MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KISA ROTASYONLU BİTKİLERLE AĞAÇLANDIRMA İLE FARKLI KAVAK (*POPULUS* SP.) GENOTİPLERİNDE TOPRAK ÜSTÜ ODUNSU BİYOKÜTLE ÜRETİMİ

KÜBRA SÖNMEZOĞLU

Biyolog

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Biyoloji Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. İbrahim İlker ÖZYİĞİT

EŞ-DANIŞMAN

Prof.Dr. Reinhart CEULEMANS

İSTANBUL, 2014

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KISA ROTASYONLU BİTKİLERLE AĞAÇLANDIRMA İLE FARKLI KAVAK (*POPULUS* SP.) GENOTİPLERİNDE TOPRAK ÜSTÜ ODUNSU BİYOKÜTLE ÜRETİMİ

KÜBRA SÖNMEZOĞLU

Biyolog

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Biyoloji Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. İbrahim İlker ÖZYİĞİT

EŞ-DANIŞMAN

Prof.Dr. Reinhart CEULEMANS

İSTANBUL, 2014

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Bu zorlu yolculukta yardım ve desteklerini benden esirgemeyen kişiler sayesinde bu tez tamamlanmış oldu.

Öncelikle Belçika'ya gitmemin öncesinde ve sonrasında beni cesaretlendirmesi ve çalışmalarımın her aşamasında bana büyük bir fedakârlıkla, bilgi ve deneyimleriyle yardımcı olan ve her türlü desteği veren danışmanım Doç. Dr. İbrahim İlker Özyiğit'e,

Belçika'ya vardığım ilk andan itibaren çalışmalarımı sürdürmem için sunduğu tüm imkânlar ve konukseverliği için Prof. Dr. Reinhart Ceulemans'a,

Tüm araştırma çalışmalarımı yürütürken bana verdikleri bilimsel destek ve zorlu arazi koşulları altında her zaman bana yardım eli uzattıkları için Dr. Melanie Verlinden ve Dr. Laura Broeckx'e,

Yaprak Alan İndeksi ile ilgili çalışmalarımda bana yardım ve desteğini esirgemeyen Stefan Vanbeveren'e,

Toprak-altı ve toprak-üstü biyokütle hesaplamalarımda gerek analiz kısmında gerekse arazi çalışmalarında bana yardım için elinden geleni yapan Dr. Gonzalo Berhongaray'a,

Çalışmalarım sırasında bana kattıkları bilimsel değerler ve tüm yardımları için POPFULL ve PLECO takımına teşekkürlerimi sunarak selamlarımı iletiyorum, siz olmadan bu tezin tamamlanması hayal olurdu.

Son olarak, yüksek lisans süresince her zaman bana tüm destek ilgi ve yardımları ile tez süresince bana büyük anlayış ve sabır gösteren **aileme** ve Belçika'da bulunduğum süre boyunca desteklerini, güvenlerini her zaman bana hissettiren arkadaşlarıma ayrıca çok teşekkür ediyorum. Hepinizi çok seviyorum.

Eylül 2014 **Kübra SÖNMEZOĞLU**

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR iv

ABSTRACT vi

ÖZET ii

SEMBOL LİSTESİ iii

KISALTMALAR vii

ŞEKİL VE TABLO LİSTESİ ix

1. GİRİŞ 1

1.1. Dünya Çapındaki Enerji Problemleri 1

1.2. Kısa Rotasyonlu Bitki (KRB) Kültürleri 2

1.3. Kavağın Biyokütle Üretimi 4

1.4. Bu Çalışmanın Amacı 7

2. MATERYAL VE YÖNTEM 8

2.1. Deneysel Alan 8

2.2. Bitki Materyali ve Plantasyon Kurulumu 8

2.3. Ölçümler 12

2.3.1. Yaprak Alan İndeksi 12

2.3.2. Toprak-üstü Biyokütle Üretimi 13

2.3.3. Toprak-altı Biyokütle Üretimi 13

3. BULGULAR 15

3.1. YAI Ölçümleri 15

3.2. Toprak-üstü Odunsu Biyokütle ve Allometrik İlişkiler 19

3.3. Toprak-altı Biyokütle ve Allometrik İlişkiler 22

4. TARTIŞMA 24

4.1. Biyokütle Üretimindeki Genotipik Değişiklikler 24

4.2. Toprak-altı Biyokütle ve Süreç 29

5. SONUÇ 31

6. REFERANSLAR 33

EKLER 47

Ek A: Kavak Genotiplerinin Sezonsal YAI 47

Ek B: Gövde Kuru Ağırlığı ile Gövde Çapı Arasındaki Allometrik İlişki 48

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Kübra SÖNMEZOĞLU'nun "KISA ROTASYONLU BİTKİLERLE AĞAÇLANDIRMA İLE FARKLI KAVAK (*POPULUS* SP.) GENOTİPLERİNDE TOPRAK ÜSTÜ ODUNSU BİYOKÜTLE ÜRETİMİ" başlıklı tez çalışması, 09 Ocak 2015 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. İbrahim İlker ÖZYİĞİT (Danışman)

Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Celal YARCI (Üye)

Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İlhan DOĞAN (Üye)

İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25/05/2015 tarih ve ……2015/11-02….. sayılı kararı ile Kübra Sönmezoğlu'nun Biyoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof.Dr. UĞUR YAHŞİ

MÜDÜR

ÖZET

Çalışma kapsamında; Nisan 2010'da Lochristi, Belçika'da geniş ölçekli kavak (*Populus* spp.) ve söğüt (*Salix* spp.) ağaçlarını kapsayan kısa rotasyonlu bitkilerin plantasyonu tarımsal arazi üzerinde yapıldı. Seçilmiş 12 farklı kavak genotipinin; yaprak alan analizi, yaprak alan, büyüme performansı, toprak-üstü biyokütle enerjisi üretimi, bunlara ilaveten Koster ve Skado genotiplerinde toprak-altı biyokütle enerjisi üretimi değerlendirildi. Büyüme ve biyokütle enerjisi üretim performanslardaki genotipik ve soy varyasyonları bulundu. Bu varyasyonlar ikinci büyüme yılının ikinci rotasyonunda gerçekleştirildi.

Çalışma sonucunda, Hees (8.0 m^2 m^{-2}), Skado (6.6 m^2 m^{-2}), Bakan (6.8 m^2 m^{-2}) genotiplerinin maksimum yaprak alan indeks değerine sahip olduğu; Robusta (4.75 m^2 m^{-2}) ve Wolterson (5.29 m^2 m^{-2}) genotiplerinin ise en düşük yaprak alan indeks değerlerine sahip olduğu gözlendi. Hees (738.9 m^2 gün m^{-2}), Bakan (883.3 m^2 gün m^{-2}) ve Skado (804.7 m^2 gün m^2) genotiplerinin en yüksek, Grimminge (488.3 m^2 gün m^{-2}) ve Oudenberg (466.6 m^2 gün m^{-2}) genotipleri en düşük yaprak alan durasyonu değerlerine sahip oldukları gözlendi. Elde edilen verilere göre; yıllık toprak-üstü biyokütle enerjisi üretimi performansı 6.7 ve 17.3 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında seyretmektedir. Yıllık büyüme oranı yüksek olan genotipler aynı zamanda yüksek toprak-üstü biyokütle enerjisi üretimi göstermektedir. Robusta (6.7 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) ve Brandaris (7.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) genotipleri en düşük biyokütle enerjisi üretim performansı gösterirken, Skado (17.3 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$), Hees (14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) ve Vesten (14.0 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) genotipleri en yüksek biyokütle enerjisi üretim performansına sahiptir. Ortalama yıllık biyokütle enerjisi üretim performansı her ağaç başına 1.1 and 2.4 kg arasında seyretmektedir. Hees genotipi ağaç başına en yüksek enerji performansını gösterirken, Brandaris genotipi en düşük değerlere sahipti. Toprak-altı biyokütle üretimi Skado genotipi için 6.1 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ iken Koster için 4.9 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Skado genotipi ortalama yıllık toprak-üstü biyokütle üretim performansı bakımından Koster'dan daha iyi bir kapasiteye sahiptir.

Çalışmada ayrıca, hibrit genotiplerin saf *Populus nigra* ırklarına göre üretim açısından daha yüksek bir performansa sahip oldukları gözlenmiştir. Çalışmada ayrıca, bireyler arasındaki genotipik ve soy farklılıklarının üretim performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yüksek üretim kapasitesi T x M (*P. trichocarpa* x *P. maximowiczii*) genotipinde (14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$)

tespit edilirken, en düşük performans N genotiplerinden (8.9 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) (*P. nigra*) elde edildi.

Genotipler arasındaki yüksek üretim kapasitesi genellikle arazi ortamındaki optimal toprak ve su kondisyonlarına bağlı olarak artış göstermektedir. Bu çalışma kısa rotasyonlu kavak türlerinin yüksek toprak-üstü biyokütle enerjisi performanslarını göstermiştir. Çalışmadan elde edilen verilerin biyokütle enerjisi üretimi için yapılacak çalışmalara birer örnek teşkil edeceği düşünülmektedir.

ABSTRACT

In April 2010, a large-scale short-rotation coppice (SRC) plantation consisting of mainly poplar (*Populus* spp.) and willow (*Salix* spp.) was established on a former agricultural site (previously used as cropland and pasture) in Lochristi, Belgium. Leaf are index (LAI), leaf area duration (LAD), growth performance, annual above-ground biomass production of 12 selected poplar genotypes and below-ground production for two genotypes (Skado and Koster) were evaluated. Genotypic and parentage variations in growth and biomass production were found. These variations were pronounced in the second growth year of the second two-year rotation.

Genotypes Hees (8.0 m^2 m^{-2}), Skado (6.6 m^2 m^{-2}), Bakan (6.8 m^2 m^{-2}) had the highest LAI_{max} (maximum leaf area index) whereas Robusta (4.75 m^2 m^{-2}) and Wolterson (5.29 m^2 m^{-2}) had the lowest LAI_{max} values. Hees (738.9 m^2 day m^{-2}), Bakan (883.3 m^2 day m^{-2}), Skado (804.7 m^2 day m^{-2}) also had the highest LAD values. While Grimminge (488.3 m^2 day m^{-2}) and Oudenberg (466.6 m^2 day m^{-2}) had the lowest LAD values. Annual above-ground biomass production ranged between 6.7 and 17.3 Mg ha^{-1} $year^{-1}$. Genotypes which had a high growth rate also displayed a high annual biomass production. Skado (17.3 Mg ha^{-1} $year^{-1}$), Hees (14.5 Mg ha^{-1} $year^{-1}$), Vesten (14.0 Mg ha^{-1} $year^{-1}$) were the most productive genotypes whereas Robusta (6.7 Mg ha^{-1} $year^{-1}$) and Brandaris (7.5 Mg ha^{-1} $year^{-1}$) were the least productive genotypes. Mean annual above-ground biomass production per tree ranged between 1.1 and 2.4 kg per $tree^{-1}$. Hees had the highest above-ground biomass per tree, whereas Brandaris had the lowest. Below-ground biomass production was 6.1 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ for genotype Skado and 4.9 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ for Koster. Skado (0.6 kg per $tree^{-1}$) showed higher average annual above-ground biomass production than Koster (0.8 kg $tree^{-1}$). Hybrid genotypes on average performed better than the pure *Populus nigra* genotypes. Genotypic and parentage effects on the annual above-ground biomass production were pronounced. High productivity was observed in T x M genotypes (14.5 Mg ha^{-1} $year^{-1}$) (*P. trichocarpa x P. maximowiczii*) whereas N genotypes (8.9 Mg ha^{-1} $year^{-1}$) (*P. nigra*) had the lowest. The high productivity observed amongst the majority of genotypes was largely attributed to optimal soil and water conditions at the site. The results of this study further demonstrate the high potential of poplar SRC for above-ground biomass production.

SEMBOL LİSTESİ

%	**:**	Yüzde
cm	**:**	Santimetre
CO_2	**:**	Karbondioksit
D	**:**	Doğu
ha	**:**	Hektar
K	**:**	Kuzey
kg	**:**	Kilogram
m	**:**	Metre
m^2	**:**	Metre kare
Mg	**:**	Miligram
mm	**:**	Milimetre
^oC	**:**	Santigrad derece

KISALTMALAR

BS1 : Büyüme Sezonu 1

BS2 : Büyüme Sezonu 2

Ç : Gövde Çapı

DAI : Dal Alan İndeksi

İK : İnce Kökler

KA : Kuru Ağırlık

KK : Kalın Kökler

KRB : Kısa Rotasyonlu Bitki

LAD : Leaf Area Duration

LAI : Leaf Area Index

OB : Orta Büyüklükteki Kökler

SYA : Spesifik Yaprak Alanı

SRC : Short Rotation Coppice

YAD : Yaprak Alan Durasyonu

YAI : Yaprak Alan İndeksi

YDD : Yaşam Değerlendirme Döngüsü

ŞEKİL ve TABLO LİSTESİ SAYFA

Şekil 1a Lochristi'de deneysel alandaki iki alan kullanım tipinin yayılımı 10

Şekil 1b POPFULL projesinin deneysel alanındaki plantasyon dizaynı 10

Tablo 1 Bu çalışmada içerilen 12 kavak genotipinin nesil, cinsiyet, orijin, alt şubeleri ve üretim yılının genel taslağı 11

Şekil 2 Her bir genotip için ikinci büyüme yılının ikinci rotasyonundaki Sezonsal Yaprak Alan İndeksi (YAI) (2013) 16

Şekil 3 Dört soy grubunun ikinci yıl ikinci rotasyon zamanı direkt metot ile ölçülmüş YAI_{max} değerleri. 16

Şekil 4 Bakan, Grimminge, Brandaris, Koster genotipleri için ikinci büyüme yılı ikinci rotasyon zamanındaki YAI değerleri (indirekt metot) 17

Şekil 5 İkinci yılın ikinci rotasyon zamanındaki indirekt YAI_{max} ölçümleri ile direkt YAI_{max} ölçümleri arasındaki ilişki..... 18

Şekil 6 İkinci büyüme yılının ikinci rotasyon zamanı sırasındaki 12 kavak genotipinin yaprak alan durasyonu (YAD)..... 18

Şekil 7 Seçilmiş dört genotip (her soy için bir genotip) gövde kuru ağırlığı ve gövde çapı (22 cm'de) arasındaki allometrik ilişkiler 20

Şekil 8 Ağaç kültüründeki 12 farklı kavak genotipinin iki büyüme yılı sonundaki toprak- üstü biyokütle ürün kapasitesi 21

Şekil 9 İkinci yılın ikinci rotasyon evresinin sonundaki toprak-üstü biyokütle üretimi.... 21

Şekil 10 Ağaç kültüründeki farklı 12 kavak genotipinin iki büyüme yılı sonundaki toprak- üstü biyokütle ürün kapasitesi 22

Şekil 11 Toprak-altı biyokütle performansının dört yıl sonundaki ürün performansları..... 23

Şekil 12 Toprak-altı biyokütle miktarının Mg $ağaç^{-1}$ olarak tanımlanması 23

Şekil 13 Total toprak-altı ağaç biyokütlesinin toprak-üstü ağaç biyokütlesi olan ilişkisinin kök:gövde oranı şeklinde gösterilmesi..... 24

1. GİRİŞ

1.1. Dünya Çapındaki Enerji Problemleri

Fosil yakıt enerjisinden biyoenerji gibi geri dönüştürülebilir enerjiye geçiş dünya enerji ihtiyacının giderilmesine katkıda bulunmaktadır (White, 2010). Biyoenerji geri dönüşümsüz enerji kaynaklarının yerine geçme potansiyeline sahiptir. Fosil yakıt dönemi uygarlığa çok büyük bir etki göstermiştir ancak fosil yakıt miktarının azalması ve devam eden fosil yakıt kullanımının önemli ölçüdeki çevresel zararları tekrar kullanımlı enerji potansiyellerine olan ilginin arttırmasına neden olmuştur. Artan fosil yakıt kullanımı ve fosil yakıt yanma süreçleri atmosferdeki CO_2 seviyesinin ve küresel ısınmayla ilgili diğer sera gazlarının miktarının artmasına sebep olmaktadır (Klass, 1998; Björn ve ark., 2009). Bu yüzden daha az karbon emisyonu sağlayan biyoenerji kaynaklarına önemli ölçüde ihtiyaç vardır (Cherubini, 2010).

Biyokütle birincil küresel enerji kaynaklarından biri olma potansiyeline sahiptir ve ısı ve elektrik üretimi için alternatif yollardan biridir. Geleceğin önemli geri dönüşümlü enerji sağlayıcılarından biri olarak görülmektedir (White, 2010). Avrupa Birliği, Avrupa Biyokütle Hareketi kanunu çıkarmıştır ve 2020'ye kadar geri dönüştürülebilir enerji kaynaklarından total birincil enerji tüketiminin %20'sinin üretimini hedeflemektedir (Commission of the European Communities, 2009). Vejetatif biyokütle küresel karbon döngüsünde önemli bir role sahiptir. Atmosferden karbonun alınması ve onun canlı dokularda depo edilmesi ile ve daha sonra tekrar atmosfere salınması ya da diğer karasal veya sucul rezervlere transfer edilmesi ile karbon salınımı bitkiler tarafından redükte edilmektedir (Schlamadinger ve ark., 1997). Mevsimsel değişikler çevresel sorunların en önemlilerinden biridir. Odunsu biyokütle üretimi yardımı ile, çevreye ve iklime olan zararlı etkiler azaltılarak atmosferdeki sera gazı etkisi stabilize edilebilmektedir (Berndes ve ark., 2003; Labrecque ve Teodorescu, 2005). The International Energy Agency (IEA) "New Policies Scenario" ile 2008'den 2035'e kadar yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık %1.2 kadar artış göstereceğini ve bu enerji ihtiyacının %70'inin gelişmiş ülkeler tarafından olacağını tahmin etmiştir (Oh ve ark., 2010). 2009'da küresel enerji tüketiminin %16'sı yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacaktır (Umar ve ark., 2014). Tarımsal mahsüller ve orman kalıntılarıyla dünya genelinde 15.000 milyon tonluk biyokütlenin yaklaşık yarısının üretileceği tahmin edilmiştir (Umar ve ark., 2014).

1.2. Kısa Rotasyonlu Bitki (KRB) Kültürleri

Fosil gaz tüketiminin çevreye olan etkileri ve enerji kaynaklarının azalması gibi endişelerden dolayı son zamanlarda biyoenerjiye olan ilgi giderek artmaktadır. Odunsu biyokütle üretim süreçlerinde, biyokütlenin bir kısmı doğal kaynak stoklarından direkt olarak elde edilir. Kısa rotasyonlu bitki ekinleri, özel hibrit kavak (*Populus* spp.) ve söğüt (*Salix* spp.) biyokütle üretimi için hammaddeyi sağlayan kaynaklar olarak düşünülür (Palmer ve ark., 2014). KRB plantasyonu hızlı gelişim gösteren ve normalden daha fazla filizlenme kapasitesine sahiptir (Deraedt ve Ceulemans, 1999; Dillen ve ark., 2010).

Plantasyon erozyonun azaltılmasına katkıda bulunabilir. KRB kültürleri ayırma ve fosil yakıtın yerini alarak atmosferdeki CO_2 miktarını azaltmaktadır (Labrecque ve Teodorescu, 2001; Peart ve ark., 1993). Ayrıca, topraktan alınan besinin tutulmasında da önemli bir role sahiptirler ve su erozyonunu, rüzgarı da kontrol ederler (Pellis ve ark., 2004; Perttu, 1995). Hasat edilmiş bitkideki ağır metalin yok edilmesi ile uygulanan biyoremediasyonda kısa rotasyonlu hızlı büyüyen odunsu bitkilerin kullanılması gibi bir imkân da bulunmaktadır (Östman, 1994). Odunsu biyokütle ısı üretimi, elektrik üretimi ve biyoyakıt kadar olmasa da en önemli enerji kaynaklarından biridir. Bilindiği üzere, kavak ormanından biyokütle üretimi; kâğıt hamuru, kâğıt odun panel firmalarının ilgisini uyandırmaktadır. Hızlı büyüyen kavak ve söğütler kolay kurulum, hızlı büyüme, kolay yönetim, belirli çevresel kirleticilerin yüksek potansiyel ile alınabilirliği gibi avantajlarından dolayı geniş çapta kısa rotasyonlu ağaçlandırmada kullanılır (Corseuil ve Moreno, 2001; Kuzovkina ve Volk, 2009; Nissim ve ark., 2014).

Birçok çalışma detaylı yaşam döngü değerlendirilmesi (YDD) ile biyoenerji bitkilerinin etkilerini ve potansiyel çevresel faydalarını incelemiştir ve ikinci nesil biyokütle bitkileri tarıma uygun bitki üretimi için alanın kullanımı yönünden kıyaslandığında; enerji desteği, ekosistem onarımı ve karbon miktarının azaltılması yönünden yararlı etkilere sahiptir. YDD enerjinin kapsamlı ve sistem bazlı analizini ve üretim sisteminin çevresel performansını sağlayan bir metottur. Üretim, kullanım, yok etme ile kazanılmış hammaddenin yaşamı boyunca enerji ve materyal giriş ve çıkışlarının sayılmasıyla bu metot yürütülür. Ürün sisteminin potansiyel çevresel etkileri daha sonra hayat döngü envanterine dayalı olarak değerlendirilir (Heller ve ark., 2003).

Adler ve ark. (2007) değişik biyoenerji bitki sistemlerinin sera gazı üzerine olan net etkisini belirleyebilmek için karbon dengesini incelemiştir ve biyoyakıt kullanımının sera gazı akışını

azalttığı sonucuna varmıştır. Heller ve ark. (2003) New York'taki söğüt biyokütle ağaçlık sistemlerinin çevresel performanslarını YDD ile analiz etmiştir. New York'ta şu anki uygulamaları gösteren temel durum analizleri, biyokütle ekinlerinin 23 yıllık yaşam süreleri boyunca tüketilen her bir birimlik fosil yakıta karşılık 55 birim biyokütle enerjisi ürettiğini göstermiştir. Njakou Djomo ve ark. (2011) kavak ve söğüt biyoenerji mahsülleri için YDD'nın sera gazları dengesini ve enerji çalışmalarını yeniden incelemiş ve kuruluş fazının sera gazı yayılımında çok önemli bir katkıya sahip olduğu sonucuna varmıştır. Nikièma ve ark., (2012) enerji çalışmalarını ve kavak, söğüt biyoenerji mahsülleri için YDD 'nin sera gazı dengesini tekrar gözden geçirmiştir ve fosil yakıtın yerine geçen biyokütle yakıtlar ile yakından ilişkisi olan net sera gazı etkisinin belirlenmesi için de çok önemli bir faktör olduğu sonucuna varmıştır.

Belçika'daki nüfus yerleşiminin ve geniş çaptaki sanayileşme miktarının artmasına bağlı olarak, kısa rotasyonlu ağaçlık kültürleri için uygun yerin bulunması zor bir hal almıştır. Sonuç olarak, kısa rotasyonlu bitkiler genellikle terk edilmiş tarımsal alanlara ekilmiştir (Pallardy ve ark., 2003; Broeckx ve ark., 2012a; Hauk ve ark., 2014).

KRB kültürleri tercihen yüksek seviyedeki yeraltı suları, hafif kirlenmiş alanlar ya da merkezden uzak alanlara kurulmuştur. KRB'ler yarışmalıdır, çünkü fakir toprak kalitesine rağmen yüksek ve stabil ürünler elde etmektedir (Stolarski ve ark., 2011). Kontamine arazilerdeki KRB plantasyonu sadece stabilizasyonu ve dekontaminasyonu sağlamaz ayrıca araziden bazı ekonomik geri dönüşleri de sağlar. KRB plantasyonu biyoenerji üretimi için uygun olan fakat geleneksel meyve mahsül üretimi için uygun olmayan kontamine alanlarda kurulabilir. KRB plantasyon sistemi tarımsal atık ürünlerinin ısı ve enerji üretimi için kullanması ve orman atıklarının azaltılması yönünde yarar sağlayabilir (Krzyzaniak ve ark., 2014). Bu yüzden, KRB için kurulum bölgeleri bol degredasyon aktivitesine sahip ve ağır metal varlığı ile birlikte fazla miktarda fertilize kapasitesine sahip kirli topraklarla karakterize edilir. Marmiroli ve ark. (2011) kavağın hızlı büyüme özelliğinin onu biyoremediasyon için güçlü bir aday yaptığını rapor etmiştir. Bir kavak KRB plantasyonu Belçika Boom'da kadmiyum ve çinko gibi ağır metallerle kontamine olmuş toprakların olduğu atık arıtım bölgelerinde kurulmuş ve konu ile ilgili olumlu neticeler elde edilmiştir (Laureysens ve ark., 2004).

Biyokütleden enerji üretimi için KRB'lerin benimsenmesi ekonomik rantabilitenin en önemli faktörlerden biri olmasından dolayı konu ile ilgili yapılan birçok çalışma KRB'lerin ekonomik

değerlendirmesini uygulamaktadır. Bu çalışmaların %43'ü KRB'lerin ekonomik uygulanabilirliğini rapor ederken %19'u KRB'lerin ekonomik dezavantajlarını bildirmiş ve % 38'i olumlu ve olumsuz karışık sonuçlara değinmektedir (Hauk ve ark., 2014). KRB'lerin uzun zamanlı kullanım geri dönüşleri ekonomiktir ve geleneksel tarım alanların kullanımı için ekonomik avantaja sahip olan bir alternatiftir (Isebrands ve Karnosky 2001). Bitki materyali, kurulum, ekim alanı, ekim ve hasat yönetimi gibi işlemler maliyet gerektirmektedir. Bununla ilgili olarak, KRB biyokütle ürünlerinin veriminin arttırılması için KRB kültürlerinin ekonomik uygunluğunun tespiti gerekmektedir (Wolbert-Haverkamp ve Musshoff, 2014).

Odunsu biyokütle türlerinin kullanılmasındaki temel neden; pestisit ve hastalığa dirençli, yüksek biyokütle üretimine, kolay vejetatif yayılıma sahip, çevresel olarak kabul edilebilir geri dönüşümlü özellikler göstermesidir (Ledin,1996). Pestisitlere, hastalıklara dirençlilik ya da büyüme oranını maksimum seviyeye getirebilmek için uygun genotiplerin seçilmesi mümkündür (Thomas ve Richardson, 2006).

KRB'lerin kurulum ve kültür yönetimi; alan hazırlanması, kesim ve bazı durumlarda sulama ve gübre uygulama gibi birçok süreci içermektedir. Kesilmiş ağaç gövdesinden tekrar üremenin yapılabilirliğinden faydalanmak için kök sürgünlerinin düzenli aralıklarla kesildiği ağaçlık arazi yönetim sistemine "baltalık" denir. Kurulum yılının sonunda, kesim yöntemi genellikle dormant kış periyodu sırasında uygulanmaktadır. Kesim sezonu sürgün sayısını etkilemektedir. Yaz mevsiminden sonra üretilen sürgünler kış kesimlerinden sonra oluşan sürgün sayısından daha azdır. Kesimden sonra, bitkinin aktif filizlenme potansiyeli, yüksek miktarda biyokütle üretimine neden olan fazla yoğunluktaki sürgün sayısına yol açar (Harmer, 1995; Sims ve ark., 2001). Kök sisteminin kullanımının sağladığı avantajlardan dolayı kesilmiş ağaçlar, dal çeliği ya da fideye göre daha hızlı büyümeye sahiptir. Sonuç olarak, alanın faydalı kullanımının ve ağaç tepesi alanın hızlı kapanmasına sebep olan ağaç yaprak alan indeksinde hızlı bir artış görülür (Laureysens ve ark., 2003).

1.3. Kavağın Biyokütle Üretimi

Kavak genellikle diğer birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi Belçika'daki kontrplak, kâğıt hamuru, cila, mobilya endüstrisi için hammadde sağlama amacıyla yetiştirilir. Bununla birlikte, odunsu türler ABD'deki kâğıt ve kâğıt hamuru endüstrisi için temel kaynak olarak düşünülmektedir (Dickmann ve Stuart, 1983). Kavak, 1970'den beri, Çin'nin güney merkezi boyunca kereste ve lif ürünlerini üretmeye katkıda bulunur.

Populus sp. diğer nesillerle kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Ekolojik çevreye adaptasyonu fazla, yüksek ürün kapasitesine sahip, hızlı gelişen bir cinstir. Birçok çalışma, kavak KRB kültürlerinin yüksek kapasitede büyüme gösterdiklerini (Heilman ve ark., 1994) sadece bir büyüme sezonunda yüksek biyokütle üretimine (Hansen, 1991; Laureysens ve ark., 2001; 2003) ve yüksek fotosentetik kapasiteye sahip olduklarını göstermiştir (Barigah ve ark., 1994). Ayrıca Heilman ve Stettler (1985), Hinckley ve ark. (1989) ve Ceulemans (1990) farklı kavak genotiplerinin üretim ve büyüme performansları bakımından değişiklik gösterdiğini açıklamışlardır. Hastalıklara ve yabani otlara olan dayanıklılık, yüksek büyüme kapasiteli genotiplerin seçimi kavaktan yüksek biyokütle üretiminin elde edilmesini sağlar (Macpherson, 1995). Bununla birlikte, Herve ve Ceulemans (1996) kavağın kesim yöntemi için uygunluğunun diğer çalışmaların açıkladığından daha az olduğunu belirtmiştir. Uygun besin miktarının azalmasından (Galinski ve ark., 1991) ve düşük filizlenme kapasitesinden dolayı, düzenli kesimden sonraki uzun periyotlarda yüksek miktarlarda ürün elde edilememektedir. Herve ve Ceulemans (1996) iki-üç yıl arasındaki büyüme sürecinden sonra, kesim yapılmış olan kavak ağaçları ile kesim yapılmamış kavak ağaçları kıyas edildiğinde, kesim yapılmamış olanların daha fazla gövde sayısına sahip olduğunu belirtmiştir. Tarımsal biyokütle üretimi, yaprağın ısı enerjisini tutma kapasitesiyle önemli derecede ilişkilidir. Işık enerjisi kavak yapraklarındaki klorofil tarafından tutulur ve fotosentez süreci boyunca glikoz üretimi için kimyasal enerjiye dönüştürülür. Hızlı büyüme ve yüksek biyokütle üretimi tepe bitki örtüsünün fotosentezi ile ağacın bütün parçalarının yaptığı solunum boyunca kaybettiği karbon miktarı arasındaki dengeye bağlıdır. Kavak diğer türler arasında en yüksek fotosentetik orana sahip olan türlerden biridir (Nelson, 1984). Linder (1995) bunun kısmen solar enerjiyi tutma miktarı ve yüksek yaprak alan indeksi (YAI) ile ilgili olduğu bildirmiştir. Kavak genotipleri ile ışık absorbsiyonu total yaprak alanı ile direkt olarak ilişkilidir (Scarascia-Mugnozza ve ark., 1989). Kavak genotiplerinin ışık tutması büyüme sezonu boyunca tepe bitki örtüsü kapanana kadar artar (Scarascia-Mugnozza ve ark., 1989). YAI'nin hızlı artışından dolayı, kavaklar büyüme sezonunun erken evrelerinde maksimum fotosentetik aktiviteye sahiptirler (Broeckx ve ark., 2012b).

Ağaç bölgesinde yaprak alanını ifade edebilmek için kullanılan parametre, o alanı çevreleyen her birimlik alandaki bitki örtüsünün yaprak alanını ifade eden yaprak alan indeksidir. Yaprak alanı büyüme miktarının tahmininde kullanılan önemli bir göstergedir. Kısa rotasyonlu kavak bitkilerinin büyümesi ve başarılı kurulumu için gerekli olan seçilmiş genotipler ve hibritler tarafından yaprak alanının hızlı gelişimi sağlanır (Pellis ve ark., 2004) ve yaprak alan

durasyonu (YAD) mahsül miktarını belirleyen en önemli faktördür. YAD yaprak hastalıklarından etkilenebilir, ayrıca su ve besin azlığı yaprak büyümesini etkilemektedir. Yılın gün sayısının fonksiyonu olarak, her genotip için sezonluk YAI eğrisinin altındaki integral alan hesaplanır. Su yokluğu ve topraktaki nitrojen miktarı yaprağın sayısını ve boyutunu etkilemektedir. Yaprak tarafından absorbe edilen radyasyon miktarı ile büyüme arasındaki güçlü ilişkinden dolayı, yaprak üretimi enerji üretimindeki en önemli faktörlerden biri olmaya başlamıştır (Pellis ve ark., 2004; Bréda, 2003). Büyük yapraklar uygun miktarda ışığı kullanmaya olanak sağlamaktadır ve bu yüksek YAI ve yüksek fotosentetik üretime sebep olur (Al Afas ve ark., 2005). Yaprak boyutları farklı soylara ait genotipler arasında farklılık gösterir (Pellis ve ark., 2004). Bu değişiklik ağaçların fotosentetik oranlarında farklılıklara sebep olur. Fakat küçük farklılıklar her yaprak alan ünitesindeki fotosentetik oranlarda gösterilir (Al Afas ve ark., 2005; Dickmann ve ark., 2001). YAI biyokütle üretim kapasitesi için önemli bir indikatördür. Bu yüzden, bütün ağaçlar arasında en yüksek fotosentez oranına sahip olan genotipler yüksek biyokütle üretimine sahiptir.

Kavak plantasyonu CO_2 ayrıştırılmasında çok etkili bir role sahiptir. Bu yüzden kısa rotasyonlu kavak bitkisinin enerji üretiminde fosil yakıt yerine kullanılması çok daha önemli olmaya başlamıştır (Vitousek, 1991). Çin'de kavak plantasyonu karbon ayrıştırımına ve sera gazının yayılmasına diğer türlerden daha çok katkıda bulunmuştur (Taylor, 2002). Kavak karbon ayrıştırımı için birçok avantaja sahiptir. Mesela; hızlı büyüme, karbon ayrıştırımı ekonomisine yardım eden yüksek değerli odun ürünleri ve geniş yayılım (Fang ve ark., 2007). Kavakta karbon yapraklar boyunca floem yardımıyla kök, dal, gövde, kabuk gibi ağacın diğer kısımlarına taşınır. Böcekler tarafından meydana gelen yaprak bozulması, çevresel stresler ve patojenler kök büyümesinin ve karbon rezervelerinin azalmasına neden olur (Dickmann ve ark., 2001).

Kökler yapraklarından ayrıldığından ve köklerin biyokütle ürününün azaltılmasına sebep olan abiyotik ve biyotik faktörlerin sürekliliğinden dolayı, stresten en fazla toprak-altı biyokütle üretimini etkilenir. Kavaktaki fotosentez sırasında gövde, gövde tomurcuğu ve kökler karbonu, karbonhidrat ve yağ olarak depo eder. Yazın sonuna doğru sonbaharda karbon depoları en yüksek seviyeye ulaşır ve baharda bu miktar düşüşe geçer. Baharda büyüme için bu depolar kullanılır. Dallardaki karbon rezervleri sürgünlerin büyümesine katkıda bulunur ve sürgün rezervleri de ince köklerin büyümesine katkı sağlamaktadır. Artan yaprak boyutu, artan fotosentetik oran ve depo ya da büyüme organlarına artan oranlarda fiske edilmiş karbon

taşınımından dolayı kesilmiş kavak ağaçları kesilmemiş olanlardan daha fazla biyokütle üretimine sahiptir (Dickmann ve ark., 2001).

Kavak biyokütle üretimin artan CO_2'e cevabı yüksek derecede farklılık gösterir. Gielen ve Ceulemans (2001) artan CO_2'in total biyokütle miktarına ve kavak ağaçlarının gövde biyokütlesine pozitif bir etkisi olduğunu göstermiştir, fakat bu cevapların gösterdiği varyasyonlar belki de farklı kavak türlerindeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Ceulemans ve Mousseau, 1994; Volin ve Reich, 1996; Dickson ve ark., 1998). Etkili su ve besin koşullarında yüksek CO_2, köklere karbon taşınımını ve yerleşimini desteklemektedir (Norby, 1994; Rogers ve ark., 1994). Curtis ve Wang (1998) bitki büyüklüğünün artmasıyla ilgili olarak fakat kök/gövde oranına bağlı olmaksızın, yüksek CO_2 koşulu altında kök büyümesinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Artan CO_2 miktarı, toprak-üstü odunsu biyokütle üretimini ve *Populus nigra*'daki kalın kök biyokütle üretimini önemli ölçüde etkilemektedir (Liberloo ve ark., 2006). Artan CO_2 koşulları altında, YAI her zaman artmaktadır (Wullschleger ve ark., 1997; Norby ve ark., 1999; Janssens ve ark., 2000). Fakat artan CO_2 koşulları altında bitki tepe örtüsü kapanmasından sonra bitkinin topraktan aldığı besinler, su ya da ışık tarafından sınırlanmaktadır (Norby ve ark., 1999). Liberloo ve ark. (2006) artan CO_2 miktarı ile birlikte bitki tepe örtüsü kapandıktan sonra bile hala birçok yaprağın korunduğu rapor edilmiştir. Bu da, artan CO_2 koşullarında kavakların daha fazla fotosentez aktivitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Kavak türleri, su tüketimi çok fazla olmasına rağmen sıcak bölgelerdeki en yüksek biyokütle ürünü veren ağaçlardır. Allen ve ark. (1999) ve Zhang ve ark. (1999), kavakta su sınırlanmasının biyokütle üretiminin azalmasına neden olduğunu bulmuşlardır. Kavağın genellikle yüksek su kaynağına ihtiyaç duyması beklenilir.

1.4. Bu Çalışmanın Amacı

Yukarıda bahsedilen küresel enerji sorunları çerçevesinde ve KRB plantasyonundan biyoenerji kullanımı için yapılan araştırmalar ile bu tezin genel amacı belirtilmiştir:

1) Arazi envanter kombinasyonları ve allometrik ilişkiler kullanılarak KRB plantasyonundaki farklı kavak (*Populus*) genotiplerinin toprak-üstü ve toprak-altı biyokütle miktarlarının ölçülmesi.
2) Farklı genotipler arasındaki değişen YAI değerlerini incelemek ve biyokütle üretim kapasitesini belirlemek.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Deneysel Alan

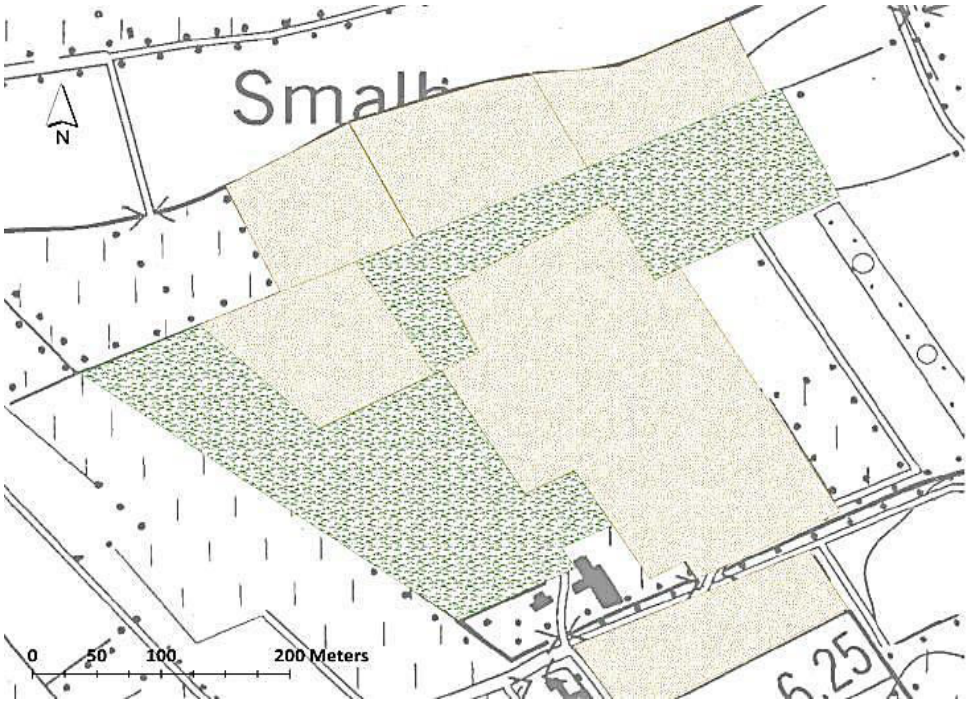
Bu tez çalışmasındaki veriler, geniş çaplı biyoenerji araştırma projesi çerçevesinde toplanıldı (POPFULL; Broeckx ve ark., 2012a; uahost.uantwerpen.be/popfull). Deneysel alan, Belçika'da, Doğu Flaman Bölgesi'nde, Lochristi'de bulunmaktadır (51°06'44'' K, 3°51'02'' D). Sırasıyla yıllık ve büyüme sezonu sıcaklığı ortalama 9.5°C ve 13.72 °C olmakla birlikte, 6.25 m rakım seviyesinde ve yıllık ve büyüme sezonunda ortalama 726 mm ve 433 mm kadar yağış alan bir bölgede bulunmaktadır. Alan az miktarda tabii drenaja sahiptir ve toprak dip bölgelerde kilce zengin kumsu bir yapıya sahiptir. Plantasyon tarla ve otlak alandan oluşan tarımsal araziye kurulmuştur ve total alan 18.4 hektardır (Broeckx ve ark., 2012a).

2.2. Bitki materyali ve plantasyon kurulumu

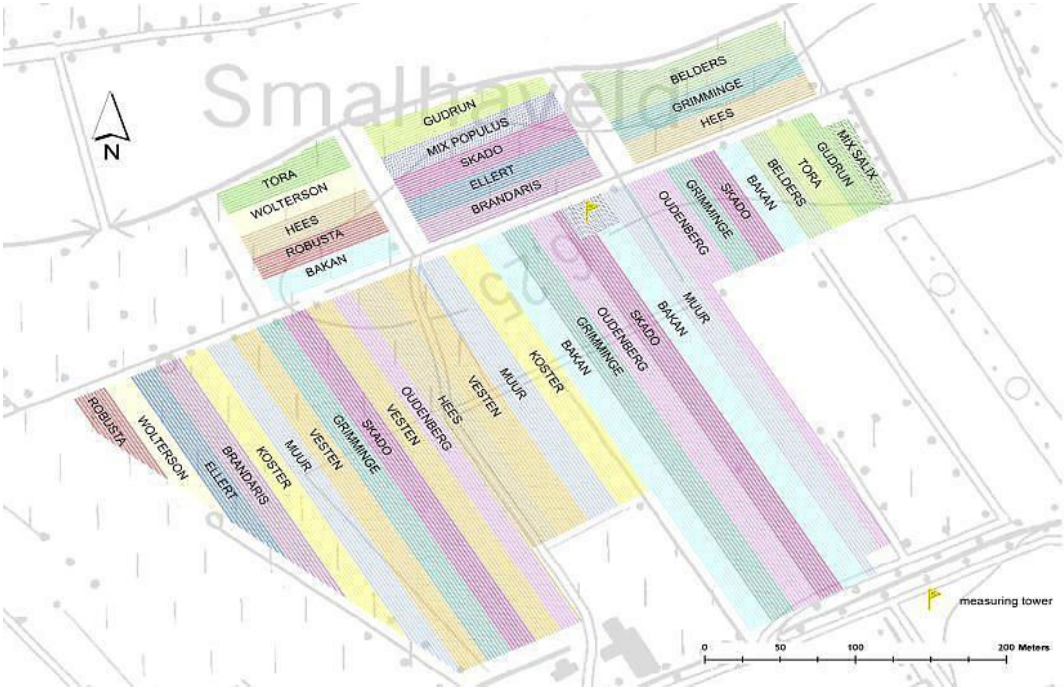
KRB plantasyonu 7-10 Nisan 2010 arasında 14.5 ha'lık bir alana 12 adet seçilmiş kavak (*Populus spp.*) genotipleri ve aynı arazi alanında ekilmiş olan seçilmiş söğüt (*Salix spp*.) genotipleriyle kurulmuştur (Tablo 1). Bu genotipler *Populus deltoides*, *Populus maximowiczii*, *Populus nigra*, *Populus trichocarpa* ve *Salix viminalis*, *Salix dasyclados*, *Salix alba* ve *Salix schwerinii'*in farklı tür ve hibritlerini göstermektedir. 25 cm uzunluğundaki dormant, köklenmemiş çelikleri 24 saat suda beklettikten sonra, 0.75 m ve 1.5 m arasında değişen iç sıra aralığı ve bir sıradaki ağaçlar arasındaki boşluk 1.10 m olmak üzere, her hektara 8.000 adet ağaç düşen ekim yoğunluğuna karşılık gelen çift sıra dizaynla ekim yapılmıştır. 12 kavak genotipinin her biri aynı ya da farklı otlak, tarla alan kullanım aktivitesiyle ilişkili replike monoklonal bloklar halinde ekildi (Broeckx ve ark., 2012a) (Şekil 1a ve Şekil 1b). Plantasyon yönetimi; gübreleme, sulama ve herbisit olmaksızın yürütülmüştür. Mekanik zararlı otları temizleme yönetimi kurulum ve birinci hasat zamanından sonra uygulanmıştır. Rotasyon uzunluğu iki yıldır (2010-2011: Birinci rotasyon, 2012-2013: İkinci rotasyon).

Bu çalışma sadece kavak genotiplerine odaklı yürütülmüştür. Muur, Oudenberg ve Vesten (*P.deltoides* × *P. nigra*), Grimminge (*P. deltoides* × (*P. trichocarpa* × *P. deltoides*)), Skado ve Bakan (*P. trichocarpa* × *P. maximowiczii*)'ı içeren genotiplerin yarısı; Belçika'daki

Garaardsbergen'de the Institute for Nature and Forestry Research'den sağlanmış ve büyütülmüştür. *P. deltoides* ağaçlarının açık tozlaşmasıdan orijin alan Robusta genotipinin ticareti ilk olarak Nursery Simon-Louis Fréres (Metz, France) tarafından yapılmıştır. Brandaris ve Wolterson (*P. nigra*), Ellert, Hees, Koster 'De Dorschkamp' (Wageningen'deki Peyzaj planlama ve Orman Araştırma Enstitüsü) tarafından Hollanda'da üretilmiş genotiplerdir. Son olarak beş genotip ve Robusta (*P. deltoides* × *P. nigra*) Hollanda Zeewolde'deki Propagation Nurseries' den sağlanmıştır (Verlinden ve ark., 2013).



Şekil 1a: Lochristi'de deneysel alandaki iki alan kullanım tipinin yayılımı. Sarı renkli alanlar tarla kısmını göstermektedir ve yeşil kısımlar otlak alanları temsil etmektedir (Broeckx ve ark., 2012a).



Şekil 1b: POPFULL projesinin deneysel alanındaki plantasyon dizaynı, monoklonal bloklar halinde ekilen farklı genotipleri farklı renklerle göstermektedir (Broeckx ve ark., 2012a). 12 adet olan kavak genotiplerinin isimleri için Tablo 1 bakınız. Gudrun, Tora ve Belders söğüt genotiplerini temsil etmektedir.

Tablo 1: Bu çalışmada içerilen 12 kavak genotipinin nesil, cinsiyet, orijin, alt şubeleri ve üretim yılının genel taslağı (Broeckx ve ark., 2012a).

Genotip	Soy kodu	Orijin Yeri	Alt Şubesi	Cinsiyet	Üretim Yılı
Bakan	T × M	(Washington ABD × Oregon ABD) × Japonya	Tacamahaca	E	2005
Skado	T × M	(Washington ABD × Oregon ABD) × Japonya	Tacamahaca	K	2005
Ellert	D × N	Michigan ABD × Fransa	Aigeiros	E	1989
Hees	D × N	Michigan ABD × Fransa	Aigeiros	K	1989
Koster	D × N	Michigan ABD × Hollanda	Aigeiros	E	1988
Muur	D × N	(lowa ABD × Illinois ABD) × (Italya × Belçika	Aigeiros	E	1999
Oudenberg	D × N	(lowa ABD × Illinois ABD) × (Italya × Belçika)	Aigeiros	K	1999
Robusta	D × N	Doğu ABD × Avrupa	Aigeiros	E	1890
Vesten	D × N	(lowa ABD × Illinois ABD) × (Italya × Belçika)	Aigeiros	K	1999
Grimminge	D × (T × D)	Michigan ABD × Connecticut ABD) × Washington ABD × (lowa ABD × Missouri ABD)	Aigeiros x	E	1999
Brandaris	N	Hollanda × Italya	Aigeiros	E	1976
Wolterson	N	Hollanda	Aigeiros	K	1976

D = *Populus deltoides*, N = *Populus nigra*, T = *Populus trichocarpa*, M = *Populus maximowiczii*; ABD = Amerika Birleşik Devletleri. Cinsiyet için; E= Eril, K= Dişil.

2.3. ÖLÇÜMLER

2.3.1. Yaprak Alan İndeksi (YAI)

YAI direkt ve direkt olmayan metotlarla değerlendirilir. İndirekt metotlar için LAI-2200 Plant Canopy Analyzer (LiCor, Lincoln, NE, USA) kullanılır. Bu cihaz, ışık sensörü ve göz lensi tarafından hemisferik resmi analiz eden kontrol ünitesinden oluşmuştur. Her genotipteki arazi parçası için uygulanan farklı replike ölçümler değerlendirildi. Ölçümler kapalı hava durumu koşulları altında yapıldı. Her bir alan kullanım tipi için dört arazi parçası olmak üzere her bir genotip için sekiz arazi parçası vardı. Her bir arazi parçası için iki yatay pozisyonda üç adet okuma - geniş ve dar alan sıraları kapsayan- iki kez tekrar edildi (Her tepe bitki örtü tabakası altında 12 okuma). Ölçümler 45°'lik okuma kapağı kullanılarak yürütüldü (Broeckx ve ark., 2012a). Direkt olmayan YAI ölçümleri Nisan 2013'den Kasım 2013'e kadar büyüme sezonu boyunca yaprak alan gelişmesi ve maksimum YAI'ini belirleyebilmek için aylık olarak alındı. Her bir arazi parçası için ölçüm, geniş ve dar sıralar arasında iki yönde iki diagonal yatay ölçümlerle ve her yatay ölçüm de ağaç dizisine sensör paralel ve ağaç dizisine sensör dikey şekilde alındı (Broeckx ve ark., 2012a). Dal alan indeksi (DAI) - örneğin büyüme sezonundan sonra ve öncesinden yapraksız kışlık görünüşün YAI- gerçek sezonsal YAI gelişimini hesaplamak için dikkate alındı. Bu iki yapraksız YAI veri noktaları arasına doğrusal regresyon uyduruldu. Dallar haricindeki gerçek YAI hesaplamalarını elde edebilmek için büyüme sezonu boyunca hesaplanan YAI değerlerinden DAI çıkarılarak sonuçlara ulaşıldı. Direkt YAI değerlendirmeleri - Eylül 2013'den Aralık 2013'e kadar olan dönemi kapsayan- yaprak dökümü sırasında büyüme sezonunun sonunda yaprakların toplanmasıyla yürütüldü. İndirekt YAI ölçümlerinin yapıldığı arazi parçasının yarısında yaprak koleksiyonu uygulanmıştır (her genotip ve arazi kullanım tipi için iki arazi parçası). Üç tane 0.57 m × 0.39 m'lik yaprak tuzakları ağaç sıraları arasında diagonal yatay şekilde yerleştirildi. Yaprak tuzakları her iki haftada bir boşaltıldı. Toplanmış yapraklar kurutuldu (48 saat için 50-60 C°) ve toplanmış yaprakların kuru ağırlıklarını kıyaslamak için tartıldı. YAI_{max}, spesifik yaprak alanı ve toplanmış yaprak koleksiyonlarının kuru ağırlığı kullanılarak belirlendi (SYA, m^2 kg^1). Her genotip için SYA, taze yaprak alanı ve yaprak kuru ağırlığının oranından hesaplandı (Broeckx ve ark., 2012a).

2.3.2 Toprak-üstü Biyokütle Üretimi

Toprak-üstü odunsu biyokütle üretimi bitkiye zarar vermeyen ölçümler kullanılarak hesaplandı. Bu metot geliştirilmiş envanterdeki gövde ağırlıklarının ve çaplarının direkt ölçümlerini içermektedir. Büyüme sezonunun sonunda her bir monoklonal bloktaki sıranın ilk 5. ağacının tüm gövdeleri için, dijital çap ölçer kullanılarak yerüstü seviyesinden 22 cm uzaklığından gövde çapı (Ç) ölçüldü (Mitutoyo CD- 15DC, UK) (Şekil b). Bu sıradaki her kök sürgününden filizlenmiş olan dal sayısı belirlendi. Bu sayılar her genotipin kök sürgünündeki dal sayısının ortalamasını hesaplamak için kullanıldı. Dijital çap ölçer kullanılarak hasattan önce gövde çaplarının ortalaması hesaplanan ağaçların gövde çapları ile her gövdenin dal sayısı çarpıldı. İkinci büyüme sezonunun sonunda, bütün genotipler için kuru biyokütle üretimi ve gövde çapı belirlendi. Çap envanterine dayalı her genotip için sekiz gövde çapları ile beraber seçildi. Hasattan önce ve sonra 22 cm'lik uzaklıktan ölçülen sekiz yapraksız gövdenin gövde çapları ölçüldü ve ortalamaları daha sonraki hesaplamalarda kullanıldı. Değişik genotipler için gövdenin ve dalların kuru ağırlığı (KA), bir haftalık süre boyunca sabit ağırlığa ulaşılıncaya kadar 70 C°'de kurutulduktan sonra belirlendi. Gövde ve belirlenmiş dal kuru ağırlık oranlarından tüm gövdelerin total KA'ları belirlenir. Allometrik enerji denklemi ($KA = aÇ^b$) (a ve b regresyon katsayısıdır) her genotip için gövde çapının ortalamasına karşılık total gövde KA ortalamasının grafiği çizilerek hesaplandı. Envanterde ölçülmüş bütün gövde çapları için, gövde kuru biyokütlesi hesaplamalarında allometrik enerji denklemi kulanıldı. Her ağacın bütün gövde biyokütle miktarlarının toplanmasıyla, total toprak-üstü biyokütle üretimi hesaplandı. Böylece, her ağaç sırasındaki ortalama gövde KA'sı her klon için her yıl, hektarlık biyokütle üretiminin miktarı ile tahmin edilmiş oldu. Her monoklonal bloktaki ağaç sıralarının değerlendirilmesiyle eksik ağaçların sayısı sayılarak mortalite miktarı belirlendi. Ağaç yoğunluğu dikkate alınarak (Örn: yaklaşık 8.000 ağaç ha^{-1}) ve mortalite, her hektardaki gerçek biyokütle miktarı hesaplandı.

2.3.3 Toprak-altı Biyokütle Üretimi

Kalın kök odunsu biyokütle miktarı 20 ağacın kök sisteminin kazılmasıyla belirlendi (Her genotip için 10, Örn: Skado ve Koster). Her genotip için farklı gövde çaplarına sahip beş ağaç, iki tip alan kullanım tipine göre seçildi. Hemen hasattan sonra Şubat 2014'de, kesilmiş ağaç gövdeleri ve seçilmiş ağaçların kökleri, 1.1 m x 1.125 m' lik alan olarak kabul edilen Voronoï poligon üzerinden kazıldı. Geniş ve dar sıralar ortasındaki ve ağaç sıraları arasındaki uzaklığın ortasında bulunan bu bölgedeki toprak tabakasının 0-15 cm ve 15-60 cm

derinliğindeki toprak tabakası kazıldı. Kazıma işlemi yapılan bu ağaçlardan alınan kök örnekleri, komşu ağaçların köklerinin de özelliklerini temsil ettiği varsayılarak toplandı. Derinliği 60 cm'den daha aşağıda olan kısımlarda üst tabakalara kıyasla daha az miktarda kök örneğine rastlandığı için, kazma işleminin limit derinliği 60 cm olarak belirlendi. Ağaç sıraları arasındaki uzaklığın dar olduğu ve birbirleri arasındaki uzaklığın geniş olduğu ağaç sıralarının 0-15 cm ve 15-60 cm derinliğindeki toprak tabakasından orta büyüklükteki kökler (OB, Ø = 2-5 mm) ve kalın kökler (KK, Ø > 5 mm) birbirinden ayrılarak örneklendirildi. OB ve KK köklerinin total kuru biyokütlesi alındı, laboratuarda yıkandı ve 70°C'de sabit ağırlığa gelene kadar fırında kurutuldu. Daha sonra KA'ın belirlenmesi için hassas terazide tartıldı. Bazal alanın hesaplanabilmesi için çap ölçüleriyle birlikte on adet gövde sürgünü rastgele seçildi. Her ağacın bazal alanı gövde çapları ile birlikte [$\pi.(Ç/2)^2$] formülü kullanılarak hesaplandı. Kök kuru ağırlığı (KA)'na karşılık bazal alan veri grafikleri kullanılarak, her genotip için allometrik enerji ilişkileri ve eşitlikler elde edildi ($KA= aÇ^b$) (a ve b regresyon katsayısı). OB ve KK verileri toplanıp aynı grafikte gösterilirken, kesilen ağacın gövdesi ve bazal alan arasındaki allometrik ilişkiler ayrı ayrı belirlendi.

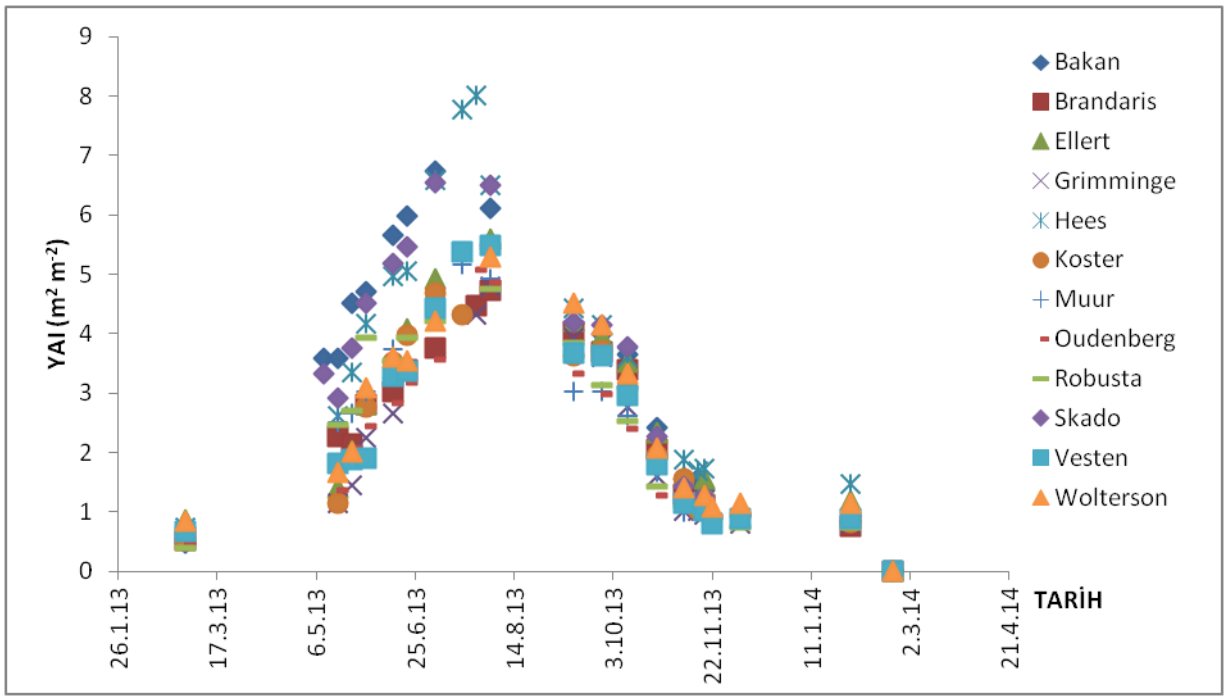
Her bir arazi alan kullanım tipinden 30 adet lokasyon kullanılarak, toplamda 60 adet lokasyondan alınan toprak örneklerinin analizi ile Aralık 2013'de toprak örneklendirilmesi yürütüldü. 8 cm çaplı x 15 cm derinliğe sahip manuel öz örneklendirme ekipmanı ile toprak örneklendirilmesi yapılarak ince kök (İK) biyokütlesi dinamiği değerlendirildi (Eijkelkamp Tarımsal Araştırma Ekipmanı, Hollanda). Örnekler plastik poşetlere konuldu ve -20 C°'de işlem aşamasına kadar muhafaza edildi. Laboratuvarda, İK'ler (Ø < 2 mm) 10 dakikalık süreyle topraktan ayrıştırıldı. Yaşayan kökler ölü köklerden korteks ve periderm arasında gösterdikleri kohezyona, elastikiyetlerine ve sahip oldukları renk farklılıklarına göre birbirinden ayrıldı. Kökler musluk suyu altında yıkandı ve stabil ağırlığa gelene kadar 70 C°'de fırında kurutuldu (Al Afas ve ark., 2008).

Kök iç büyümesi öz metodunda, kök file çantaları toprağa yerleştirildi. File çantaları homojen şekilde toprakla dolduruldu ve toprağın 30 cm derinliğine yerleştirildi. İK'lerin belirlenmesi ve hesaplanması için, Aralık 2012'de kök iç büyümesi öz yöntemi kuruldu. Bir yıl sonra, Aralık 2013'te file çantaları dışarıya çıkarıldı ve örnekler file çantasının dibinden (20-30 cm derinlik) ortasından (10-20 cm derinlik) ve üst kısmından (0-10 cm derinlik) öz örneklendirmesi ile alındı. Örnekler bitki artıkları ve kökleri ayrıştırmak için laboratuvara taşındı ve kuruması için fırına konuldu. Stabil ağırlığa gelene kadar 70°C'de kurutulduktan sonra köklerin kuru kök ağırlığı belirlendi. Kuru ağırlığı belirlemek için terazide tartıldı.

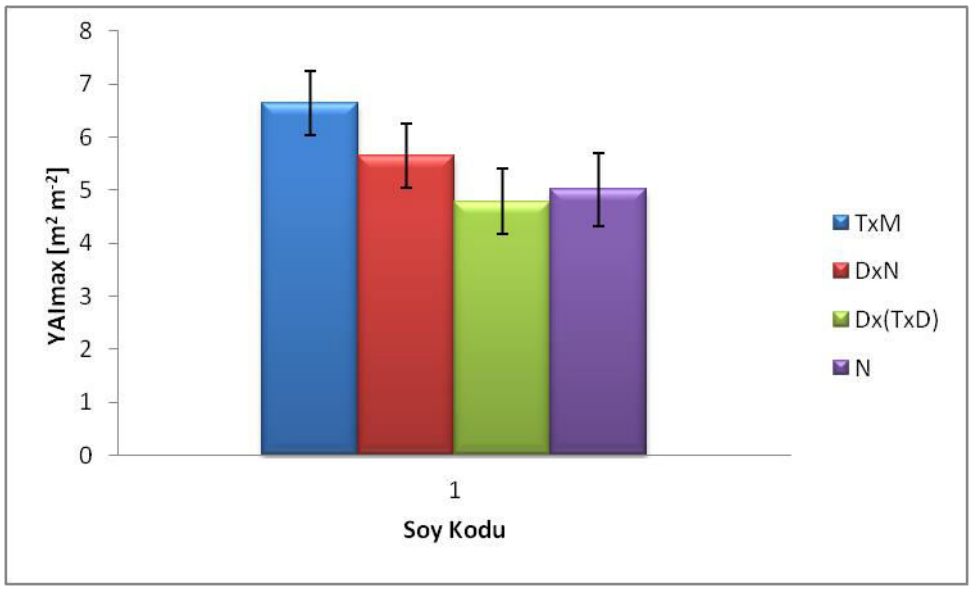
3. BULGULAR

3.1. YAI Ölçümleri

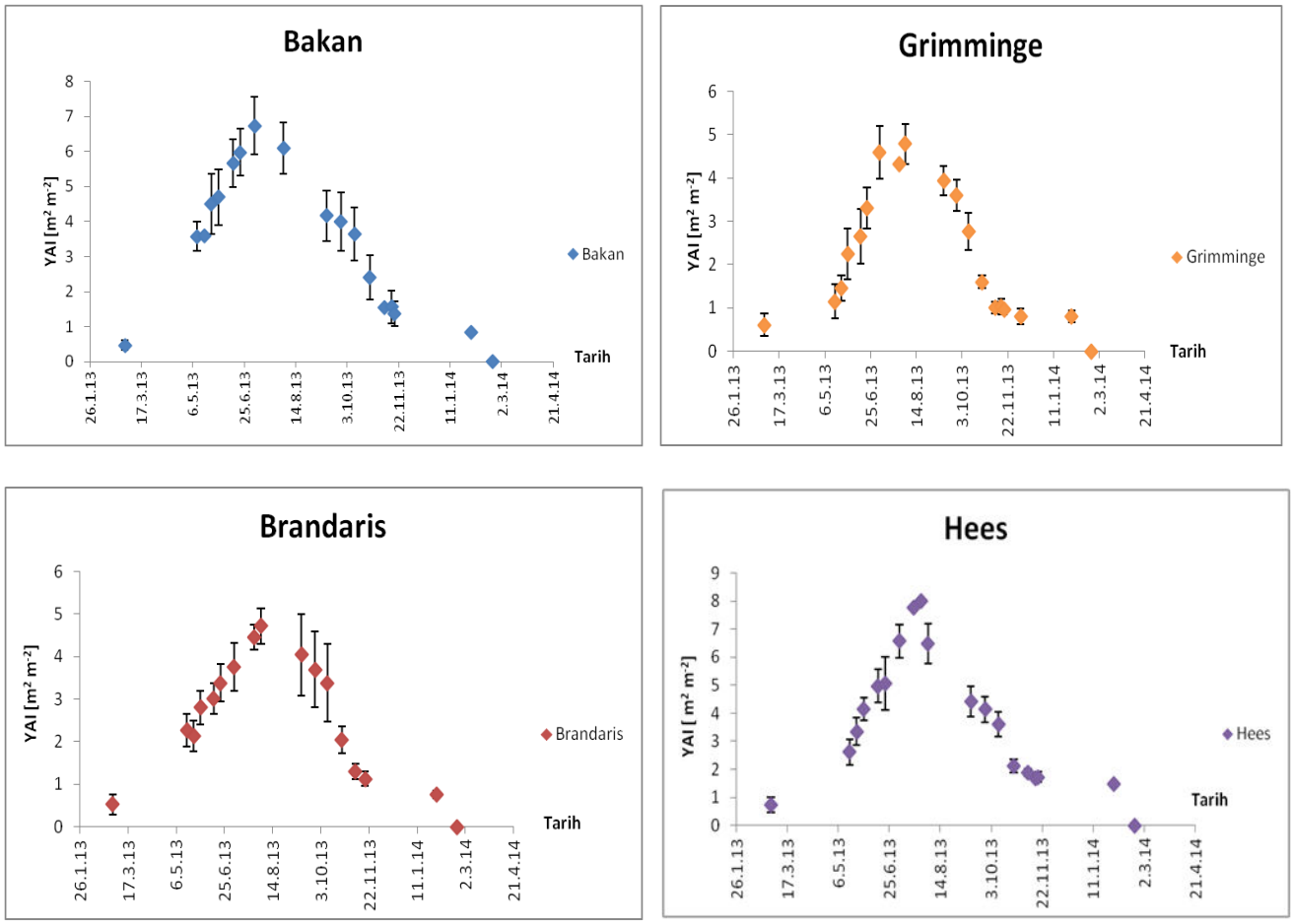
2013 yılında, ikinci büyüme yılının ikinci rotasyon zamanında, bu çalışmada birçok genotipin YAI_{max}'ları Temmuz 2013 ile Ağuatos 2013'ün başlarında maksimum seviyeye ulaştı (Şekil 2). Brandaris genotipi en düşük YAI_{max} değeri gösterirken, Hees genotipi en yüksek değeri gösterdi (Şekil 2). Grimminge [*P. deltoides* × (*P. trichocarpa* × *P. deltoides*)] (4.8 m^2 m^{-2}) diğer hibritlerle kıyaslandığında daha düşük bir YAI_{max} değeri gösterdi. *P. trichocarpa* × *P. maximowiczii* genotipleri [Örn: Skado (6.6 m^2 m^{-2}) ve Bakan (6.7 m^2 m^{-2})] diğer nesiller arasında en yüksek YAI_{max} değerlerine sahiptir (Şekil 3). Bu çalışmadaki gözlemlerden geniş ayalı yapraklara sahip olan genotiplerin (Skado ve Bakan) daha yüksek YAI değeri göstermeye eğilimli oldukları belirlendi. Brandaris, Grimminge (2.2 m^2 m^{-2}) ve Oudenberg (2.1 m^2 m^{-2}) genotiplerinden çok az bir oran farkı ile daha yüksek bir YAI performansı gösterdi (Şekil 4, Ek A). YAI_{max} hem direkt hem de indirekt ölçümlerde YAD değerleri ile linear bir korelasyon gösterdi (Şekil 5). En yüksek YAD değerleri, Bakan (883.4 m^2 gün m^{-2}), Skado (804.7 m^2 gün m^{-2}) ve Hees (738.9 m^2 gün m^{-2}) genotiplerinde ve en düşük YAD değerleri ise Oudenberg (466.6 m^2 gün m^{-2}) ve Grimminge (488.3 m^2 gün m^{-2}) genotiplerinde bulundu. En düşük performanslar ise eşit şekilde Vesten ve Wolterson genotipleri için gözlendi. *P. trichocarpa* × *P. maximowiczii* hibritleri diğer hibritlerle kıyaslandığında en yüksek YAD değerine sahipti. Grimminge [*P. deltoides* × (*P. trichocarpa* × *P. deltoides*)] ise diğer hibritlerle kıyaslandığında daha düşük YAD değerine sahipti (Şekil 6).



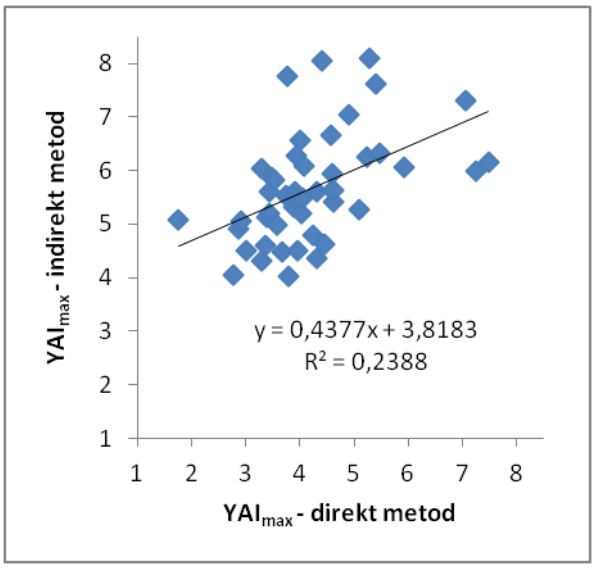
Şekil 2: Her bir genotip için ikinci büyüme yılının ikinci rotasyonundaki Sezonsal Yaprak Alan İndeksi (YAI) (2013). Yukarıdaki her bir dağıtım noktası Mart ayından hasat zamanına kadar indirekt metotla ölçülmüş olan yaprak alan indeksi değerlerini temsil etmektedir.



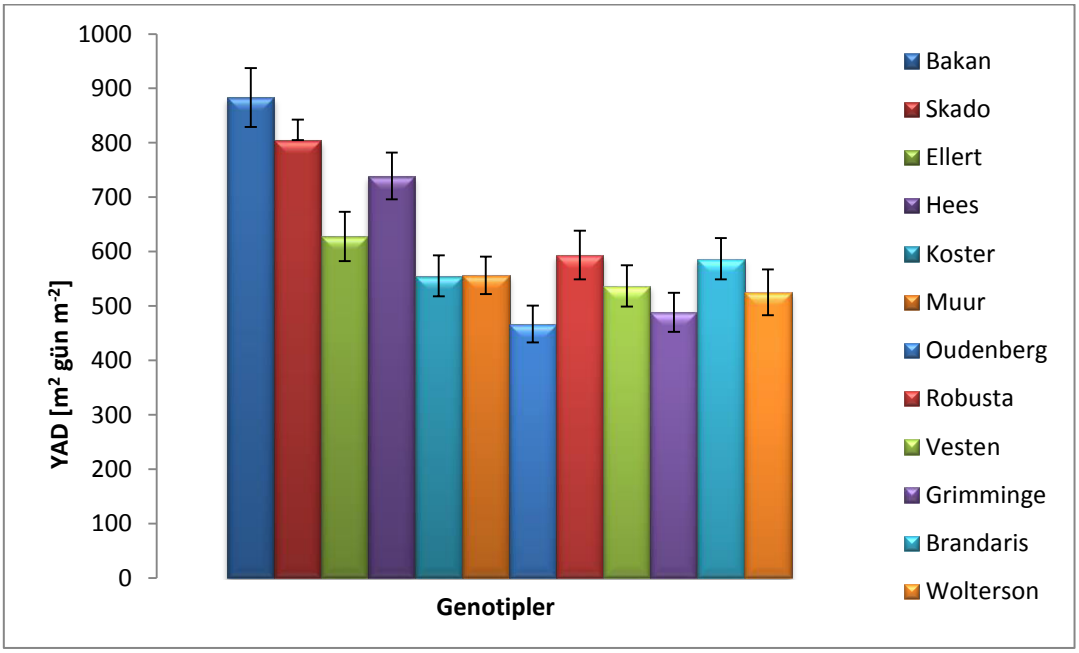
Şekil 3: Dört soy grubunun ikinci yıl ikinci rotasyon zamanı direkt metot ile ölçülmüş YAI_{max} değerleri. D = *Populus deltoides*, N = *Populus nigra*, T = *Populus trichocarpa*, M = *Populus maximowiczii.*



Şekil 4: Dört genotip (Bakan, Grimminge, Brandaris, Koster, her soy için bir örnek) için ikinci büyüme yılı ikinci rotasyon zamanındaki YAI değerlerini gösteren sezonsal gelişim (indirekt metot ile ölçüldü). Dağıtım noktaları ortalama değerleri, hata çubukları ise dört genotipin ortalama YAI değerlerinin standart sapmalarını göstermektedir.



Şekil 5: İkinci yılın ikinci rotasyon zamanındaki indirekt YAI_{max} ölçümleri ile direkt YAI_{max} ölçümleri arasındaki ilişki. Regresyon eşitliği ve determinasyon katsayısı (R^2) gösterilmiştir.

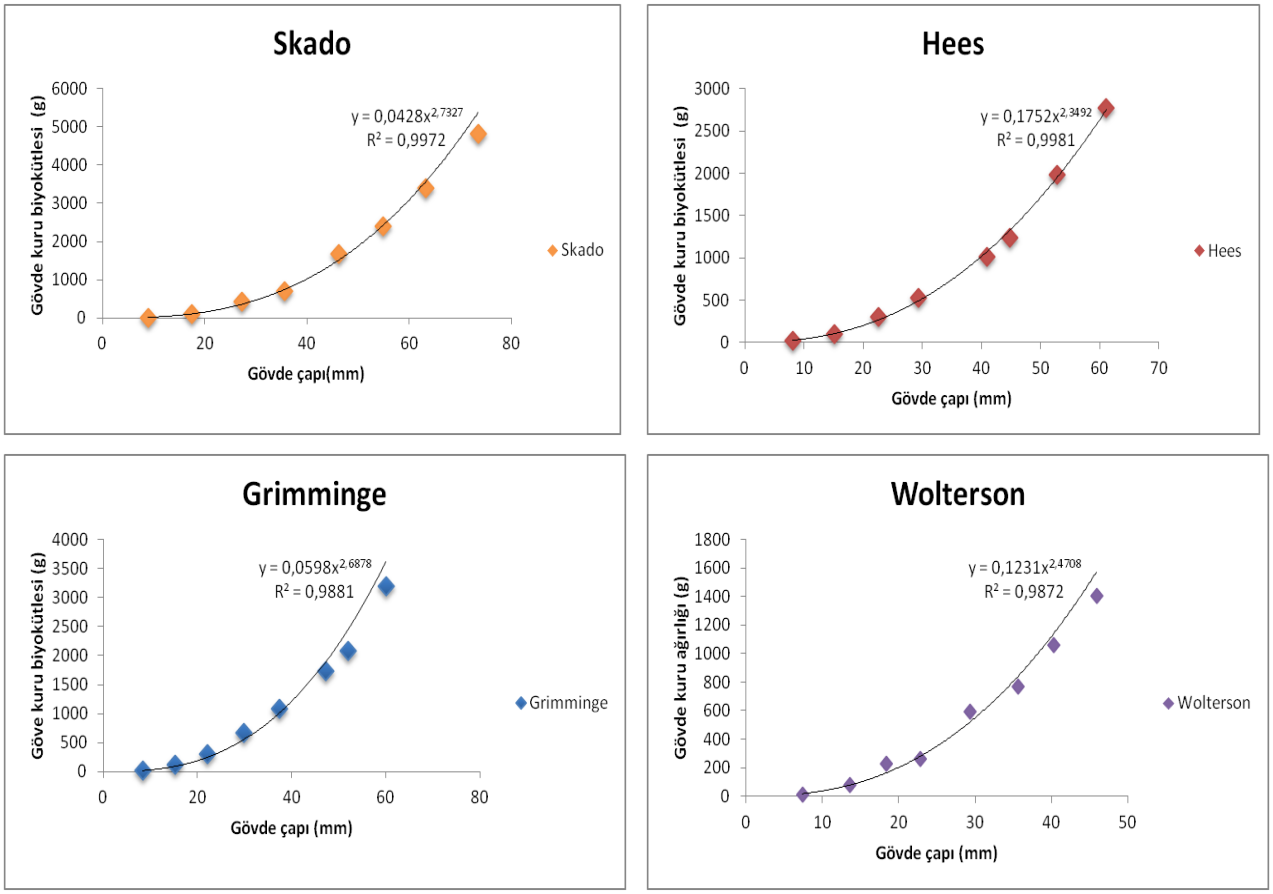


Şekil 6: İkinci büyüme yılının ikinci rotasyon zamanı sırasındaki 12 kavak genotipinin yaprak alan durasyonu (YAD). Ortalama değerler standart sapma ile birlikte verilmiştir (hata çubukları).

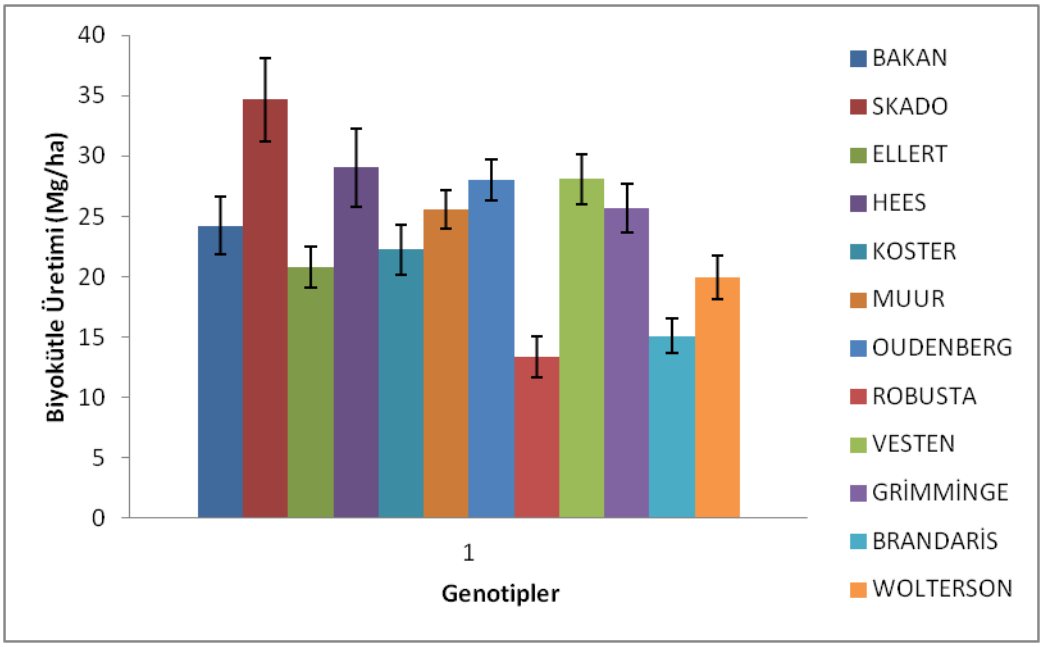
3.2. Toprak-üstü Odunsu Biyokütle ve Allometrik İlişkiler

Gövde kuru ağırlığı ile gövde çapı (22 cm'de) arasındaki allometrik ilişkiler her bir genotip için incelendi. Pozitif enerji eşitlikleri elde edildi (Şekil 7, Ek B). İkinci büyüme yılının ikinci rotasyon zamanının sonunda yıllık toprak-üstü odunsu biyokütle üretimi Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterildi. Hees (14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$), Vesten (14.0 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$), Oudenberg (14.0 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) ve Skado (17.3 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) en iyi performansı gösterdi. Bu dört genotipin hepsi diğer genotiplerden daha fazla biyokütle ürününe sahipti. Diğer genotiplerin çoğu nispeten yüksek ürün miktarına sahipti, örneğin Bakan, Grimminge, Muur. Robusta (6.7 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) diğer genotiplerle kıyaslandığında en düşük biyokütle ürün performasına sahipti. Aynı ölçüde Brandaris (7.9 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$)'de düşük performans gösteren genotiplerden biri oldu. Wolterson, Robusta ile kıyas edildiğinde az bir farkla da olsa daha iyi performans gösterdi ve Brandaris tüm genotiplerin arasındaki en düşük performansa sahip olan genotipti (Şekil 8). Büyüme yılının sonunda her bir ağacın yıllık ortalama toprak-üstü odunsu biyokütle üretimi Şekil 9'da gösterildi. Skado (4.86 kg $ağaç^{-1}$), Vesten (4.41 kg $ağaç^{-1}$), Hees (4.30 kg $ağaç^{-1}$) ve Oudenberg (4.02 kg $ağaç^{-1}$) genotipleri en iyi performansı gösterdi. Bu dört genotipin her bir ağaç için olan biyokütle ürün kapasitesi diğerlerine göre daha fazladır. Diğer genotiplerin çoğu az çok aynı ürün kapasitesine sahiptir, örneğin Grimminge (3.61 kg $ağaç^{-1}$), Muur (3.25 kg $ağaç^{-1}$) ve Bakan (3.34 kg $ağaç^{-1}$). Brandaris (2.16 kg $ağaç^{-1}$) diğer genotiplerle kıyaslandığında daha düşük biyokütle ürün performansı gösterdi. Robusta (2.26 kg $ağaç^{-1}$)'da düşük performans gözlendi. Wolterson (2.89 kg $ağaç^{-1}$)'da az bir farkla olsa da Robusta'dan daha iyi performans gösterdi.

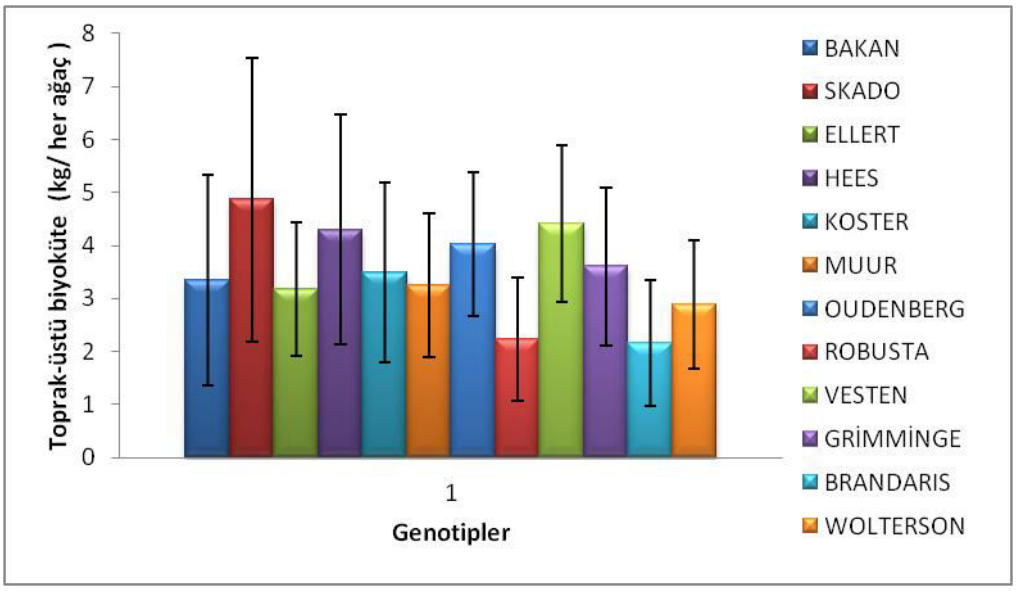
Farklı soylar arasındaki değişiklikler düşünüldüğünde, N genotipleri diğer üç farkı soyla kıyaslandığında daha düşük gövde çap ortalamasına sahipti, D x N diğer soylarla kıyaslandığında daha yüksek gövde çapı ortalaması gösterdi. N (8.78 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) biyokütle üretimi açısından, diğer soylarla kıyaslandığında en düşük biyokütle ürün performansını gösterdi. T x M genotipleri ise en yüksek miktarda biyokütle ürününü verdi (14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) (Şekil 10).



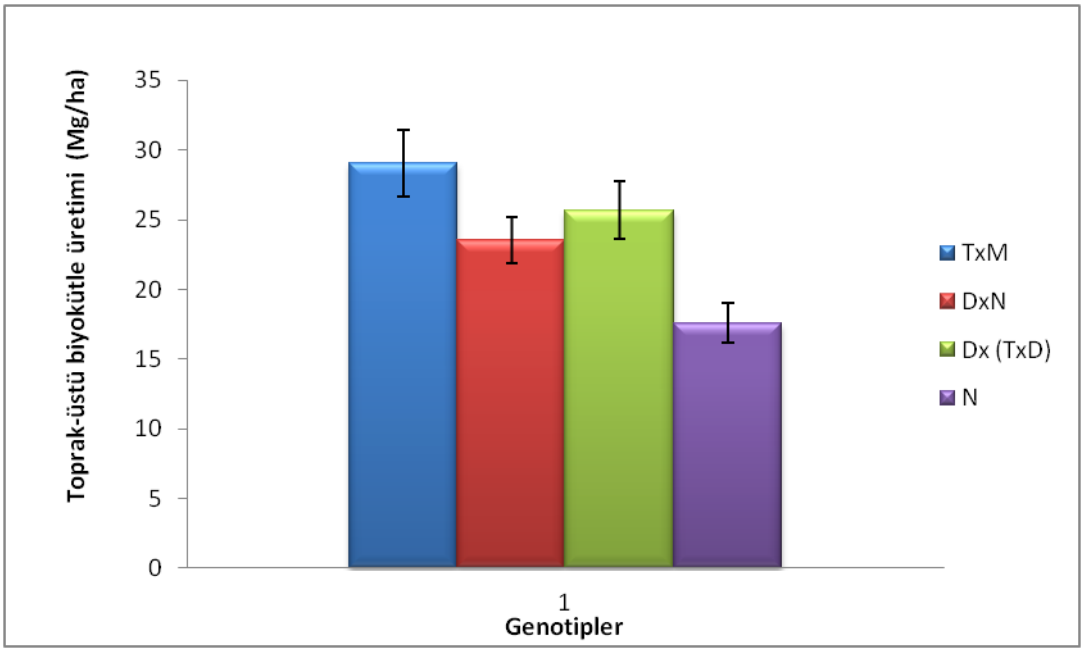
Şekil 7: Seçilmiş dört genotip (her soy için bir genotip) gövde kuru ağırlığı ve gövde çapı (22 cm'de) arasındaki allometrik ilişkiler. Regresyon denklemi gösterildi.



Şekil 8: Ağaç kültüründeki 12 farklı kavak genotipinin iki büyüme yılı sonundaki toprak-üstü biyokütle ürün kapasitesi



Şekil 9: İkinci yılın ikinci rotasyon evresinin sonundaki toprak-üstü biyokütle üretimi. Ağaçların ortalama biyokütle üretimi ve standart sapmaları (hata çubukları) gösterilmiştir.

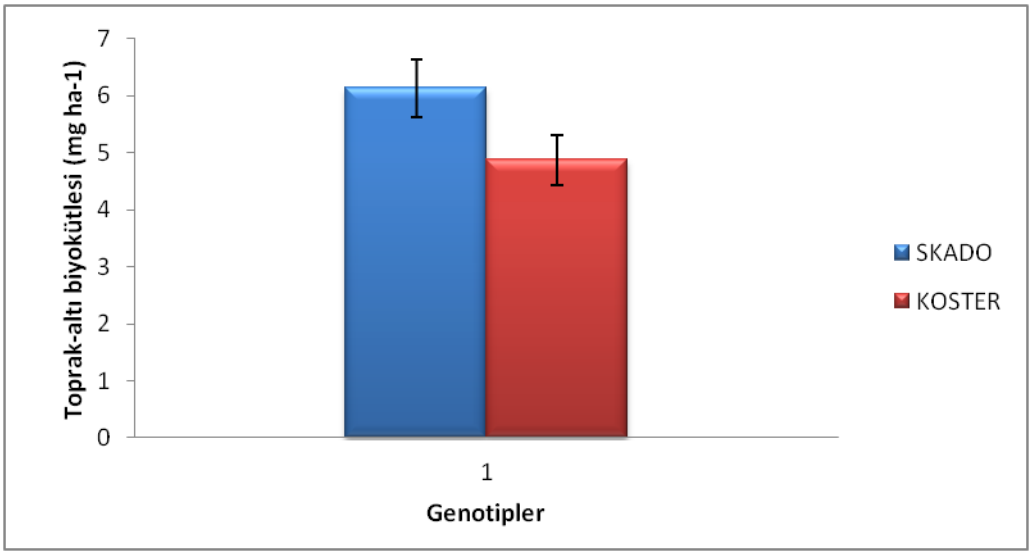


Şekil 10: Ağaç kültüründeki farklı 12 kavak genotipinin iki büyüme yılı sonundaki toprak-üstü biyokütle ürün kapasitesi. Ortalama değerler ve standart sapmaları gösterildi. D = *Populus deltoides*, N = *Populus nigra*, T = *Populus trichocarpa*, M = *Populus maximowiczii*.

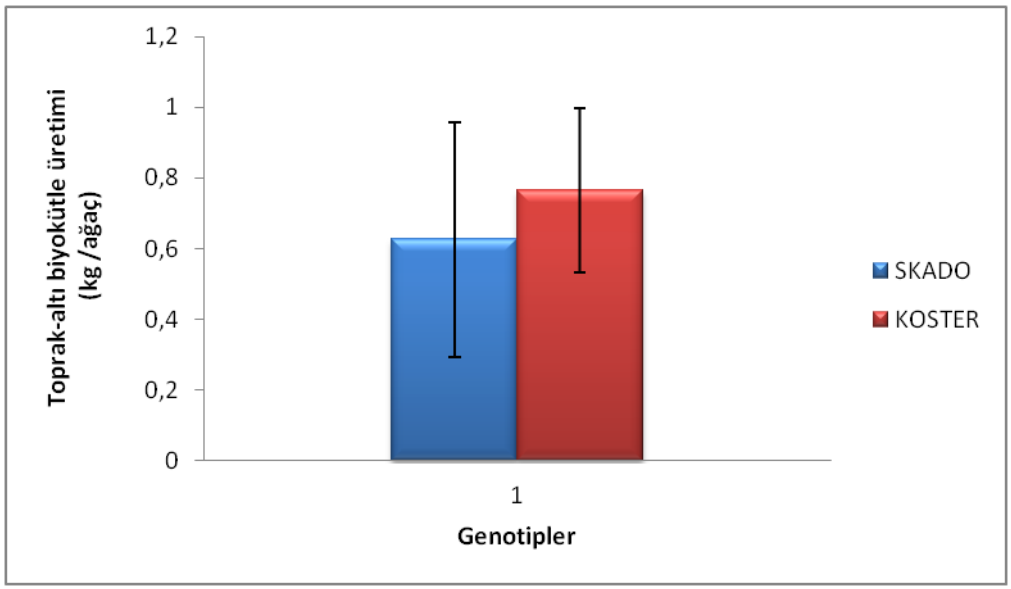
3.3. Toprak- altı Biyokütle ve Allometrik ilişkiler

Yıllık toprak-altı biyokütle miktarının ortalaması - orta büyüklükteki kökleri ve kalın kökleri kapsayan - ikinci yılın sonunda Skado için 6.13 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ ve Koster için 4.87 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak belirlendi (Şekil 11). Ayrıca her bir ağaç için yıllık ortalama toprak-altı biyokütle üretimi hesaplandı; Koster (0.76 kg $ağaç^{-1}$) Skado ile kıyaslandığında (0.63 kg $ağaç^{-1}$) daha yüksek ortalama toprak-üstü biyokütle ürününe sahipti (Şekil 12).

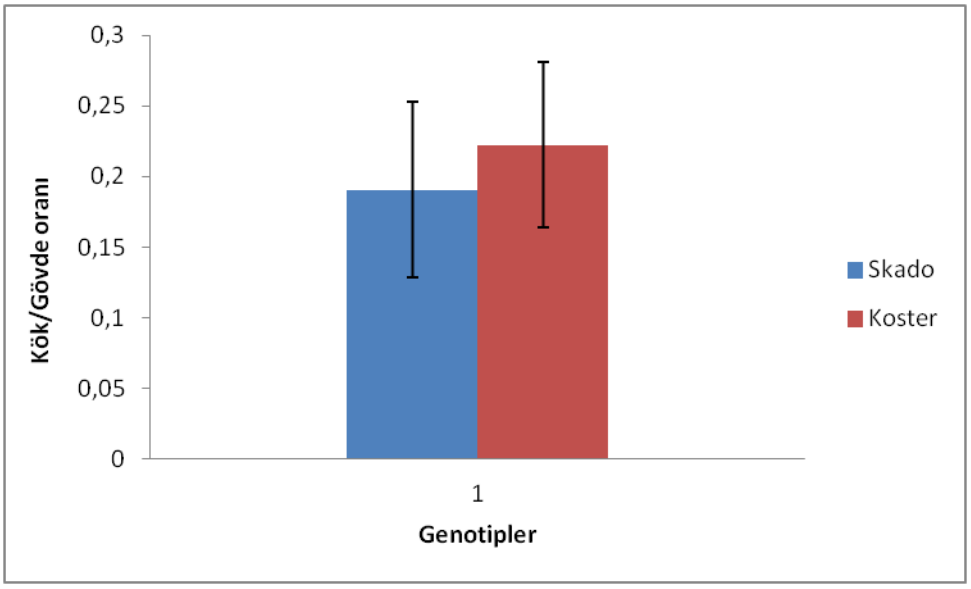
Kök:gövde değerlerinin ortalama oranları - örneğin total toprak-altı biyokütle miktarının toprak-üstü odunsu biyokütle miktarına oranı Şekil 13'de gösterilmiştir. Skado (0,19) Koster'dan (0,22) daha düşük biyokütle oranına sahipti.



Şekil 11: Kalın kökleri ve orta büyüklükteki kökleri kapsayan toprak-altı biyokütle performansı ağaç kültüründeki iki kavak genotipinin dört yıl sonraki büyüme evresinden sonraki ürün performansları. Ortalama değerleri ve standart sapmaları gösterildi.



Şekil 12: Toprak-altı biyokütle miktarı Mg ağaç$^{-1}$ olarak tanımlandı. Genotiplerin (Skado-Koster) ortalama değerleri ve toprak-altı biyokütlenin standart hataları gösterildi.



Şekil 13: Total toprak-altı ağaç biyokütlesinin (orta büyüklükteki kökler, kalın kökler ve ağacın kesilmiş gövdesinin yarısını içeren) toprak-üstü ağaç biyokütlesi ile (gövde biyokütlesini içeren) olan ilişkisi kısa rotasyonlu bitki plantasyonundaki iki kavak genotipi için (Skado ve Koster) kök:gövde oranı şeklinde gösterildi.

4. TARTIŞMA

4.1. Biyokütle Üretimindeki Genotipik Değişiklikler

Bu çalışmadaki ortalama toprak-üstü odunsu biyokütle üretimi, kısa rotasyonlu ağaç kültürünün ikinci iki yıllık rotasyonu sırasında 6.7 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ - 17.3 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ değerleri arasında seyretmektedir. Tarımsal alandaki iki yıllık kavak plantasyonu için toprak-üstü biyokütle üretimini gösteren nispeten az sayıda çalışma mevcuttur. Ama araştırılan değerler diğer çalışmalardaki farklı genotiplerle kıyaslanabilir. ABD, Lower Midwest'de sulak arazilerde yetişen iki yıllık kavak genotipleri bu çalışmada gözlenen değerlerle yaklaşık aynı değerleri göstererek 7.4 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ to 13.9 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında seyretmiştir (Pallardy ve ark., 2003).

Birinci büyüme yılındaki bu yüksek biyokütle ürünü belki de bu çalışmada olmayan periyodik sulama gibi optimal su koşullarıyla ilgilidir. Önceki çalışmalar; nemli, serin bölgelerde yetişmiş olan kavak ve söğütler için yüksek biyokütle eldesine sulama etkeninin sebep olduğunu göstermiştir (Hansen, 1988; Heilman ve ark., 1994; Matthews ve ark., 1994). Benzer çalışmalarda, elverişli iklim, sulama ve gübreleme gibi optimal koşullarda 4 yıllık

kavak plantasyonu için her yıl 20–25 Mg ha^{-1} kadar ürün elde edilmiştir (Heilman ve Stettler, 1985, Heilman ve ark., 1994; Scarascia-Mugnozza ve ark., 1997).

Daha elverişsiz koşulların denendiği benzer çalışmalarda, yıllık 10-15 Mg ha^{-1}'lık ürün elde edilmiş ve bu azalan değerin koşullarla bağlantılı olduğu gözlenmiştir (Cannell ve Smith, Cannell ve Smith, 1980; Hansen, 1991). İklim koşullarının farklı olduğu ülkelerdeki ürün miktarları kıyaslandığında, 2 ile 7 yıllık kesim yöntemi kullanılmamış plantasyonlar için ürün miktarı 2 ile 13.9 Mg ha^{-1} arasında bulunmuştur (Matthews ve ark., 1994; Trnka ve ark., 2008). Fang ve ark., 2007 tarafından, dört farklı ekim yoğunluğuna sahip 10 yıllık kısa rotasyonlu kavak plantasyonu için ortalama biyokütle üretim değerleri 14.6, 13.9, 13.1 ve 11.7 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak belgelenmiştir. Bir başka çalışmada, 10 yaşın üzerindeki kavak ağaçlarının yıllık biyokütle üretimi değişiklik göstermiştir, 7-10 yıllık ağaç plantasyonları arasındaki farklılıkların ise çok önemli bir boyutta olmadığı görülmüştür. İlk 6 yıldaki ortalama yıllık biyokütle hasılatı 7-10 yıllık kavak ağaçlarının ürün miktarından daha fazladır (Fang ve ark., 2007). Al Afas ve ark. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, bazı genotiplerin performansları farklı rotasyon ve yıllar üzerinde önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Ayrıca, araştırmacılar tarafından birbirini takiben uygulanan hasattan sonra genotiplerin filizlenme kapasitelerini kaybettiği görülmüştür.

Danimarka'da, Nielsen ve ark. (2014) 36 adet kavak genotipi için yıllık ortalama biyokütle üretiminin 6-9 Mg ha^{-1} kadar olduğunu rapor etmiştir. İsveç'de, Karacic ve ark. (2003) *Populus*'un yıllık ortalama biyokütle üretiminin 3.3 Mg ha^{-1} ile 9.2 Mg ha^{-1} arasında seyrettiğini rapor etmiştir. Sonuçlar kavak ağacının biyokütle üretimi için çok önemli bir yere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Verlinden ve ark. (2013) ilk iki büyüme sezonundan sonra Brandaris genotipi için ortalama biyokütle üretiminin 1.52 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olduğunu ve Hees genotipi içinse bu değerin 7.22 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olduğunu ortaya koymuştur. Kıyaslamalar bu çalışmadaki (POPFULL) çoğu genotipin yüksek biyokütle üretim performansına sahip olduğunu göstermiştir. Amerika Pasifik Kuzey Batı'da, yoğun sulama ve gübreleme uygulanan plantasyonların, 4-7 yıllık rotasyonlar sonucunda 20 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$'dan daha fazla miktarda ürüne sahip oldukları gösterilmiştir (Heilman ve Stettler 1985, Scarascia-Mugnozza ve ark., 1997). Fransa'da yaklaşık 30 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ kadarlık hasılatın iki yıllık ağaç sistemlerinden elde edildiği rapor edilmiştir (Pontailler ve ark., 1997). Bununla birlikte, eğer sulama ve gübreleme plantasyon sistemine uygulanmamışsa, 10 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$'dan daha fazla miktarda ürün eldesi çok nadir görülen bir durumdur (Ericsson, 1994).

Kısa rotasyonlu kavak plantasyonu üzerinde yürütülen çalışmalarda büyüme miktarı ve biyokütle üretim miktarı, farklı çevresel koşullara ve kültür yönetimine bağlı olarak yüksek oranda değişiklik gösterir (Ceulemans ve Deraedt 1999). Kavak ve söğüt gibi hızlı büyüyen ağaçlar aşırı iklimsel koşullara çok hassastır. İklimsel değişikliklere bağlı olarak artan kuraklık, enerji üretimini ve enerji üretim bitkileri için gerekli olan karbon miktarını azaltır (Hastings ve ark., 2009; Zhou ve ark., 2011).

Saf türlere göre hibrit genotipler her zaman daha çok tercih edilir. Bu yüzden, erken yaşlarda plantasyonun hızlı kurulumu sağlanır (Dillen ve ark., 2013). Çalışmamızda, T × M hibritleri en iyi performansı gösterdi (7.8 Mg ha^{-1} ve 9.6 Mg ha^{-1}), ayrıca *P. trichocarpa* (Columbia River, Fritzi Pauley ve Trichobel) genotipleri de yüksek biyokütle üretim kapasitesine sahipti (6.1 Mg ha^{-1}). Genel olarak, yüksek biyokütle üretim performansı soy olarak *P. maximowizcii* ile elde edilir. En düşük üretim miktarı ise, saf *Populus nigr*a (N) ve *Populus deltoides* (D) hibritleri için gözlemlenir (Verlinden ver ark., 2013). Laureysens ve ark. (2003) 6 yıllık kavak ağaç kültürleri için, yıllık ortalama biyokütle üretiminin 1.6-10.8 Mg ha^{-1} değerleri arasında seyrettiğini rapor etmiştir. Aynı çalışmada, N genotip Wolterson'nun yıllık ortalama biyokütle üretimi 7.8 ve 10 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında seyrettiği gözlemlenmiştir. Diğer çalışmalarda 4 yıllık rotasyon ürünleri; genotipe, toprak gübrelenmesi ve iklim koşullarına bağlı olarak 5-24 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında seyrettiği gösterilmiştir (Hansen ve Strong, 1993; Heilman ve ark., 1994; Bungart ve Hüttl, 2001). Uygun koşullarda yıllık 20 Mg ha^{-1}'lık biyokütle hasılatı yada daha fazlası, uygun iklim koşulları altında ya da yoğun toprak gübreleme durumunda elde edilmiştir (Heilman ve ark., 1994).

Hibrit genotipler saf türlere göre daha iyi performans gösterir (Broeckx ve ark., 2012a). Çalışmamızda, T × M ve D × N genotipleri diğer hibrit genotiplerle kıyaslandığında en iyi performansı gösterirken, N genotipleri en düşük performansı göstermiştir. Nielsen ve ark. (2014) *P. nigra* ve *P. nigra* hibritlerinin diğer genotiplerden daha düşük büyüme hızına sahip olduğunu açıklamıştır. Diğer yandan, *P. nigra*'nın saf türleri *P. trichocarpa* ve *P. maximowiczii* kadar üretici bir genotiptir.

İkinci rotasyonun iki büyüme yılından sonra, çalışmamızdaki D × N (12.8 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) genotipleri diğer çalışmalardaki yıllık biyokütle ürün hasılatları ile kıyaslanabilir. Pellis ve ark. (2004) ikinci rotasyonun ilk büyüme sezonundaki ürün miktarının 3-8 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında seyrettiğini açıklamıştır. D × N genotipleri ilk rotasyon döneminde düşük biyokütle üretimi göstermiştir (Laureysens ve ark., 2003). Ama ilk rotasyondan sonra, D × N

genotiplerinin biyokütle üretimi durmadan artmıştır ve yüksek biyokütle üretimi diğer genotiplerle kıyaslandığında üçüncü ve dördüncü rotasyon evrelerinde elde edilmiştir. Kök sürgünlerinin hayatta kalma oranı beklenmedik şekilde üçüncü rotasyon evresine oranla dördüncü rotasyon evresinde daha fazla olduğu gösterilmiştir (Dillen ve ark., 2011). Laureysens ve ark. (2003) D x N genotiplerinin iki rotasyon süresi sonunda daha düşük performansa (1.6 - 4.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) sahip olduklarını göstermiştir. Bunun sebebinin fazla miktarda sürgün mortalitesi ile ilgili olduğu düşünülmüştür. Bununla birlikte, yukarıda değinilmiş olan çalışmanın yürütüldüğü alan düşük besin ve yüksek ağır metal özelliklerine sahipken, bizim çalışmamız yüksek biyokütle üretim eldesi sağlayabilen daha iyi toprak özelliklerine sahip bir ortamda yürütüldü. Çalışmamızda Brandaris (7.6 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) ve bunun yanı sıra N genotip Wolterson (9.98 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$)'da en düşük performansa sahip olan genotiplerden biri olmasına rağmen, diğer çalışmalarda Wolterson (8 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$'den daha fazla)'nın farklı genotiplerle kıyaslandığında daha yüksek üretim kapasitesine sahip olduğunu gösterilmiştir (Laureysens ve ark., 2003). Dillen ve ark. (2011) genotip Wolterson (N)'nun 15 yıllık KRB plantasyonlarındaki hızlı filizlenme kapasitesi ve düşük miktarda sürgün mortalite özelliklerine sahip olması sebebi ile en üretici genotip olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma alanı atık boşaltım alanlarından daha iyi büyüme koşullarına sahip olmasına rağmen, bu düşük üretim hâsılatı belki de fazla yabani ot baskısına bağlı olarak elde edilmiştir. Verlinden ve ark. (2013) birinci rotasyondan sonraki yıllık ortalama biyokütle üretiminin 1.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ (Brandaris) ile 7.2 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ (Hees) arasında seyrettiğini ortaya koymuştur. 2014'te, bu değerler Brandaris için 7.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ ile Hees için 14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak hesaplanarak artış göstermiştir.

Bu çalışmadaki en yüksek biyokütle üretimi T × M (14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$), D × N (11.8 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) ve D × (T × D) (12.83 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) hibritlerinden sağlanırken, en düşük üretim kapasitesinin N genotipinde olduğu gözlenmiştir (8.78 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$). En yüksek biyokütle üreitm kapasitesine hibrit genotiplerin sahip olduğu bu çalışmada da açıkça gösterilmiştir.

Çalışmamızdaki en yüksek YAI_{max} değerlerine Hees (8.0 m^2 m^{-2}), Skado (6.6 m^2 m^{-2}), Bakan (6.8 m^2 m^{-2}) genotipleri sahipken; Robusta (4.75 m^2 m^{-2}) ve Wolterson (5.29 m^2 m^{-2}) en düşük YAI_{max} değerlerine sahipti. Aynı zamanda; Hees (738.9 m^2 gün m^{-2}), Bakan (883.3 m^2 gün m^{-2}), Skado (804.7 m^2 gün m^2) en yüksek YAD değerlerini gösterdi. Buna rağmen, Grimminge (488.3 m^2 gün m^{-2}) ve Oudenberg (466.6 m^2 gün m^{-2}) en düşük YAD değerlerine sahipti.

Buna verilere göre, ortalama biyokütle üretimi ile gövde çapı, yükseklik, YAI_{max}, YAD ve SYA arasında bir ilişkinin olduğu görülmüştür. YAI, farklı genotiplerin yaprak alanlarından daha gerçekçi ve daha mantıklı bir biyokütle üretim indikatörüdür (Ceulemans, 1990; Barigah ve ark., 1994; Orlović ve ark., 1998; Tharakan ve ark., 2005). Al Afas ve ark. (2005) daha geniş yaprak alanıyla bitki üst tabaka gölgeleme miktarıyla ilgili olan düşük SYA değeri arasındaki ilişkiyi bulmuştur. Bitki üst tabaka gölgelemesi artan YAI'e bağlı olarak artar ve SYA'da YAI ve bitki üst tabaka gölgelemesinin artışıyla birlikte yükselir. Broeckx ve ark. (2012a) YAI_{max}'ın biyokütle üretimi için önemli bir indikatör olduğunu bulmuştur. YAI; yaprak alanı, bitki boyutu, yaş ve bitkinin konumuna bağlıdır. Yüksek YAI genel olarak geniş yaprak ve yüksek fotosentetik üretim ile ilgilidir (Al Afas ve ark., 2005). Ayrıca, yer alanındaki her birimdeki gövde çapındaki artışlar, kavak KRB plantasyonunun ikinci büyüme yılındaki YAI değerleri ile pozitif bir korelasyonu gösterdi (Al Afas ve ark., 2005).

Bu çalışmada, toprak-üstü biyokütle üretimi için en iyi performansı, kalın ve uzun gövdeler üreten Skado (17.3 Mg ha^{-1}), Vesten (14.04 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) ve Hees (14.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$), Oudenberg (14.0 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) genotiplerinin göstermiştir. Yüksek YAI_{max} değerlerine ve yüksek üretim performansına sahip olan Hees ve Skado aynı zamanda yüksek YAD değerlerine sahiptir. Broeckx ve ark. (2012a) ilk büyüme sezonu sona erdiğinde YAI_{max} değerleri açısından, küçük yapraklarla hızlı biyokütle üretimini başaran Hees genotipinin en iyi performansı gösterdiğini bulmuştur. Hees gibi Ellert'de (10.4 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$) her kök sürgününden ortalama iki gövde üretmesine rağmen, ince ve bununla bağlantılı olarak dar bazal alana sahip olan kısa gövdelere ilişkin ortalama ürün hasılatından daha düşük miktarda ürün hasılatı elde edilmiştir. En düşük performansa sahip olan genotipler, düşük biyokütle ürününe sebep olan zayıf ve kısa gövdelerleriyle karakterize edilen 10.4 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ kadarlık üretim göstermiştir. N genotipleri Brandaris (4.73 m^2 m^{-2}) ve Wolterson (5.29 m^2 m^{-2}) en düşük YAI_{max} değerlerine sahiptir. Ayrıca, Brandaris ve Wolterson ilk rotasyon sırasında en düşük YAI_{max} değerlerini göstermiştir (Broeckx ve ark., 2012a). Grimminge (4.29 m^2 m^{-2}) 'de Brandaris, Wolterson Robusta gibi düşük YAI_{max} değeri göstermesine rağmen, daha yüksek biyokütle üretim miktarına sahiptir. Bu yüksek ihtimal ile Grimminge genotipinin daha az miktarda ve kuru ağırlığı fazla olan dal özelliklerine bağlıdır. Broeckx ve ark. (2012b) Wolterson'daki seyrek dal yapısının beklenen şekilde daha düşük YAI_{max} değerine sahip olmasına neden olduğunu açıklamıştır. Bu sebeple YAI'nın biyokütle üretimi için en önemli indikatör olduğu düşünülmektedir (Heilman ve ark., 1996; Pellis ve ark., 2004), dar tepe bitki örtüsü şekli yüksek biyokütle üretiminin sağlanması için pek tercih edilmez. Ceulemans

(1990)'e karşılık, Broeckx ve ark. (2012b) Wolterson genotipinin dar tepe bitki örtüsü şeklinin az miktarda odunsu biyokütle hacmine sebep olduğunu bulmuştur. Bitki yoğunluğu, ışık geçirgenliği, plantasyonun karbon asimilasyonunu etkileyen tepe bitki örtüsü yapısı en önemli biyokütle üretim indikatörüdür (Hallé ve ark., 1978; Duursma ve Mäkelä 2007; Kim ve ark., 2011). Bitki karakteri odunsu bitki yapısı ile belirlenir. *Populus*, *Larix* gibi ılıman ağaç cinsleri ve silleptik dallar üreten tropik ağaçlar bitki yoğunluğunun artmasına katkıda bulunur. Bitki yoğunluğu, henüz tepe bitki örtüsü kapanmamış plantasyonun gelişiminin ilk yıllarında çok önemlidir (Gielen ve ark., 2002).

YAI değerindeki değişiklikler; farklı yaprak sayılarından, N konsantrasyonu ve yaprağın su alımını etkileyen farklı yaprak boyutlarından kaynaklandığı açıklanmıştır (Monclus ve ark., 2005). *P. deltoides* yaprakları *P. nigra* ile kıyaslandığında geniş ayalı fakat miktarca daha az olduğu belirtilmiştir (Ceulemans, 1990; Marron ve Ceulemans, 2006). *P. nigra*'nın dar ayalı yaprakları diğer genotiplerle kıyaslandığında daha düşük LAI_{max} değerlerine neden olmuştur. D × N hibritleri biyokütle üretimi ile ilgili olan soy türlerinin ikisinden de daha geniş total yaprak alanına sahip olduğu görülmüştür (Orlović ve ark., 1998; Marron ve Ceulemans, 2006). Diğer yandan T x M genotipleri Bakan ve özellikle Skado en prodüktif genotiplerin arasındadır. Tüm genotiplerde, plantasyon kurulumundan sonraki zaman içerisinde hızlı büyüyen tüm genotiplerde ilk büyüme sezonuyla bağıntılı olarak ikinci büyüme sezonunda da YAI değeri artmıştır. YAI_{max} büyüme sezonu 1 (BS1)'den büyüme sezonu 2 (BS2)'ye kadar iki katı ya da üç katı kadar artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Verlinden ve ark., 2013). Verlinden ve ark. (2013) ağaç uzunluğu, gövde çapı ve ayrıca genotipler arasındaki total biyokütlede BS2'de arttığını belirtmiştir. Örneğin, BS1'deki YAD değerleri 53.5 m^2 m^{-2} gün ile 182.9 m^2 m^{-2} gün arasında değişirken, BS2'deki YAD değerleri 146.6 m^2 m^{-2} gün ile 649.8 m^2 m^{-2} gün arasında değişmiştir. BS1'deki biyokütle miktarı 1.27 Mg ha^{-1} - 3.83 Mg ha^{-1} arasında değişmiştir, fakat BS2 değerleri 3.04 Mg ha^{-1} - 14.43 Mg ha^{-1} arasında değişiklik göstermiştir.

4.2. Toprak-altı Biyokütle ve Süreç

Kök sistemi kavak ağaçlarının sadece hayatta kalma süresini etkilemez, fakat aynı zamanda büyüme oranları ve üretimlerini de etkiler. Yüksek miktarda toprak-üstü üretimi ve büyüme gösteren genotipler fazla miktarda kök biyokütlesine sahiptir, ayrıca plantasyon kurulum yılındaki düşük performans daha zayıf kök sistemleriyle ilişkilidir. Güçlü bir kök sisteminin özellikle kurulum yılındaki büyüme oranını desteklediği belirtilmiştir (Dillen ve ark., 2010).

Bununla beraber, güçlü bir kök sisteminin zayıf olan kök sistemine oranla daha fazla büyüme oranına sahip olduğu anlamına gelmediği gözlemlenmiştir (Dillen ve ark., 2010). Dickmann ve Stuart (1983), N genotiplerinden Wolterson ve Brandaris'in güçlü kök sistemine sahip olmasına rağmen az büyüme hâsılatı ve üretim performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Kavak genotipleri için toprak-altı biyokütle üretimi ile ilgili az sayıda çalışma olduğu görülmüştür (Samson ve ark., 1999; Pallardy ve ark., 2003).

Bu yüksek ihtimal kök analizlerinin zorluğuyla ilgilidir. Kök örneklerinin analizi deneysel dizayn tarafından kısıtlanmaktadır. Bununla birlikte köklerin toprak şekli ve besin içeriği gibi alan koşullarına olan yüksek hassasiyeti, kök kazıma sürecindeki zaman kaybı, köklenmedeki yüksek klonal değişiklikler ile birlikte örnekleme metotları kısıtlayıcı özelliklerden bir kaçının olduğu belirtilmiştir (Samson ve ark., 1999). Buna rağmen çalışmamızda mevcut çalışmalarla kıyaslamalar yapılmıştır. Bu çalışmada, toprak-altı biyokütle hesaplamaları Skado ve Koster için 6.1 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ ve 4.9 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ kadardır. Başka bir çalışmada ise, Heilman ve ark. (1994) ince köklerin (0.5 mm çapından daha küçük) toprak-altı biyokütle ağırlık değerlerinin 4.0 - 6.5 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında değiştiğini gözlemlemiştir. Cannell ve Smith (1980), kısa rotasyonlu bitkiler için bizim hesaplamalarımızdan düşük olarak toprak-altı biyokütle miktarı 2-3 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ değerleri arasında olduğu belgelendirilmiştir. Friend ve ark. (1991), iki yıllık hibrit kavakların ortalama toprak-altı biyokütle miktarı 3.01 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak rapor etmiştir. Ayrıca bir başka çalışmada iki yıllık kavak ve söğüt plantasyonu için toprak-altı biyokütle değerleri 1-2 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$ arasında olduğu açıklanmıştır (Ericsson ve ark., 1984; Matthews ve ark., 1994).

Çalışmamızda, kök:gövde oran hesaplamalarına göre, Skado (0.19) Koster'e (0.20) göre, daha fazla miktarda fotosentez ürününün hasat edilen kısımlarda birikiminden dolayı gövde sürgünleri köke oranla daha fazla miktarda biyokütle hasılatına sahip olduğu gözlenmiştir. Buna rağmen, bir başka çalışmada Skado genotipinin su ve besin stresine daha çok eğilim gösterdiği belirtilmiştir (DesRochers ve Tremblay, 2009). Ayrıca, Koster genotipinin yüksek kök:gövde oranına bağlı olarak su ve besin stresini tolere edebildiği gözlemlenmiştir (DesRochers ve Tremblay, 2009).

Bu çalışmadaki kök:gövde oranı (0.19:0.20) benzer bir çalışmada, Pallardy ve ark. (2003) tarafından otlak alanda plante edilmiş iki yıllık kavak genotiplerinin kök:gövde oranı ile (0.26-0.36) kıyaslanmıştır. Çalışma ortamımız besin kaynağı bakımından elverişli özelliklere sahip olsa da, kök:gövde oranı diğer çalışmalardan daha yüksek değerlere sahipti. Samson ve

ark., (1999) topraktaki yüksek besin miktarlarının, KRB kültürlerinde düşük miktarda kök üretim miktarına sebep olduğu belirtilmiştir. Bu zıt sonuçların kavağın yüksek su ve besin ihtiyacından ötürü olduğu ileri sürülmüştür (Samson ve ark., 1999; Dillen ve ark., 2010).

Tarımsal mahsül artışı bitkideki kuru madde dağılımı ile sağlandığı görülmüştür (Gifford ve Evans, 1981; Gifford ve ark., 1984). Asit yağmurlarının azot depolarıyle birlikte köklerde olan asimilasyonu azaltmasına neden olan besin dengesizliğine sebep olduğu bulunmuştur (Ericsson ve Kahr, 1993). Ayrıca; su kaynağına ulaşılabilirlik, ışık koşulları ve bitkinin gelişim evresi gibi faktörlerin kök büyümesinde önemli bir etkiye sahip olduğu ileri sürülmüştür (Ericsson, 1995). Pearsall ve White (1923), fotosentetik ürünlerin dağıtımı için gövdelerin önceliğe sahip olduğunu rapor etmiştir. Shank (1945) bu fikri köklerdeki besin limitasyonu ve suyun etkilerinin gövde büyümesiyle olan ilişkilerini araştırarak geliştirmiştir. Eğer bu faktörlerden biri büyüme limitine sahipse, kök büyüme yatırımı kök:gövde oranını artmasına sebep olan besin ve su alınımının artımı için gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Brouwer (1962)'e göre, karbonhidrat ve nitrojen arasındaki denge toprak-altı ve toprak-üstü büyümesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Gövde nitrojen ve su alınımını düzenler. Karbonhidrat kaynaklarında bir limitasyon olduğunda, kök:gövde oranının azalmasına bağlı olarak gövde kökten daha fazla asimilasyon yaparken, mineral veya su kaynaklarının limitli olması halinde tam tersi durum ortaya çıktığı belirtilmiştir (Thornley, 1972). İnce köklerin ağaç ekosistemindeki total kök biyokütlesine çok az etkide bulunduğu görülmüştür (Jackson ve ark., 1997). Ama kök biyokütlesindeki ufak fraksiyonlara rağmen, ince kök dinamikleri biyokütle üretimi ve karbon döngüsündeki bitki- toprak interaksiyonlarındaki karbon yerleşiminde önemli bir role sahip olduğu gözlemlenmiştir (Ostonen ve ark., 2005). İnce kök gelişimi ağaca mal olan asıl karbon (Janssens ve ark., 2002) ve topraktaki geniş karbon inputu (Ruess ve ark.,1996) ile örneklendirilir. İnce kök biyokütlesi ve ince kök gelişimi birçok yöntemle geliştirilmiştir (Waisel ve ark., 2002). Bu metotlar allometrik teknikler (kök:gövde veya gövde:kök oranları), kökün direkt kazılması, core örneklemesini içermektedir (Cuin ve ark., 2011); Vogt ve Persson, 1991). Tarımsal sistemlerde, yabani otlar mahsülle ışık, su ve besin alınımı yönüyle yarış etmektedir. Toprak-üstünde yabani otların ışık ile (Curt ve ark., 2005) ve toprak-altında su ve besin için yarıştıkları belirtilmiştir (Kabba ve ark., 2007). Yabani otlar ayrıca ince kök sisteminin nitrojen alınımını azaltarak KRA'daki kavaklar için nitrojen elde edebilme yönünden yarış içinde olduğu görülmüştür (Kabba ve ark., 2007).

5. SONUÇ

Bu çalışmada, kavak genotiplerinin çoğundan Robusta, Brandaris, Wolterson ve Ellert genotipleri dışında 12.0 Mg ha^{-1} $yıl^{-1}$'dan daha fazla yıllık biyokütle ürünü elde edilmiştir. Genel olarak genotipik ve soy farklılıklarının yıllık toprak-üstü biyokütle üretimine etkileri, Skado ve Koster genotiplerinin toprak-altı biyokütle üretim farklılıkları kıyaslamalı olarak ileri sürülmüştür. Yıllık biyokütle üretimindeki genotipik ve soy varyasyonları ve üretim karakteristiği bulunmuştur. Hibrit genotiplerin biyokütle üretim açısından en iyi performansa sahip oldukları ortaya çıkmıştır. Saf *P. nigra* genotipleri Wolterson ve Brandaris en düşük performansı göstermiştir. Ayrıca, YAD, YAI_{max} ve biyokütle üretimi her genotip için hesaplanmış ve hesaplamalar farklı genotipler arasında kıyaslanmıştır. Bu hesaplamalar yüksek YAD and YAI_{max} değerlerine sahip olan genotiplerin aynı zamanda yüksek biyokütle ürün miktarına sahip olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma biyoenerji amacıyla kullanılan değişik *Populus* genotipleri ile kısa rotasyonlu bitki plantasyonunun yaşam sürecini göstermiştir. Bu yüksek yıllık biyokütle ürünleri ile ortaya çıkarılmıştır.

Daha sonraki araştırmaların genellikle toprak-altı biyokütle üretimindeki genotipik varyasyonlarını ortaya koymaya yönelik yapılması gereklidir. Bu çalışmadaki sonuçlar ekosistem cevaplarını ve KRB'lerin odunsu biyokütle üretimini daha iyi bir hale getirmek için gerekli olan ağaç gelişiminin ekofizyolojik karakter kontrolünün daha iyi anlaşılması için gösterilmiştir.

Kavak KRB çalışmaları genellikle yıllık biyokütle ürünlerinin her rotasyon sonrasındaki genotipik varyasyonlarını ortaya koymaya odaklanmıştır. Daha sonraki biyokütle üretim çalışmaları her rotasyon sonrasında bitkinin filizlenme kapasitesi hakkında bilgi kazanmak amacıyla yürütülmelidir. Biyokütle üretimi ile ilgili çalışmalar farklı genotiplerle, çevresel cevaplar ve genotip arasındaki interaksiyonları daha iyi anlamak için farklı çevresel koşullarda yürütülebilir. Bu bilgiler KRB kültürlerinin yeni genotiplerin seçimi ve biyokütle ürünlerinin arttırılması için kullanılabilir.

6. REFERANSLAR

Adler PR, Del Grosso SJ, Parton WJ (2007) Life-cycle assessment of net green-house flux for bioenergy cropping systems. Ecological Applications. 17:675-691.

Al Afas N, Pellis A, Niinemets Ü, Ceulemans R (2005) Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. II. Clonal and year-to-year differences in leaf and petiole characteristics and stand leaf area index. Biomass and Bioenergy. 28:536-547.

Al Afas N, Marron N, Zavalloni C, Ceulemans R (2008) Growth and production of a short-rotation coppice culture of poplar—IV: Fine root characteristics of five poplar clones. Biomass and Bioenergy**.** 32:494-502.

Allen SJ, Hall RL, Rosier PTW (1999) Transpiration by two poplar varieties grown as coppice for biomass production. Tree Physiology. 19:493-501.

Barigah TS, Saugier B, Mousseau M, Guittet J, Ceulemans R (1994) Photosynthesis, leaf area and productivity of five poplar clones during their establishment year. Annals of Forest Science. 51:613-625.

Berndes G, Hoogwijk M, Van den Broek R. (2003) The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. Biomass and Bioenergy. 25:1-28.

Björn P, Norbert K, Paula RH (2009) The impact of fossil fuels greenhouse gas emissions, environmental consequences and socio-economic effects. Energy Research Architecture. 57-83.

Bréda NJJ (2003) Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany. 392:2403-2417.

Broeckx LS, Verlinden MS, Ceulemans R (2012a) Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populus* trees in Flanders (Belgium): Effects of genotype and former land use. Biomass and Bioenergy. 42:151-163.

Broeckx LS, Verlinden MS, Vangronsveld, Ceulemans R (2012b) Importance of crown architecture for leaf area index of different *Populus* genotypes in a high-density plantation. Tree Physiology. 32:1214-1226

Brouwer R (1962) Distribution of dry matter in the plant. Netherlands Journal of Agricultural Science 10:361-376.

Bungart R, Hüttl RF (2001) Production of biomass for energy in post-mining landscapes and nutrient dynamics. Biomass and Bioenergy. 20:181-187.

Cannell MGR, Smith RI (1980) Yields of mini-rotation closely spaced hard woods in temperature regions: Review and appraisal. Forest Science. 26:415-428.

Ceulemans R (1990) Genetic variation in functional and structural productivity determinants in poplar Thesis Publishers, Amsterdam.

Ceulemans R, Deraedt W (1999) Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. Forest Ecology and Management. 121:9-23.

Ceulemans R, Mousseau M (1994) Effects of elevated atmospheric CO_2 on woody plants. New Phytologist. 127:425-446.

Cherubini F (2010) The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. Energy Conversion and Management. 7:1412-1421.

Commission of the European Communities (2009) On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives. 140:16-62 L140/62. http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF.

Cook J, Beyea J (2000). Bioenergy in the United States: progress and possibilities. Biomass and Bioenergy. 18:441-455.

Corseuil HX, Moreno FN (2001) Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended gasoline. Water Research. 35:3013-3017.

Cuin TA, Bose J, Stefano G, Jha D, Tester M, Mancuso S, Shabala S (2011) Assessing the role of root plasma membrane and tonoplast Na^+/H^+exchangers in salinity tolerance in wheat: *in planta* quantification methods. Plant, Cell & Environment. 34:947-961.

Curt T, Coll L, Prevosto B, Balandier P, Kunstler G (2005) Plasticity in growth, biomass allocation and root morphology ogy in beech seedlings as induced by irradiance and her baceous competition. Annals of Forest Science. 62:51–60.

Curtis PS, Wang X (1998) A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology. Oecologia. 113:299–313.

DesRochers A, Tremblay F (2009) The effect of root and shoot pruning on early growth of hybrid poplars. Forest Ecology and Management. 258:2062-2067.

Dickmann DI, Isebrands JG, Eckenwalder JE, Richardson J (2001) Poplar culture in North America. National Research Council of Canada. 3:91-109.

Dickmann DI, Stuart KW (1983) The culture of poplars in Eastern North America. Michigan State University Publications, East Lansing, Michigan. 91-114.

Dickson RE, Coleman MD, Riemenschneider DE (1998) Growth of five hybrid poplar genotypes exposed to interacting elevated CO_2 and O_3. Canadian Journal of Forest Research. 28:1706–1716.

Dillen SY, Njakou Djomo SN, Al Afas N, Vanbeveren S, Ceulemans R (2013) Biomass yield and energy balance of a short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years. Biomass and Bioenergy. 56:157-165.

Dillen SY, Rood SB, Ceulemans R (2010) Growth and physiology. In. Genetics and Genomics of *Populus*, Jansson S, Bhalerao R, Groover A (eds.), Plant Genetics and Genomics. Crops and Models, Springer Science Business Media. 8:39-57.

Dillen SY, Vanbeveren S, Al Afas N, Laureysens I, Croes S, Ceulemans R (2011) Biomass production in a 15-year-old poplar short-rotation coppice culture in Belgium. Biomass and Energy Crops Aspects of Applied Biology. 112.

Duursma RA, Mäkelä A (2007) Summary models for light interception and light-use efficiency in non-homogeneous canopies. Tree Physiology. 27:859–870.

Ericsson T (1984) Root biomass distrubition in willow stands grown on bog. In Ecology and Management of Forest Biomass Production Systems. K.L. Perttu (ed.) Department of Ecology and Environment. Researcher, Swedish University of Agricultural Sciences. Report 15. 335-348.

Ericsson T, Kahr M (1993) Growth and nutrition of birch seedlings in relation to potassium supply rate. Trees. 7:78-85.

Ericsson T (1994) Nutrient dynamics and requirements of forest crops. New Zealand Journal of Forestry Science. 24:133-168.

Ericsson T (1995) Growth and shoot: root ratio of seedlings in relation to nutrient availability. Plant and Soil. 168-169:205-214.

Fang S, Xue J, Tang L (2007) Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns. Journal of Environmental Management. 85:672-679.

Friend AL, Scarascia-Mugnozza GE, Isebrands J G, Heilman PE (1991) Quantification of two-year-old hybrid poplar root systems: morphology, biomass, and C distribution. Tree Physiology. 8:109-119.

Galinski W, Goossens R, Ceulemans R, Impens I (1991) The wood productivity of two poplar clones (*Populus trichocarpa* × *Populus deltoides*) as affected by stocking and age. Biomass and Bioenergy. 1:233–239.

Gielen B, Calfapietra C, Claus A, Sabatti M, Ceulemans R (2002) Crown architecture of *Populus* spp. Is differentially modified by free air CO_2 enrichment (POPFACE). New Phytologist. 153:91–99.

Gielen B, Ceulemans R (2001) The likely impact of rising atmospheric CO_2 on natural and managed *Populus*: a literature review. Environmental Pollution. 115:335-358.

Gifford RM, Evans LT (1981) Photosynthesis, carbon partitioning and yield. Annual Review of Plant Physiology. 32:485–509.

Hallé F, Oldeman RAA, Tomlinson PB (1978) Tropical trees and forests: an architectural analysis. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 441.

Hansen EA (1988) Irrigating short rotation intensive culture hybrid poplars. Biomass. 16:237-250.

Hansen EA (1991) Poplar woody biomass yields: a look to the future. Biomass and Bioenergy. 1: 1-7.

Hansen E, Strong T (1993) Hybrid poplar spacing/productivity relations in short rotation intensive culture plantations. Biomass and Bioenergy. 4:255-261.

Harmer R (1995) Management of Coppice Stools. Research Division of the Forestry Authority.

Hastings A, Clifton-Brown J, Wattenbach M, Mitchell CP, Stampfl P, Smith P (2009) Future energy potential of Miscanthus in Europe. Global Change Biology Bioenergy. 1:180–196.

Hauk S, Knoke T, Wittkopf S (2014) Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. Renewable and Sustainable Energy. 29:435-448.

Heilman PE, Ekuan G, Fogle D (1994) Above- and below-ground biomass and fine roots of 4-year-old hybrids of *Populus trichocarpa* × *Populus deltoides* and parental species in short-rotation culture. Canadian Journal of Forest Research. 24:1186-1192.

Heilman PE, Hinckley TM, Roberts DA, Ceulemans R (1996) Production physiology. In biology of populus and its implications for management and conservation. NRC research press, Ottawa, ON. 459-489.

Heilman PE, Stettler RF (1985) Genetic variation and productivity of *Populus trichocarpa* and its hybrids. II. Biomass production in a 4-year plantation. Canadian Journal of Forest Research. 15:384-388.

Heller MC, Keoleian AG, Volk TA (2003). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. Biomass and Bioenergy. 25:147-265.

Herve C, Ceulemans R (1996) Short rotation coppiced vs. non-coppiced poplar a comparative study at two different field sites. Biomass and Bioenergy 11:139-150.

Hinckley TM, Ceulemans R, Dunlap JM, Figliola A, Heilman PE, Isebrands JG, Scarascia-Mugnozza G, Schulte PJ, Smit B, Stettler RF, Van Volkenburgh E, Wiard BM (1989) Physiological, morphological and anatomical components of hybrid vigor in *Populus.* In: Kreeb KH, Richter H, Hinckley TM (Eds.) Structural and Functional Responses to Envıronmental Stresses. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, 199-217.

Isebrands JG, Karnosky DF (2001) Environmental benefits of poplar culture. Poplar culture in North America. NRC Research Press Part A: 207-218.

Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED (1997) A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. The National Academy of Sciences of the USA. 94:7362–7366.

Janssens IA, Mousseau M, Ceulemans R (2000) Crop ecosystem responses to global climate change: tree crops. Climate Change and Global Crop Productivity, 245–270. CAB International, Wallingford, UK

Janssens IA, Sampson DA, Curiel-Yuste J, Carrara A, Ceulemans R (2002) The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. Forest Ecology Management. 168:231–240.

Kabba BS, Knight JD, Van Rees KCJ (2007) Growth of hybrid poplar as affected by dandelion and quackgrass competition. Plant and Soil. 298:203–217.

Karacic A, Verwijst T, Weih M (2003) Above-ground Woody Biomass Production of Short-rotation *Populu*s Plantations on Agricultural Land in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research. 18:427-437.

Kim H-S, Palmroth S, Thérézien M, Stenberg P, Oren R (2011) Analysis of sensitivity of absorbed light and incident light profile to various canopy architecture and stand conditions. Tree Physiology. 31:30–47

Klass DL (1998) Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals: Historical Energy Consumption Patterns. Academic Press. 2:24-28.

Krzyzaniak M, Stolarski MJ, Waliszewska B, Szczukowski S, Tworkowski J, Zaluski D, Snieg M (2014) Willow biomass as feedstock for an integrated multi-product biorefinery. Industrial Crops and Products. 58:230-237.

Kuzovkina YA, Volk TA (2009). The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology. Ecological Engineering. 35:1178-1189.

Labrecque M, Teodorescu TI (2001) Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar nutrient status of two willow species grown under SRIC in southern Quebec (Canada). Forest Ecology and Management. 150:223-239.

Labrecque M, Teodorescu TI (2005) Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). Biomass and Bioenergy. 29:1-9.

Laureysens I, Bogaert J, Blust R, Ceulemans R (2004) Biomass production of 17 poplar clones in a short rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristic. Forest Ecology and Management. 187:295-309.

Laureysens I, Casella E, Deraedt W, Ceulemans R (2001) High-density coppice culture of poplar: Clonal differences in growth, mortality and biomass yield after a three year rotation. 1st World conference on Biomass for Energy and Industry. 1:459-462.

Laureysens I, Deraedt W, Indeherberge T, Ceulemans R (2003) Population dynamics in a 6-year old coppice culture of poplar. I. Clonal differences in stool mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production. Biomass and Bioenergy. 24:81-95.

Ledin S (1996) Willow wood properties, production and economy. Biomass and Bioenergy. 11:75-83.

Liberloo M, Calfapıetra C, Lukac M, Godbold D, Bın luo Z, Polle A, Hoosbeek MR, Kull O, Marek M, Raines C, Rubino M, Taylor G, Scarascia-Mugnozza G, Ceulemans (2006) Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy *Populus* plantation increases in a future. Global Change Biology. 12:1094-1106.

Linder S (1995) Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce Ecological Bulletins. 44:178–190.

Macpherson G (1995) Home-grown energy from short-rotation coppice. Ipswich: Farming press books. 214.

Marmiroli M, Pietrini F, Maestri E, Zacchini M, Marmiroli N, Massacci A (2011) Growth, physiological and molecular traits in *Salicaceae* trees investigated for phytoremediation of heavy metals and organics. Tree Physiology. 00:1-16.

Marron N, Ceulemans R (2006) Genetic variation of leaf traits related to productivity in a *Populus deltoides* ×*Populus nigra* family. Canadian Journal of Forest Research. 36:390-400.

Matthews R, Robinson R, Abbott S, Fearis N (1994) Modelling of Carbon and Energy Budgets of Wood Fuel Coppice Systems. Technical Report ETSU B/W5/00337/REP,

Mensuration Branch, Forestry Commission, for the Energy Technology Support Unit, Department of Trade and Industry, London, United Kingdom.

Monclus R, Dreyer E, Delmotte FM, Villar M, Delay D, Boudouresque E, Petit JM, Marron N, Bréchet C, Brignolas F (2005) Productivity, leaf traits and carbon isotope discrimination in 29 *Populus deltoides* x *P. nigra* clones. New Phytologist. 167:53-62.

Nelson ND (1984) Woody plants are not inherently low in photosynthetic capacity. Photosynthetica. 18:600-605.

Nielsen UB, Madsen Palle, Hansen JK, Nord-Larsen T, Nielsen A (2014) Production potential of 36 poplar clones grown at medium length rotation in Denmark. Biomass and Bioenergy. 64:99-109.

Nikièma P, Rothstein DE, Miller RO, Miller RO (2012) Initial greenhouse gas emissions and nitrogen leaching losses associated with converting pastureland to short-rotation woody bioenergy crops in northern Michigan, USA. Biomass and Bioenergy. 39:413-426.

Nissim WG, Voicu A, Labrecque M. (2014).Willow short-rotation coppice for treatment of polluted groundwater. Ecological Engineering. 62:102-114.

Njakou Djomo S, El Kasmioui O, Ceulemans R (2011) Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: a review. Global Change Biology Bioenergy 3:181-197.

Norby RJ (1994) Issues and perspectives for investigating root responses to elevated atmospheric carbon dioxide. Plant and Soil. 165:9–20.

Norby RJ, Wullschleger SD, Gunderson CA (1999) Tree responses to rising CO_2 in field experiments: implications for the future forest. Plant, Cell and Environment. 22:683–714.

Oh TH, Pang SY, Chua SC (2010) Energy policy and alternative energy in Malaysia: Issues and challenges for sustainable growth. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14:1241-1252.

Orlović S, Guzina V, Krstić B, Merkulov L (1998) Genetic variability in anatomical, physiological and growth characteristics of hybrid poplar (*Populus x euramericana* DODE (GUINIER)) and eastern cottonwood (*Populus deltoides* BARTR.) clones. Silvae Genetica. 47:183–190.

Östman G (1994). Cadmium in Salix - a study of the capacity of Salix to remove cadmium from arable soils. Environmental Sciences. 27:153-155.

Ostonen I, Lõhmus K, Pajuste K (2005) Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle- aged Norway spruce stand: comparison of soil core and ingrowth core methods. Forest Ecology and Management. 212:264-277.

Pallardy SG, Gibbins DE, Rhoads JL (2003) Biomass production by two-year-old poplar clones on floodplain sites in the Lower Midwest, USA. Agroforestry Systems. 59:21-26.

Palmer MM, Forrester JA, Rothstein DE, Mladenoff DJ (2014) Establishment phase greenhouse gas emissions in short rotation woody biomass plantations in the Northern Lake States, USA. Biomass and Bioenergy. 62:26-36.

Pearsall WH (1923) Studies in growth. IV. Correlations in development. Annals of Botany. 37:261-275.

Peart R, Curry R, Jones J, Boote K, Allen L. Reducing the rate of carbon dioxide build up with biomass fuel under climate change. In. Proceeding of the first biomass conference of Americans, Burlington, 1993. p. 1507-17.

Pellis A, Laureysens I, Ceulemans R (2004) Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar I. Clonal differences in leaf characteristics in relation to biomass production. Biomass and Bioenergy. 27:9-19.

Persson H (1991) Measuring growth and development of roots. In: Lassoie JP, Hinckley TM (eds) Techniques and approaches in forest tree ecophysiology. CRC Press, Inc., Boca Raton. 477–501.

Perttu KL (1995). Ecological, biological balances and conservation. Biomass and Bioenergy. 9:107-116.

Pontailler JY, Ceulemans R, Guittet J, Mau F (1997) Linear and non-linear functions of volume index to estimate woody biomass in high density young poplar stands. Annals of Forest Science. 54:335-345.

Quinkenstein A, Pape D, Freese D, Schneider BU, Hüttl RF (2012) Biomass, carbon and nitrogen distrubution in living woody plant parts of Robinia ppseudoacacia L. growing on reclamation sites in the mining region of lower Lusatia (Northeast Germany). International Journal of Foresty Research. 891798:4.

Rogers HH, Runion GB, Krupa SV (1994) Plant responses to atmospheric CO_2 enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. Environmental Pollution. 83:155–189.

Rowe RL, Street NR, Taylor G (2009) Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13:271-290.

Ruess RW, Van Cleve K, Yarie J, Viereck LA (1996) Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. Canadian Journal of Forest Research. 26:1326-1336.

Samson R, Girouard P, Zan C, Mehedi B, Martin R, Henning J (1999) The implications of growing short-Rotation Tree Species for Carbon Sequestration in Canada. Resource Efficient Agricultural Production, Canada. 3-74.

Scarascia-Mugnozza GE, Isebrands JG, Hinckley TM (1989) Dynamics of light interception, leaf area and biomass production in *Populus* clones in the establishment year. Annals of Forest Science. 46:515-518.

Scarascia-Mugnozza GE, Ceulemans R, Heilman PE, Isebrands JG, Stettler RF, Hinckley TM (1997) Production physiology and morphology of *Populus* species and their hybrids grown

under short rotation. II Biomass components and harvest index of hybrid and parental species clones. Canadian Journal of Forest Research. 27: 285-294.

Schlamadinger B, Apps M, Bohlin F, Gustavsson L, Jungmeier G, Marland, Pingoud K, Savolainen I (1997) Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil enery systems. Biomass and Bioenergy. 13:359-375.

Shank D (1945) Effects of phosphorus, nitrogen and soil moisture on top-root ratios of inbred and hybrid maize. Journal of Agricultural research. 70:365-367.

Sims REH, Maiava TG, Bullock BT (2001) Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand. Biomass and Bioenergy. 20:329-335.

Stolarski MJ, Szczukowski S, Tworkowski J, Klasa A (2011) Willow biomass production under conditions of low-input agriculture on marginal soils. Forest Ecology and Management. 262:1558-1566.

Taylor FW (2002) The greenhouse effect and climate change revisited. Reports on Progress in Physics. 65: 1-25.

Tharakan PJ, Volk TA, Nowak CA, Abrahamson LP Morphological traits of 30 willow clones and their relationship to biomass production. Canadian Journal of Forest Research. 35:421–431.

Thomas B, Richardson J (2006) Poplar genomics to poplar production: Bridging the gap for best use of our resources and knowledge. 6-7.

Thornley JHM (1972) A balanced quantitative model for root:shoot ratios in vegetative plants**.** Annals of Botany. 36:431-441.

Trnka M, Trnka M, Fiolová J, Koutecký V, Fajman M, Žalud Z, Hejduk S (2008) Biomass production and survival rates of selected poplar clones grown under a short-rotation on arable land. Plant, Soil and Environment. 54:78-88.

Umar MS, Jennings P, Urmee T (2014) Generating renewable energy from oil palm biomass in Malaysia: The Feed-in Tariff policy framework. Biomass and Bioenergy. 62:37-46.

Verlinden MS, Broeckx LS, Van Den Bulcke J, Van Acker J, Ceulemans R (2013) Comparative study of biomass determinants of 12 poplar (*Populus*) genotypes in a high-density short-rotation culture. Forest Ecology and Management. 307:101-111.

Vitousek PM (1991) Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide. Journal of Environmental Quality. 20:348–354.

Vogt KA, Persson H (1991) Measuring growth and development of roots. In: Lassoie JP, Hinckley TM (eds) Techniques and approaches in forest tree ecophysiology. 477–501.

Volin JC, Reich PB (1996) Interaction of elevated CO_2 and O_3 on growth, photosynthesis and respiration of three perennial species grown in low and high nitrogen. Physiologia Plantarum. 97:674–684.

Wolbert-Haverkamp M, Musshoff O (2014) Are short rotation coppices an economically interesting form of land use? A real options analysis. Land Use Policy. 38:163-174.

Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (2002) Plant Roots: The Hidden Half, Marcel Dekker, New York.

Welham C, Van Rees K, Seely B, Kimmins H (2007) Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: weed competition and fertilizer effects. Canadian Journal of Forest Research. 37:356–370.

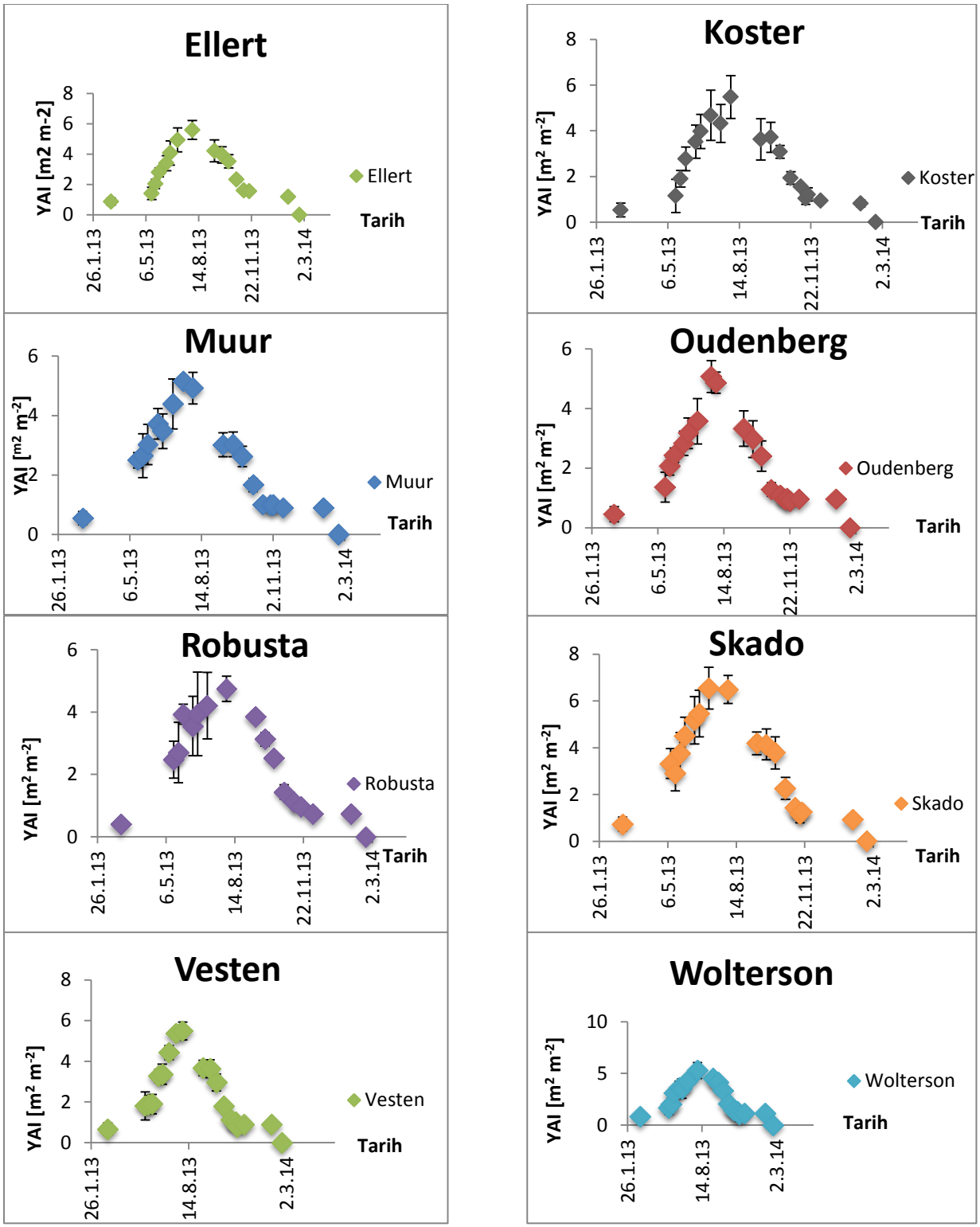
White EM (2010) Woody Biomass for Bioenergy and Biofuels in the United States: a briefing paper. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-825. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1.

Wullschleger SD, Norby RJ, Gunderson CA (1997) Forest trees and their response to atmospheric CO2 enrichment: a compilation of results. Advances in Carbon Dioxide Effects Research. 61:79–100.

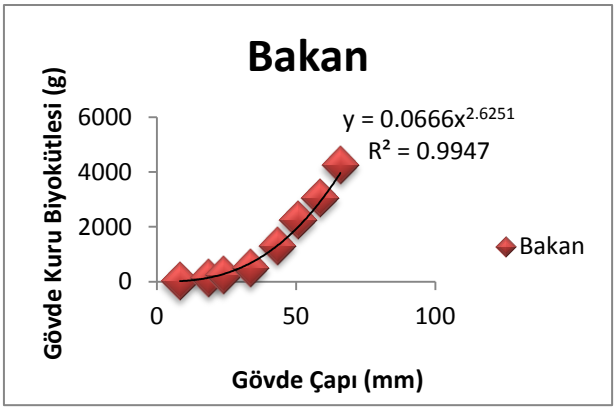
Zhang H, Morison JI, Simmonds LP (1999) Transpiration and water relations of poplar trees growing close to the water Table. Tree Physiology. 19:563-573.

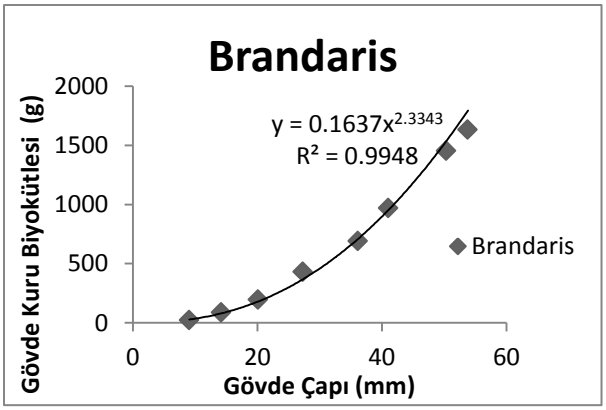
Zhou X, Ge ZM, Kellomaki S, Wang KY, Peltola H, Martikainen P (2011) Effects of elevated CO2 and temperature on leaf characteristics, photosynthesis and carbon storage in aboveground biomass of a boreal bioenergy crop (*Phalaris arundinacea* L.) under varying water regimes. Global Change Biology Bioenergy. 3:223–234.

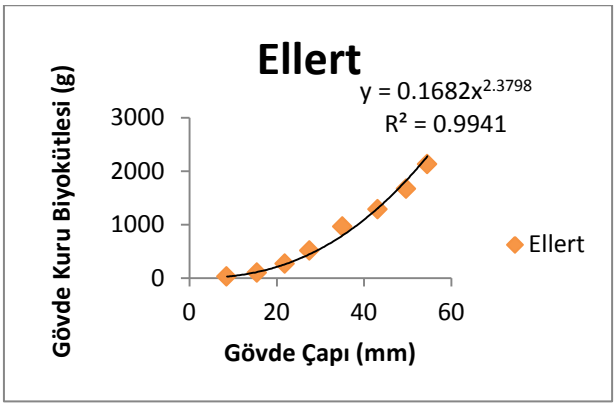
EKLER

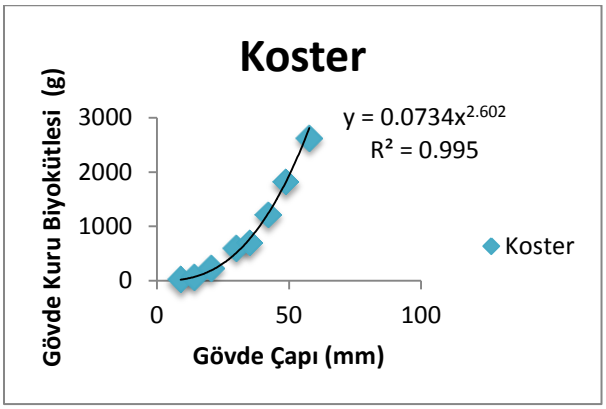


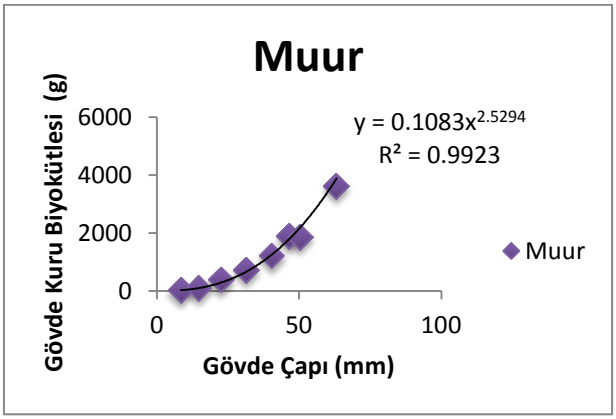
Ek A: Seçilmiş kavak genotipleri için ikinci büyüme yılı ikinci rotasyon zamanındaki YAI değerlerini gösteren sezonsal gelişim (indirekt metot ile ölçüldü). Dağıtım noktaları ortalama değerleri, hata çubukları ise genotiplerin ortalama YAI değerlerinin standart sapmalarını göstermektedir.

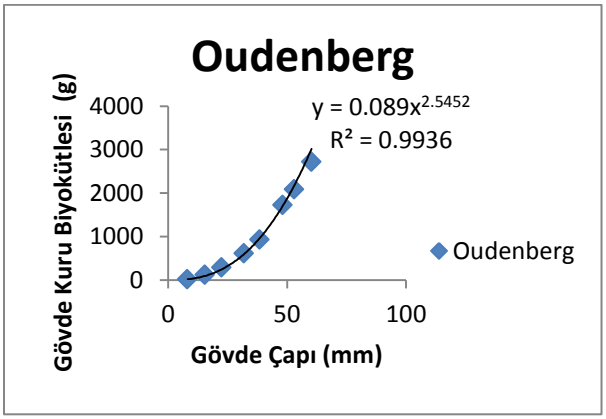


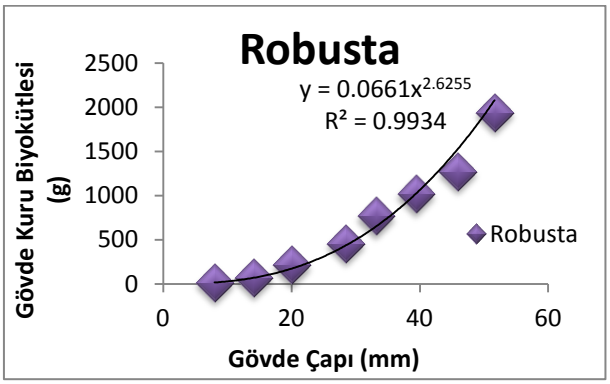


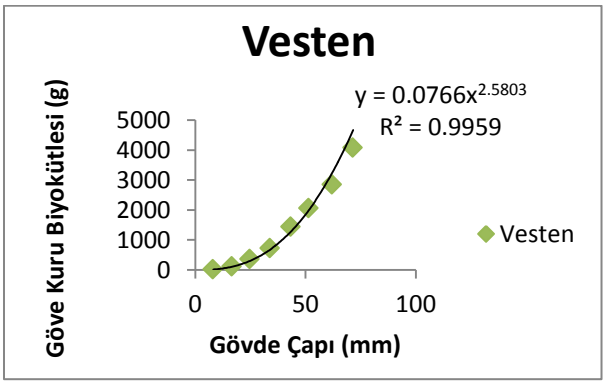












Ek B: Kavak genotiplerinin gövde kuru ağırlığı ve gövde çapı (22 cm'de) arasındaki allometrik ilişkileri. Regresyon denklemi gösterildi.