T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE SANAYİ EMİSYONLARININ AZALTILMASI İÇİN KARBON TUTMA OPTİMİZASYON STRATEJİLERİ: TAHMİNİ BİR AĞAÇLANDIRMA MODELİ

Asım Burhan ERDAL

DANIŞMAN
Doç. Dr. İnci ÇAĞLAYAN

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği Programı

Temmuz, 2025

T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE SANAYİ EMİSYONLARININ AZALTILMASI İÇİN KARBON TUTMA OPTİMİZASYON STRATEJİLERİ: TAHMİNİ BİR AĞAÇLANDIRMA MODELİ

Asım Burhan ERDAL

DANIŞMAN
Doç. Dr. İnci ÇAĞLAYAN

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Temmuz, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Asım Burhan ERDAL tarafından, **Doç. Dr. İnci ÇAĞLAYAN** danışmanlığında hazırlanan **"TÜRKİYE'DE SANAYİ EMİSYONLARININ AZALTILMASI İÇİN KARBON TUTMA OPTİMİZASYON STRATEJİLERİ: TAHMİNİ BİR AĞAÇLANDIRMA MODELİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **23/07/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Doç. Dr. İnci ÇAĞLAYAN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Amenajmanı Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ASİL ÜYE	Prof. Dr. Özgür KABAK İstanbul Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ASİL ÜYE	Doç. Dr. Serhun SAĞLAM İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Amenajmanı Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
YEDEK ÜYE	Prof. Dr. Ahmet YEŞİL İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Amenajmanı Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
YEDEK ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Zühal ÖZCAN YAVUZ Bahçeşehir Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

İTHAF

Bu yüksek lisans tezini, hayatımın her anında yanımda duran, sevgileriyle yolumu aydınlatan ve hiçbir karşılık beklemeden her türlü fedakârlığı üstlenen kıymetli aileme; sabırlarına, sevgilerine ve sonsuz emeklerine ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

TÜRKİYE'DE SANAYİ EMİSYONLARININ AZALTILMASI İÇİN KARBON TUTMA OPTİMİZASYON STRATEJİLERİ: TAHMİNİ BİR AĞAÇLANDIRMA MODELİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
İTHAF ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
ABSTRACT ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. KÜRESEL ISINMA VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ 6
2.2. KARBON EMİSYONU AZALTIM STRATEJİLERİ 7
2.2.1. Ağaçlandırma 7
2.2.2. Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS) 8
2.3. AĞAÇLANDIRMADA OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI 9
3. YÖNTEM **11**
3.1. AŞAMA 1: TÜRKİYE'DEKİ AĞAÇLANDIRMA SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ 12
3.2. AŞAMA 2: MODELİN ANA AMACININ ORTAYA KONMASI 13
3.3. AŞAMA 3: MODEL İÇİN GEREKLİ VERİLERİN ELDE EDİLMESİ 13
3.3.1. Ağaç Türleri 13
3.3.2. Potansiyel Ağaçlandırma Sahaları 21
3.3.3. Ağaçlandırma Maliyetleri 23
3.3.4. Proje Sahibine Ait Parametreler 25
3.4. AŞAMA 4: MODELİN OLUŞTURULMASI VE ÇÖZÜMÜ 25
4. BULGULAR **30**
4.1. SENARYO I 30

4.2. SENARYO II 33
4.3. SENARYO III 36
4.4. SENARYO IV 39
5. TARTIŞMA 42
5.1. SENARYOLARIN DEĞERLENDİRMESİ 42
5.1.1. Senaryo I 45
5.1.2. Senaryo II 47
5.1.3. Senaryo III 49
5.1.4. Senaryo IV 50
5.2. MODELİN UYGULANABİLİRLİĞİ VE POTANSİYEL SORUNLAR 51
5.3. HUKUKİ ZEMİN 55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 56
KAYNAKLAR 58
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Kavramsal Çerçeve 5

Şekil 2.2 Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) Mekanizması (Senken, 2024) 8

Şekil 3.1 Optimizasyon Modeli Oluşturma Süreci 11

Şekil 3.2 Bonitet Sınıflarına Göre Ağaç Türlerinin Yıllık Karbon Tutumu (tCO_2e/ha) 19

Şekil 3.3 Potansiyel Ağaçlandırma Sahaları 22

Şekil 4.1 Senaryo I-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl) 30

Şekil 4.2 Senaryo I-Toplam Ağaçlandırmanın Ağaç Türlerine Göre Dağılımı 31

Şekil 4.3 Senaryo I-Toplam Ağaçlandırmanın Bonitet Sınıflarına Göre Dağılımı 31

Şekil 4.4 Senaryo I-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl) 32

Şekil 4.5 Senaryo I-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl) 32

Şekil 4.6 Senaryo II-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl) 33

Şekil 4.7 Senaryo II-Toplam Ağaçlandırmanın Ağaç Türlerine Göre Dağılımı 34

Şekil 4.8 Senaryo II-Toplam Ağaçlandırmanın Bonitet Sınıflarına Göre Dağılımı 34

Şekil 4.9 Senaryo II-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl) 35

Şekil 4.10 Senaryo II-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl) 35

Şekil 4.11 Senaryo III-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl) 36

Şekil 4.12 Senaryo III-Toplam Ağaçlandırmanın Bonitet Sınıflarına Göre Dağılımı 37

Şekil 4.13 Senaryo III-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl) 37

Şekil 4.14 Senaryo III-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl) 38

Şekil 4.15 Sahipli Arazide Proje Sonu Odun Emvali Satış Gelirleri (TL/yıl) 38

Şekil 4.16 Senaryo IV-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl) 39

Şekil 4.17 Senaryo IV-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl) 40

Şekil 4.18 Senaryo IV-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl) 40

Şekil 4.19 Sahipli Arazilerden 49 Yılın Sonunda Elde Edilen Satış Gelirleri (TL/yıl) 41

Şekil 5.1 Ağaçlandırma Süreleri ve Miktarları 43

Şekil 5.2 Toplam Depolanan CO_2e Miktarları 43

Şekil 5.3 Toplam Ağaçlandırma Maliyeti 43

Şekil 5.4 Gerekli Karbon Kredisi Tutarı 43

Şekil 5.5 Odun Emvali Satış Geliri 43

Şekil 5.6 Hedeflenen CO_2e İçin Toplam Maliyet 43

Şekil 5.7 Senaryo I - Senaryo III Yıllık Bütçe Kullanımları 45

Şekil 5.8 Senaryo I-Ağaçlandırma Bütçesi Kullanımı - Depolanan CO_2e 46

Şekil 5.9 Senaryo II-Yıllık Bütçe Kullanımı ve Satın Alınması Gereken Karbon Kredileri (TL/yıl) 48

Şekil 5.10 Senaryo III-Toplam Maliyet (TL) 49

Şekil 5.11 1990 - 2025 Tarihleri Arası AB ETS Emisyon İzni Fiyatları (WORLD BANK GROUP, 2025) 54

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Özel Ağaçlandırma Sahaları ve Ağaçlandırma Boyutları 12

Tablo 3.2 Ölü Örtü Karbon Miktarı Katsayıları 16

Tablo 3.3 Orman Toprağı İçindeki Karbon Miktarı Katsayıları 16

Tablo 3.4 Yıllara Göre Cari CO_2e Karbon Miktarları 18

Tablo 3.5 Sahipli Arazilerde Birim Alandaki Satış Gelirleri 20

Tablo 3.6 Ağaçlandırma Maliyetleri (OGM, 2025b, 2025c) 24

Tablo 3.7 Kümelerin, Parametrelerin ve Değişkenlerin Tanımı 27

Tablo 3.8 Denklemlerin Açıklamaları 29

Tablo 5.1 Ağaçlandırma Senaryoları Özet Tablo 42

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
°C	: Santigrat Derece
CO_2	: Karbondioksit
CO_2e	: Karbondioksit Eşdeğeri
€	: Euro (Avro)
ha	: Hektar
km	: Kilometre
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
O_2	: Oksijen
TL	: Türk Lirası

Kısaltmalar	Açıklama
AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BGF	: Biyokütle Genişletme Faktörü
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CBAM	: Carbon Border Adjustment Mechanism
CF	: Biyokütleyi Karbon Miktarına Dönüştürme Katsayısı
COP21	: Conference of the Parties (21. Taraflar Konferansı)
DGH	: Dikili Kabuklu Gövde Hacmi
ETS	: Emisyon Ticaret Sistemi
EUA	: European Union Allowance (Avrupa Birliği Emisyon İzni)
FAO	: Food and Agriculture Organization (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü)
FRA	: Global Forest Resources Assessment (Küresel Orman Kaynakları Değerlendirmesi)
GPG-LULUCF	: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık için İyi Uygulama Rehberi)

HA	: Hacim Ağırlığı
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
KDV	: Katma Değer Vergisi
MIP	: Mixed-Integer Programming (Karma Tamsayılı Programlama)
NBD	: Net Bugünkü Değer
OGM	: Orman Genel Müdürlüğü
ÖOB	: Ölü Odun Biyokütlesi
ÖOK	: Ölü Odun Karbon Miktarı
R	: Kök/Sak Oranı
SKDM	: Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması
TAB	: Toprak Altı Canlı Biyokütle
TAK	: Toprak Altı Biyokütle İçindeki Karbon Miktarı
TBMM	: Türkiye Büyük Millet Meclisi
TÜB	: Toprak Üstü Canlı Biyokütle
TÜK	: Toprak Üstü Biyokütle İçindeki Karbon Miktarı
UKB	: Ulusal Katkı Beyanı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE SANAYİ EMİSYONLARININ AZALTILMASI İÇİN KARBON TUTMA OPTİMİZASYON STRATEJİLERİ: TAHMİNİ BİR AĞAÇLANDIRMA MODELİ

Asım Burhan ERDAL

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Doç. Dr. İnci ÇAĞLAYAN

Karbon tutma kapasiteleri sayesinde ormanlar, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol üstlenmektedir. Türkiye'de özel sektörün iklim hedeflerine katkı sağlayabileceği en etkili stratejilerden biri, ağaçlandırma yoluyla karbon yutaklarını artırmaktır. Ancak sınırlı bütçelerle en yüksek etkiyi sağlayacak şekilde bir strateji geliştirilmesi, karar destek sistemlerine duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Çalışmada, Türkiye'nin yüksek ağaçlandırma kapasitesi dikkate alınarak, belirli bir karbon tutma hedefi ve yıllık bütçe sınırlamaları çerçevesinde özel sektörün uzun vadeli ağaçlandırma yatırımlarını ülke koşullarına uygun olarak nasıl optimize edebileceği analiz edilmiştir. Bu yaklaşımla sanayi emisyonlarının azaltılması, elde edilen karbon miktarlarının emisyon ticaret mekanizmalarında ekonomik değere dönüştürülmesi ve aynı zamanda kamu kurumlarının üzerindeki ağaçlandırmanın maddi yükünün hafifletilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında GAMS Studio kullanılarak geliştirilmiş optimizasyon modeli "Karma Tamsayılı Programlama" yaklaşımıyla oluşturulmuş ve 49 yıllık bir planlama dönemi

için uygulanmıştır. Model; farklı ağaç türlerini (Kızılçam ve Sahil Çamı), üç farklı arazi tipini (devlet ormanları, hazine arazileri ve sahipli araziler), üç bonitet sınıfını (I, II, III) ve çeşitli maliyet bileşenlerini kapsamaktadır. Ayrıca, yıllık karbon tutma hedefi, yıllık bütçe limiti, ağaçlandırma maliyetler, arazi sınırlamaları ve ağaçlandırma izin süreleri gibi parametreler modele kısıtlayıcı koşullar olarak dahil edilmiştir.

Model dört farklı senaryo altında test edilmiş ve elde edilen sonuçlar maliyet etkinliği, karbon tutma verimliliği ve tür-ağaç kombinasyonlarının performansları açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, farklı bütçe seviyeleri, arazi mülkiyet yapıları ve gelir getirici faaliyetlerin ağaçlandırma projelerinin karbon depolama başarısı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle Senaryo I, kısa ağaçlandırma süresiyle ve düşük maliyetle hedefe ulaşılması açısından en dengeli ve uygulanabilir çözümü sunarken, sahipli arazilerin kullanıldığı senaryolar daha yüksek karbon tutumu ve ekonomik getiri sağlamıştır. Öte yandan yıllık ağaçlandırma bütçesinin azaltılmasının, uzun vadede daha yüksek maliyetlere yol açtığı belirlenmiştir. Bu bulgular, özel sektörün ağaçlandırma projelerine etkin katılımında arazi mülkiyeti yapısının, gelir-bütçe modellerinin ve uzun vadeli planlamanın kritik rol oynadığını göstermekte olup; elde edilen sonuçlar üzerinden planlama, politika, uygulama ve mevzuat düzeyinde önerilere yer verilmiştir.

Temmuz 2025 , 82 sayfa.

Anahtar kelimeler: İklim Değişikliği, Emisyon Ticaret Sistemi, Karbon Depolama, Ağaçlandırma, Optimizasyon, Sanayi Emisyonları

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

OPTIMIZATION STRATEGIES FOR CARBON SEQUESTRATION IN REDUCING INDUSTRIAL EMISSIONS IN TÜRKİYE: A PREDICTIVE AFFORESTATION MODEL

Asım Burhan ERDAL

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Forest Engineering

Forest Engineering, Master's Program with Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. İnci ÇAĞLAYAN

Forests play a vital role in combating climate change due to their carbon sequestration capacities. In Turkey, one of the most effective strategies through which the private sector can contribute to climate goals is by increasing carbon sinks through afforestation. However, developing a strategy that yields the highest impact within limited budgets highlights the need for decision support systems. This study analyzes how the private sector in Turkey can optimize long-term afforestation investments under national conditions, considering a specific carbon sequestration target and annual budget constraints, based on the country's high afforestation potential.

The aim is to reduce industrial emissions, convert the sequestered carbon into economic value through emission trading mechanisms, and alleviate the financial burden of afforestation on public institutions.

An optimization model was developed using GAMS Studio based on the “Mixed-Integer Programming” approach and applied over a 49-year planning period. The model includes different tree species (Pinus brutia and Pinus pinaster), three land types (state forests, treasury lands, and privately-owned lands), three site quality classes (I, II, III), and various cost components. Additionally, parameters such as the annual carbon sequestration target, annual budget limit, afforestation costs, land constraints, and afforestation permit durations were incorporated into the model as limiting conditions.

The model was tested under four different scenarios, and the results were compared in terms of cost-effectiveness, carbon sequestration efficiency, and the performance of species-land combinations. The results revealed the effects of varying budget levels, land ownership structures, and revenue-generating activities on the carbon storage success of afforestation projects. In particular, Scenario I offered the most balanced and feasible solution in terms of achieving the target with a short afforestation period and low cost, while scenarios involving privately-owned lands provided higher carbon sequestration and economic returns. On the other hand, reducing the annual afforestation budget was found to lead to higher long-term costs. These findings highlight the critical role of land ownership structure, income-budget models, and long-term planning in enabling the effective participation of the private sector in afforestation projects. Based on these results, recommendations were provided at the levels of planning, policy, implementation, and legislation.

July 2025, 82 pages.

Keywords: Afforestation, Carbon Sequestration, Climate Change, Optimisation, Emission Trade System, Industrial Emissions

1. GİRİŞ

Geçmişte ormanlardan çoğunlukla odun üretimi amacıyla faydalanılırken, günümüzde artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte orman ekosistemleri üzerindeki baskı her geçen gün artmaktadır (Assessment, 2005). Kıt kaynaklar ve sınırsız ihtiyaçlar arasındaki dengenin oluşturulması için orman ekosistemlerinin sunduğu ürün ve hizmetleri daha verimli kullanmanın önemi giderek artmaktadır (Assessment, 2005).

Günümüzde ormanlar, sunduğu ürün ve hizmetler doğrultusunda çeşitli sınıflandırmalara ayrılmaktadır. Orman fonksiyonları üç ana grupta toplanmaktadır: ekonomik, ekolojik ve sosyokültürel. Bu temel gruplar Eraslan (1973) tarafından belirlenen on genel orman fonksiyonunu kapsamaktadır. Bu fonksiyonlar; "Orman ürünleri üretim fonksiyonu", "Doğayı koruma", "Erozyonu önleme", "İklim koruma", "Hidrolojik fonksiyon", "Toplum sağlığı", "Estetik", "Ekoturizm ve rekreasyon", "Ulusal savunma" ve "Bilimsel fonksiyon" başlıkları altında sınıflandırılmaktadır.

"Millennium Ecosystem Assessment" (2005) raporunda 4 ana başlık altında 24 grupta tanımlanırken, Kindler (2016) tarafından yapılan sınıflandırmada ise 24 farklı ekosistem hizmeti yer almaktadır. Bu sınıflandırmalarda günümüzde ön plana çıkan ekosistem hizmetlerinin başında "iklim koruma" yer almaktadır.

Çağımızın en önemli sorunlarından biri olan iklim değişikliği ile mücadelede, orman ekosistemleri önemli bir rol üstlenmektedir. Bilindiği üzere küresel ısınmanın sebebi olan sera gazlarından en önemlisi karbondioksittir (CO_2) ve ormanlar karasal alanlardaki en güçlü karbon yutakları arasında yer almaktadır (Lead ve diğ., 2000). Basit bir anlatımla fotosentez, bitkilerin havadaki CO_2 gazlarını ayrıştırmak suretiyle karbonu (C) bünyesinde depolayarak büyümesi ve havaya da oksijen (O_2) salmasını ifade etmektedir (Raven ve diğ., 2005). Birçok emisyon azaltım yöntemine kıyasla fotosentez, atmosferi onarıcı bir özellik göstermektedir.

Ormancılık faaliyetleri ile karbon tutumunu artırmaya yönelik çalışmalardan biri de ağaçlandırmadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), "Ağaçlandırma" terimini önceden orman örtüsü bulunmayan alanlarda orman oluşturma pratiği olarak tanımlamaktadır

(FAO, 2001). Crowther Laboratuvarı'nın yaptığı araştırma, yaklaşık bir trilyon yeni ağacın, insan kaynaklı karbondioksit (CO_2) emisyonlarının yaklaşık üçte birini absorbe edebileceğini öne sürmektedir (Kim, 2021).

Ülkemiz, bir ağaçlandırma ülkesi olması ile bu bakımdan avantajlı konumdadır (OGM, 2025a). Her yıl yapılmakta olan orman varlığını artırmaya yönelik ağaçlandırmalar, karbon emisyonlarını azaltmak açısından son derece önemlidir. OGM Faaliyet Raporu'na (2025) göre 2020-2024 yılları arasında kamu eliyle 128.948 ha, özel ağaçlandırma ile 23.557 ha olmak üzere toplamda 152.505 ha alan ağaçlandırılmıştır. Özel ağaçlandırma çalışmaları hibe ve kredi finansmanlarıyla desteklenmiştir (OGM, 2025a). Türkiye'nin orman varlığına tarihsel olarak bakıldığında, 1973 yılında 20.199.296 hektar olan orman alanı, ülke yüzölçümünün %26,1'ine karşılık gelmekte; 2020 yılı itibarıyla bu alan 22.933.000 hektara ulaşarak toplam yüzölçümün %29,4'ünü oluşturmaktadır (OGM, 2021). Günümüzde ise ormanlık alanlar, ülke yüzölçümünün yaklaşık %30'unu kapsamaktadır (OGM, 2025a).

Türkiye ormanlarının tamamına yakını devletin hüküm ve tasarrufu altında olup büyük çoğunluğu Orman Genel Müdürlüğü tarafından idare edilmektedir (OGM, 2021). Özel mülkiyete ait orman alanları ise, toplam ormanlık alanın binde ikisinden daha az olup (yaklaşık 30 bin hektar) -anayasa gereği hiçbir şekilde bölünemez ve bu alanların denetimi OGM tarafından yürütülmektedir(OGM, 2021). 2020 yılı itibarıyla yapılan tespitlere göre ormanlık alanlar, yaklaşık 22,9 milyon ha ile ülke alanının %29,4' ünü kaplamaktadır (OGM, 2021). Her yıl gerçekleştirilen ağaçlandırma faaliyetleri sayesinde orman alanlarında artış gözlemlenmektedir. Nitekim FRA 2020 raporuna göre, Türkiye 2015-2020 yılları arasında orman dışı alanlarda yapılan ağaçlandırma çalışmaları bakımından dünya genelinde 4. sırada yer almıştır (OGM, 2021).

Ülkemizde gerçek ve tüzel kişiler tarafından gerçekleştirilebilecek ağaçlandırma faaliyetleri 7310 sayılı özel ağaçlandırma tamimine göre yürütülmektedir. Bu tamime göre özel ağaçlandırma ve özel imar-ihya çalışmalarına konu edilebilecek alanlar; Orman arazileri, Hazine arazileri ve sahipli arazilerdir (OGM, 2020a).

Artan karbon emisyonları, küresel ısınmaya ve buna bağlı olarak ciddi ekolojik, ekonomik ve sosyal problemlere yol açmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler, sanayileşme ve ekonomik büyüme süreçlerinde karbon emisyonlarını azaltma hedefleriyle

uyumlu sürdürülebilir stratejilere ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla karbon tutumu, orman planlamasında önem verilmesi gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkemizin de taraf olduğu Paris Anlaşması, tüm sektörler için 2030 yılına kadar, 2010 seviyelerine kıyasla toplam sera gazı emisyonunun %45 civarında azaltılmasını hedeflemektedir (Agreement, 2015). Bu hedef doğrultusunda küresel ölçekte yenilenebilir enerji kullanımı, enerji verimliliği artırımı, sürdürülebilir ulaşım ve su kaynakları yönetimi gibi çeşitli emisyon azaltımı ve iklim değişikliğine uyum stratejileri geliştirilmektedir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bu stratejilerden birisi de karbon piyasalarıdır.

Türkiye'de hâlihazırda zorunlu bir karbon piyasası bulunmamakla birlikte, 2 Temmuz 2025 tarihinde Türkiye Büyük Millet Meclisi'nin 28. Dönem 3. Yasama Yılı 104. Birleşiminde kabul edilen ve 9 Temmuz 2025 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 7552 sayılı 'İklim Kanunu' kapsamında, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) benzeri bir Ulusal Emisyon Ticaret Sistemi'nin kurulması planlanmaktadır (TBMM, 2025; Resmî Gazete, 2025).

ETS, "Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması" (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM/SKDM) ile desteklenmektedir. SKDM, ithal edilen malların üretiminde açığa çıkan emisyonlar için tedarikçi firmaların karbon vergisi ödediğini belgeleyen bir mekanizmadır (European Commission, 2024a). Bu sistem Avrupa Birliği (AB) karbon piyasasında, AB dışından ithal edilen mallar sebebiyle oluşabilecek "karbon kaçağı''nı engellemek adına kurulmuştur. 2023-2025 tarihleri arası, belirli sektörleri kapsayan bir geçiş uygulanmakta; 2026 yılı itibariyle ise bu sektörler için tam uygulama devreye girecektir (European Commission, 2024a). Yakın gelecekte neredeyse tüm sektörler için zorunlu hale geleceği öngörülmektedir. Türkiye, toplam ihracatının %40,6'sını Avrupa ülkelerine gerçekleştirmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2023). Bu nedenle henüz ulusal düzeyde zorunlu bir karbon piyasası bulunmamakla birlikte SKDM uygulaması sebebiyle Avrupa Birliği ülkelerine ihracat yapan Türk şirketleri karbon emisyonlarını azaltmak ve beyan etmekle yükümlüdürler. Bu durumda, hem ulusal Emisyon Ticaret Sistemi'nin (ETS) kurulma süreci hem de ihracatçı firmaların SKDM kapsamında artan yükümlülükleri sebebiyle firmaların, sera gazı emisyonları azaltım stratejileri geliştirmesi zorunlu hâle getirmektedir.

Günümüzde sanayi kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik mevcut senaryolar, tek başlarına emisyon azaltım hedeflerine ulaşmakta yetersiz kalmakta; bu nedenle tamamlayıcı

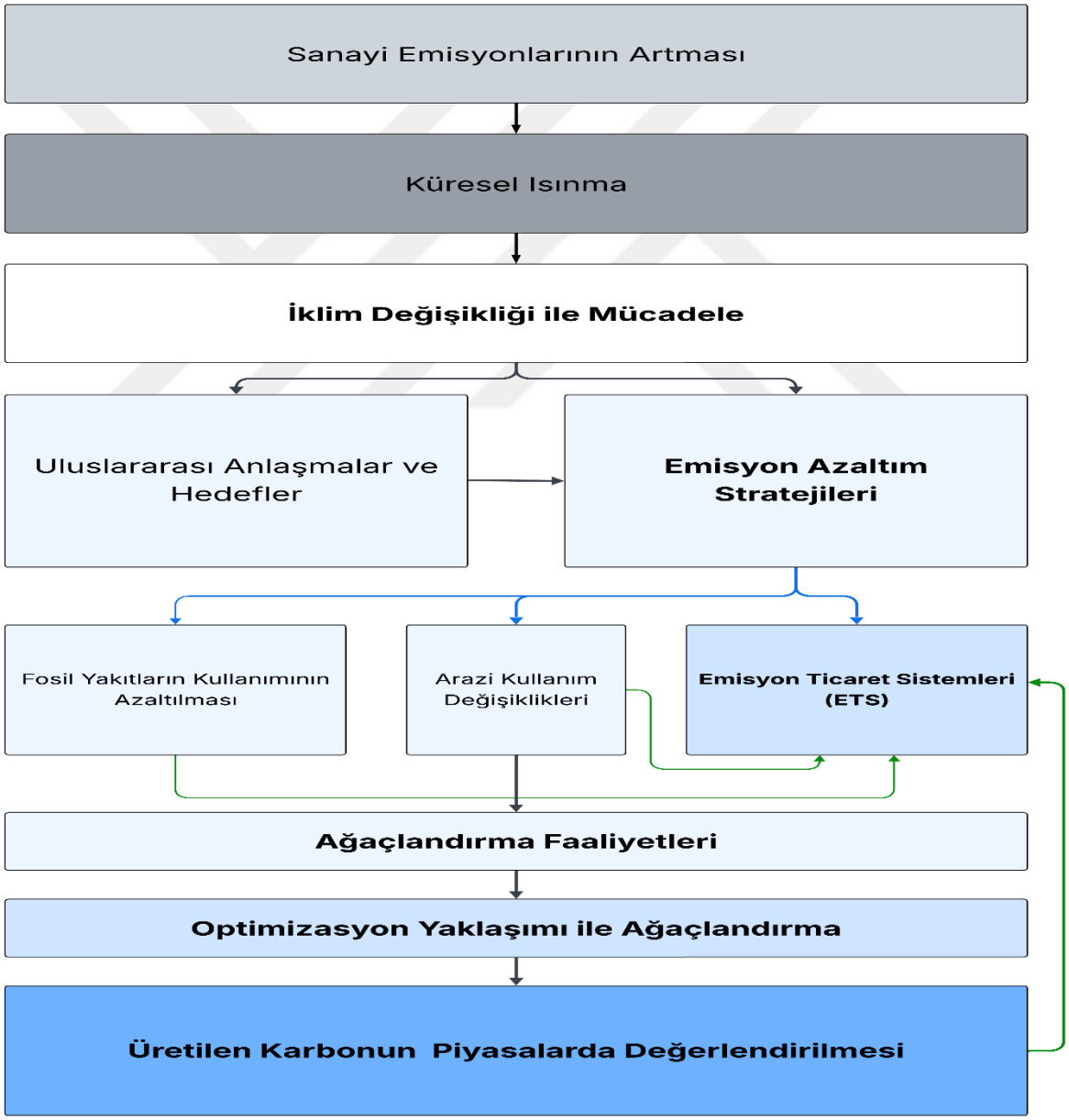
stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda ormancılık faaliyetleri, özellikle de ağaçlandırma, hem maliyet etkin bir çözüm sunmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Türkiye, ağaçlandırma faaliyetlerine elverişli arazi varlığı ve yıllık ağaçlandırma uygulamaları bakımından avantajlı bir konumda bulunmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'de yasal sınır olan 49 yıllık kiralama süresi boyunca, bir şirketin yıllık karbon tutma hedefi ve bütçesi doğrultusunda, geleneksel planlama yöntemlerine kıyasla daha etkin ve verimli sonuçlar üreten optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Model kapsamında iki farklı ağaç türü, üç farklı arazi tipi ve üç farklı bonitet düzeyinde her yıl hangi alanda ne kadar ağaçlandırma yapılması gerektiği belirlenmiştir. Böylece hem karbon hedefi karşılanmakta hem de toplam maliyet en aza indirilmektedir. Geliştirilen optimizasyon modeli, şirketleri karbon kredileri satın almak yerine, doğrudan ağaçlandırma yatırımı yapmaya teşvik ederek, hem karbon emisyonlarının azaltılmasına hem de ülkenin orman varlığının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, çevresel, sosyal, ekonomik ve yasal boyutları bütüncül bir yaklaşımla ele alarak karbon azaltımına yönelik yenilikçi ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Bu durum, özel sektörün çevresel sorumluluk bilincini artırmakla kalmayıp, kamu kurumları üzerindeki finansal yükün hafifletilmesine de katkıda bulunacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma iklim değişikliği ile mücadelede özel sektörün daha aktif bir rol üstlenmesini teşvik ederek, sürdürülebilir ormancılık uygulamalarının yaygınlaştırılmasına katkı sağlamayı, Paris İklim Anlaşması hedeflerine ve yakın gelecekte ülkemizde kurulması planlanan karbon piyasalarına hazırlık niteliği taşımayı amaçlamaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu çalışmanın çerçevesi 3 temel konu başlığı oluşturmaktadır; küresel ısınma ve iklim değişikliği, karbon emisyonu azaltım stratejileri ve ağaçlandırma süreçlerinde optimizasyon yaklaşımı. Bu başlıklar arasındaki ilişkiyi görsel olarak ortaya koymak amacıyla **Şekil 2.1** oluşturulmuştur. Bu 3 temel konu, alt başlıklar halinde aşağıda özet olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.1 Kavramsal Çerçeve

2.1. KÜRESEL ISINMA VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

Sanayi Devrimi, 18. yüzyılın ikinci yarısında Britanya'da başlayıp diğer ülkelere yayılan, hızlı sanayileşme sürecidir. Buhar makinesinin icadıyla başlayan bu dönem, kömür gibi fosil yakıtların yoğun kullanımı sebebiyle, atmosfere büyük miktarda sera gazı salımına yol açmıştır (IPCC, 2023). Bu sera gazlarının başında karbondioksit (CO_2) gelmektedir (IPCC, 2023). Sanayi emisyonları, doğal sera etkisinin artmasına ve atmosferde biriken gazların ısıyı tutmasına neden olmaktadır (IPCC, 2023). Bu sera etkisi, gezegenin ortalama yüzey sıcaklıklarının artmasına neden olarak küresel ısınmayı tetiklemekte; bu da buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi ve aşırı hava olayları gibi birçok çevresel sorunu beraberinde getirmektedir (IPCC, 2023).

Küresel ısınmanın yol açtığı iklim değişikliği, sadece sıcaklık artışıyla sınırlı kalmamakta; yağış rejimlerinde düzensizlik, kuraklık, sel, orman yangınları ve biyoçeşitlilik kaybı gibi etkilerle, doğrudan veya dolaylı bir şekilde doğal yaşamı tehdit etmektedir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bu nedenle, iklim değişikliğiyle mücadele küresel bir öncelik haline gelmiştir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

İklim değişikliği küresel bir sorun olup, bu sorunla mücadelede uluslararası işbirliği temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Bu çerçevede çeşitli uluslararası anlaşma ve protokoller imzalanmıştır. 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), ardından 1997 yılında Kyoto Protokolü imzalanmıştır. Bu anlaşmalardan yasal olarak bağlayıcı olan Paris Anlaşması, 12 Aralık 2015'te Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı'nda 196 ülke tarafından kabul edilmiştir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bu anlaşmaya göre hedef, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayileşme öncesi döneme göre 2°C'nin altında tutmak ve mümkünse 1,5°C ile sınırlamaktır (Agreement, 2015).

Türkiye'nin de taraf olduğu Paris Anlaşması, 'Ulusal Katkı Beyanı' (UKB) olarak adlandırılan beş yıllık bir raporlama döngüsü çerçevesinde yürütülmektedir. Bu kapsamda taraf ülkeler, her beş yılda bir UKB'lerini Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi sekretaryasına sunmakla yükümlüdür. Türkiye, Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'na göre 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarının %41'ini azaltmayı hedeflemektedir. 2053 yılı ise net sıfır emisyon hedefinin ulaşılacağı tarih olarak belirlenmiştir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

2.2. KARBON EMİSYONU AZALTIM STRATEJİLERİ

Anlaşmalara taraf ülkelerin, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayileşme öncesi döneme göre 2°C'nin altında tutmak için uygulayabileceği birçok emisyon azaltım stratejisi bulunmaktadır. BMİDÇS taraflar toplantısında, iklim değişikliğinin insan kaynaklı olduğunu özellikle vurgulamaktadır (Serengil, 2019).

IPCC raporuna (2006) göre insan kaynaklı sera gazlarının artmasının temel nedenleri fosil yakıtların kullanımı ve arazi kullanım değişiklikleridir ancak arazi kullanım değişimleri ile emisyonların azaltılabileceği senaryolar da mümkündür.

Ormanlar en iyi karasal karbon yutaklarından biridir (Lead ve diğ., 2000). Dolayısıyla, ağaçlandırma yoluyla gerçekleştirilen ormanlaştırma çalışmaları, arazi kullanımındaki değişimin olumlu bir sonucudur.

Fosil yakıt kullanımının azaltılmasından yenilenebilir enerji yatırımlarına ve ağaçlandırma gibi uygulamalara kadar tüm bu çabalar, teşvik ve yaptırımlara ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan başlıca iki strateji "Ağaçlandırma" ve Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS)" 'dir. İlgili stratejilerin detayları, aşağıda başlıklar altında açıklanmıştır.

2.2.1. Ağaçlandırma

Paris İklim Anlaşması (Agreement, 2015), tüm ülkelerin orman yönetimi de dahil olmak üzere arazi temelli emisyon azaltım seçeneklerini tam verimli şekilde kullanmalarını öngörmektedir. Wade ve diğ. (2022) ormancılık alanında karbon birikimi konusunun giderek artan bir ilgi odağı haline geldiğini belirtmektedir.

Crowther Laboratuvarı tarafından yürütülen bir araştırmaya göre, dünya genelinde yaklaşık bir trilyon yeni ağacın dikilmesi durumunda, insan kaynaklı karbondioksit (CO_2) emisyonlarının yaklaşık üçte birinin absorbe edilebileceği öngörülmektedir (Kim, 2021). Girardin ve diğ. (2021), yaptıkları çalışmada ağaçlandırma yoluyla karbon yakalama gibi doğa temelli çözümlerin, maliyet etkin bir senaryoda yılda 10 gigaton CO_2 azaltımı sağlayabileceğini vurgulamaktadır. Bu kapsamda ağaçlandırma çalışmaları, düşük maliyetli, uygulanabilirliği

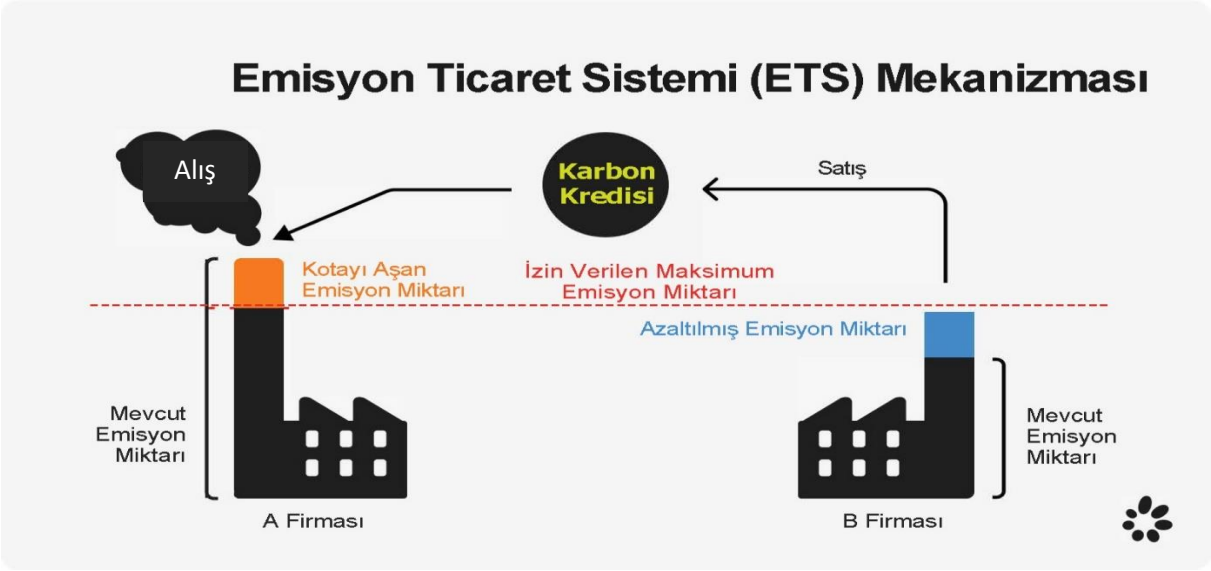
yüksek ve geniş coğrafyalarda uygulanabilir olması nedeniyle etkili bir emisyon azaltım aracı olarak öne çıkmaktadır (Doelman ve diğ., 2020).

2.2.2. Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS)

Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS), sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik piyasa temelli bir mekanizma olup, ilk olarak 2005 yılında Avrupa Birliği'nde uygulanmaya başlanmıştır. Bu sistem kota esasına dayalı olarak çalışmaktadır. Sanayi, enerji ve bazı ulaşım sektörleri için toplam karbon salım sınırı (kota) belirlenmektedir. Bu durum, atmosferi kirletme hakkının sektörler arasında paylaştırılarak sınırlandırılması anlamına gelmektedir. Belirlenen bu kotaya göre işletmelere karbon emisyon izni (EUA-EU Allowance) verilmektedir. Bir (1) EUA, bir (1) ton CO_2 salma hakkını temsil etmektedir. İşletmeler, tahsis edilen izin miktarını aşmaları durumunda piyasadan ek EUA satın almak zorundadır. 2025 yılı itibariyle 1EUA 65 € olarak belirlenmiştir (WORLD BANK GROUP, 2025).

AB ETS kapsamında yer alan sanayi ve enerji tesislerinden kaynaklanan emisyonlar, 2005'e kıyasla yaklaşık %47 azalmıştır. Bu sistem sayesinde 2013 yılından günümüze kadar 175 milyar € gelir elde edilmiştir (European Commission, 2024b).

ETS, "kirleten öder, tasarruf eden ödüllendirilir" prensibine dayanmaktadır (European Commission, 2024b). Eğer bir işletme fazladan emisyon iznine ihtiyaç duyarsa EUA satın almak zorundadır. Tahsis edilen miktarın altında salım gerçekleştiren işletmeler ise fazla kalan izinlerini piyasada satarak gelir elde edebilmektedir (**Şekil 2.2**).



Şekil 2.2 Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) Mekanizması (Senken, 2024)

Tüm işletmelere tanınan toplam kota her sene giderek azaltılmaktadır. Yıllık kotalar Paris Anlaşması'nın 2030 ve 2050 hedeflerine ulaşılacak şekilde belirlenmektedir (European Commission, 2024b). Böylece EUA fiyatları artmakta, kirletmenin maliyeti yükselmekte ve temiz enerji yatırımları daha karlı hale gelmektedir.

Türkiye'de ETS kurulmasına yönelik tedbirler Orta Vadeli Programda (2024-2026) yer almakta olup, ülkemizin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi doğrultusunda ETS'nin kurulması hedeflenmektedir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bu hedef, 2 Temmuz 2025 tarihinde TBMM'de kabul edilen ve 9 Temmuz 2025 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 7552 sayılı 'İklim Kanunu' ile netlik kazanmıştır (TBMM, 2025; Resmî Gazete, 2025).

2.3. AĞAÇLANDIRMADA OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

Optimizasyon, belirli hedeflere ulaşabilmek için bir sistemin, sürecin veya tasarımın en iyi duruma getirilmesini amaçlayan matematiksel yöntemlerin kullanılmasıdır (Okudan ve Şen, 2023). Ormancılık açısından bakıldığında literatürde bazı örnekleri bulunmaktadır. Çağlayan ve diğ. (2018) tarafından yapılan orman amenajmanında optimizasyon için taksonomik derleme çalışmasına göre yıllık veya toplam karbon depolamanın maksimizasyonu için yapılmış 5 adet çalışma bulunmaktadır. Dragicevic ve diğ. (2016), Fransa'da optimal ağaç türü seçimini risk ve üretkenlik dengesine göre analiz etmiş, riski azaltan politikaların karbon depolama potansiyelini artırabileceğini göstermiştir. Triviño (2015) tarafından yapılan çalışma, odun geliri ile karbon depolama arasındaki ekosistem hizmeti ödünleşmelerini inceleyerek her iki hizmeti birlikte en üst düzeye çıkaran orman yönetim stratejilerini belirlemeyi amaçlamıştır. Benzer şekilde Rabotyagov ve diğ. (2013), karbon dahil ekosistem hizmetlerini sunan farklı orman yönetimi senaryoları arasından sosyal fayda ve arazi gelirini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Hernandez (2014) ve Giménez (2013) ise, yürüttükleri çalışmalarda hasat planlamasının optimize edilmesine odaklanmıştır.

2018 sonrası literatürde ise Carle (2021), odun üretimi ile karbon depolama potansiyelinden en verimli şekilde faydalanmayı sağlayacak optimizasyon modelini hedeflemiştir. Dong ve diğ. (2024) da benzer şekilde odun üretimi ve karbon depolama kapasitesini birlikte maksimize etmek için optimum idare süresi, maliyetler ve ağaç yoğunluğu gibi parametreleri analiz etmiştir. O'Donoghue ve diğ. (2024) ise karbon depolama kapasitesi

de dahil olmak üzere birkaç farklı fonksiyondan en yüksek faydayı sağlayacak optimum idare süresinin belirlemesini hedeflemiştir.

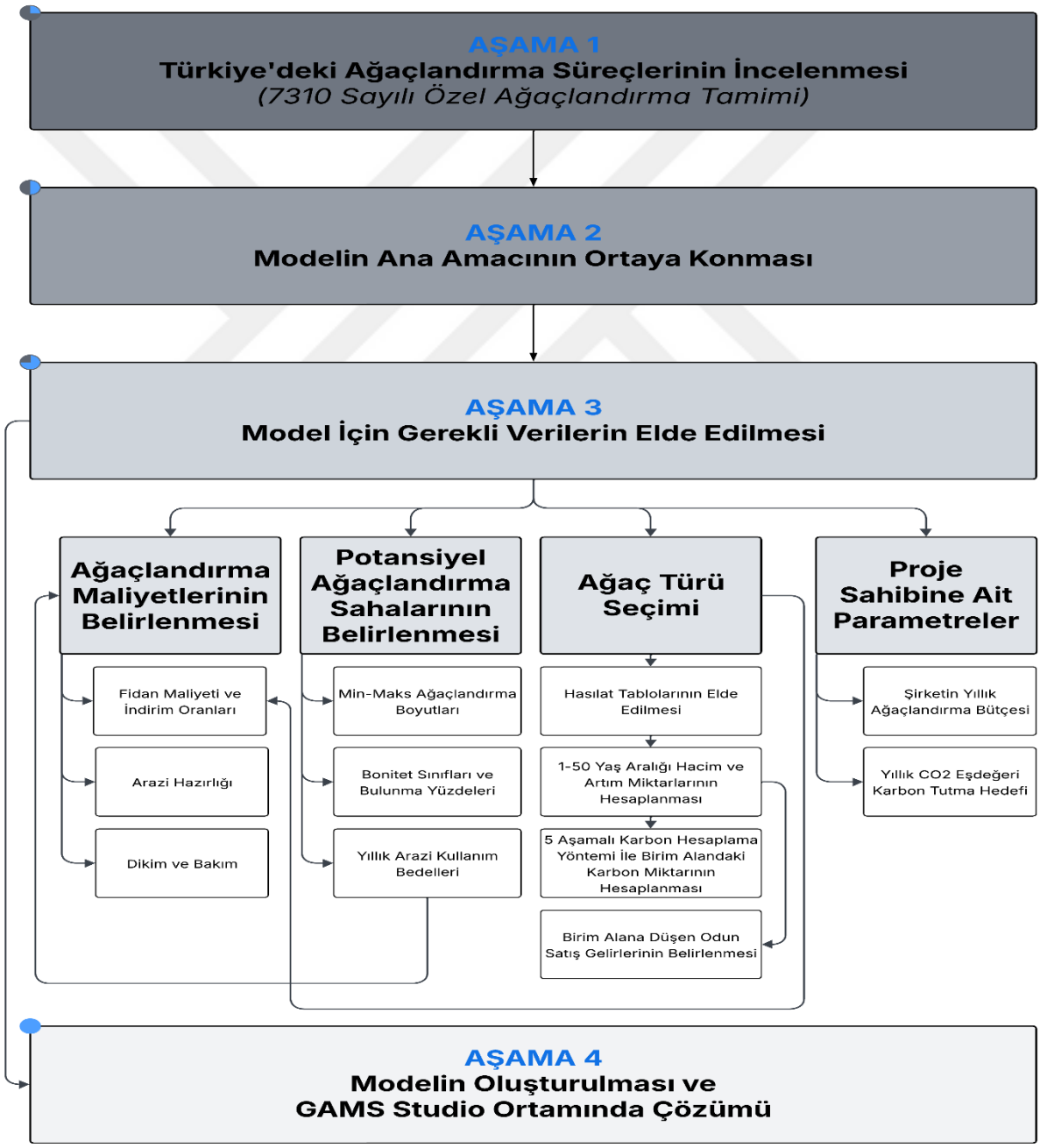
Yapılan literatür taraması, ağaçlandırma optimizasyonu konusunda giderek artan bir ilgi olmasına rağmen, bu alanda henüz yeterli çalışma olmadığını ortaya koymaktadır. Mevcut çalışmalar karbon depolama kapasitesi ile ilgili olması karşın, çoğunlukla mevcut ormanların yönetimi üzerine odaklanmakta; optimal tür seçimi, hasat planlaması, ekosistem hizmetleri arasındaki ödünleşmeler ya da optimum idare süresi belirleme gibi parametreleri analiz etmektedir. Bu çalışmaların ortak noktası, ormanların odun üretimi ve karbon tutma kapasiteleri gibi çoklu işlevlerini dengeleyen stratejiler geliştirmeye çalışmalarıdır.

Ancak bu araştırma, önceki çalışmalardan farklı olarak yeni ağaçlandırma alanlarında uygulanabilecek etkili bir dikim planı geliştirerek, sınırlı bütçe koşulları altında hem karbon depolama kapasitesini hem de maliyet etkinliğini eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, ilk kez ormanlaştırılacak alanlar için sıfırdan karar verme sürecini içermesi bakımından özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Geliştirilen model, farklı arazi türleri, bonitet sınıfları, tür tercihi, ağaçlandırma maliyetleri ve yıllık bütçe gibi çok sayıda faktörü göz önünde bulundurarak 49 yıllık bir planlama döneminde en uygun dikim stratejisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Böylece, elde edilen karbon miktarı hem Emisyon Ticaret Sistemleri (ETS) kapsamında ticari bir değere dönüştürülebilecek hem de doğrudan yıllık emisyon azaltımı olarak raporlanabilecektir. Ayrıca bu çalışma, Paris Anlaşması hedefleriyle uyumlu biçimde, ormanların karbon tutma kapasitesini ağaçlandırma yoluyla bir yatırım aracına dönüştürmeye yönelik yeni bir model sunmakta; bu yönüyle literatürdeki önceki çalışmalardan ayrılarak özgün bir katkı sağlamaktadır.

3. YÖNTEM

Orman ekosistemlerinin karbon tutma potansiyelinden, sanayi kaynaklı emisyonlarının azaltılması amacıyla en etkin şekilde yararlanmayı hedefleyen bir optimizasyon modeli, dört temel aşamadan oluşmaktadır (**Şekil 3.1**).



Şekil 3.1 Optimizasyon Modeli Oluşturma Süreci

3.1. AŞAMA 1: TÜRKİYE'DEKİ AĞAÇLANDIRMA SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ

İlk aşamada, Türkiye'de özel ağaçlandırmanın hukuki alt yapısı incelenmiştir. Ülkemizde ormanların neredeyse tamamı devletin hüküm ve tasarrufu altında bulunduğundan ağaçlandırma çalışmaları büyük ölçüde Orman Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir. Ancak temel olarak verimsiz orman alanlarının veya bozuk arazilerin yeniden verimli hale dönüştürülmesi amacıyla belirli koşullar altında gerçek veya tüzel kişilerin de ağaçlandırma çalışmaları yürütmesine olanak tanınmaktadır. 7310 sayılı özel ağaçlandırma tamimine göre gerçek ve tüzel kişilerin yapabileceği özel ağaçlandırma ve özel imar-ihya çalışmalarına konu edilebilecek sahalar **Tablo 3.1**'de özetlenmiştir (OGM, 2020a).

Tablo 3.1 Özel Ağaçlandırma Sahaları ve Ağaçlandırma Boyutları

	Devlet Ormanları*	**Hazine Arazileri****	**Sahipli Araziler**
Minimum Ağaçlandırma Boyutu (ha)	0.5	2	0.5
Maksimum Ağaçlandırma Boyutu (ha)	300	300	300
*"Kesinleşen kadastro çalışmaları neticesinde orman sınırları içinde kalan, amenajman planına ve aktüel durumuna göre verimli orman niteliğinde olmayan yerler."			
**"Mülkiyeti Hazineye ait olan arazilerde, gerçek ve tüzel kişilerce yapılacak özel ağaçlandırma, özel imar-ihya ve özel orman fidanlığı çalışmalarına ait müracaat, saha tespit ve izin işlemleri, Milli Emlak Genel Müdürlüğü'nce bu maksatla çıkarılan mevzuat hükümleri çerçevesinde özel ağaçlandırmaya konu yerler."			

Bu sahalarda yasal olarak öngörülen maksimum kiralama süresi 49 yıldır. Tek seferde gerçekleştirilebilecek maksimum ağaçlandırma alanı 300 ha ile sınırlandırılmıştır. Söz konusu ağaçlandırma 300 ha'dan fazla olduğu takdirde yeni bir ağaçlandırma projesi olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla ağaçlandırma miktarı, projelendirme maliyetine doğrudan etki etmektedir.

Modelin karar değişkenlerinden olan arazi sınıfları ile minimum ve maksimum ağaçlandırma alanı kısıtları 7310 sayılı tamim esas alınarak belirlenmiştir. Aşama 1'de, ülkemizde yapılabilecek ağaçlandırma çalışmalarına genel teknik bir çerçeve çizilmiştir. Bu çerçeve doğrultusunda modelin bazı karar değişkenleri ve kısıtları şekillenmeye başlamıştır.

3.2. AŞAMA 2: MODELİN ANA AMACININ ORTAYA KONMASI

Daha önce de ifade edildiği üzere bu çalışmanın temel amacı orman ekosistemlerinin karbon tutma potansiyelinden yararlanarak, sanayi kaynaklı emisyonların azaltılmasına katkı sağlayacak bir optimizasyon modelinin geliştirilmesidir. Çalışmanın hukuki çerçevesi ve sektörün beklentileri göz önünde bulundurulduğunda modelin ana amacı:

Türkiye'de yasal olarak belirlenen maksimum 49 yıllık kiralama süresi boyunca, bir şirketin yıllık karbon tutma hedefi ve bütçesi doğrultusunda, iki farklı ağaç türü, üç farklı arazi tipi ve üç farklı bonitet düzeyinde her yıl hangi alanda ne kadar ağaçlandırma yapılması gerektiğini optimizasyon teknikleri kullanılarak belirlemektir. Model, yıllık karbon tutma hedefini karşılarken toplam maliyeti en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır.

3.3. AŞAMA 3: MODEL İÇİN GEREKLİ VERİLERİN ELDE EDİLMESİ

Optimizasyon modelinin oluşturulabilmesi için gerekli olan tüm veri setleri, doğrudan elde edilmiş ya da belirli varsayımlar ve literatür temelli yöntemlerle türetilmiştir. Bu kapsamda ihtiyaç duyulan veriler aşağıda başlıklar hâlinde detaylandırılmıştır.

3.3.1. Ağaç Türleri

Ağaçlandırma faaliyetleri ile karbon emisyonlarını azaltmak için ağaç türü seçimi önemli bir rol oynamaktadır. Türlerin ekolojik istekleri, büyüme hızları ve maliyeti, seçilecek türün hem ağaçlandırma alanlarına hem de hedeflenen amaca uygunluğunu belirlemektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında Kızılçam *(Pinus brutia)* ve Sahil Çamı *(Pinus pinaster)* olmak üzere 2 farklı ağaç türü kullanılmıştır.

Kızılçam, ülkemizde doğal yayılış gösteren, hızlı gelişen bir tür olup, yaklaşık 5,6 milyon hektarlık alanla Türkiye'de en geniş yayılışa sahip orman ağacıdır (Akkemik, 2018). Sahil Çamı ise hızlı gelişen bir diğer tür olup özellikle endüstriyel plantasyonlarda tercih edilmektedir (Özturna ve diğ., 2023).

Her iki ağaç türü için üretilmiş birden fazla hasılat tablosu bulunmaktadır. OGM ağaçlandırma pratiğine göre, kurum görüşü alınarak tüm arazi ve bonitet sınıfları için her iki türe ait dikim sayısı 1666 adet/ha ve potansiyel büyüme alanı 6 m^2 olarak belirlenmiştir. Bu duruma uygun hasılat tabloları; Kızılçam için Usta (1991) ve Sahilçamı için Özcan (2003) tarafından üretilen teknik bültenlerden alınmıştır.

Çalışmada 49 yıllık bir planlama dönemi ele alındığından, 1 yaşındaki fidanlardan başlayarak 50 yaşına kadar olan dönem için hacim ve artım değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için hasılat tablolarında bulunmayan yaşlara ait hacimler, m^3 cinsinden söz konusu teknik bültenlerde yer alan büyüme modelleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.

Ancak, Kızılçam büyüme modeli ile elde edilen 1-6 yaş aralığındaki değerler gerçeği yansıtmadığından bu aralıktaki hacimler üstel enterpolasyon yöntemi ile yeniden elde edilmiştir.

Ayrıca, her iki tür için de kullanılan hasılat tablosunda da belirtilen ayrılan meşcere hacminin alanda bırakıldığı varsayılmıştır.

3.3.1.1. Karbon Depolama Kapasitesinin Hesaplanması

Ülkemizde ormanların ağaç serveti envanteri, dikili kabuklu gövde odunu hacminin belirlenmesiyle yapılmaktadır (OGM, 2017). Dolayısıyla hasılat tablolarından üretilen 1-50 yaş arası hacim ve artım değerleri dikili kabuklu gövde odunu hacmidir. Bu veriler sayesinde, IPCC GPG-LULUCF kılavuzunda yer alan (IPCC, 2003) karbon hesaplama yönteminin ülkemiz iklim ve yetişme koşullarına uyarlanan hali olan 299 sayılı tebliğe göre birim alandaki karbon miktarları (ha/ton) hesaplanmıştır. Hesaplama yönteminin detayları aşağıdaki gibidir (OGM, 2017);

Orman ekosistemlerinde tutulan karbon, beş ayrı havuzda depolanmaktadır. Bunlar:

- Toprak Üstü Canlı Biyokütle
- Toprak Altı Canlı Biyokütle (Kök)
- Ölü Odunlar
- Ölü Örtü
- Toprak olarak sıralanmıştır.

Orman ekosistemlerinde mevcut olan karbon miktarının havuzlar itibarıyla hesaplanması beş adımda gerçekleştirilir. Bunlar:

- **1. Adım:** Toprak üstü ve altındaki canlı biyokütlenin hesaplanması,
- **2. Adım:** Canlı biyokütle içindeki karbon miktarının hesaplanması,
- **3. Adım:** Ölü odun içindeki karbon miktarının hesaplanması,
- **4. Adım:** Ölü örtü içindeki karbon miktarının hesaplanması,
- **5. Adım:** Orman toprağı içindeki karbon miktarının hesaplanmasıdır.

1. Adım: Toprak üstü canlı biyokütle (TÜB) ve toprak altı canlı biyokütle (TAB), 3.1 ve 3.2 nolu denklemler ile ton cinsinden hesaplanmaktadır.

$$T\ddot{U}B = DGH * HA * BGF \quad (3.1)$$

Denklemde kullanılan DGH toplam dikili kabuklu gövde hacmini (m^3), HA, kabuklu gövde odunu hacim ağırlığını (ton/m^3) ifade etmektedir. HA, Türkiye ormanlarında ibreliler için 0,446'dir. BGF ise dikili kabuklu gövde odunu hacmine karşılık gelen biyokütleyi toprak üstü toplam biyokütleye çevirmek için ibrelilerde 1,212 olarak kullanılan genişletme faktörüdür.

Toprak altındaki canlı biyokütle (kök) hesabı, denklem 3.2'de verilmiştir.

$$TAB = T\ddot{U}B * R \quad (3.2)$$

Burada R, **"**Kök/Sak" oranını ifade etmektedir. Ağacın toprak üstü biyokütlesinden kök biyokütlesini hesaplama katsayısıdır. İbreli normal kapalı ormanlar için 0,29; ibreli boşluklu kapalı ormanlar için 0,40 olarak belirlenmiştir.

Son olarak toprak altı ve toprak üstü canlı biyokütle toplanarak alandaki toplam canlı biyokütle hesaplanmaktadır (Denklem 3.3).

$$Toplam\ Canlı\ Biyok\ddot{u}tle = T\ddot{U}B + TAB \quad (3.3)$$

2. Adım: Hesaplanan toprak üstü ve toprak altı canlı biyokütle içindeki karbon miktarının hesaplanmasıdır. Kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir.

$$Toprak\ \ddot{U}st\ddot{u}\ biyok\ddot{u}tle\ içindeki\ karbon\ miktarı\ (T\ddot{U}K) = T\ddot{U}B * CF \quad (3.4)$$

$$Toprak\ Altı\ biyok\ddot{u}tle\ içindeki\ karbon\ miktarı\ (TAK) = TAB * CF \quad (3.5)$$

CF, biyokütleyi karbon miktarına dönüştürme katsayısıdır. İbreli ormanlar için 0,51 olarak belirlenmiştir. Buna göre toplam canlı biyokütle karbon miktarı aşağıdaki gibidir.

$$Toplam\ Canlı\ Biyok\ddot{u}tle\ Karbon\ Miktarı = T\ddot{U}K + TAK \quad (3.6)$$

3. Adım: Ölü odun (dikili kuru ve devrik) biyokütle miktarı, ibreli ve yapraklı ormanlardaki toprak üstü canlı biyokütlenin %1'i olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan

biyokütle, karbon dönüştürme faktörü (CF) olan 0,47 ile çarpılarak "ölü odun karbon miktarı" hesaplanmaktadır (Denklem 3.7, Denklem 3.8).

$$\text{Ölü } Odun\ Biyokütlesi\ (\text{ÖOB}) = T\text{ÜB} * 0{,}01 \quad (3.7)$$

$$\text{Ölü } Odun\ Karbon\ Miktarı\ (\text{ÖOK}) = T\text{ÜB} * 0{,}01 * 0{,}47 \quad (3.8)$$

4. Aşama: Ölü örtü içindeki karbon miktarı, **Tablo 3.2**'de verilen birim alandaki (ton/ha) ölü örtü karbon miktarı katsayıları ile hesaplanmaktadır.

Tablo 3.2 Ölü Örtü Karbon Miktarı Katsayıları

Ağaç Türü Grupları	Normal Kapalı Ormanlarda Ölü Örtüdeki Karbon Miktarı (ton/ha)	Boşluklu Kapalı Ormanlarda Ölü Örtüdeki Karbon Miktarı* (ton/ha)
İbreliler	**7,46**	1,86

*Normal kapalı ormanlardaki ölü örtü karbon miktarının ¼'ü olarak alınmıştır.

$$\text{Ölü Örtü } Karbon\ Miktarı = Alan(ha) * \text{Ölü Örtü } Karbon\ Katsayısı \quad (3.9)$$

5. Aşama: Orman toprağı içindeki organik karbon miktarı, **Tablo 3.3**'de verilen birim alandaki (ton/ha) orman toprağı içindeki karbon miktarı katsayıları ile hesaplanmaktadır.

Tablo 3.3 Orman Toprağı İçindeki Karbon Miktarı Katsayıları

Ağaç Türü Grupları	Normal Kapalı Ormanlarda Topraktaki Organik Karbon Miktarı (ton/ha)	Boşluklu Kapalı Ormanlarda Topraktaki Organik Karbon Miktarı * (ton/ha)
İbreliler	**76,56**	19,14

* Normal kapalı ormanlardaki topraktaki organik karbon miktarının ¼'ü olarak alınmıştır.

$$Toprak\ Karbon\ Miktarı\ = Alan(ha) * Toprak\ Karbon\ Katsayısı \quad (3.10)$$

Bu çalışmada yukarıda açıklanan karbon hesaplama yöntemi, belirli varsayımlar ve koşullar altında kullanılmıştır. Modelde kullanılan ağaç türleri iğne yapraklıdır ve 6m^2 potansiyel büyüme alanına sahiptir. Bu sebeple tüm denklemlerde normal kapalı ve ibreli türler için sunulan katsayılar kullanılmıştır.

49 yıllık ağaçlandırma periyodu içerisinde kayda değer miktarda ölü odun oluşmayacağı varsayılarak ölü odundaki karbon miktarı hesaplamaya dahil edilmemiştir. Ölü örtünün ağaçlandırmanın 8. yılından itibaren oluşacağı varsayılmış, özel ağaçlandırmaya konu tüm sahalarda topraktaki karbon miktarı sabit kabul edilmiştir.

Topraktaki karbon stokları ağaçlandırmadan bağımsız olarak bulunmaktadır. Ancak çalışma konusu olan ağaçlandırmalar yalnızca orman sınırları içinde değil orman sınırları dışında da yapılacaktır. Dolayısıyla devlet tarafından halihazırda ağaçlandırılması garanti olmayan veya daha önceden orman vasfı bulunmayan bu alanlar imara konu edilebilmekte veya sel, taşkın, çeşitli erozyonlar gibi doğal afetlerle de zarar görebilmektedirler. Dolayısıyla yapılacak ağaçlandırmalar topraktaki karbonun mevcudiyetini koruyacağından, orman sınırları dışındaki arazilerde de topraktaki karbon stokları hesaplamaya dahil edilmiştir.

49 yıllık ağaçlandırma periyodu boyunca topraktaki karbon miktarı yalnızca ilk yıl hesaplamalara dahil edilmiştir. Daha sonraki yıllarda yalnızca toprak üstü canlı biyokütle içindeki karbon (TÜK) ve toprak altı canlı biyokütle içindeki karbon'a (TAK) ek olarak 8. yıldan itibaren oluşmaya başlayan ölü örtüdeki karbon miktarı hesaplanmıştır.

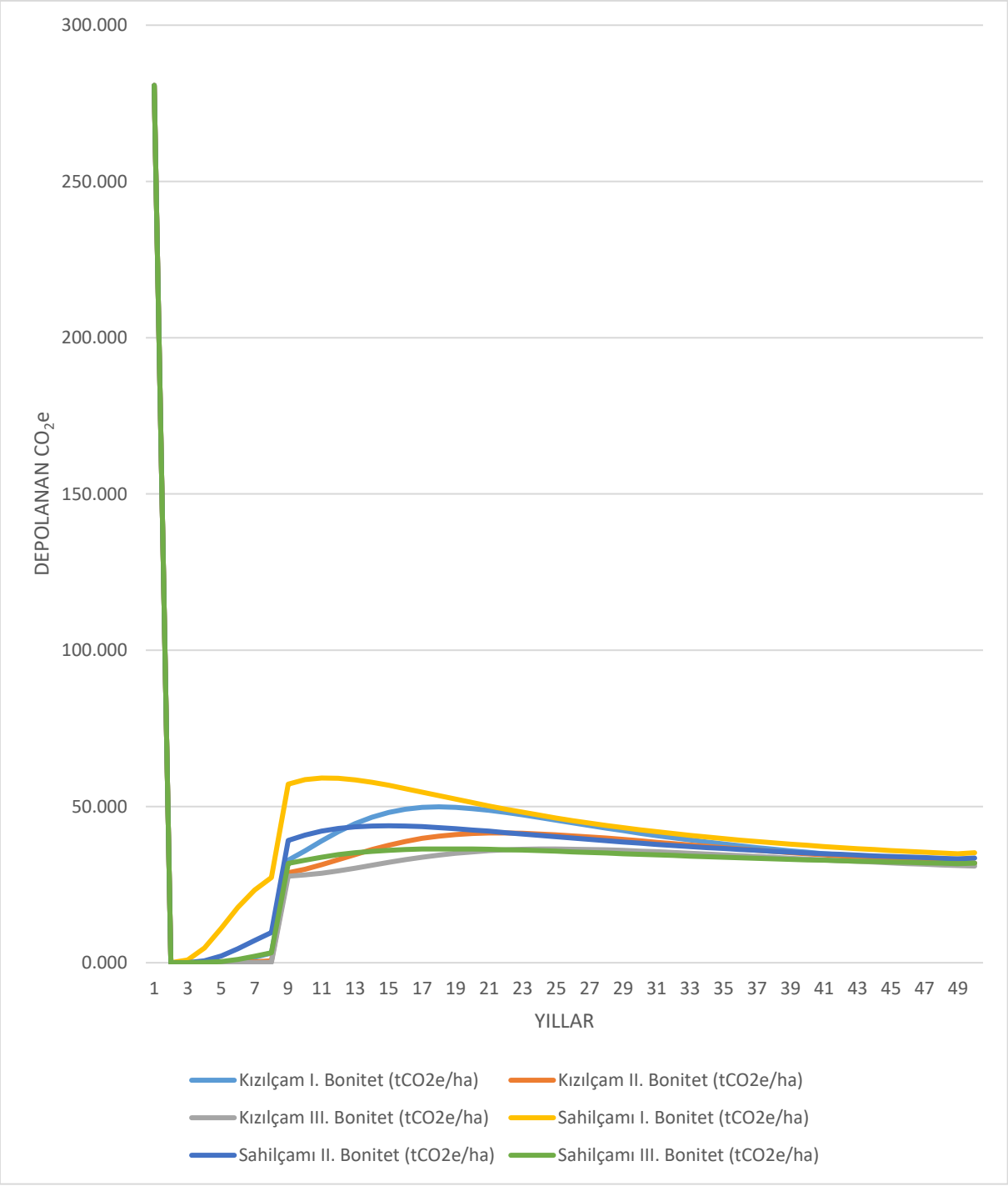
Her iki tür ve 3 bonitet sınıfı için birim alandaki yıllık karbon üretim miktarları (ton/ha) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda dikili kabuklu gövde odunu hacmi (DGH) değeri olarak, ilk yıl birim alandaki hacim, diğer yıllarda ise cari artım miktarı kullanılmıştır. Bu sayede üretilen veri birikimli değil, her yıl bağımsız olarak depolanan karbonu ifade etmektedir.

Tüm koşul ve varsayımlar altında hesaplanan değerler, birim alana düşen ton cinsinden karbon miktarlarıdır. Karbon, EU ETS gibi karbon piyasalarında genellikle CO_2 eşdeğeri (CO_2e) şeklinde ifade edildiğinden hesaplanan birim alandaki karbon miktarları IPCC (2003) kılavuzunda belirtilen "44/12" katsayısı ile çarpılarak CO_2 eşdeğeri karbon miktarları elde edilmiştir. Elde edilen veriler **Tablo 3.4**'de sunulmuştur. Bu veriler yalnızca o yılda üretilen birim alandaki CO_2e karbon miktarlarıdır.

Tablo 3.4 Yıllara Göre Cari CO_2e Karbon Miktarları

YIL	KIZILÇAM						SAHİLÇAMI					
	Bonitet Sınıfı	CO2 eşdeğeri karbon (ton/ha)	Bonitet Sınıfı	CO2 eşdeğeri karbon (ton/ha)	Bonitet Sınıfı	CO2 eşdeğeri karbon (ton/ha)	Bonitet Sınıfı	CO2 eşdeğeri karbon (ton/ha)	Bonitet Sınıfı	CO2 eşdeğeri karbon (ton/ha)	Bonitet Sınıfı	CO2 eşdeğeri karbon (ton/ha)
1	1	280.728	2	280.720	3	280.720	1	280.720	2	280.720	3	280.720
2	1	0.011	2	0.000	3	0.000	1	0.025	2	0.001	3	0.000
3	1	0.025	2	0.001	3	0.000	1	0.909	2	0.060	3	0.004
4	1	0.060	2	0.004	3	0.000	1	4.742	2	0.602	3	0.073
5	1	0.143	2	0.015	3	0.001	1	11.081	2	2.125	3	0.386
6	1	0.340	2	0.053	3	0.006	1	17.728	2	4.479	3	1.067
7	1	1.726	2	0.266	3	0.043	1	23.260	2	7.141	3	2.063
8	1	3.073	2	0.663	3	0.136	1	27.256	2	9.665	3	3.223
9	1	32.842	2	28.784	3	27.707	1	57.173	2	39.166	3	31.751
10	1	35.793	2	29.924	3	28.095	1	58.581	2	40.858	3	32.840
11	1	38.927	2	31.367	3	28.669	1	59.124	2	42.105	3	33.787
12	1	41.911	2	32.987	3	29.408	1	59.048	2	42.960	3	34.572
13	1	44.506	2	34.643	3	30.263	1	58.546	2	43.490	3	35.194
14	1	46.586	2	36.217	3	31.177	1	57.761	2	43.760	3	35.668
15	1	48.119	2	37.625	3	32.091	1	56.797	2	43.827	3	36.010
16	1	49.131	2	38.819	3	32.960	1	55.728	2	43.739	3	36.239
17	1	49.683	2	39.780	3	33.751	1	54.606	2	43.534	3	36.376
18	1	49.852	2	40.509	3	34.441	1	53.468	2	43.245	3	36.435
19	1	49.711	2	41.023	3	35.021	1	52.338	2	42.894	3	36.431
20	1	49.333	2	41.344	3	35.489	1	51.233	2	42.502	3	36.378
21	1	48.776	2	41.499	3	35.849	1	50.163	2	42.083	3	36.285
22	1	48.092	2	41.514	3	36.108	1	49.135	2	41.647	3	36.162
23	1	47.321	2	41.412	3	36.276	1	48.152	2	41.204	3	36.015
24	1	46.496	2	41.218	3	36.364	1	47.217	2	40.760	3	35.851
25	1	45.643	2	40.949	3	36.381	1	46.328	2	40.320	3	35.674
26	1	44.780	2	40.624	3	36.338	1	45.487	2	39.886	3	35.488
27	1	43.922	2	40.256	3	36.244	1	44.691	2	39.463	3	35.296
28	1	43.079	2	39.857	3	36.108	1	43.939	2	39.051	3	35.101
29	1	42.259	2	39.437	3	35.938	1	43.228	2	38.651	3	34.904
30	1	41.467	2	39.004	3	35.740	1	42.556	2	38.265	3	34.708
31	1	40.706	2	38.564	3	35.521	1	41.922	2	37.893	3	34.513
32	1	39.978	2	38.123	3	35.285	1	41.323	2	37.534	3	34.321
33	1	39.285	2	37.684	3	35.036	1	40.757	2	37.190	3	34.132
34	1	38.626	2	37.251	3	34.778	1	40.222	2	36.859	3	33.947
35	1	38.000	2	36.826	3	34.515	1	39.716	2	36.542	3	33.766
36	1	37.408	2	36.410	3	34.248	1	39.238	2	36.237	3	33.590
37	1	36.848	2	36.006	3	33.981	1	38.785	2	35.946	3	33.418
38	1	36.318	2	35.613	3	33.714	1	38.356	2	35.666	3	33.252
39	1	35.818	2	35.234	3	33.450	1	37.949	2	35.399	3	33.090
40	1	35.345	2	34.867	3	33.189	1	37.564	2	35.142	3	32.933
41	1	34.900	2	34.514	3	32.932	1	37.198	2	34.897	3	32.781
42	1	34.479	2	34.174	3	32.680	1	36.851	2	34.662	3	32.634
43	1	34.082	2	33.847	3	32.434	1	36.521	2	34.436	3	32.492
44	1	33.707	2	33.533	3	32.194	1	36.208	2	34.220	3	32.354
45	1	33.353	2	33.232	3	31.961	1	35.909	2	34.013	3	32.221
46	1	33.019	2	32.943	3	31.734	1	35.625	2	33.815	3	32.093
47	1	32.703	2	32.666	3	31.514	1	35.355	2	33.625	3	31.969
48	1	32.404	2	32.401	3	31.300	1	35.097	2	33.442	3	31.849
49	1	32.122	2	32.146	3	31.094	1	34.851	2	33.267	3	31.733
50	1	31.856	2	31.903	3	30.894	1	35.226	2	33.533	3	31.909

NOT: Bu veriler 1 ha alanda her yıl bağımsız olarak ne kadar CO_2e karbon depolandığını göstermektedir.



Şekil 3.2 Bonitet Sınıflarına Göre Ağaç Türlerinin Yıllık Karbon Tutumu (tCO_2e/ha)

Şekil 3.2, **Tablo 3.4**'de sunulan verilere dayanarak oluşturulmuş olup, ağaçlandırmanın başladığı yıldan itibaren, ilk dikim yılı elde edilen toplam biyokütleye dayalı CO_2 miktarını ve takip eden yıllarda bu biyokütlenin yıllık artımına bağlı olarak gerçekleşen CO_2 tutumunu göstermektedir. Artım hızları yıllara göre farklılık göstermekte; bazı tür ve bonitetlerde ilk yıllarda yüksek olan artım değerleri, zamanla azalma eğilimine girebilmektedir.

3.3.1.2. Sahipli Arazilerde Odun Satışından Elde Edilen Birim Gelir

Özel ağaçlandırma faaliyetleri esasında devletin, verimsiz nitelikteki alanları verimli hale dönüştürmek amacıyla gerçek veya tüzel kişiliklere izin verdiği uygulamalardır. 49 yıllık yasal izin süresinin sonunda yapılan ağaçlandırmalardan odun satışı yapılması söz konusu değildir. Ancak sahipli arazilerde durum daha farklıdır. Bu arazilerde yapılan ağaçlandırmalar, "tapulu kesim"e konu edilebilmekte, dolayısıyla bu sahalarda yapılan ağaçlandırmalar sonucunda odun satışlarından gelir elde edilebilmektedir (OGM, 2020b).

Sahipli arazilerin 3. bonitet sınıfında yer aldığı varsayılmıştır. Her iki tür için de hasılat tablolarından üretilen 1-50 yaş aralığındaki hacim miktarları, OGM E-Satış Portalı'ndan ulaşılan, proje sonunda elde edilebilecek odun çeşitleri ve sınıflarına göre birim hacim ($m^{3)}$ satış fiyatlarının ortalaması ile çarpılarak proje sonunda elde edilecek gelir (ha/TL) hesaplanmıştır. Ancak 1-15 yaş aralığına ait hesaplanan gelir değerlerinin uygulamada gerçekçi ve ekonomik olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda, modelde yalnızca 15 yaşını doldurmuş sahalardan elde edilecek odun satış gelirleri dikkate alınmıştır (**Tablo 3.5**).

Tablo 3.5 Sahipli Arazilerde Birim Alandaki Satış Gelirleri

AĞAÇ YAŞI	KIZILÇAM BİRİM ALANDAKİ SATIŞ GELİRİ (ha/TL)	SAHİL ÇAMI BİRİM ALANDAKİ SATIŞ GELİRİ (ha/TL)
15	38,688.914	95,188.728
16	51,262.327	110,521.750
17	65,231.365	126,089.561
18	80,286.413	141,759.271
19	96,113.499	157,423.232
20	112,413.486	172,995.355
21	128,914.055	188,407.668
22	145,376.056	203,607.250
23	161,595.789	218,553.583
24	177,404.548	233,216.300
25	192,666.474	247,573.292
26	207,275.473	261,609.146
27	221,151.719	275,313.840
28	234,238.093	288,681.683
29	246,496.765	301,710.434
30	257,906.048	314,400.595
31	268,457.565	326,754.817
32	278,153.766	338,777.433
33	287,005.776	350,474.068
34	295,031.555	361,851.321
35	302,254.343	372,916.518
36	308,701.353	383,677.499

Tablo 3.5 (devam) Sahipli Arazilerde Birim Alandaki Satış Gelirleri

37	314,402.687	394,142.457
38	319,390.442	404,319.798
39	323,697.979	414,218.043
40	327,359.326	423,845.735
41	330,408.700	433,211.374
42	332,880.127	442,323.367
43	334,807.142	451,189.982
44	336,222.557	459,819.320
45	337,158.283	468,219.291
46	337,645.202	476,397.596
47	337,713.069	484,361.716
48	337,753.069	492,118.902
49	337,793.069	499,676.174
50	337,813.069	507,536.826

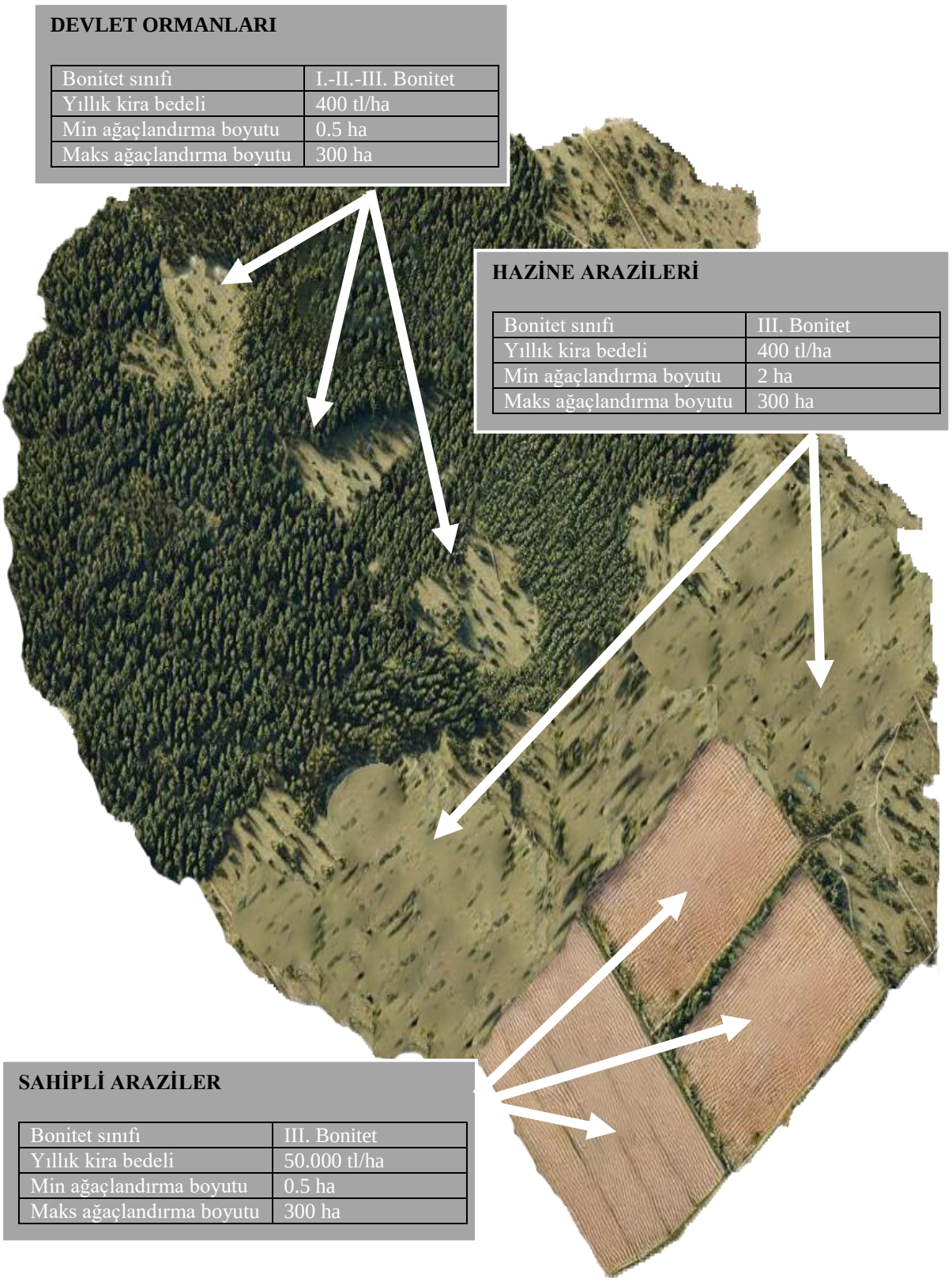
3.3.2. Potansiyel Ağaçlandırma Sahaları

Modelde kullanılan minimum ve maksimum ağaçlandırma alan büyüklükleri, **Tablo 3.1**'de belirtilen değerlere göre belirlenmiş ve modelin kısıtlarından biri olarak tanımlanmıştır. Ağaçlandırma sahalarının seçimi, modelin önemli karar değişkenlerinden biri olup, bu sahalar bonitet sınıflarına göre gruplandırılmıştır.

Devlet ormanları 3 farklı bonitet sınıfına ayrılmaktadır. Özel ağaçlandırmaya konu olabilecek orman içi açıklık ve bozuk orman alanlarının en fazla %5'i I. bonitet ve %25'i II. bonitet olarak uzman görüşü alınarak belirlenmiştir. Hazine arazileri ve sahipli araziler verimli orman toprağı özelliği taşımadıkları için bu arazilerin bonitet sınıfı III olarak varsayılmıştır (**Şekil 3.3**).

Bu alanlarda yapılacak ağaçlandırmalarda; orman arazileri için OGM tarafından belirlenen arazi kullanım bedelleri (OGM, 2024a), hazine arazileri için ise Milli Emlak Genel Müdürlüğünce belirlenen kira bedelleri alınmaktadır (OGM, 2024b). Sahipli arazilerde ise yine 2025 yılı esas alınarak Temmuz ayı itibariyle Türkiye geneli kira ilanları taranmış ve ortalama bir değer bulunmuştur. Tüm arazi sınıfları için birim alanda ödenmesi gereken yıllık kira bedelleri aşağıdaki gibidir.

- Devlet Ormanlarında: 400 tl/ha/yıl
- Hazine Arazilerinde: 400 tl/ha/yıl
- Sahipli Arazilerde: 50.000 tl/ha/yıl



Şekil 3.3 Potansiyel Ağaçlandırma Sahaları

3.3.3. Ağaçlandırma Maliyetleri

OGM ağaçlandırmaları dikkate alınarak tüm arazi ve bonitet sınıfları için her iki türde de dikim yoğunluğu 1666 adet/ha ve 1 yaşında çıplak köklü fidanlar tercih edilmiştir. Buna göre ülkemizde yapılan ağaçlandırmalarda sıklıkla uygulanan işlemler sırasıyla aşağıdaki gibidir.

1) Toprak Tahlili ve Projelendirme
2) Arazi Hazırlığı - Gradoni Teras ve Sahalarının Tel Çit ile Çevrilmesi
3) Fidan Temini
4) Fidanların Arazide Dağıtımı ve Dikimi
5) Ağaçlandırmayı Takip Eden 3 Yıl Boyunca Bakım Çalışmaları

Yukarıda listelenen 1, 2, 4 ve 5 numaralı işlemlere ait birim fiyatlar, OGM tarafından yayınlanan "2025 Yılı Birim Fiyat Cetveli"'nden alınmıştır. 3 numaralı fidan teminine ait bedeller ise yine OGM tarafından yayınlanan "2025 Yılı Fidan ve Tohum Satış Fiyatları" listesinde bulunmaktadır. Listelerde yayınlanan tüm fiyatlar KDV hariç Türk Lirası cinsindendir. Tüm fiyatlar, 1 ha alan boyutuna uyarlanarak optimizasyon modeline uygun hale getirilmiştir. Güncellenmiş birim fiyatlar, poz numaraları ile birlikte **Tablo 3.6** 'da sunulmuştur (OGM, 2025b, 2025c).

Çalışma kapsamında ağaçlandırma maliyetleri, sabit ve değişken olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Toprak tahlili ve projelendirme bedelleri ağaçlandırma boyutlarına göre değişmektedir. Aynı zamanda OGM, toplam fidan satış bedelleri üzerinden belirli aralıklarda indirim uygulamaktadır (OGM, 2025b). Kısacası bu iki maliyet kalemi yıllık ağaçlandırma miktarına göre değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla modelde değişken maliyetler olarak işlenmiştir. Tüm sabit ve değişken maliyetlere ait detaylar **Tablo 3.6** 'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6 Ağaçlandırma Maliyetleri (OGM, 2025b, 2025c)

	İŞLEM SIRASI	POZ NO	İŞLEM TANIMI	BİRİM	FİYAT (TL)	BİRİM ALANA UYARLANAN DEĞERLER (1 ha)	
						BİRİM	FİYAT (TL)
1) Toprak Tahlili ve Projelendirme	**1**	2201	Özel ağaçlandırma ve özel imar-ihya projelerinin tanziminde **65850 TL maktu ücrete ek olarak** çalışılacak alan büyüklüğüne göre ek bedeller alınmaktadır.	0.5-5 ha	**32,250.000**	-	
				5.1-10 ha	**40,500.000**		
				10.1-20 ha	**48,000.000**		
				20+ ha	**55,500.000**		
	2	2204	Toprak Tahlili Yaptırılması *	Adet	**3,010.850**		
2) Arazi Hazırlığı - Gradoni Teras ve Sahalarının Tel Çit ile Çevrilmesi	**3**	308.1	Makineli gradoni teras yapımı	Km	11,414.700	3.33 km	**38,010.951**
	4	1200.4	Eşit kollu (L) veya (T) profil demir çit direği bedeli	Km	61,092.320	400m	**24,436.928**
	5	1200.5	Galvanizli dikenli tel bedeli	Km	20,144.530	400 m	**8,057.812**
	6	1200.7	Beton, L ve T profil demir çit direği dikenli tel bağlantısı için galvanizli inşaat teli bedeli	Km	237.710	400 m	**95.084**
	7	1200.15	Dikenli telin dört sıra halinde tel çit direklere tespiti ve gerilmesi	Km	9,473.690	400 m	**3,789.476**
	8	1200.16	(L) veya (T) profil demir çit direklerin sahada dağıtılması, sivri uçlu çit direklerin 4 m ara ile çakılması, altı çit direkte bir çukur açılması, açılan bu çukurda ankrajlı çit direğin taşla sıkıştırılarak tespiti.	Km	8,000.580	400 m	**3,200.232**
3) Fidan Temini	**9**	-	OGM, toplam fidan satış bedelleri üzerinden belirli aralıklarda indirim uygulamaktadır.**	Adet	7.000	1666 adet	**11,662.000**
4) Fidanların Arazide Dağıtımı ve Dikimi	**10**	1002.1	200 m mesafeye kadar çıplak köklü ibreli fidanların dağıtımı	1000 Adet	74.640	1666 adet	**124.350**
	11	1003.3	Çıplak köklü ibreli fidan dikimi	1000 Adet	8,973.950	1666 adet	**14,950.601**
5) Ağaçlandırmayı Takip Eden 3 Yıl Boyunca Bakım Çalışmaları	**12**	1102.1	Ağaçlandırma sonrası 3 yıllık periyodik saha bakımı	1000 Adet	4,451.690	1666 adet/3 yıl	**22,249.547**

* *Toprak tahlili her 25 ha alan için 1 adet olarak belirlenmiştir.*

Fiyatlara KDV dahil değildir.

Satış Miktarı (TL)	** *İndirim Oranı (%)*	
60.000-100.000	*5*	*OGM tarafından, toplam fidan satış bedelleri üzerinden belirli aralıklarda uygulanan indirim aralıkları verilmiştir (OGM, 2025b).*
100.001-200.000	*8*	
200.001-400.000	*12*	
400.001- ve üzeri	*15*	

NOT:	***SABİT MALİYETLER YEŞİL RENK İLE SİMGELENMİŞTİR***
NOT:	***DEĞİŞKEN MALİYETLER MAVİ RENK İLE SİMGELENMİŞTİR***

3.3.4. Proje Sahibine Ait Parametreler

Bu çalışmada iki temel parametreye ait veriler varsayımsal olarak tanımlanmıştır. Bunlar; bir şirketin yıllık CO_2e tutma hedefi ile bu ağaçlandırma faaliyetlerine ayıracağı yıllık bütçedir. Model, yalnızca bu iki parametre üzerinden farklı senaryolara ve ihtiyaçlara uyarlanabilecek esneklikte tasarlanmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan varsayımsal değerler aşağıdaki gibidir:

- Yıllık ağaçlandırma bütçesi: 46.000.000 tl/yıl
- Yıllık hedeflenen CO_2e depolama miktarı: 100.000 ton/yıl

Modelin parametrik yapısı sayesinde, bu iki girdi değeri değiştirilerek farklı stratejik planlama senaryoları kolaylıkla oluşturulabilmektedir.

3.4. AŞAMA 4: MODELİN OLUŞTURULMASI VE ÇÖZÜMÜ

Bu aşamada, çalışmanın temel amacı olan yıllık karbon tutma hedefini en düşük maliyetle karşılayacak bir planlama yapabilmek için, 49 yıllık kiralama süresi boyunca bir şirketin yıllık bütçe ve karbon hedefi doğrultusunda; iki farklı ağaç türü, üç farklı arazi tipi ve üç bonitet düzeyine göre her yıl hangi alanlarda ne kadar ağaçlandırma yapılması gerektiğini belirleyen bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

Modelde hem ikili (binary) hem de tamsayılı (integer) karar değişkenleri bulunduğu için hesaplamalar, "GAMS Studio" optimizasyon programı yardımıyla "Karma Tamsayılı Programlama" (MIP-Mixed-Integer Programming) metodu ile çözülmüştür. Bu programlama modeli önceki aşamalarda elde edilen, üretilen ve varsayılan verilere dayanmaktadır.

Bu veriler doğrultusunda oluşturulan optimizasyon modelinin matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibidir. Karma tamsayılı programlama formülasyonu için kullanılan kümeler, parametreler ve karar değişkenlerine ilişkin tanımlar **Tablo 3.7**'de verilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min z = \sum_{i,j,y}(sm_{j,i} * x_{i,j,y} + ym_{j,i} * xq_{i,j,y}) + \sum_{y,a} pa_a * pq_{y,a} + \sum_y (cc * kkm_y + tm * ta_y + fm_y) - \sum_{i,y} x_{i,sa,y} * sg_{i,y} \quad (3.11)$$

Amaç fonksiyonuna bağlı olarak aşağıdaki denklemler geliştirilmiştir.

$$ka_{y1} = \sum_{i,j,y \le y1} x_{i,j,y} * kh_{i,j,y,y1} \quad (3.12)$$

$$ka_k + kkm_k \ge hk_k \quad (3.13)$$

$$x_{i,ha,y} \ge 2 * xb_{i,ha,y} \quad (3.14)$$

$$x_{i,j,y} \ge 0{,}5 * xb_{i,j,y} \quad (3.15)$$

$$xq_{i,j,y} = xq_{i,j,y-1} + x_{i,j,y} \quad (3.16)$$

$$\sum_a pq_{y,a} * pha_a \ge \sum_{i,j} x_{i,j,y} \quad (3.17)$$

$$\sum_a pq_{y,a} \le \sum_{i,j} xb_{i,j,y} \quad (3.18)$$

$$25 * ta_y \ge \sum_{i,j} x_{i,j,y} \quad (3.19)$$

$$\sum_{i,j} sm_{j,i} * x_{i,j,y} + \sum_{i,j,y} ym_{j,i} * xq_{i,j,y} + tm * ta_y + fm_y + \sum_a pa_a * pq_{y,a} \le yb \quad (3.20)$$

$$\sum_i x_{i,1,y} \le 0{,}05 * \sum_{i,j} x_{i,j,y} \quad (3.21)$$

$$\sum_i x_{i,2,y} \le 0{,}25 * \sum_{i,j} x_{i,j,y} \quad (3.22)$$

$$x_{i,j,y} \le 1000 * xb_{i,j,y} \quad (3.23)$$

$$fs_y \ge 1666 * \sum_{i,j} x_{i,j,y} \quad (3.24)$$

$$fs_y = \sum_{ar} t1_{ar,y} * x1_{ar} + t2_{ar,y} * x2_{ar} \quad (3.25)$$

$$fm_y = \sum_{ar} t1_{ar,y} * y1_{ar} + t2_{ar,y} * y2_{ar} \quad (3.26)$$

$$far_{ar,y} = t1_{ar,y} + t2_{ar,y} \quad (3.27)$$

$$\sum_{ar} far_{ar,y} = 1 \quad (3.28)$$

Tablo 3.7 Kümelerin, Parametrelerin ve Değişkenlerin Tanımı

Kümeler ve Göstergeler	
i: ağaç türleri	$i = \{kızılçam, sahilçamı\}$
j: bonitet sınıfları*	$j = \{1,2,3, ha, sa\}, \quad ha = sa = 3$
k: yıllar	$k = \{1,2, \dots ,50\}, \ \ y \in k, \ \ y1 \in k, \ \ y \neq y1$
a: proje aralıkları**	$a = \{1,2, \dots ,8\}$
ar: fidan maliyeti indirim aralıkları***	$ar = \{1,2,3,4,5\}$
Parametreler	
$ym_{j,i}$: yıllık 1 ha arazi kira maliyeti	$ym_{j,i} = \begin{cases} 400, & eğer\ j \in \{1,2,3, ha\}, \ \ sa \neq 3 \\ 50000, & eğer\ j \in \{sa\} \end{cases}$
$sm_{j,i}$: ağaçlandırma maliyeti	$sm_{j,i} = 114914{,}9806$
hk_k: yıllık CO_2e karbon tutma hedefi	$hk_k = 100000$
$kar_{i,j,k}$: cari karbon üretimi	i ağaç türünün j bonitetinde k yılında 1 ha birim alandaki CO_2e cari karbon (ton CO_2e/ha) üretimi (**Tablo 3.4**)
$g_{i,k}$: satış gelirleri	Sahipli arazilerde (sa) 1 ha birim alanda bulunan ağaçların satışlarından elde edilecek gelir (TL/ha). (**Tablo 3.5**)
$f_{ar,*}$: fidan satışları indirim aralıkları	$f_{ar,x1}$ $f_{ar,x2}$ $f_{ar,y1}$ $f_{ar,y2}$ 1 0 60000 0 420000 2 60001 100000 399006.65 665000 3 100001 200000 644006.44 1288000 4 200001 400000 1232006.16 2464000 5 400001 1000000 2380005.95 5950000 $x1_{ar}$: fidan sayısı alt sınırı $x2_{ar}$: fidan sayısı üst sınırı $y1_{ar}$: alt sınırdaki toplam maliyet $y2_{ar}$: üst sınırdaki toplam maliyet
$kh_{i,j,y,y1}$: $y1$ yılındaki $CO2e$ üretimi	$kh_{i,j,y,y1} = \begin{cases} kar_{i,j,k}, & eğer\ k = y1 - y + 1, \ \ y1 \geq y \\ 0, & aksi\ takdirde \end{cases}$
pha_a: proje maliyeti hektar aralıkları	$pha_a = \begin{cases} 5 & a = 1 \\ 10 & a = 2 \\ 20 & a = 3 \\ 300 & a = 4 \\ 305 & a = 5 \\ 310 & a = 6 \\ 320 & a = 7 \\ 600 & a = 8 \end{cases}$
pa_a: proje ek maliyet aralıkları*****	$pa_a = \begin{cases} 98100 & a = 1 \\ 106350 & a = 2 \\ 113850 & a = 3 \\ 121350 & a = 4 \\ 196200 & a = 5 \\ 212700 & a = 6 \\ 227700 & a = 7 \\ 242700 & a = 8 \end{cases}$
tm: toprak analizi maliyeti	$tm = 3010{,}85$

Tablo 3.7 (devam) Kümelerin, Parametrelerin ve Değişkenlerin Tanımı

yb: şirketin yıllık bütçesi	$yb = 46000000$ Şirketin ağaçlandırma projesine ayıracağı yıllık bütçesi (TL/yıl)
cc: CO_2e kredi fiyatı****	$cc = 3002{,}7$ (TL/ton CO_2e)
$sg_{i,y}$: 49. yıl satış gelirleri	$sg_{i,y} = \begin{cases} g_{i,51-y}, & eğer \;\; 51-y \geq 15 \\ 0, & aksi\ takdirde \end{cases}$ Sahipli arazilerde, i ağaç türü ile y yılında yapılan ağaçlandırmalardan proje sonunda (49. yıl) odun satışlarından elde edilecek birim gelir (TL/ha)
Değişkenler	
$x_{i,j,y}$: dikim miktarı	$x_{i,j,y} \geq 0$ i ağaç türü ile j bonitetli alanda y yılındaki dikim miktarı (ha)
$xq_{i,j,y}$: kümülatif dikim alanı	$xq_{i,j,y} \geq 0$ y yılına kadar i ağaç türü ile j bonitetli alanda dikilmiş toplam (kümülatif) alan (ha)
ka_{y1}: y1 yılı toplam CO_2e miktarı	$ka_{y1} \geq 0$ y1 yılında elden edilen toplam CO_2 eşdeğeri karbon miktarı (ton CO_2e/yıl)
kkm_y: y yılında satın alınan karbon kredisi	$kkm_y \geq 0$ Ağaçlandırma ile karbon hedefi karşılanmadığı bir durumda hedefi sağlamak için y yılında vergisi ödenmesi gereken CO_2e miktarı (ton)
ta_y: toplam toprak analizi miktarı	y yılında yapılan toplam toprak analizi miktarı (adet/yıl)
$pq_{y,a} \in \{0,1\}$: proje ek maliyet değişkeni	y yılında a numaralı proje için ek maliyet uygulanıp uygulanmadığını belirten ikili karar değişkeni
$xb_{i,j,y} \in \{0,1\}$: dikim kontrol değişkeni	y yılında alanda dikim yapılıp yapılmadığını kontrol eden değişken
fm_y: toplam fidan maliyeti	$fm_y \geq 0$ y yılındaki toplam fidan maliyeti (TL/yıl)
fs_y: toplam fidan sayısı	y yılında dikilen toplam fidan sayısı (adet/yıl)
$far_{ar,y}$: indirim aralığı seçim değişkeni	$far_{ar,y} \in \{0,1\}$ y yılında alınan fidan maliyetine göre indirim aralığı seçim değişken
$t1_{ar,y}$: doğrusallaştırma değişkeni	$t1_{ar,y} \geq 0$
$t2_{ar,y}$: doğrusallaştırma değişkeni	$t2_{ar,y} \geq 0$

* *ha (hazine arazisi) ve sa (sahipli arazi) bonitet sınıfları, III. bonitet olarak kabul edilmiştir.*

** *Proje bedelleri ha alan aralıklarına göre değişmektedir.*

*** *Fidan satışlarına uygulanan indirim oranları yıllık toplam satış bedellerine göre değişmektedir.*

**** *Temmuz 2025 Avrupa'da ETS'de uygulanan 65€ ton/CO_2e karbon kredisi tutarıdır* (WORLD BANK GROUP, 2025).

***** *Projelerin tanziminde 65850 TL maktu ücrete ek olarak çalışılacak alan büyüklüğüne göre ek bedeller alınmaktadır.*

Amaç fonksiyonu 3.11 nolu denklem ile ifade edilmiştir. Tüm denklemlerin açıklamaları sırasıyla **Tablo 3.8**'de verilmiştir.

Tablo 3.8 Denklemlerin Açıklamaları

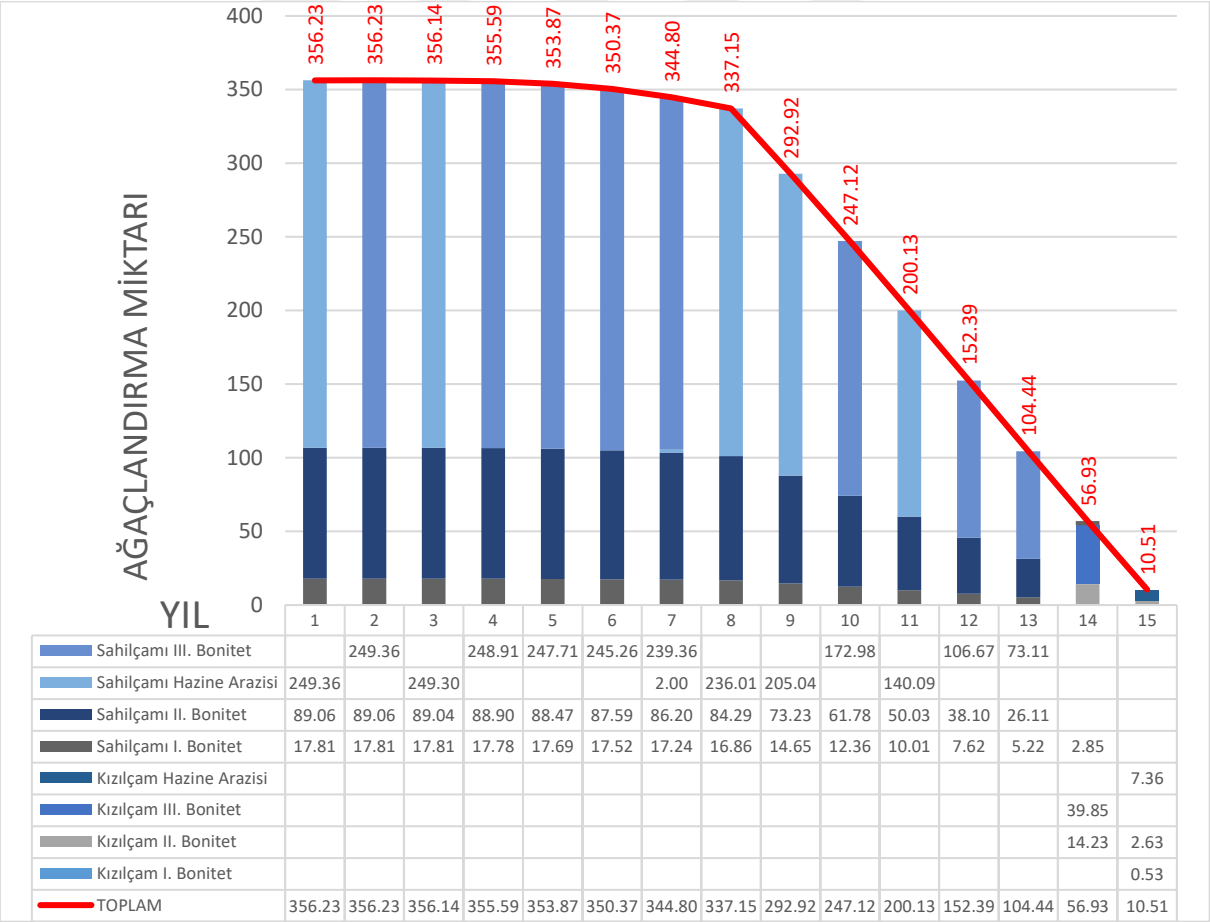
3.11 nolu denklem	Amaç fonksiyonu denklemidir. Toplam maliyeti en aza indirir.
3.12 nolu denklem	y1 yılındaki toplam CO_2 eşdeğeri karbon üretiminin hesaplanması.
3.13 nolu denklem	Yıllık minimum karbon hedefini karşılama: bütçenin yetersiz olduğu durumlarda hedeflenen CO_2e miktarının ne kadarlık kısmının karbon kredileriyle tamamlanacağını göstermektedir.
3.14 nolu denklem	Hazine arazilerinde en az 2 ha alan ağaçlandırılmalıdır.
3.15 nolu denklem	Diğer tüm arazilerde en az 0.5 ha alan ağaçlandırılmalıdır.
3.16 nolu denklem	Kümülatif alan hesapları: proje boyunca toplam arazi kira bedelini bulabilmek için bir alanın yıllar içindeki birikimli kullanımı (xq), önceki yılın değerine o yıl yapılan dikim miktarının eklenmesiyle hesaplanır.
3.17 nolu denklem	Her yıl için toplam dikim alanına uygun bir proje aralığı seçilir.
3.18 nolu denklem	y yılında eğer dikim yapılmışsa en fazla bir tane proje aralığı (a) seçilebilir.
3.19 nolu denklem	Her 25 ha alan için en az 1 adet toprak analizi yapılmalıdır.
3.20 nolu denklem	Yıllık proje maliyetleri şirketin yıllık bütçesinden fazla olamaz.
3.21 nolu denklem	Tüm alanların en fazla %5'i 1. bonitet olabilir.
3.22 nolu denklem	Tüm alanların en fazla %25'i 2. bonitet olabilir.
3.23 nolu denklem	Dikim karar değişkeninin ikili değişken olmasını sağlayan değişken. Sayı olarak 1000, x değişkeninin pratikte geçemeyeceği bir üst sınır olarak belirlenmiştir.
3.24 nolu denklem	Dikilen alana göre fidan sayısı: Yıl y için alınacak toplam fidan sayısı, dikilen toplam alanla doğru orantılı olarak en az 1666 adet/hektar olmak zorundadır. Bu katsayı, hektar başına önerilen minimum fidan miktarını temsil eder.
3.25 nolu denklem	Denklemden fidan sayısı hesaplanması: Bu denklem, fidan sayısını f(ar,*) tablosunda tanımlanan parça (aralık) sistemine göre temsil eder. t1 ve t2, parçalı doğrusal dönüşümde kullanılan sürekli değişkenlerdir ve hangi fidan sayısı aralığında bulunulduğunu belirlemek için kullanılır.
3.26 nolu denklem	Denklemden maliyet hesaplanması: Yıl y için toplam fidan maliyeti, seçilen fidan sayısı aralığına karşılık gelen maliyetler (y1 ve y2) kullanılarak doğrusal şekilde hesaplanır. Bu denklem, maliyeti sürekli bir fonksiyon olarak ifade etmeye olanak tanır.
3.27 nolu denklem	t1 ve t2 ikili değişkene bağlanması: Bu denklem, bir aralık (ar) için kullanılan sürekli değişkenlerin (t1, t2) toplamının o aralığın seçilip seçilmediğini belirten ikili değişkene (far) eşit olmasını sağlar. Böylece yalnızca seçilen aralığın doğrusal kombinasyonu kullanılabilir.
3.28 nolu denklem	Tek bir aralığa seçimi: Bu kısıt, her yıl yalnızca bir fidan maliyet aralığının seçilmesini zorunlu kılar. Böylece model, maliyet fonksiyonunun birden fazla aralıkta kırılmasını engelleyerek kararlılığı ve gerçekçiliği artırır.

4. BULGULAR

Oluşturulan optimizasyon modeli, ilk olarak 46 milyon TL yıllık ağaçlandırma bütçesi ile 100 bin ton yıllık CO_2 yakalama hedefi doğrultusunda çalıştırılmıştır. Buna ek olarak, farklı koşulları test etmek amacıyla üç alternatif senaryo daha geliştirilmiş ve her bir senaryoya ilişkin model çıktıları aşağıda başlıklar hâlinde sunulmuştur.

4.1. SENARYO I

Yıllık ağaçlandırma bütçesini 46 milyon TL olarak belirleyen ve karşılığında yıllık 100 bin ton CO_2 eşdeğeri karbon depolama beklentisi olan bir firmanın 49 yıllık ağaçlandırma projesine ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

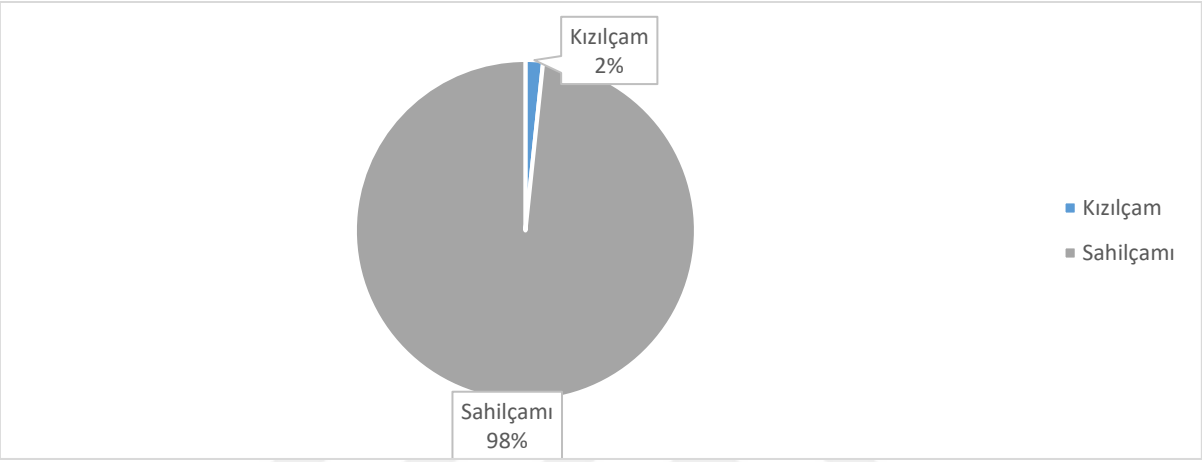


YIL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sahilçamı III. Bonitet		249.36		248.91	247.71	245.26	239.36			172.98		106.67	73.11		
Sahilçamı Hazine Arazisi	249.36		249.30				2.00	236.01	205.04		140.09				
Sahilçamı II. Bonitet	89.06	89.06	89.04	88.90	88.47	87.59	86.20	84.29	73.23	61.78	50.03	38.10	26.11		
Sahilçamı I. Bonitet	17.81	17.81	17.81	17.78	17.69	17.52	17.24	16.86	14.65	12.36	10.01	7.62	5.22	2.85	
Kızılçam Hazine Arazisi															7.36
Kızılçam III. Bonitet														39.85	
Kızılçam II. Bonitet														14.23	2.63
Kızılçam I. Bonitet															0.53
TOPLAM	356.23	356.23	356.14	355.59	353.87	350.37	344.80	337.15	292.92	247.12	200.13	152.39	104.44	56.93	10.51

Şekil 4.1 Senaryo I-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl)

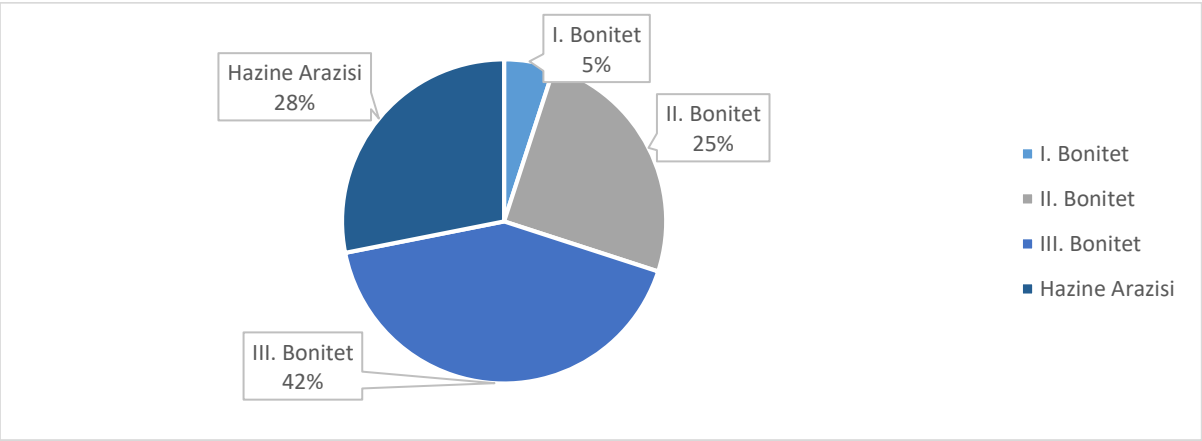
Şekil 4.1'in incelenmesinden de anlaşılacağı üzere 49 yıllık ağaçlandırma periyodu içerisinde modele göre, yalnızca ilk 15 yıl ağaçlandırma yapılmaktadır.

Senaryo I kapsamında gerçekleştirilen toplam ağaçlandırmanın ağaç türlerine göre dağılımı **Şekil 4.2**'de sunulmuştur. Bu senaryoda, ağaçlandırma alanlarının %98'inde Sahilçamı, %2'sinde ise Kızılçam türü tercih edilmiştir.



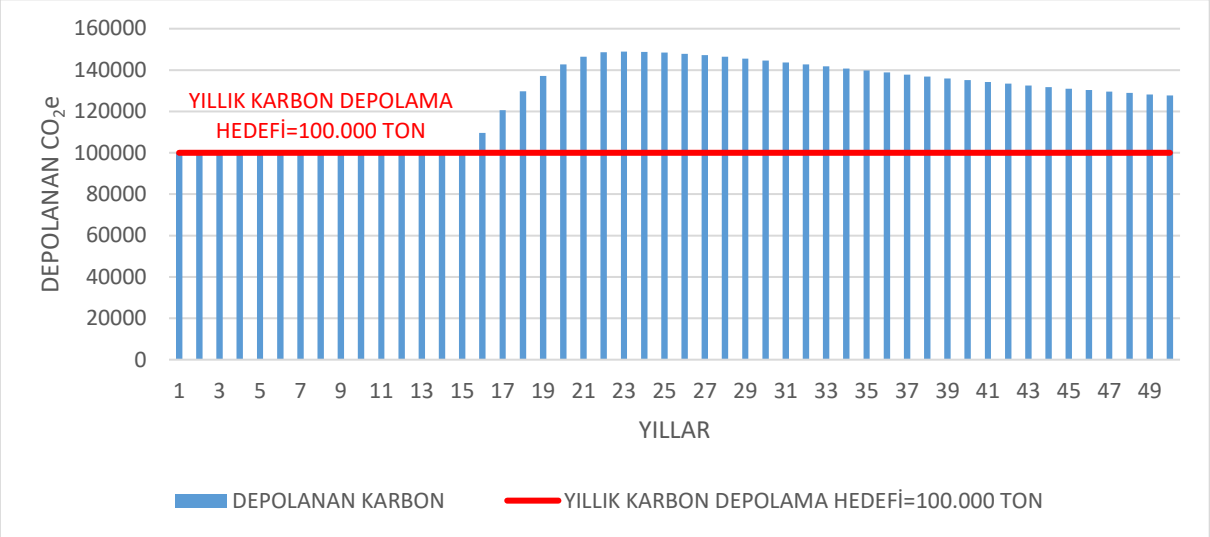
Şekil 4.2 Senaryo I-Toplam Ağaçlandırmanın Ağaç Türlerine Göre Dağılımı

Toplam ağaçlandırmanın bonitet sınıflarına göre dağılımları ise **Şekil 4.3**'de sunulmuştur. Buna göre ağaçlandırmaların %42'si III. bonitet, %25'i II. bonitet ve %5'i I. bonitet sahalarda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ağaçlandırmaların %28'i hazine arazilerinde yapılmıştır. Bu dağılım, modelin bonitet kısıtlarını dikkate alarak karbon tutma kapasitesini en üst seviyeye çıkarmak için yüksek bonitetli orman alanlarını maksimum düzeyde kullandığını göstermektedir.

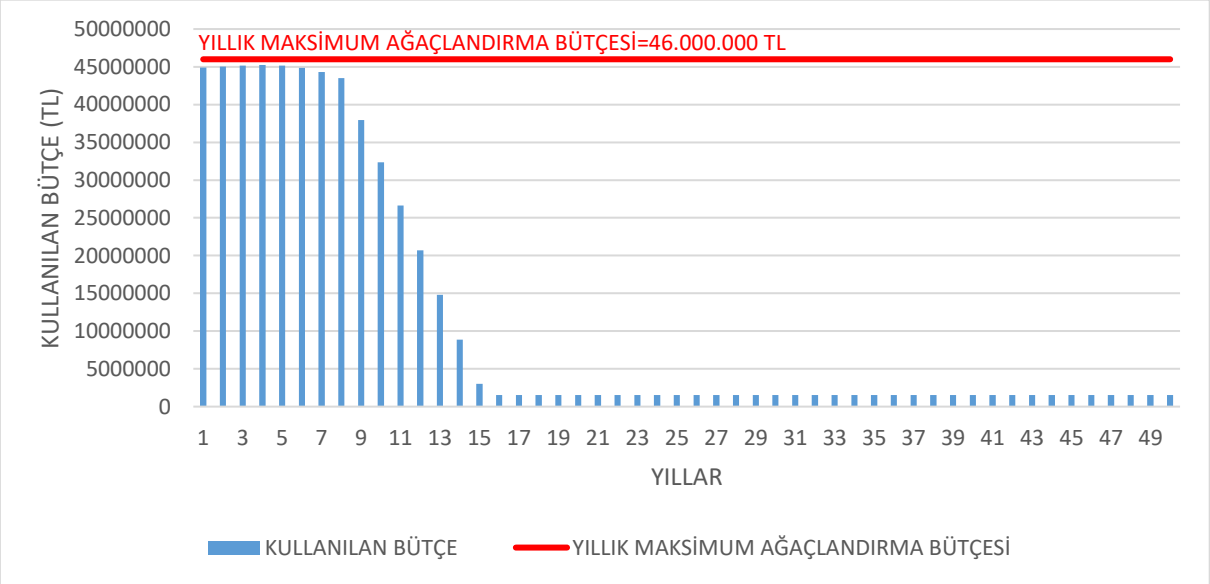


Şekil 4.3 Senaryo I-Toplam Ağaçlandırmanın Bonitet Sınıflarına Göre Dağılımı

Gerçekleştirilen ağaçlandırmalar sonucunda elde edilen yıllık CO_2e miktarları **Şekil 4.4**'de, yıllık bütçe kullanımı ise **Şekil 4.5**'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Senaryo I-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl)

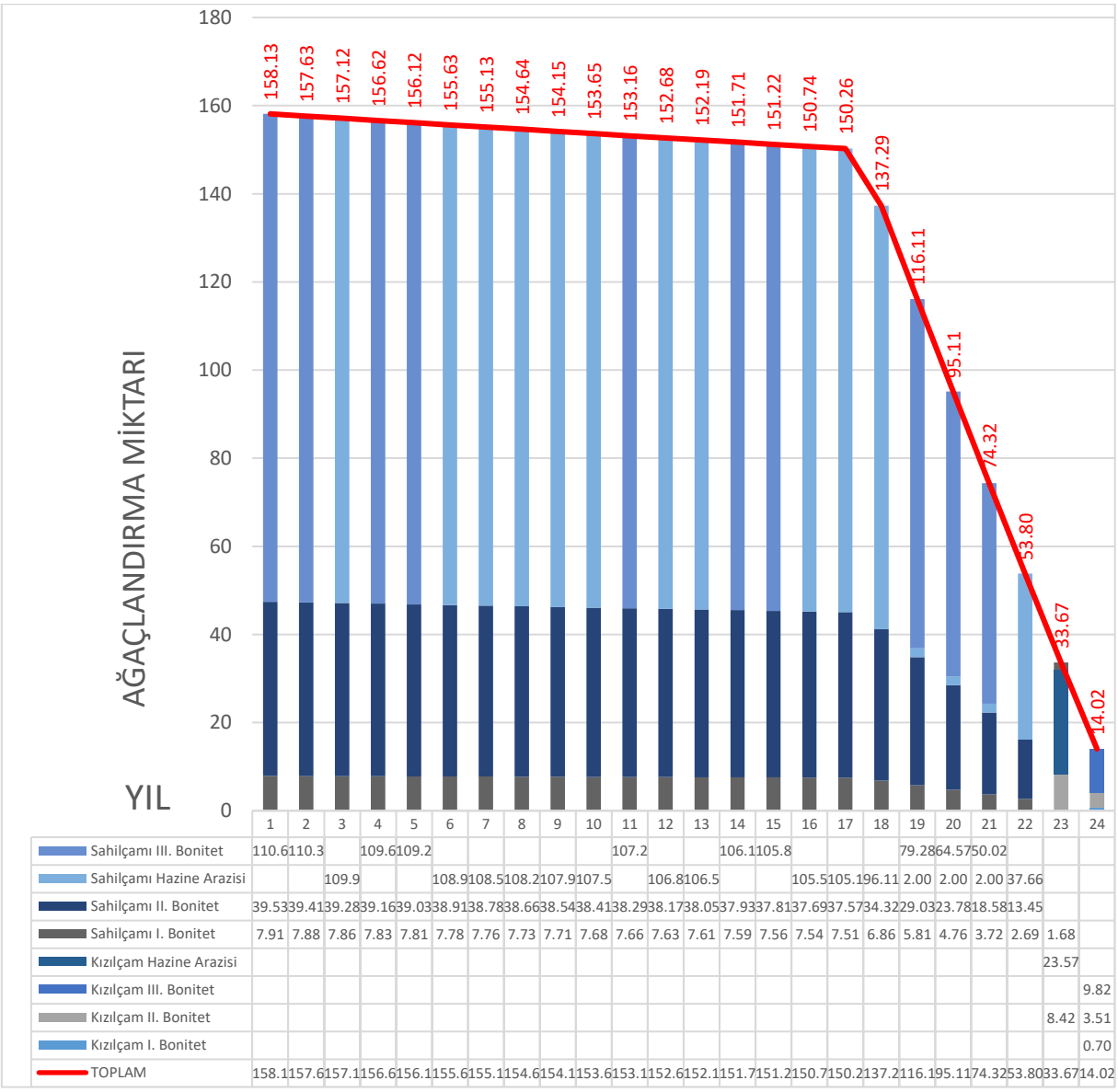


Şekil 4.5 Senaryo I-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl)

Bu senaryoda ağaçlandırma faaliyetleri ilk 15 yılı kapsamaktadır. 15. yıldan sonra yalnızca ağaçlandırılan alanların yıllık kiralama bedelleri ödenmektedir. 49 yıllık ağaçlandırma projesinin toplam maliyeti 556.708.440 tl'dir (**Şekil 4.5**). Hedeflenen yıllık CO_2e, karbon kredisi satın alınmadan ağaçlandırma ile karşılanmış, toplamda 6.313.852,330 ton CO_2e karbon depolanmıştır (**Şekil 4.4**). Sahipli arazilerde ağaçlandırma tercih edilmediği için bu senaryoda odun satışı geliri elde edilmemiştir.

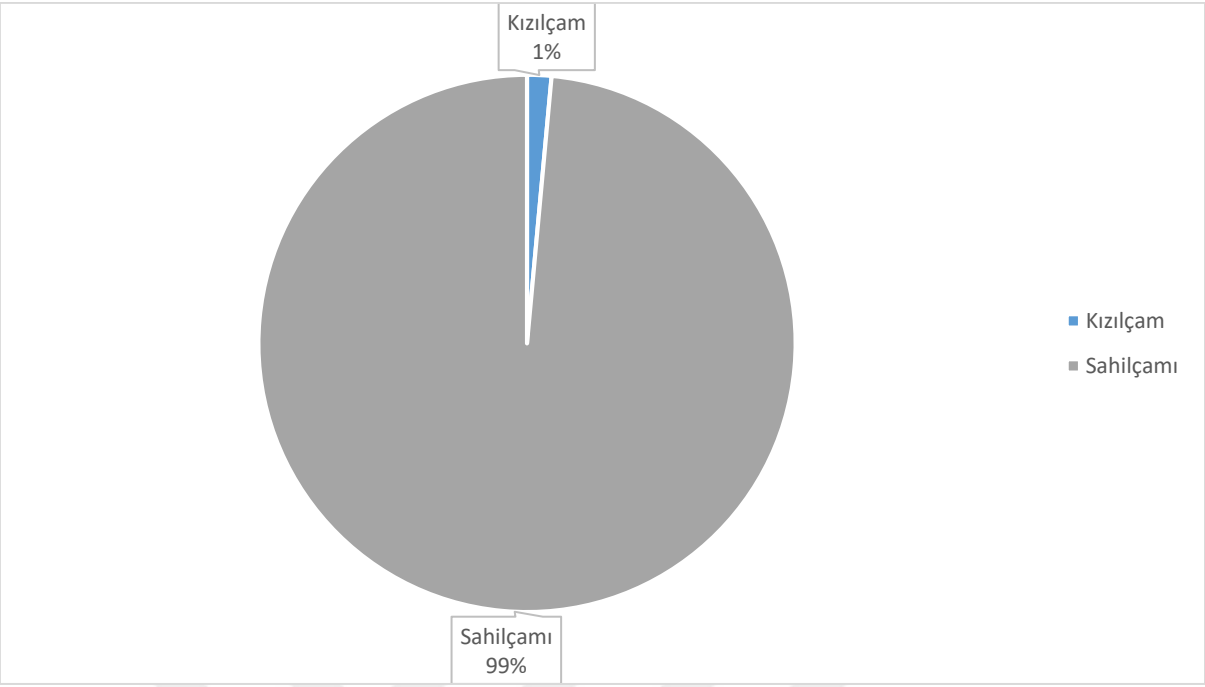
4.2. SENARYO II

İlk senaryodan farklı olarak yıllık ağaçlandırma bütçesinin 20.000.000 TL olduğu, yıllık karbon depolama hedefinin ise aynı şekilde (100.000 tCO_2e) kaldığı durumda ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



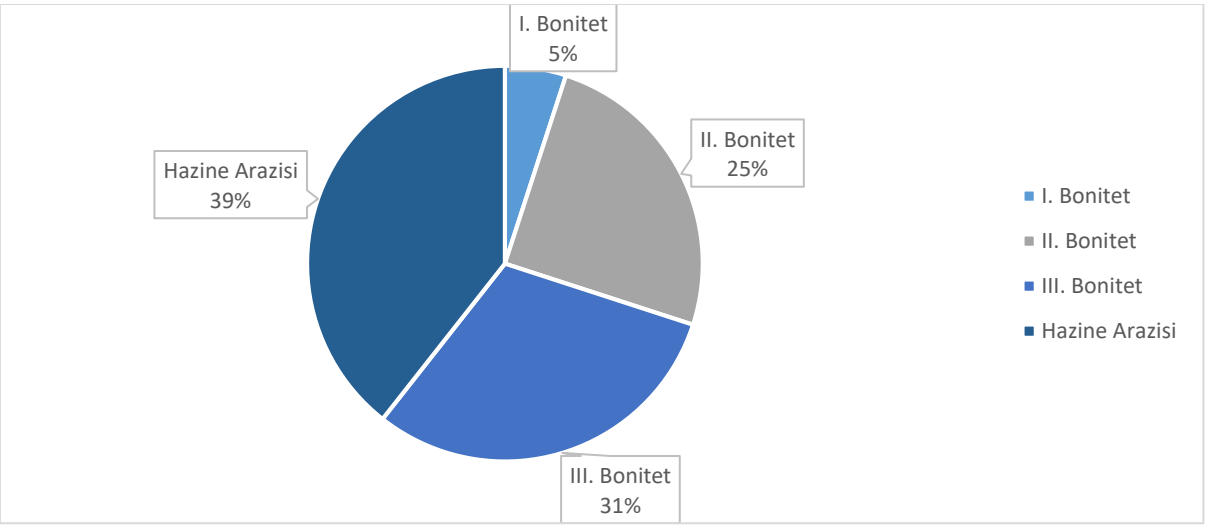
Şekil 4.6 Senaryo II-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl)

Senaryo II 'de 49 yıllık ağaçlandırma periyodu içerisinde ilk 24 yıl ağaçlandırma yapılmaktadır (**Şekil 4.6**). Toplam ağaçlandırmanın ağaç türlerine göre dağılımı **Şekil 4.7**'de gösterilmektedir. Bu senaryoda, ağaçlandırma alanlarının %99'unda Sahilçamı, yalnızca %1'inde ise Kızılçam türü tercih edilmiştir. Bu dağılım, maliyet ve karbon tutma kapasitesi açısından Sahilçamı'nın model tarafından daha avantajlı bulunduğunu göstermektedir.



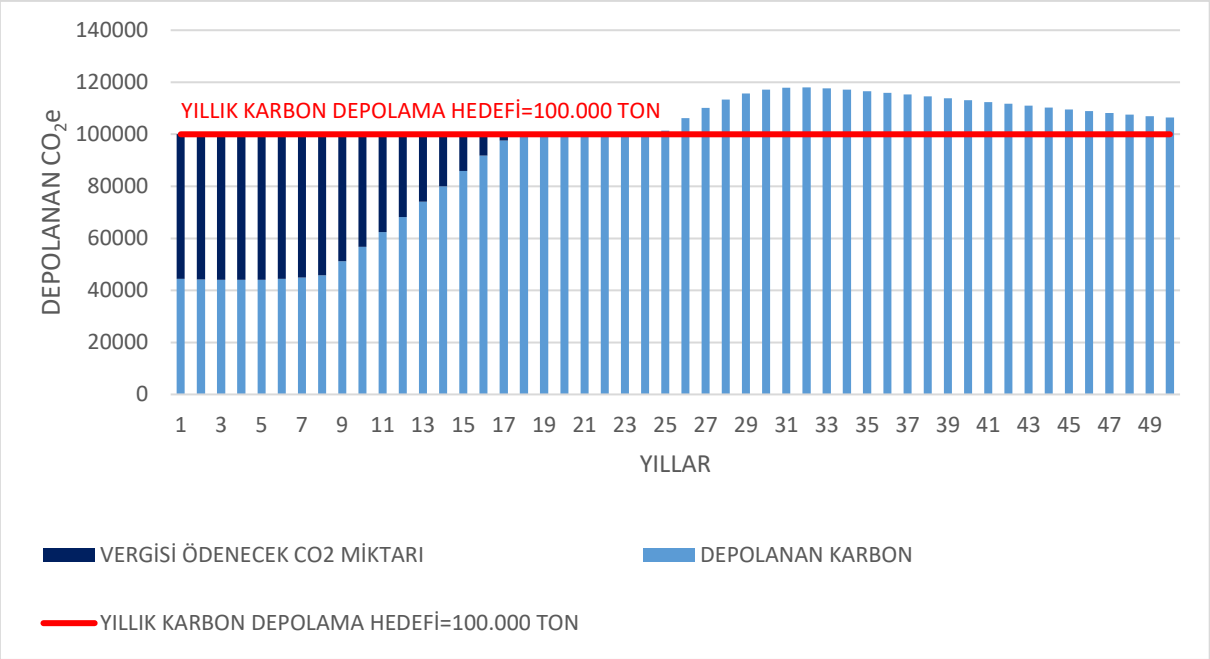
Şekil 4.7 Senaryo II-Toplam Ağaçlandırmanın Ağaç Türlerine Göre Dağılımı

Toplam ağaçlandırmanın bonitet sınıflarına ve arazi türlerine göre dağılımı **Şekil 4.8**'de gösterilmektedir. Ağaçlandırma alanlarının %39'u hazine arazilerinde, %31'i III. bonitet, %25'i II. bonitet ve %5'i I. bonitet sınıfında yer alan sahalarda gerçekleştirilmiştir.

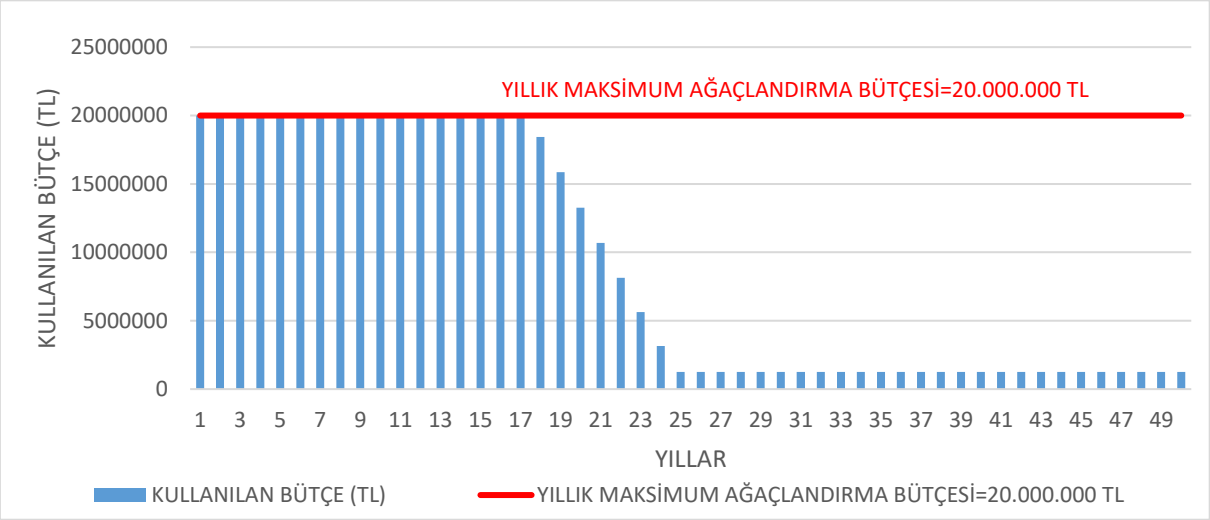


Şekil 4.8 Senaryo II-Toplam Ağaçlandırmanın Bonitet Sınıflarına Göre Dağılımı

Bu sahalarda yapılan ağaçlandırma faaliyetleri neticesinde elde edilen yıllık CO_2e miktarları **Şekil 4.9**'da ve yıllık bütçe kullanımı **Şekil 4.10**'da sunulmuştur.



Şekil 4.9 Senaryo II-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl)

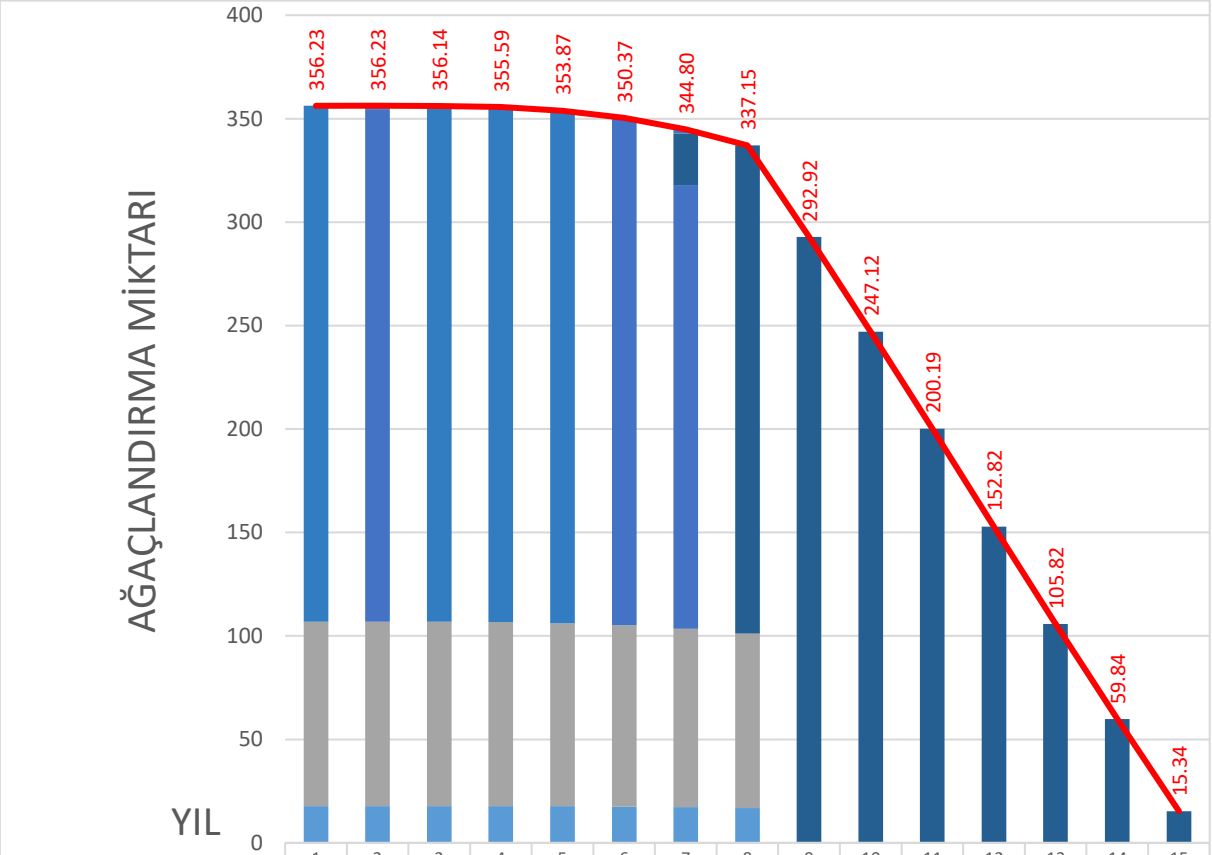


Şekil 4.10 Senaryo II-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl)

Bu senaryoda 49 yıllık ağaçlandırma projesinin toplam maliyeti 447.893.808,48 tl'dir (**Şekil 4.10**). Modele göre hedeflenen yıllık CO_2e miktarına ulaşmak için toplamda 2.028.669.013,88 TL tutarında karbon kredisi satın alınması gerekmektedir (**Şekil 4.9**). Böylece 49 yılda toplam 4.640.800,33 ton CO_2e karbon depolanmıştır (**Şekil 4.9**). Sahipli arazilerde ağaçlandırma tercih edilmediği için odun satışı geliri elde edilmemiştir.

4.3. SENARYO III

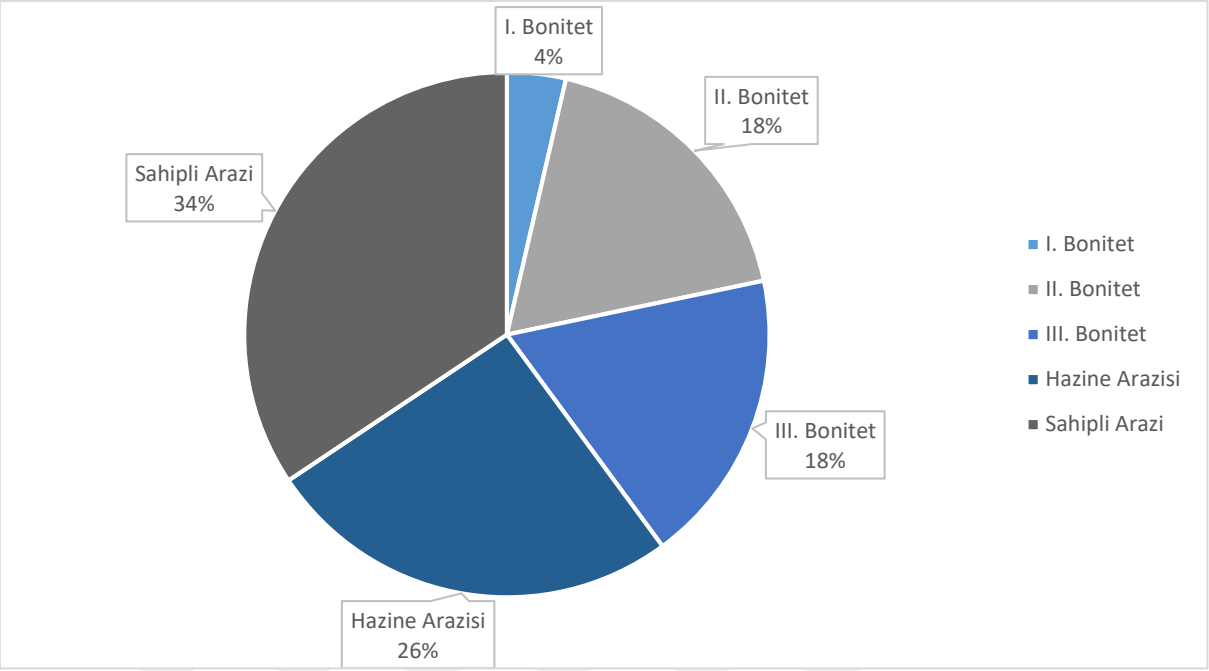
Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere sahipli arazilerin kira bedelleri güncel ilanların ortalaması alınarak tahmini 50.000 tl/ha olarak belirlenmiştir. Birim alan kira bedellerinin daha düşük olduğu bir senaryoda (10.000 tl/ha) ilk senaryo ile aynı hedef (100.000 tCO_2e/yıl) ve bütçe (46.000.000 tl/yıl) doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sahilçamı Hazine Arazisi	249.36	2.00	249.30	248.91	247.71		2.00								
Sahilçamı Sahipli Arazi							24.96	236.01	292.92	247.12	200.19	152.82	105.82	59.84	15.34
Sahilçamı III. Bonitet		247.36				245.26	214.40								
Sahilçamı II. Bonitet	89.06	89.06	89.04	88.90	88.47	87.59	86.20	84.29							
Sahilçamı I. Bonitet	17.81	17.81	17.81	17.78	17.69	17.52	17.24	16.86							
TOPLAM	356.23	356.23	356.14	355.59	353.87	350.37	344.80	337.15	292.92	247.12	200.19	152.82	105.82	59.84	15.34

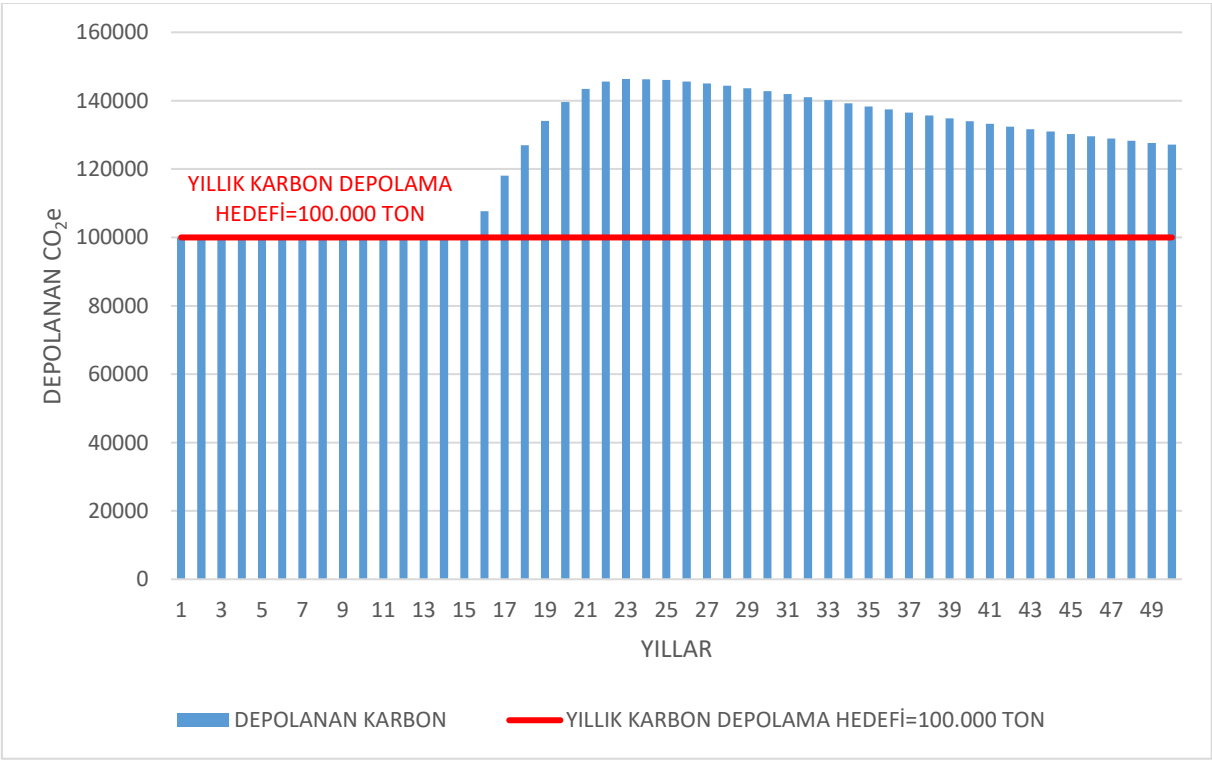
Şekil 4.11 Senaryo III-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl)

Bu senaryoda da ağaçlandırma faaliyetleri ilk 15 yılda yalnızca Sahilçamı türü ile tamamlanmıştır. Toplam ağaçlandırmanın bonitet sınıflarına ve arazi türlerine göre dağılımı **Şekil 4.12**'de gösterilmektedir. Ağaçlandırma faaliyetlerinin %34'ü sahipli arazilerde, %26'sı hazine arazilerinde, %18'i III. bonitet, %18'i II. bonitet ve %4'ü I. bonitet sahalarda gerçekleştirilmiştir. Bu dağılım, özel mülkiyetli sahaların gelir potansiyeli nedeniyle modelde daha fazla tercih edildiğini göstermektedir.

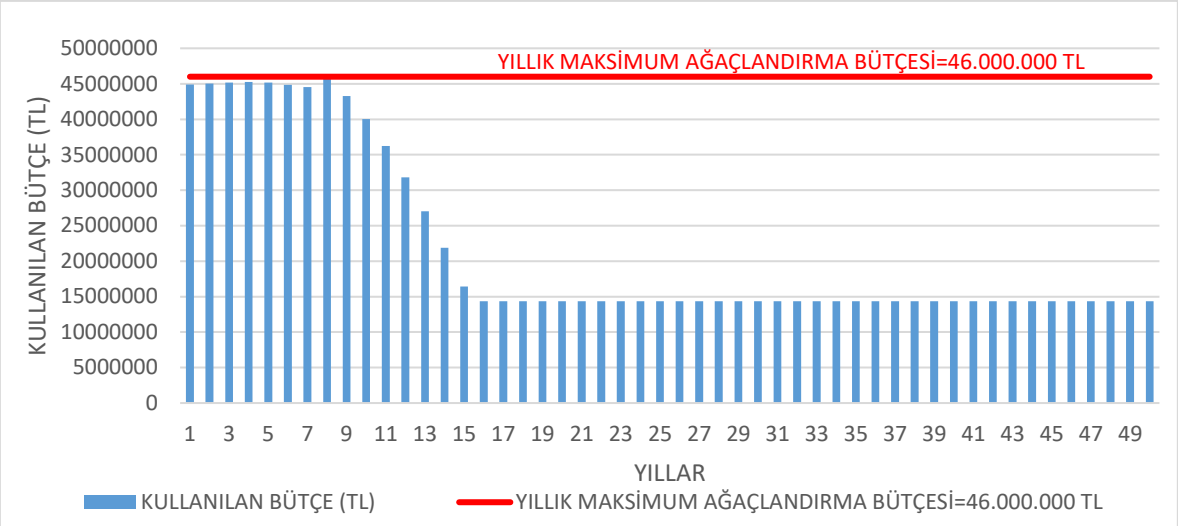


Şekil 4.12 Senaryo III-Toplam Ağaçlandırmanın Bonitet Sınıflarına Göre Dağılımı

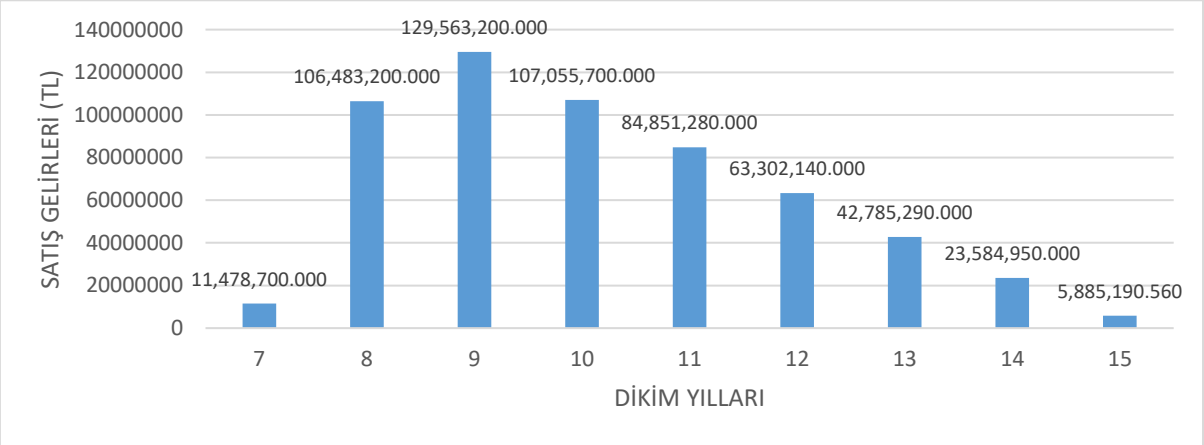
Bu sahalarda yapılan ağaçlandırma faaliyetleri neticesinde elde edilen yıllık CO_2e miktarları **Şekil 4.13**'de, yıllık bütçe kullanımı **Şekil 4.14**'de ve odun emvalinin satış gelirleri **Şekil 4.15**'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Senaryo III-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl)



Şekil 4.14 Senaryo III-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl)



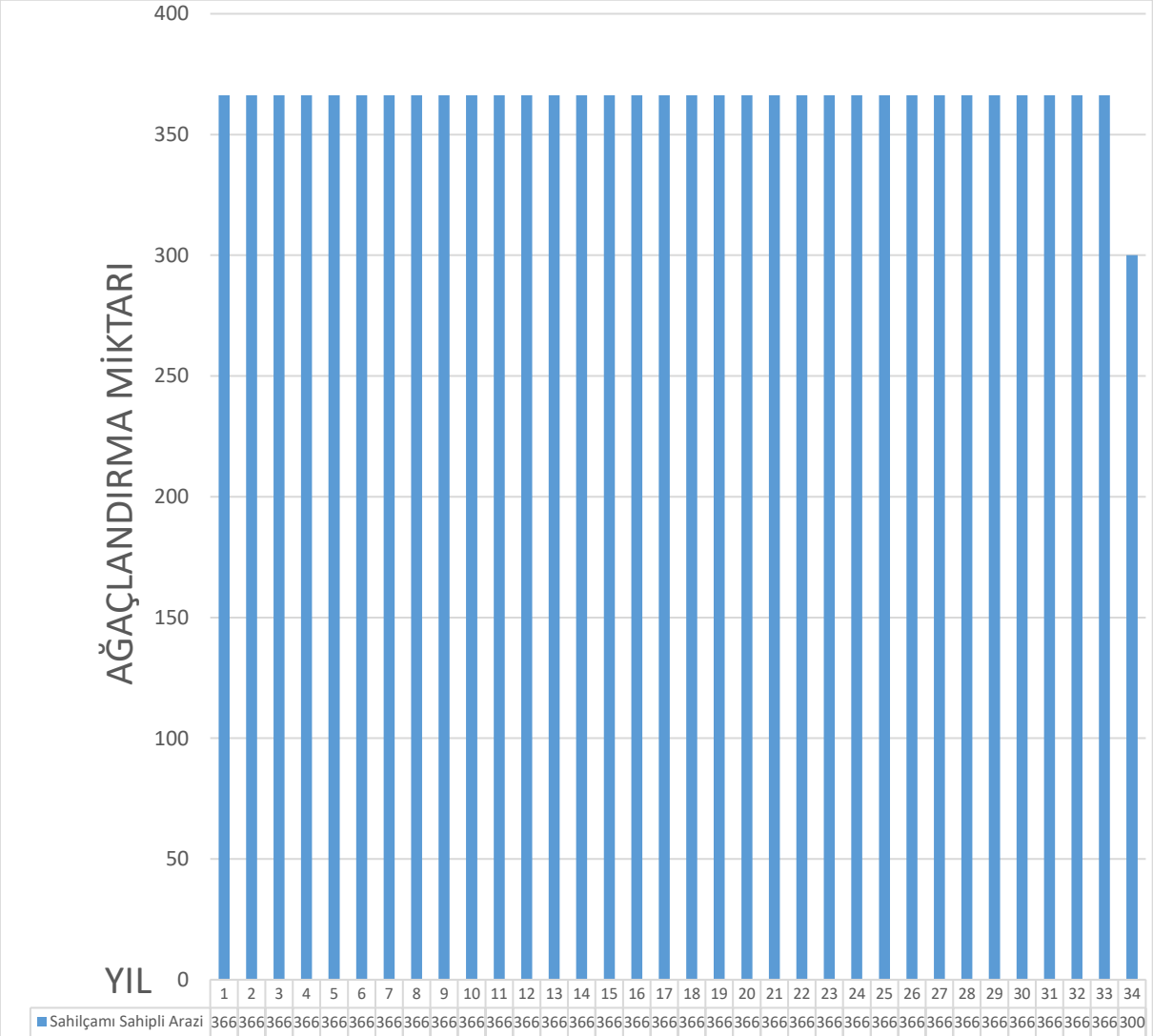
Şekil 4.15 Sahipli Arazide Proje Sonu Odun Emvali Satış Gelirleri (TL/yıl)

Şekil 4.15'de sunulan değerler; ağaçlandırılan alanlardan, dikim yılından itibaren 49 yılın sonuna kadar elde edilen odun hacminin satışından elde edilecek gelirleri ifade etmektedir. Örneğin 9. yıl ağaçlandırılan alan 49. yıla kadar 40 yıllık bir büyüme yapmıştır. 40 yaşına gelen ağaçların toplam gövde hacimlerinin satışından 129.563.200 TL gelir elde edilmiştir. Tüm satış gelirleri proje sonunda elde edilmektedir.

Bu senaryoda 49 yıllık ağaçlandırma projesinin toplam maliyeti 1.080.631.450 tl'dir (**Şekil 4.14**). Sahipli arazilerden elde edilen toplam 574.989.650,56 TL gelir, ağaçlandırma maliyetinden çıkarıldığında toplam net maliyet 505.641.810 TL olmaktadır. Bu koşullarda model, hedeflenen minimum yıllık karbon tutma hedefini karşılamış ve karbon kredisi satın alınmamıştır. Böylece 49 yılda toplam 6.255.135,547 ton CO_2e karbon depolanmıştır (**Şekil 4.13**).

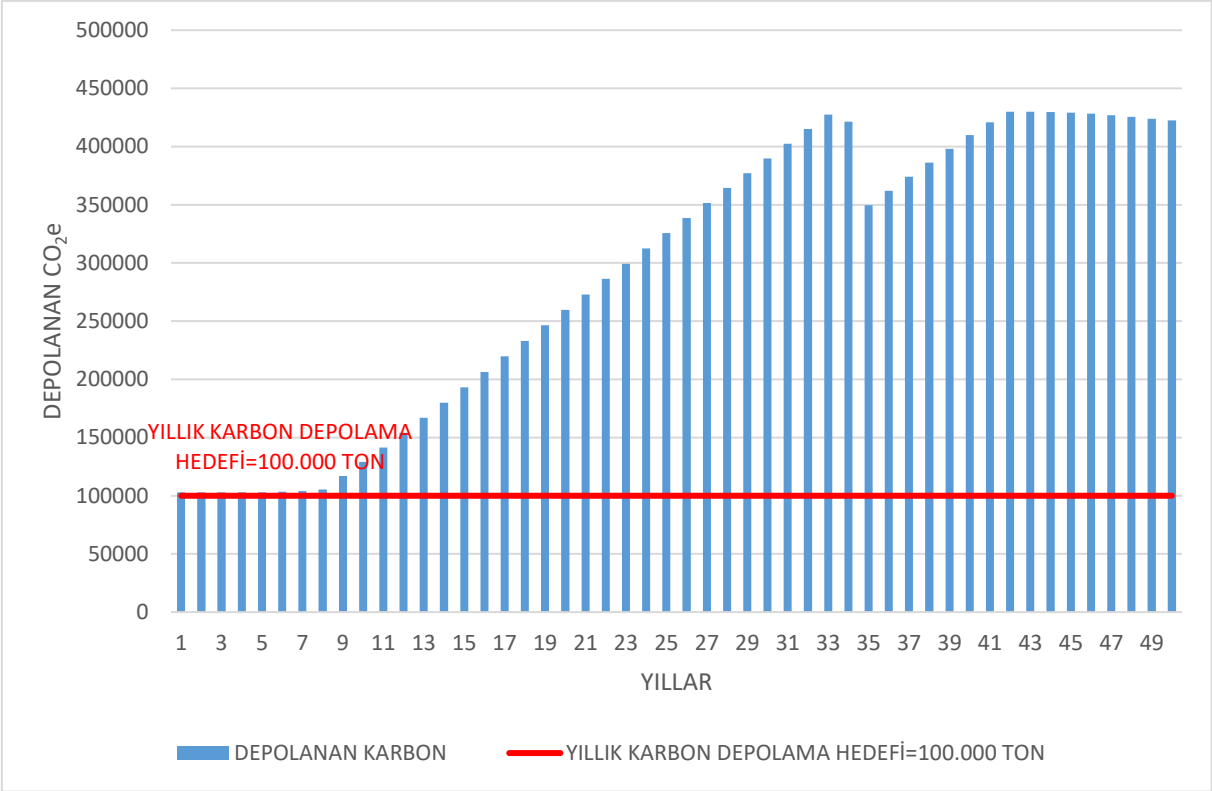
4.4. SENARYO IV

Son senaryoda ise ağaçlandırma projelerine yatırım yapacak olan firmanın bünyesinde bulundurduğu araziler olduğu ve herhangi bir kiralama bedeli olmayacağı varsayılmıştır. Model, bu varsayımla ilk senaryo ile aynı karbon depolama hedefi (100.000 tCO_2e/yıl) ve yıllık bütçe (46.000.000 tl/yıl) doğrultusunda çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.

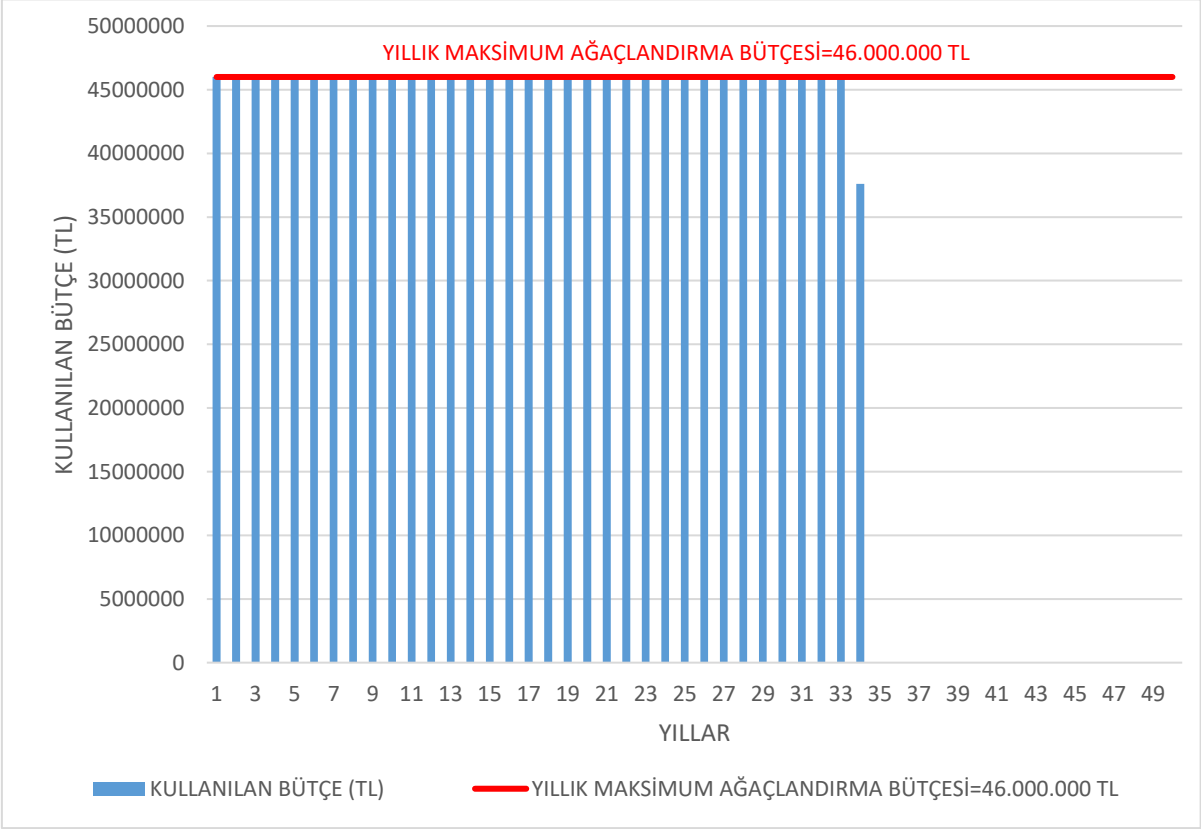


Şekil 4.16 Senaryo IV-Ağaçlandırma Periyodu Boyunca Yıllık Toplam Dikim Miktarları (ha/yıl)

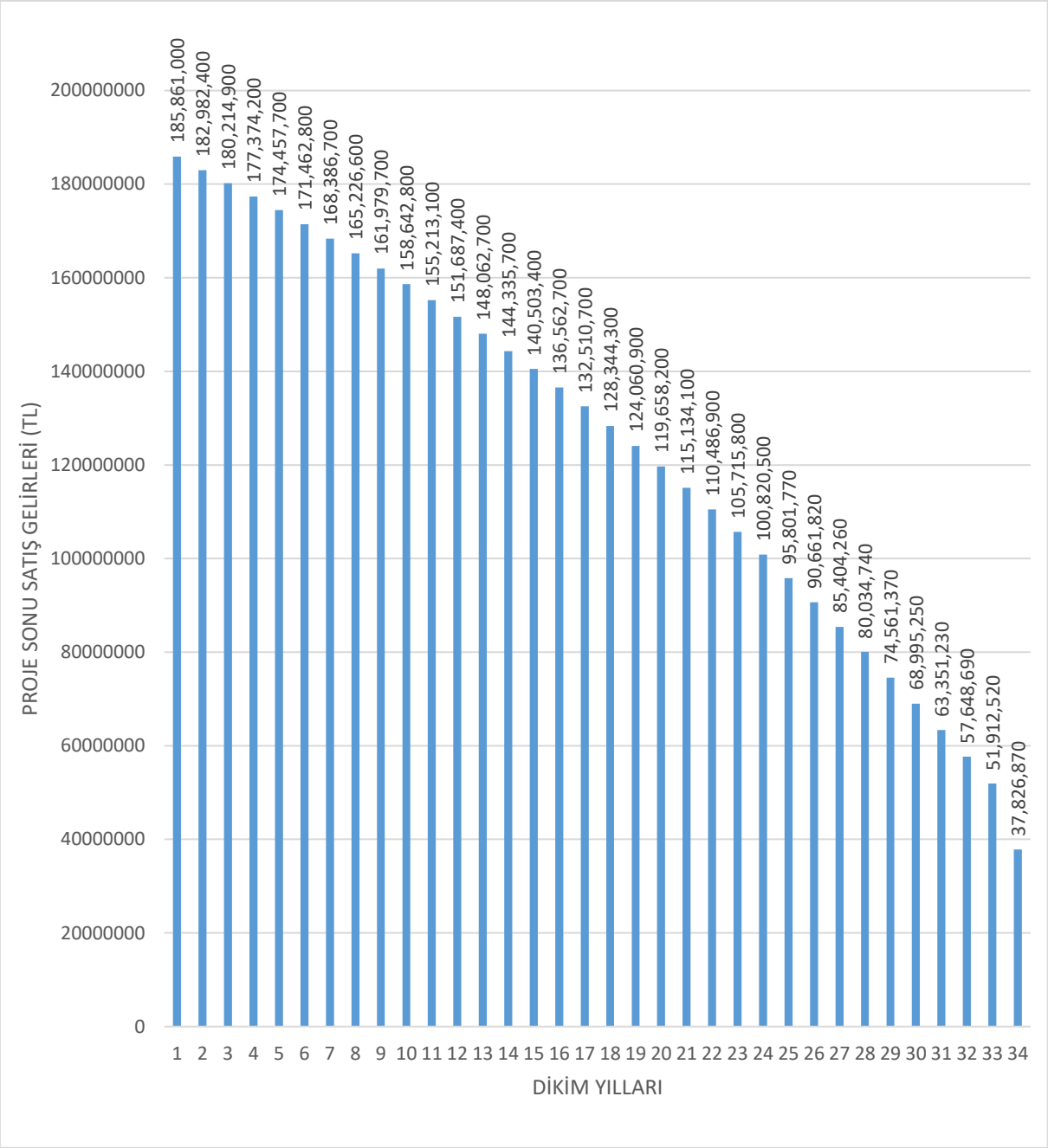
Bu senaryoda da ağaçlandırma faaliyetleri ilk 34 yılı kapsamaktadır. Tüm faaliyetler, **Şekil 4.16**'da da görüleceği üzere Sahil Çamı ağaç türüyle sahipli arazilerde gerçekleşmiştir. Bu sahalarda yapılan ağaçlandırma faaliyetleri neticesinde üretilen yıllık CO_2e miktarları, yıllık bütçe kullanımı ve odun emvalinin satış gelirleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4.17 Senaryo IV-Yıllık Depolanan CO_2e Miktarları (ton/yıl)



Şekil 4.18 Senaryo IV-Yıllık Kullanılan Ağaçlandırma Bütçesi (TL/yıl)



Şekil 4.19 Sahipli Arazilerden 49 Yılın Sonunda Elde Edilen Satış Gelirleri (TL/yıl)

Bu senaryoda 49 yıllık ağaçlandırma projesinin toplam maliyeti 1.555.605.784 tl'dir (**Şekil 4.18**). **Şekil 4.19**'da gösterilen sahipli arazilerden elde edilen toplam 4.245.883.720 TL gelir, ağaçlandırma maliyetinden çıkarıldığında toplam net maliyet -2.690.277.936 TL olmaktadır. Yani yatırımcı bu proje ile kazanç elde etmektedir. Bu koşullarda model, hedeflenen minimum yıllık karbon tutma hedefini karşılamış ve karbon kredisi satın alınmamıştır. Böylece 49 yılda toplam 14.605.604,19 ton CO_2e karbon depolanmıştır (**Şekil 4.17**).

5. TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışma kapsamında geliştirilen ağaçlandırma optimizasyon modelinin çıktıları değerlendirilmekte ve dört farklı senaryo üzerinden yapılan analizler tartışılmaktadır. Modelin temel amacı; farklı yıllık bütçeler, CO_2 depolama hedefleri, ağaç türü ve arazi tiplerine göre ağaçlandırma stratejilerini optimize ederek ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler önermektir. Bulgular, sadece teknik ve finansal sonuçlarıyla değil, aynı zamanda Türkiye'deki mevcut mevzuat, karbon piyasalarının durumu ve ormancılık uygulamaları doğrultusunda ele alınmaktadır. Her bir senaryo, uygulanabilirlik, maliyet etkinliği ve uzun vadeli etkileri açısından karşılaştırılarak değerlendirilmiş; sonuçlar üzerinden politika, uygulama ve mevzuat düzeyinde önerilere yer verilmiştir. Tartışmalar, sadece modelin çıktılarını yorumlamakla kalmayıp, bu çıktıları geniş çerçevede orman politikaları, karbon piyasaları ve iklim değişikliğiyle mücadele bağlamında konumlandırmayı amaçlamaktadır.

5.1. SENARYOLARIN DEĞERLENDİRMESİ

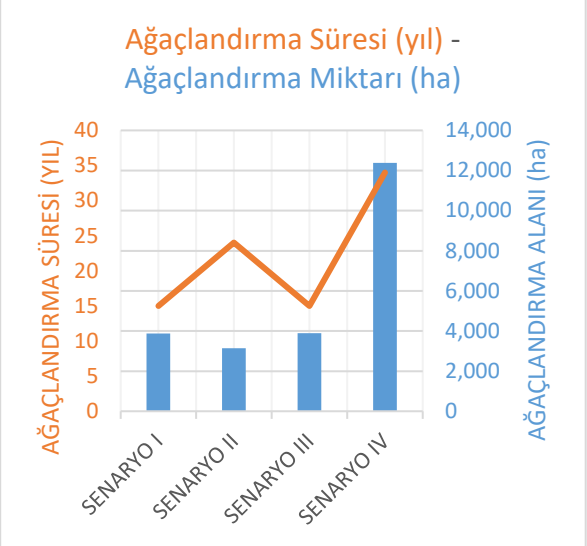
Tüm senaryolara ait elde edilen bulguların genel toplamları özet halinde **Tablo 5.1**'de verilmiştir. Ayrıca verilerin daha kolay anlaşılması adına karşılaştırmalı grafiklerle de ifade edilmiştir (**Şekil 5.1 – 5.6**).

Tablo 5.1 Ağaçlandırma Senaryoları Özet Tablo

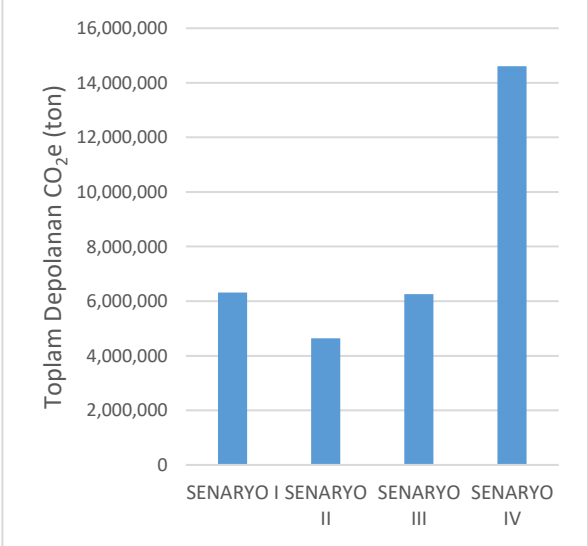
	SENARYO I	SENARYO II	SENARYO III	SENARYO IV
Yıllık Ağaçlandırma Bütçesi (tl/yıl)	46,000,000	20,000,000	46,000,000	46,000,000
Yıllık CO2e Depolama Hedefi (tCO2e/yıl)	100,000	100,000	100,000	100,000
Toplam Satın Alınacak Karbon Kredisi (tl)	0.00	2,028,669,013.88	0.00	0.00
Odun Emvali Toplam Satış Geliri (tl)*	0.00	0.00	574,989,650.56	4,245,883,720.00
Ağaçlandırma Süresi (yıl)	15	24	15	34
Ağaçlandırma Proje Periyodu (yıl)	49	49	49	49
Toplam Ağaçlandırma Miktarı (ha)	3,874.82	3,145.11	3,884.43	12,384.66
Toplam Depolanan CO2e (tCO2e)	6,313,852.33	4,640,800.33	6,255,135.55	14,605,604.19
Toplam Ağaçlandırma Maliyeti (tl)	556,708,440.00	447,893,808.48	1,080,631,450.00	1,555,605,784.00
Hedeflenen Karbon İçin Toplam Maliyet (tl)**	556,708,440.00	2,476,562,822.36	505,641,799.44	-2,690,277,936.00

** Odun Emvali Toplam Satış Geliri 49. yılın sonunda elde edilmektedir.*

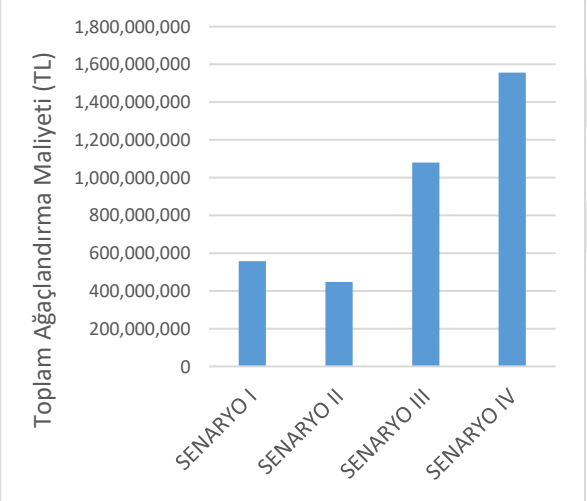
***"Toplam Ağaçlandırma Maliyeti + Toplam Satın Alınacak Karbon Kredisi - Odun Emvali Toplam Satış Geliri" şeklinde Hesaplanmaktadır.*



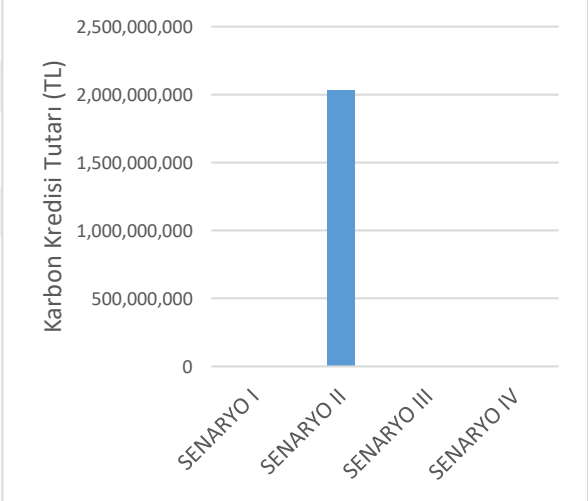
Şekil 5.1 Ağaçlandırma Süreleri ve Miktarları



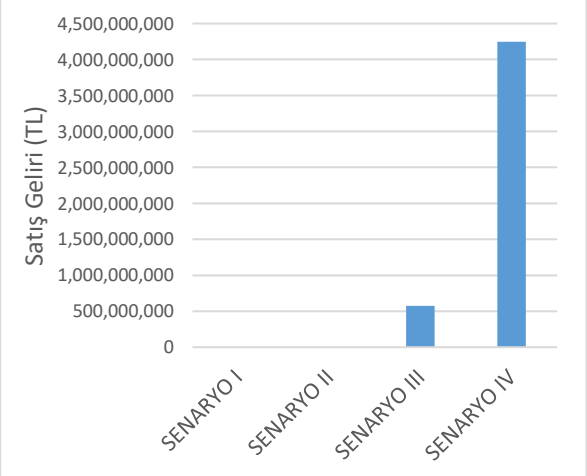
Şekil 5.2 Toplam Depolanan CO_2e Miktarları



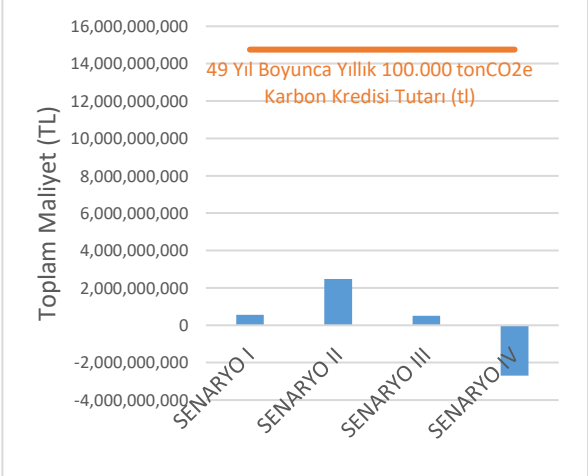
Şekil 5.3 Toplam Ağaçlandırma Maliyeti



Şekil 5.4 Gerekli Karbon Kredisi Tutarı



Şekil 5.5 Odun Emvali Satış Geliri



Şekil 5.6 Hedeflenen CO_2e İçin Toplam Maliyet

Senaryolara göre ağaçlandırma süresi (yıl) ile toplam ağaçlandırma miktarının (ha) karşılaştırmalı dağılımı **Şekil 5.1**'de gösterilmektedir. Senaryo IV, 12.384,66 hektar ile en yüksek ağaçlandırma alanına ve 34 yıl ile en uzun ağaçlandırma dönemine sahiptir. Diğer senaryoların ağaçlandırma miktarları 4.000 hektarın altında kalmış, süreleri ise 15–24 yıl aralığında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, Senaryo II'nin yıllık ağaçlandırma bütçesinin daha düşük olması nedeniyle, ağaçlandırma faaliyetlerini diğer senaryolara kıyasla daha az alanda ve daha uzun bir zaman dilimine yayarak gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır.

Senaryolara göre toplam depolanan CO_2e miktarı **Şekil 5.2**'de gösterilmektedir. En yüksek karbon depolama yaklaşık 14.6 milyon tCO_2e ile Senaryo IV'te gerçekleşirken, diğer senaryolarda bu değer yaklaşık 4.6 - 6.4 milyon tCO_2e civarındadır.

Tüm senaryoların toplam ağaçlandırma maliyetlerine göre dağılımı **Şekil 5.3**'de gösterilmektedir. En düşük maliyet yaklaşık 450 milyon TL ile Senaryo II'de gerçekleşmiş, en yüksek maliyet ise yaklaşık 1,55 milyar TL ile Senaryo IV'te olmuştur.

Satın alınması gereken karbon kredisi maliyetleri, **Şekil 5.4**'de her senaryo için gösterilmektedir. Sadece Senaryo II'de hedeflenen CO_2 miktarına ulaşılamadığından, yaklaşık 2 milyar TL değerinde karbon kredisi satın alınması gerekmiştir. Diğer senaryolarda bu gereklilik oluşmamıştır.

49 yıllık ağaçlandırma projesi sonunda elde edilen odun emvali satış gelirleri, senaryolara göre karşılaştırmalı olarak **Şekil 5.5**'de gösterilmektedir. Sadece Senaryo III ve IV'te odun satışı gerçekleşmiş, özellikle uzun süreli ağaçlandırmanın yapıldığı Senaryo IV'te yaklaşık 4,2 milyar TL gelir elde edilmiştir.

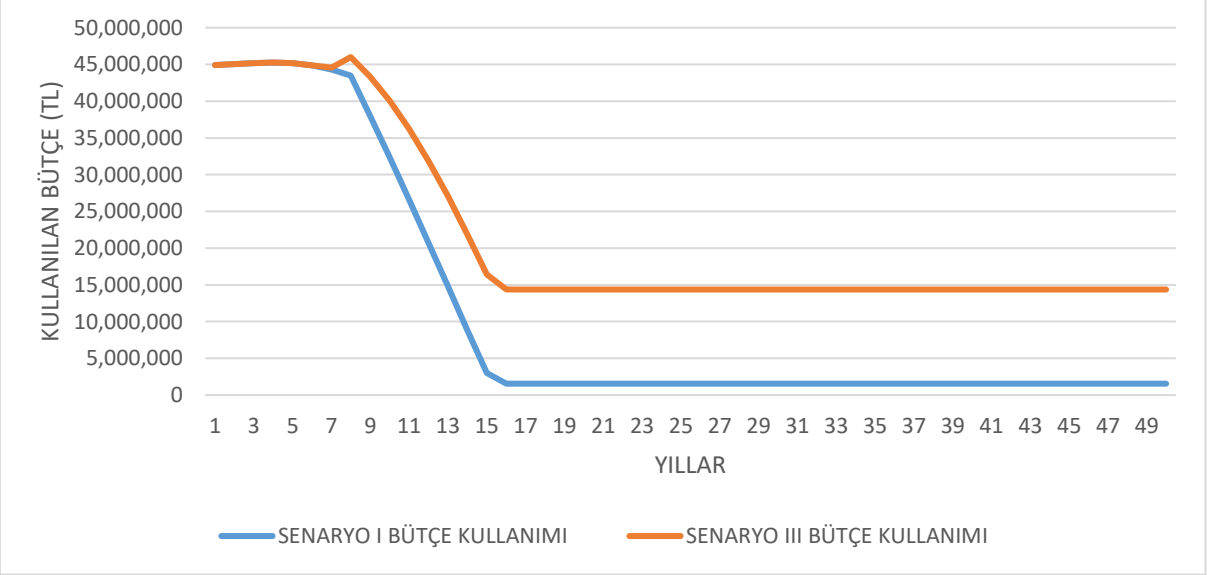
Her senaryo için yıllık 100.000 ton CO_2e hedefi doğrultusunda toplam maliyetleri **Şekil 5.6**'da gösterilmektedir. Karşılaştırma amacıyla, aynı hedefin yalnızca karbon kredisi satın alımıyla karşılanması durumunda oluşacak maliyet de grafikte yer almaktadır.

Yukarıdaki karşılaştırmalı özet grafiklerle bağlantılı olarak her bir senaryo özelinde yapılan detaylı değerlendirmeler aşağıda başlıklar halinde ele alınmıştır.

5.1.1. Senaryo I

Senaryo I, 49 yıl içerisinde toplam 6.313.852,33 ton CO_2e depolama kapasitesine sahiptir (**Şekil 5.2**). Aynı zamanda, en kısa ağaçlandırma süresi ve en az arazi kullanımına sahip senaryodur (**Şekil 5.1**). Bu senaryoda yalnızca belirlenen yıllık ağaçlandırma bütçesi kullanılmakta; bunun dışında herhangi bir karbon kredisi alımı veya odun satışından elde edilen gelir bulunmamaktadır. Toplam ağaçlandırma maliyeti açısından incelendiğinde, kredi kullanılmaksızın en düşük maliyet bu senaryoda gerçekleşmiştir (**Şekil 5.3**).

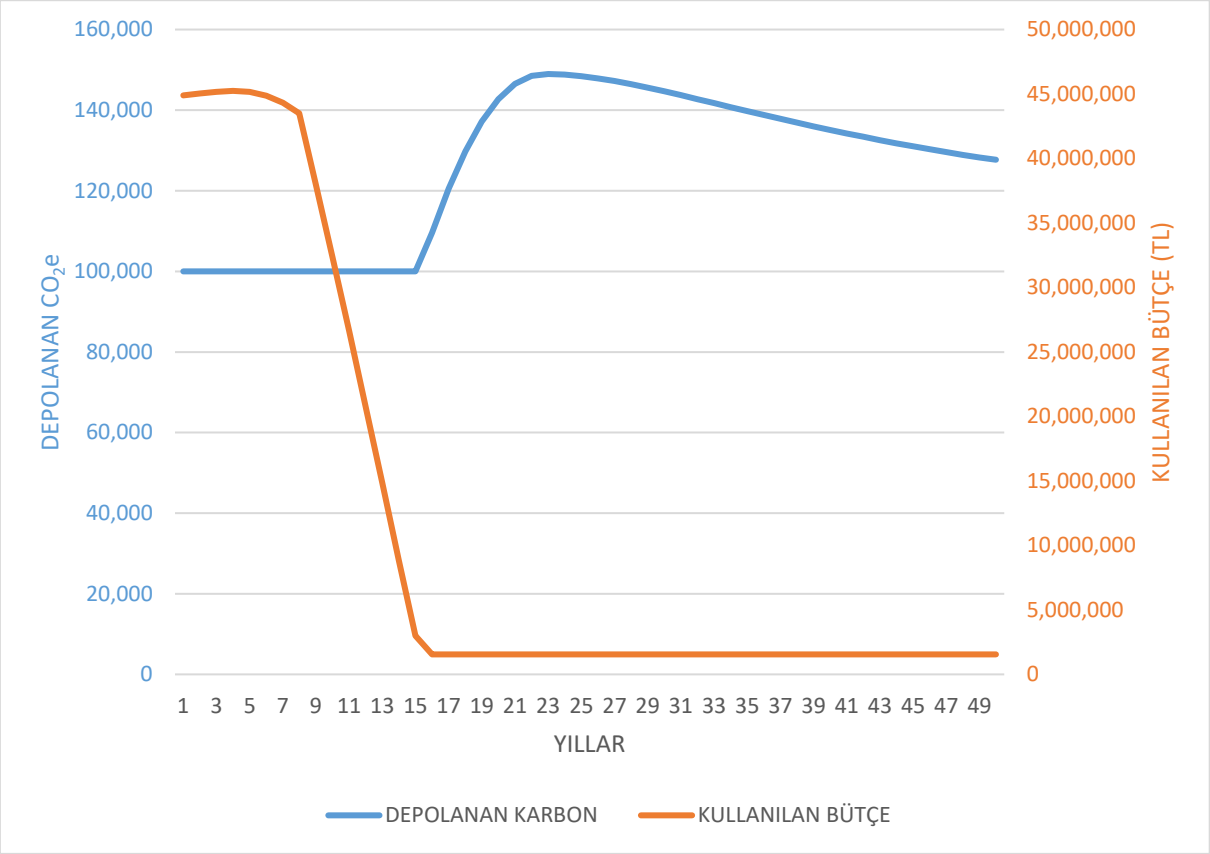
Proje süresinin sonunda oluşan toplam maliyet, Senaryo III ile benzer düzeydedir. Ancak Senaryo III'de, yıllık bütçe daha yüksek miktarda kullanılmış (**Şekil 5.7**) ve odun satışlarından gelir elde edilmiştir (**Şekil 5.5**). Senaryo I'in toplam proje sonu maliyeti, Senaryo III'e kıyasla 51,07 milyon TL daha yüksektir. Bu fark, Senaryo III'te odun satışından elde edilen gelirin toplam maliyeti düşürmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla burada tercih, firmanın finansal önceliklerine ve uzun vadeli stratejilerine bağlıdır.



Şekil 5.7 Senaryo I - Senaryo III Yıllık Bütçe Kullanımları

Bu senaryonun başarısının temel nedeni, yıllık karbon tutma hedefi için en uygun yıllık bütçe ile çalıştırılmasıdır. Model, yıllık 46 milyon TL ağaçlandırma bütçesi doğrultusunda en uygun ağaç türü, bonitet sınıfı ve dikim yılı kombinasyonlarını optimize etmekte; böylece hem kısa vadede hem de uzun vadede karbon hedefini en verimli şekilde karşılamaktadır. Ağaç türü ve bonitet seçimi, sadece projenin başlangıcındaki performansa değil, tüm yaşlardaki artım eğilimlerine dayalı olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.4'deki verilere göre, yıllar ilerledikçe karbonun büyük bölümü dikimlerden değil, mevcut ağaçların yıllık artımından sağlanmaktadır. Bu durum, modelin başlangıç yıllarında daha fazla dikim yapılmasına, ilerleyen yıllarda ise bu ihtiyacın azalmasına yol açmıştır. Dolayısıyla yıllık bütçe kullanımı azalırken yıllık karbon tutma hedefi fazlasıyla karşılanmaktadır (**Şekil 5.8**). Böylece karbon hedefi, ağaçlandırma faaliyetlerinin bitiminden itibaren, ağaçlandırılmış alanlarda meydana gelen artımlar sayesinde karşılanabilmiştir.



Şekil 5.8 Senaryo I-Ağaçlandırma Bütçesi Kullanımı - Depolanan CO_2e

Bu senaryodaki toplam yakalanan karbon miktarı, aşamalı olarak değil de tek seferde ağaçlandırma yaparak elde edilmek istendiğinde, **Tablo 3.4**'deki veriler doğrultusunda yapılan basit bir hesaplamaya göre yaklaşık 3.663 hektarlık bir alan yeterli olmaktadır. Bu alan miktarı, modelin çıktısından daha az görünmektedir ancak uygulama açısından değerlendirildiğinde, bu kadar geniş bir alanın aynı anda ağaçlandırılması hem ekonomik hem de operasyonel olarak oldukça zorludur. Böyle bir planlamada, gerekli finansal kaynağın 49 yıl yerine tek seferde kullanılması, yoğun iş gücü ve lojistik destek gereklidir. Söz konusu alan, yaklaşık 5500 adet futbol sahasına veya başka bir deyişle Belgrad Ormanı'nın üçte ikisi büyüklüğüne denk gelmektedir.

Ayrıca, Türkiye'de ağaçlandırma faaliyetlerinin iklimsel koşullara bağlı olarak yılda ortalama 3-4 ay gibi bir sürede gerçekleştirilebilmesi, bu tür büyük ölçekli tek seferlik uygulamaları fiilen imkânsız hale getirmektedir. İş gücü, ekipman ve zaman sınırlılıkları göz önüne alındığında, kademeli ve yıllara yayılmış ağaçlandırma stratejileri hem daha uygulanabilir hem de sürdürülebilir olmaktadır.

Modelde herhangi bir idare süresi tanımlanmamıştır. Bunun temel nedeni, ağaçların ilk yıllardaki yüksek büyüme hızlarına rağmen, bu dönemlerde karbon artış miktarının mutlak değer olarak yetersiz kalmasıdır. Yasal olarak belirlenen 49 yıllık proje süresi içerisinde yapılacak her türlü kesim faaliyeti, toplam karbon depolama miktarını azaltmakta ve modelin karbon hedefleriyle çelişmektedir. Ancak daha uzun süreli ormancılık planlamalarında uygulanması mümkündür. Bu nedenle, karbon optimizasyonu önceliği doğrultusunda, kesim içermeyen bir planlama tercih edilmiştir.

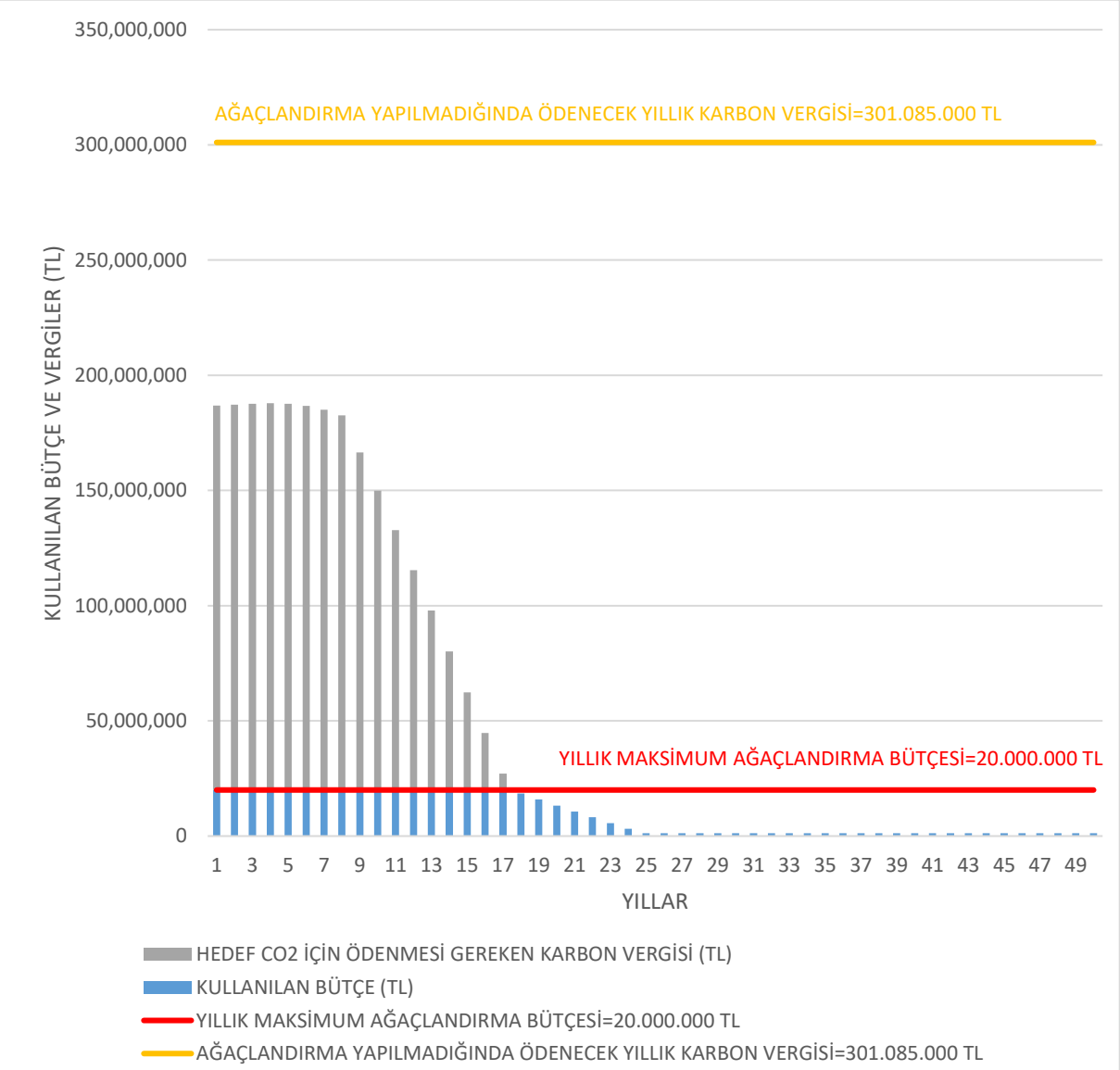
Bu senaryonun, en kısa ağaçlandırma süresi ve en az arazi kullanımına sahip olması, ağaçlandırma, bakım ve taşıma gibi operasyonel faaliyet süreçlerinde daha az fosil yakıt tüketimi anlamına gelmekte; çevresel etkileri azaltma açısından da avantaj sağlamaktadır. Tüm bu çevresel, ekonomik ve operasyonel faydalar bir arada değerlendirildiğinde, Senaryo I, hem yıllık karbon yakalama hedeflerine ulaşmadaki etkinliği hem de sürdürülebilirlik kriterlerine uyumu açısından modelin sunduğu en dengeli ve uygulanabilir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır.

5.1.2. Senaryo II

Senaryo II, 20 milyon TL yıllık ağaçlandırma bütçesi ile en az toplam ağaçlandırma maliyetine sahip senaryodur.

Genel olarak tüm senaryolarda ağaçlandırma süresi ile ağaçlandırma miktarı doğru orantılı olarak artarken, bu senaryo bu eğilimin dışına çıkmaktadır. Senaryo II, bu anlamda istisnai bir örnek teşkil etmektedir. Çünkü her ne kadar toplam ağaçlandırma maliyeti diğer senaryolara kıyasla daha düşük olsa da, yıllık ağaçlandırma bütçesinin 20 milyon TL ile sınırlı olması nedeniyle, ilk 17 yıl 100.000 ton CO_2e hedefini karşılayacak düzeyde ağaçlandırma yapılması mümkün olmamıştır. Bu sebeple ağaçlandırma faaliyetleri 24 yıllık bir zamana yayılmış ve hedefe ulaşmak için karbon kredisi satın alınan tek senaryo olmuştur.

Bu senaryoda ağaçlandırma süresi diğer senaryolara göre daha uzun, toplam ağaçlandırma miktarı ise daha azdır. Aynı zamanda, toplam 4.640.800,33 ton CO_2e depolama miktarı ile en düşük karbon depolanan senaryo olma özelliği taşımaktadır. Yıllık bütçe kullanımı ve satın alınması gereken karbon kredilerine ait detaylar **Şekil 5.9**'da sunulmuştur.

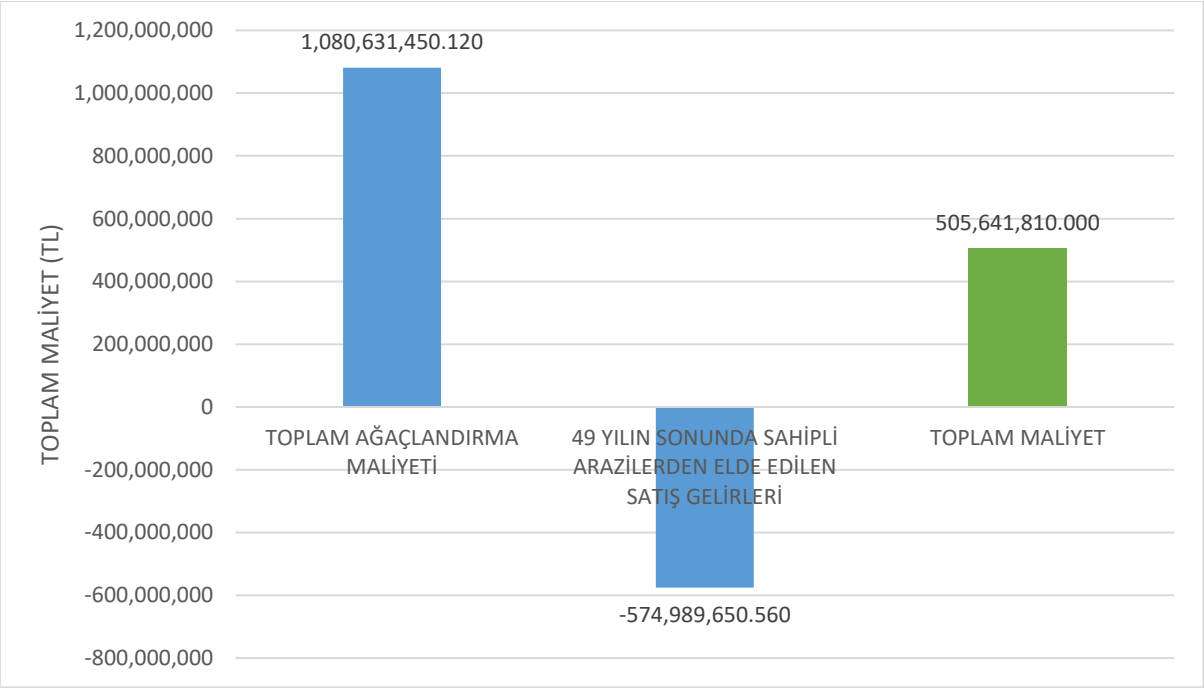


Şekil 5.9 Senaryo II-Yıllık Bütçe Kullanımı ve Satın Alınması Gereken Karbon Kredileri (TL/yıl)

Karbon kredisi maliyetleri de dahil edildiğinde, 49 yıl sonunda toplam proje maliyeti en yüksek olan senaryodur. Bu senaryo, ağaçlandırmanın finansman planlamasında düşük bütçenin avantaj sağlamadığını, aksine hedeflerin gerçekleştirilmesi için ek maliyetler doğurabileceğini açıkça ortaya koymaktadır. Buna rağmen, bu yaklaşım hâlâ karbon vergileri ödemek yerine daha avantajlı bir alternatif sunmaktadır.

5.1.3. Senaryo III

Bu senaryoda, sahipli arazilerin kira bedellerinin diğer senaryolara kıyasla daha düşük olması önemli bir avantaj sağlamaktadır. Benzer sonuçlar veren senaryo I'e kıyasla 9.61 hektar daha fazla ağaçlandırma yapılmış, toplam ağaçlandırmanın 1335,02 hektarlık kısmı sahipli arazilerde gerçekleştirilmiştir. Bu durum, özellikle odun emvali satışından gelir elde etme potansiyelini beraberinde getirmekte ve projenin mali dengesini olumlu yönde etkilemektedir (**Şekil 5.10**).



Şekil 5.10 Senaryo III-Toplam Maliyet (TL)

Ağaçlandırma faaliyetlerinin başlangıç yıllarında sahipli araziler tercih edilmemiş; bunun yerine, projenin ilerleyen yıllarında bu araziler kullanılmıştır. Bu yaklaşımın temel amacı, kira bedellerinin uzun yıllar boyunca birikmesini önleyerek maliyetleri düşürmektir. Sahipli arazilerin kira maliyetleri yüksek olmasına rağmen, bu alanlarda odun satışı yapılabilmesi, uzun vadede toplam maliyetin dengelenmesini ve gelir elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Karbon kredisi alımına ihtiyaç duyulmaması ise bu senaryonun bir diğer avantajıdır. Toplam ağaçlandırma maliyeti yüksek olsa da, şirketin kaynak planlamasına ve stratejik önceliklerine göre uygun bir alternatif olma ihtimali vardır. Nihayetinde bu senaryo, mülkiyet türüne göre farklılaştırılmış dikim stratejileriyle hem karbon hedeflerine ulaşılabileceğini hem de ekonomik getiri sağlanabileceğini göstermektedir.

5.1.4. Senaryo IV

Toplam ağaçlandırma maliyetinin ve toplam yakalanan CO_2'nin en yüksek olduğu senaryo, Senaryo IV'tür (**Şekil 5.3**). Ancak bu yüksek maliyete rağmen, toplam proje sonunda ödenecek net tutar açısından diğer senaryolara kıyasla daha avantajlıdır. Bunun temel nedeni, bu senaryoda şirketin bünyesinde bulunan arazilerin kullanılmasından kaynaklı arazi kiralama maliyetinin bulunmaması ve sahipli araziler üzerinden yürütülen ağaçlandırma faaliyetlerinden odun satış geliri elde edilebilmesidir. Bu avantajlar sayesinde proje, 49 yıl sonunda negatif net maliyet ile sonuçlanmakta ve şirket için kâr sağlayan bir yapıya dönüşmektedir (**Şekil 5.6**). Başka bir deyişle, şirket hem yıllık karbon tutma hedefini başarıyla gerçekleştirmiş hem de proje sonunda ekonomik getiri elde etmiştir.

Bu sonucun ortaya çıkabilmesi için, yıllık ağaçlandırma bütçesi 34 yıl boyunca yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Tüm ağaçlandırma faaliyetleri yalnızca sahipli araziler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu durum, Türkiye'deki mevcut koşullar göz önüne alındığında tam anlamıyla uygulanabilir olmayabilir; ancak farklı ülkelerde veya daha küçük çaplı ağaçlandırma planlarında mümkün hale gelebilecek bir modeldir.

Bununla birlikte bu senaryo, gelir getirici türlerin kullanımıyla yalnızca karbon emisyonlarının azaltılmasının değil, aynı zamanda ekonomik kazanç elde edilmesinin de mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamındaki diğer ağaçlandırma sahalarında odun üretiminden gelir elde etmek mümkün olmasa da, odun dışı orman ürünleri veren ve aynı zamanda yüksek karbon yakalama potansiyeline sahip türlerin tercih edilmesi halinde benzer ekonomik faydalar sağlanabileceğini göstermiştir. Bu yönüyle model, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği destekleyen alternatif yaklaşımlar sunmaktadır.

Buna ek olarak Senaryo IV'de depolanan karbon, diğer senaryoların iki katından daha fazladır. Bu fazladan depolanan karbon miktarı, modelde ekonomik bir getiri olarak hesaba katılmamıştır; çünkü bu noktada değerlendirme, tamamen şirketin stratejik tercihlerine bağlıdır.

Diğer senaryolarda da geçerli olmak üzere şirket, elde edilen fazla karbonu ilerleyen yıllarda kendi emisyon dengelemesinde salım izni olarak kullanabileceği gibi, karbon piyasalarında da değerlendirebilir. Eğer karbon piyasalarında değerlendirme seçeneği tercih edilirse, yıllık ağaçlandırma bütçesi kullanımı önemli ölçüde azalacak ve proje çok daha düşük maliyetlerle sürdürülebilir hâle gelecektir.

Bu durum, ağaçlandırma projelerinin hem karbon piyasası yoluyla çevresel katkı sunduğunu hem de odun ve karbon gelirleri sayesinde ekonomik olarak cazip bir yatırım aracı olabileceğini göstermektedir. Ancak bu noktada önemli bir husus da göz önünde bulundurulmalıdır: Odun emvalinden elde edilen ürünlerin yakacak olarak kullanılmayacağına dair açık bir taahhüt veya denetim mekanizması sağlanmalıdır. Aksi takdirde, elde edilen karbon kazancı atmosfere geri salınarak çevresel etkinin tersine dönmesi riski doğacaktır. Bu nedenle, üretilen odunun kullanım amacına ilişkin sürdürülebilirlik kriterlerinin net şekilde belirlenmesi, hem karbon dengesinin korunması hem de projelerin güvenilirliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

5.2. MODELİN UYGULANABİLİRLİĞİ VE POTANSİYEL SORUNLAR

Geliştirilen optimizasyon modeli, farklı ağaçlandırma stratejilerini teknik, ekonomik ve çevresel açılardan karşılaştırarak karar vericilere yol göstermeyi amaçlamaktadır. Ancak modelin saha uygulamalarına aktarılabilirliği değerlendirildiğinde, çeşitli sınırlamalar, belirsizlikler ve dikkat edilmesi gereken hususlar ortaya çıkmaktadır.

Öncelikle, Avrupa Birliği karbon piyasalarında ağaçlandırma projelerinin uluslararası karbon kredisi üretiminde kabul görmediği bilinmektedir (European Commission, 2024). Dwortzan (2023), günümüzde en verimli ve ölçeklenebilir sera gazı azaltım stratejisi ağaçlandırma olarak görülse de bu yaklaşımın arkasında operasyonel riskler (dikim başarısı), siyasi riskler (araziye erişim güvencesi), itibar riskleri (sosyal fayda sağlanabilirliği) ve doğrulama süreçlerine duyulan güvensizlik gibi unsurların yer aldığını belirtmektedir. Buna ek olarak modelde öngörülen karbon tutma potansiyelinin karbon piyasalarında kredilendirilebilmesi için, projelerin orman varlığını artırıcı nitelikte olması gerektiği düşünülmüştür. Halihazırda orman sayılan alanlarda veya devlet tarafından ağaçlandırılması planlanan sahalarda yürütülen faaliyetler, Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kapsamında karbon kredisi üretimi açısından uygun görülmeyeceği kanaatine varılmıştır. Buna rağmen, şeffaf, denetlenebilir ve sürdürülebilir biçimde yürütülen ağaçlandırma faaliyetlerinin, karbon piyasalarında geçerli bir kredi mekanizmasına dönüşme potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, uygun sahaların belirlenmesi titizlikle yapılmalı ve belirtilen riskler dikkate alınmalıdır.

Huntingford ve diğ. (2017), bitki solunumu yoluyla atmosfere salınan karbon miktarı daha önce tahmin edilenden yaklaşık %30 daha fazla olduğunu belirtmiştir. Küresel ısınmayla birlikte bu solunumun artacağı, dolayısıyla bitkilerin atmosferden karbon yakalama kapasitesini azaltacağını vurgulamıştır. Modelde fotosentez yoluyla yakalanan karbon miktarı üzerinde durulmuş, ağaçların solunum yoluyla atmosfere saldığı karbondioksit dikkate alınmamıştır. Bu eksik hesaplama, gelecek çalışmalarda dikkate alınması gereken bir geliştirme alanı olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca, iklim değişikliğine bağlı olarak ağaç türlerinin ekolojik yayılış alanları zamanla değişmektedir. Bu nedenle, tür seçimi yalnızca bugünkü coğrafi uygunlukla değil, aynı zamanda uzun vadeli iklim projeksiyonları doğrultusunda yapılmalıdır. Buna ek olarak tür sayısı ve çeşitliliğinin artması, modelin daha fazla bölgede uygulanabilir olmasını sağlayacaktır. Modelde biyokütle genişletme faktörü (BGF) olarak, uygulama kolaylığı açısından 299 sayılı tebliğde (OGM, 2017) ibreliler için önerilen 1.212 katsayısı kullanılmıştır. Ancak Tolunay (2019), Türkiye ormanlarında yetişen ağaç türleri için tür bazında farklı BGF değerleri sunmaktadır; bu da modelin tür bazlı hassasiyetinin artırılması açısından dikkate değer bir geliştirme potansiyeli ortaya koymaktadır.

Ağaçlandırma ve bakım faaliyetleri, ağırlıklı olarak fosil yakıt tüketimine dayalı gerçekleştirilmektedir. Bu durum, ormanların iklim değişikliğiyle mücadeledeki tam potansiyelini gerçekleştirmesini sınırlamaktadır (Kim, 2021). Her ne kadar modelde operasyonel emisyonlara yer verilmemiş olsa da, gerçek uygulamalarda bu emisyonların ya şirketin yıllık karbon beyanına dâhil edilmesi ya da faaliyetleri yürüten taşeron firmaya atfedilmesi gerekliliği doğacaktır. Bu bağlamda, ağaçlandırma projelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, karbon bilançosunu daha sürdürülebilir hâle getirecektir.

Modelde yer alan senaryolardan bazıları odun emvali üretimi yoluyla ekonomik gelir sağlamayı hedeflemektedir. Ancak bu gelir yalnızca ürünlerin sürdürülebilir kullanımına bağlı olarak çevresel fayda sağlayabilir. Odunların yakacak olarak kullanılması hâlinde, depolanan karbonun tekrar atmosfere salınması riski doğmakta ve projenin çevresel kazanımlarını azaltabilmektedir. Bu nedenle, üretilecek odunların kullanım amaçlarının önceden belirlenmesi ve denetlenebilir sürdürülebilirlik kriterlerine bağlanması büyük önem taşımaktadır.

Bununla birlikte, geniş çaplı ağaçlandırmaların yüksek miktarda arazi ihtiyacı da dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktördür. Bu durum tarım ve mera alanları ile rekabeti artırarak gıda güvenliği üzerinde baskı oluşturabilmektedir. Doelman ve diğ. (2020),

küresel emisyon azaltım hedeflerine ulaşmak için 1.100 milyon hektara kadar yeni ağaçlandırma alanı gerekebileceğini belirtmektedir. Bu büyüklükte bir arazi ihtiyacı, sosyal, ekonomik ve çevresel açıdan çeşitli ödünleşmeler yaratabileceğinden, ağaçlandırma politikalarının diğer sektörlerle uyumlu şekilde tasarlanması gerekmektedir.

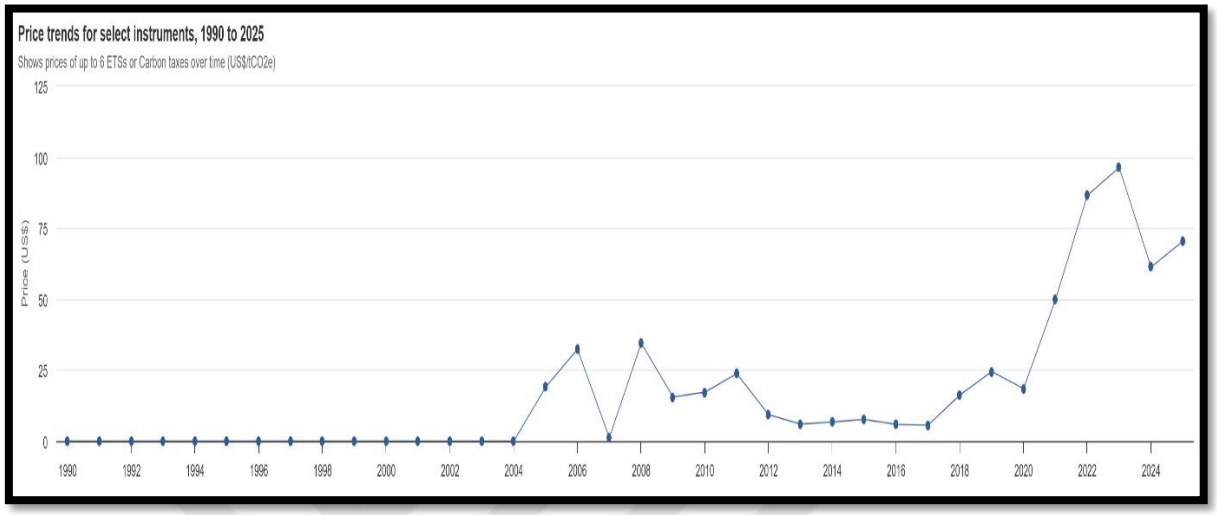
Aynı zamanda ağaçlandırmanın yüksek miktarda arazi ihtiyacı, "albedo" etkisinin de değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Kirschbaum ve diğ. (2011) tarafından Yeni Zelanda'da yapılan bir çalışmaya göre ağaçlandırma faaliyetleri, atmosferdeki karbondioksiti azaltarak soğutucu etki yaratırken, ormanların ışığı daha az yansıtıcı olması (düşük albedo) nedeniyle güneş ışığını daha fazla soğurmasıyla ısınmaya neden olmaktadır. Yaptıkları çalışma albedo kaynaklı ısınmanın, ilk yıllarda karbon tutumundan elde edilen soğutmayı büyük ölçüde dengelediğini; uzun vadede ise karbon depolama etkisinin baskın hale geldiğini, ortalama olarak karbon tutumu ile elde edilen iklimsel faydayı %17–24 oranında azalttığını göstermiştir. Bu sebeple daha küçük alanlarda daha fazla karbon tutma potansiyeline sahip bitkileri kullanmak da bir seçenek olarak değerlendirilmelidir.

Öte yandan, sahipli arazilerde gerçekleştirilen senaryoların sunduğu ekonomik avantajlar göstermektedir ki, ağaçlandırma sahalarında odun dışı orman ürünleri sağlayan ve aynı zamanda hızlı gelişen türlerle yapılacak projelerin değerlendirilmesi, özellikle ağaç kesimi yapılamayan özel ağaçlandırma sahalarında ekonomik getiri sağlama açısından önem arz etmektedir. Bu sayede karbon emisyonlarını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda gelir elde edilmesi mümkün olacaktır.

Ayrıca, fidan türü seçimi de proje maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Özel ağaçlandırmalarda genellikle daha yüksek başarı oranına sahip olan tüplü fidanlar tercih edilmektedir. Buna karşılık, OGM'nin standart uygulamalarında kullanılan çıplak köklü fidanlar tutma oranı açısından daha düşük başarı göstermektedir. Tüplü fidanlarda dikim, dağıtım ve fidan maliyetleri önemli ölçüde artış göstermektedir. Modelde OGM uygulamaları baz alınarak çıplak köklü fidanlar kullanılmıştır.

Son olarak, T.C. Ticaret Bakanlığı (2023) verilerine göre Türkiye'nin dış ticaretinin önemli bir bölümünü Avrupa Birliği ile gerçekleştirmesi nedeniyle, modelde karbon fiyatı referansı olarak Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) esas alınmıştır. Bununla birlikte, modelde hem ekonomik koşulların hem de ETS kapsamındaki CO_2e karbon emisyon izni fiyatlarının zaman içinde sabit kalacağı varsayılmıştır. Ancak gerçekte, AB ETS

kapsamında her yıl azaltılan emisyon kotaları doğrultusunda karbon kredisi fiyatlarının artış eğilimi gösterdiği (**Şekil 5.11**) ve buna paralel olarak enflasyon kaynaklı maliyet artışlarının da gerçekleşebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 5.11 1990 - 2025 Tarihleri Arası AB ETS Emisyon İzni Fiyatları (WORLD BANK GROUP, 2025)

Türkiye'de henüz zorunlu bir ETS uygulaması bulunmadığından, ulusal düzeyde geçerli bir CO_2 emisyon izin fiyatı tanımlanmamıştır. Bu bağlamda, modelde 1 ton CO_2 emisyon iznine karşılık gelen 65 € AB ETS fiyatının kullanılması bir gereklilik olarak ortaya çıkmış olsa da, bu yaklaşım Türkiye'nin mevcut ekonomik koşulları açısından sınırlı düzeyde geçerlilik ve uygulanabilirlik taşımaktadır. Türkiye'nin, kendi makroekonomik dinamikleri ve sektör yapısına uygun, ulusal ölçekte bir CO_2e karbon fiyatlama mekanizması geliştirmesi gerekmektedir. Nitekim dünya genelindeki ETS uygulamalarında CO_2e karbon fiyatlarının yaklaşık 0,7 ila 70 ABD doları arasında değişkenlik gösterdiği gözlemlenmektedir (WORLD BANK GROUP, 2025). Bu da farklı ekonomik yapıların, kendi ihtiyaç ve önceliklerine göre karbon fiyatlarını belirlediklerini ortaya koymaktadır.

İlerleyen dönemlerde, karbon kredisi gelirleri ile ağaçlandırma maliyetlerinin net bugünkü değer (NBD) analizine dayalı olarak yeniden değerlendirilmesi, modelin ekonomik gerçekliklere daha duyarlı hale getirilmesini sağlayacaktır. Böyle bir güncelleme ile daha isabetli ve sürdürülebilir projeksiyonlar elde edilmesi mümkün olacaktır. Tüm bu belirsizlik ve değişkenliğe rağmen, ağaçlandırma uygulamaları genel olarak maliyet etkinliğini büyük ölçüde korumakta ve uzun vadede hem çevresel hem de ekonomik açıdan güçlü bir çözüm alternatifi olarak öne çıkmaktadır.

5.3. HUKUKİ ZEMİN

Modelin uygulanabilirliğini etkileyen en kritik faktörlerden biri de mevcut hukuki altyapının henüz hazır olmamasıdır.

Türkiye'de özel ağaçlandırma uygulamaları genellikle kamu arazilerinde yürütülmektedir ve bu alanların karbon haklarıyla ilgili yasal düzenlemeler netlik kazanmamıştır. Benzer şekilde, hatıra ormanları gibi uygulamalarda yalnızca fidan bedelinin ödenmesiyle yapılan ağaçlandırmalarda, karbon hakkının kimde olduğu da hukuken belirsizdir. Bu çalışmada, söz konusu arazilerin karbon hakkının yatırımcılara devredildiği varsayımıyla hareket edilmiştir.

Ayrıca OGM, özel ağaçlandırmaya uygun arazileri, yatırımcılara hazır bir liste hâlinde sunmamakta; bunun yerine, arazinin tespiti yatırımcıya bırakılmaktadır. Bu durum, süreçlerin yavaş işlemesine ve potansiyel sahaların etkin biçimde değerlendirilememesine neden olmaktadır. Bu nedenle çalışmada gerçek sahalar yerine varsayımsal sahalar kullanılmıştır.

Bu çerçevede, karbon hakkının paylaşımı, özel ağaçlandırma izinleri ve kamu arazilerinin tahsisine ilişkin süreçlerin açık biçimde tanımlandığı, uygulamaya yönelik bütüncül bir mevzuat altyapısının oluşturulması gereklidir. Devletin yatırımcılara rehberlik eden bir yaklaşım benimsemesi, hem karbon piyasalarının gelişimini hem de özel sektörün ağaçlandırma yatırımlarına yönelmesini kolaylaştıracaktır. 9 Temmuz 2025 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren İklim Kanunu ile Emisyon Ticaret Sistemi'nin (ETS) kurulması ve karbon emisyonu azaltım projelerine teşvik sağlanması hedeflenmektedir. Bu düzenlemenin, özel sektör yatırımlarını artırarak karbon piyasalarının oluşumunu hızlandırması ve ağaçlandırma projelerinin ekonomik açıdan daha cazip hâle gelmesine katkı sunması beklenmektedir.

Sonuç olarak, mevcut yasal belirsizlikler özel sektörün katılımını sınırlandırmakta ve modelin uygulama potansiyelini düşürmektedir. Bu nedenle, karbon hakkı sahipliği, teşvik yapısı, arazi erişimi gibi temel konuları kapsayan, şeffaf ve yatırımcı dostu bir yasal çerçevenin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Böyle bir düzenleme, yalnızca özel sektör yatırımlarını teşvik etmekle kalmayacak; aynı zamanda kırsal kalkınmayı destekleyecek, kamu üzerindeki maddi yükü azaltacak ve Türkiye'nin iklim hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin sahip olduğu yüksek ağaçlandırma potansiyelinden faydalanarak iklim değişikliği ile mücadele kapsamında orman ekosistemlerinin sunduğu karbon tutma kapasitesinden faydalanarak, özel sektörün ağaçlandırma projelerine daha etkin şekilde katılımını sağlamaya yönelik bir "Karma Tamsayılı Programlama" (MIP-Mixed-Integer Programming) optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Model, Türkiye'de yasal sınır olan 49 yıllık arazi kiralama süresi boyunca, bir şirketin yıllık CO_2 tutma hedefi ve bütçesi doğrultusunda farklı arazi türleri, bonitet sınıfları ve ağaç türleri için en uygun ağaçlandırma stratejisini belirlemektedir. Böylece hem yıllık karbon hedefi karşılanmakta hem de maliyet en aza indirilmektedir. "GAMS Studio" optimizasyon programı ile çalıştırılan modelde dört farklı senaryo üzerinden elde edilen bulgular, ağaçlandırma faaliyetlerinin ekonomik, çevresel ve operasyonel açılardan dikkatle planlanması gerektiğini ortaya koymuştur.

Senaryo I, kısa ağaçlandırma süresi ve düşük maliyetle hedefe ulaşılması açısından en dengeli çözümü sunarken; Senaryo II, düşük yıllık bütçenin uzun vadede daha yüksek maliyetlere neden olabileceğini göstermiştir. Senaryo III, arazi mülkiyetine dayalı gelir getirici faaliyetlerin projeyi ekonomik açıdan güçlendirebildiğini ortaya koymuş; Senaryo IV ise sahipli arazilerin sunduğu imkânlar sayesinde karbon hedefinin çok üzerinde bir başarı ve ekonomik kârlılık sağlamıştır. Özellikle Senaryo IV'te elde edilen karbon miktarı, firmanın gelecekteki salım dengelemesi veya karbon piyasalarında ticari getiri elde etmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Ancak modelin uygulanabilirliği değerlendirildiğinde, çeşitli hukuki, teknik ve çevresel sınırlamalarla karşılaşılmaktadır. Avrupa Birliği karbon piyasalarında ağaçlandırma projeleri hâlen kabul görmemektedir; albedo etkisi, operasyonel emisyonlar ve bazı risk unsurları kredilendirmeyi zorlaştırmaktadır. Türkiye özelinde ise kamu arazilerinde karbon hakkı paylaşımı ve yatırımcıların araziye erişimi, projelerin uygulanabilirliğini sınırlayan temel faktörler arasındadır. Bu kapsamda, karbon hakkı sahipliğinin açık ve yasal çerçeveye bağlanması; kamu arazilerinde yapılan özel ağaçlandırmalarda karbon haklarının yatırımcılara devrine yönelik düzenlemelerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Arazi tespiti süreci yatırımcıya yol gösterici bir yapıya kavuşturulmalıdır.

2025 tarihli İklim Kanunu kapsamında kurulacak olan Emisyon Ticaret Sistemi, ormanlaştırma projelerini de kapsayacak şekilde yapılandırılmalı; karbon kredisi üretimi için gerekli metodolojik altyapı oluşturulmalıdır. Karbon kredilerinin doğrulanabilirliği ve denetlenebilirliği ise uluslararası standartlara uygun şekilde güvence altına alınmalı ve yatırımcılara yol gösterici rehber dokümanlar sunulmalıdır. Buna ek olarak, ağaçlandırma faaliyetlerinde meydana gelebilecek olumsuzluklara karşı bir güvence sistemi geliştirilmelidir. Yangın, kaçak kesim gibi durumlarda kaybedilecek CO_2 miktarının telafisi için; devlet ve hazine arazilerinde devlet teminatı, sahipli arazilerde ise sigorta mekanizması uygulanmalıdır.

Proje sahalarının belirlenmesinde yalnızca bugünkü ekolojik uygunluk değil, iklim değişikliği projeksiyonlarına dayalı uzun vadeli tür adaptasyon potansiyeli dikkate alınmalıdır. Ayrıca ağaçlandırma faaliyetlerinde kullanılan enerji kaynaklarının fosil yakıtlara dayalı olması, operasyonel emisyonların da hesaplamalara dahil edilmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda, uygulama süreçlerinde yenilenebilir enerji kullanımı teşvik edilmeli ve karbon bilançosu bütüncül olarak değerlendirilmelidir. Odun emvali üretimi hedeflenen projelerde, odunun yakacak olarak kullanılmayacağına dair taahhüt ve denetim mekanizmaları oluşturulmalı; karbonun atmosfere yeniden salınması engellenmelidir. Hızlı büyüyen ve odun dışı orman ürünleri sağlayan türlerin kullanımı, hem karbon emisyonlarını azaltmak hem de ekonomik getiri sağlamak açısından dikkate değer bir seçenektir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda yalnızca fotosentez yoluyla tutulan karbon değil, bitki solunumu ile atmosfere salınan karbon miktarı da göz önünde bulundurularak daha gerçekçi bir karbon bilançosu oluşturulmalıdır. Ayrıca fidan türü, dikim yöntemi ve bakım maliyetleri gibi değişkenlerin daha ayrıntılı biçimde modellenmesi; farklı türlerin senaryolara etkisini ortaya koyacaktır. Karbon kredisi fiyatlarındaki değişkenlik ve enflasyon etkisi dikkate alınarak net bugünkü değer analizleri yapılması, yatırım kararlarının daha sağlıklı verilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, geliştirilen model hem karbon emisyonlarının azaltılmasına hem de özel sektörün çevresel yatırımlar yoluyla ekonomik getiri elde etmesine imkân sağlayan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak bu potansiyelin gerçeğe dönüşebilmesi için hukuki, teknik ve çevresel boyutlarda yapılması gereken düzenlemeler bulunmaktadır. Doğru politikalar ve sürdürülebilir planlama ile desteklendiği takdirde, Türkiye, özel sektör eliyle yürütülecek ağaçlandırma projelerinde öncü bir ülke konumuna gelebileceği ve Paris İklim Anlaşması hedeflerine ulaşmada önemli bir adım atılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Agreement, P., 2015, Paris agreement, *Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (21st Session, 2015: Paris), *Retrived December* (C. 4, s. 2017), HeinOnline.

Akkemik, Ü. (Ed.), 2018, "*Türkiye'nin Doğal-Egzotik Ağaç ve Çalıları*", Orman Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara

Assessment, M. E., 2005, Current State and Trends, R. Hassan, R. Scholes, & N. Ash (Ed.), *Ecosystems and human well-being*, Island Press, Washington, DC (USA).

Carle, M.-A., D'Amours, S., Azouzi, R., Rönnqvist, M., 2021., A Strategic Forest Management Model for Optimizing Timber Yield and Carbon Sequestration, *Forest Science*, 67(2), 205-218.

Çağlayan, İ., Yeşil, A., Çınar, D., Cieszewski, C., 2018, Taxonomy for the optimization in forest management: a review and assessment, *Forestist*, 68(2), 122-135.

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2024, *İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030)*, İklim Değişikliği Başkanlığı, Ankara.

Doelman J.C., Stehfest E., van Vuuren D.P., Tabeau A., Hof A.F., Braakhekke M.C., Gernaat D.E.H.J., van den Berg M., van Zeist W.J., Daioglou V., van Meijl H., Lucas P.L.,2020, Afforestation for climate change mitigation: potentials, risks and trade-offs, *Global Change Biology*, 26(3), pp.1576–1591.

Dong, L., Lin, X., Bettinger, P., Liu, Z., 2024, How to maximize the joint benefits of timber production and carbon sequestration for rural areas? A case study of larch plantations in northeast China, *Carbon Balance and Management*, 19(1), 24.

Dragicevic, A., Lobianco, A., Leblois, A., 2016, Forest planning and productivity-risk trade-off through the Markowitz mean-variance model, *Forest Policy and Economics*, 64, 25-34.

Dwortzan, M., 2023, *How forests can cut carbon, restore ecosystems, and create jobs*, https://news.mit.edu/2023/how-forests-can-cut-carbon-restore-ecosystems-create-jobs-0727, [Ziyaret tarihi: 29 Mart 2024].

Eraslan, İ., 1973, Türkiye'de orman amenajmanının gelişimi ve yeni yönelimleri, *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 0(0).

European Commission, 2024a, *Carbon Border Adjustment Mechanism*, https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en?prefLang=tr#cbam, [Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2024].

European Commission, 2024b, *What is the EU ETS?*, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en, [Ziyaret tarihi: 29 Mart 2024].

FAO, 2001, *State of the World's Forests (SOFO)*, https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/y0900e, [Ziyaret tarihi: 09 Temmuz 2025].

Giménez, J. C., Bertomeu, M., Diaz-Balteiro, L., Romero, C., 2013, Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective, *Forest Ecology and Management*, 291, 367-376.

Girardin C.A.J., Jenkins S., Seddon N., Allen M., Lewis S.L., Wheeler C.E., Griscom B.W., Malhi Y., 2021, Nature-based solutions can help cool the planet—if we act now, *Nature*, 593(7858), 191–194.

Hernandez, M., Gómez, T., Molina, J., León, M. A., Caballero, R., 2014, Efficiency in forest management: A multiobjective harvest scheduling model, *Journal of Forest Economics*, 20(3), 236-251.

Huntingford C., Atkin O.K., Martinez-de la Torre A., Mercado L.M., Heskel M.A., Harper A.B., Bloomfield K.J., O'Sullivan O.S., Reich P.B., Wythers K.R., Butler E.E., Chen M., Griffin K.L., Meir P., Tjoelker M.G., Turnbull M.H., Sitch S., Wiltshire A., Malhi Y., 2017, Implications of improved representations of plant respiration in a changing climate, *Nature Communications*, 8(1), 1602.

IPCC, 2003, *Good Practice Guidance for LULUCF*, https://doi.org/10.1016/j.crvi.2014.11.004, [Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2025].

IPCC, 2006, *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*, IGES, Japan.

IPCC, 2023, *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.

Kim, D. K., 2021, *Afforestation can help to tackle climate change. Here's how,* https://www.weforum.org/agenda/2021/11/afforestation-can-help-tackle-climate-change-heres-how/, [Ziyaret tarihi: 29 Mart 2024].

Kindler, E., 2016, A comparison of the concepts: Ecosystem services and forest functions to improve interdisciplinary exchange, *Forest Policy and Economics*, 67, 52-59.

Kirschbaum, M. U. F., Whitehead, D., Dean, S. M., Beets, P. N., Shepherd, J. D., Ausseil, A.-G. E., 2011, Implications of albedo changes following afforestation on the benefits of forests as carbon sinks, *Biogeosciences*, 8(12), 3687-3696.

Lead, C., Anatoly, A., Barber, C. V., Persson, R., Authors, L., Gonzalez, P., … Scholes, B., 2000, Forest and Woodland Systems, *Area.*

O'Donoghue, C., O'Fatharta, E., Geoghegan, C., Ryan, M., 2024, Farmland afforestation: Forest optimal rotation ages across discrete optimisation objectives, *Land Use Policy*, 139, 107091.

OGM, 2017, *Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Orman Amenajman Planlarının Düzenlenmesine Ait Usul ve Esaslar*, Ankara

OGM, 2020a, *7310 Sayılı Özel Ağaçlandırma Tamimi*, Ağaçlandırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.

OGM, 2020b, *Orman Sayılmayan Tapulu Taşınmazlar Üzerindeki Ağaç ve Ağaççıklardan Faydalanılması Hakkında Yönetmelik,* Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

OGM, 2021, *Türkiye Orman Varlığı 2020*, Orman İdaresi ve Planlama Dairesi Başkanlığı, Ankara.

OGM, 2024a, *Başvuru ve Arazi Kullanım Bedelleri*, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

OGM, 2024b, *Kira Bedelleri*, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

OGM, 2025a, *2024 Faaliyet Raporu*, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.

OGM, 2025b, 2025 Yılı Fidan ve Tohum Satış Fiyatları, https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/mevzuat/talimatlar, [Ziyaret tarihi: 22 Haziran 2025].

OGM, 2025c, *Ağaçlandırma, Rehabilitasyon, Toprak Muhafaza, Erozyon ve Sel Kontrolü, Mera Islahı, Fidanlık, Silvikültür ve Etüt Proje İşlerinde Kullanılacak 2025 Yılı Birim Fiyat Cetveli*, https://www.ogm.gov.tr/tr/duyurular/agaclandirma-rehabilitasyon-toprak-muhafaza-erozyon-ve-sel-kontrolu-mera-islahi-fidanlik-silvikultur-ve-etut-proje-is, [Ziyaret tarihi: 22 Haziran 2025].

Okudan, A., Şen, B., 2023, *Optimizasyon Nedir ve Türleri Nelerdir?*, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/014_15.pdf, [Ziyaret tarihi: 28 Haziran 2025].

Özcan, B. G., 2003, *Sahilçamı (Pinus pinaster Ait.) Ağaçlandırmalarında Artım ve Büyüme*, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Kavak ve Hızlı Gelişen Orman Ağaçları Araştırma Enstitüsü, İzmit.

Özturna, A. G., Pehlivan, S., Makineci, E., Tolunay, D., 2023, Durusu Kumulu sahil çamı *(Pinus pinaster Ait.)* ağaçlandırmalarında yaş ticari kök kütlesi miktarları, *Ormancılık Araştırma Dergisi,* 10(2), 197-216.

Rabotyagov, S. S., Tóth, S. F., Ettl, G. J., 2013, Testing the Design Variables of ECOSEL: A Market Mechanism for Forest Ecosystem Services, *Forest Science*, 59(3), 303-321.

Raven, P. H., Evert, R. F., Eichhorn, S. E., 2005, *Biology of plants*, Macmillan, New York.

Resmî Gazete, 2025, *İklim Kanunu,* https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/07/20250709-1.htm, [Ziyaret tarihi: 09 Temmuz 2025].

Senken, 2024, *European Emissions Trading System (EU ETS)*, https://www.senken.io/glossary/eu-ets, [Ziyaret tarihi: 28 Haziran 2025].

Serengil, Y., 2019, *İklim Değişikliği ve Karbon Yönetimi / Tarım Orman ve Diğer Arazi Kullanımları*, UNDP, Ankara.

TBMM, 2025, *28. Dönem 3. Yasama Yılı 104. Birleşim-İklim Kanunu Teklifi*, https://www.tbmm.gov.tr/Yasama/Kanun/a0d0d465-837b-41f0-bd57-0195237fad31, [Ziyaret tarihi: 05 Temmuz 2025].

T.C. Ticaret Bakanlığı, 2023, *Yanı Başımızdaki Dev Pazar Avrupa Birliği,* https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/avrupa-birligi/yani-basimizdaki-dev-pazar-avrupabirligi#:~:text=AB%2C, [Ziyaret tarihi: 22 Kasım 2024].

Tolunay, D., 2019, Biomass factors used to calculate carbon storage of Turkish forests, *Forestist,* 69(2), 145-155.

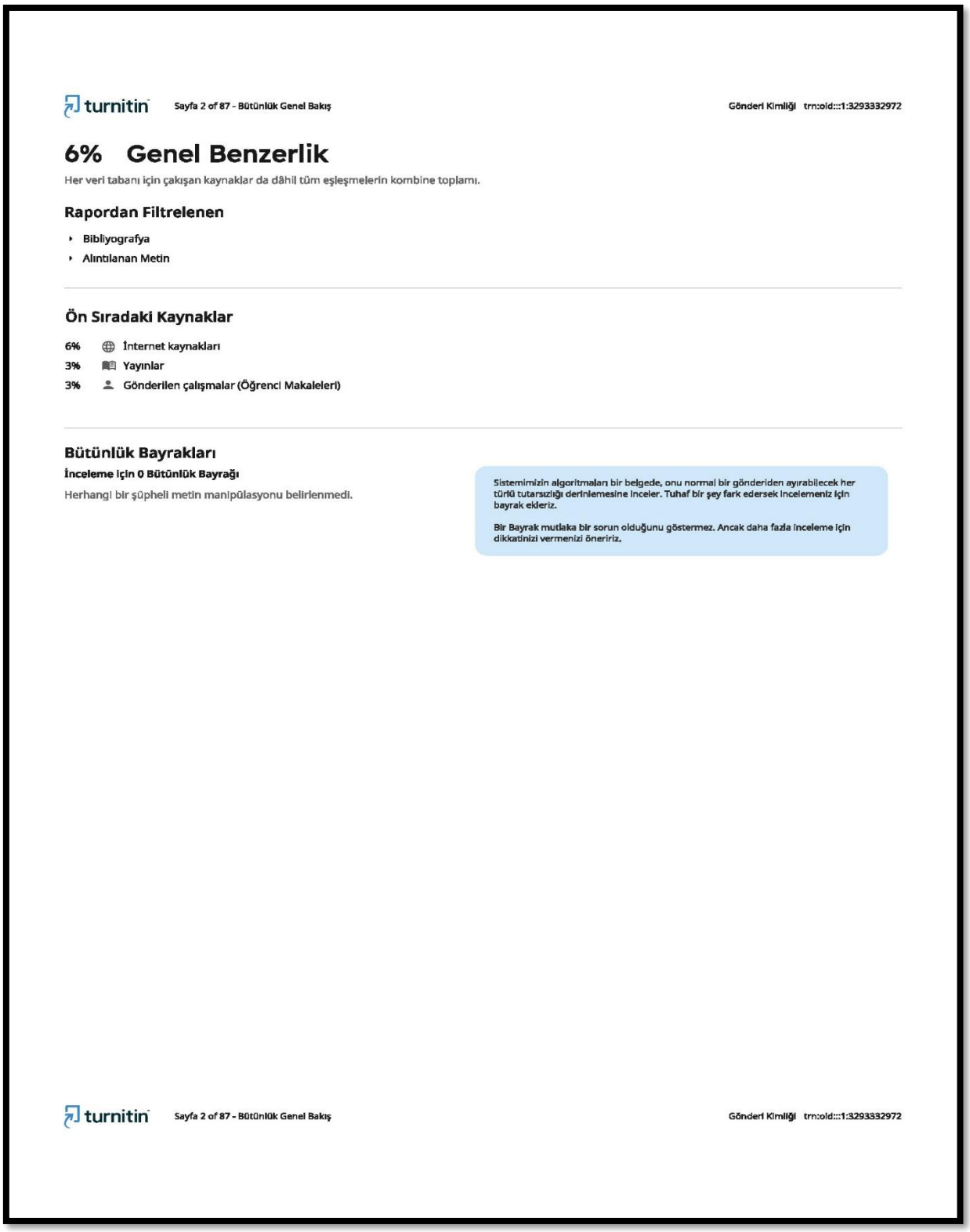
Triviño, M., Juutinen, A., Mazziotta, A., Miettinen, K., Podkopaev, D., Reunanen, P., Mönkkönen, M., 2015, Managing a boreal forest landscape for providing timber, storing and sequestering carbon, *Ecosystem Services,* 14, 179-189.

Usta, H. Z., 1991, Kızılçam *(Pinus brutia Ten.)* Ağaçlandırmalarında Hasılat Araştırmaları, *Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları,* Ankara.

Wade C.M., Baker J.S., Jones J.P.H., Austin K.G., Cai Y., de Hernandez A.B., Latta G.S., Ohrel S.B., Ragnauth S., Creason J., McCarl B., 2022, Projecting the impact of socioeconomic and policy factors on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in US forestry and agriculture, *Journal of Forest Economics,* 37(1), pp.127–131.

WORLD BANK GROUP, 2025, *Price of Carbon Around The World*, https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price, [Ziyaret tarihi: 25 Haziran 2025].

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



turnitin Sayfa 2 of 87 - Bütünlük Genel Bakış Gönderi Kimliği trn:oid:::1:3293332972

6% Genel Benzerlik

Her veri tabanı için çakışan kaynaklar da dâhil tüm eşleşmelerin kombine toplamı.

Rapordan Filtrelenen

- Bibliyografya
- Alıntılanan Metin

Ön Sıradaki Kaynaklar

6% İnternet kaynakları
3% Yayınlar
3% Gönderilen çalışmalar (Öğrenci Makaleleri)

Bütünlük Bayrakları

İnceleme için 0 Bütünlük Bayrağı

Herhangi bir şüpheli metin manipülasyonu belirlenmedi.

Sistemimizin algoritmaları bir belgede, onu normal bir gönderiden ayırabilecek her türlü tutarsızlığı derinlemesine inceler. Tuhaf bir şey fark edersek incelemeniz için bayrak ekleriz.

Bir Bayrak mutlaka bir sorun olduğunu göstermez. Ancak daha fazla inceleme için dikkatinizi vermenizi öneririz.

turnitin Sayfa 2 of 87 - Bütünlük Genel Bakış Gönderi Kimliği trn:oid:::1:3293332972