyla Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11'deki formüllere göre hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Birleştirme yöntemlerinin mekanik direnç değerleri

| Birleştirme Tipi | Eğilme Direnci ($N/mm^2$) | Eğilmede Elastikiyet Modülü ($N/mm^2$) | Şok Direnci (Kpm) |
|---|---|---|---|
| **Düz Birleştirme** | 62,19<br>(3,46) | 8.373,2<br>(725,07) | 3,37<br>(0,72) |
| **Lambalı Birleştirme** | 41,89<br>(3,94) | 5.661,86<br>(649,16) | 3,94<br>(0,74) |
| **Makine Birleştirme** | 57,66<br>(4,68) | 8.475,22<br>(815,565) | 7,39<br>(0,63) |
| **Kendinden Çıtalı Kinişli Birleştirme** | 40,56<br>(3,46) | 5.710,56<br>(712,125) | 3,50<br>(0,41) |
| **Yabancı Çıtalı Kinişli Birleştirme** | 50,90<br>(4,01) | 7.377,68<br>(884,985) | 8,16<br>(0,60) |
| Parantez içindeki değerler standart sapmayı ifade etmektedir. | | | |

Çizelge 3.2 incelendiğinde en yüksek eğilme direncine sahip olan birleştirme yönteminin düz birleştirme yöntemi olduğu anlaşılmaktadır. Elastikiyet modülü değerleri kıyaslandığında en yüksek değerin makine birleştirme yönteminde, en düşük değerin ise lambalı birleştirme yönteminde olduğu görülmektedir. Şok direnci değerleri incelendiğinde en yüksek değerin yabancı çıtalı kinişli birleştirme yönteminde, en düşük değerin ise düz birleştirme yönteminde olduğu ortaya çıkmıştır.

Yapılan testler sonucunda YHB üretiminde kullanılacak kerestelerin lambalı birleştirme yöntemi ile montajı uygun görülmüştür. Bunun temel nedeni çarpışma sırasında darbe alan parçaların haricinde diğer parçalarda deformasyonun meydana gelmesini engellemek ya da deformasyon ihtimalini azaltmaktır. Düz birleştirme hariç diğer birleştirme yöntemlerinde daha kompleks bağlantı yapılarının olduğu bilinmektedir. Bu bağlantı yapılarının yerinde bakım süresini uzatacağı düşünülmektedir. Ayrıca yerinde bakım esnasında sadece zarar gören parçaların sökülmesinin yeterli olacak olması lambalı birleştirme metodunun seçiminde ayrıca etkili olmuştur.

### 3.2.5. YHB Üretiminde Kullanılacak Vidaların Tipinin Seçimi

Ahşap ve ahşap esaslı malzemeler, konut ve ticari amaçlar açısından en yaygın inşaat malzemeleridir [73]. Ahşap malzeme herhangi bir diğer malzemeye çivi, vida, dübel, cıvata, metal ve plastik bağlantı elemanları gibi malzemeler ile bağlanabilmektedir [74].

Vidalar bağlantı parçalarını bir arada tutmak için güçlü bağlantı sağlayan ve en yaygın kullanılan mekanik ahşap bağlantı elemanlarıdır. Mevcut konstrüksiyonun dayanıklılığı ve sağlamlığı büyük ölçüde vida tipi, vida yönü, kılavuz delik çapı ve penetrasyon derinliği gibi faktörlere bağlıdır [75–77].

Çeşitli araştırmalarda vida çapı ile vida tutma direnci arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur. Buna ek olarak vida uzunluğunun vida çekme mukavemeti üzerine pozitif etkisi olduğu anlaşılmıştır [76,77].

Vida seçimi için piyasada yaygın olarak kullanılan ahşap vidaları incelenmiş ve işlenecek olan ağaç malzemenin metal ızgaralar üzerine daha önceden açılmış kılavuz delikler yardımıyla monte edilmesinde yeterli mukavemeti sağlayacağı düşünülen 3,5 x 50 mm boyutlarındaki vidaların kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 3.9). Önceki çalışmalara göre vidalama kalitesinin yüksek olabilmesi için vida çapının %80'i kadar pilot deliği açılmış olması gerektiği belirtilmiştir [76–78]. Bu nedenle köknar keresteler üzerine vida çapının %80'i kadar (2,8 mm) pilot delikleri açılmıştır. Her bir kerestenin sabitlenmesinde 4 adet (1 adet YHB için toplamda 72 adet) vida kullanılmıştır.



Şekil 3.9. YHB üretiminde kullanılan 3,5 x 50 mm'lik vidalar.

## 3.3. KUMUN ENERJİ ABSORPSİYON ÖZELLİĞİ

Kum, ufalanmış kayaç ve mineral parçacıklardan oluşan doğal ve granüler bir malzemedir. TS 1900-1 standardına göre çapı 0,075 mm ile 2 mm arasında değişen zemin daneleri kum olarak adlandırılmaktadır. Uygulamada çapı 4 mm'ye kadar olanları sıva kumu, 5 mm'ye kadar olanları ise beton/şap kumu olarak

adlandırılmaktadır. Birim hacim ağırlığı boşluk miktarına bağlı olarak 1,5 ton/$m^3$ ile 1,80 ton/$m^3$ arasında değişiklik gösterebilmektedir. Kuru veya suya doygun halde kohezyonsuzdur, ancak belirli bir su muhtevasında kohezyonu vardır. Elasto-plastik özelliklere sahip bir zemin malzemesidir [79].

Bazı ülkelerde dolgu, istinat duvarı, galeriler gibi koruma yapılarında kumun enerji sönümleyici etkisinin kullanılması oldukça yaygındır. Özellikle karayolu ve demiryolu kenarlarındaki yarma şevlerinden kaya düşmelerinde ortaya çıkan yüksek çarpma etkisine karşı bu koruma yapılarında kum yastıkların kullanılmasının pozitif etki sağlayacak bir çözüm olduğu bilinmektedir. Kum, doğrudan bu koruma yapıları ile temas halinde veya "kum hücreleri" adı verilen geotekstil kafesler içerisinde kullanılabilmektedir. Son zamanlarda bu kum hücrelerinin şok darbesine karşı gösterdiği etkinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapılmakta olup yakın gelecekte kumun enerji sönümleyici etkisi sebebiyle birçok koruma yapısında özellikle yük hücresi şeklinde kullanılacağı tahmin edilmektedir [80].

Sabet vd. [83], sivri uçlu merminin cam fiber takviyeli plastik ve %20 kumdan oluşan plakalarda yüksek hızdaki çarpma neticesinde delinme durumunu incelemiş olup kum içeren plakalarda gerekli balistik kriterlerin sağlandığını ve dikkate değer bir enerji sönümlemesi sağlandığını gözlemlemiştir. Chian vd. [17], kompozit koruyucu bariyerlerde kum kullanarak değişik şekil ve ağırlıklara sahip mermilerin etkisini incelemiş, kumun enerji sönümleme miktarının gerekli balistik limitleri fazlasıyla sağladığını, enerji sönümleme miktarının mermi ucunun şekline ve merminin kütlesine bağlı olduğu kadar kumun sıkışma miktarına da bağlı olduğunu ifade etmiştir. Malek vd. [84], çalışmasında kumlu bir zemine döşenen mayının patlaması esnasında zırhlı araçlara ve içerisindeki personele vereceği zararın azaltılabilmesinin önemine değinmiştir. Buradan hareketle değişik oranlarda su muhtevasına sahip kumun mekanik özelliklerini darbe yükleri altında incelemiş ve su içeriğinin, kumun darbe yükleri altındaki sıkışma özelliklerini etkilediğini ifade etmiştir.

Kum geleneksel olarak askeri amaçlı (özellikle mevzi ve siperlerde) kullanılsa da malzemenin eşsiz enerji absorbe etme kapasitesi hakkında çok az şey bilinmektedir. Singapur Ulusal Üniversitesi'nin yaptığı bir çalışmada, çeşitli şekil ve kütlelerden

oluşan mermilerin silis kum bloğuna karşı etkisi incelenmiş ve mermilerin sahip olduğu enerjinin %85'ten fazlasının kum tarafından sönümlediği ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında, kumun potansiyel olarak zırhlı yapılar kadar kritik sistemlerin korunma seviyesini artırmak için daha ucuz, daha hafif ve daha çevre dostu bir alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmektedir.

Anadolu'da geleneksel yapılarda zemin düzeltilip 15 – 20 cm kalınlığında kum serildikten sonra temel yapımına geçilmiştir. Temel altına serilen kumun zemin suyunu yapıya iletmemesinin yanında depremde yer sarsıntılarını sönümlemesi açısından da yararı olduğu ifade edilmiştir [83]. Dongyi [2016], temel altında kullanılan kum zeminin (kum yastık) depreme karşı etkisini incelemiş olup kumun şok absorpsiyonu ve izolasyon sağladığını ortaya koymuştur. Bhatti [86], çalışmasında, betonarme bir koruma yapısı olan kaya koruma tünelinde, kaya düşmesi neticesinde ortaya çıkacak olan darbe etkisinin tünelin döşemesine vereceği zararı önlemeye dönük olarak "kum yastık" kullanılmasının etkisini incelemiş, bu doğrultuda kumun darbe enerjisini sönümlemede etkili olduğunu ortaya koymuştur. Kum yastık (Şekil 3.10) temas basıncını dağıtmakta, çarpma ivmesini ve çarpma süresini azaltmaktadır. Sonuç olarak; kum yastığı kullanımının nükleer tesisler, yakıt tankları, dağlık bölgelerdeki karayolları ve falezler boyunca yapılan kaya koruma tünelleri gibi önemli yapıların güvenliğinin sağlanmasında uygun bir mühendislik yaklaşımı olduğunu ifade etmiştir.



Şekil 3.10. Kaya koruma tünelinde kum yastık kullanımı [84].

Zemin malzemelerinin sismik hareketler, patlama dalgası ve darbeler gibi dinamik yükler altındaki davranışının kavranabilmesi oldukça ilgi çeken bir konudur. Kum gibi poröz malzemelerin su doygunluğu zeminin davranışı üzerinde oldukça etkili bir parametredir [85]. Murayama [1966] çalışmasında kumun kayma deformasyonu üzerindeki elastik özelliklerini tersinir harekete bağlı olarak yer değiştiren kum tanelerinin karşılıklı sürtünmesi ile açıklamaktadır [56]. Omidvar vd. [88], çalışmasında kumun mekanik davranışının tam olarak ortaya konulabilmesi için boşluk oranı, dane şekli, dane boyutu, gradasyon, danelerin yüzey dokusu ve minerolojisi vb. hususların etkisinin irdelenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Tüm bu çalışmalardan elde edilen veriler ışığında tez kapsamında kullanılacak olan kumun sıkılık oranına (az sıkı/orta sıkı/çok sıkı) nem içeriğine, boyutlarına, minerolojisine bağlı olarak farklı neticeler elde edilebileceği aşikârdır. Literatürde bahsi geçen parametrelerin bütün olarak değerlendirildiği bir çalışma olmaması sebebiyle YHB üretiminde kolaylıkla temin edilebilen, ekonomik olarak ideal olan ve beton üretiminde de yoğun olarak kullanılan 5 mm çapında kırma taş kum kullanılacaktır. Ayrıca dış hava etkilerine maruz kalacak olması sebebiyle kuru ve suya doygun olarak iki farklı alternatif üzerinde deneyler gerçekleştirilecektir.

## 3.4. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER TASARIMI VE ÜRETİMİ

Araştırmacılar günümüze kadar genellikle çarpışma esnasında ortaya çıkacak büyük boyuttaki darbe yüklerine karşı koyabilecek yeterlilikte bariyer geliştirmişlerdir. Ancak, estetik kaygılar sadece güvenlik ve yapısal gerekliliklerin dikkate alınmasından dolayı gölgede kalmıştır. Mühendisler genellikle bu yapıların peyzaj üzerindeki etkisini, özellikle doğal alan ve tarihi alanlardaki önemini fark etmekte zorlanmışlardır. Tasarımcılar ve mimarlar genellikle yapısal yetersizlikler nedeniyle mühendislerin kabul edemeyeceği ancak estetik açıdan hoşa giden bariyerler önermektedir [26]. Bu nedenle hem estetik açıdan hem de güvenlik açısından ihtiyaçları karşılayacak yeni bir bariyer tasarlanması gerekmektedir.

Hâlihazırda literatürde yer alan ahşap bariyerlerin en önemli dezavantajı yüksek maliyetli olmasıdır. Bu tez, ahşap ve kumun birlikte kullanılması ile diğer ahşap bariyerlere kıyasla daha az maliyetli ve daha yüksek çarpışma performansına sahip

bariyer üretilmesine imkân tanıyacaktır. Üretilmesi planlanan YHB'nin diğer bariyer tipleri ile kriter ve gereksinimleri karşılama durumu literatürden ve uygulamalardan elde edilen bilgiler ışığında sübjektif olarak değerlendirilmiş ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bariyerlerin kriter ve gereksinimlerinin karşılaştırılması

| **Kriter** | **Gereklilik** | **Çelik** | | **Beton** | **Plastik** | **Ahşap** | **Hibrit** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Tel Halat** | **W Kirişli** | | | | |
| **1. Malzeme** | Yeterli miktarda esnekliğe sahip olmalı | Esnek | Yarı Rijit | Rijit | Esnek | Yarı Rijit | Yarı Rijit |
| **2. Performans** | | | | | | | |
| **2.1. Mukavemet** | Yeterli mukavemete sahip olmalı | 2 | 3 | 5 | 1 | 3 | 4 |
| **2.2. Darbe absorpsiyonu** | Yeterli absorpsiyona sahip olmalı | 3 | 5 | 1 | 2 | 4 | 5 |
| **2.3. Defleksiyon miktarı** | Sapma miktarı engel mesafesinden az olmalı | 1 | 2 | 5 | 1 | 3 | 4 |
| **3. Bakım** | | | | | | | |
| **3.1. Periyodik bakım** | Mümkün olduğu kadar seyrek bakıma ihtiyaç duymalı | 2 | 4 | 5 | 5 | 1 | 2 |
| **3.2. Çarpma sonrası bakım** | Az maliyetli olmalı ve fazla işçilik gerektirmemeli | 3 | 3 | 5 | 4 | 1 | 2 |
| **4. Maliyet** | | | | | | | |
| **4.1. Üretim maliyeti** | Az olmalı | 4 | 4 | 2 | 5 | 1 | 3 |
| **4.2. İşletme maliyeti** | Az olmalı | 3 | 3 | 5 | 4 | 1 | 3 |
| **5. Araziye uygunluğu** | Dolgu seviyesi, banket genişliği vb. uyumu | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| **6. Uygulama standardının / şartnamesinin bulunması** | (+) var<br>(-) yok | + | + | + | - | - | - |
| **7. Montaj kolaylığı** | Kolay kurulabilmeli | 4 | 3 | 5 | 5 | 1 | 2 |
| **8. Estetik görünüş** | Doğal ve tarihi alanlar gibi turizm bölgelerine hitap edebilecek estetik görünüşe sahip olmalı | 2 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| **9. Kullanım (servis) ömrü** | En az 25 yıl servis ömrü olmalı | 3 | 4 | 5 | 5 | 2 | 2 |
| **10. Dış hava koşullarına ve çevresel etkilere dayanımı** | Yağmur, kar, güneş ışığı, UV ışınları, donma çözülme vb. etkiler karşı dayanıklı olmalı | 3 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 |

Çizelge 3.3. (devam ediyor).

| Kriter | Gereklilik | Çelik | | Beton | Plastik | Ahşap | Hibrit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Tel Halat | W Kirişli | | | | |
| **11. Işık engelleme kabiliyeti** | Karşı yönden gelen araçların ışığını azaltabilmeli | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **12. Ses yutma kabiliyeti** | Trafikteki ses kirliliğini kısmen engelleyebilmeli | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 5 |
| **13. Karbon tutma kapasitesi ve küresel iklim değişimine etkisi** | Yüksek karbon tutma kapasitesine sahip olmalı ve küresel iklim değişiminin önlenmeli | 1 | 1 | 3 | 1 | 5 | 5 |
| **14. Geri dönüşüm kolaylığı** | Atık üretimi olmaması için geri dönüşüm kolaylığı olmalı | 4 | 4 | 1 | 5 | 3 | 4 |
| **15. Yenilenebilirlik** | Fosil kaynakların önüne geçilerek küresel iklim değişiminin önlenmesine katkıda bulunulması için yenilenebilir, doğal kaynaklardan üretilmeli | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| **16. Sürdürülebilirlik** | Sürdürülebilir malzemelerden üretilmeli | 2 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| *1 en düşük 5 en yüksek değer olacak şekilde puanlama yapılmıştır. | | | | | | | |

Çizelge 3.3'ten anlaşılacağı üzere tasarlanan YHB'lerin diğer bariyer türlerine göre en yüksek değerlendirme ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. YHB'nin diğer bariyer tipleri ile avantaj, dezavantaj ve kullanım alanı açısından kıyaslanması Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bariyer özelliklerinin kıyaslanması [40].

| Sistem | Avantajlar | Dezavantajlar | Kullanım Alanı |
|---|---|---|---|
| **Çelik Halat Bariyer** | 1. Düşük kurulum maliyeti<br>2. Zayıf direkler araç stabilitesini korur<br>3. Nispeten kolay kurulum<br>4. Orta dereceli çarpışmadan sonra işlevsel kalır<br>5. Onarım kolaylığı<br>6. Kar birikmesini en aza indirir | 1. Daha geniş defleksiyon alanı gerektirir<br>2. Aracın devrilmesine neden olabilir.<br>3. Bazı araçlar bariyerin altına girebilir.<br>4. Kurb ile birlikte kullanılamaz.<br>5. Herhangi bir çarpışmada onarım gerektirir.<br>6. Trafikten gelen ışığı engelleyemez. | 1. Otoban dışındaki yollarda<br>2. Kırsal otoyollarda<br>3. Defleksiyon alanının yeterli olduğu yerlerde. |
| **W-Kirişli Çelik Bariyer** | 1. Düşük kurulum maliyeti<br>2. Bakım personeli tarafından aşinalık yüksek seviyededir.<br>3. Binek araçların bariyere çarpması genelde güvenli bir şekilde olabilmektedir.<br>4. Nispeten kolay kurulabilirler.<br>5. Ortalama bir çarpışmadan sonra işlevsel kalabilir.<br>6. Kurb ile birlikte kullanılabilir. | 1. Betonarme bariyer veya kablo bariyeri kıyasla büyük tonajlı araçları tutma ihtimali azdır.<br>2. Çarpışma bölgelerinde sık bakım yapılması gerekmektedir.<br>3. Kablo bariyerden daha fazla kar biriktirir.<br>4. Araçların içine geçen ya da yeniden yönlendirme ile sonuçlanan çarpışmalarda onarım gerekecektir.<br>5. Trafikten gelen ışığı engelleyemez. | 1. Dar orta mesafeli otoyollar.<br>2. Kırsal otoyollarda<br>3. Yan tehlikelerin olduğu yerlerde defleksiyon yeterlidir. |
| **Beton Bariyer** | 1. Çoğu aracın darbesini nüfuz etmeden barındırabilir.<br>2. Arka kısmında defleksiyon mesafesi gerektirmez.<br>3. Çoğu aracın çarpmasıyla çok az hasar meydana gelmekte ya da hiç hasar meydana gelmemektedir. Bu nedenle çok az bakıma ihtiyaç duymaktadır. | 1. En yüksek kurulum maliyetine sahiptir.<br>2. Aracın devrilmesine neden olabilir.<br>3. Çarpışma esnasında oluşan enerjiyi yolculara en çok aktaran bariyer sistemidir. Bu nedenle affedici bariyer sınıfında yer almamaktadır.<br>4. Seyahat edilen yol ile bariyer arasındaki farkın 3.6 m'yi aştığı durumlarda performansı düşer.<br>5. Genellikle yer altı drenajı gerektirir.<br>6. Yoğun şekilde kar biriktir. | 1. Şehir yollarında<br>2. Anlık trafik yoğunluğun un yüksek olduğu yollarda<br>3. Ağır tonajlı araçların yoğun olduğu yollarda |

Çizelge 3.4. (devam ediyor).

| Sistem | Avantajlar | Dezavantajlar | Kullanım Alanı |
|---|---|---|---|
| **Ahşap Bariyer** | 1. Estetik açıdan hoş bir görünüme sahiptir.<br>2. Yenilenebilir, organik, doğal, karbon stok özelliği sayesinde küresel iklim değişimini önleyici etkiye sahip olan ahşap malzemeden elde edildiği için çevre dostudur.<br>3. Ahşabın ses yutma kabiliyeti olduğundan trafik gürültüsün azaltıcı etki yapmaktadır.<br>4. Kar biriktirme ihtimali azdır. | 1. Üretim maliyeti en yüksek olan bariyerdir.<br>2. Trafikten gelen ışığı engelleyemez.<br>3. Bakımı ve onarımı yoğun işçilik gerektirir.<br>4. Kullanım ömrü diğer bariyerlere nazaran daha azdır.<br>5. Olası çarpışmada bariyer parçaları araç içerisine nüfuz ederek yaralanma ve/veya ölüm riskini artırmaktadır. | 1. Turistik yollarda,<br>2. Doğa yollarında<br>3. Şehir içi, anlık trafik yoğunluğun un yüksek olduğu yollarda<br>4. Tarihi dokunun yoğun bulunduğu bölgelerdeki yollarda |
| **Yenilenebilir Hibrit Bariyer** | 1. Arka kısmında kabul edilebilir defleksiyon mesafesi olacağı tahmin edilmektedir.<br>2. Kumun enerji absorbe etme yeteneğinin araç stabilitesini koruyacağı ve buna bağlı olarak kaza anında doğacak çarpışma enerjisini araç içerisine diğer bariyerlere nazaran daha az ileteceği düşünülmektedir.<br>3. Estetik açıdan hoş bir görünüme sahip olacaktır.<br>4. Yenilenebilir, organik, doğal, karbon stok özelliği sayesinde küresel iklim değişimini önleyici etkiye sahip olan ahşap malzemeden elde edileceği için çevre dostudur.<br>5. Ahşabın ses yutma kabiliyeti olduğundan trafik gürültüsün azaltıcı etki yapacağı düşünülmektedir.<br>6. Ortalama bir çarpışmadan sonra işlevsel kalabileceği tahmin edilmektedir.<br>7. Bakımı ve daha kolay onarımı ahşap bariyerlere nazaran daha kolay olacaktır. Daha az işçilik gerektirecektir.<br>8. Çelik bariyerlerde olduğu gibi araçların içine geçen bariyer kısımları bu bariyer tiplerinde görülmeyecektir.<br>9. Çarpışma esnasında oluşan enerjiyi yolculara en az aktaran bariyerler arasında olması beklenmektedir.<br>10. Gece sürüşünde trafikten gelen ve bariyerlerden yansıyan ışığın sürücüyü rahatsız etmesi gibi sorunları azalabilecektir. | 1. Çelik bariyerlere nazaran üretim maliyeti daha yüksek olacaktır. Ancak beton ve ahşap bariyerlerden daha düşük bir üretim maliyeti olacaktır.<br>2. Çarpışma bölgelerinde sık bakım yapılması gerekmektedir.<br>3. F Tipi New Jersey bariyerlerin şeklinde üretildiğinden dolayı kar biriktirmesi beklenmektedir.<br>4. Kullanım ömrü beton ve çelik bariyerlere nazaran daha az olacaktır.<br>5. Her ne kadar kum, bariyer içerisine torbalarla yerleştirilecek olsa da şiddetli bir çarpışmadan sonra yola kum saçılma ihtimali bulunmaktadır. | 1. Turistik yollarda,<br>2. Doğa yollarında<br>3. Şehir içi, anlık trafik yoğunluğun un yüksek olduğu yollarda<br>4. Tarihi dokunun yoğun bulunduğu bölgelerdeki yollarda |

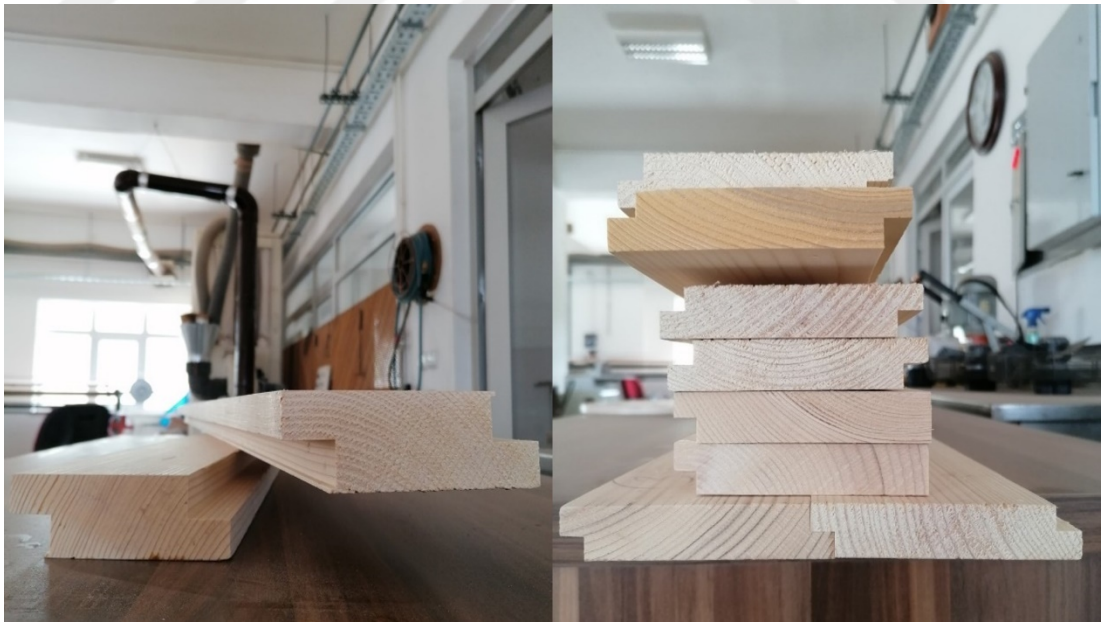
Ahşap malzeme dış ortamda fiziksel ve mekanik zararlara uğrayabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı çeşitli koruma tedbirleri (kurutma, emprenye, kimyasal / termal modifikasyon, vernik vb.) geliştirilmiştir. Ancak ahşap malzeme korunurken fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişim meydana gelebilmektedir. Bu nedenle en sık kullanılan koruma yöntemlerinden emprenye ve ısıl işlem uygulanmış ahşap malzemelerin çarpışma performansları da belirlenecektir. Tez kapsamında üretilecek olan YHB'lerin dış hava koşullarında kullanılacağı göz önüne alınarak ahşap malzemenin farklı koşullara göre fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimi bariyer performansını ne derece etkilediği incelenecektir. Bu nedenle farklı rutubet derecelerine sahip farklı kalınlıklardaki ahşap malzemeler kullanılarak YHB'lerin çarpışma performansları belirlenecektir. Dış hava koşullarda kuru ve suya doygun hallerde olacak olan kumun enerji absorbe etme yeteneğinde değişim meydana geleceği bilinmektedir. Bu nedenle farklı rutubet derecelerinde kum kullanılarak testler gerçekleştirilecektir. İlgili kriterler baz alınarak oluşturulan YHB üretim matrisi Çizelge 3.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. Üretilmesi planlanan YHB tipleri.

| Grup Kodu | Sıra No | YHB Türü | Ağaç Türü | Ahşap Malzeme Rutubet Derecesi (%) | Ahşap Malzeme Kalınlığı (cm) | Kum Rutubet Derecesi (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I. Grup | 1 | B1K2 | Köknar | 8 | 2 | Hava Kurusu |
| | 2 | B1K4 | Köknar | 8 | 4 | Hava Kurusu |
| | 3 | B1Y2 | Köknar | 120 | 2 | Tam Yaş |
| | 4 | B1Y4 | Köknar | 120 | 4 | Tam Yaş |
| II. Grup | 5 | B2K2 | Köknar (Emprenye Edilmiş) | 8 | 2 | Hava Kurusu |
| | 6 | B2K4 | Köknar (Emprenye Edilmiş) | 8 | 4 | Hava Kurusu |
| | 7 | B2Y2 | Köknar (Emprenye Edilmiş) | 120 | 2 | Tam Yaş |
| | 8 | B2Y4 | Köknar (Emprenye Edilmiş) | 120 | 4 | Tam Yaş |
| III. Grup | 9 | B3K2 | Köknar (Isıl İşlem Görmüş) | 8 | 2 | Hava Kurusu |
| | 10 | B3K4 | Köknar (Isıl İşlem Görmüş) | 8 | 4 | Hava Kurusu |
| | 11 | B3Y2 | Köknar (Isıl İşlem Görmüş) | 120 | 2 | Tam Yaş |
| | 12 | B3Y4 | Köknar (Isıl İşlem Görmüş) | 120 | 4 | Tam Yaş |
| Bağlantı Noktası | | | Köknar | 8 | 4 | Hava Kurusu |
| Sadece Kum | | | Köknar | 8 | 4 | Hava Kurusu |
| Sadece Ahşap | | | Köknar | 8 | 4 | Hava Kurusu |

Çizelge 3.4'te belirtilen YHB'lerin maliyeti kullanılan ağaç türüne, malzeme çeşidine, malzemenin kalınlığına ve içerisine kullanılan kum miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu maksat ile ekonomik olarak diğer türlere nazaran daha uygun olan kavak ve köknar türlerinden birisinin kullanılmasına karar verilmiştir. Köknar kerestelerin estetik olarak Kavak'tan daha hoş bir görüntüye sahip olması ve bölgemizde ürüne erişimin daha kolay olması nedeniyle YHB üretiminde kullanılması uygun görülmüştür.

I. Grup YHB'lerin üretiminde kullanılacak I. sınıf köknar keresteler teknik kuruma yöntemi ile kurutulmuştur. Özellikle budaklı, urlu, spiral lifli, eksantrik özlü, çift özlü, mantar ve böcek zararına uğramamış, herhangi bir kusur barındırmayan keresteler tercih edilmiştir. YHB üretiminde kullanılacak keresteler 20x100x1250 mm ve 40x100x1250 mm boyutlarında hazırlanması için öncelikle kalınlık makinesinde, daha sonra boylama için daire testerede ve nihayetinde lambaların açılabilmesi için ise freze makinesinde işlenmiştir. YHB üretiminde keresteler Şekil 3.11'de görülen lambalı en birleştirme tekniği kullanılarak üst üste birleştirilmiştir.

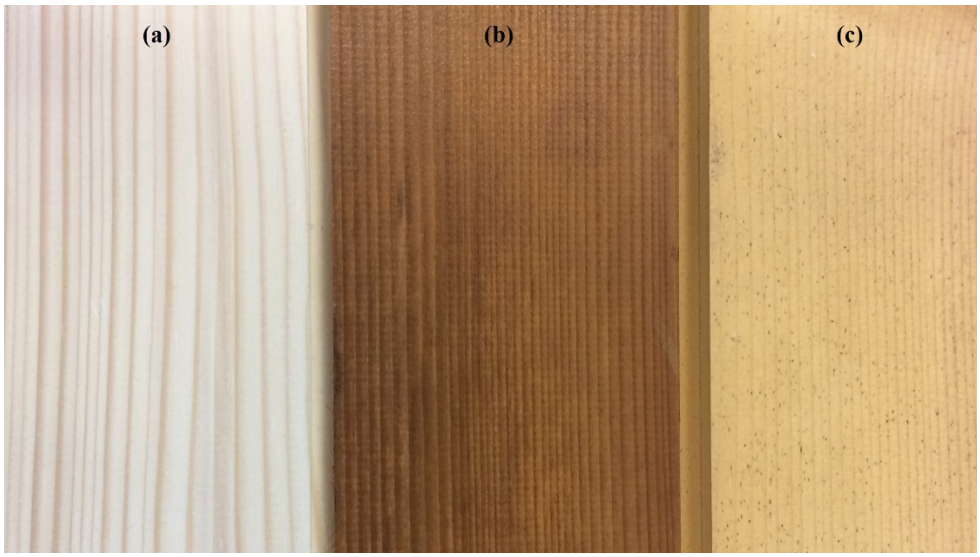


Şekil 3.11. Lambalı en birleştirme.

II. Grup YHB'lerin üretiminde kullanılacak olan I. sınıf köknar keresteler öncelikle kalınlık makinesinden geçirilmiş ve daha sonra boylama ve lamba açma işlemlerine

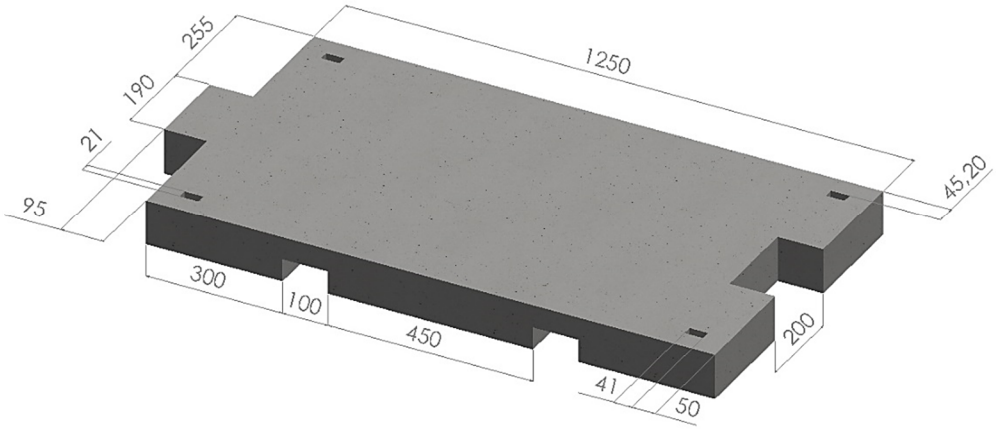
tabi tutulmuştur. Ardından emprenye işlemi özel bir firmada sanayi tipi bir emprenye kazanında gerçekleştirilmiştir. Emprenye maddesi olarak, piyasada en sık kullanılan tür olması, çevre dostu olması ve insan sağlığına zararı olmaması nedeniyle Tanalith-E seçilmiştir. Emprenye işlemi için keresteler emprenye kazanına sevk edildikten sonra 25 dakika süre ile 600 mm Hg'lık ön vakum işlemine tabi tutulmuştur. Ön vakum işleminin ardından emprenye kazanındaki vakum boşaltılmış ve emprenye kazanına Tanalith – E maddesi sevk edilmiştir. Bu işlemin ardından kerestelere emprenye maddesinin penetrasyonunu artırabilmek için 30 dakika süre ile 12 bar'lık bir basınç uygulanmıştır. Sürenin sonunda basınç boşaltılarak Tanalith-E maddesi emprenye kazanından boşaltılmıştır. Son olarak keresteler üzerinde kalan fazlalık emprenye maddesinin alınabilmesi için 20 dakika süre ile 600 mm Hg'lık son vakum işlemi uygulanmıştır. Tanalith – E maddesi bakır içermesi nedeniyle emprenye işleminin ardından örneklerde fiksasyon işleminin gerçekleşebilmesi için 22±3 °C'de ve %65 bağıl nemde 10 gün süre ile bekletilmiştir. Ardından kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

III. Grup YHB'lerin üretiminde kullanılacak olan I. sınıf köknar keresteler özel bir firmada 110°C'deki sanayi tipi bir fırında atmosferik basınç altında ve hava ortamında 7 saat süre ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemin ardından tüm numuneler 7 gün süre ile %65±5 bağıl nem ve 20±2°C'deki oda koşullarında kondisyonlanmaya bırakılmıştır. Isıl işlemin ardından köknar keresteler ilgili boyutlandırma ve birleşim yeri açma işlemlerinden geçirilmiştir. Şekil 3.12'de herhangi bir işlem uygulanmamış, emprenye işlemi uygulanmış ve ısıl işleme maruz bırakılmış köknar numuneler görülmektedir.




Şekil 3.12. Herhangi bir işlem uygulanmamış (a), emprenye işlemi uygulanmış (b) ve ısıl işleme maruz bırakılmış (c) keresteler.

Ahşabın rutubet ile şekil değiştirmesi (daralma-genişleme) fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Üretilecek olan YHB'lerin dış hava koşullarına maruz kalacak olmasından dolayı ahşap kısımlarında rutubet alışverişi meydana gelecektir. Dolayısı ile mekanik özellikleri değişkenlik gösterecektir. Aynı zamanda YHB'lerin içindeki kum da rutubet alarak ağırlaşacaktır. Bu nedenlerden dolayı zeminde birikecek olan suyun YHB'lerden ayrılabilmesi ve yol kenarında drenajın sağlanabilmesi için YHB'ler prefabrik beton bir tablanın üzerine konulacaktır (Şekil 3.13).




Şekil 3.13. YHB'lerin altında yer alan prefabrik beton tabla ölçüleri (mm).

Beton tabla kalıbı oluşturulması esnasında metal profillerin geçeceği delikler ve drenaj kanalları ahşap parçalar konularak sağlanmıştır. Kalıp içerisine 8 mm'lik inşaat demiri örülmüştür. Bu sayede beton tabla tekrar tekrar kullanılabilecek şekilde dirençli hale getirilmiştir. Bariyerlerin olası bir çarpışma esnasında birbirinden kolayca ayrılamaması için beton tablaların sağ ve sol kenarlarına erkek ve dişi geçme kısımları eklenmiştir. Ayrıca yol üzerinde yağmur, kar vb. doğa olayları nedeniyle birikecek suyun tahliye edilebilmesi için beton tablaların alt kısımlarına drenaj kanalları açılmıştır. Nakliye ve montaj esnasında kolaylık sağlanabilmesi için beton tablaların üst ve ön kısımlarına U şeklinde demir parçalar konularak demir örgüye bağlanması sağlanmıştır. Kalıplar, tasarımdaki ölçülere uygun olacak şekilde OSB levhalar kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.14). Hazırlanan kalıpların içerisine C25 kalitede beton dökülerek beton tablaların üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 3.14. Beton tablaların kalıplarının hazırlanması.

YHB'nin ana iskeleti metal ızgaradan oluşmaktadır. Keresteler bu metal ızgara üzerine daha önceden açılmış deliklere vida yardımıyla sabitlenecektir. Metal ızgaraların üretimi için 20x40 mm boyutlarında ve 3 mm kalınlığında profiller kullanılmıştır. Metal profiller F tipi New Jersey bariyer boyutlarına göre ek yerlerinde kaynak kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3.15).




Şekil 3.15. Metal ızgara ve boyutları (mm).

Çarpışma esnasında bariyer hattının bir bütün olarak davranış sergilemesi amacıyla metal ızgaralar birbirlerine M12'lik tij ve somun vasıtası ile bağlanmışlardır. Metal ızgaralar üzerine daha önceden 6 mm kalınlığındaki T profiller sabitlenmiştir. T profiller üzerine tijlerin geçebileceği 13 mm çapında delikler açılmıştır. 25 cm boyunda kesilmiş olan tijler T profiller üzerine açılan deliklerden geçirilmiş ve somunlar yardımı ile sabitlenmişlerdir. İki bariyer dört noktadan birbirine bağlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Metal ızgaraların birbirlerine bağlanmasını sağlayan birleştirme tipi.

Ülkemizde askeri amaçla kullanılan kum torbalarına ilişkin olarak 1989 tarihli TS 7742 ve TS 7743 standartları bulunmaktadır. Bu standartlarda sadece kum torbalarının boyutları ve torbanın imalinde kullanılacak olan malzemelerle ilgili kriterler verilmiş olup içerisinde kullanılacak olan kumun boyutları, sıklığı, tane şekli, türü gibi fiziksel faktörler dikkate alınmamıştır. YHB üretiminde, yaygın olarak kullanılan 0-5 mm çapında kırma taş kum kullanılmıştır. YHB'ler içerisine kum 35x65 cm boyutlarında torbalar halinde yerleştirilmiştir (Şekil 3.17). Buradaki temel maksat çarpışma esnasında karayoluna kum taneleri yayılarak başka kazaların oluşmasının önüne geçmek ve çevre kirliliğine sebep olmamaktır. YHB testleri için her bir torbaya

yaklaşık 55±2 kg kum koyulmuştur. Daha sonra kum torbalarının ağız kısımları kapatılmıştır.




Şekil 3.17. YHB'ler içerisine yerleştirilen kum torbaları.

Tam yaş halde kullanılan ahşap malzemeler 72 saat süre ile Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi laboratuvarında bulunan içi su dolu bir havuzun içerisinde tamamen batırılmış şekilde bekletilmiştir (Şekil 3.18). Ayrıca tam yaş halde kullanılacak kum torbaları (daha önceden torbalara doldurulup ağızları dikili olarak), içi su dolu bir havuzun içerisine 24 saat bekletilmiştir.



Şekil 3.18. Köknar kerestelerin su havuzuna yerleştirilmesi.

YHB montajı için öncelikle metal ızgara prefabrik betonun üzerinde kendileri için açılmış olan yuvalara oturtulmuştur (Şekil 3.19).

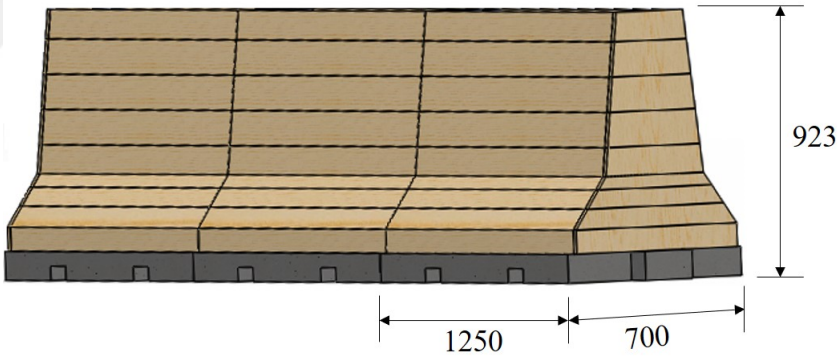


Şekil 3.19. Metal ızgaraların prefabrik beton üzerine yerleştirilmesi.

Metal ızgara sınırları içerisine YHB'lerin üst kısmında 300 mm boşluk kalacak şekilde kum torbaları yerleştirilmiştir. YHB'nin uzun kenarları boyutlandırılmış olan ahşap malzemeler ile kapatılmıştır (Şekil 3.20). YHB'lerin üst kısmında 300 mm yüksekliğinde oluşturulan boşluğa bitki yetiştirilebilmesi için bitkisel toprak konulmuştur. Art arda eklenen YHB'lerin kısa kenarları birbirlerine yaslanacağından bu kenarları ahşap malzeme ile kapatmak maliyeti artıracaktır. Bu nedenle YHB'lerin kısa kenarları seri başlangıcı ve bitiminde kapatılacaktır. Şekil 3.21'de YHB'lerin ölçüleri yer almaktadır.



Şekil 3.20. YHB'nin köknar keresteler ile kapatılması.



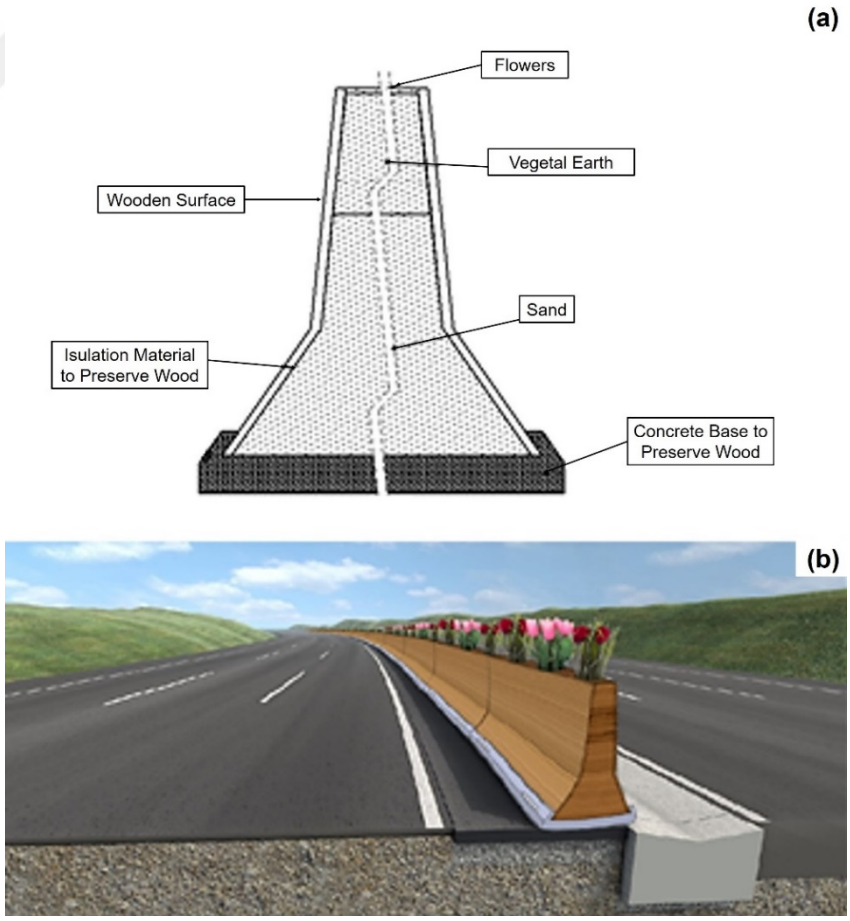

Şekil 3.21. YHB'lerin kenarlarının köknar keresteler ile kaplanması (mm).

EN 1317 standardına göre YHB'lerin test edilebilmesi için test esnasında belirli uzunlukta bariyer hattının elde edilmesi gerekmektedir. Literatür çalışmaları doğrultusunda en az 3 adet YHB'nin birbirine bağlanmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Buradaki esas amaç YHB'lerin birbirine bağlandıkları andaki toplam performansını gözlemlemektir. Her tip YHB için yapılan testler 3'er kez tekrar edilmiştir. Sadece orta kısımda yer alan YHB hasar gördüğünden dolayı her iki yanda kullanılan YHB'ler diğer tekerrürlerde yeniden kullanılmıştır. Bu nedenle her tip YHB testi için 3 adet YHB üretilmiştir. Toplamda 3 grup, 12 tip YHB olduğundan dolayı optimizasyon testleri haricinde toplam 36 adet YHB üretilmiştir. Bunun yanı sıra

bağlantı noktasının test edilmesi için 1 adet, sadece kum etkisini görmek için 1 adet ve sadece ahşap etkisini görebilmek için 1 adet olmak üzere ilave olarak 3 adet YHB üretimi gerçekleştirilmiş olduğundan bu sayı toplamda 39 adet olmuştur.

1 adet YHB için 0,27 $m^3$ kum ve 0,1 $m^3$ toprak kullanılmıştır. 1 adet YHB üretmek için 20 mm kalınlığındaki ahşap malzemeden 0,043 $m^3$, 40 mm kalınlığındaki ahşap malzemeden ise 0,086 $m^3$'e ihtiyaç vardır. Üretilen 39 adet YHB için yaklaşık 2 $m^3$ köknar kereste kullanılmıştır. Bu kerestelerin yaklaşık 0,7 $m^3$'ü emprenye işlemine, diğer 0,7 $m^3$'ü ısıl işleme tabi tutulmuştur. Geriye kalan 0,7 $m^3$'ü ise herhangi bir işleme tabi tutulmamıştır. Bir adet bariyerin toplam ağırlığı 826 kg'dır.

Bu tez kapsamında tasarlanan YHB'lerin karayolu üzerindeki görünüşü Şekil 3.22'de model olarak verilmiştir. YHB'lerin karayolunda kullanımından önce standartlara uygun çarpışma testlerinden geçmesi gerekmektedir.




Şekil 3.22. YHB'lerin kısımları (a) ve karayolu üzerindeki görünüşü (b) [37].

Uygun bariyer gereksinimlerini karşılamak için çarpışma esnasında oluşan darbe kuvveti altında bariyer tepkisini analiz etmek, araç etkisinden kaynaklanan büyük gerilme kuvvetlerini aktarabilecek uygun bir tasarım geliştirmek ve dış hava şartlarında kullanım için bariyer dayanıklılığını değerlendirmek hayati önem taşımaktadır [27,37]. Ülkemizde herhangi bir çarpışma test merkezi bulunmaması, yurtdışındaki merkezlerin ise ilk etap testleri için ekonomik olmaması sebebiyle literatürde benzer amaçlarla kullanılan pandül sistemlerinden esinlenerek deneysel çarpışma sistemi geliştirilmiş ve YHB'lerin deneysel çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir.

# BÖLÜM 4

# YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERE EKOLOJİK YAKLAŞIM

## 4.1. GİRİŞ

Ülkelerin ekonomik kalkınma hedefleri ile küresel ekolojik çevre sorunları arasındaki çatışmanın şiddetinin azaltılabilmesi için günümüzde yenilenebilir malzeme kullanımına yönelim artış göstermiştir. Bu maksatla odun ve odun esaslı materyaller bu sorunun çözümü için hayati önem taşımaktadır [87].

Küresel iklim değişimi, insanların çeşitli faaliyetleri sonucunda meydana gelen, karbondioksit ($CO_2$), metan ($CH_4$), azot oksit (NO) gibi sera gazlarının atmosferde birikmesi sonucunda dünya yüzeyindeki sıcaklığın uzun periyotta yükselmesi olarak tanımlanmaktadır [88,89]. Sanayi devrimi ile birlikte, insan faaliyetlerinden kaynaklanan $CO_2$ emisyonu artışı, son yıllarda küresel iklim değişiminin artmasına neden olmuştur [58,90]. 18. ve 19. yüzyıllarda atmosferdeki $CO_2$ konsantrasyonu 280-290 ppm olarak belirlenmiştir. Sanayi ve teknolojinin gelişmesi ile fosil yakıtların kullanılması sonucunda günümüzde atmosferdeki $CO_2$ konsantrasyonu yaklaşık olarak 350 ppm'e kadar çıkmıştır. 1958 yılından itibaren atmosferdeki $CO_2$ miktarının %9 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Günümüzde her yıl bu oran 1 ppm artış göstermektedir [57]. Bu bulgular küresel iklim değişiminin tahmin edilenden daha hızlı olacağı argümanını desteklemektedir [91].

Ormanlar karasal ekosistemler içerisinde en önemli karbon yutak alanlarıdır [92]. Bu ekosistemlerde karbon öncelikle canlı biyokütlede depolanmaktadır [93]. Biyokütlenin ikincil bir fonksiyonu neticesinde ölü organik madde ve toprak karbon havuzları oluşturarak karbon depolamaktadır. Dolayısıyla da küresel iklim değişikliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [94]. Ormanlar canlı ve dinamik sistemlerdir. Ormanların doğal süksesyonu içerisinde ortaya çıkan ölümler ve çeşitli tahribatlar sonucunda canlı biyokütleden atmosfere karbon kayıpları olmaktadır [58]. Ormanların sağlıklı bir şekilde işletilmesi için uygulanan silvikültürel

faaliyetler sırasında çeşitli odun kaynaklı orman ürünü elde edilmektedir. Bunların uygun şartlarda kullanılması sayesinde içerdikleri karbonun uzun zamanlar boyunca korunması mümkündür [95].

Ormanlardaki odun hammaddesi halinde depo edilen canlı biyokütle, ağaçların gövde, dal ve köklerini oluşturan odunsu yapı bünyesinde olmaktadır. Odun ve odun kökenli ürünler, yapılarındaki karbon bileşiklerinin özellikleri nedeniyle, doğal olarak çeşitli oranlarda karbon içermektedir [96,97]. Söz konusu odunun hasat edildiğindeki yapacak ürün miktarı, endüstriyel ham madde miktarı, nihai üretime kadar olan süreçteki madde kayıpları karbon stokunda önemli değişikliklere neden olmaktadır. Ahşabın içerdiği karbonun atmosfere dönüş süresi; nihai kullanım ürünlerinin kullanım biçimleri, ürünlerin hizmet ömürleri ve hizmet ömrünün sonundaki yakıt olarak kullanım / geri dönüşüm veya ayrışmaya terk etme gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [95].

Ahşap malzeme, yapısındaki karbon bileşikleri nedeniyle, karbon stok potansiyeli yüksektir. Ayrıca ahşap malzeme üretim sürecinde çelik, alüminyum ve diğer malzemelere göre daha az enerjiye ihtiyaç duyar ve daha az $CO_2$ emisyonuna neden olur [49]. Literatürdeki çalışmalar ahşap malzemenin sera gazı emisyonunu azaltıcı etkisinden dolayı üretiminde daha yüksek enerji gerektiren ve daha fazla sera gazı salınımına neden olan malzemelerin yerini alması gerektiğini belirtmektedir [98,99]. Ahşap kullanımı, içeriğindeki karbon stokunun korunması ile küresel iklim değişimini yavaşlatabilir. Ahşap malzeme çelik ve alüminyum gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında üretim maliyeti, enerji tüketimi/gereksinimi ve üretiminde doğaya salınan sera gazı emisyonu açısından diğerlerine kıyasla çok daha üstündür [58].

Çelik, beton ve alüminyum gibi malzemelerin yerine orman ürünlerinin ikame edilmesi bu hammaddelerin üretimi esnasında kullanılan fosil yakıt tüketimini de düşürecektir [57].

Ahşap malzemenin diğer malzemeler yerine ikame edilmesinin küresel iklim değişimi üzerindeki hafifletme etkisini incelemek için oluşturulacak ürünün hammaddelerin toplanmasından bertarafına kadar bütün yaşam döngüsü boyunca çevresel yükü

dikkate alan bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA) yaklaşımı kullanmak gerekir [49].

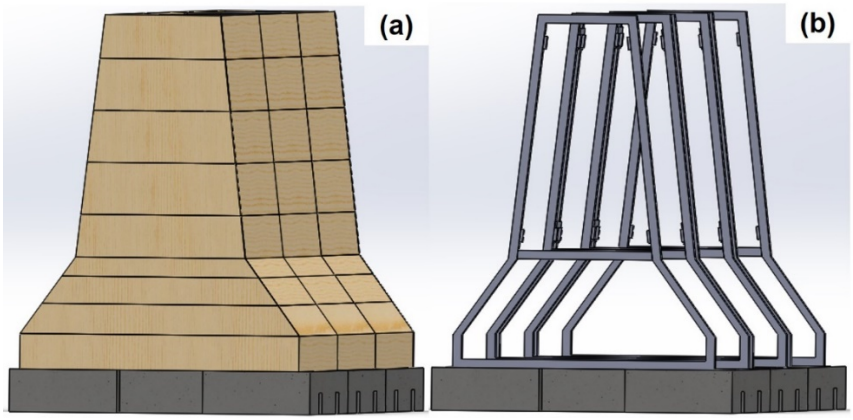
YDA, bir ürünün üretilmesinden başlanarak montajı, bakımı, onarımı, bertarafı ve bertarafı nedeni ile ortaya çıkan atıkların geri dönüşümüne kadar tüm yaşamı boyunca çevresel etkilerinin belirlendiği bir değerlendirme yöntemidir [100].

3'üncü bölümde detaylı olarak anlatılan YHB'ler tasarlanmıştır. Tezin bu bölümünde;

1. YHB'lerin beton ve çelik bariyerler yerine kullanılmasının karbon emisyonu açısından değerlendirilmesi için bu üç tip bariyerin üretiminde doğaya salınan $CO_2$ miktarları kıyaslanmıştır.
2. YHB üretiminde kullanılan köknar kerestelerin karbon tutma kapasitesi ve ormandaki biyokütle karşılığı hesaplanmıştır.
3. YDA yöntemi kullanılarak yeni tasarlanan YHB'lerin yaşam döngüsü süreci belirlenmiştir.
4. Günümüzde ahşap malzemenin kullanım ömrünün uzatılabilmesi için çeşitli ahşap koruma teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden özellikle emprenye ve ısıl işlem uygulamalarının ağaç malzeme içerisine hapsedilmiş karbon miktarını ne derece etkilediği incelenmiştir.

## 4.2. YOL KENARI BARİYERLERİ

YHB olarak isimlendirdiğimiz yeni tip bariyer içerisinde temel olarak kullanılan 5 tip malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeleri ahşap, kum, toprak, çelik ve beton olarak sıralayabiliriz. F tipi New Jersey bariyer şeklinde üretilen YHB'ler Şekil 4.1'de görülebilmektedir.




Şekil 4.1. F tipi New Jersey bariyer şeklindeki yenilenebilir hibrit bariyer (a) ve ana iskelet yapısı (b).

Şekil 4.1'de gösterilen bariyer (1 adeti) 1250 mm uzunluğunda, 700 mm genişliğinde ve 923 mm yüksekliğindedir.

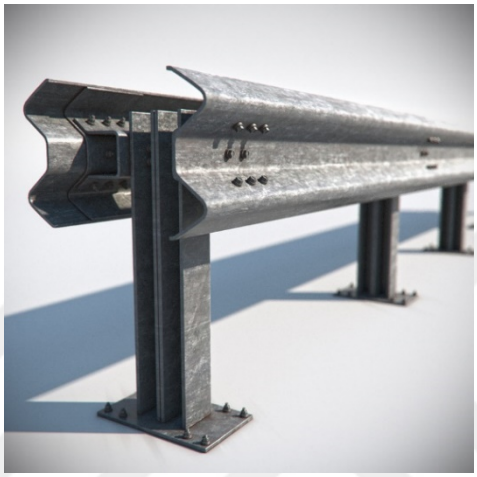
YHB, kendisi ile aynı ölçülere sahip olan ve C25 betondan üretilen F tipi New Jersey beton bariyer ile kıyaslanacaktır (Şekil 4.2). YHB'ler ile aynı boyutlardaki beton bariyerin toplam hacmi 0,721 $m^3$, ağırlığı ise 1683 kg'dır. Beton bariyer üretiminde kalıp içerisinde toplam 8 metrelik 8 mm çapında inşaat demiri kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. F tipi New Jersey beton bariyer.

S235JR kalitedeki çelikten üretilen W kirişli çelik bariyerler piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 4.3). W kirişli çelik bariyerler temel olarak W kiriş, dikme, takoz, bağlantı plakası, altıgen vida ve somunlar olmak üzere 5 kısımdan oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında YHB'ler ile kıyaslama yapılabilmesi için denk boyutlarda çift

taraflı W kirişli çelik bariyerin tüm parçaları ve ölçüleri belirlenmiştir. 1,25 m uzunluğundaki bir W kirişli çelik bariyerin üretimi için 2 adet 3x316x1250 mm boyutlarında W kiriş, 2 adet 5x62,5x1500 mm boyutlarında çelik dikme, 4 adet 5x70x350 mm ölçülerinde takoz, 2 adet 5x40x115 mm boyutlarında bağlantı plakası ve 28'er adet M10x45 mm ölçülerinde altıgen vida ve somun kullanılmıştır. W kirişli çelik bariyerin toplam ağırlığı 47,53 kg'dır.



Şekil 4.3. W kirişli çelik bariyer.

## 4.3. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERİN KARBON EMİSYONU AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

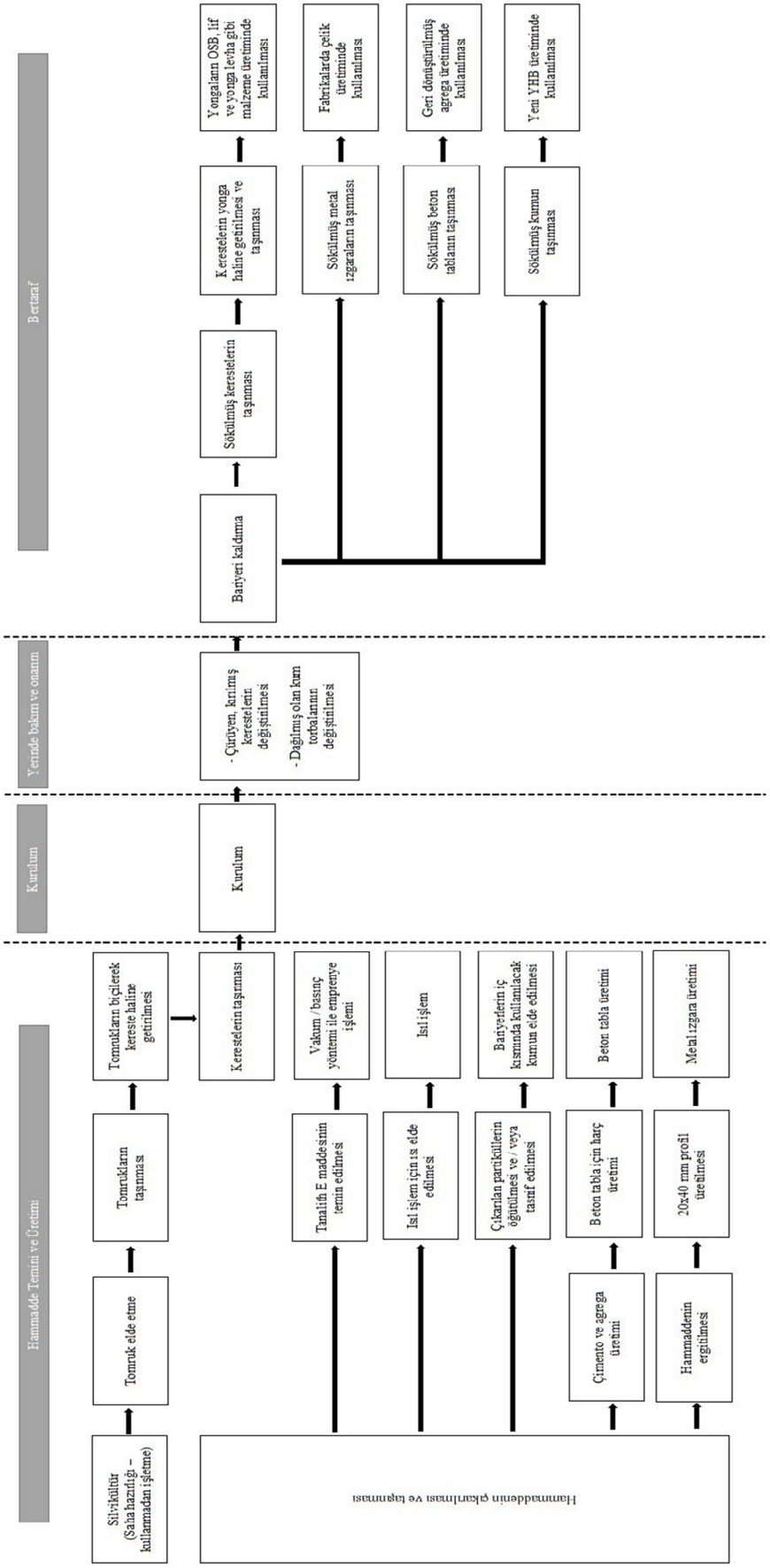
Ürünlerin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi ve çevresel etkilerinin belirlenebilmesi gibi amaçlar için ürünün yaşam döngüsü süreçleri oluşturulmalıdır [98,99,101]. YHB'lerin yaşam döngüsü süreçleri hammadde temini ve üretimi, kurulumu, yerinde bakım ve onarımı, bertarafı ve geri dönüşümü başlıklarından oluşmaktadır. YHB'lerin yaşam döngüsü süreçleri Şekil 4.4'ten görülebilmektedir.

Çizelge 4.1. 1,25 metre uzunluğundaki YHB, beton ve çelik bariyerlerin üretimi sürecinde kullanılan malzeme miktarları (kg).

| Malzemeler | YHB | F Tipi | W Kirişli |
|---|---|---|---|
| **Dikme** | - | - | 11,619 |
| **Takoz** | - | - | 3,856 |
| **Kiriş** | - | - | 28,740 |
| **Bağlantı plakası** | - | - | 1,928 |
| **Altıgen vida ve somun** | - | - | 1,390 |
| **Çelik donatı** | 13,640 | 3,155 | - |
| **Sunta vida** | 0,135 | - | - |
| **Kum (0 – 5 mm)** | 432,000 | - | - |
| **Bitki toprağı** | 160,000 | - | - |
| **Köknar kereste (tam kuru)** | 18,490 | - | - |
| **Beton** | 202,710 | 1680,000 | - |
| **Toplam** | 826,975 | 1683,155 | 47,533 |

Çizelge 4.2. Kullanılan malzemelerin ve işlemlerin sera gazı emisyon değerleri [49,102–104].

| Prosesler | Birim | $CO_2$ | $CH_4$ | $N_2O$ | Toplam Sera Gazı |
|---|---|---|---|---|---|
| **Çelik üretimi** | kg-$CO_2$eq/kg | 2,3200 | 0,0376 | 0,0444 | 2,4020 |
| **Galvanizleme** | kg-$CO_2$eq/kg | 2,3200 | 0,0376 | 0,0444 | 2,4020 |
| **Çelik vida / cıvata / somun üretimi** | kg-$CO_2$eq/kg | 2,3210 | 0,0390 | 0,0205 | 2,3804 |
| **Yapısal karbon çelik üretimi** | kg-$CO_2$eq/kg | 1,8040 | 0,0324 | 0,0104 | 1,8468 |
| **Tomruk üretimi** | kg-$CO_2$eq/$m^3$ | 5,8300 | 0,2390 | 0,0498 | 6,1188 |
| **Kereste üretimi (planyalanmış)** | kg-$CO_2$eq/$m^3$ | 5,3080 | 0,0390 | 0,1570 | 5,5040 |
| **Yeni karıştırılmış beton üretimi** | kg-$CO_2$eq/$m^3$ | 289,5000 | 2,8155 | 1,0609 | 293,3764 |
| **Transport (4 tonluk kamyon)** | kg-$CO_2$eq/t km | 0,1502 | 0,0057 | 0,0007 | 0,1566 |




Şekil 4.4. YHB'lerin yaşam döngüsü süreçleri [105].

YHB'lerin üretim sürecinde emprenye ve ısıl işlem aşamalarına da yer verilmiştir. Bu işlemler YHB'lerin üretimi için zorunlu olmadığından ve opsiyonel olduklarından dolayı çalışmadaki üretim süreçlerine dahil edilmemişlerdir. 1,25 metre uzunluğundaki YHB, beton ve çelik bariyerlerin inşası için gerekli olan malzeme miktarları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Bu bariyerlerin üretiminde kullanılan malzemelerin ve uygulan işlemlerin sera gazı emisyon değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 ve 4.2'deki değerler dikkate alındığında YHB, beton ve çelik bariyerlerin üretiminde doğaya salınan sera gazı emisyonları Çizelge 4.3'teki gibi hesaplanmıştır. Her işlem için fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının ($CO_2$, $CH_4$, $N_2O$) ne derece azaldığı tespit edilmiştir. Bu işlem tüm bariyerler için geçerlidir. Her sera gazının 100 yıllık küresel iklim değişimi potansiyelleri (GWP100) ($CO_2$: 1, $CH_4$: 34, $N_2O$: 298) kullanılarak $CO_2$ eşlenikleri (kg-$CO_2$eq) gösterilmiştir.

Burada YHB üretiminde kullanılan metal ızgaralar ile beton bariyer üretiminde kullanılan inşaat demiri yapısal karbon çelik sınıfında olacak şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca çelik bariyer üretiminde kullanılan dikme, takoz, kiriş ve bağlantı plakası genel çelik sınıfında değerlendirilmiştir. Çelik bariyerlerde kullanılan tüm malzemeler galvanizleme işlemine tabi tutulmuş şekilde hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bariyer üretiminde deniz kumu kullanıldığından dolayı sadece transport esnasında sera gazı emisyonu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kum ve toprak temininde oluşan sera gazı emisyonu değerleri hesaplanmıştır.

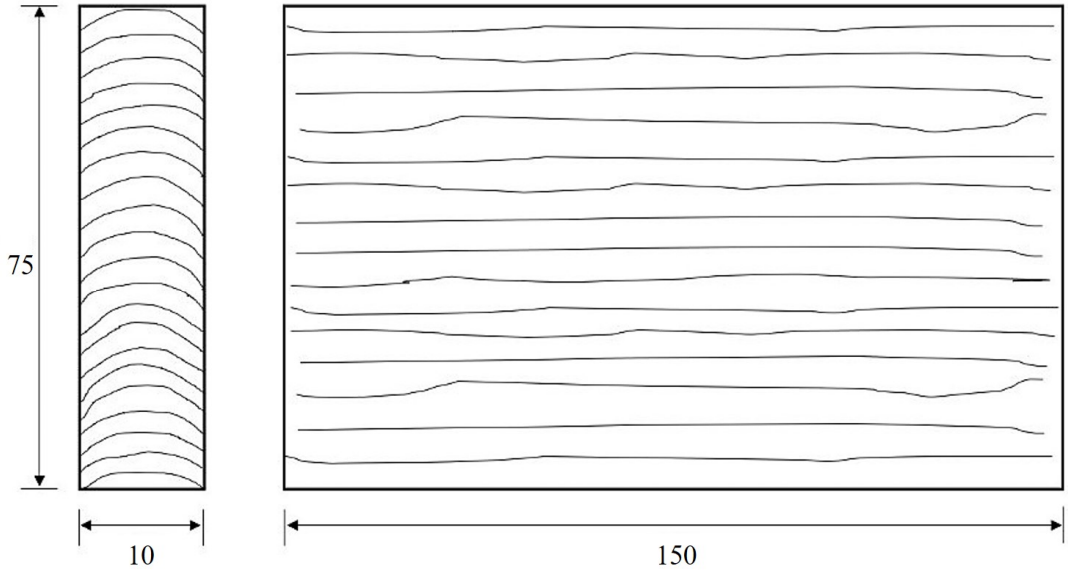
Çizelge 4.3. YHB, beton ve çelik bariyer üretiminde doğaya salınan toplam sera gazı emisyon değerleri (kg-CO2eq).

| Malzemeler | YHB | F Tipi | W Kirişli |
|---|---|---|---|
| **Dikme** | - | - | 27,909 |
| **Takoz** | - | - | 9,262 |
| **Kiriş** | - | - | 69,033 |
| **Bağlantı plakası** | - | - | 4,631 |
| **Altıgen vida ve somun** | - | - | 3,309 |
| **Galvanizleme** | - | - | 114,174 |
| **Çelik donatı** | 25,190 | 5,827 | - |
| **Sunta vida** | 0,249 | - | - |
| **Kum (0-5 mm)** | 0,042 | - | - |
| **Bitki toprağı** | 0,016 | - | - |
| **Kereste üretimi (planyalanmış)** | 0,237 | - | - |
| **Beton** | 25,524 | 211,524 | - |
| **TOPLAM** | 51,258 | 217,351 | 228,318 |

Çizelge 4.1'e göre üretiminde doğaya salınan toplam sera gazı miktarları kıyaslandığında YHB'ye göre beton ve çelik bariyer üretiminde yaklaşık 4,5 kat daha fazla sera gazı doğaya salınmaktadır. Literatürde ahşap malzemenin üretiminde daha çok enerji ihtiyacı duyulan malzemeler yerine kullanımının sera gazı emisyonunu azaltıcı etki yaptığı belirtilmektedir [106–110]. Bu sonuçlar literatürü desteklemektedir.

## 4.4. ODUN KORUMA YÖNTEMLERİ VE HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA TESTİNİN ODUNDAKİ KARBON MİKTARI ÜZERİNE ETKİSİ

75x10x150 mm (radyal x teğet x boyuna) boyutlarında 33 adet köknar numunesi hazırlanmıştır (Şekil 4.5). Numunelerin 3 tanesi kontrol grubu olarak hiçbir işleme tabi tutulmamış, 6 adet numune sadece yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş, 9 numune sadece emprenye işlemine tabi tutulmuş, 6 numune 150 ºC'de, 6 numune ise 210 ºC'de ısıl işleme tabi tutulmuştur.




Şekil 4.5. Emprenye, ısıl işlem ve yaşlandırma işlemine tabi tutulan numune boyutları (mm).

Köknar numuneler, atmosferik basınç altında ve hava ortamında laboratuvar tipi bir fırında 150 ve 210 ℃ sıcaklıklarda 2 saat süre ile ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemin ardından tüm numuneler 7 gün süre ile 65±5% bağıl nem ve 20±2°C'de bir inkübatörde kondisyonlanmaya bırakılmıştır.

Emprenye işlemi, Kastamonu Üniversitesi, Orman Fakültesi, Emprenye laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Emprenye maddesi olarak piyasada yaygın kullanılan, çevre dostu ve insan sağlığına zararı olmayan Tanalith-E seçilmiştir.

Emprenye maddesinin yoğunluğu 1,3 gr/cm$^3$ ve konsantrasyonu %3'tür. Emprenye işleminde numunelere 30 dakika boyunca 400 mm/Hg ön vakum uygulanmıştır. Emprenye sıvısının kazana sevk edilmesinden sonra örneklere 60 dakika süre ile 4 bar basınç uygulanmıştır. Emprenye işleminin ardından numuneler üzerindeki fazlalık emprenye maddesi temizlenerek uzaklaştırılmıştır. Daha sonra Eşitlik 4.1'e göre retensiyon miktarları (kg/m$^3$) hesaplanmıştır.

$$R\ (\mathrm{kg/m^3}) = \frac{(Ma - Mb) \times C}{V} \times 10 \qquad (4.1)$$

Burada;

*Mb* : Odun numunesinin emprenye işleminden önceki ağırlığı (g);

*Ma* : Odun numunesinin emprenye işleminden sonraki ağırlığı (g);

*C* : Emprenye çözeltisinin konsantrasyonu (%);

*V* : Odun numunesinin hacmini ($m^3$) ifade etmektedir.

Emprenye işleminin ardından örnekler fiksasyon işleminin gerçekleşebilmesi için 22±3 ℃'de ve %65 bağıl nemde 10 gün süre ile bekletilmiştir.

Elementel karbon analizi Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Laboratuvarında bulunan "Eurovector EA3000-Single" cihazında ASTM D 5373 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Her grup köknar numunelerden 3'er adet olmak üzere toplam 27 adet numune Bartın Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında hızlandırılmış yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma işlemi QUV-Lab Product® marka hızlandırılmış yaşlandırma cihazında 365-295 nm dalga boyunda çalışan UVA-340 lambası kullanılarak 300 ve 600 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Bu yaşlandırma süreleri içerisinde deney numuneleri üçlü döngü 0,75 W/$m^2$ UV ışığı altında 4 saat, 50 °C'de 2 saat kondisyonlama ve 15 dakika su spreyi şeklinde devam eden bir program döngüsünde bekletilmiştir.

Odun koruma yöntemleri ve yaşlandırma işleminin odunun karbon içeriği üzerine etkisinin araştırılabilmesi için emprenye ve ısıl işlem görmüş köknar numuneler yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş ve elementel karbon analizi yöntemi ile içerdikleri karbon oranları belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Retensiyonun ve yaşlandırma işleminin karbon oranı üzerine etkisi (%).

| | Yaşlandırma Tipi | | |
|---|---|---|---|
| | **Yaşlandırılmamış** | **300 saat** | **600 saat** |
| **Kontrol** | 48,52 | - | - |
| **Yaşlandırılmış Kontrol** | | 47,60 | 48,24 |
| **Emprenye İşlemli** | - (10,13) | 48,43 (9,94) | 48,12 (11,09) |
| **Isıl İşlemli (150 ºC)** | - | 48,35 | 48,05 |
| **Isıl İşlemli (210 ºC)** | - | 49,57 | 49,81 |
| Parantez içindeki veriler retensiyon değerlerini göstermektedir ($kg/m^3$) | | | |

Kontrol grubu köknar numunesinin karbon oranı (%48,52), emprenye ve ışıl işlem uygulanmış örnekler ile karşılaştırılmıştır. Tüm numeneler kıyaslandığında 210 ºC'de ısıl işleme maruz bırakılmış köknar numunelerin en yüksek karbon oranına sahip olduğu görülmüştür. Yaşlandırma işlemi ile ısıl işlem görmüş köknar numunelerde ortalama karbon oranı (%49,69) artmıştır. Emprenye işlemine tabi tutulmuş numuneler ile kontrol grubu numuneleri kıyaslandığında emprenye işleminin karbon oranı üzerine etkisinin önemsenmeyecek derecede olduğu anlaşılmaktadır. Diğer yandan emprenye işlemine tabi tutulmuş numunelerin yaşlandırma işlemi ile birlikte karbon oranının çok az miktarda azaldığı görülmüştür.

Isıl işlem sırasında hemiselülozlar hidroliz reaksiyonları ile birlikte oligomer ve monomerlere ayrışırlar. Arabinoz ve galaktoz gibi yan zincir bileşenleri ayrılır ve bunu mannoz glikoz ve ksiloz gibi ana bileşenlerin bozunması izler. Pentoz ve heksozlar sırasıyla furfural ($C_5H_4O_2$) ve hidroksimetilfurfural ($C_6H_6O_3$)'a dehidrate olur. Formaldehid ($CH_2O$) gibi diğer aldehidler (O=CH-) ligninde Cγ'den bölünmede olduğu gibi karbonhidratların $C_6$'dan bölünmesi sebebiyle bulunur. Diğer yandan hemiselülozun asetil gruplarından asetik asit ayrılır. Odundaki asetil ($COCH_3$) içeriği azalır. Isıl işlem ile odunun karbon ve lignin oranı genel olarak artmaktadır. 200°C'den 250°C'ye kadar $CO_2$ ve diğer bileşikler ligninden ayrılır [64,111]. Isıl işlem ile birlikte odun yapısındaki bu değişimler ısıl işleme maruz bırakılmış köknar numunelerdeki karbon oranının artmasına neden olmuş olabilir.

## 4.5. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYER ÜRETİMİNDE KULLANILAN ODUNUN ORMANLARDAKİ BİYOKÜTLE EŞDEĞERİ VE KARBON STOK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

YHB'lerin üretimi için kullanılan köknar keresteler, kabuklu köknar tomruklardan %50 zayiat ile elde edilmektedir [112]. Bu tomrukların ormandan istihsalinin neden olacağı, canlı biyokütle kaybı "Land Use, Land Use-Change and Forestry" (LULUCF) kılavuzunda belirtilen kurallara göre hesaplanmıştır. Yuvarlak odun kesimlerinden kaynaklanan karbon kaybının tahmini Eşitlik 4.2'ye göre yapılabilmektedir. Bu eşitlikten yararlanarak, YHB'lerin üretimi için gerekli kerestenin orman biyokütlesindeki eşdeğeri olan yer üstü biyokütle (AGB) ve canlı biyokütle içindeki yer üstü karbon stoklarından kaynaklanan karbon kaybı tahmin edilmiştir.

$$L_{fellings} = H \; x \; D \; x \; BEF_2 \; x \; (1 - f_{BL}) \; x \; CF \quad (4.2)$$

$$AGB = H \; x \; (1 + BEF_2) \quad (4.3)$$

$$L_{ACS} = AGB \; x \; D \; x \; CF \quad (4.4)$$

Burada;

$L_{fellings}$ : Ticari kesimlere bağlı karbon kaybını (kgC);

$H$ : Ormandan çıkarılan yuvarlak odun hacmini ($m^3$);

$D$ : Odunun yoğunluğunu ($kg/m^3$)

$BEF_2$ : Ormandan çıkarılan yuvarlak odun hacminin yer üstü biyokütleye (kabuk dahil) dönüştürülebilmesi için genişletme faktörünü (boyutuz);

$f_{BL}$ : Ormanda çürümeye bırakılan biyokütle fraksiyonunu (boyutsuz);

$CF$ : Kuru maddenin karbon oranını (varsayılan 0,5);

$AGB$ : Yer üstü yaşayan biyokütleyi ($m^3$);

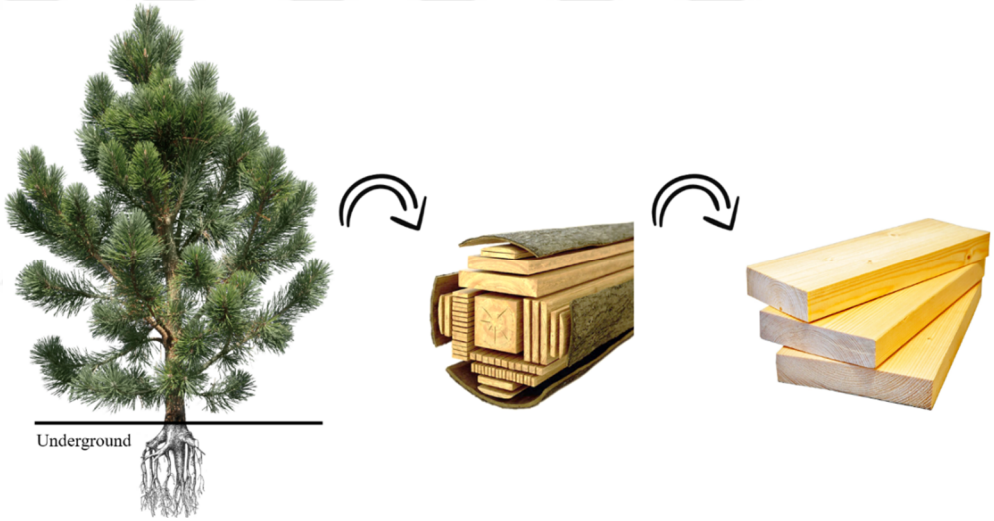
$L_{ACS}$ : Canlı biyokütlenin yeraltı karbon stoklarından kaynaklanan karbon kaybını (kgC) ifade etmektedir [93].

Toplam karbon miktarını $CO_2$ eşleniğine çevirmek için öncelikle bileşiğin ve atomların molekül ağırlıklarını bilmek gerekmektedir. Karbonun molekül ağırlığı 12 g/mol, oksijenin 16 g/mol ve $CO_2$'in 44 g/mol'dür. Karbonun $CO_2$ eşdeğerini

hesaplayabilmek için dönüşüm faktörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu faktör $CO_2$'nin molekül ağırlığını karbonun molekül ağırlığına oranlanması ile bulunmaktadır (3,67).

Literatürde üretiminde ahşap kullanılan bariyerlerin karbon dengesine etkisinin ormandaki üretim dahil edilerek detaylı incelenmesi gerektiği önerilmektedir [49]. Bu nedenle YHB'lerin üretiminde kullanılan ahşap malzemenin ormandan elde edilme sürecindeki karbon dengesine etkisi incelenmiştir.

1 adet YHB üretiminde 0,043 $m^3$ köknar kereste kullanılmaktadır. Köknar tomruklardan kereste elde edilmesi esnasında %50 zayiat gerçekleşmektedir. Bu nedenle 0,043 $m^3$ köknar kereste elde edebilmek için 0,086 $m^3$ köknar tomruğa ihtiyaç duyulmaktadır.




Şekil 4.6. Ağaçtan keresteye dönüşüm [105].

0,086 $m^3$ köknar tomrukların üretilebilmesi için doğadan ne kadar ağaç kesilmesi gerektiğini tespit edebilmek için Eşitlik 4.2'deki denklemi adımlar halinde kullanılarak AGB'nin hesaplanması gerekmektedir.

Eşitlik 4.3'teki denkleme göre AGB'yi hesaplayabilmek için $BEF_2$ genişletme faktörünün bilinmesi gerekmektedir. $BEF_2$, iğne yapraklı ağaçlar için %24 ve yapraklı ağaçlar için %26 olduğu literatürde belirtilmektedir [113].

$AGB = H\ x\ (1 + BEF_2)$

$AGB = 0{,}086\ x\ (1 + \%24)$

$AGB = 0{,}10664$ $m^3$ olarak hesaplanır.

Özet olarak 1 adet YHB'nin kurulumunda kullanılan 0,043 $m^3$ köknar kerestenin üretilebilmesi için ormandan köknar ağacı keserek, yer üstü biyokütleden 0,10664 $m^3$ azaltılması gerekmektedir.

1 adet YHB kurulumunda kullanılan köknar kerestelerin ve bu kerestelerin elde edilebilmesi için orman biyokütlesinden eksilen toplam karbon miktarı ($L_{ACS}$) Eşitlik 4.4'teki denklemden yararlanarak hesaplanabilmektedir. Toplam karbon miktarının hesaplanabilmesi için köknar odununun yoğunluğunun (D = 430 kg/$m^3$) olup, yapılan analizlere göre işlem görmemiş köknar kerestesinin karbon oranı (CF=0,4852) bulunmuştur (Çizelge 4.4).

1 adet YHB kurulumunda kullanılan 0,043 $m^3$ köknar kerestenin karbon içeriği ($YHB_C$) şu şekilde hesaplanır:

$YHBc = 0{,}043\ x\ D\ x\ CF$

$YHBc = 0{,}043\ x\ 430\ x\ 0{,}4852$

$YHBc = 8{,}97$ kg C olarak hesaplanır.

Özetle 1 adet YHB kurulduğunda toplam 8,97 kg karbon stoklanmış olur. Aynı denklem yardımı ile YHB üretimi için doğadan kesilen ağacın içerdiği karbon miktarı;

$L_{ACS} = AGB\ x\ D\ x\ CF$

$L_{ACS} = 0{,}10664\ x\ 430\ x\ 0{,}4852$

$L_{ACS} = 22{,}25$ kg C olarak hesaplanır.

Toplam karbon değerlerini $CO_2$ eşdeğerine dönüştürecek olursak;

1 adet YHB için kullanılan kerestelerde;

$RHB_C = 8{,}97\ x\ 3{,}67 = 32{,}92$ kg-$CO_2$eq bulunur.

Bu kerestenin elde edilmesi için orman canlı biyokütlesinden azalan $CO_2$ miktarı;

$L_{ACS} = 22{,}50\ x\ 3{,}67 = 82{,}58$ kg-$CO_2$eq olarak hesaplanır.

Ancak biyokütlede meydana gelen bu kayıp YHB üretimi için çelik ve beton üretiminin aksine kasten yapılmamaktadır. YHB üretiminde kullanılan kereste, ormanların ekolojik ve silvikültürel ihtiyaçları kapsamında yapılan üretim faaliyetlerinin sonucunda ortaya çıkan tomruklardan yapılmaktadır. Ancak çelik ve beton üretimi için özel olarak yeraltından cevher çıkarma işlemi yapılmaktadır. Yani YHB üretimi maksadı ile ormandan ağaç kesilmemektedir. Silvikültürel amaçlarla ormanlardan elde edilen orman ürünlerinin YHB olarak kullanılmaması halinde inşaat, ambalaj sanayi gibi alanlarda daha kısa ömürlü malzemeler olarak kullanılması gerekecektir. Bu malzemelerin gereken koruyucu tedbirler alınarak YHB üretiminde kullanılması kerestenin içerdiği karbonun daha uzun süreler boyunca korunması sağlayabilecektir.

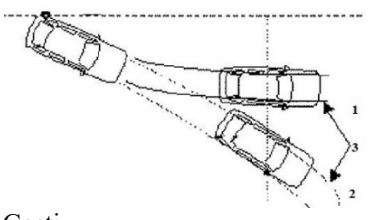
Bu sonuçlara göre YHB'lerin diğer bariyerlere göre daha çevre dostu bir bariyer olduğu söylenebilir. Küresel iklim değişiminin azaltılabilmesi için üretiminde sera gazı salınımının daha yüksek olduğu malzemeler yerine odun ve odun kökenli malzemelerin kullanılabilmesi ve kullanım alanının zenginleştirilebilmesi konusunda farklı çalışmalar yürütülmesi önerilmektedir.

# BÖLÜM 5

# BARİYER PERFORMANSININ BELİRLENME KRİTERLERİ

Dünyada mevcut bariyerlerin uluslararası standartlara uyup uymadıkları, yapılan testlerle kanıtlanmakta, standartları karşılayan bariyerlerin yapılan testlerin akabinde karayollarına yerleştirilmelerine izin verilmektedir. Farklı isim ve tiplerde üretilen otoyol bariyerlerinin karayollarında kullanım izni alabilmesi için Amerika'da NCHRP R350, Avrupa'da EN 1317 standartlarına uygun bazı testlerden geçmesi ve belirli kriterleri karşılaması gerekmektedir. Bu iki standardın nitel test kriterleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. NCHRP R350 ile EN 1317 standardına göre nitel test kriterlerinin kıyaslanması [114].

| **Değerlendirme Faktörü** | **NCHRP R350 Değerlendirme Kriteri** | **EN 1317 Değerlendirme Kriteri** |
|---|---|---|
| **Yapısal Yeterlilik** | Araç yol içerisinde kalmalı ve yeniden yönlendirilmelidir. Bariyerin yanal sapması kabul edilebilir. Araç bariyere saplanmamalı, bariyerlerin alt ve üst kısmından geçmemelidir. | Araç yol içerisinde kalmalı ve bariyer aracı yeniden yönlendirmelidir. Yanal sapma ölçülür ve nicel kriterler ile detaylandırılır. |
| **Yolcu Riski** | Bariyer üzerindeki elemanlar araç içerisinde yolcu bölmesine nüfuz etmemeli veya nüfuz etme potansiyeli göstermemelidir. Sürücü ve yolcu bölümünde ciddi yaralanmalara sebebiyet verecek deformasyona yol açmamalıdır. | Bariyerlerin ana kısımları çarpışma sırasında bariyer üzerinden ayrılmamalıdır. |
| | Araç, çarpışma esnasında ve sonrasında dik konumda durmalıdır. Orta düzeydeki salınma, eğilme ve yalpalama kabul edilebilir. | Test bölgesinde bariyerin devrilmesi kesinlikle kabul edilemez. |
| **Araç Yörüngesi** | Çarpışma sonrasında araç yörüngesinin bitişik şeritlere girmemesi tercih edilir. | Aracın yönlendirilmesi "CEN box" kriterine uygun olmalıdır.   1: Geçti<br>2: Başarısız<br>3: Tekerlek izleri |

Bu çalışmada EN 1317 standardına uygun olarak gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon ortamında çarpışma testleri yürütülecektir. Buna göre; gerçek bir araç, standartlarda belirtilen koşullar altında (çarpma hızı, darbe açısı vs.) performansı belirlenmek istenen bariyere çarptırılarak fiziksel çarpışma testine tabi tutulur. Aynı testin farklı tip araçlar için farklı açı ve hız değerlerinde tekrarlanması gerektiği düşünüldüğünde bu yöntemin oldukça maliyetli olduğu görülmektedir. Bu yüzden özellikle son yıllarda, çarpışma testlerinin 'Sonlu Elemanlar Metodu' kullanılarak bilgisayarlar yardımıyla sanal ortamda simüle edilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bilgisayarlar kullanılarak gerçekleştirilen sanal çarpışma analizleri sayesinde bariyer davranışlarının incelenmesi çok daha ekonomik olmaktadır ve daha da önemlisi araştırmacılar gerçek zamanlı çarpışma testlerine oranla çok daha fazla bilgiye çok daha hızlı biçimde ulaşabilmektedirler [42]. Simülasyon testlerinin ardından EN 1317'ye göre gerçek zamanlı çarpışma testleri yürütülecektir.

## 5.1. EN 1317 STANDARDI TEST KRİTERLERİ

EN 1317 standardında araç tipi, araç ağırlığı, çarpışma hızı ve darbe açısı baz alınarak çarpışma test kriterleri oluşturulmuştur. Çizelge 5.2'de EN 1317 standardına göre çarpışma test kriterleri görülmektedir.

Çizelge 5.2. EN 1317 standardına göre çarpışma test kriterleri.

| Test Kodu | Araç Tipi | Araç Ağırlığı (kg) | Çarpma Hızı (km/h) | Darbe Açısı (derece) |
|---|---|---|---|---|
| **TB11** | Otomobil | 900 | 100 | 20 |
| **TB21** | Otomobil | 1.300 | 80 | 8 |
| **TB22** | Otomobil | 1.300 | 80 | 15 |
| **TB31** | **Otomobil** | **1.500** | **80** | **20** |
| **TB32** | Otomobil | 1.500 | 110 | 20 |
| **TB41** | Kamyon | 10.000 | 70 | 8 |
| **TB42** | Kamyon | 10.000 | 70 | 15 |
| **TB51** | Otobüs | 13.000 | 70 | 20 |
| **TB61** | Kamyon | 16.000 | 80 | 20 |
| **TB71** | Kamyon | 30.000 | 65 | 20 |
| **TB81** | Tır | 38.000 | 65 | 20 |

Bariyer sistemlerinin ait olduğu hizmet seviyesi için uygulanması gereken test tipleri EN1317 standardında Çizelge 5.3'teki gibi belirtilmiştir. Her iki çizelge incelendiğinde üretilen YHB'lerin normal hizmet sınıfında olacağı, trafik hacminin ve

hızının düşük, ağır taşıt trafiğinin az olacağı tarihi, turistik ve doğa yollarında kullanılacağı öngörülmektedir. Buna bağlı olarak bu sınıfta belirtilen testlerden N1 koruma seviyesinde, TB31 nolu kabul testinin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Çizelge 5.3. EN 1317 standardına göre kabul testleri.

| Koruma Seviyesi | Koruma Seviyesi Kodu | Kabul Testi |
|---|---|---|
| **En Hafif Hizmet** | T1 | TB21 |
| | T2 | TB22 |
| | T3 | TB21 + TB41 |
| **Normal Hizmet** | **N1** | **TB31** |
| | N2 | TB11 + TB32 |
| **Ağır Hizmet** | H1 | TB11 + TB42 |
| | H2 | TB11 + TB51 |
| | H3 | TB11 + TB61 |
| **Çok Ağır Hizmet** | H4a | TB11 + TB71 |
| | H4b | TB11 + TB81 |

EN 1317 standardına göre çarpışma sonuçlarının değerlendirme kriterleri,

1. Yapısal yeterlilik;
   a. Bariyer aracı tutabilmeli ve üstünden veya altından geçmesine izin vermemeli.
   b. Bariyer kesinlikle yırtılarak veya yere yatarak araçla kontağını kaybetmemelidir.

2. Sürücü ve yolculara gelen darbe yükleri;
   a. Çarpışma esnasında oluşan ivmelenme ve savrulmalar standartlardan yüksek olmamalı.
   b. Araç çarpışma anında stabilitesini kaybetmemeli.

3. Aracın bariyerden ayrılma açısı az olmalıdır [115].

Bu kriterlerin nitel olarak değerlendirilebilmesi bazı kavramların sayısal verilere dönüştürülmesi ve bu verilerin belirli sınırlar içerisinde kalması beklenmektedir. Çalışma kapsamında YHB'lerin çalışma genişliği (W) ve çarpışma şiddeti (ASI) değerleri belirlenerek uygun sınırlar içerisinde olup olmadığı araştırılacaktır.

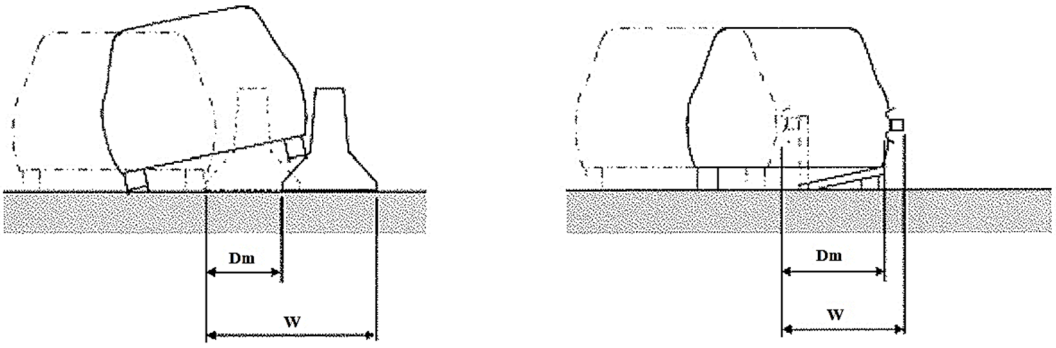
### 5.1.1. Çalışma Genişliği (W)

EN1317'ye göre yanal değiştirme, çalışma genişliği (W) ve defleksiyon (Dm) olarak ikiye ayrılmaktadır. Çalışma genişliği, bariyerin deformasyona uğramayan trafik yüzündeki (arka yüz) herhangi bir parçasının maksimum yanal ötelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 5.4'te çalışma genişliği sınıfları görülebilmektedir.

Çizelge 5.4. EN 1317'ye göre çalışma genişliği sınıfları.

| Deformasyon Kodu | Çalışma Genişliği (m) |
|---|---|
| **W1** | W ≤ 0,6 |
| **W2** | W ≤ 0,8 |
| **W3** | W ≤ 1,0 |
| **W4** | W ≤ 1,3 |
| **W5** | W ≤ 1,7 |
| **W6** | W ≤ 2,1 |
| **W7** | W ≤ 2,5 |
| **W8** | W ≤ 3,5 |

Dinamik defleksiyon, bariyerin trafiğe bakan yüzünün herhangi bir noktasının maksimum yanal dinamik deplasmanıdır. Dinamik defleksiyon ile çalışma genişliği arasındaki fark Şekil 5.1'de görülmektedir.




Şekil 5.1. Defleksiyon ve çalışma genişliği arasındaki fark.

Çalışma genişliği değeri bariyerlerin uygun bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan boşluk alanını temsil etmektedir. Bu alanın varlığı kazalarda oluşabilecek hasarın azaltılabilmesi için önemlidir. Çalışma genişliği değeri gerçekleştirilecek tüm gerçek zamanlı testler ve Ls Dyna simülasyon testleri için hesaplanacaktır.

### 5.1.2. Çarpma Şiddeti (ASI)

Çarpma şiddeti olarak bilinen ASI (Acceleration Severity Index) parametresi; çarpmanın araçta bulunan yolculara olan etkisinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Araç ağırlık merkezinin çarpma esnasında 3 yöndeki ivmelenmesi ölçülür ve bu değerlerin belirli aralıklarla (50 ms) belirli bir formülasyonla ortalamasının alınmasıyla boyutsuz ASI parametresi elde edilir. ASI değeri Eşitlik 5.1'e göre hesaplanmaktadır.

$$ASI = max\sqrt{\left(\frac{\bar{a}_x\,(t)}{12}\right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y\,(t)}{9}\right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z\,(t)}{10}\right)^2} \tag{5.1}$$

Burada;

$\bar{a}_x$ (t): x yönündeki maksimum ivmeyi (m/s$^2$)

$\bar{a}_y$ (t): y yönündeki maksimum ivmeyi (m/s$^2$)

$\bar{a}_z$ (t): z yönündeki maksimum ivmeyi (m/s$^2$) ifade eder.

ASI değerinin Çizelge 5.5'te verilen kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bu değerlerin üzerine çıkıldığında ise yolcu güvenliği açısından risk artmaktadır.

Çizelge 5.5. EN 1317'ye göre çarpma şiddeti düzeyleri [8].

| Çarpma Şiddeti Düzeyi | Çarpma Şiddeti Değeri | Açıklamalar |
|---|---|---|
| **A** | ASI ≤ 1,0 | En güvenli sınıf |
| **B** | 1,0 < ASI ≤ 1,4 | Orta güvenli sınıf |
| **C** | 1,4 < ASI ≤ 1,9 | En az güvenli sınıf |

ASI değeri gerçekleştirilecek tüm gerçek zamanlı testler ve Ls Dyna simülasyon testleri için hesaplanacaktır.

### 5.1.3. Teorik Başa Darbe Hızı (THIV)

EN1317 standardına göre çarpışma testinde hesaplanabilen bir diğer işlevsel parametre teorik başa darbe hızıdır (THIV). Bu parametre araç ile bariyerin çarpışması esnasında araç içerisinde bulunan yolcunun alabileceği hasar miktarını tespit etmekte kullanılmaktadır. Çarpışma anında hem aracın hem de yolcunun teorik olarak yatay yönde aynı hızda olduğu varsayılır. Bu nedenle test sonucunda aracın yuvarlanması, devrilmesi, eğimli veya dikey şekilde ötelenmesi durumları ihmal edilmektedir. EN 1317 standardına göre THIV parametresinin üst sınırı 33 km/s olarak belirtilmektedir. THIV Eşitlik 5.2'deki denkleme göre hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında THIV Trap isimli yazılım kullanılarak hesaplanmıştır.

$$THIV = \sqrt{V_x^2\,(t) + V_y^2\,(t)} \tag{5.2}$$

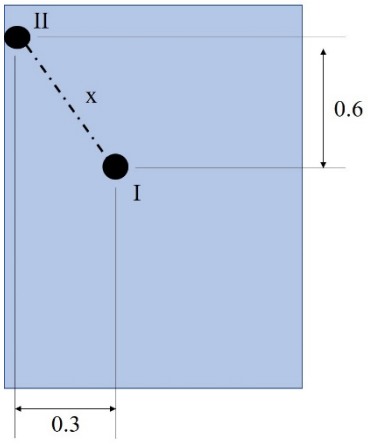
Burada;

$THIV$ : teorik başa darbe hızını (km/s)

$V_x$ (t) : araç içerisindeki yolcunun başının x yönündeki darbe hızını (km/s)

$V_y$ (t) : araç içerisindeki yolcunun başının y yönündeki darbe hızını (km/s) ifade eder.

Uçuş süresi (Tv), araç içerisindeki yolcunun baş pozisyonunun yatay düzlemde araç içindeki herhangi bir iç yüzeye ulaştığı süre olarak tanımlanmaktadır. Uçuş süresinin fazla olması çarpışma sırasında çarpışma şiddetinin araç içerisine daha az aktarıldığı, az olması ise daha fazla aktarıldığını ifade etmektedir. Uçuş süresinin hesaplanabilmesi için yolcunun bulunduğu alan Şekil 5.2'deki gibi kare şeklinde bir kutu olarak değerlendirilir. EN 1317'ye göre kutunun boylamasına yer değiştirmesi Dx: 0,6 m, yanal yer değiştirmesi ise Dy: 0,3 m olarak belirtilmiştir.




Şekil 5.2. Çarpışma sırasındaki araç içerisindeki yolcunun baş pozisyonu

Şekil 5.2'de yolcunun baş pozisyonunun I konumundan II konumuna gelirken aldığı mesafe X olarak belirtilmektedir. Yolcunun başı X mesafesini aldığı süre yani uçuş süresi Eşitlik 5.3'teki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$THIV = \frac{x}{T_v} \tag{5.3}$$

Burada;

$THIV$ : teorik başa darbe hızını (km/s)

$x$ : araç içerisindeki yolcunun başının ilk konumu ile çarpışma anındaki konumu arasındaki mesafeyi (m)

$T_v$ : uçuş süresini (sn) ifade eder.

# BÖLÜM 6

# DENEYSEL ÇARPIŞMA SİSTEMİNİN TEORİSİ VE TASARIMI

EN 1317'ye göre bariyerlerin yol kenarlarında kullanımının uygunluğu, gerçekleştirilecek çarpışma testlerinin ardından belirlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında daha önce Bölüm 5'te açıklanan N1 hizmet sınıfı, TB31 test kriterlerine göre çarpışma testi yürütülecektir. Standartta belirtilen kriterlere göre bu testte 1500 kg ağırlığındaki bir araç bariyere 80 km/s hız ve 20º'lik bir açı ile çarptırılmaktadır.

Tam ölçekli çarpışma testi bariyer performansını araştırmak için geleneksel bir mekanizma olsa da bu tür bir test hem araç satın almayı hem de tam uzunlukta bir bariyer üretmeyi gerektirmektedir. Bu şartlar baş edilmesi zor olan oldukça maliyetli bir durumu ortaya çıkarmaktadır. Diğer taraftan Ülkemizde herhangi bir çarpışma test merkezi bulunmamaktadır. Yurtdışında ilgili testlerin yürütülmesi için bütçe ve zaman gerektirmektedir. Bu nedenle literatürde benzer örnekleri bulunan alternatif pandül tipi çarpışma testinin yapılması planlanmıştır.

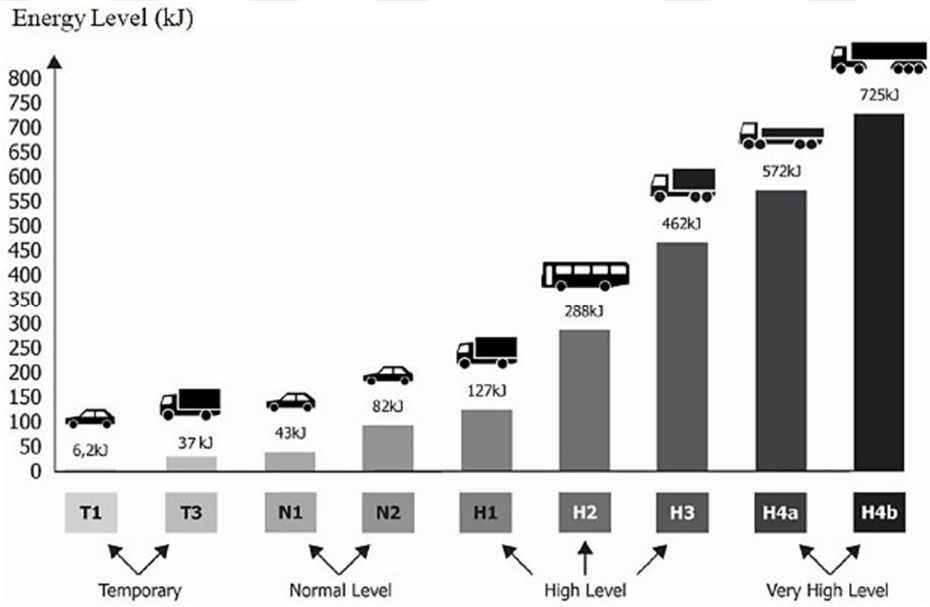
Pandül çarpışma testlerinin yürütülebilmesi için Mersin'de bulunan İskenderun Teknik Üniversitesi ile Çimsa Beton A.Ş. ortaklığında gerçekleştirilen beton bariyer çarpışma deneylerinde kullanılmış olan ve atıl durumda bulunan bir çarpışma düzeneği Karabük Üniversitesi Merkez Kampüsü'ne getirilmiştir (Şekil 6.1).

Getirilen pandül sisteminde deneme çarpışmaları yapılmış ve sistemden istenilen verim alınamamıştır. Ayrıca güvenlik kaygılarının da oluşması nedeniyle tez kapsamında gereksinimleri karşılayacak yeni bir çarpışma sisteminin kurulmasına karar verilmiştir. Bu sistem ile gerçek zamanlı çarpışma esnasında oluşan enerjiye yakın bir enerji seviyesinde çarpışma testlerinin yürütülmesi planlanmıştır.



Şekil 6.1. Mersin İli'nden getirilen pandül sistemi.

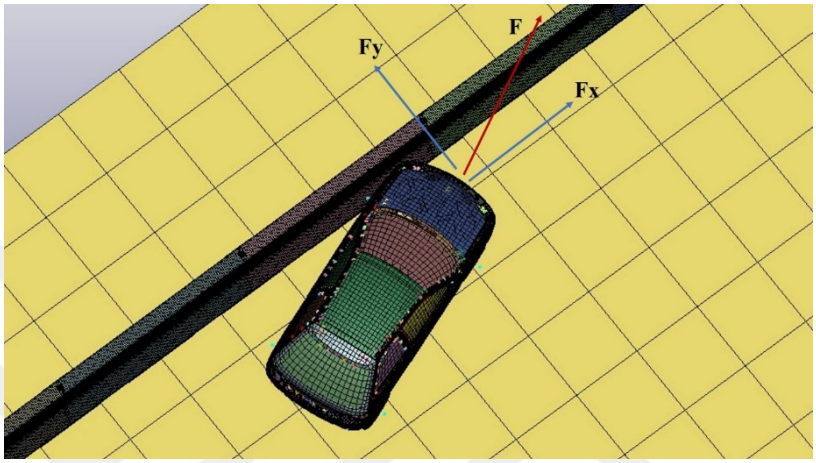
Daha önce Çizelge 5.3'te belirtilen hizmet sınıflarına göre gerçekleştirilen çarpışma testleri sonucunda bariyerler üzerinde oluşan enerji seviyeleri Şekil 6.2'den görülebilmektedir.




Şekil 6.2. EN 1317 standardına göre kabul testlerinde ortaya çıkan çarpışma enerjileri.

Bu çalışmada uygulanması planlanan TB31 nolu kabul testinde 43 kJ'lük bir enerjinin çarpışma esnasında ortaya çıkması gerekmektedir. Şekil 6.3'te temsili bir görüntüsü

bulunan TB31 nolu çarpışma testinde, 1500 kg ağırlığındaki bir araç 80 km/h hız ve 20º'lik bir açı ile bariyere çarpmaktadır. F kuvveti bariyere çarpan aracın kuvvet bileşenleri Fx ve Fy olarak tanımlanırsa, Fy bileşeni çarpışma sonucunda bariyer üzerine düşen kuvveti temsil eder. Fx kuvveti bariyer üzerine düşen kuvvet açısından önemsizdir.




Şekil 6.3. TB31 nolu çarpışma testi örneği.

Fy yönünde (bariyere düşen bileşen) oluşan toplam enerjinin 43 kJ olması gerekmektedir. Çizelge 6.1'de de belirtilen bu enerji Eşitlik 6.1'deki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times \left(\frac{V}{3{,}6}\ x\ \sin 20\right)^2 \tag{6.1}$$

Burada;

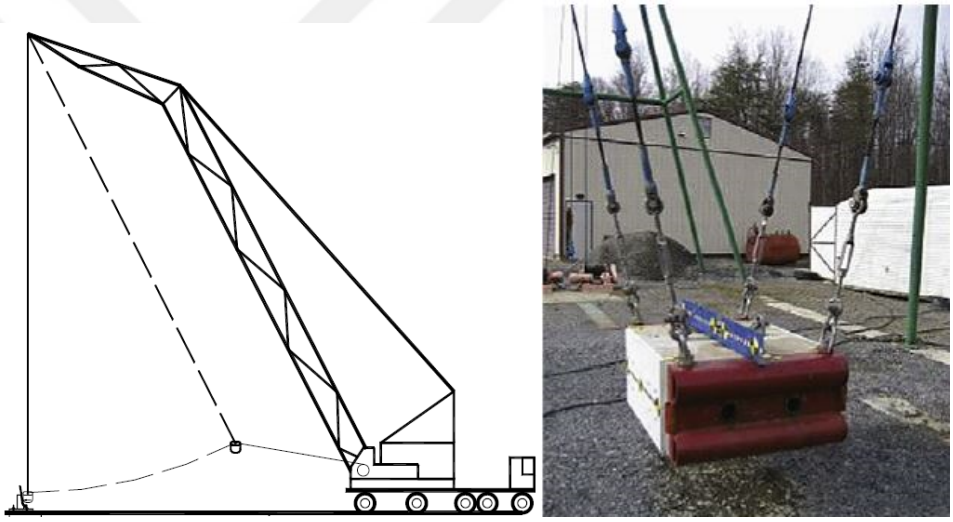
E: Fy yönünde oluşan enerji miktarını (J)

m: Araç ağırlığını (kg)

V: Araç hızını (km/s) ifade eder.

## 6.1. DENEYSEL ÇARPIŞMA SİSTEMİNİN TASARIMI

Literatürde pandül ve benzeri sistemler kullanılarak bariyer gibi güvenlik sistemlerinin analizlerinin gerçekleştirildiği birçok çalışma mevcuttur. El-Salakawy vd.[118], çalışmalarında cam elyaf takviyeli polimer çubuklar ile güçlendirilmiş beton köprü bariyerlerinin dayanıklılığını test etmek için arabalı bir vinç üzerine bağlanmış ağırlık kullanmışlardır (Şekil 6.4a). Gabauer vd. [119], W kirişli çelik bariyerlerin çarpışma testinde ABD'deki Federal Açık Alan Etki Laboratuvarı'nda bulunan ve Şekil 6.4b'den görülebilen bir pandül sistemi kullanmıştır. Yine benzer amaçlarla kullanılmış bir çok pandül sistemi literatürde mevcuttur [118–123].



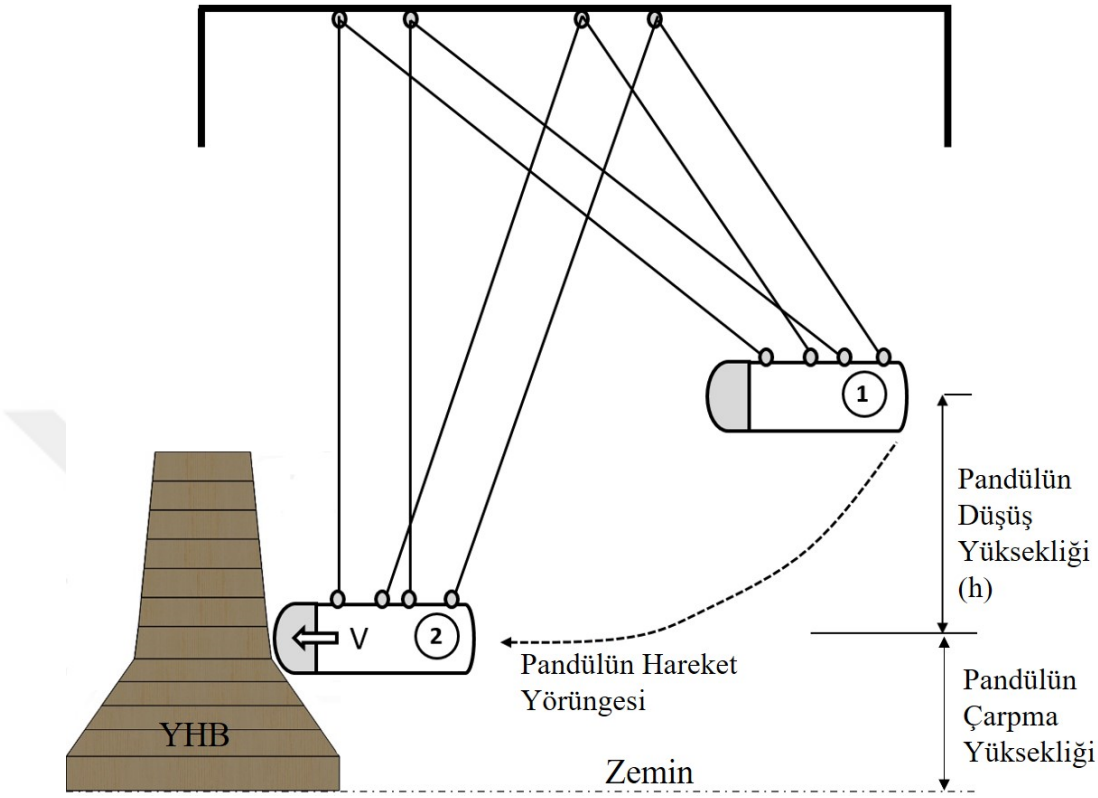
(a) (b)

Şekil 6.4. Arabalı vinç tipi pandül sistemi (a), ABD'deki bir pandül örneği (b).

Pandül tipi çarpışma sistemi genel olarak taşıyıcı bir çerçeve, bir pandül ve rijit çerçeveye bağlayan zincirlerden oluşmaktadır. Pandül belirli bir yüksekliğe kaldırılarak serbest düşüşe bırakılmaktadır. Böylece her defasında pandül aynı hızla bariyere çarparak aynı enerji uygulanabilmektedir. Çarpışma testlerinde hesaplanması gereken en önemli büyüklük, çarpışma anındaki kütlenin sahip olduğu "V" hızıdır.

Şekil 6.5'te, pandül sisteminin çalışma mantığı görülebilmektedir. Pandülün bariyere çarptığı yükseklik uygulanacak olan test kriterinde kullanılan araç tipinin tampon

yüksekliği olarak tanımlanmaktadır. Bu değer TB31 numaralı kabul testi için 50 cm olarak alınmıştır.




Şekil 6.5. Pandül sisteminin çalışma mantığı.

Pandülün kaldırıldığı 1 numaralı pozisyonundaki toplam enerjisi Eşitlik 6.2'deki potansiyel enerji denklemine göre hesaplanmaktadır. Potansiyel enerjinin maksimum olduğu bu noktada kinetik enerji bulunmamaktadır.

$$Ep = m.g.h \tag{6.2}$$

Burada;

Ep : Toplam potansiyel enerjiyi (J)

m : Çarpıştırılan pandül ağırlığını (kg)

g : Yer çekimi ivmesini ($m/s^2$)

h : Pandülün bırakıldığı yüksekliği (m) ifade eder.

Pandülün indiği andaki 2 pozisyonundaki toplam enerjisi Eşitlik 6.3'teki kinetik enerji denklemine göre hesaplanmaktadır. Çarpışma anında potansiyel enerji sıfırdır. Mevcut olan tüm potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşmüştür (hava sürtünmesi ihmal edilmiştir).

$$Ek = \frac{1}{2} . m . V^2 \tag{6.3}$$

Burada;

Ek : Toplam kinetik enerjiyi (J)

m : Çarpıştırılan pandül ağırlığını (kg)

V : Pandülün bariyere çarptığı andaki hızını (m/s) ifade eder.

Enerjinin korunumu kanununa göre pandül en alt seviyeye inip bariyer ile çarpışmadan hemen önceki potansiyel enerjisi tamamen kinetik enerjiye dönüştüğünden dolayı toplam Şekil 6.5'teki pandülün 1 konumundaki potansiyel enerjisi ile 2 konumundaki kinetik enerjisi birbirine eşit olacaktır. Pandülün bariyere çarpma anındaki hızının hesabı Eşitlik 6.5'teki denklemden bulunabilmektedir.

$$\sum Ep = \sum Ek \tag{6.4}$$

Eşitlik 6.4'e göre hesaplamalar yapılacak olursa Eşitlik 6.5'teki denklemden pandülün bariyere çarpma anındaki hızı hesaplanabilir;

$m . g . h = \frac{1}{2} . m . V^2$ ise;

$V = \sqrt{2. g. h}$ olarak bulunur. (6.5)

Bu hız değeri, darbe anında pandülün veya aracın sahip olduğu hızdır. h düşme yüksekliği aynı kaldığı sürece ve sürtünmeler ihmal edildiğinde darbe hızı V'nin her çarpışma için aynı olduğu görülmektedir. Özetlemek gerekirse, Şekil 6.5'te gösterilen pandülün 2 numaralı konumunda önüne yerleştirilecek bariyere uygulayacağı darbe

şiddeti sadece h düşüş yüksekliğine bağlı ve pandülün bariyere çarpma şeklinden bağımsızdır. Şekil 6.2'de belirtildiği gibi N1 test seviyesinde gerçek zamanlı bir çarpışma testinde çarpışma anında 43 kJ'lük bir enerji ortaya çıkmaktadır. Deneysel çarpışma testinde bu enerjinin elde edilebilmesi için 1500 kg ağırlığındaki pandülün düşüş yüksekliğinin (h) hesaplanması gerekmektedir. Eşitlik 6.2'deki potansiyel enerji formülü kullanılarak bu yüksekliğin hesaplanması mümkündür.

$Ep = m.g.h$

$43000 = 1500\,.\,9{,}8\,.\,h$ ise;

$h = 2{,}93\ metre$ olarak hesaplanır.

EN 1317 standardında araç-bariyer etkileşimi ayrıca aracın çarpışma boyunca ve çarpışma sonrası hareketinin tanımlanması amacıyla fotogrametrik alım yapılması gerektiği ifade edilmiştir. Bu tez kapsamında üretilecek olan çarpışma deney düzeneğine yüksek çözünürlüklü kamera yerleştirilerek ilgili verilerin gözlemlenmesi sağlanacaktır.

## 6.2. DENEYSEL ÇARPIŞMA SİSTEMİNİN İNŞA EDİLMESİ

Literatürde benzer örnekleri bulunan yeni bir deneysel çarpışma sisteminin Karabük Üniversitesi, Orman Fakültesi önündeki arazi üzerine kurulabilmesi için gerekli izinler alınmıştır. Ardından arazi üzerine kontrol odası maksadı ile kullanılacak bir kulübe monte edilmiştir (Şekil 6.6a). Sistemin kurulacağı alan parke taş ile kaplı olduğundan çarpışma testi için uygun değildir. Bu nedenle zemindeki parke kaplama ve altında yer alan kum tamamen kaldırılmıştır (Şekil 6.6b,c).




(a) (b) (c)

Şekil 6.6. Kontrol odası (a), pandül sisteminin kurulacağı zeminin hazırlanışı (b,c).

Çalışma alanında ve pandül sisteminde kullanılmak üzere 220 ve 380 volt elektrik hattı kontrol odasına kadar getirilmiştir. Pandül sisteminin ana iskeletini 4 metre genişliğinde ve 8 metre uzunluğundaki çatılar oluşturacaktır. Çatıları oluşturan metal elemanların et kalınlığı 10 mm, genişliği 100 mm ve kalınlığı ise 150 mm'dir. 2 adet çatının yan yana birleştirilmesi sureti ile ana iskeletin oluşturulması planlanmıştır. Böylece pandül sisteminin çalışma alanı 8 metre x 8metre olacak şekilde tasarlanmıştır. Pandül sisteminin yüksek ağırlıklar ile çalışacak olması ve çarpışma etkisi ile şiddetli salınımlar geçirecek olmasından dolayı zemine sabitlenmesi güvenlik açısından oldukça önem arz etmektedir. Pandül sisteminin 4 ayrı noktadan zemine ankrajlanması kararlaştırılmıştır. Bu maksatla beton zemin 70 x 40 x 60 cm (en x boy x derinlik) ölçülerinde kırılarak derinleştirilmiş ve beton kaidelerin imalatı için hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Pandül sisteminin ana iskeletinin zemine sabitlenebilmesi için yapılan hazırlık çalışmaları.

Beton zemin üzerindeki hazırlıkların tamamlanmasının ardından arabalı vinç yardımı ile çatılar kendileri için açılmış olan yerlere oturtulmuştur. Çatının zeminden yüksekliği 3,1 metredir. Ayarlanabilir teleskopik direkler ile geçici sabitleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dört kaidenin her biri için 10 mm kalınlığındaki inşaat demiri ile zeminin 60 cm altından başlanarak zeminin 1,5 metre üzerine kadar demir örgü yapılmıştır. Ardından beton kalıpları ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıplar içerisine C25 kalitede beton dökülerek sertleşmesi için beklenmiştir. Betonun kuruma süresinin sona ermesinin ardından kalıplar ve ayarlanabilir teleskopik direkler sökülerek pandül sisteminin ana iskeletinin inşası tamamlanmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Pandül sisteminin ana iskeleti.

Pandül sisteminin ana iskeletinin inşası tamamlandıktan sonra 1500 kg'lık pandülün çatı kısmına asılabilmesi için bir torna atölyesinde 4 adet mil ve millere uygun yataklar yaptırılmıştır. 24 mm kalınlığındaki miller ve 10 mm kalınlıktaki metal plakalar kullanılarak üretilen yataklar pandül sisteminin tam merkezine eşit uzaklıkta olacak şekilde tavan kısmına somunlar vasıtası ile monte edilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Pandülü taşıyacak mil ve yatakları.

Pandül kısmının üretimi için bazı kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Tek bir test türü için kullanılacak bir pandül üretmek geniş perspektifte iktisadi olmayacaktır. Pandülün ağırlığının ayarlanabilir olması farklı şartlarda çarpışma testlerinin gerçekleştirilebilmesinin önünü açacaktır. Diğer yandan çarpışma yüzeyinin oval bir yapıda olması, araç tamponlarını temsil etmesi, darbeye karşı dirençli olması ve tekrar tekrar kullanılabilecek olması dikkate alınan diğer hususlardır.

Pandül üretimi için 300 litrelik bir kompresör tankı kullanılmıştır. Tankın içi toplam ağırlığı 900 kg oluncaya kadar metal toz ile doldurulmuştur (Şekil 6.10). Tankın 900 kg'a ayarlanmasının nedeni EN1317 standardına en düşük araç ağırlığının 900 kg olmasıdır.



Şekil 6.10. Çarpışma tokmağı olarak kullanılacak olan tanka demir tozunun doldurulması.

Tankın üst kısmına ekstra bir depo monte edilmiştir. Deponun içi darası ile toplam ağırlığı 600 kg olacak şekilde metal tozu doldurulmuştur. Pandülün toplam ağırlığının 1500 kg olması sağlanmıştır (Şekil 6.11). Bu ağırlık gelecek çalışmalara göre değiştirilebilir şekilde tasarlanmıştır. EN 1317 standardında ±75 kg'a kadar hata payı kabul edilmektedir. Ayrıca pandülün arka kısmına test esnasında yükseğe kaldırmak için kullanılacak olan çeki demiri kaynatılmıştır.



Şekil 6.11. Pandül görselleri.

Oluşturulan pandülün tavandaki millere asılabilmesi için 8 mm kalınlığındaki çelik zincirler kullanılmıştır. Zincirler yeterli mukavemete sahip mapalar vasıtası ile hem tavandaki millere hem de pandülün dört bir tarafına sabitlenmiştir. Zincirler pandül

üzerinden 2 ön ve 2 arkada olacak şekilde 4 ayrı noktaya sabitlenmiştir. Tavanda ise ön iki zincir birinci mile, arka iki zincir ise ikinci mile asılmıştır. Zincirlerin tavanda birleştirilmesinin temel nedeni çarpışma esnasında pandülün salınım yapmasını engellemektir.

1500 kg ağırlığındaki pandülü gerekli seviyelere kaldırabilmek için 2 ton ağırlık kaldırabilecek kapasitede Sezginler Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş isimli firmadan Paftar marka 2 tonluk vinç temin edilmiştir. 380 volt enerji ile çalıştırılabilen vinç, sistemin arka kısmına yine mil ve somunlar vasıtası ile sabitlenmiştir. Halatın çekme doğrultusu ile pandülün çeki demiri çakışacak şekilde montaj işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.12). Vinç sisteminin çalışabilmesi için daha önce kontrol odasına getirilen 380 voltluk enerji gerekli sigorta ve bağlantı tertibatı kullanılarak organize edilmiştir. Sistemin yağmur, kar gibi etkenlerden korunabilmesi için çatı kısmı oluklu sac kullanılarak kapatılmıştır.



Şekil 6.12. 2 ton kapasiteli vinç

Çarpışma testlerine hazır hale getirilen sistemde, pandül salınımı gerçekleştirildiğinde sistemin de sallandığı görülmüştür. Sistemi daha güvenli hale getirebilmek için taban alanı 20x20 $cm^2$, et kalınlığı 8 mm olan 4 adet metal direğin sisteme monte edilmesine karar verilmiştir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. Direkler ile güçlendirilmiş gerçek zamanlı çarpışma sistemi.

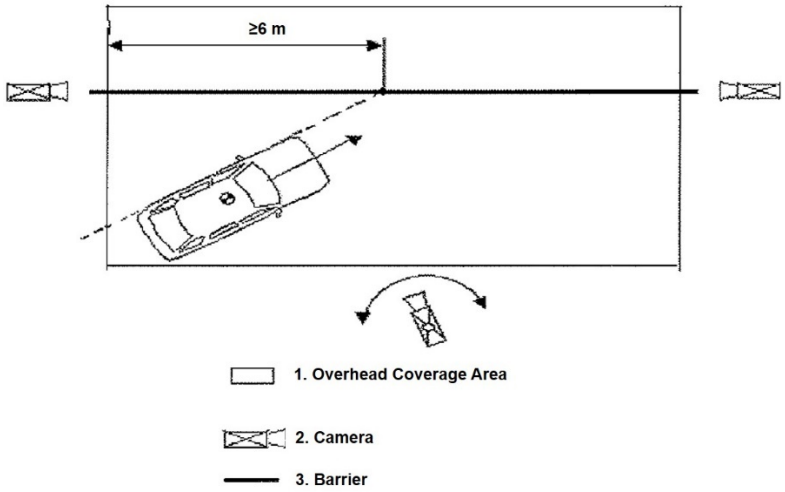
İki direk pandülün sağ ve sol tarafına, diğer iki direk ise vincin sağ ve sol tarafına kaynak vasıtası ile monte edilmiştir. Direkler beton zemine daha önce çelik dübeller vasıtası ile sabitlenmiş metal plakalar üzerine kaynatılarak monte edilmiştir. Güçlendirme işleminin ardından test edilen sistemde herhangi bir güvenlik sorunu olmadığı anlaşılmıştır.

# BÖLÜM 7

# DENEYSEL (PANDÜL) ÇARPIŞMA TESTLERİ

Ahşap malzemenin kalınlığı, emprenye, ısıl işlem ile ahşap ve kumun rutubet miktarı YHB'lerin çarpışma performansı üzerinde etkili olacağı değerlendirilmiş ve bu doğrultuda Çizelge 3.4'te belirtilen deneme matrisine göre YHB'ler üretilmiştir. Üretilen YHB'lerin deneysel çarpışma testine tabi tutulabilmesi için Bölüm 6'da detaylı olarak açıklanan pandül sistemi kullanılmıştır. Her grup YHB'lerden 3 başarılı tekrar olacak şekilde çarpışma testleri yürütülmüştür. Deneysel çarpışma testlerinde pandül (ağırlık merkezi ile zemin arasındaki mesafe), güvenli olarak maksimum kaldırılabildiği 1,73 m yüksekliğe kaldırılmıştır. Bu seviye her tekrarda aynı olacak şekilde testler uygulanmıştır. Bu sayede her bir çarpışmada 25,5 kJ'lük bir enerjinin YHB'lere uygulanması sağlanmıştır. Pandül çarpışma testi sırasında pandül hızı Eşitlik 6.1'deki denkleme göre hesaplanmış ve 61,33 km/s olarak bulunmuştur. Pandül tokmağının çarpma noktasının zeminden yüksekliği ile ilgili olarak EN 1317 standardında herhangi bir açıklama bulunmamaktadır. Tez kapsamında kullanılan TB 31 sınıfı ile ilgili literatür çalışmalarının ve C sınıfı otomobillerin tampon yüksekliklerinin incelenmesi sonucunda bu değerin 50 cm olması kararlaştırılmıştır.

EN1317 standardına göre bariyer çarpışma testinde çarpışma anında ve sonrasında aracın ve bariyerin davranışını net bir şekilde tanımlayacak şekilde fotogrametrik ölçüm yapılmasının yeterli olacağı ve kamera görüntülerinde bir referans ölçek görünmesi gerektiği belirtilmiştir. Şekil 7.1'de kamera yerleşimi gösterilmektedir.




Şekil 7.1. EN 1317'ye göre test esnasında kamera yerleşimi.

Bu doğrultuda pandül sistemine biri çarpışma noktasının 6 m gerisinde olacak şekilde yatay ölçüm alan (Casio Exilim Pro EX-F1), diğeri ise çarpma noktasında tepeden ölçüm alacak şekilde (GoPro Hero 5) 720 piksel ve 240 fps yüksek çözünürlüklü iki adet kamera yerleştirilmiştir. Elde edilen kamera görüntüleri vasıtasıyla gerekli ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle deney esnasında pandül sisteminin farklı noktalarına röper adı verilen referans ölçekleri yerleştirilmiştir (Şekil 7.2). Her bir referans ölçeğinin çapı 7,5 cm'dir.




Şekil 7.2. Pandül çarpışma testi referans ölçekleri.

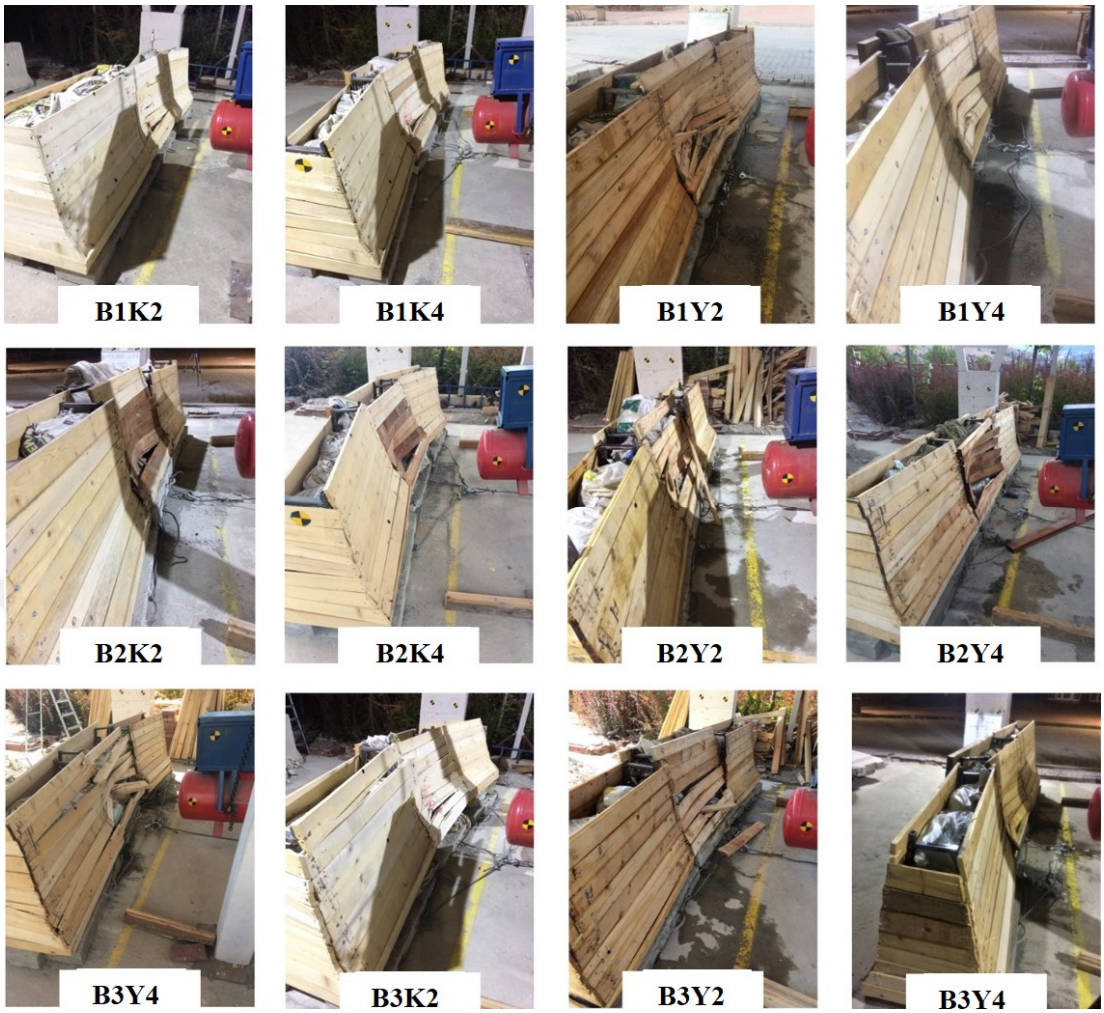
Video kayıtlarının düzenlenmesi işlemi "DaVinci Resolve 16.0" yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Videolardan alınan maksimum ötelenme görüntüleri üzerinde ölçüm yapılarak çalışma genişliğinin belirlenmesi işlemi "ImageJ" programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında “PCB Piezotronics-350A43” marka ve model, ICP tipi, üç eksende ölçüm yapabilen ve yüksek şok dayanımı olan ivme ölçer kullanılmıştır. İlgili standarda göre ivme ölçerin yerleşimine ilişkin olarak araç ağırlık merkezinden 7 cm kadar hata payına izin verilmektedir. Pandül sisteminde yer alan tokmağın rijit bir yapıda olması sebebiyle ivme ölçerin ağırlık merkezinden farklı noktalara sabitlenerek gerçekleştirilen ön deneylerde sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Sistemde herhangi bir problem olup olmadığının kontrolü amacıyla ön deneme çarpışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. Pandül sistemi kullanılarak gerçekleştirilen deneme çarpışmaları.

Vinç verimliliği, pandül yüksekliğinin uygunluğu, kırılması muhtemel parçaların tespiti, pandül sisteminin kontrolü, kameraların konumları, deney verilerinin sağlıklı bir şekilde okunabilmesi vb. konularda optimizasyon sağlanmış, eksiklikler giderilmiştir.




Şekil 7.4. YHB'lerin pandül çarpışma testleri sonrası görüntüleri.

Şekil 7.4 incelendiğinde çarpışma yüzeyindeki ahşap kısımların deformasyonu genellikle benzer düzeyde olmuştur. Çarpışma testleri esnasında ön yüzeyde bulunan 9 adet kerestenin ortalama 5 tanesi kırılmış veya çatlamıştır. YHB'lerin arka yüzeylerindeki köknar kerestelerde herhangi bir deformasyon gerçekleşmemiştir. Bu durum çarpışma esnasında oluşan enerjinin kum ve ahşap tarafından yeterince absorbe edildiğini gösterebilir. Ayrıca çarpışma testleri sonrasında kum torbalarında deformasyon ve/veya dağılma meydana gelmemektedir. Bu nedenle kum, olası bir çarpışma sonrasında herhangi bir ilaveye ihtiyaç duyulmadan tekrar kullanılabilir.

## 7.1. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERİN ÇALIŞMA GENİŞLİĞİ SINIFLARI

YHB deneysel çarpışma testlerinde çalışma genişliği sınıflarının belirlenebilmesi için video kamera kayıtlarından görüntü alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu görüntüler Image J isimli programda düzenlenmiştir. Görüntülerdeki referans noktaları piksel cinsinden ölçülerek bilinmesi istenilen mesafe hesaplanmaktadır. Şekil 7.5'te düzenlenmiş görüntülere ait örnekler görülmektedir.



Şekil 7.5. Image J programı ile ölçümü yapılan test görüntüleri.

Testler, pandülün (bağlantı noktası testi hariç) YHB'lerin orta noktalarına çarpması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bağlantı noktası testinde ise pandülün YHB'lerin birbirlerine bağlandıkları noktaya çarpıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Çarpışma testlerinden elde edilen veriler ise Çizelge 7.1'de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. YHB'lerin çalışma genişliği sınıfları.

| YHB Grup Kodları | Bariyer Kodu | 25,5 kJ | 43 kJ | |
|---|---|---|---|---|
| | | W (m) | W (m) | W Sınıfı |
| I. Grup | B1K2 | 0,87 (0,15) | 1,46 | W5 |
| | B1K4 | 1,08 (0,04) | 1,83 | W6 |
| | B1Y2 | 1,09 (0,01) | 1,83 | W6 |
| | B1Y4 | 1,11 (0,07) | 1,88 | W6 |
| II. Grup | B2K2 | 1,03 (0,07) | 1,74 | W6 |
| | B2K4 | 1,09 (0,06) | 1,83 | W6 |
| | B2Y2 | 1,07 (0,01) | 1,80 | W6 |
| | B2Y4 | 1,04 (0,01) | 1,76 | W6 |
| III. Grup | B3K2 | 1,12 (0,04) | 1,89 | W6 |
| | B3K4 | 1,14 (0,05) | 1,92 | W6 |
| | B3Y2 | 1,08 (0,04) | 1,83 | W6 |
| | B3Y4 | 1,09 (0,06) | 1,83 | W6 |
| Bağlantı Noktası | | 1,34 (0,00) | 2,26 | W7 |
| Parantez içindeki değerler standart sapmayı ifade etmektedir. | | | | |

Sadece kum kullanılarak üretilen bariyerin çarpışma testi sonucunda kum torbaları bir arada kalamamış ve dağılmıştır (Şekil 7.6). Bariyerde herhangi bir ötelenme meydana gelmemiştir (W: 0). Ancak pandül, bariyeri aşarak diğer tarafa geçmiştir. Bu durum kumun bariyerde tek başına kullanılmasının mümkün olmadığını göstermektedir.



Şekil 7.6. Sadece kum kullanılarak üretilen bariyerin çarpışma testi.

Sadece ahşap kullanılarak üretilen bariyerde bariyerin ön ve arka yüzeyindeki köknar kerestelerin tamamına yakını kırılmış ve çok az miktarda ötelenmiş (W: 0,42) ancak pandül, bariyeri aşarak diğer tarafa geçmiştir (Şekil 7.7). Burada ahşap kerestelerin

bariyer performansında yeterli olmadığı görülmüştür. Ahşap ve kumun birlikte kullanımının YHB'lerin performansını önemli derecede iyileştirdiği anlaşılmıştır.



Şekil 7.7. Sadece ahşap kullanılarak üretilen bariyerin çarpışma testi.

Çizelge 7.1'de deney sonuçlarına göre ortaya çıkan çalışma genişliği sınıfları görülmektedir. Pandül çarpışmasında oluşan 25,5 kJ'lük enerjinin TB 31 test kriterlerinde belirtilen 43 kJ'lük enerjiye karşılık gelen çalışma sınıfı genişlikleri ayrıca hesaplanmıştır. Pandül çarpışma testi sırasında kamera görüntülerinden elde edilen ölçümler ışığında YHB'lerin muhtelif deney varyasyonlarına göre W5-W7 çalışma genişliği aralığında yer aldığı görülmektedir. Sadece kum veya ahşap kullanılan YHB'lerde çalışma genişliği sırası ile W1 ve W2 olarak hesaplanmıştır. Amato vd. [126] çalışmalarında, TB 31 kabul şartlarına göre beton bariyerler ile gerçekleştirilen çarpışma testlerinde çalışma genişliği sınıflarını W1 olarak bulmuşlardır.

Çizelge 7.1'e göre köknar kereste kalınlığının değişmesi ile çalışma genişliği sınıflarında önemli bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir. Bu sonuçlara göre 4 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin kullanılmasının gereksiz maliyet artışına sebep olmasından dolayı 2 cm kalınlıktaki kerestelerin kullanılmasının yeterli olacağı söylenebilir.

Çalışma genişliği sınıfları incelendiğinde II. grup YHB'ler ile I. grup YHB'ler arasında önemli bir farklılığın olmadığı görülebilmektedir. Literatürdeki çalışmalara göre emprenye işleminin ahşap malzemenin mekanik özelliklerini kısmen iyileştirdiği ancak önemli bir değişiklik meydana gelmediği belirtilmektedir [125–128]. Literatür ile uyumlu olarak emprenye işleminin YHB'lerin çalışma genişliği üzerinde olumsuz anlamda bir etkisinin bulunmadığı söylenebilir.

III. grup YHB'lerin çarpışma testi sonucundaki çalışma genişliği sınıfları I. grup YHB'ler ile kıyaslandığında aralarında önemli bir farklılık olmadığı anlaşılmaktadır. Ahşap malzemenin ısıl işleme tabi tutulması ile birlikte hemiselülozların önemli ölçüde hidrolize olması ahşap malzemenin mekanik özelliklerini (özellikle şok direncini) önemli ölçüde düşürmektedir [64,129,130]. Elde edilen sonuçlar ahşap malzemede gerçekleşen bu direnç düşüşünün YHB'lerin toplam direnci içerisindeki payının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Herhangi bir işlem uygulanmamış, emprenye ve ısıl işlem görmüş numuneler kendi içerisinde değerlendirildiğinde kum ve ahşap malzemenin suya doymuş olmasının genel olarak çalışma genişliğini ihmal edilebilir düzeyde düşürdüğü görülmüştür. Bu durumun suyun bariyer hattına katmış olduğu ağırlıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Suya doygun YHB'lerin çalışma genişliklerinin genellikle hava kurusu YHB'lerden daha düşük bir değerde olduğu görülmüştür. Literatür çalışmalarında rutubet ile birlikte ahşap malzemenin mekanik özelliklerinin arttığı ve şok direncinde iyileşme meydana geldiği belirtilmektedir [131]. Çalışma genişliğinin rutubetin artması ile birlikte nispeten azalması durumu şok direncindeki bu iyileşme ile açıklanması muhtemeldir. Rutubet ile çalışma genişliğinin azalması özellikle yağışlı havalarda YHB'lerin olası bir kazada daha efektif sonuçlar vereceği ve bu sebeple açık hava koşullarında kullanımının karayolu trafik güvenliği açısından uygun olacağı söylenebilir.

Bağlantı noktasına gerçekleştirilen çarpışma sonucuna göre YHB'ler hem orta noktalarına hem de bağlantı noktalarına alabilecekleri muhtemel darbe etkilerine karşı EN 1317 de belirtilen W7 çalışma genişliği sınıfı içerisinde yer alarak diğer çarpışma

testleri ile benzer sonuç göstermiştir. Bu sonuca göre bariyer hattının herhangi bir noktasına gelebilecek darbenin benzer sonuçlar doğuracağı söylenebilir.

## 7.2. YENİLENEBİLİR HİBRİT BARİYERLERİN ASI SINIFLARI

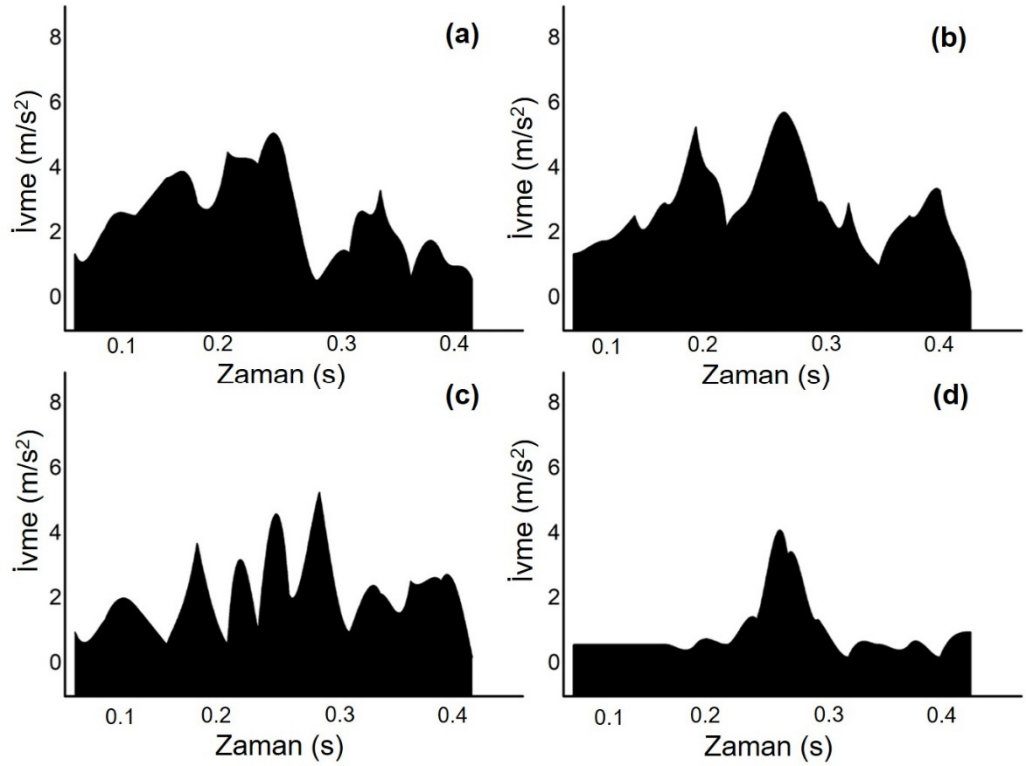
ASI sınıfı bir aracın bariyer ile çarpışması sonucunda araç içerisindeki yolculara olan etkisinin bir ölçüsü olarak ifade edilmektedir. Bu değerin nasıl elde edildiği ve hesaplandığı Bölüm 5'te detaylı olarak anlatılmaktadır. YHB'lerin ASI değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. YHB'lerin ASI değerleri.

| YHB Grup Kodları | Bariyer Kodu | 25,5 kJ | | 43 kJ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | İvme ($m/s^2$) | ASI Değeri | İvme ($m/s^2$) | ASI Değeri | ASI Sınıfı |
| I. Grup | B1K2 | 5,80 (0,98) | 0,48 (0,06) | 9,78 | 0,82 | A |
| | B1K4 | 5,36 (0,90) | 0,45 (0,06) | 9,04 | 0,75 | A |
| | B1Y2 | 7,49 (0,60) | 0,63 (0,03) | 12,64 | 1,05 | B |
| | B1Y4 | 7,23 (0,79) | 0,60 (0,04) | 12,20 | 1,02 | B |
| II. Grup | B2K2 | 6,97 (0,60) | 0,58 (0,03) | 11,75 | 0,97 | A |
| | B2K4 | 6,32 (0,81) | 0,53 (0,04) | 10,66 | 0,89 | A |
| | B2Y2 | 6,45 (1,17) | 0,54 (0,07) | 10,88 | 0,91 | A |
| | B2Y4 | 6,58 (1,26) | 0,55 (0,07) | 11,10 | 0,93 | A |
| III. Grup | B3K2 | 6,58 (0,60) | 0,55 (0,07) | 11,10 | 0,93 | A |
| | B3K4 | 7,36 (1,26) | 0,61 (0,07) | 12,42 | 1,04 | B |
| | B3Y2 | 6,71 (0,45) | 0,56 (0,02) | 11,31 | 0,94 | A |
| | B3Y4 | 6,45 (0,39) | 0,54 (0,02) | 10,88 | 0,91 | A |
| Bağlantı Noktası | | 5,67 (0,00) | 0,47 (0,00) | 10,00 | 0,83 | A |
| Parantez içindeki değerler standart sapmayı ifade etmektedir. | | | | | | |

Çizelge 7.2'de pandül çarpışma testlerinden elde edilen ivme verilerinin Eşitlik 5.1'deki denkleme yerleştirilmesi ile elde edilen ASI değerleri görülebilmektedir. Tüm bariyer tiplerindeki ASI değerleri A ve B sınıfı olarak elde edilmiştir. Sonuçlar ışığında YHB'lerin TB31 sınıfı test kriterlerini sağladığı, herhangi bir araç çarpması durumunda yolcular için oluşabilecek hasarı öngörülen seviyede tutacağı söylenebilir.

ASI değerleri incelendiğinde I. grup YHB'ler üzerinde gerçekleştirilen çarpışma test sonuçlarına göre suya doygun YHB'lerin ASI sınıfları, hava kurusu YHB'lere göre daha düşük olduğu görülebilmektedir. Rutubetin artmasının emprenye edilmiş ve ısıl işlem görmüş köknar keresteler ile üretilen YHB'lerde I. gruba göre belirgin bir fark yaratmadığı görüşmüştür. I., II., ve III. grup YHB'lere ait ortalama ivme zaman grafikleri Şekil 7.8'den görülebilmektedir.




Şekil 7.8. Pandül çarpışma testleri sırasında YHB'lerin ivme-zaman grafikleri; I. grup (a), II. Grup (b), III. Grup (c) ve bağlantı noktası testi (d).

Kereste kalınlığı, ısıl işlem ve emprenye işlemlerinin ASI değerini belirgin bir şekilde etkilemediği görülebilmektedir. YHB'lerin üretiminde gereksiz maliyet artışının önüne geçebilmek için 2 cm kalınlıkta kereste kullanımının uygun olduğu söylenebilir. Dış ortamda kullanılacak olan YHB'lerin servis ömrünün uzatılabilmesi için hayati önem taşıyan odun koruma yöntemlerinin YHB'lerin çarpışma performansını olumsuz yönde etkilemediği görülmektedir.

Bağlantı noktası testi için üretilen YHB'lerin diğer YHB tipleri ile genel olarak aynı ASI sınıfında olduğu görülmüştür. Bu durum YHB'lerin herhangi bir noktasına gelecek muhtemel darbelere karşı yeterli performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Genel olarak maliyet, çarpışma performansı ve servis ömrü kıstasları göz önüne alındığında kullanıma en uygun olan YHB'lerin 2 cm kalınlıkta olması, emprenye veya ısıl işleme tabi tutulması gerektiği söylenebilir.

## 7.3. YHB'NİN MALİYET ANALİZİ

Üretilen YHB'nin beton ve çelik bariyerler ile maliyet açısından kıyaslanması önemli bir nokta olarak görülmüştür. Bu maksatla maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizi için 1250 mm uzunluğundaki YHB, çelik ve beton bariyerlerin hammadde ve direkt işçilik giderleri göz önünde bulundurulmuştur (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3. YHB'nin maliyet analizi.

| Ana Gider Kalemi | Alt Gider Kalemi | Miktar | Birim Fiyat Türk Lirası (₺) | Toplam Fiyat Türk Lirası (₺) |
|---|---|---|---|---|
| | **Hammadde** | | | |
| | Beton Tabla (adet) | 1 | 19,00 | 19,00 |
| | Köknar Keresteler (20 mm) | 18 | 3,15 | 56,70 |
| | Kum ($m^3$) | 0,30 | 30,00 | 14,10 |
| | Kum Torbası (adet) | 14 | 0,50 | 7,00 |
| | Bitki Toprağı ($m^3$) | 0,07 | 133,50 | 9,35 |
| | Metal Izgara (adet) | 2 | 35,00 | 70,00 |
| | Vida (adet) | 18 | 0,06 | 1,08 |
| | **İşçilik** | | | |
| | Köknar kerestelerin işlenmesi | 18 | 3,35 | 60,30 |
| | Metal ızgara üretimi | 2 | 10,00 | 20,00 |
| | YHB'nin montajı | 1 | 30,00 | 30,00 |
| **Toplam** | | | | 287,53 |

1 adet beton tabla üretimi için 0,87 $m^3$ C25 beton kullanılmaktadır. 20x100x1250 $mm^3$ boyutlarındaki köknar kerestelerden 1 adeti 0,0025 $m^3$'tür. 1 adet metal ızgara üretebilmek için 2 mm kalınlığında, 20x40 mm boyutlarında toplam 3 m uzunluğunda metal profil gerekmektedir. YHB üretiminde 3,5x50 mm boyutlarındaki sunta vidası kullanılmıştır.

F şeklindeki beton bariyer ve çift taraflı W kirişli çelik bariyer fiyatları 3 farklı firmadan alınmış ve ortalama fiyatları tespit edilmiştir. Diğer tüm malzemelerin fiyatları aynı yöntemle tespit edilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında piyasadan alınan güncel fiyatlar ile YHB'yi oluşturan tüm elemanların ve işçilik ücretlerinin toplam maliyetinin 287,53 ₺ olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 7.4'te 1250 mm uzunluğundaki YHB, F tipi New Jersey beton bariyer ve çift taraflı W kirişli çelik bariyerlerin maliyet

kıyaslamaları yer almaktadır. F tipi New Jersey beton bariyer ve çift taraflı W kirişli çelik bariyerlerin maliyetlerine üretimi sırasındaki dolaylı işçilikler de dahildir.

Çizelge 7.4. 1250 mm uzunluğundaki YHB, F tipi New Jersey beton bariyer ve çift taraflı W kirişli çelik bariyerlerin maliyet analizlerinin kıyaslanması.

| Gider Türü | Türk Lirası (₺) |
|---|---|
| **YHB** | 287,53 |
| **Beton Bariyer** | 344,15 |
| **W Kirişli Çelik Bariyer** | 363,73 |

Çizelge 7.4'ten anlaşılacağı üzere bariyerlerin birim maliyetleri kıyaslandığında YHB'lerin maliyetinin diğer bariyer tiplerine nazaran daha düşük olduğu anlaşılabilir. YHB'lerin F tipi New Jersey beton bariyerlerden yaklaşık olarak %25, çift taraflı W kirişli çelik bariyerlerden ise %33 daha düşük maliyetli olduğu tespit edilmiştir. Uygulamada ahşap bariyerlerin daha az tercih edilmelerinin en önemli sebeplerinden birinin maliyet olduğu bilinmektedir. Bu çalışma ile söz konusu ekonomik kaygıların giderilebileceği düşünülmektedir.

# BÖLÜM 8

# LS DYNA SİMÜLASYON TESTLERİ

Sonlu elemanlar analizi karmaşık problemleri küçük parçalara bölerek diferansiyel denklemler ve fonksiyonlar kullanarak çözüme ulaştırmaya çalışan bir yöntemdir. İlk olarak 1956 yılında geliştirilmiştir. Yıllar içerisinde gelişerek günümüzde karmaşık problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu metotta karmaşık olan problemin içinde yer alan malzemeler mesh adı verilen küçük parçalara bölünürler. Mesh düğüm noktaları bir ağ yapısına benzemektedir. Mesh boyutu ne kadar küçük olursa çözüm o kadar gerçeğe yakın olmaktadır ancak çözüm süresi modele bağlı olarak aşırı derecede uzayabilir. Mesh boyutu arttıkça çözüm süresi kısalmaya ve çözüm gerçeklikten uzaklaşmaya başlar [132,133].

Birçok alanda yapılan çalışmaların netice verebilmesi için deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile sonuca varabilmek oldukça uzun zaman, ekonomik güç ve emek gerektirmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar metodu günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüm bunların yanında sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan testler ile gerçek zamanlı yapılan testler yüzde yüz olarak birbirleri ile örtüşmez. Doğada gerçekleşen bir olayı tamamen doğru bir şekilde sayısal ortama aktarmak neredeyse imkansızdır. Sonlu elemanlar analizi ile var olan bir problemi küçük bir alana indirgeyerek çözüm için doğru cevapları kısa sürede elde etmek temel amaçtır [134–136].

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle karmaşık problemlerin analiz sürecinde ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA, ABAQUS, PATRAN gibi çok sayıda ticari yazılımlar kullanılmaktadır. Bu paket programlar karmaşık tasarımlardan, meydana gelen non-linear (doğrusal olmayan) ve dinamik analizlerin kısa zamanda doğru ve etkin olarak çözülmesinde kolaylık sağlamıştır [137,138]. Ticari yazılımlar sayesinde çarpışma simülasyonları sanal ortamda araç ve insan prototipi kullanılmadan birçok kez analiz yapılarak doğru sonuca hem ekonomik hem de zamandan tasarruf sağlanarak hızlı bir şekilde ulaşılmaktadır [43].

Literatürde bariyer sistemlerinin performanslarını ölçen birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar gerçek çarpışma deneyleri ile yapıldığı gibi çarpışmaların bilgisayar ortamında simüle edildiği sanal çarpışma deneyleri de kullanılarak yapılabilmektedir. Yeni güvenlik bariyeri tasarımlarının geliştirme ve test maliyetlerini azaltmak için, test aracı etkisi altındaki güvenlik bariyer davranışının erken değerlendirilmesinde hesaplamalı kaza simülasyonlarının kullanılması önerilir. Bu şekilde, çarpma şiddeti parametreleri ve bariyer deformasyonu gerçek bir çarpışma testinden önce tahmin edilebilir ve muhtemel tasarım değişiklikleri kolayca değerlendirilebilir [24].

Bilgisayar destekli modelleme ve simülasyon sayesinde standartlar dâhilinde yapılan araç-bariyer çarpışma deneylerinin sonuçlarından elde edilen değerler vasıtasıyla optimum bariyer tiplerinin belirlenmesi, gerçek çarpışma deneylerinde performansı yakalayamayan bariyer sistemlerinde yapılan düzenlemelere göre daha az maliyetli, daha hızlı ve etkin sonuçlara ulaşılması amaçlanmaktadır [43]. Günümüz dünya ekonomisi göz önüne alındığında, zorlu araştırma şartlarında her çarpışma senaryosunu tam ölçekli çarpışma testlerini kullanarak değerlendirmek uygun değildir. Son zamanlarda simülasyon ortamında çarpışma testi yapmak, gerçek zamanlı testlere göre daha fazla tercih edilmektedir. [23].

Bu çalışmada, Livermore Software Technology Corporation (LSTC) tarafından geliştirilen üç boyutlu bir sonlu eleman yazılımı olan LS-DYNA (v.2006) [139] YHB'lerin modellenmesi ve analiz edilmesi için kullanılmıştır. Gerçek zamanlı çarpışma testlerinde istenilen performansın sağlanabilmesi için başarılı bir modelleme ve optimizasyona ihtiyaç duyulmaktadır [140].

## 8.1. OPTİMİZASYON TESTLERİ

Üretilen YHB'lerin çarpışma performanslarının LS-DYNA yazılımları yardımıyla simülasyon ortamında gerçeğe en yakın düzeyde belirlenebilmesi için optimizasyon testlerinin yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu maksat ile deneysel çarpışma sistemindeki gerçek zamanlı ön deneme çarpışma testleri kullanılmıştır. Gerçek zamanlı ön deneme testlerine en yakın sonucun alınabilmesi ve YHB modelinin

oluşturulabilmesi için toplamda 109 adet optimizasyon testi gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde YHB ve deneysel çarpışma sisteminin her parçasının davranışları ayrı ayrı incelenmiş ve model oluşturabilmek için en ideal değerler kullanılmıştır.

## 8.2. LS DYNA MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Ls Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalara göre modelleme ve çözüm aşamaları şu şekilde sıralanabilir [141].

1. Problem geometrik olarak tanımlanır.
2. Geometrik şekil düğüm ve nokta yardımı ile alt bölgelere ayrılır.
3. Kritik bölgelere nispeten daha yoğun mesh ataması yapılır.
4. Problem solid veya shell olarak tanımlanır.
5. Problemin materyal özellikleri tanımlanır.
6. Probleme ait farklı parçalar arasındaki bağlantı (kontak) atamaları yapılır.
7. Geometrik alanın sınır koşulları tanımlanır.
8. Problemin yükleme verileri girilir.
9. Gerekli kontrol kartları açılır ve problem koşturulur.

YHB modeli beton bir tabla, metal ızgara, köknar keresteler ve kum olmak üzere 4 farklı bileşenden oluşmaktadır. Çarpışma testleri iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki bu tez kapsamında üretilen gerçek zamanlı çarpışma test düzeneği, diğeri ise NCAC tarafından doğrulanmış 1500 kg'lık bir araç modelidir.

Bu tez kapsamında model çizimleri "Solidworks 2016" isimli ticari bir yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Çizilen tüm modeller "IGES" formatında kaydedilmiştir. Ls Dyna programında problem çözümünü gerçekleştirebilmek için "Ls Prepost" isimli bir ara yüzde modelin tüm kısımları, materyal, kontak vb. parametrelerinin tanımlaması yapılmıştır. Modelin tanımlama işlemlerinin ardından Ls-Dyna yazılımında çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

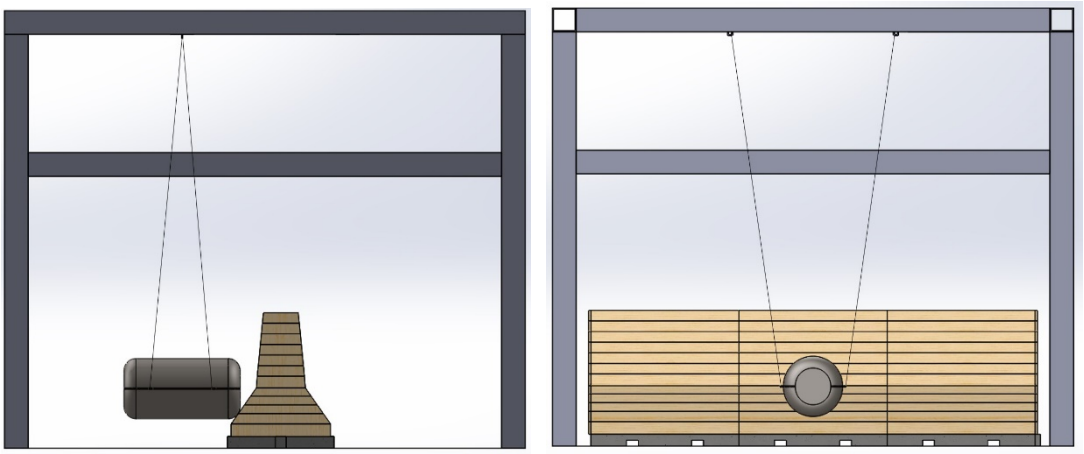
Ls Prepost ara yüzü kullanılarak gerçekleştirilen modelleme işleminde kullanılan birimler Çizelge 8.1'den görülebilmektedir.

Çizelge 8.1. Modelleme esnasında kullanılan birimler.

| **Malzeme Özelliği** | **Birimi** |
|---|---|
| **Uzunluk** | Milimetre |
| **Zaman** | Saniye |
| **Kütle** | Ton |
| **Kuvvet** | Newton |
| **Hız** | cm/sn |
| **İvme** | $mm/sn^2$ |
| **Elastikiyet (Young) modülü** | $N/mm^2$ |
| **Yoğunluk** | $kg/m^3x10^{-9}$ |

### 8.2.1. Deneysel Çarpışma Sisteminin Modellenmesi

Deneysel çarpışma sistemi modeli ana metal konstrüksiyon, pandül kulp, çatı kulp, ivme ölçer, 1500 kg ağırlığındaki bir pandül ve bu pandülü sisteme bağlayan zincirler olmak üzere 6 farklı bileşenden oluşmaktadır (Şekil 8.1). "IGES" formatında kaydedilmiş olan çizim "Ls Prepost" ara yüzüne aktarılmıştır.



Şekil 8.1. "Solidworks" programı kullanılarak çizilmiş gerçek zamanlı çarpışma (pandül) sistemi.

"Ls Prepost" ara yüzüne aktarılan modelin ivme ölçer, pandül, pandül kulp, çatı kulp, direkler ve zincir olacak şekilde "part" tanımlamaları yapılmıştır (Şekil Ek A.1). Bu "part"lardan pandül, pandül kulp, çatı kulp ve ivme ölçer "solid" olarak

tanımlanmıştır. Direk kısımları “Shell” ve zincir kısımları ise “beam” olarak tanımlanmıştır. Daha sonra model üzerinde “mesh” boyutları 20 mm, “mesh” geometrisi “quad” olacak şekilde “mesh” atama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Modeldeki “part”ların tanımlanmasının ardından “solid”, “Shell” ve “beam” olacak şekilde 3 adet “section” tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Burada “Shell” olarak tanımlanan “part”lar için “section” kısmında kalınlık (T1) kutucuğuna mm cinsinden kalınlık değeri girilmiştir (Şekil Ek A.2).

Materyal tanımlama işlemine geçilmiştir. Materyal tanımlanırken öncelikle malzemenin gerçek değerlerinin girilmesi gerekir. Ls Dyna kütüphanesinde birçok materyalin değerleri hazır olarak mevcuttur. Bu çalışmada pandülün metal kısımları yani tamamı “Mat_024_Piecewise Linear Plasticity” olarak tanımlanmıştır (Şekil Ek A.3). İvme ölçer kısmı “Mat_020_Rigid” (Şekil Ek A.4) ve zincir kısımları ise “Mat_098_Simplified_Johnson_Cook” (Şekil Ek A.5) olarak tanımlanmıştır. Tüm bu işlemlerin ardından “part” kısmına tekrar gelinmiş ve burada daha önce tanımlanan partlara “MID” ve “SECID” kısımlarından ilgili “materyal” ve “section” ataması yapılmıştır.

Sistemin zeminden hareket etmemesi için modelde sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Deneysel çarpışma sisteminin 4 ayağının alt kısımları “SPC” komutu ile zemine sabitlenmiştir.

Modelde partların birbirleri ile olan temasları “contact” kısmından yapılmaktadır. Bu kısımda “Automatic_Single_Surface” başlığı kullanılarak tüm temaslar tanımlanmıştır (Şekil Ek A.6).

Programda “Initial” sekmesinden pandüle başlangıç hızı verilerek test esnasında istenilen çarpışma enerjisinin ortaya çıkması sağlanmıştır (Şekil Ek A.7).

### 8.2.2. Yenilenebilir Hibrit Bariyerlerin Modellenmesi

YHB'lerin "Ls Prepost" ara yüzünde beton, kum, vida, ahşap, çelik ve tij olmak üzere 6 adet part tanımlaması yapılmıştır (Şekil Ek A.8). Bu "part"lardan beton ve kum "solid" olarak tanımlanmıştır. Ahşap ve çelik kısımlar "Shell", vida ve tij kısımlar ise "beam" olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Daha sonra model üzerinde "mesh" boyutları ahşap ve metal kısımlarda 10 mm, beton ve kum kısımlarında ise 20 mm olacak şekilde "mesh" atama işlemi gerçekleştirilmiştir. "Mesh" geometrisinin dörtgen olmasına özen gösterilmiştir.

Modelde "beam", "Shell" ve "solid" olmak üzere 3 tip "section" tanımlanmıştır. Beton ve kum "solid", vidalar ise "beam" olarak tanımlanmıştır. Ayrıca "Shell" olarak tanımlanan ahşap ve metal kısımların kalınlıkları verilmiştir. Metal kısımların kalınlıkları 3 mm olarak belirlenmiştir. Ahşap kısımların kalınlıkları ise gerçekleştirilecek olan testlere göre 20 mm ve 40 mm olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil Ek A.9).

YHB partlarına malzeme tanımlaması yapılabilmesi için "mat" sekmesinde Ls Dyna kütüphanesinden ideal olan kartlar seçilmiştir. Metal kısımlar "024_Piecewise_Linear_Plasticity" olarak tanımlanmıştır (Şekil Ek A.10). Beton (Şekil Ek A.11) ve kum (Şekil Ek A.12) kısmı "020_Rigid" olarak, vida ve tij kısmı ise "098_Simplified_Johnson_Cook" olarak tanımlanmıştır (Şekil Ek A.13). Malzeme tanımlarının ardından part sekmesinden "MID" ve "SECID" tanıtımları yapılmıştır.

Ahşap malzemenin tanımlanabilmesi için program kütüphanesindeki "024_Piecewise_Linear_Plasticity" malzemesi kullanılmıştır (Şekil Ek A.14). Köknar odununun hava kurusu haldeki fiziksel ve mekanik özelliklerinin bir kısmı gerçekleştirilen deneylerden bir kısmı ise literatürden elde edilmiştir [142].

Modelde tüm "part"lar arasındaki temaslar "contact" sekmesi altında yer alan "Automatic_Single_Surface" anahtar kelimesi kullanılarak tanımlanmıştır (Şekil Ek A.15).

YHB'lerin alt kısmına zemin tanımlamak için "wall" sekmesi kullanılmıştır. Bu zeminin özellikleri ise "rgdwall" sekmesi kullanılarak girilmiştir (Şekil Ek A.16).

Modelleme işleminin sona ermesinin ardından son işlem olarak "Renum" sekmesinden tüm elemanların yeniden numaralandırılması sağlanmıştır. Numaralandırmanın nispeten uç sayılar kullanılarak yapılması deney sırasında eklenecek diğer "part"lar ile "ID" çakışmasının yaşanmasını önleyecektir. Burada 1.000.000'dan başlanarak numaralandırma yapılmıştır (Şekil Ek A.17).

Oluşturulan YHB modelinin toplam ağırlığının 800 kg olduğu belirlenmiştir.

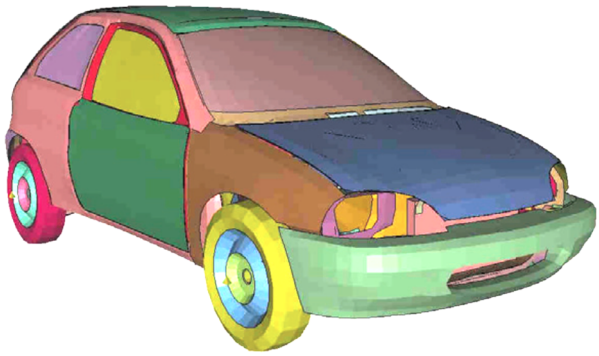
### 8.2.3. TB31 Çarpışma Testlerinde Kullanılan Araç Modeli

Günümüzde bilgisayar destekli modelleme ve simülasyonun yol kenarı güvenliği alanında kullanımı iki ana uygulamayı kapsamaktadır [114]. Bunlar;

- Yeni tasarımın geliştirilmesi veya mevcut tasarımların optimizasyonu
- Değiştirilmiş ürünlerin sertifikasyonudur.

Her iki durumda da sayısal modellerin kullanımı olumlu karşılanmaktadır. Yeni tasarım geliştirme aşamasında deneme çarpışmaları için sürekli olarak işçilik ve maliyet oluşturmadan sayısal ortamda testler gerçekleştirilip gerekli modifikasyonlar yapılabilmektedir. Yine değiştirilmiş ürünlerin nihai hali oluşana kadar bilgisayar ortamında çarpışma testlerinin gerçekleştirilmesi ekonomik olarak bir kazanç sağlamanın yanında başarısız çarpışma test sayısını azaltılır ve buna bağlı olarak oluşabilecek iş kazalarının da önüne geçilmiş olunur.

Bu tez kapsamında yürütülen tüm simülasyon çalışmalarında TB31 test kriterlerine göre 1500 kg ağırlığında bir araç kullanılmıştır. NCAC tarafından doğrulanmış araç modeli Şekil 8.2'de görülebilmektedir [143].



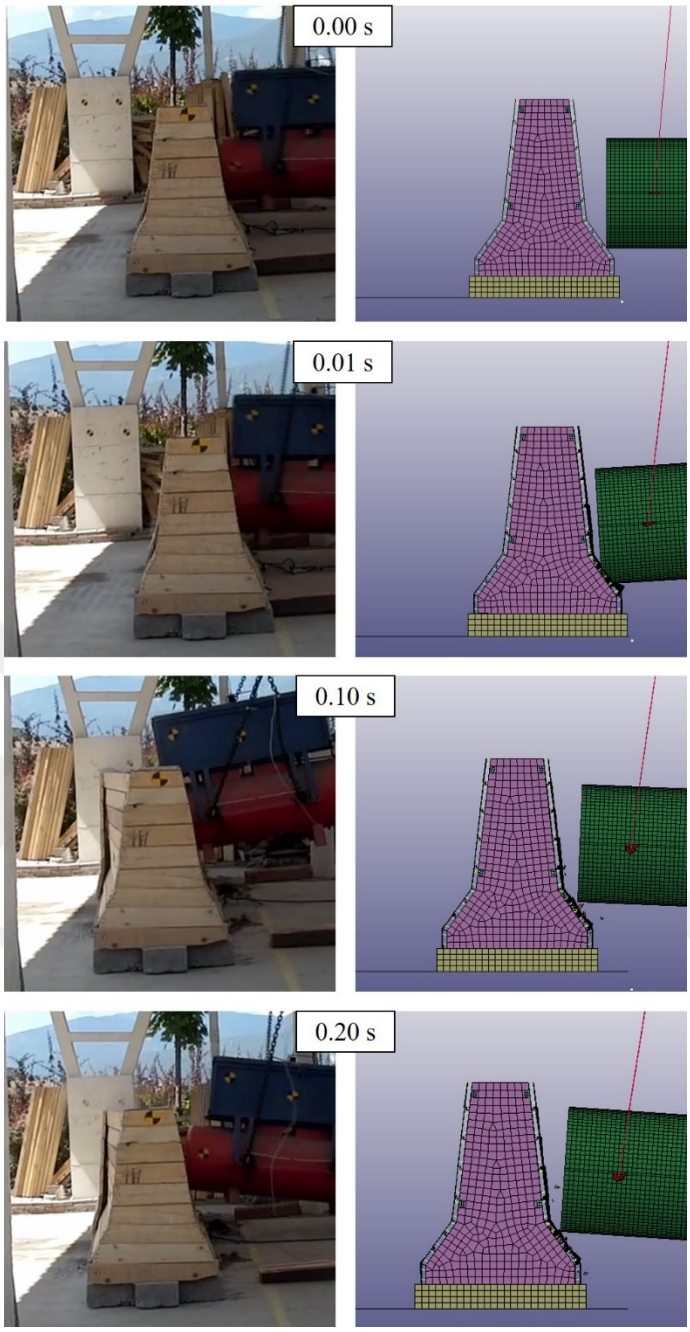
Şekil 8.2. NCAC tarafından doğrulanmış 1500 kg ağırlığındaki araç modeli [143].

## 8.3. PANDÜL SİSTEMİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN SİMÜLASYON TESTLERİ

Optimizasyon testlerinin ardından 2 cm ve 4 cm kalınlıktaki hava kurusu köknar kerestelerden üretilen YHB'lerin pandül çarpışma performansları simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.

### 8.3.1. "2 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında Pandül Çarpışma Testi

B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna ortamında çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.3'te gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon ortamında gerçekleştirilen pandül çarpışma testlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



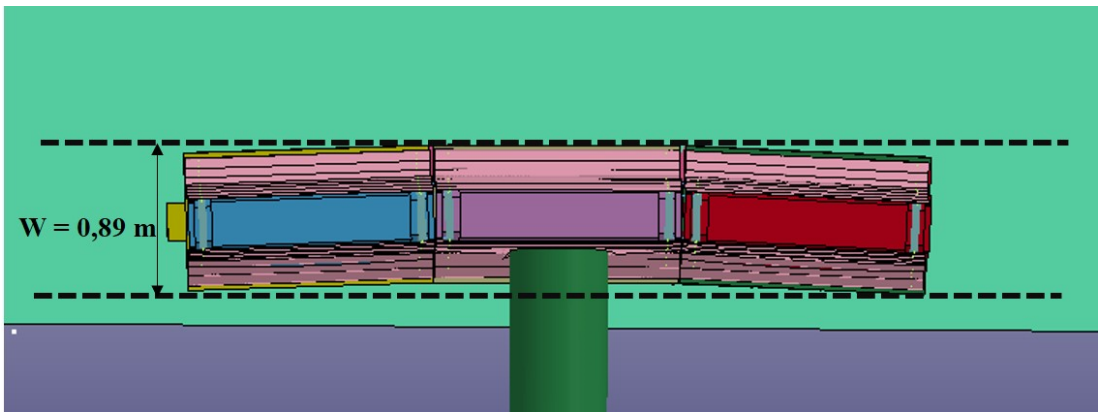

Şekil 8.3. B1K2 grubu YHB'nin gerçekleştirilen simülasyon ve gerçek zamanlı test karşılaştırması.

Şekil 8.3'te 2 cm kalınlıktaki köknar keresteler kullanılarak üretilen YHB'lerin gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon ortamında gerçekleştirilen çarpışma testlerinin sonucunda pandül ve bariyerin benzer konumda olduğu görülmektedir. Her iki testte de aynı noktalarda bulunan 5'er adet kereste kırılmış ve/veya deforme olmuştur (Şekil 8.4).

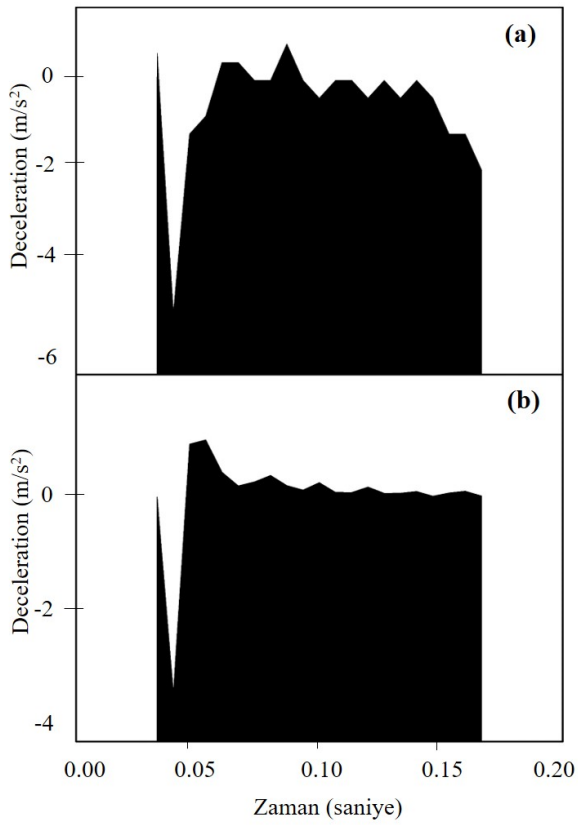


Şekil 8.4. B1K2 grubu YHB üzerinde çarpışma sonrası kırılan köknar keresteler.

Çalışma genişliği, çarpışma sonrası bariyerin en uzaktaki parçasının başlangıç noktasına uzaklığı olarak tanımlanmaktadır. 2 cm kalınlıktaki YHB'lerin Ls Dyna simülasyon ortamındaki pandül çarpışma testi sonucunda çalışma genişliği (W) 0,89 m olarak ölçülmüştür (Şekil 8.5). Gerçek zamanlı (W:0,87) ve Ls Dyna simülasyon test sonuçlarının (W:0,89) birbirleri ile örtüştüğü görülmektedir.




Şekil 8.5. B1K2 grubu YHB'nin çarpışma sonrası çalışma genişliğinin ölçülmesi (mm).



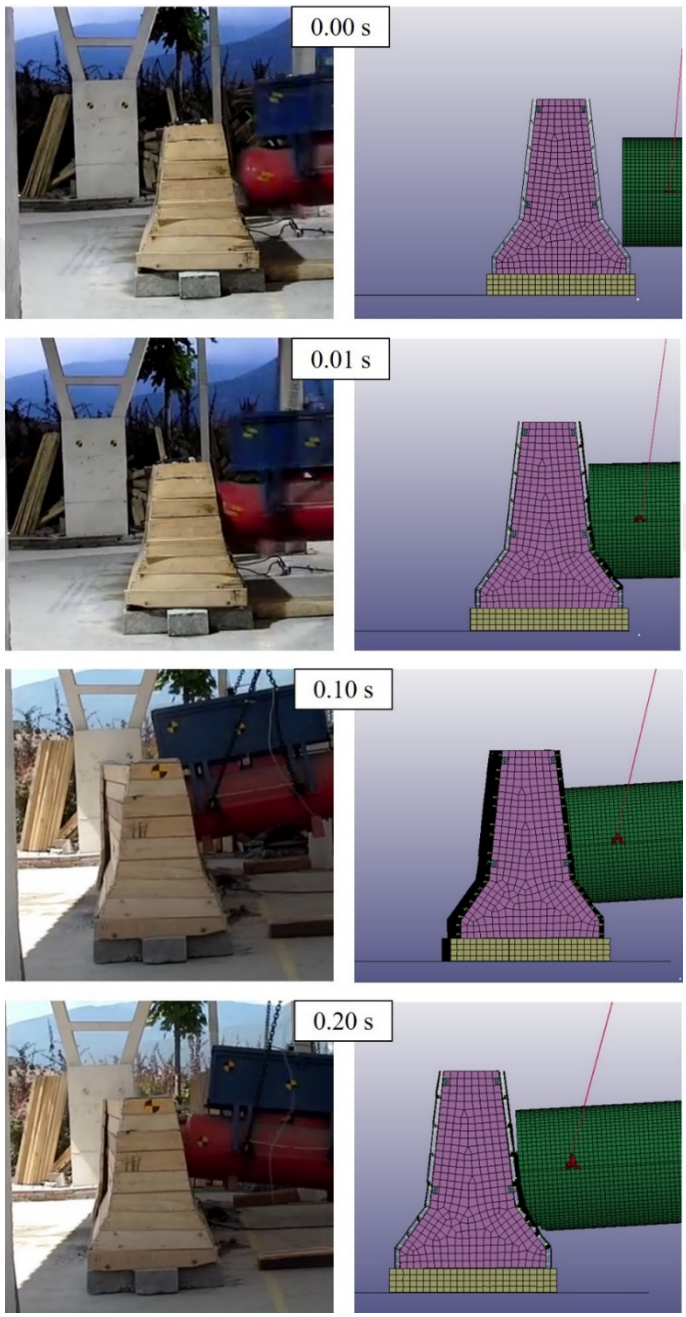

Şekil 8.6. B1K2 grubu YHB'nin gerçek zamanlı (a) ve Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında pandül yavaşlama ivmesi / zaman grafiği.

Gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon testi sırasında pandülün zamana bağlı yavaşlama grafiği Şekil 8.6'da verilmiştir. Her iki grafikte benzer şekilde eğriler oluştuğu görülmektedir. 0.01'inci saniyede eksi yönde görülen pik pandül ile bariyerin çarpışması anında oluşan yavaşlamayı ifade etmektedir.

B1K2 grubu gerçek zamanlı çarpışma testi sonucunda pandül ivme değeri 5,80 m/s$^2$ (ASI: 0,48) olarak kaydedilmiştir. Ls Dyna simülasyon testi sonucunda ise bu değer 3,20 m/s$^2$ (ASI: 0,27) olarak tespit edilmiştir. Eşitlik 5.1'deki denkleme göre ASI değeri hesaplandığında her iki çarpışma testi sonucunda B1K2 grubu YHB'lerin A sınıfında yer aldığı görülmüştür. Bu sonuç, gerçek zamanlı çarpışma testi ile Ls Dyna çarpışma testi sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermektedir.

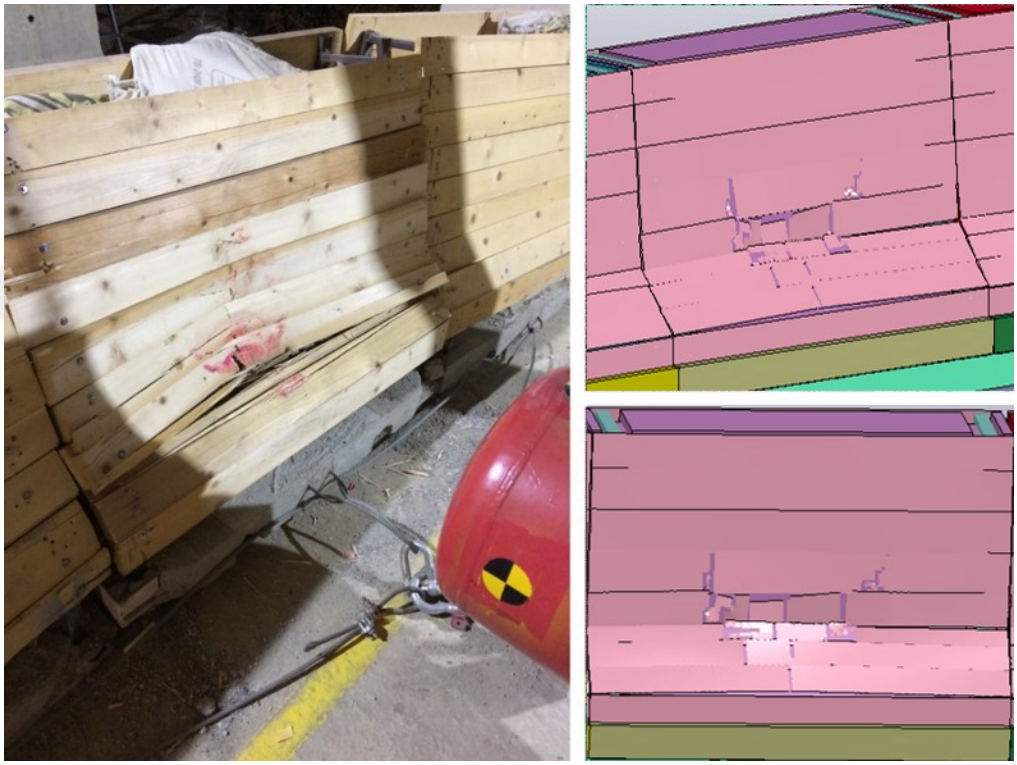
### 8.3.2. “4 cm” Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB’lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında Pandül Çarpışma Testi

B1K4 grubu YHB’lerin Ls Dyna ortamında çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.7’de gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon ortamında gerçekleştirilen pandül çarpışma testlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



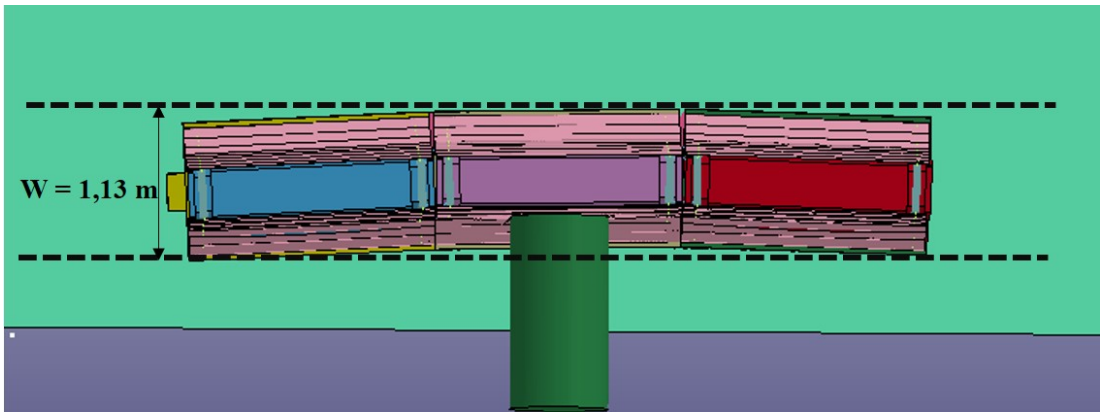

Şekil 8.7. B1K4 grubu YHB’nin gerçekleştirilen simülasyon ve gerçek zamanlı test karşılaştırması.

Şekil 8.7'de 4 cm kalınlıktaki köknar keresteler kullanılarak üretilen YHB'lerin gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon ortamında gerçekleştirilen çarpışma testlerinin sonucunda pandül ve bariyerin benzer konumda olduğu görülmektedir. Her iki testte de aynı noktalarda bulunan 5'er adet kereste kırılmış ve/veya deforme olmuştur (Şekil 8.8).

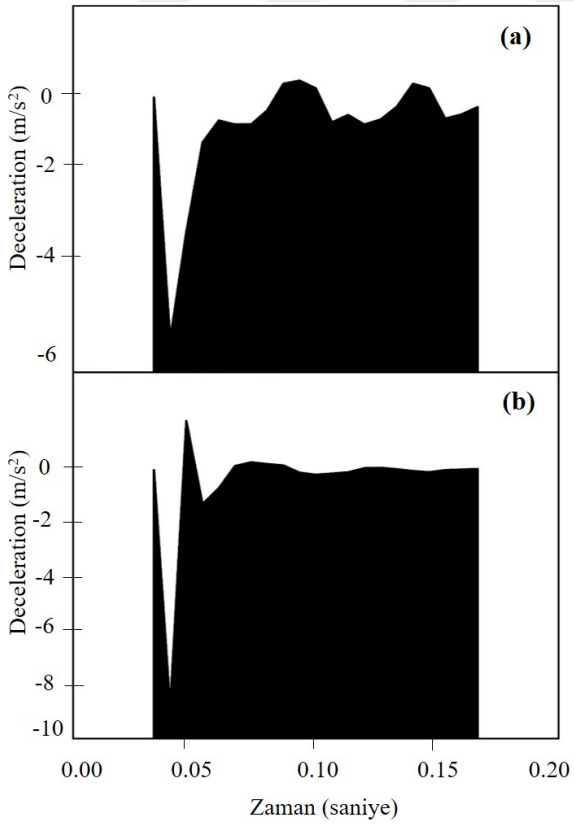


Şekil 8.8. B1K4 grubu YHB üzerinde çarpışma sonrası kırılan köknar keresteler.

Çalışma genişliği, çarpışma sonrası en uzaktaki bariyer parçasının başlangıç noktasına uzaklığı olarak tanımlanmaktadır. 4 cm kalınlıktaki YHB'lerin Ls Dyna simülasyon ortamındaki pandül çarpışma testi sonucunda çalışma genişliği (W) 1,13 m olarak ölçülmüştür (Şekil 8.9). Gerçek zamanlı (W:1,08) ve Ls Dyna simülasyon test sonuçlarının (W:1,13) birbirini desteklediği görülmektedir.




Şekil 8.9. B1K4 grubu YHB'nin çarpışma sonrası çalışma genişliğinin ölçülmesi (mm).




Şekil 8.10. B1K4 grubu YHB'nin gerçek zamanlı (a) ve Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında pandül yavaşlama ivmesi / zaman grafiği.

Gerçek zamanlı ve Ls Dyna simülasyon testi sırasında pandülün zamana bağlı yavaşlama grafiği Şekil 8.10'da verilmiştir. Her iki grafikte benzer şekilde eğriler oluştuğu görülmektedir. 0.01'inci saniyede eksi yönde görülen pik pandül ile bariyerin çarpışması anında oluşan yavaşlamayı ifade etmektedir.

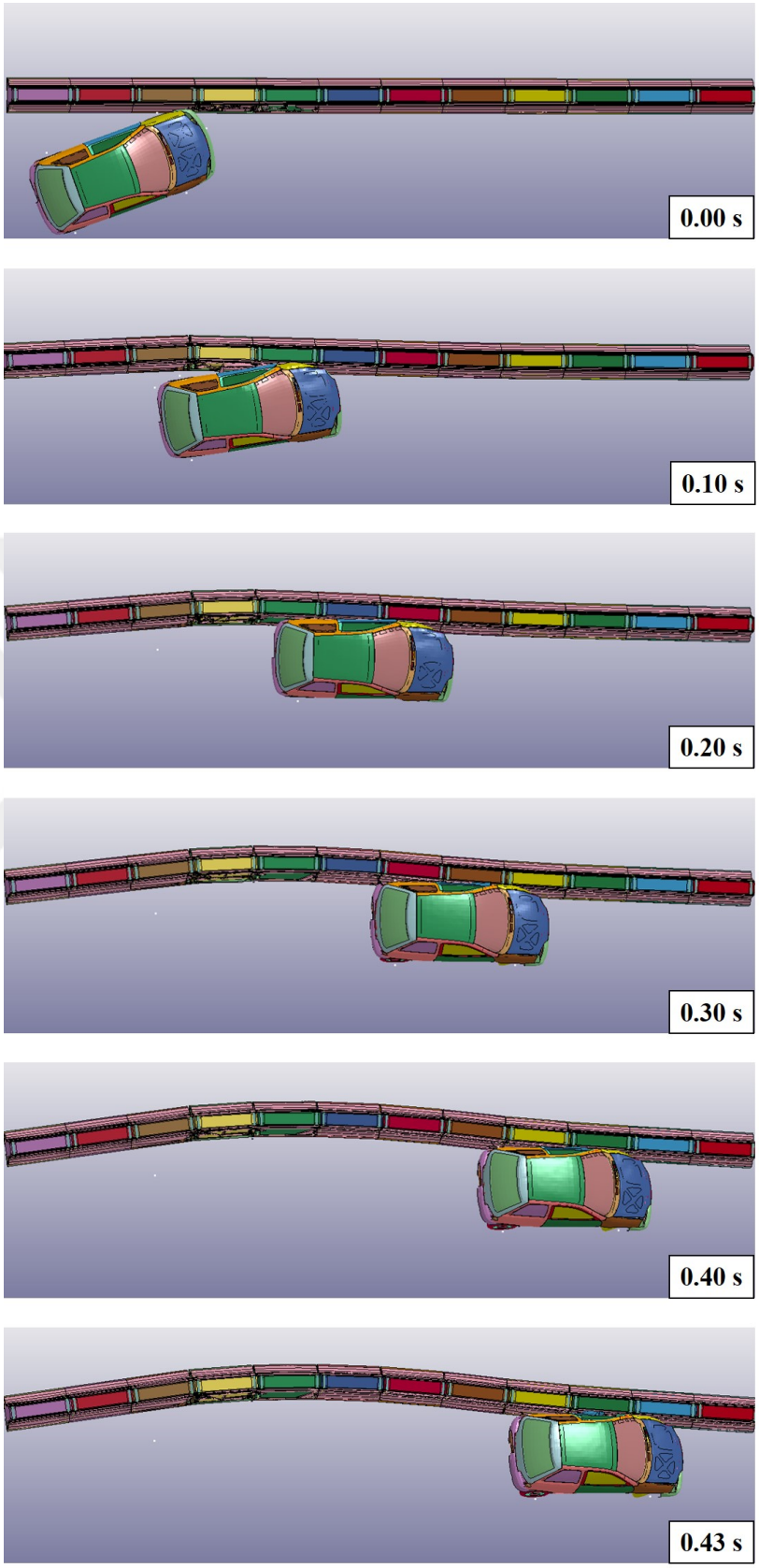
B1K4 grubu gerçek zamanlı çarpışma testi sonucunda pandül ivme değeri 5,36 m/s$^2$ (ASI: 0,45) olarak kaydedilmiştir. Ls Dyna simülasyon testi sonucunda ise bu değer 9,71 m/s$^2$ (ASI: 0,81) olarak tespit edilmiştir. Eşitlik 5.1'deki denkleme göre ASI değeri hesaplandığında her iki çarpışma testi sonucunda B1K4 grubu YHB'lerin A sınıfında yer aldığı görülmüştür. Bu sonuç, gerçek zamanlı çarpışma testi ile Ls Dyna çarpışma testi sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermektedir.

## 8.4. EN 1317 / TB31 ŞARTLARINA GÖRE GERÇEKLEŞTİRİLEN SİMÜLASYON TESTLERİ

Daha önceden doğruluğu sınanmış olan YHB ve araç modelinin EN1317 standardı ve TB31 kabul şartlarına göre çarpışma performansları simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.19'da gösterilen 1500 kg'lık aracın hızı 80 km/s olarak ayarlanmıştır. Araç ile YHB hattı arasındaki çarpışma açısı 20° olarak düzenlenmiştir.

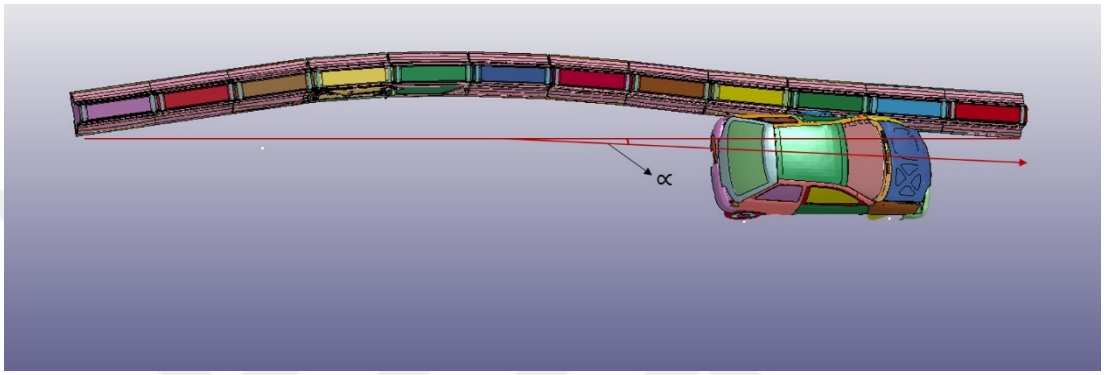
### 8.4.1. "2 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında TB31 Çarpışma Testi

B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna ortamında çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.11'de zamana göre araç ve bariyer hattının davranışı görülebilmektedir.



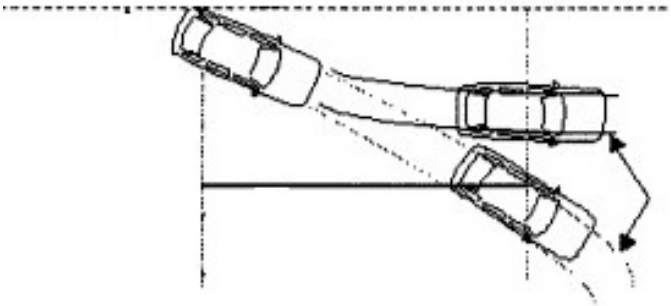

Şekil 8.11. B1K2 grubu YHB'lerin EN1317 / TB31 kabul şartlarına göre Ls Dyna simülasyon çarpışma testi.

Şekil 8.11'de görülen zamana göre araç – YHB çarpışması incelendiğinde bariyerin çarpışma ile birlikte çarpışma bölgesinde bir miktar ötelenmeye maruz kaldığı anlaşılmaktadır. 0,43'üncü saniyede ise aracın arka kısmı bariyer hattını terk etmiştir. Şekil 8.12'de aracın bariyer hattını terk etme açısı görülebilmektedir. Dijital bir iletki kullanılarak bu açının 3° olduğu belirlenmiştir. Sonuca göre aracın bariyer hattını ideal bir açıda terk ettiği görülmektedir.




Şekil 8.12. Aracın bariyer hattını terketme açısı

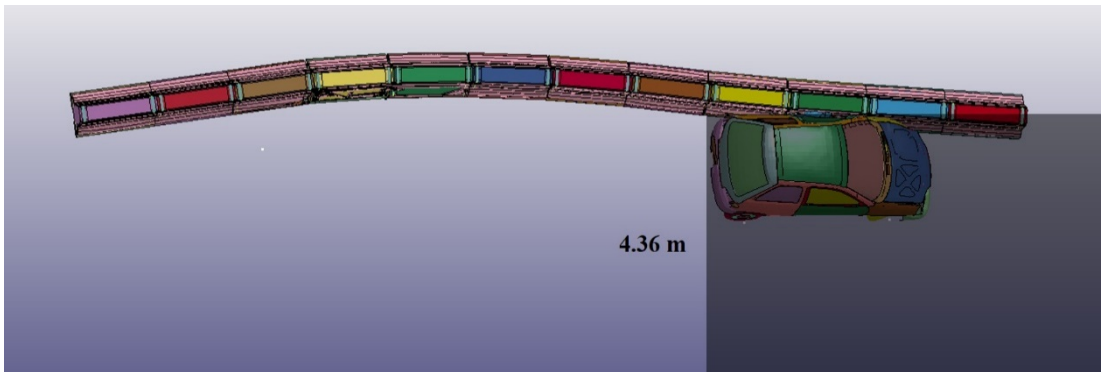
EN 1317 standardına göre çarpışma sonrasında aracın arka kısmının bariyer hattını terk ettiği noktadan itibaren çizilen çıkış kutusu içerisinde kalması gerekmektedir (Şekil 8.13).



Şekil 8.13. EN 1317 standardında belirtilen çıkış kutusu

Çıkış kutusunun yatay kenarının uzunluğu otomobiller için 10 metredir. Dikey kenarının uzunluğu, araç genişliği ve araç uzunluğunun %16'sının toplamına 2,2 metre eklenmesi ile bulunur. Simülasyon testinde kullanılan araç modelinin uzunluğu 3,75

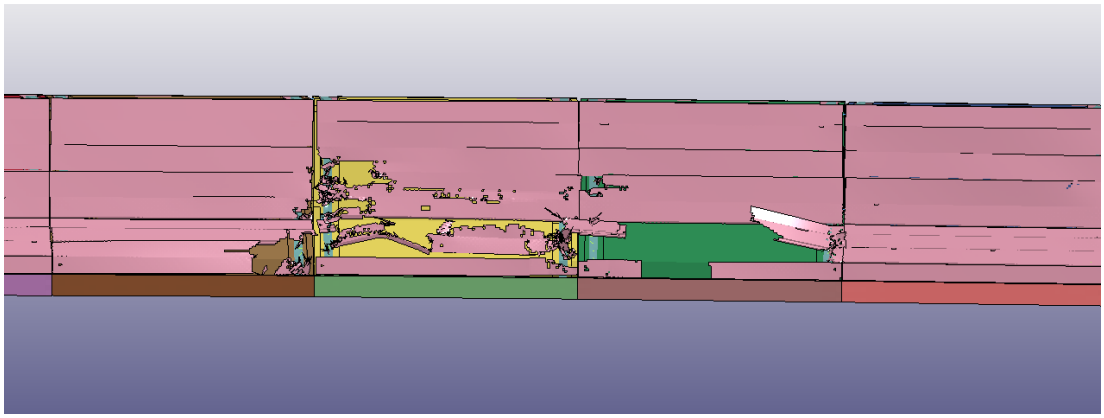
metre, genişliği ise 1,56 metredir. Yapılan test için çizilecek çıkış kutusunun dikey kenarının uzunluğu 4,36 metre olarak hesaplanmıştır (Şekil 8.14).




Şekil 8.14. Aracın bariyer hattını terkettiği anda oluşan çıkış kutusu

Şekil 8.14'ten de anlaşılacağı üzere araç, çarpışma sonrasında bariyeri terk ederken çizilen çıkış kutusu içerisinde kalmaktadır. Bu sayede tasarlanan YHB'lerin yol kenarında kullanıldığı taktirde gerçekleşebilecek olası bir kazada çarpışan aracı yol platformu içerisinde tutarak yeniden yola yönlendireceği söylenebilir.

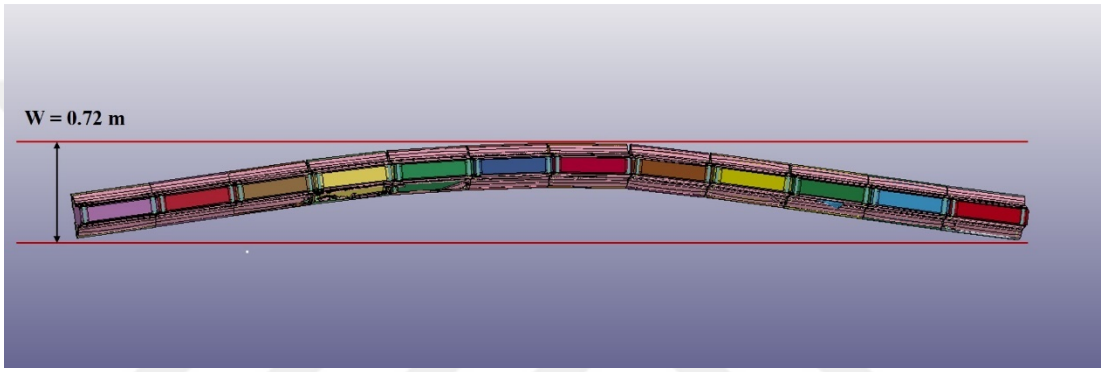
Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sonrasında YHB'ler üzerindeki 2 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin davranışları incelenmiştir (Şekil 8.15).



Şekil 8.15. Çarpışma sonrası 2 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin deformasyonu

Köknar kerestelerin sadece ilk çarpışma noktasında deforme olduğu görülmektedir. Deformasyonlar 2 bariyer üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu bariyerlerden birinde yaklaşık 6 adet kereste zarar görürken diğerinde 3 adet kereste zarar görmüştür.

Bariyer performansının belirlenmesindeki en önemli parametrelerin başında çalışma genişliği sınıfı gelmektedir. B1K2 grubu YHB'lerin gerçekleştirilen simülasyon çarpışma testi sonrasında çalışma genişliği sınıfı 0,72 metre olarak ölçülmüştür (Şekil 8.16). Test sonucuna göre B1K2 grubu YHB'lerin çalışma genişlikleri W2 sınıfında yer almaktadır. Bu sonuç pandül çarpışmasından elde edilen değer ile mukayese edildiğinde daha efektif olup bariyer hattının birlikte çalışmasından kaynaklandığı söylenebilir.



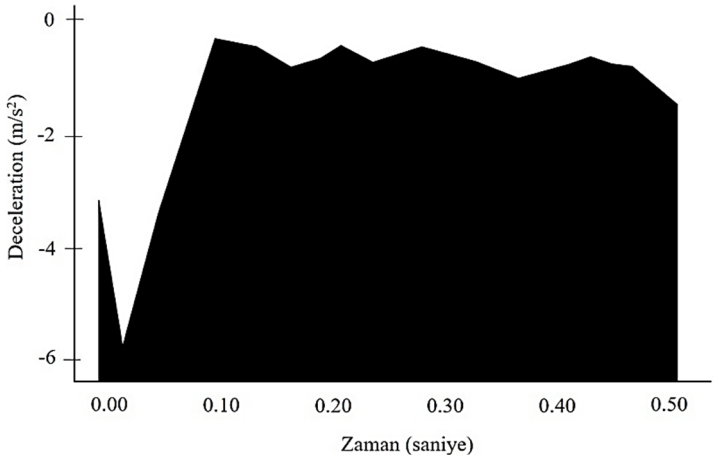

Şekil 8.16. B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sonucunda oluşan çalışma genişliği (m).

Gerçekleştirilen çarpışma testinin ardından LS Dyna yazılımından okunan üç yöndeki araç ivme değerleri Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna test sonuçlarına göre araç ivme değerleri.

| **İvme Yönü** | **İvme Değeri (m/s$^2$)** |
|---|---|
| **X yönü** | 5,40 |
| **Y yönü** | 5,95 |
| **Z Yönü** | 4,37 |

Çizelge 8.2'deki maksimum ivme değerleri kullanılarak Eşitlik 5.1'deki denkleme göre ASI değeri B1K2 grubu bariyerler için 0,91 olarak hesaplanmıştır. Ls Dyna çarpışma testi sonucunda YHB'lerin ASI bakımından A sınıfı yer aldığı görülmüştür. Şekil 8.17'de simülasyon testlerinde elde edilen araç yavaşlama ivmesi / zaman grafiği görülebilmektedir.

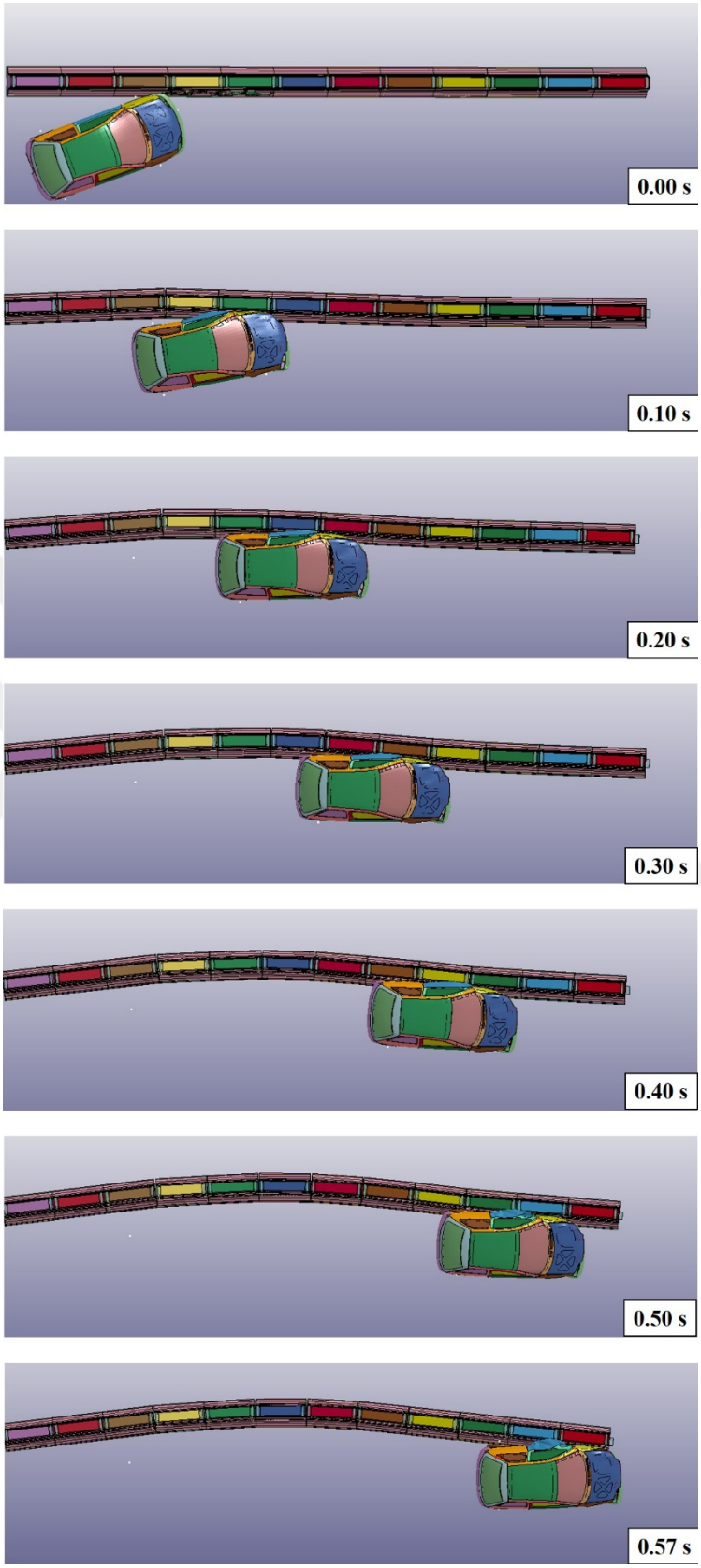



Şekil 8.17. B1K2 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında oluşan X yönündeki araç yavaşlama ivmesi / zaman grafiği.

Şekil 8.17'deki grafikte 0,01'inci saniyedeki pik, araç ile bariyerin çarpıştığı anda aracın yavaşlamasını ifade etmektedir. Çarpışma anında X yönündeki ivme değeri 5,40 $m/s^2$'dir. Grafik literatürdeki TB 31 testlerinden elde edilenler ile uyumludur [124,144].

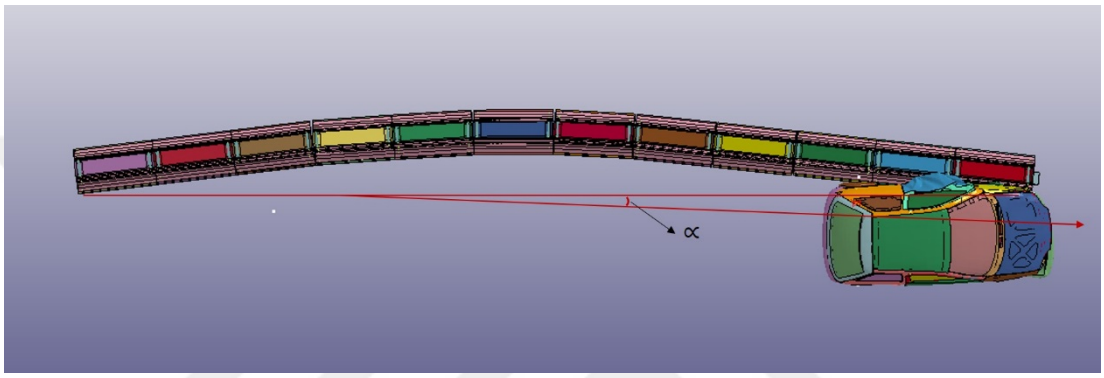
### 8.4.2. "4 cm" Kalınlıktaki Köknar Keresteler ile Üretilmiş YHB'lerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında TB31 Çarpışma Testi

B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna ortamında çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.18'de zamana göre araç ve bariyer hattının davranışı görülebilmektedir.



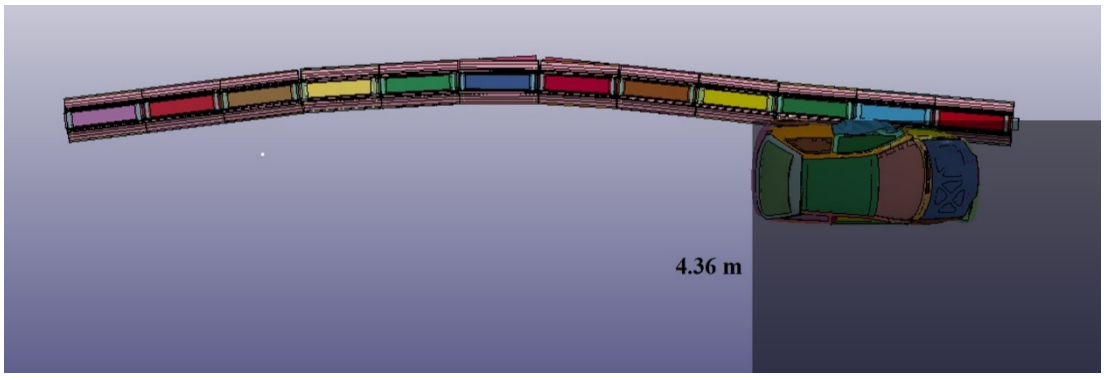

Şekil 8.18. B1K4 grubu YHB'lerin EN1317 / TB31 kabul şartlarına göre Ls Dyna simülasyon çarpışma testi.

Şekil 8.18'te görülen zamana göre araç – YHB çarpışması incelendiğinde bariyerin çarpışma ile birlikte çarpışma bölgesinde bir miktar ötelenmeye maruz kaldığı anlaşılmaktadır. 0,57'nci saniyede ise aracın arka kısmı bariyer hattını terk etmiştir. Şekil 8.19'da EN 1317'ye göre aracın bariyer hattını terk etme açısı görülebilmektedir. Dijital bir iletki kullanılarak bu açının 3° olduğu belirlenmiştir. Sonuca göre aracın bariyer hattını ideal bir açıda terk ettiği görülmektedir.




Şekil 8.19. Aracın bariyer hattını terketme açısı

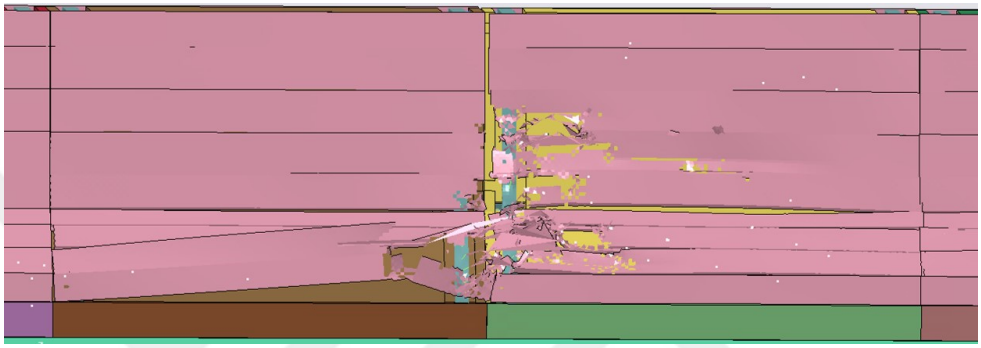
EN 1317 standardına göre çarpışma sonrasında aracın arka kısmının bariyer hattını terk ettiği noktadan itibaren çizilen çıkış kutusu içerisinde kalması gerekmektedir. B1K4 grubu YHB'ler ile yapılan Ls Dyna simülasyon çarpışma testinde çıkış kutusu 4,36 x 10 m olarak çizilmiştir (Şekil 8.20).




Şekil 8.20. Aracın bariyer hattını terkettiği anda oluşan çıkış kutusu

Şekil 8.20'den de anlaşılacağı üzere araç, çarpışma sonrasında bariyeri terk ederken çizilen çıkış kutusu içerisinde kalmaktadır. Bu sayede tasarlanan YHB'lerin yol kenarında kullanıldığı taktirde gerçekleşebilecek olası bir kazada çarpışan aracı yol platformu içerisinde tutarak yeniden yola yönlendireceği söylenebilir.

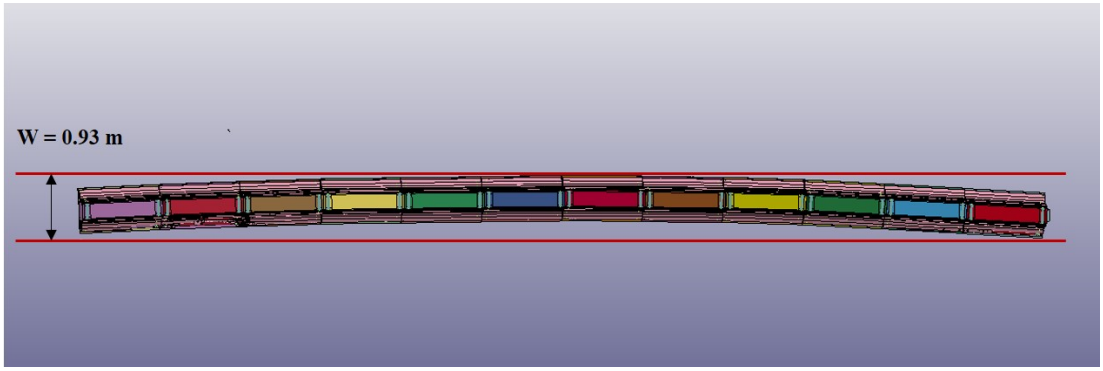
Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sonrasında YHB'ler üzerindeki 4 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin davranışları incelenmiştir (Şekil 8.21).



Şekil 8.21. Çarpışma sonrası 4 cm kalınlığındaki köknar kerestelerin deformasyonu

Şekil 8.21'den de görüldüğü üzere ilk çarpışmanın gerçekleştiği YHB'ler üzerindeki 4 cm'lik köknar kerestelerde kısmi deformasyon meydana gelmiştir. Deformasyon daha ziyade birleşim yeri ve vidaların çevresinde gerçekleşmiştir. B1K2 grubu YHB'ler ile kıyaslandığında B1K4 grubu YHB'lerin köknar kereste kısımlarının çarpışmaya karşı daha dirençli olduğu söylenebilir.

Bariyer performansının belirlenmesindeki en önemli parametrelerin başında çalışma genişliği sınıfı gelmektedir. B1K4 grubu YHB'lerin gerçekleştirilen simülasyon çarpışma testi sonrasında çalışma genişliği 0,93 metre olarak ölçülmüştür. Test sonucuna göre B1K4 grubu YHB'lerin çalışma genişlikleri W3 sınıfında yer almaktadır (Şekil 8.22).



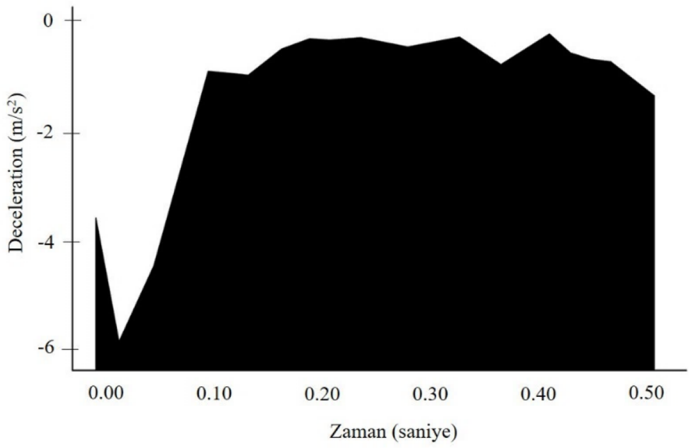

Şekil 8.22. B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sonucunda oluşan çalışma genişliği (m).

Gerçekleştirilen çarpışma testinin ardından LS Dyna yazılımından okunan üç yöndeki araç ivme değerleri Çizelge 8.3'te verilmiştir.

Çizelge 8.3. B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna test sonuçlarına göre araç ivme değerleri.

| **İvme Yönü** | **İvme Değeri (m/s$^2$)** |
|---|---|
| **X yönü** | 5,90 |
| **Y yönü** | 6,15 |
| **Z Yönü** | 2,28 |

Çizelge 8.3'teki maksimum ivme değerleri kullanılarak Eşitlik 5.1'deki denkleme göre ASI değeri B1K4 grubu bariyerler için 0,87 olarak hesaplanmıştır. Ls Dyna çarpışma testi sonucunda YHB'lerin ASI bakımından A sınıfı yer aldığı görülmüştür. Şekil 8.23'te simülasyon testlerinde elde edilen araç yavaşlama ivmesi / zaman grafiği görülebilmektedir.




Şekil 8.23. B1K4 grubu YHB'lerin Ls Dyna simülasyon çarpışma testi sırasında oluşan X yönündeki araç yavaşlama ivmesi / zaman grafiği.

Şekil 8.23'teki grafikte 0,01'inci saniyedeki pik, araç ile bariyerin çarpıştığı anda aracın yavaşlamasını ifade etmektedir. Çarpışma anında X yönündeki ivme değeri 5,90 $m/s^2$'dir. Grafik literatürdeki TB 31 testlerinde elde edilenler ile uyumludur [124,144]. Çizelge 8.4'te çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm test sonuçlarına göre ivme değerleri görülmektedir.

### 8.4.3. B1K2, B1K4 ve Beton Bariyerlerin Ls Dyna Simülasyon Ortamında Gerçekleştirilen TB31 Çarpışma Testi Sonucuna göre THIV Kıyaslaması

Tez kapsamında F tipi New Jersey bariyerlerin Ls Dyna simülasyon ortamında TB31 çarpışma testleri gerçekleştirilmiştir. Beton bariyerler rijit olarak tanımlanmıştır. Çarpışma testi sonucunda ASI değeri 2,36 (C sınıfı), çalışma genişliği ise 0,59 m (W1 sınıfı) olarak bulunmuştur. Üç bariyerin THIV değerleri Eşitlik 5.3'teki denkleme göre Trap isimli yazılım kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 8.4).

Çizelge 8.4. B1K2, B1K4 ve Beton bariyerlerin TB31 simülasyon testi sonucuna göre THIV değerleri.

| Bariyer Tipi | THIV (km/s) | THIV (m/sn) |
|---|---|---|
| **B1K2** | 26,33 | 7,31 |
| **B1K4** | 25,52 | 7,09 |
| **Beton** | 31,74 | 8,82 |

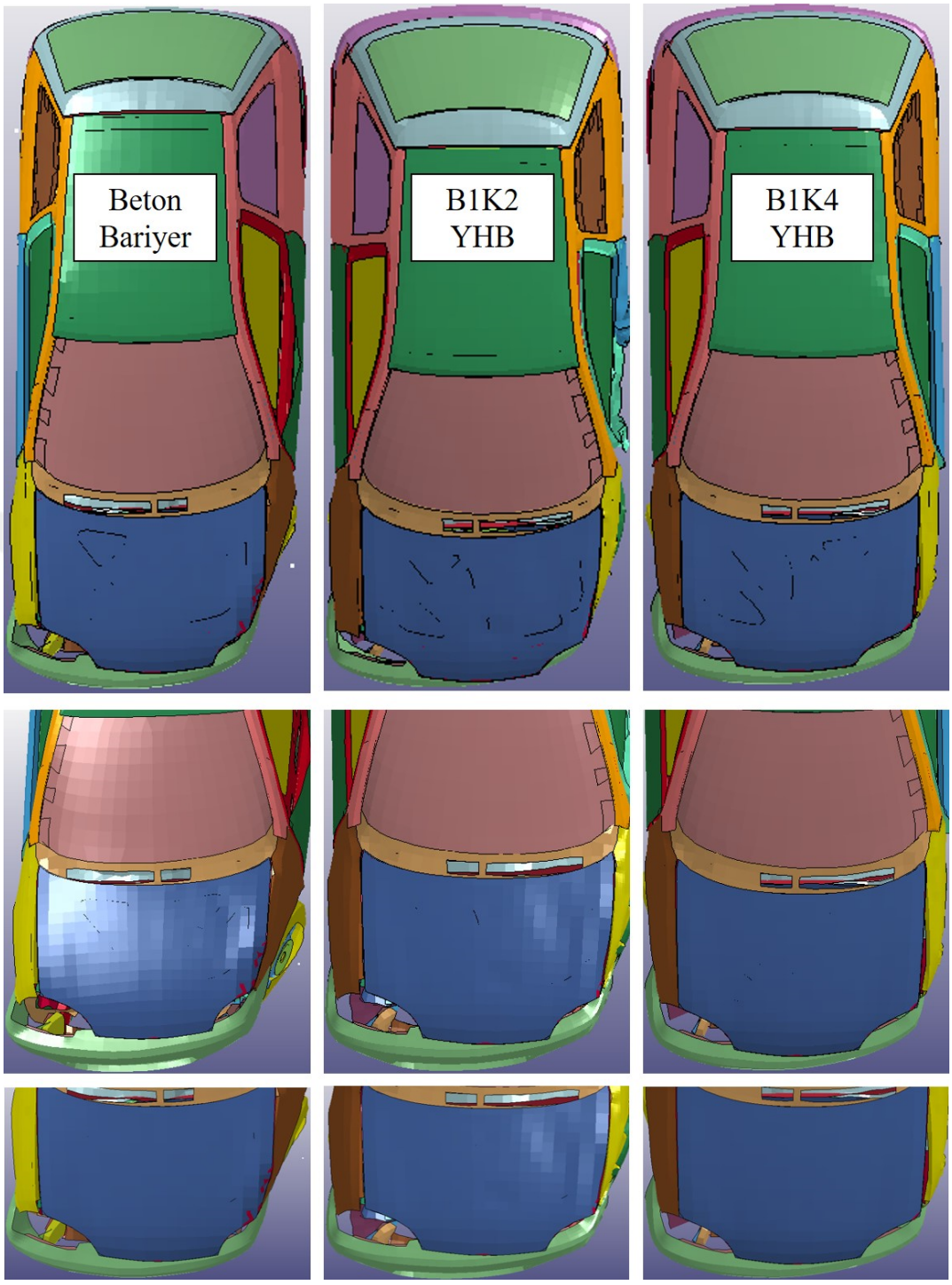
Çizelge 8.4'te belirtilen THIV değerleri 33 km/s sınırının altında kalarak geçerli kısımda yer almışlardır. En yüksek THIV değeri beton bariyerlerde, en düşük THIV değeri ise B1K4 grubu YHB'lerde meydana gelmiştir. Sonuçlara göre yaralanma şiddeti en az olan bariyerin B1K4 grubu YHB'ler olduğu ancak B1K2 grubu YHB ile dikkate değer bir farkının bulunmadığı, her ikisinin de beton bariyerlere nispeten üstün olduğu görülmüştür.

Şekil 5.3'te gösterilen x mesafesi 0,671 m olarak hesaplanmıştır. Bu değer Eşitlik 5.4'teki denkleme yerleştirilerek uçuş süresi (Tv) hesaplanmıştır. Sonuçlara göre uçuş süreleri Çizelge 8.5'te görülmektedir.

Çizelge 8.5. B1K2, B1K4 ve Beton bariyerlerin TB31 simülasyon testi sonucuna göre araç içerisindeki yolcuya ait Tv değerleri.

| **Bariyer Tipi** | **Uçuş Süresi (sn)** |
|---|---|
| **B1K2** | 0,09179 |
| **B1K4** | 0,09465 |
| **Beton** | 0,07610 |

Çizelge 8.5'e göre araç içerisindeki yolcunun başının çarpışma noktasına vardığı en kısa süre beton bariyerlere, en uzun süre ise B1K4 grubu bariyerlere ait olup olup B1K2 grubu YHB ile dikkate değer bir farkının bulunmadığı görülmektedir. Uçuş süresinin kısa olması yolcunun başının araç içerisindeki çarpma noktasına daha şiddetli çarptığı anlamına gelmektedir. Bu duruma göre üretilen YHB'lerin aynı şekil ve boyutlardaki beton bariyerlerden daha yüksek şok absorpsiyonuna sahip olduğu söylenebilir. Bu durum çarpışma sonrası aracın genel olarak aldığı hasarların kıyaslanması ile doğrulanabilmektedir. Şekil 8.24'te Ls Dyna simülasyon testleri sonucunda darbe alan araçların son durumları görülebilmektedir.




Şekil 8.24. B1K2, B1K4 ve beton bariyerler ile çarpışan araçların Ls Dyna simülasyon testi sonrasındaki son durumları

Şekil 8.24'te görüldüğü üzere çarpışma testleri sonrasında en fazla hasar beton bariyer ile çarpışan araçta meydana gelmiştir. B1K2 veB1K4 grubu bariyerler ile çarpışan

araçların hasar durumları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Bu sonuçlar THIV ve uçuş süreleri ile uyumludur.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen ASI ve W değerleri gösteren özet tablo Çizelge 8.6'da görülmektedir.

Çizelge 8.6. Simülasyon sonuçları özet tablosu.

| **Bariyer Tipi** | | **B1K2** | **B1K4** |
|---|---|---|---|
| **Pandül (Gerçek Zamanlı)** | ASI | 0,82 (A) | 0,75 (A) |
| | W (m) | 0,87 (W3) | 1,08 (W4) |
| **Pandül (Simülasyon)** | ASI | 0,82 (A) | 0,81 (A) |
| | W (m) | 0,89 (W3) | 1,13 (W4) |
| **TB 31 (Simülasyon)** | ASI | 0,91 (A) | 0,87 (A) |
| | W (m) | 0,72 (W2) | 0,93 (W3) |

# BÖLÜM 9

# SONUÇLAR

Deneysel çarpışma testi sonuçları ile Ls Dyna simülasyon testi sonuçları karşılaştırıldığında simülasyon sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Hem deneysel pandül sisteminden elde edilen veriler, hem de Ls-Dyna simülasyon test sonuçları ışığında YHB'lerin EN-1317 standardında belirtilen koşulları başarı ile sağladığı görülmüştür.

Ls Dyna simülasyon ortamında gerçek zamanlı çarpışma testleri optimize edilmiş ve gerçeğe uygun sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan modeller EN1317, TB 31 kabul şartlarına göre daha önceden doğrulanmış 1500 kg'lık bir araç modeli kullanılarak simülasyon testine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda B1K2 grubu YHB'lerin testlerinden elde edilen verilere göre ASI değeri 0,97 (A sınıfı), çalışma genişliği 0,72 m (W2 sınıfı) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca aracın arka kısmının bariyeri terk ettiği anda araç doğrultusunun bariyer hattının ilk konumu ile yaptığı açı (çıkış açısı) 3° olarak hesaplanmıştır. B1K4 grubu YHB'lerin testlerinden elde edilen verilere göre ASI değeri 0,87 (A sınıfı), çalışma genişliği 0,93 m (W3 sınıfı) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca aracın arka kısmının bariyeri terk ettiği anda araç doğrultusunun bariyer hattının ilk konumu ile yaptığı açı (çıkış açısı) 3° olarak hesaplanmıştır. Her iki testte de çarpışan araç bariyeri çıkış kutusu içerisinde kalarak güvenli bir şekilde terk etmiştir. Bu sonuçlar yeni tasarlanan YHB'lerin EN 1317'deki güvenlik kriterlerini sağladığını göstermektedir. YHB'lerin yol kenarlarında, özellikle tarihi ve turistik yollarda, doğa yollarında, deniz kenarları vb. yerlerde kullanımı önerilmektedir.

Yüksek şok absorpsiyonuna sahip olan ahşap malzeme ve kum kullanımının YHB'lerin darbe absorpsiyonunu önemli ölçüde arttıracağı ve dolayısıyla çarpışma sonrası araçta meydana gelecek olan hasar ile araç içerisindeki yolcuların yaralanma ve ölüm olasılığını azaltacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Mevcut beton ve çelik bariyerlerin özellikle motosiklet sürücüleri açısından ortaya çıkardığı olumsuzluklara ilişkin literatürde oldukça fazla çalışma yer almaktadır. Çalışmada da ifade edildiği üzere yüksek şok direncine sahip olan ve keskin kenarları bulunmayan YHB'ler ile bu olumsuzlukların ortadan kaldırılacağı düşünülmekte olup konuya ilişkin gerçekleştirilecek çalışmalarla somut neticeler elde edileceği değerlendirilmektedir.

Üretilen YHB'ler kent mobilyası sınıfında yer alacak olup aynı zamanda tarihi/turistik bölgelerde ve doğa yollarında doku ile uyum sağlayarak estetik bir katma değer oluşturacağı düşünülmektedir.

Ahşap birleştirme yöntemlerinin eğilme ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin kıyaslanabilmesi için gerçekleştirilen testler sonucuna göre en yüksek eğilme direncine sahip olan birleştirme yönteminin düz birleştirme yöntemi olduğu anlaşılmaktadır. Elastikiyet modülü değerleri kıyaslandığında en yüksek değerin makine birleştirme yönteminde, en düşük değerin ise lambalı birleştirme yönteminde olduğu görülmektedir. Şok direnci değerleri incelendiğinde en yüksek değerin yabancı çıtalı kinişli birleştirme yönteminde, en düşük değerin ise düz birleştirme yönteminde olduğu ortaya çıkmıştır.

Çarpışma sonrası kumun deforme olmaması sebebiyle tekrar kullanılabilmesi, sınırlı sayıda ahşap kerestenin deforme olması ve her bir YHB parçasının demonte olması nedeniyle hızlı bir bakım/onarım süreci ile eski haline getirilebilmesi hem maliyet hem de trafik akışının engellenmemesi açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Gece sürüşlerinde karşı yönden gelen araçların far ışıkları trafikteki önemli sorunlardan birisidir. YHB'lerin üst kısmına 4 mevsim yeşil kalabilen bitkilerin yerleştirilmesi ile gece sürüşlerinde karşı yönden gelen araçların far ışığının engellenmesi sağlanacaktır. Bu sayede hem estetik görünüme katkı sağlanması hem de trafik güvenliğinin artırılması hedeflenmektedir.

YHB'lerin özellikle kentsel alanlarda kullanımının trafik gürültüsünün azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

YHB'ler mevcut bir bariyer türü ile kıyaslanabilmesi için F şeklindeki New Jersey bariyer boyutlarında tasarlanmıştır. Optimizasyonun sağlanmasının ardından gelecek çalışmalarda farklı şekillerde tasarımlar geliştirerek gerekli testlerin yapılması önerilmektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında TB 31 test kriterlerine göre optimum ahşap kereste kalınlığı 2 cm olarak belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda farklı ağaç türlerinin, kereste kalınlığının ve/veya bariyer boyutlarının denenmesi önerilmektedir.

Köknar odunun elementel karbon analizi ile toplam karbon oranı (48.52%) belirlenmiştir. Emprenye işleminin odunun karbon oranı üzerine etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ortaya çıkmıştır. Isıl işlem ile odunun karbon oranının artış gösterdiği anlaşılmıştır. Bu artışın ısıl işlem ile çözünen odun bileşenlerinin toplam karbon oranını artırıcı etki yapmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Isıl işlem görmüş ve yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş numunelerde karbon oranı artış göstermiştir.

YHB üretimi için gerekli olan köknar kerestelerin (0,043 $m^3$) doğada karşılığı olan toplam biyokütle miktarı (0.15 $m^3$) belirlenmiştir. YHB üretimi için orman canlı biyokütlesinden 82,58 kg-$CO_2$eq azaltılacağı ve bu azalmaya karşılık kullanım yerinde 33,92 kg-$CO_2$eq hapsedileceği belirlenmiştir.

Beton, çelik ve YHB'lerin üretimleri için doğaya salınan sera gazı emisyonları kıyaslanmış ve YHB'lerin üretiminde doğaya salınan sera gazı emisyonunun (51,258 kg-$CO_2$eq) çelik (228,318 kg-$CO_2$eq) ve beton (217,351 kg-$CO_2$eq) bariyerden yaklaşık olarak 4,5 kat daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Sera gazı emisyonunun azaltılabilmesi ve küresel iklim değişiminin önüne geçilebilmesi için YHB'lerin kullanılması önerilmektedir.

Küresel iklim değişiminin azaltılabilmesi için üretiminde sera gazı salınımının daha yüksek olduğu malzemeler yerine odun ve odun kökenli malzemelerin kullanılabilmesi ve kullanım alanının zenginleştirilebilmesi konusunda farklı çalışmalar yürütülmesi önerilmektedir.

Kuma ait birtakım parametrelerin (rutubet hali, sıkılık, boyut, şekil vb.) değişiminin bariyerin toplam performansını hangi oranda etkileyeceğine ilişkin olarak literatürde kapsamlı bir çalışma bulunmamakta olup bu konuda yeni çalışmalar gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Literatürde yer alan ahşap bariyer türleri yüksek maliyetler nedeniyle uygulamada fazla yer edinememiş olup bu çalışmada ahşaba ilave olarak kum kullanımı ile maliyet düşürülmüştür. Maliyete ilişkin söz konusu kaygının giderilmiş olması ile uygulamada kullanılabilirliğinin artacağı öngörülmektedir.

Ülkemizde sadece çelik ve beton bariyerler için standartlar bulunmaktadır. Bu çalışma ahşap ve ahşap esaslı bariyerler için standartlaşma çalışmalarına öncülük edecektir.

Gerçekleştirilen bu çalışma, daha sonraki adım olan gerçek zamanlı çarpışma testlerine ve standartlaşma çalışmalarına altlık teşkil edecektir. Çalışmanın disiplinler arası bir konu içeriyor olması sebebiyle daha farklı çalışmalara yön vereceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR


1. Bek, A., "2004 Yılında İstanbul – Ankara Devlet Yolunda Meydana Gelen Ölümlü, Yaralanmalı Trafik Kazalarının Hava Durumu, Yol Satıh Durumu ve Yoldaki Yön Durumuna Bağlı Olarak İncelenmesi", ***Gazi Üniversitesi***, (2007).

2. Davies, H., "From Trackways to Motorways: 5000 Years of Highway History", ***Tempus Publishing Ltd***, Stroud, (2006).

3. Kaszynski, W., "The American Highway: The History and Culture of Roads in the United States", ***McFarland, Incorporated, Publishers***, (2012).

4. Chell, J., Brandani, C. E., Fraschetti, S., Chakraverty, J., and Camomilla, V., "Limitations of the European Barrier Crash Testing Regulation Relating to Occupant Safety", ***Accident Analysis And Prevention***, 133: (2019).

5. Internet: Avrupa Komisyonu, "Road Safety: Data Show Improvements in 2017 but Renewed Efforts Are Needed for Further Substantial Progress", **https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_18_2761** .

6. KGM, "Karayolları Genel Müdürlüğü Sorumluluğundaki Yol Ağında Meydana Gelen Trafik Kazalarına Ait Özet Bilgiler", ***Karayolları Genel Müdürlüğü***, Ankara, (2018).

7. Internet: Statista, "Annual Number of Road Traffic Accidents in Spain from 2011 to 2018", **https://www.statista.com/statistics/1019526/number-of-traffic-accidents-spain** .

8. Murray, C. J. L. and Lopez, A. D., "The Global Burden of Disease: A Comprehensive Assessment of Mortality and Disability from Deceases, Injuries and Risk Factors in 1990 and Projected to 2010", Harvard University Press, 1–35 (1996).

9. Elvik, R., Vaa, T., Hoye, A., and Sorensen, M., "The Handbook of Road Safety Measures", The Handbook of Road Safety Measures, (2009).

10. Tunç, A., "Yol Güvenlik Mühendisliği ve Uygulamaları", ***Asil Yayın Dağıtım***, Ankara, (2004).

11. CEREMA, "Les Accidents Mortels contre Obstacles", (1995).

12. ETSC, "Forgiving Roadside", ***European Transport Safety Council***, Brüksel, (1998).

13. KGM, "Trafik Kazaları Özeti", ***Karayolları Genel Müdürlüğü***, Ankara, (2018).

14. KGM, "Karayolu Tasarım Raporu: Ek:3 Yol Kenarı Alanları ve Otokorkuluklar Ile İlgili Olarak Önerilen Tasarım Esasları", ***Karayolları Genel Müdürlüğü***, Ankara, (2000).

15. Wright, P. H., "Highway Engineering", ***Wiley***, New York, (1995).

16. Silvestri Dobrovolny, C., Shi, S., Kovar, J., and Bligh, R. P., "Development and Evaluation of Concrete Barrier Containment Options for Errant Motorcycle Riders", ***Transportation Research Record***, (2019).

17. Kaya, A. T., "Karayolu Bariyerlerinin Motosiklet Kazalarına Etkileri ve Alternatif Bariyer Sistemlerinin İncelenmesi", ***Bahçeşehir Üniversitesi***, (2015).

18. Internet: TÜİK, "Taşıt Cinslerine Göre Trafiğe Kayıtlı ve Trafik Kazasına Karışan Taşıtlar", **www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=361** .

19. Ray, M. H., "The Use of Finite Element Analysis in Roadside Hardware Design", ***International Journal Of Crashworthiness***, 2 (4): 333–348 (1997).

20. OECD, "Roadside Obstacles: Their Effects on the Frequency and Severity of Accidents: Development and Evaluation of Countermeasures: A Report", ***OECD Publications Center***, Washington, DC, ABD, (1975).

21. AASHTO, "Roadside Design Guide", ***American Association Of State Highway And Transportation Officials***, Washington, DC, 1 vol (various pagings) (2011).

22. Örnek, M., Atahan, A. O., Türedi, Y., Erdem, M. M., and Büyük, M., "Soil based design of highway guardrail post depths using pendulum impact tests", ***Acta Geotechnica Slovenica***, 16 (2): 77–89 (2019).

23. Pilia, F., Maltinti, F., and Annunziata, F., "Preliminary Results on a New Safety Road Barrier Made Completely of Wood", ***Environmental Semeiotics***, 5 (2): 11–23 (2012).

24. Borovinšek, M., Vesenjak, M., Ulbin, M., and Ren, Z., "Simulation of Crash Tests for High Containment Levels of Road Safety Barriers", ***Engineering Failure Analysis***, 14 (8 SPEC. ISS.): 1711–1718 (2007).

25. Teng, T.-L., "Impact Performance of W-beam Guardrail Supported by Different Shaped Posts", ***International Journal Of Mechanical Engineering And Applications***, 4 (2): 59 (2016).

26. Lohrey, E. C., Carney, J. F., Bullard, D. L., Alberson, D. C., and Menges, W. L., "Testing and Evaluation of Merritt Parkway Guiderail", ***Transportation Research Record***, (1599): 40–47 (1997).

27. Davids, W. G., Botting, J. K., and Peterson, M., "Development and Structural Testing of a Composite-Reinforced Timber Highway Guardrail", ***Construction And Building Materials***, 20 (9): 733–743 (2006).

28. Yeğinobalı, A., Atahan, A. O., and Gözen, A., "Concrete Barriers (Guardrails)", Ankara, (2011).

29. KGM, "Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler)", ***Karayolları Genel Müdürlüğü***, Ankara, (2013).

30. Karataş, F., "Ağır Vasıta Çarpmalarına Dayanıklı Geçiş Otokorkulukları: Bir Çelikten – Betona Geçiş Otokorkuluğu Tasarımı ve Analizi", ***Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi***, (2010).

31. KGM, "Karayolu Tasarım El Kitabı", ***Karayolları Genel Müdürlüğü***, Ankara, (2005).

32. Grzebieta, R. H., Zou, R., Jiang, T., and Carey, A., "Roadside Hazard and Barrier Crashworthiness Issues Confronting Vehicle and Barrier Manufacturers and Government Regulators", (2005).

33. Borovinšek, M., Vesenjak, M., and Ren, Z., "Improving the Crashworthiness of Reinforced Wooden Road Safety Barrier Using Simulations of Pre-Stressed Bolt Connections with Failure", ***Engineering Failure Analysis***, 35: 625–635 (2013).

34. Gover, R. B. and Gudimelta, B., "Testing and Simulation of Extruded Polystyrene Foam Low to Moderate Strain Rates", (2011).

35. Larsson, M., Candappa, N., and Corben, B., "Flexible Barrier Systems Along High-Speed Roads : A Lifesaving Opportunity", (2003).

36. FMIC, "Unpublished Note on Road Accidents", ***Finnish Motor Insurers Centre***, Finland, (1996).

37. Yumrutaş, H. İ. and Yörür, H., "Hybrid Road Barrier Design as Aesthetic Safety Feature and Urban Furniture", ***International Journal Of System Modeling And Simulation***, 2 (2): 23–26 (2017).

38. Schoon, C. C., "Roadside Design in the Netherlands for Enhancing Safety", (1997).

39. TÇMB, "Beton Bariyerler (Otokorkuluklar)", ***Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği***, Ankara, (2011).

40. IDOT, "Bureau of Design and Environment Manual", 137 (2012).

41. Köse, N., "Hareketli Bir Çelik Otokorkuluk Tasarım ve Sonlu Elemanlar Çarpışma Analizi", ***Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi***, (2013).

42. Kurtuluş, E., "Yeni Nesil Otokorkuluk Sistemlerinin Çarpışma Analizleri ve Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Geliştirilmesi", ***Bursa Teknik Üniversitesi***, (2015).

43. Bayat, E., "Çarpışma Testi ve Simülasyon Kullanılarak Yeni Nesil H1 Seviye Otokorkuluk Geliştirilmesi", ***Bahçeşehir Üniversitesi***, (2012).

44. Ouellet, J. V., "Environmental Hazards In Motorcycle Accidents", (1982).

45. Goubel, C., Massenzio, M., and Ronel, S., "Wood-Steel Structure for Roadside Safety Barriers", ***International Journal Of Crashworthiness***, 17 (1): 63–73 (2012).

46. Goubel, C., Massenzio, M., and Ronel, S., "Wood-Steel Structure for Vehicle Restraint Systems", (2011).

47. Atahan, A. O. and Yücel, A. Ö., "Crumb Rubber in Concrete: Static and Dynamic Evaluation", ***Construction And Building Materials***, 36: 617–622 (2012).

48. FAJ, "Annual Report on Trends in Forests and Forestry: Fiscal Year 2012", ***Forestry And Fisheries Of Japan***, Tokyo, Japonya, (2013).

49. Noda, R., Kayo, C., Yamanouchi, M., and Shibata, N., "Life Cycle Greenhouse Gas Emission of Wooden Guardrails: A Study in Nagano Prefecture", ***Journal Of Wood Science***, 62 (2): 181–193 (2016).

50. Zhang, R., Nakazawa, T., Iimura, Y., and Kanemaru, K., "Collision Test of Log - Concrete Composite Bridge Guardrail System", (2006).

51. Kuilen, J. W. G., "The First Full Timber Guardrail for Highways", (2012).

52. Zhang, R., Kanemaru, K., Nakazawa, T., Limura, M., and Nakamura, M., "Timber Guardrail Combined of Round Log Rails and Concrete Posts", (2004).

53. Ulaştırma Bakanlığı, T., "Karayollarında Trafik Güvenliği: Otokorkuluklar Raporu", İstanbul, (2009).

54. Yıldırım, E., "İstanbul'da Kent Mobilyalarının Değerlendirilmesi: Sultanahmet Meydanı Örneği", ***İstanbul Üniversitesi***, (2004).

55. Akyol, E., "Kent Mobilyalarının Tasarım ve Kullanım Süreci", ***İstanbul Teknik Üniversitesi***, (2006).

56. Ertaş, Ş., "Tarihi Çevre İçinde Kent Mobilyaları Tasarımına Yönelik Bir Yöntem Önerisi: Konya Sille", ***Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 8 (1): 78–95 (2017).

57. Saraçoğlu, N., "Küresel İklim Değişimi, Biyoenerji ve Enerji Ormancılığı", ***Elif Yayınevi***, Ankara, (2010).

58. IPCC, "Climate Change 2014, Fifth Assessment Report, Mitigation of Climate Change", ***Cambridge University Press***, New York, (2014).

59. Bozkurt, A. Y. and Göker, Y., "Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi", ***İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları***, (1987).

60. Bozkurt, A. Y., "Orman Ürünlerinden Faydalanma", ***İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları***, İstanbul, (1981).

61. Zorlu, İ., "Kontrüksiyon I", ***Yüksek Teknik Öğretmen Okulu***, Ankara, (1977).

62. Kantay, R., "Kereste Kurutma ve Buharlama", ***Ormancılık Ve Kültür Vakfı***, İstanbul, (1993).

63. Berkel, A., "Ağaç Malzeme Teknolojisi - Ağaç Malzemenin Korunması ve Emprenye Tekniği", ***İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları***, İstanbul, (1972).

64. Kocaefe, D., Poncsak, S., and Boluk, Y., "Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen", ***BioResources***, 3 (2): 517–537 (2008).

65. Yun, H., Tu, D., Li, K., Huang, J., and Ou, L., "Variation and correlation of heat-treated wood's crystalline structure and impact toughness", ***BioResources***, 10 (1): 1487–1494 (2015).

66. Berkel, A., "Orman Ağaç ve Ağaççıkları Odunları Teşhis Klavuzu", ***İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları***, İstanbul, (1950).

67. Berkel, A., "Orman Mahsüllerinden Faydalanma Bilgisi", ***Orman Genel Müdürlüğü Yayınları***, İstanbul, (1948).

68. Berkel, A., "Ağaç Malzeme Teknolojisi - I. Cilt", ***İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları***, İstanbul, (1970).

69. Bektaş, İ., "Kızılçam (Pinus brutia Ten.) Odununun Teknolojik Özellikleri ve Yörelere Göre Değişimi", ***İstanbul Üniversitesi***, (1997).

70. Kaymakcı, A., "Paulownia (Paulownia elongata) Odununun Anatomik, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri ile Kullanım Alanları Üzerine Araştırmalar", ***Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi***, (2010).

71. MEB, M. E. B., "Gemi Yapımı / Ahşap Birleştirme Teknikleri", ***Milli Eğitim Bakanlığı***, Ankara, (2011).

72. Noll, T., "The Joint Book", Gary Allen Pty Ltd., 194 (2002).

73. Yorur, H., "Utilization of Waste Polyethylene and its Effects on Physical and Mechanical Properties of Oriented Strand Board", ***BioResources***, 11 (1): (2016).

74. Tor, Ö., Demirel, S., Hu, L., and Zhang, J., "Effects of Driving Torques on Direct Screw Withdrawal Resistance in OSB", ***Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi***, 16 (2): (2016).

75. Tor, O., Yu, X., and Zhang, J., "Characteristics of torques for driving screws into wood-based composites", ***Wood And Fiber Science***, 47 (1): 2–16 (2015).

76. Yorur, H., Tor, O., Gunay, M. N., and Birinci, E., "The effects of different variables on the screw withdrawal strength of plywood", ***Kastamonu University, Journal Of Forestry Faculty***, 17 (2): 325–333 (2017).

77. Yorur, H., Birinci, E., Gunay, M. N., and Tor, O., "Effects of factors on direct screw withdrawal resistance in medium density fiberboard and particleboard", ***Maderas. Ciencia Y Tecnología***, 22 (3): (2020).

78. Tor, O., Birinci, E., Hu, L., and Chen, C., "Effects of Pilot Hole Diameter and Depth on Screw Driving Torques in Plywood", ***BioResources***, 15 (4): 8121–8132 (2020).

79. Poran, C. J. and Rodriguez, J. A., "Finite Element Analysis of Impact Behavior of Sand", ***Soils And Foundations***, 32 (4): 68–80 (1992).

80. Sy Ho, T. and Masuya, H., "Finite Element Analysis of the Dynamic Behavior of Sand-Filled Geocells Subjected to Impact Load by Rockfall", ***International Journal Of Erosion Control Engineering***, 6 (1): 1–12 (2013).

81. Sabet, A. R., Beheshty, M. H., and Rahimi, H., "Experimental Study of Sharp-Tipped Projectile Perforation of Gfrp Plates Containing Sand Filler Under High Velocity Impact and Quasi-Static Loadings", ***Polymer Composites***, 30 (10): 1497–1509 (2009).

82. Abdel-Malek, S., Meyer, L. W., and Herzig, N., "Mechanical Behavior of Sand Under High Pressure and High Strain Rate", ***EPJ Web Of Conferences***, 26: (2012).

83. Arun, G., "Yığma Kagir Yapı Davranışı", (2005).

84. Bhatti, A. Q., "Falling-Weight Impact Response for Prototype RC Type Rock-Shed with Sand Cushion", ***Materials And Structures/Materiaux Et Constructions***, 48 (10): 3367–3375 (2015).

85. Arlery, M., Gardou, M., Fleureau, J. M., and Mariotti, C., "Dynamic Behaviour of Dry and Water-Saturated Sand Under Planar Shock Conditions", ***International Journal Of Impact Engineering***, 37 (1): 1–10 (2010).

86. Omidvar, M., Iskander, M., and Bless, S., "Stress-Strain Behavior of Sand at High Strain Rates", ***International Journal Of Impact Engineering***, 49: 192–213 (2012).

87. Zhang, Q., Li, Y., Yu, C., Qi, J., Yang, C., Cheng, B., and Liang, S., "Global timber harvest footprints of nations and virtual timber trade flows", ***Journal Of Cleaner Production***, 250: (2020).

88. Internet: NASA, "Overview: Weather, Global Warming and Climate Change", **https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/** .

89. Selin, H. and Mann, M. E., "Global warming", ***Britannica***, (2020).

90. Draper, A. M. and Weissburg, M. J., "Impacts of global warming and elevated CO2 on sensory behavior in predator-prey interactions: A review and synthesis", ***Frontiers In Ecology And Evolution***, 7 (MAR): (2019).

91. Xu, Y., Ramanathan, V., and Victor, D. G., "Global warming will happen faster than we think", ***Nature***, 564 (7734): 30–32 (2018).

92. Lal, R., "Soil carbon sequestration to mitigate climate change", ***Geoderma***, 123 (1–2): 1–22 (2004).

93. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K., "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", ***Agriculture, Forestry And Other Land Use. Hayama***, 4: (2006).

94. Settele, J., Scholes, R., Betts, R. A., Bunn, S., Leadley, P., Nepstad, D., Overpeck, J., Taboada, M. A., Fischlin, A., Moreno, J. M., Root, T., Musche, M., and Winter, M., "Terrestrial and Inland Water Systems", Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability, (2015).

95. Pingoud, K., Pohjola, J., and Valsta, L., "Assessing the integrated climatic impacts of forestry and wood products", ***Silva Fennica***, 44 (1): 155–175 (2010).

96. Kalaycioglu, H., Deniz, I., and Hiziroglu, S., "Some of the properties of particleboard made from paulownia", ***Journal Of Wood Science***, 51 (4): 410–414 (2005).

97. Lee, J., Makineci, E., Tolunay, D., and Son, Y., "Estimating the effect of abandoning coppice management on carbon sequestration by oak forests in Turkey with a modeling approach", ***Science Of The Total Environment***, 640–641: 400–405 (2018).

98. Kayo, C., Noda, R., Sasaki, T., and Takaoku, S., "Carbon balance in the life cycle of wood: targeting a timber check dam", ***Journal Of Wood Science***, 61 (1): 70–80 (2014).

99. Noda, R., Kayo, C., Sasaki, T., and Takaoku, S., "Evaluation of CO2 emissions reductions by timber check dams and their economic effectiveness", ***Journal Of Wood Science***, 60 (6): 461–472 (2014).

100. Demirer, G. N., "Yaşam Döngüsü Analizi", ***Bölgesel Çevre Merkezi - REC Türkiye***, Ankara, (2011).

101. Puettmann, M. E. and Lippke, B., "Woody biomass substitution for thermal energy at softwood lumber mills in the US inland Northwest", ***Forest Products Journal***, 62 (4): 273–279 (2012).

102. Ferguson, I., Bren, L., Hateley, R., Hermesec, B., and La Fontaine, B., "Environmental Properties of Timber", 80 (1996).

103. Hitoe, K., Hasegawa, T., Hasegawa, K., Terazawa, K., Yamanaka, K., and Hattori, N., "Case study of life cycle assessment of domestic logs", ***Mokuzai Gakkaishi***, 59: 269–277 (2013).

104. JEMAI, J. E. M. A. for I., "MILCA", Tokyo, Japan, (2014).

105. Birinci, E., Yörür, H., Yumrutaş, H. İ., and Duyar, A., "Evaluation of Renewable Hybrid Barriers in Terms of Carbon Emission with Concrete and Steel Barriers", ***Forestist***, 71 (1): (2021).

106. Green, M. and Taggart, J., "Tall wood buildings: Design, construction and performance", ***Tall Wood Buildings: Design, Construction And Performance***, 1–176 (2017).

107. Hou, F., Cai, T., and Wang, J., "Environmental performances of forest products industry participating in global value chain--taking the carbon emissions of China’s wood processing and paper printing and publishing industry as an example", ***Ekoloji***, 28 (107): 583–591 (2019).

108. Köhl, M., Ehrhart, H. P., Knauf, M., and Neupane, P. R., "A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals", ***Ecological Indicators***, 111: (2020).

109. Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A. S., and Ofozor, C. A., "Does wood biomass energy use reduce CO2 emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members", ***Journal Of Cleaner Production***, 253: (2020).

110. Winchester, N. and Reilly, J. M., "The economic and emissions benefits of engineered wood products in a low-carbon future", ***Energy Economics***, 85: (2020).

111. Korkut, S. and Kocaefe, D., "Isıl İşlemin Odun Özellikleri Üzerine Etkisi", ***Düzce Üniveristesi Ormancılık Dergisi***, 5 (2): 11–34 (2009).

112. Sofuoğlu, S. D. and Kurtoğlu, A., "A survey for determination of wastage rates at massive wood materials processing", ***Wood Research***, 57 (2): 297–308 (2012).

113. OGM, "National Inventory Report Land Use Land Use Change and Forestry", Ankara, (2011).

114. Goubel, C., "Vehicle Restraint System Crash Test Modelling Application to Steel-Wood Structures", ***University Claude Bernard Lyon 1***, (2012).

115. BS, "Road Restraint Systems", (2010).

116. El-Salakawy, E., Masmoudi, R., Benmokrane, B., Brière, F., and Desgagné, G., "Pendulum impacts into concrete bridge barriers reinforced with glass fibre reinforced polymer composite bars", ***Canadian Journal Of Civil Engineering***, 31 (4): 539–552 (2004).

117. Gabauer, D. J., Kusano, K. D., Marzougui, D., Opiela, K., Hargrave, M., and Gabler, H. C., "Pendulum testing as a means of assessing the crash performance of longitudinal barrier with minor damage", ***International Journal Of Impact Engineering***, 37 (11): 1121–1137 (2010).

118. Moreno-Pérez, F., Barroso, A., Cañas, J., and París, F., "Influence of the size and depth of a circumferential notch on the impact behavior of streetlights. A passive-safety concept", ***Engineering Failure Analysis***, 53: 15–23 (2015).

119. Gierczycka, D., Watson, B., and Cronin, D., "Investigation of occupant arm position and door properties on thorax kinematics in side impact crash scenarios-comparison of ATD and human models", ***International Journal Of Crashworthiness***, 20 (3): 242–269 (2015).

120. Yamaguchi, G. T., Dainty, D., Lam, T., and Watson, H., "Performance of Certified Climbing Helmets During Simulated Climbing Falls", ***Journal Of Testing And Evaluation***, 42 (5): 20130122 (2014).

121. Zhang, G., Wang, Y., Li, Q., and Li, Z., "Occupant risk evaluation based on frontal collision of bus", ***International Conference On Logistics, Engineering, Management And Computer Science, LEMCS 2014***, 1103–1106 (2014).

122. Mitchell, G., Strahota, M. T., Gokani, V., Picón, R., Yang, S., Clinger, R. E., and Williamson, E. B., "Performance of retrofit highway barriers with mechanical anchors", ***ACI Structural Journal***, 107 (4): 381–389 (2010).

123. Ozcanan, S. and Atahan, A. O., "Radial basis function surrogate model-based optimization of guardrail post embedment depth in different soil conditions", ***Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering***, 234 (2–3): 739–761 (2020).

124. Amato, G., O'Brien, F., Ghosh, B., and Simms, C. K., "Multibody modelling of a TB31 and a TB32 crash test with vertical portable concrete barriers: Model verification and sensitivity analysis", ***Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part K: Journal Of Multi-Body Dynamics***, 227 (3): 245–260 (2013).

125. Li, P., Zhang, Y., Zuo, Y., Wu, Y., Yuan, G., and Lu, J., "Comparison of silicate impregnation methods to reinforce Chinese fir wood", ***Holzforschung***, (2020).

126. Percin, O., Sofuoglu, S. D., and Uzun, O., "Effects of boron impregnation and heat treatment on some mechanical properties of oak (Quercus petraea Liebl.) wood", ***BioResources***, 10 (3): 3963–3978 (2015).

127. Simsek, H., Baysal, E., and Peker, H., "Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates", ***Construction And Building Materials***, 24 (11): 2279–2284 (2010).

128. Taghiyari, H. R., "Study on the effect of nano-silver impregnation on mechanical properties of heat-treated Populus nigra", ***Wood Science And Technology.***, 46 (5): 399–404 (2012).

129. Kučerová, V., Lagaňa, R., Výbohová, E., and Hýrošová, T., "The Effect of Chemical Changes during Heat Treatment on the Color and Mechanical Properties of Fir Wood", ***BioResources***, 11 (4): (2016).

130. Yang, L. and Liu, H. H., "Effect of a combination of moderate-temperature heat treatment and subsequent wax impregnation on wood hygroscopicity, dimensional stability, and mechanical properties", ***Forests***, 11 (9): (2020).

131. Gerhards, C. C., "Effects of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects", ***Wood And Fiber Science***, 14 (1): 4–36 (1982).

132. Zhu, B., "Finite Element Method Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering", 1st. Ed., ***Wiley***, Beijing, (2018).

133. Topçu, A., "Sonlu Elemanlar Metodu", ***Eskişehir Osmangazi Üniversitesi***, Eskişehir, (2015).

134. Rao, S. S., "The Finite Element Method in Engineering", The Finite Element Method in Engineering, 1–763 (2017).

135. Öchsner, A., "Computational Statics and Dynamics", Computational Statics and Dynamics, (2016).

136. Chakraverty, S. and Pradhan, K. K., "Computational Structural Mechanics - Static and Dynamic Behaciors", 1st. Ed., ***Academic Press***, 336 (2018).

137. Gümrük, R., "Şekil Verme İşleminin Çarpma Performansına Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi", ***Karadeniz Teknik Üniversitesi***, (2006).

138. Yorur, H., "Ahşap Malzemeden Üretilen Köşe Birleştirmelerinin Simülasyon (ANSYS) Ortamında Teknolojik Özelliklerinin Belirlenmesi", ***Bartın Üniversitesi***, (2012).

139. Livermore Software Technology Corporation, "A general purpose dynamic finite element analysis program, LS-DYNA version 971 user's manual", CA, (2014).

140. Atahan, A. O. and Arslan, T., "Collision Behaviour of Double W-Beam Transition", ***International Journal Of Heavy Vehicle Systems***, 19 (1): 76–91 (2012).

141. Ozcanan, S., "Tekerlek ve Aks Konfigürasyonuna Bağlı Olarak Yolda Oluşan Deformasyonların Sonlu Elemanlarla Analizi", ***Karadeniz Teknik Üniversitesi***, (2011).

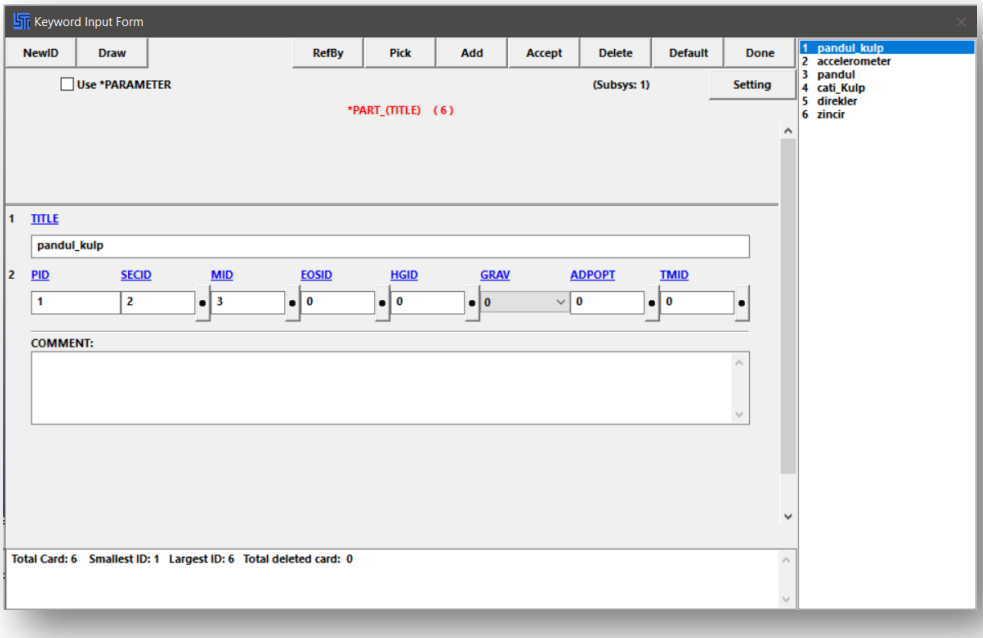
142. Department of Agriculture, Forest Servies, F. P. L., "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material", USDA - General Technical Report, 508 (2010).

143. Internet: NCAC, "Finite Element Model Archive", .

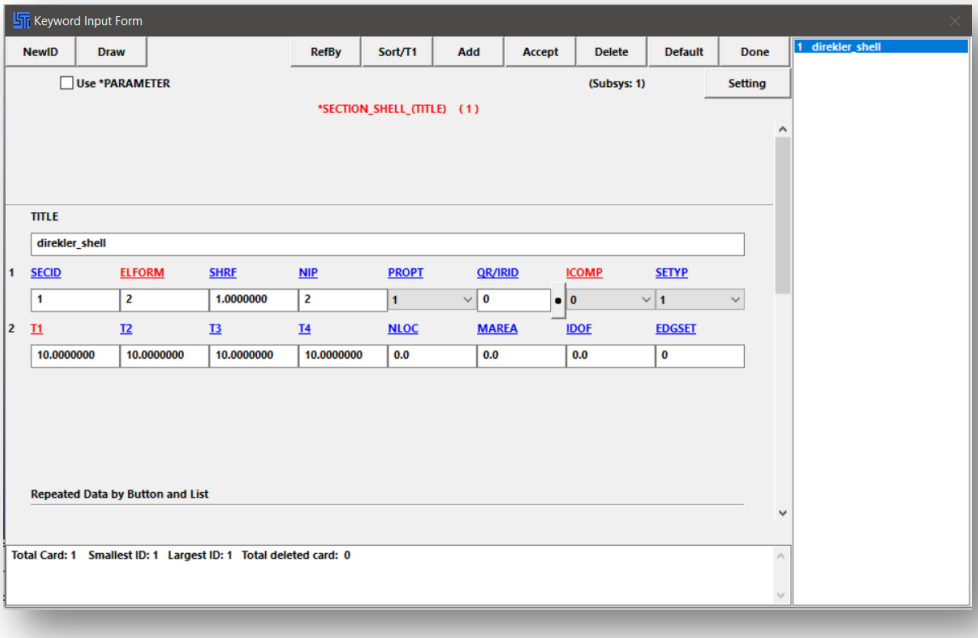
144. Amato, G., O'Brien, F., Ghosh, B., and Simms, C., "Gabions: Evaluation of potential as low-cost roadside barriers", ***International Journal Of Crashworthiness***, 20 (1): 12–26 (2015).

# EK AÇIKLAMALAR A.

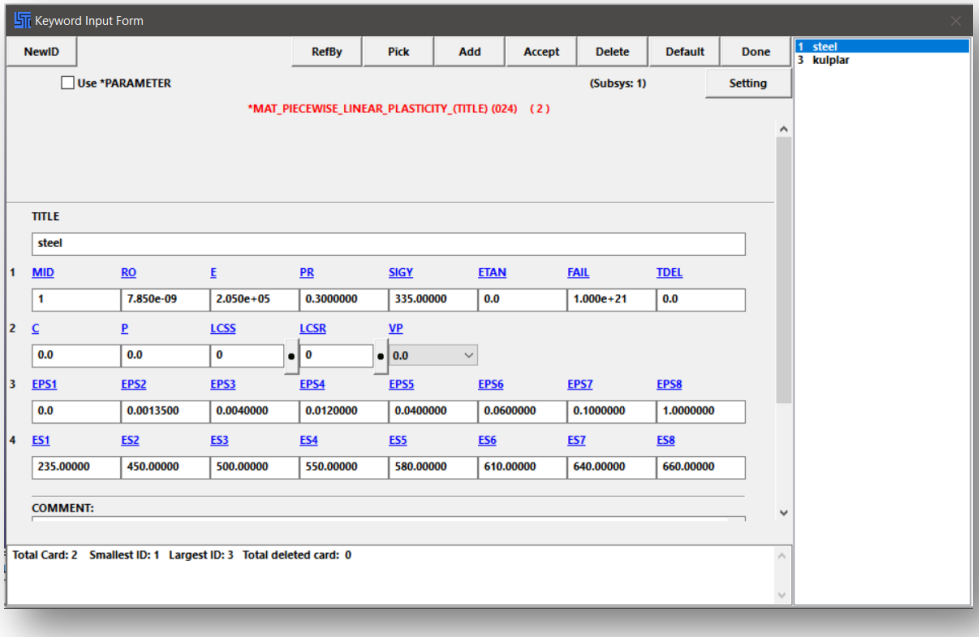
# LS DYNA TANIMLAMA KARTLARI



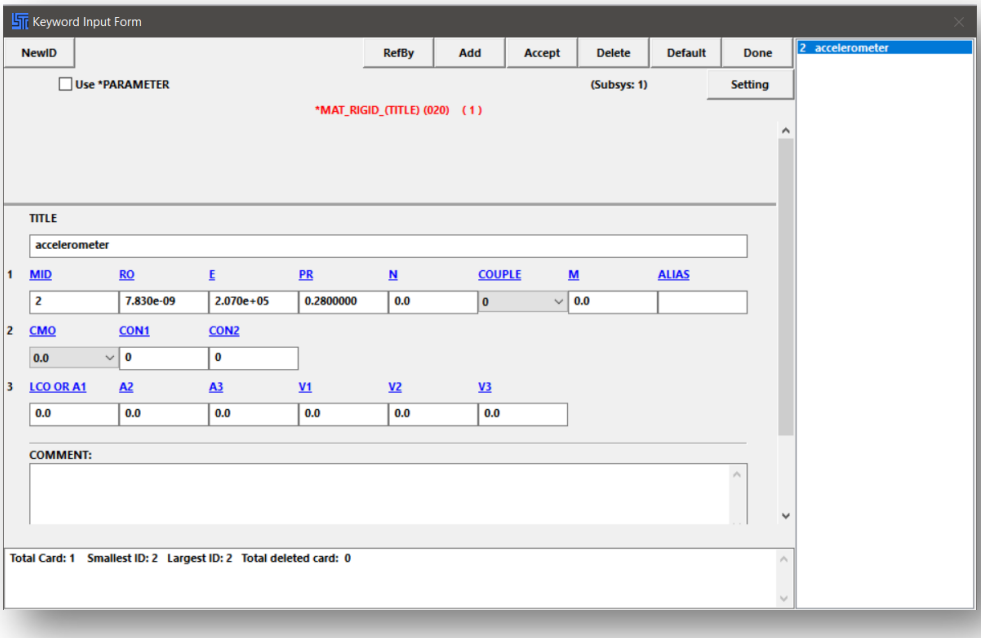

Şekil Ek A.1. Deneysel çarpışma sisteminin "part" tanımlamaları.



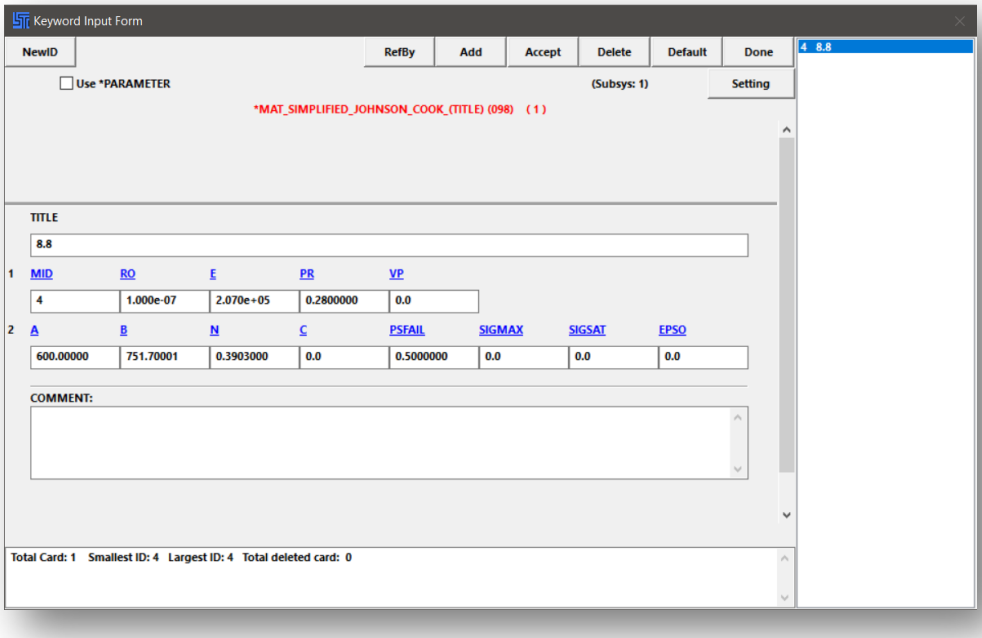

Şekil Ek A.2. Deneysel çarpışma sistemindeki metal konstrüksiyon kısmının et kalınlığının girilmesi.



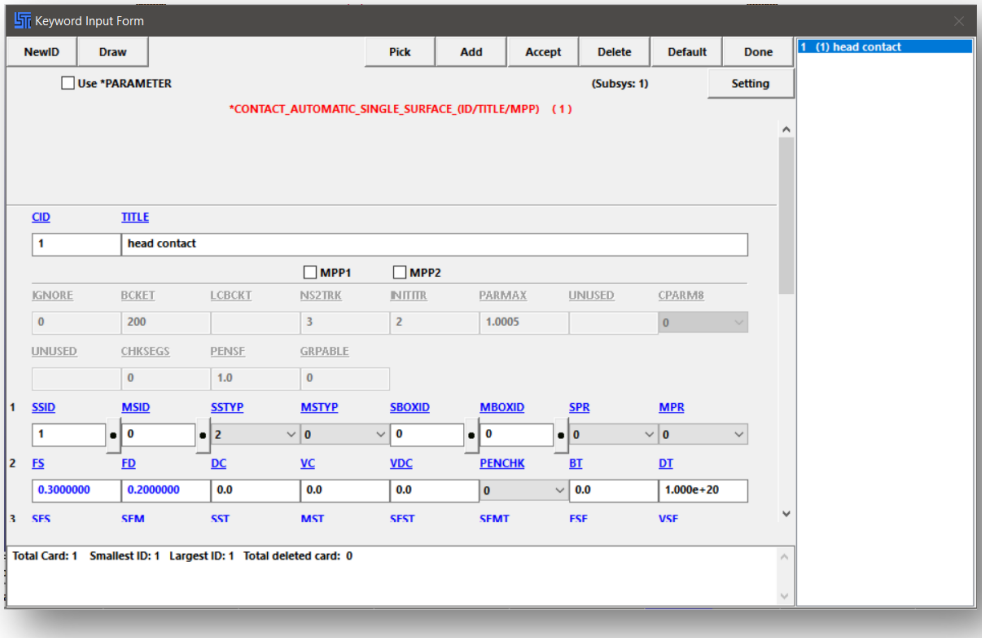

Şekil Ek A.3. Deneysel çarpışma sistemindeki metal konstrüksiyon kısmının malzeme tanımı.



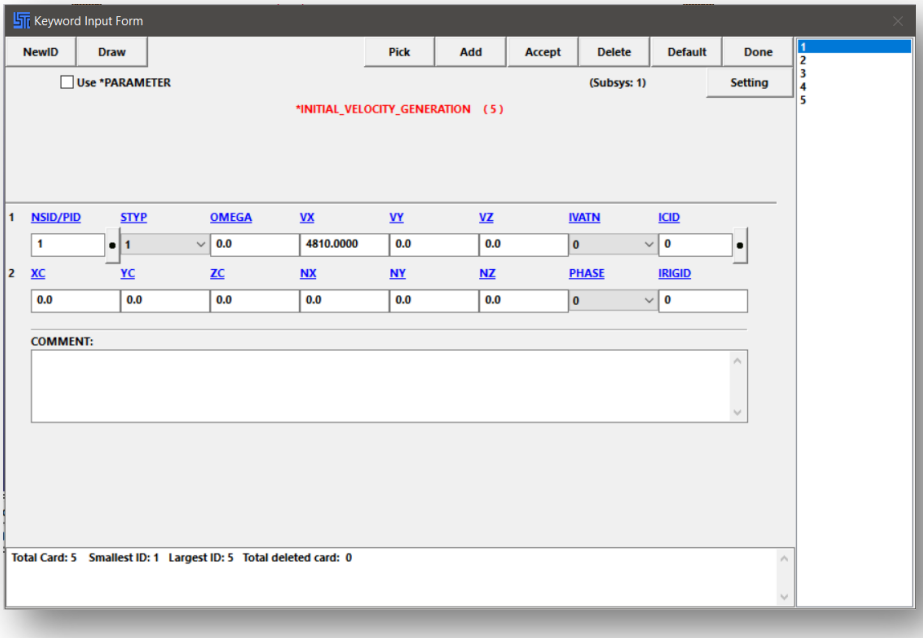

Şekil Ek A.4. Deneysel çarpışma sistemindeki ivme ölçer kısmının malzeme tanımı.



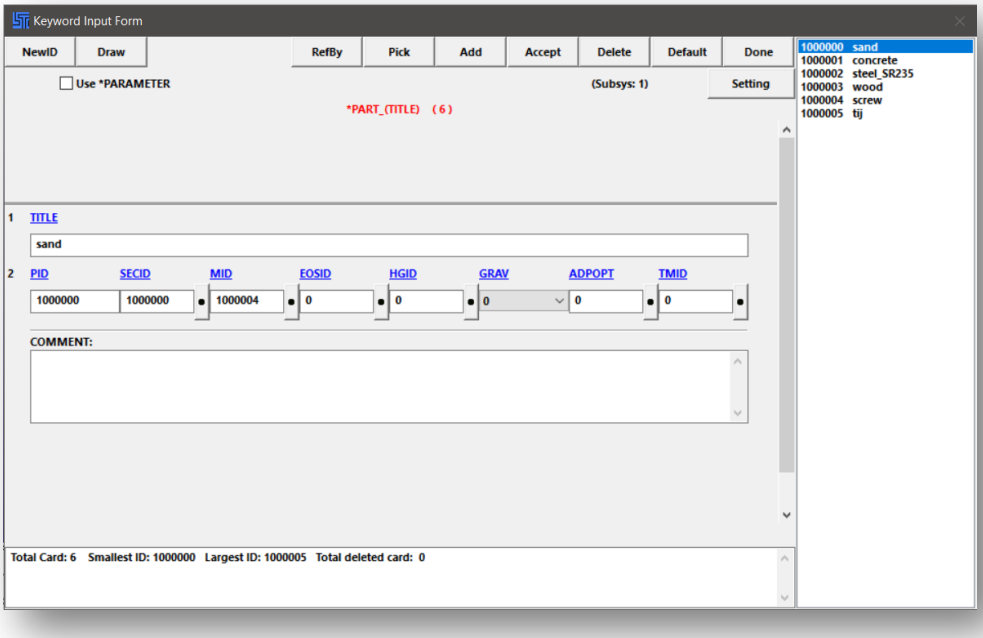

Şekil Ek A.5. Deneysel çarpışma sistemindeki zincir kısımlarının malzeme tanımı.



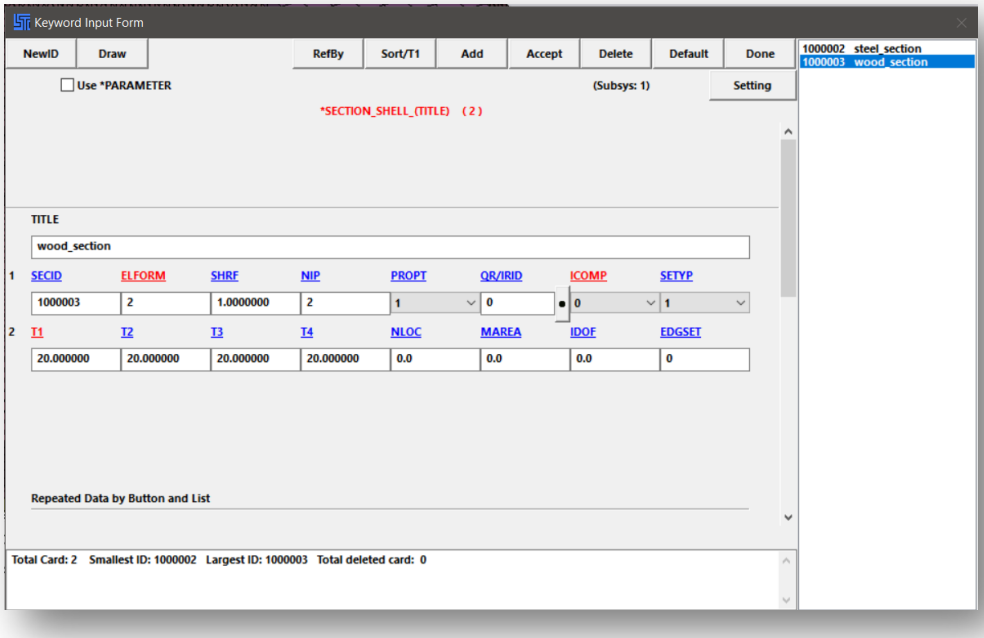

Şekil Ek A.6. Deneysel çarpışma sistemi modelindeki temas tanımlamaları.



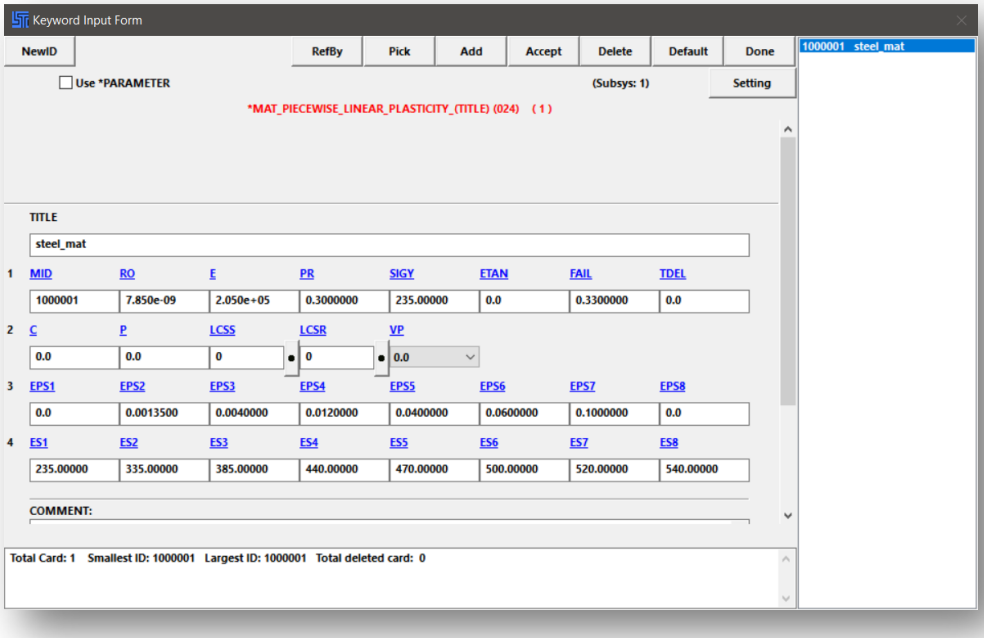

Şekil Ek A.7. Deneysel çarpışma sistemindeki pandül kısmına hız tanımlanması.



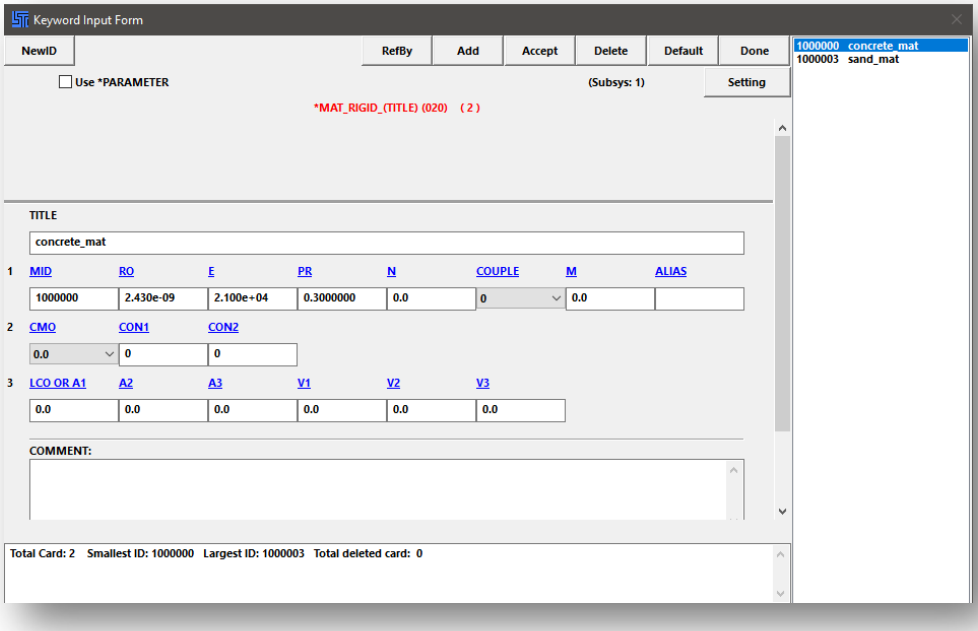

Şekil Ek A.8. YHB'lerin "part" tanımlamaları.



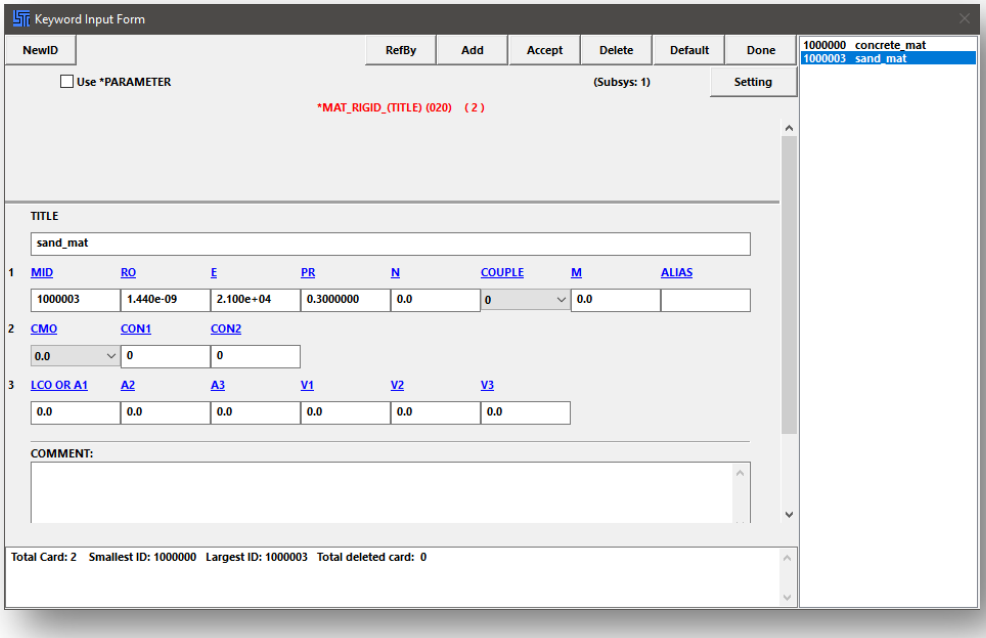

Şekil Ek A.9. YHB modelinde ahşap ve metal kısımlarına kalınlık verilmesi.



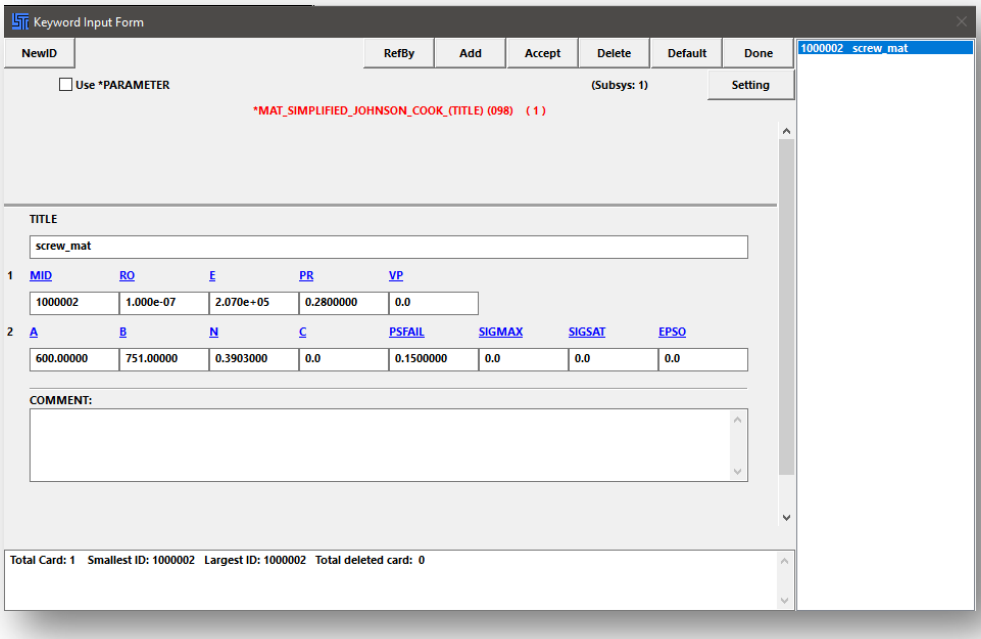

Şekil Ek A.10. YHB modelinde metal kısımlara malzeme tanımlanması.



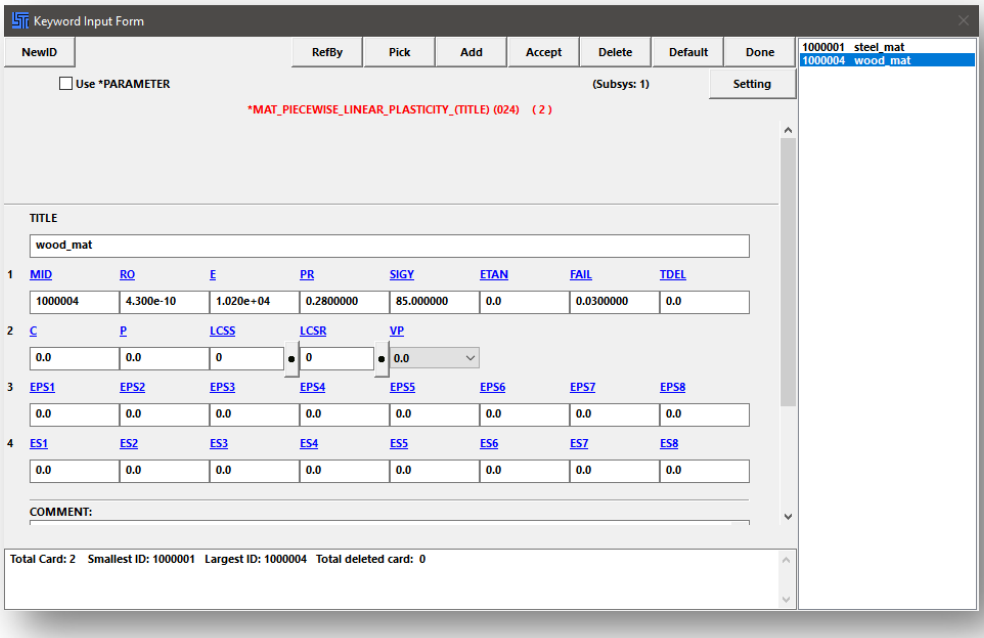

Şekil Ek A.11. YHB modelinde beton kısımlara malzeme tanımlanması.



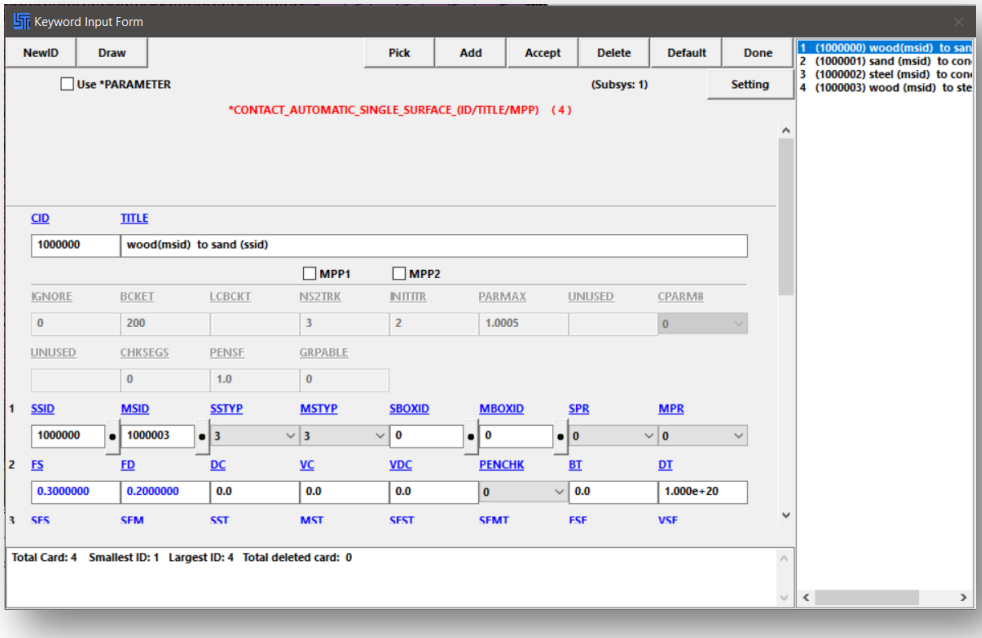

Şekil Ek A.12. YHB modelinde kum kısmına malzeme tanımlanması.



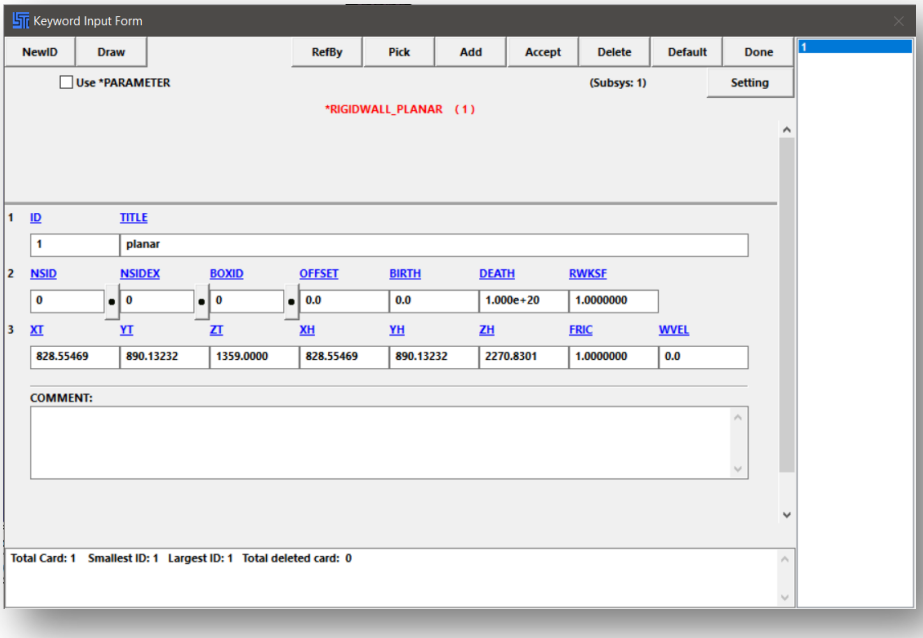

Şekil Ek A.13. YHB modelinde kullanılan vida ve tij kısımlara malzeme tanımlanması.



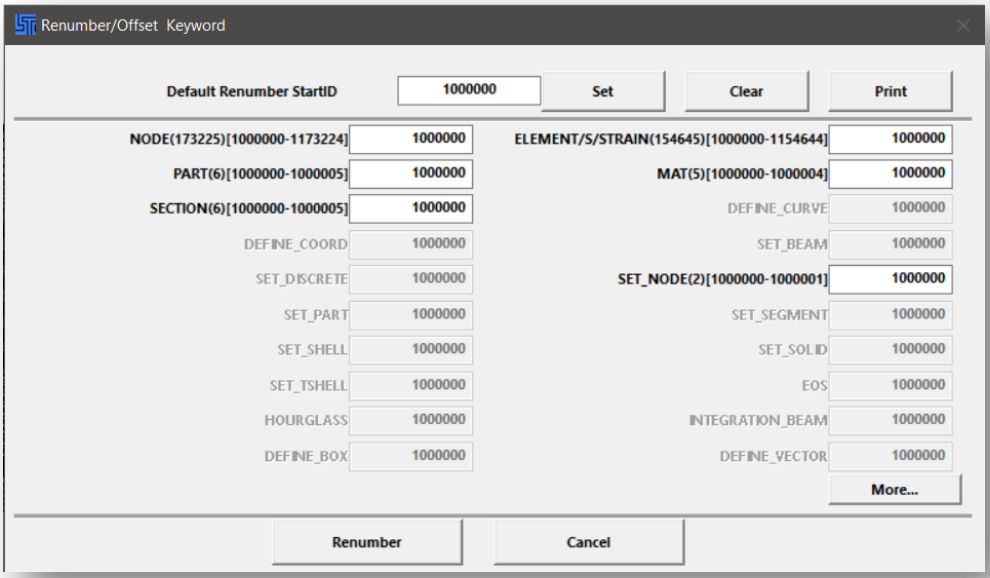

Şekil Ek A.14. YHB modelinde ahşap kısımlara malzeme tanımlanması.




Şekil Ek A.15. YHB modelinde temasların tanımlanması.




Şekil Ek A.16. YHB'lerin alt kısmına rijit bir zemin tanımlanması.




Şekil Ek A.17. YHB modelinde yeniden numaralandırma işleminin yapılması.

## ÖZGEÇMİŞ

Emre BİRİNCİ 2005 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlayıp 2009 yılında mezun oldu. Aynı yıl yine Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi'nde Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2011 yılında mezun oldu. 2010 yılında Akçaabat Ziraat Odası ve 2011 yılında Arsin Ziraat Odası'nda Proje Ofisi Sorumlusu olarak çalıştı. Bu kurumlarda Avrupa Birliği projeleri yönetti. 2011 yılının sonunda Kastamonu Üniversitesi, Araç Rafet Vergili Meslek Yüksekokulu, Ormancılık Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babası olan Emre BİRİNCİ, TEMA Vakfı üyesi ve Trabzonspor Kulübü delegesidir.