




Yüksek hassasiyetli dendrometreler kullanılarak *Cedrus libani*, *Juniperus excelsa* ve *Pinus brutia*'da radyal büyüme ve ağaç su açığının değerlendirilmesi

Aylin Güney^{a,*} , Fatma Gökçe Cankara^b , Burak Bahar^a 

Özet: Yüksek hassasiyetli dendrometrelerin sürekli ölçümlerinden elde edilen veriler, radyal gövde büyümesi ve ağaç su ilişkileri hakkında yüksek çözünürlükte bilgi sunar. 2022 yılında, "DenTRo" girişiminin bir parçası olarak Antalya'da iki uzun vadeli izleme sahası kurulmuştur: Elmalı Sedir Araştırma Ormanı'ndaki bir *Cedrus libani* A. Rich (Toros sediri)- *Juniperus excelsa* (Boylu ardıç) karışık meşçeresi ve Bük Lütüf Büyükyıldırım Araştırma Ormanı'ndaki saf bir *Pinus brutia* (kızılcım) meşçeresinde saatlik gövde yarıçap değişimlerini ölçmek için nokta dendrometreler kullanılmıştır. Bu çalışma, 2022 büyüme sezonunu kapsayan gövde yarıçap değişimi ölçümlerinin ilk sonuçlarını sunmaktadır. Radyal büyümenin yıl içerisindeki seyri Gompertz büyüme fonksiyonu ile modellenmiştir. Ayrıca, radyal gövde büyümesi (GRO) ve gövde çapının daralmasına sebep olan ağaç su açığı (TWD) saatlik gövde yarıçap değişimi ölçümlerinden hesaplanmıştır. GRO ve TWD'nin yıl içerisindeki seyri türler arasında karşılaştırılmıştır ve korelasyon analizi ile meteorolojik değişkenlerle ilişkilendirilmiştir. Kızılcımda radyal gövde büyümesi, sedir ve boylu ardıça göre yaklaşık üç hafta önce, Nisan ayının ilk haftasında başlamıştır. Kızılcım ayrıca maksimum GRO değerlerine de daha erken ulaşmıştır. Her üç türde de ana gövde büyümesi temmuz ayından önce gerçekleşmiş, ardından artan TWD ile ölçüldüğü üzere hepsi uzun süreli su kısıtlamaları yaşamıştır. Bağıl nem sedir ve boylu ardıça GRO üzerinde daha güçlü bir pozitif etkiye sahipken, kızılcımda GRO ve TWD sırasıyla yağış ve yüksek sıcaklıklarla güçlü pozitif korelasyon göstermiştir. Ağaçların iklim değişikliğinden nasıl etkilendiği hakkında daha ayrıntılı ve kapsamlı bilgiler edinilmesine olanak sağlayabilmek için, farklı orman ekosistemlerinde dendrometre gibi ekofizyolojik yöntemler kullanan uzun süreli izleme sahalarının kurulmasına ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: Boylu ardıç, Gövde yarıçap değişimi, Kambiyum faaliyeti, Kızılcım, Kuraklık stresi, Toros sediri

Assessment of radial growth and tree water deficit in *Cedrus libani*, *Juniperus excelsa*, and *Pinus brutia* using high-precision dendrometers

Abstract: Data obtained from continuous measurements of high-precision dendrometers offer information about radial stem growth and tree water relations in high resolution. In 2022, two long-term monitoring sites were established in Antalya as part of the "DenTRo" initiative: Point dendrometers were installed to measure stem radius changes in a mixed *Cedrus libani* (Taurus cedar)-*Juniperus excelsa* (Greek juniper) stand in the Elmalı Cedar Research Forest and in a pure *Pinus brutia* (Turkish pine) stand in the Bük Lütüf Büyükyıldırım Research Forest. This work presents the first results of stem radius change measurements covering the growing season of 2022. Seasonal dynamics of radial growth were modeled by Gompertz functions. Further, radial stem growth (GRO) and tree water deficit-induced stem shrinkage (TWD) were extracted from hourly stem radius change measurements, investigated for their patterns, and correlated with environmental variables. Radial stem growth in Turkish pine started in the first week of April, approximately three weeks earlier than cedar and juniper. Maximum GRO was also reached earlier in Turkish pine. In all three species, main stem growth happened before July after which all experienced longer periods of water limitations as measured by increasing TWD. Relative air humidity had a stronger positive effect on GRO in cedar and juniper, while in pine GRO and TWD were strongly positively correlated with precipitation and high temperatures, respectively. To provide more detailed and comprehensive information on how trees are affected by climate change, long-term monitoring sites in different forest ecosystems using ecophysiological methods such as dendrometers are needed.

Keywords: Greek juniper, Stem radius change, Cambial activity, Turkish pine, Drought stress, Taurus cedar

1. Giriş

Ağaçların büyüme davranışı ve çevresel koşullara tepkisi üzerine yapılan ekofizyolojik çalışmalar, ağaç türlerinin ve ormanların gelecekte beklenen iklim senaryoları altında artan sıcaklıklara ve su kıtlığına nasıl tepki verebileceğini tahmin etmeye yardımcı olmaktadır (Anderegg vd., 2015; Rigling vd., 2013; Salomón vd., 2022). Gelecekteki iklim değişikliği etkilerini daha iyi anlama ve orman ekosistemlerinin buna

nasıl uyum sağlayabileceğini değerlendirme açısından da bu çalışmalar ormancılık için kritik öneme sahiptir. Ekofizyolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları; ağaç su durumunun bir göstergesi olan ksilem su potansiyelini ölçen basınç odası tekniği (Scholander vd., 1965), fotosentez cihazları gibi ağaçların gaz alış verişini ve transpirasyonunu ölçebilen sistemler (Deligöz vd., 2019), transpirasyonu belirlemek için bitki özsu akış ölçüm yöntemleri (Özçelik vd., 2016), ksilem

^a İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, İzmir, Türkiye

^b Batı Akdeniz Ormanlık Araştırma Enstitüsü, Antalya, Türkiye

* **Corresponding author** (İletişim yazarı): aylin.guney@ikcu.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 05.09.2023, **Accepted** (Kabul tarihi): 17.03.2024



Citation (Atıf): Güney, A., Cankara, F.G, Bahar, B., 2024. Yüksek hassasiyetli dendrometreler kullanılarak *Cedrus libani*, *Juniperus excelsa* ve *Pinus brutia*'da radyal büyüme ve ağaç su açığının değerlendirilmesi. Turkish Journal of Forestry, 25(2): 166-175.
DOI: [10.18182/tjf.1355275](https://doi.org/10.18182/tjf.1355275)

kanallarında emboli oluşması ve bu eşik değerlerinin hidrolik yöntemleriyle belirlenmesi (Balekçoğlu vd., 2023) ve odun ve kabuk oluşumunu hücre bazında izlenebilmesini sağlayan anatomik yöntemlerdir (Rossi vd., 2006). Değişen çevre koşullarına karşı ağaç tepkilerini araştırmanın diğer bir yolu ise yüksek hassasiyetli dendrometreler kullanılmasıdır.

Yüksek hassasiyetli dendrometreler genelde ağaçların gövdesine takılmakta ve gövde çapındaki değişimleri mikrometre boyutunda ve yüksek zamansal çözünürlükte (genellikle 10 dakika- 1 saat arasında) sürekli olarak izleyerek ağaçların radyal büyüme ve içsel su durumu hakkında bilgi sağlamaktadır (Zweifel vd., 2000). Gövde çapı genişleme ve daralma dönemleri boyunca günlük olarak değişmektedir (Herzog vd., 1995). Çaptaki daralmalar genellikle öğle saatlerinde, transpirasyon oranlarının yüksek olup bitki kökleri ile alınan suyun transpirasyonla verilen suyu karşılamadığı durumlarda görülmektedir. Gece saatlerinde ise transpirasyon hızı azalırken bitki kökleri tarafından alınan suyla birlikte gövde çapı tekrar genişler. Dendrometrelerin çaptaki değişimleri ölçmek için kullandığı çalışma prensibi doğrusal potansiyometrelere veya doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (LVDT)'e dayanmaktadır (Clonch vd., 2021). Gövde genişleyip daraldıkça, sensörlere bir sinyal iletilmektedir. Günümüzde "nokta dendrometre" (point dendrometer) ve "şerit dendrometre" (band dendrometer) olmak üzere iki farklı tip dendrometre mevcuttur. İki tip arasındaki temel fark nokta dendrometrelerin gövdenin tek bir noktasında yarıçap değişimlerini ölçmesi, diğerinin ise ağacın bütün gövdesini sararak çevresel çap değişimlerini ölçmesidir. Bu tip şerit dendrometre ile elde edilen veriler genelde veri analizi aşamasında çap hatta yarıçapa dönüştürülmektedir.

Bu çalışmada nokta dendrometreler kullanılarak "gövde yarıçap değişimleri" (GYD) (stem radius changes) ölçülmüştür. Bu GYD farklı olayların bir kombinasyonundan oluşmaktadır: (1) elastik dokuların (kabuk, kambium ve olgunlaşmamış ksilem) geri dönüşümlü daralması (shrinkage) ve genişlemesi (swelling); (2) iletken ksilemin geri dönüşümlü daralması ve genişlemesi; (3) geriye dönüşümü olmayan gövde büyümesi (odun ve kabuk artımları dahil); ve (4) termal genleşme ve büzülme (Daudet vd., 2004; Downes vd., 1999; Herzog vd., 1995; Zweifel vd., 2000). Geriye dönüşümü olan süreçler (1+2) esas olarak ağaç içindeki su iletim dinamikleri tarafından belirlenir. Bu nedenle, gövde daralması ve genişleme dinamikleri, kuraklık stresini (Güney vd., 2020; Vieira vd., 2013; Zweifel vd., 2000), tepe su durumunu (Dietrich vd., 2018), bitki hidroliğini (Daudet vd., 2004; Ehrenberger vd., 2012) ve hatta osmoregülasyonu (Barraclough vd., 2019; Lazzarin vd., 2018) ölçmek için kullanılabilir. Gövde çapındaki azalmalarına sebep olan "ağaç su açığı" (TWD= tree water deficit) transpirasyon ve su alımı arasındaki dengesizlik nedeniyle elastik dokulardan su kaybını nicelleştirir ve birkaç gün süren kuraklık dönemlerinde de artan su açığını yansıtır (Dietrich vd., 2018). Kuraklık stresi için bir göstere olarak kullanılabilir (Zweifel vd., 2005). Yüksek hassasiyetli dendrometre çalışmalarında (Güney vd., 2020; Salomón vd., 2022; Zweifel vd., 2016) geriye dönüşümü olmayan gövde büyümesi (3) genellikle GRO (büyüme) olarak adlandırılmaktadır ve yalnızca radyal boyut artışını (radial size increase) içerir. Büyümeye atfedilebilecek diğer süreçleri (örn. odunlaşma süreçleri) içermez (Cuny vd., 2015).

Hem TWD hem de GRO yüksek çözünürlüklü dendrometre verilerinden hesaplanabilir ve ağacın sıcaklık, toprak su içeriği ve yağış gibi çevresel koşullardaki kısa vadeli değişikliklere verdiği tepki hakkında bilgi sağlamaktadır (Deslauriers vd., 2007; Güney vd., 2019). GYD'nin zaman serileri bir büyüme mevsimi boyunca gövde radyal büyümesinin seyirlerini ve kritik zamanlamalarını (örneğin, büyümenin başlangıcı, maksimum büyüme hızının zamanlaması) tanımlamak için Gompertz fonksiyonu gibi büyüme modelleri ile de modellenabilir (Rossi vd., 2003; 2006). Böylece, yüksek hassasiyetli dendrometrelerin kullanımı günlük gövde yarıçap değişimlerinin, mevsimsel gövde büyüme seyirlerinin ve ağaç su ilişkilerinin izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Son yıllarda, bu konuda önemli uluslararası birçok çalışma yayınlanmış olup aşırı iklim koşullarının ağaç büyümesi üzerindeki etkileri hakkında yeni bilgiler sağlanmıştır (Scharnweber vd., 2020; Martínez-Sancho vd., 2022). Örneğin Salomón vd. (2022) Avrupa çapında, 53 alanda ve 21 farklı ağaç türünde yapılan çalışmada şiddetli bir sıcak hava dalgasının ağaç büyümesi/kuruması üzerindeki etkilerini ve aynı zamanda hangi türlerin aşırı iklim koşullarına karşı daha dayanıklı olduğunu belirlemeye çalışmışlardır. Bu gibi çalışmalar ormancılıkta ağaçların büyüme ve gelişimini izleme, su kullanımı ölçümleri, iklim değişikliği araştırmaları, yangın sonrası zarar tespiti gibi farklı birimler tarafından çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Drew ve Downes 2009; Dukat vd., 2024). Bu sayede ormancılıkta sürdürülebilir kaynak yönetimi ve ekosistem sağlığını izleme konusunda etkili ve değerli birer araç olarak öne çıkmaktadır. Bu tür çalışmalar genelde kalıcı olarak kurulmuş sahalarda elde edilen uzun süreli dendrometre ölçümlerine dayanmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, bugüne kadar Türkiye'de dendrometre yöntemini uygulayan çalışma sayısı oldukça düşük (Akkemik vd., 2007; Güney vd., 2017) ve kalıcı olarak izlenmesine yönelik kurulmuş sahalardan yoktur. Dünyanın birçok ülkelerinde, özellikle de Avrupa ülkelerinde (örneğin İsviçre, Fransa, Almanya, Çek Cumhuriyeti), birkaç yıldır büyüme ve ağaç su açığı verilerini toplayan yüksek çözünürlüklü dendrometreler kullanılan kalıcı izleme sahalarının sayısı giderek artmaktadır. Bu uzun süreli izleme sahaları arasındaki dendrometre ağları da geniş bir mekânsal ölçekte analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır (Salomón vd., 2022). 2022 yılında tarafımızdan başlatılan "DenTRO" girişimi adı altında Türkiye'nin farklı orman ekosistemlerinde de uzun süreli izleme sahaları kurularak yüksek çözünürlüklü bir dendrometre ağı oluşturulması amaçlanmıştır. Bu çalışmada 2022 yılında Antalya'da kurulan ilk iki DenTRO sahasında ölçülen ilk yılın verileri analiz edilmiştir. Türkiye için önemli olan üç iğne yapraklı ağaç türü olan Toros sediri (*Cedrus libani* A. Rich), Boylu ardıç (*Juniperus excelsa* M. Bieb) ve Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.)'da radyal gövde büyüme dinamiklerini ve ağaç su açığını analiz etmek için yüksek çözünürlüklü nokta dendrometreler kullanılmıştır ve (i) üç tür arasında radyal gövde büyüme dinamiklerini karşılaştırmak ve (ii) gövde yarıçap değişimleri (GRO ve TWD) üzerindeki meteorolojik değişkenlerin (sıcaklık, bağıl nem, buhar basıncı açığı ve yağış) etkisini belirlemek amaçlanmıştır.

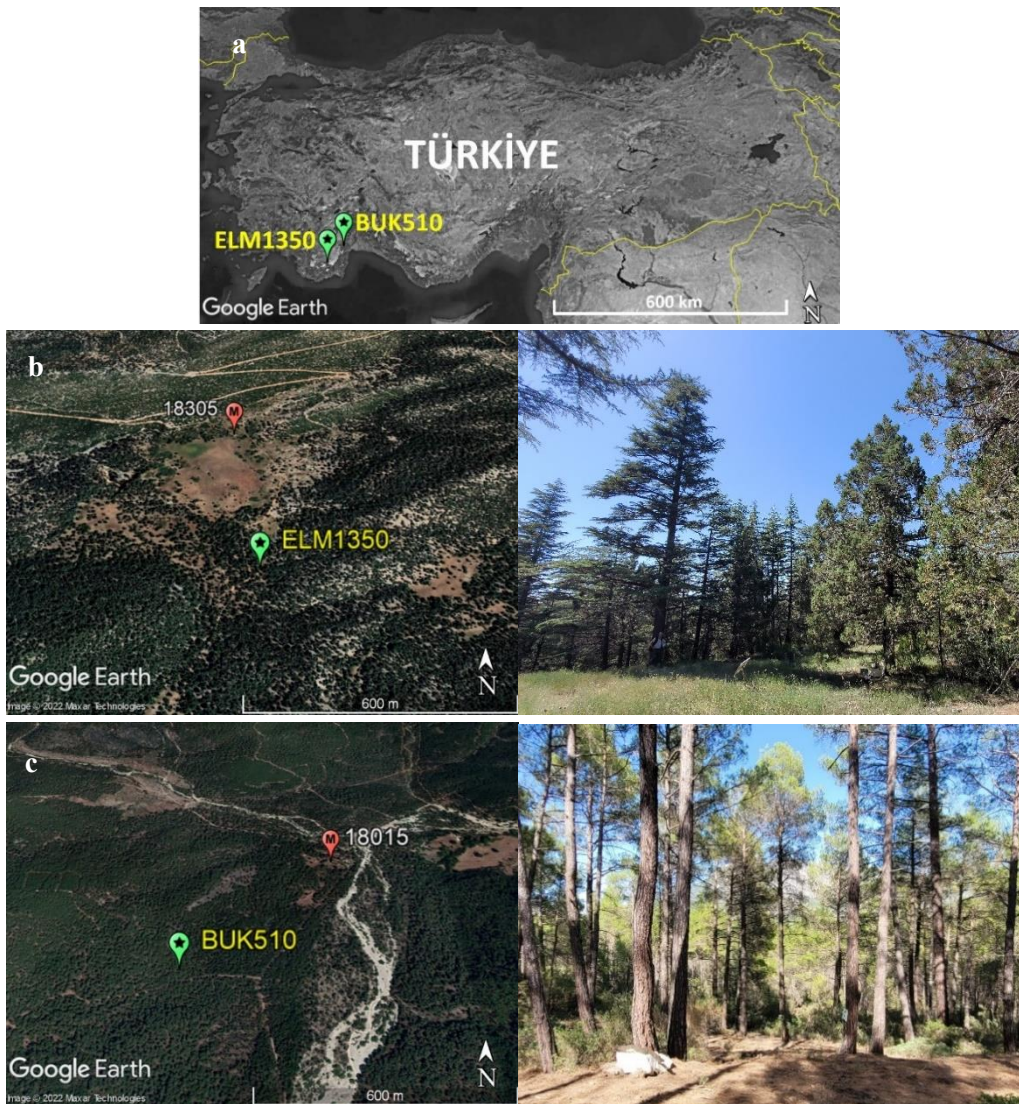
2. Materyal ve yöntem

2.1 Çalışma sahası ve ağaç seçimi

2022 yılı, şubat ayında Antalya'da iki çalışma sahası kurulmuştur. İlk çalışma sahası (ELM1350) Elmalı Sedir Araştırma Ormanı'nda ($36^{\circ}34'39.89''\text{K}$, $29^{\circ}59'22.44''\text{D}$), 1350 m yükseklikte, olgun bir doğal sedir-ardıç meşceresi içinde yer almaktadır (Şekil 1). Bu saha, yazları kurak ve kışları soğuk geçen Akdeniz dağ iklimi ile karakterize edilmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 7.4°C ve yıllık ortalama toplam yağış 725 mm 'dir (Başaran vd., 2008) ve yağışlar çoğunlukla kış aylarında gerçekleşmektedir. İkinci çalışma sahası (BUK510), BÜK Lütfi Büyükyıldırım Araştırma Ormanı'nda ($36^{\circ}57'56.58''\text{K}$, $30^{\circ}25'43.45''\text{D}$), 510 m yükseklikte, olgun ve saf bir kızılçam meşceresi içinde yer

almaktadır. Çalışma alanı, yazları sıcak ve kurak geçen yarı kurak bir iklim ile karakterize edilir. Yıllık ortalama sıcaklık 14.1°C ve yıllık ortalama toplam yağış 398 mm 'dir (Başaran vd., 2011).

Her iki sahada da ağaçlar, sahanın ortasına yerleştirilen kayıt cihazının (logger) etrafındaki yarıçapı 30 m 'lik dairesel bir alan içinde seçilmiştir. Görünür bir patojen ve zararlı hasarı ya da istilası olmayan ağaçlar seçilmiştir. Seçilen ağaçlarının boyları elektronik boy ölçer (Haglöf) ve çapları çap ölçer ile ölçülmüştür (Çizelge 1). Ağaç boyutları, çalışma sahaslarındaki orman meşceresini temsil etmektedir. Başlangıçta sensör ve cihaz sayısının az olması nedeniyle, dendrometreler üç kızılçam ağacına ve dörder sedir ve ardıç birelerine yerleştirilmiştir. Eylül 2022'de bu sayı her tür için altıya çıkarılmıştır.



Şekil 1. a) Antalya, Türkiye'deki "DenTRo" izleme sahaslarının konumu. b) ELM1350 izleme sahası Elmalı Sedir Araştırma Ormanı içinde, sedir-ardıç karışık meşceresinde yer almaktadır. c) BUK510 izleme sahası, BÜK Lütfi Büyükyıldırım Araştırma Ormanı içinde saf kızılçam meşceresinde yer almaktadır. 18305 ve 18015 Türkiye Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün meteoroloji istasyonlarını göstermektedir.

Meteorolojik veriler, çalışma sahalarına yakın meteoroloji istasyonlarından (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) alınmıştır. Meteoroloji istasyonları ile çalışma sahası arasındaki mesafe BUK510 için 670 m ve ELM1350 için 600 m'dir (Şekil 1). Analizlerimiz için günlük ortalama sıcaklık, günlük ortalama bağıl nem ve günlük toplam yağış kullanılmıştır (Şekil 2). Buhar basıncı açığının (VPD =vapor pressure deficit) günlük ortalamaları, sahaya özgü sıcaklık, bağıl nem ve hava basıncı değerlerinden hesaplanmıştır. Veriler Kasım 2022 başında elde edildiğinden, bu çalışmada kullanılan meteorolojik veriler 1 Ocak- 10 Kasım 2022 dönemini kapsamaktadır.

2.2 Radyal büyüme ve ağaç su açığının dendrometreler kullanılarak izlenmesi

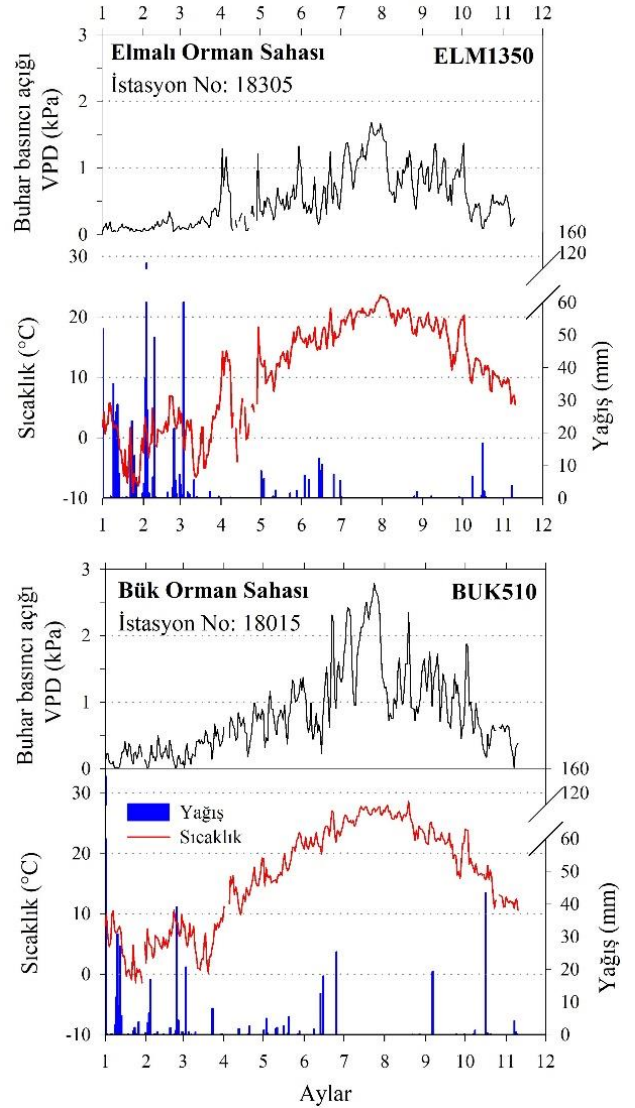
Gövde yarıçap değişimi (GYD) nokta dentrometreler (MMR 10_11 R5 K, MEGATRON Elektronik AG & Co., Almanya) kullanılarak kaydedilmiştir. Dendrometreler paslanmaz çelik çerçevelere monte edildikten sonra gövdenin göğüs hizasına ve kuzeye bakan tarafına takılmıştır (Şekil 3). Çelik çerçeveler, ksilemin yaklaşık 5 cm derinliğinde iki vida ile gövdeye tutturulmuştur (Herzog vd., 1995). Dendrometrenin başlığı, canlı dokuya zarar vermeden kabuğun büyük bir kısmı keski ile kaldırıldıktan sonra korteks yüzeyine yerleştirilmiştir (Zweifel vd., 2006). Dendrometreler alüminyum folyoyla sarılmış ve doğrudan güneş radyasyonundan ve yağıştan korumak için strafolla kaplanmıştır. Dendrometreler tarafından ölçülen gövde yarıçap değişimleri veri kaydediciler (Campbell CR23X Micrologger ve Loguino) kullanılarak 10 dakikada bir kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılan dentrometre verileri 2022 yılı şubat ayından kasım ayın sonuna kadar olan periyodu kapsamaktadır.

10 dakikada bir kaydedilen GYD verilerin saatlik ortalamaları hesaplandıktan sonra Zweifel vd. (2016)'nin konseptine dayalı olarak bu saatlik GYD verilerinden iki parametre hesaplanmıştır: (1) GRO= geriye dönüşümü olmayan gövde büyümesi (Şekil 4) ve (2) TWD= gövdenin daralmasına sebep olan ağaç su açığı. TWD, son maksimum gövde yarıçapı ile mevcut gövde yarıçapı arasındaki fark olarak hesaplanır. Sonuç olarak GRO, TWD'nin sıfır olduğu (GRO periyodu) ve gövde yarıçapının son maksimum gövde boyutunu (yarıçap olarak) aştığı dönemlerle sınırlıdır. Mutlak TWD değerleri ağaç büyüklüğü, kabuk kalınlığı ve esnekliği, odun özellikleri ve yerel çevre koşulları gibi bir dizi faktöre bağlıdır (Salomón vd., 2022; Zweifel ve Häsler, 2000). Bu nedenle, TWD verileri, türler arasındaki TWD seyirleri karşılaştırmak için normalize edilmiştir (=TWDn) (Brinkmann vd., 2016). Bu normalizasyon işlemi TWD verilerini 0 ve 1 arasında yeniden ölçekler. Normalleştirme, her bir ağaç için tüm TWD değerlerinin ilgili maksimum değere bölünmesiyle gerçekleştirilmiştir (bu değer, tüm ölçüm dönemi boyunca ölçülen mutlak maksimum değer %95'i olarak tanımlanmıştır). Normalleştirmeden sonra her tür için GRO ve TWDn'nin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 1. Çalışma sahalarındaki türlere göre seçilen ağaçların sayısı (n), çap ve boyları

Saha	ELM1350	BUK510	
Tür	Celi	Juex	Pibr
Sayı (n)	4 (6)	4 (6)	3 (6)
Çap (cm)	41.6±11.1	32.2 ± 14.7	32.4 ±2.8
Boy (m)	17.2±2.9	11.0 ± 2.8	19.3 ± 2.3

Celi: *Cedrus libani*; Juex: *Juniperus excelsa*; Pibr: *Pinus brutia*; Çap ve boy için verilen ortalama ve standart sapmalar bu analizler kapsamında kullanılan ağaçlar (n= 3-4) için geçerlidir. Parantez içindeki ağaç sayıları Eylül 2022'den itibaren geçerlidir.



Şekil 2. Çalışma sahalarında 2022 yılında ölçülen günlük ortalama sıcaklık, günlük ortalama buhar basıncı açığı (VPD) ve günlük toplam yağış



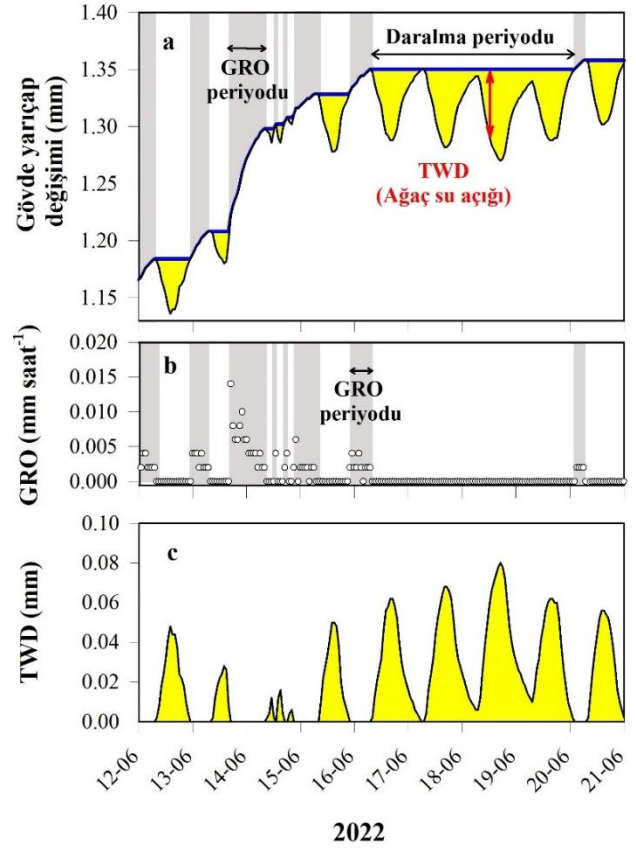
Şekil 3. Nokta dendrometrenin montaj prensibi. a) Dendrometre çelik bir çerçeve üzerine monte edilir ve ksilem içine iki vida ile gövdeye tutturulur. b) Kabuğun çoğunluğu kaldırıldıktan sonra gövdenin korteks yüzeyine dendrometrenin başlığı yerleştirilir

2.3. Büyüme dinamiklerinin modellenmesi

Radyal büyüme, odun oluşumu ve sürgün büyümesi gibi sınırlı büyüme süreçlerini modellemek için mevcut olan çeşitli sigmoid modeller arasında, esnekliği ve asimetric şekli nedeniyle Gompertz fonksiyonu en tercih edilenidir (Zeide, 1993; Rossi vd., 2003; Oberhuber vd., 2015; Ziaco vd., 2018). Radyal gövde büyüme dinamikleri, SigmaPlot yazılım paketinde (Systat Software, San Jose, CA, USA) bulunan nonlinear regresyon prosedürü kullanılarak Gompertz fonksiyonu (1) ile modellenmiştir (Şekil 5):

$$y = A \exp \left[- \exp (\beta - k t) \right] \quad (1)$$

Burada y büyümenin kümülatif toplamı, A yıllık toplam gövde yarıçapı artışı temsil eden üst yatay asimptotu, β x-ekseni konum parametresi, k eğrinin zaman ekseninde boyunca değişim oranı parametresi ve t yılın günü olarak zamandır (Cheng ve Gordon, 2000).

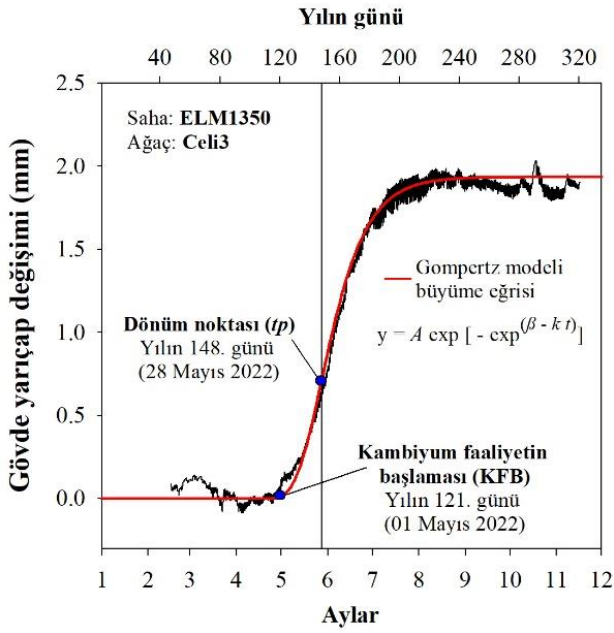


Şekil 4. Dendrometrelerle ölçülen a) gövde yarıçap değişimi verilerinden hesaplanan saatlik b) GRO (gövde büyümesi) ve c) TWD (ağaç su açığı). Üstteki mavi çizgi gövde yarıçapının son maksimumunu göstermektedir. GRO (gri gölgeli alanlar) periyodu dönemlerinde TWD (sarı gölgeli alanlar) sıfırdır.

Gompertz fonksiyonunun parametrelerinden, büyüme eğrisinin dönüm noktası $tp = \beta/k$ olarak hesaplanabilir ve GRO'nun maksimum hızı ulaştığı zamana karşılık gelmektedir. Ayrıca, yıllık halkanın tamamına yakın bir kısmının oluşması için gereken süre $d = 4/k$ olarak hesaplanabilir. Büyümenin başlangıcı (Kambiyum faaliyetin başlaması = KFB) gövde yarıçap değişimi eğrinin artmaya başladığı zaman olarak tahmin edilebilir.

2.4. İstatistiksel analizler

Türe özgü gövde yarıçap değişimlerinin iklimsel duyarlılığını değerlendirmek için, GRO ve TWDn ile günlük meteorolojik değişkenler (ortalama sıcaklık, ortalama bağıl nem, toplam yağış ve ortalama VPD) arasında korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Değişkenlerin normal dağılımını kontrol etmek için Kolmogorov-Smirnov testi uygulanmıştır. Değişkenlerin çoğu (Bağıl nem-BUK510 hariç) normal dağılmadığı için Spearman korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Gompertz fonksiyonu büyüme eğrilerinden elde edilen parametreler (A , tp , KFB ve d) tek yönlü ANOVA kullanılarak türler arasında karşılaştırılmıştır.



Şekil 5. 2022 yılında Elmalı sahasında bir sedir ağacında (Celi3) ölçülen gövde yarıçap değişimi verilerinin Gompertz modeli büyüme eğrisi (kırmızı çizgi)

3. Bulgular

Meteorolojik verilere bakıldığında 2022 yılının ilk 3 ayının yağışlı ve yazının sıcak ve kurak geçtiği her iki saha için de görülmektedir (Şekil 2). En kurak ve sıcak Temmuz ve ağustos ayları geçmiştir. ELM1350'de 1 Ocak-10 Kasım 22 dönemi için yıllık ortalama sıcaklık 10.69 °C, ortalama bağıl nem %67.3, VPD 0.54 kPa ve toplam yağış 719.4 mm'dir. BUK510'da aynı dönem için yıllık ortalama sıcaklık 16.02 °C, ortalama bağıl nem %62.4 ve VPD 0.83 kPa'dır. Toplam yağış 506.1 mm olup uzun dönem ortalaması olan 398 mm'den daha yüksektir. Genel olarak, iklim koşulları BUK510'da ELM1350'ye göre daha kuru ve daha sıcak gerçekleşmiştir.

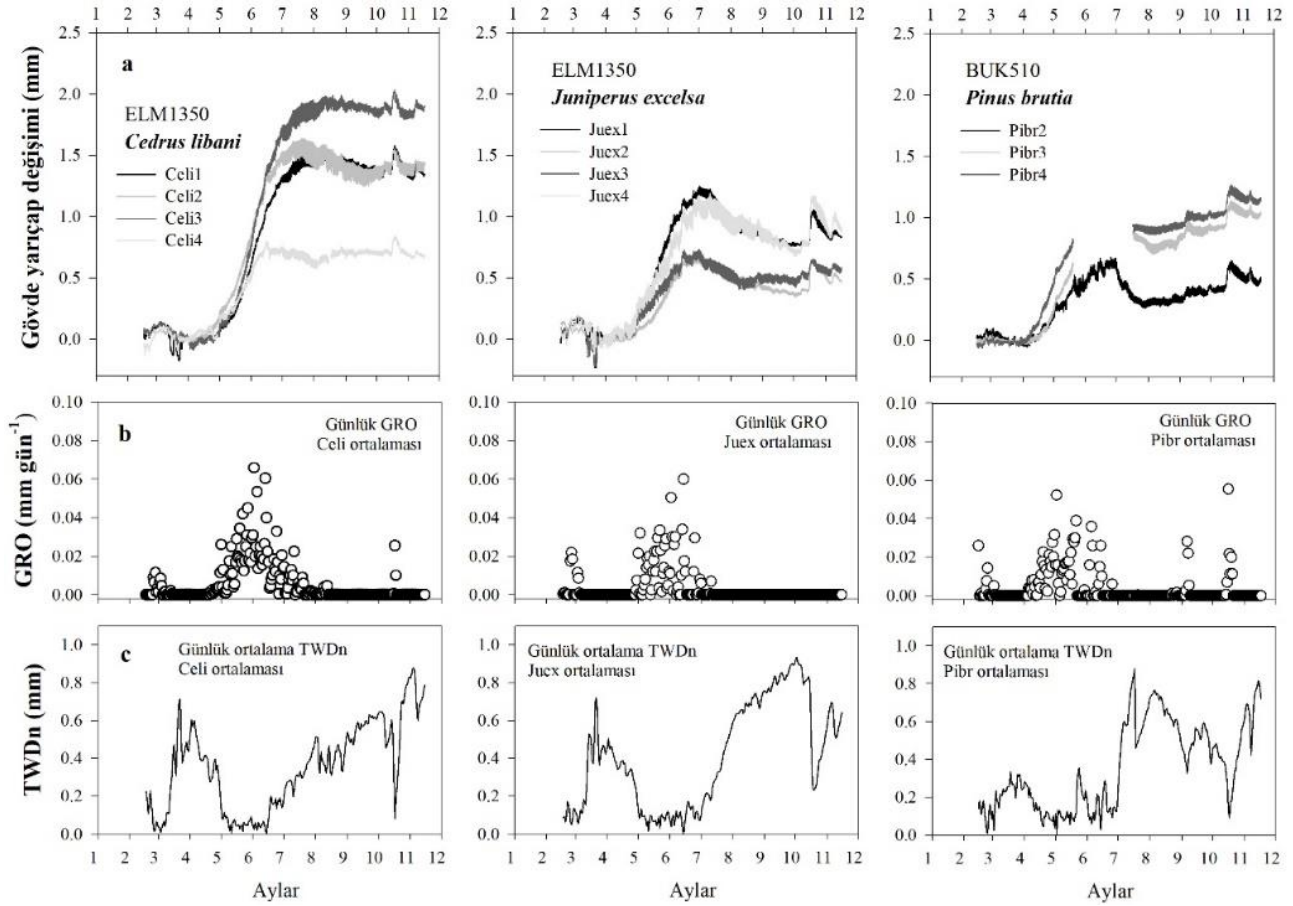
Tüm ağaçların dendrometre verilerine bakıldığında kış döneminde dendrometre eğrisinin neredeyse aynı seviyede kaldığını ancak büyüme mevsiminde ise neredeyse doğrusal bir gövde yarıçap artışı olduğu görülmektedir (Şekil 6). Her iki dönemde tipik günlük gövde yarıçap daralması ve

genişlemesi dalgalanmalar izlenmektedir. Gövde yarıçap artışları haziran ayı civarında yavaşlamaya başlar ve Temmuz ayında gövdeler daralmaya başlar. Gövde yarıçapındaki bu daralma özellikle ardıç ve kızılçamda belirgindi. Ekim ayı ortalarında tüm türlerde gövde yarıçapında kısa bir artış gözlenmiştir. Teknik sorunlardan dolayı, Mayıs ortasından Temmuz ortasına kadar olan zaman diliminde iki kızılçam ağacında gövde yarıçap değişimleri kaydedilememiştir.

KFB diğer türlerle kıyasla kızılçamda yaklaşık 3 hafta erken başlamıştır (Çizelge 2). Kızılçam için Nisan ortasında, sedir ve ardıç için mayıs ayında başlayan ağaçların en fazla GRO gerçekleştiği dönem yaklaşık olarak Temmuz ayına kadar sürmüştür (Şekil 6). Bu süre zarfında TWD tüm ağaçlar için çok düşük ve sıfıra yakındı. GRO'nun maksimum hız ulaştığı gün (tp) kızılçam için diğer türlere göre daha erken gerçekleşmiştir (Çizelge 2). En yüksek GRO, günde 0.07 mm'ye ulaşan değerlerle sedir için kaydedilmiştir (Şekil 6). Ayrıca, istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmasa da ortalama A 1.4 mm ile sedir için en yüksek çıkmıştır (Çizelge 2). Yıllık halkanın tamamına yakın bir kısmının oluşması için gereken ortalama süre (d) 46 ila 63 gün arasında değişmekte olup en kısa süre ardıçta, en uzun süre ise sedirde gerçekleşmiştir.

Temmuz ayı civarında ana GRO periyodu sona ermiş ve TWD tüm ağaçlarda gözlenen keskin bir artış göstermiştir (Şekil 6). Ardından TWD sedir ve ardıç için Ekim ortasına kadar artmaya devam ederken, kızılçam için önce Ekim ortasına kadar azalır ve ondan sonra ölçüm döneminin sonuna kadar tekrar artmaya devam eder. Ekim ortası/sonu civarında bütün ağaçlarda TWD'deki büyük bir azalış gözlemlenmiştir. Büyüme döneminden önceki TWD değerleri ELM1350'de BUK510'a kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni muhtemelen mart ortasında ELM1350'de hava sıcaklığının -5°C'nin altına düşmesi ve kabukta don kaynaklı daralmalardır (Zweifel ve Häsler, 2000).

Spearman korelasyon analizinden elde edilen sonuçlar, meteorolojik faktörlerin GRO ve TWD üzerindeki etkisinde türler arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir (Çizelge 3). Genel olarak, bağıl nem sedir ve ardıç için hem GRO hem de TWD üzerinde en önemli etkiye sahipti. Yüksek bağıl nem değerleri yüksek GRO ve düşük TWD değerleriyle ilişkiliydi. Bağıl nemin TWD üzerindeki önemi sedirde ardıçtan daha yüksek çıkmıştır. Buna karşılık, kızılçamda GRO yağışla en yakın pozitif korelasyona sahipken, TWD sıcaklık ile güçlü bir pozitif korelasyon göstermiştir.



Şekil 6. Yıl boyunca sedir, ardıç ve kızılçam için dendrometrelerle ölçülen a) saatlik çözünürlükteki gövde yarıçap değişimi b) günlük ortalama GRO (radyal büyüme) ve c) günlük ortalama TWDn (normalize edilmiş ağaç su açığı)

Çizelge 2. Çalışma saharındaki her bir ağaç için ayrı ayrı hesaplanmış Gompertz fonksiyonunun parametreleri

Saha	Ağaç	A (mm)	β	k	R ²	KFB (yılın günü)	tp (yılın günü)	d (gün)
ELM1350	Celi1	1.453	9.22	0.063	0.99	124 (4 Mayıs)	147 (27 Mayıs)	64
	Celi2	1.500	8.79	0.064	0.98	114 (24 Nisan)	139 (19 Mayıs)	63
	Celi3	1.936	8.58	0.058	0.99	121 (1 Mayıs)	148 (28 Mayıs)	69
	Celi4	0.726	9.13	0.070	0.97	112 (22 Nisan)	131 (11 Mayıs)	57
	Ortalama	1.404				118 (28 Nisan)^a	141 (21 Mayıs)^a	63
Sd	0.501				6	8	5	
ELM1350	Juex1	0.950	13.23	0.102	0.91	116 (26 Nisan)	130 (10 Mayıs)	39
	Juex2	0.516	14.80	0.110	0.87	124 (4 Mayıs)	135 (15 Mayıs)	36
	Juex3	0.579	9.86	0.079	0.90	109 (19 Nisan)	125 (5 Mayıs)	50
	Juex4	0.961	8.61	0.067	0.92	108 (18 Nisan)	128 (8 Mayıs)	59
	Ortalama	0.751				114 (24 Nisan)^a	129 (9 Mayıs)^{ab}	46
Sd	0.237				7	4	11	
BUK510	Pibr2	0.465	12.09	0.104	0.81	99 (9 Nisan)	116 (26 Nisan)	38
	Pibr5	0.928	7.99	0.065	0.96	95 (5 Nisan)	124 (4 Mayıs)	62
	Pibr6	1.042	6.22	0.054	0.97	90 (31 Mart)	115 (25 Nisan)	74
	Ortalama	0.812				95 (5 Nisan)^b	118 (28 Nisan)^b	58
Sd	0.306				5	5	18	

A: Büyüme döneminin sonunda ulaşılan yıllık toplam gövde yarıçapı artışı (mm)'ni temsil eden üst yatay asimptot parametresi, β : x-ekseni konum parametresi, k: eğrinin zaman eksenine boyunca değişim oranı parametresi, KFB: Kambiyum faaliyetlerinin başladığı gün, tp= dönüm noktası (radyal büyümenin (GRO) maksimum hızı ulaştığı gün), d= yıllık halkanın tamamına yakın bir kısmının oluşması için gereken süre. Farklı harfler türler arasındaki anlamlı fark olduğunu göstermektedir (ANOVA).

Çizelge 3. Günlük GRO ve TWDn ile meteorolojik değişkenlere uygulanan Spearman korelasyon analizi

Bağımlı değişkenler	Sıcaklık (°C)	Bağıl nem (%)	Yağış (mm)	VPD (kPa)
GRO_Celi	.128*	.240**	.043	-.042
GRO_Juex	-.088	.314**	.197**	-.199**
GRO_Pibr	-.180**	.262**	.301**	-.249**
TWDn_Celi	.066	-.435**	-.075	.273**
TWDn_Juex	.251**	-.369**	-.099	.347**
TWDn_Pibr	.509**	-.274**	-.327**	.470**

Korelasyon 0,05 seviyesinde önemli; ** Korelasyon 0,01 seviyesinde önemli; GRO: Büyüme; TWDn: Normalize edilmiş ağaç su açığı; Celi: *Cedrus libani*; Juex: *Juniperus excelsa*; Pibr: *Pinus brutia*; VPD: Buhar basıncı açığı; N= 262 gün. Her değişken için en yüksek korelasyon katsayısı gri renkle vurgulanmıştır.

4. Tartışma ve sonuç

Bu çalışma, Türkiye'nin üç önemli orman ağacı türü için bir yıllık yüksek çözünürlüklü dendrometre zaman serisi verilerini kullanarak radyal büyüme ve ağaç su açığı hakkında bilgiler sunmaktadır. Yüksek çözünürlüklü dendrometre kayıtları, yıl içi ve yıllar arası gövde büyüme dinamiklerinin yanı sıra günlük gövde yarıçapı değişimlerinin, kambiyal ve odunsu dokularda önemli zararlar oluşturmadan sürekli olarak izlenmesine olanak tanır (Güney vd., 2017; Herzog vd., 1995). Büyüme süreçlerini birkaç haftadan bin yıla kadar uzanan bir zaman aralığında inceleyen dendrokronolojik çalışmalarının aksine, yüksek çözünürlüklü dendrometre verileri KFB gibi kambiyum faaliyetlerinin ve yıllık halka oluşumunun önemli zamanlamaları hakkında da bilgi sağlamaktadır (Köcher vd., 2012; Rossi ve Deslauriers, 2007). Çeşitli çalışmalar, kış dönemi dinlenme periyodundan sonra KFB'nin Kuzey Yarımküre iğne yapraklı türlerinde sıcaklık ve fotoperiyot tarafından tetiklendiğini (Huang vd., 2020) ve dolayısıyla daha sıcak olan ilkbahar mevsiminin ağaç türlerinde kambiyal faaliyetlerin daha erken başlamasına neden olduğunu göstermiştir (Deslauriers vd., 2008; Rossi vd., 2007). Bu nedenle, sedir ve ardıça kıyasla kızılçamda KFB'nin yaklaşık üç hafta daha erken gerçekleşmesi, büyük olasılıkla BUK510'da vejetasyon döneminin başındaki sıcaklıkların daha yüksek olmasıyla ilgilidir. Ardıç ve sedir için KFB'de önemli bir fark bulunmamıştır. Bunun nedeni de muhtemelen aynı bölgede yetişmeleri ve yerel ilkbahar sıcaklığına benzer kambiyal tepki göstermeleridir (Huang vd., 2020). Aynı türler bile daha düşük rakımlarda ve daha yüksek sıcaklıklarda daha erken büyüme başlangıcı göstermektedir. Bu durum, rakımsal bir gradyan boyunca yer alan birden fazla sahada yapılan çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Güney vd., 2017; Saderi vd., 2019).

Radyal gövde büyümesi, en erken kızılçamda ve en geç sedirde olmak üzere yaz gündönümünden birkaç hafta önce maksimuma ulaşmıştır. Bu süre zarfında, ağaç türlerinin büyümesi üzerine etkisi olan çevre koşullarının optimal durumda olduğu meteorolojik kayıtlardan anlaşılmaktadır (Şekil 2). Kuzey yarımkürenin soğuk bölgelerinde yetişen iğne yapraklı türlerde maksimum GRO, bitkilerin kıştan önce sekonder hücre duvarı odunlaşmasını güvenli bir şekilde tamamlamasına olanak tanıyan büyümeyi kısıtlayıcı bir fotoperiyodik sinyal olarak hareket ettiğine inanılan yaz gündönümü civarında gerçekleştiği gösterilmiştir (Rossi vd., 2006). Sonuçlarımız, incelenen ağaçlarda maksimum GRO'ya erken ulaşılmasının (yaz gündönümünden birkaç hafta önce), çalışma alanında hüküm süren aşırı çevresel koşullarla, yani tekrarlayan kuraklık dönemleriyle başa çıkmak için bir adaptasyon olduğunu göstermektedir. Benzer bir davranış,

kuru bir iç alpin vadisinde yetişen sarıçam (*Pinus sylvestris* L.)'da da gözlenmiştir (Gruber vd., 2010).

Kurak ve sıcak mevsimin başlamasıyla (Şekil 2, temmuz başı) incelenen ağaçların gövde yarıçapları daralmaya başlayarak TWD'de artışa neden olmuştur. TWD'ye bağlı gövde daralması, transpirasyon yoluyla su kaybı ile topraktan su alımı arasındaki dengesizlikten kaynaklanır (Zweifel vd., 2016). Kurak mevsimin (yağış kıtlığı, yüksek VPD) başlamasıyla gövdede depolanmış olan su rezervleri tükenmeye başlar ve ağaçların kuraklık stresi artar. TWD ve atmosferik koşullar arasındaki yakın ilişki, korelasyon analizi sonuçlarında (Çizelge 3) ve diğer çalışmalarda gösterilmiştir (Güney vd., 2019; Zweifel vd., 2006). Güney vd. (2020) tarafından daha önce yapılan bir çalışmada da gözlemlendiği gibi, TWD artışı özellikle ardıçta hızlı gerçekleşmiştir. Daha kanaatkâr (conservative) bir büyüme stratejisine sahip olan ardıç, en sıcak ve kurak dönemlerde fizyolojik süreçleri düşük tutarak yaz kuraklığı tarafından daha fazla sınırlandığı öne sürülmüştür. Ancak bu strateji, genel olarak daha düşük bir büyüme performansı pahasına daha aşırı koşullar altında hayatta kalma olasılığını artırabilir (Genc vd., 2005; Moran vd., 2017). Kızılçamda da hızlı bir TWD artışı gözlenmiştir, ancak kritik bir zaman diliminde üç ağaçtan ikisinde veri kaybı olması nedeniyle, yaz aylarında kızılçamdaki TWD artışı hakkında anlamlı bir tartışma bu noktada mümkün değildir. Buna rağmen, sedir ve ardıçın aksine, tüm kızılçam ağaçlarının Eylül ayı civarında başlayan ve analiz edilen ölçüm döneminin sonuna doğru devam eden gövde yarıçapında yavaş ama istikrarlı bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Analiz edilen ölçüm döneminin ötesinde bu artışın devam etmiş olması muhtemeldir. Akdeniz bölgesindeki yetişen bazı ağaç türlerin büyüme için yeniden uygun koşullar sağlayan geç sonbahar-erken kış döneminde tekrar gövde yarıçapında artış gösterdikleri bilinmektedir (Vieira vd., 2014). Yaz kuraklığı boyunca kambiyum faaliyetlerinin duraklaması ve yaz sonrası yağışların başladığı ve sıcaklıkların düşmesiyle kambiyumun tekrar faaliyete geçmesi, iki tepeli dağılım gösteren (bimodal) bir büyüme seyri ile sonuçlanır (Camarero vd., 2010). Ağaçların gösterdiği bu büyüme plastisitesi (growth plasticity), daha yağışlı geçen iki ılıman dönem olan ilkbahar ve sonbahardan faydalanabildikleri için, kuraklık stresi altındaki bölgelerde yetişen türler için bir avantaj sağlayabilir.

Tüm ağaçlarda Ekim ayı ortalarında ölçülen gövde yarıçapındaki büyük artış ve TWD'deki düşüş, topraktaki su mevcudiyetini artıran ve gövdelerde özellikle de kabuğun elastik dokularında hızlı bir rehidrasyona neden olan yaz kuraklığından sonraki ilk önemli yağış olaylarından kaynaklanmaktadır (Vieira vd., 2013; Zweifel vd., 2005).

Çevresel değişkenlerin günlük gövde yarıçapı değişimleri (GRO ve TWD) üzerindeki etkilerinin analizi, ağaçların hava koşullarındaki kısa vadeli değişikliklere verdiği tepkiye ilişkin bilgiler vermektedir (Urrutia-Jalabert vd., 2015). Korelasyon analizi, bağıl neminin sedir ve ardıçın gövde büyümesini destekleyen en önemli meteorolojik faktör olduğunu ve ardıçın GRO'sunun yağışla da pozitif ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, ardıçın farklı fizyolojisi nedeniyle daha kanaatkâr bir büyüme stratejisi gösterip yağışa daha duyarlı olduğu göstermektedir ve önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur (Güney vd., 2019; Güney vd., 2020; Moran vd., 2017). Korelasyon analizi sonuçlarına göre, kızılçamda sedir ve ardıç ile kıyaslandığında GRO ve TWD ile yağış arasında daha güçlü bir bağlantı göstererek önemli ölçüde farklılık göstermiştir.

Bunun bir nedeni, kızılçamın genellikle büyüme mevsimlerinin daha sıcak ve daha kuru koşullar altında olması ve ağaçların bu yüzden yağış olaylarına karşı daha duyarlı olması olabilir. Bu varsayım, kızılçamın Eylül ve Ekim aylarında ELM1350'den daha yüksek miktarda yağış alması (BUK510'da Eylül ve Ekim ayları için toplam yağış= 65.8 mm; ELM1350'de= 30.9 mm) ve kızılçamda GRO'nun bu yağış olayların sırasında ve hemen sonrasında gözlemlenmiş olmasıyla desteklenebilir. Ancak yaz dönemindeki eksik veriler nedeniyle bu varsayım şu anda kesin olarak kanıtlanamamaktadır.

Yüksek çözünürlüklü dendrometre verilerinin birkaç yılı kapsayan daha uzun zaman serileri, mevcut gövde yarıçap değişimi verilerinin geçmiş yıllardaki verilerle ilişkilendirilmesine ve daha kapsamlı analizlere olanak sağlayacaktır. Ölçümlerin devam ettiği önümüzdeki yıllarda olağanüstü kuraklık, yağış, geç don vb. gibi aşırı iklim olayları meydana geldiğinde, çevresel koşullarla ilişkili olarak gövde büyümesi ve ağaç su açığının daha fazla yorumlanması mümkün olacaktır. Bu bilgi, ağaç türlerinin ve ormanların gelecekteki iklim senaryolarına nasıl tepki verebileceğini tahmin etmeye yardımcı olabilir. Ayrıca dendrometrelere ek olarak ekofizyoloji çalışmalarında kullanılan diğer yöntemler (örneğin, bitki özsuyu akış ölçüm yöntemleri) eklenebilir ve böylece iklim değişikliğinin ağaçların diğer fizyolojik süreçlerinin üzerindeki etkileri hakkında daha detaylı ve kapsamlı bilgi sağlanabilir. Bu yüzden, "DenTRO" girişimi kapsamında kurulan ELM1350 ve BUK510 sahalarının ve önümüzdeki yıllarda kurulması planlanan yeni sahaların uzun süreli izleme sahaları olarak kullanılması hedeflenmektedir. Amacımız, diğer araştırmacılarla iş birliği içinde Türkiye'nin çeşitli orman ekosistemlerindeki farklı orman ağacı türleri için birbirinden farklı çevresel koşullara sahip geniş bir ulusal dendrometre ağı kurmaktır. Bu hedef gelecekteki uluslararası dendrometre verilerine dayalı iş birliklerine ve ortak çalışmalara katılmamıza da olanak sağlamış olacaktır.

Sonuç olarak, kızılçam, sedir ve ardıça kıyasla KFB'nın önemli ölçüde daha erken gerçekleştiğini göstermiş ve incelenen tüm türlerde radyal büyümenin büyük bir kısmı temmuz ayından önce gerçekleşmiştir. Ardından tüm türlerin gövde çaplarında ölçülen ve birkaç ay devam eden daralmaların (TWD), uzun süreli maruz kalınan su eksikliğinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca GRO ve TWD'in iklimsel duyarlılık açısından sahalar arasında anlamlı farklılıklar göstermiştir. Burada ve diğer bazı çalışmalarda gösterildiği gibi (Güney vd., 2020; Salomón vd., 2022; Zweifel vd., 2016), yüksek çözünürlüklü dendrometre verileri fizyolojik olarak anlamlı büyüme (GRO) ve kuraklık (TWD) göstergelerine ayrılabilir. Bu göstergeler ağaç ve meşcere düzeyinde ve hatta tüm orman ekosistemleri için kullanılabilir (Zweifel, 2016) ve ormancılara erken uyarı ve müdahale imkânı sağlayarak orman yönetimi stratejilerini belirlemede, ağaçların genel sağlığının değerlendirilmesinde ve orman planlamasında bilimsel temelli ve sürdürülebilir karar alma süreçlerine önemli katkılarda bulunabilir.

Kaynaklar

- Akkemik, Ü., Yılmaz, H.Ç., Sevgi, O., 2007. Cambial activity of the sessile oak (*Quercus petraea*) in Belgrade forest, Istanbul. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 30(6): 429-438.
- Anderegg W.R.L., Schwalm, C., Biondi, F., Camarero, J.J., Koch, G., Litvak, M., Ogle, K., Shaw, J.D., Shevliakova, E., Williams A.P., Wolf, A., Ziaco, E., Pacala, S., 2015. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. Science, 349(6247): 528-532.
- Balekoglu, S., Caliskan, S., Makineci, E., Dirik, H., 2023. An experimental assessment of carbon and nitrogen allocation in *Pinus pinea* populations under drought stress and rewatering treatment. Environmental and Experimental Botany, 210, 105334.
- Barracough, A.D., Zweifel, R., Cusens, J., Leuzinger, S., 2019. Disentangling the net: concomitant xylem and over-bark size measurements reveal the phloem-generated turgor signal behind daytime stem swelling in the mangrove *Avicennia marina*. Functional Plant Biology, 46(5): 393-406.
- Başaran, M.A., Başaran, S., Baş, N., Kacar, S., Tolunay, D., Makineci, E., Kavgacı, A., Deniz, G., 2008. Determining the actual state of Cedar Research Forest Elmalı by GIS based digital maps. Ormançılık Araştırma Enstitüsü, Teknik Bülten Serisi, No: 30, Antalya.
- Başaran, S., Tolunay, D., Makineci, E., Başaran, M.A., Kavgacı, A., Çetin, A., Kacar, M.S., Baş, N., 2011. Determining the Actual State of Bük Lütüfî Büyükyıldırım Research Forest By GIS Based Digital Maps. Ormançılık Araştırma Enstitüsü, Teknik Bülten Serisi, No: 44, Antalya.
- Brinkmann, N., Eugster, W., Zweifel, R., Buchmann, N., Kahmen, A., 2016. Temperate tree species show identical response in tree water deficit but different sensitivities in sap flow to summer soil drying. Tree Physiology, 36(12): 1508-1519.
- Camarero, J.J., Olano, J.M., Parras, A., 2010. Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. The New Phytologist, 185(2): 471-480.
- Cheng, C., Gordon, I.L., 2000. The Richards function and quantitative analysis of germination and dormancy in meadowfoam (*Limnanthes alba*). Seed Science Research, 10(03): 265-277.
- Clonch, C., Huynh, M., Goto, B., Levin, A., Selker, J., Udell, C., 2021. High precision zero-friction magnetic dendrometer. HardwareX, 12(10): e00248.
- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B., Frank, D., Fonti, P., Mäkinen, H., Prislán, P., . . . Fournier, M., 2015. Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests. Nature Plants, 1(11): 15160.
- Daudet, F.A., Améglio, T., Cochard, H., Archilla, O., Lacoite, A., 2004. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. Journal of Experimental Botany, 56(409): 135-144.
- Deligöz, A., Bayar, E., Karatepe, Y., Genç, M., 2019. Photosynthetic capacity, nutrient and water status following precommercial thinning in Anatolian black pine. Forest Ecology and Management, 451: 117533.
- Deslauriers, A., Rossi, S., Anfodillo, T., 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? Dendrochronologia, 25(2): 113-124.
- Deslauriers, A., Rossi, S., Anfodillo, T., Saracino, A., 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. Tree Physiology, 28(6): 863-871.
- Dietrich, L., Zweifel, R. and Kahmen, A., 2018. Daily stem diameter variations can predict the canopy water status of mature temperate trees. Tree Physiology, 38(7): 941-952.
- Downes, G., Beadle, C., Worledge, D., 1999. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. Trees, 14(2): 102-111.

- Drew, D. M., Downes, G. M., 2009. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: a review. *Dendrochronologia*, 27(2): 159-172.
- Dukat, P., Kelly, J., Doerr, S.H., Edvardsson, J., Hölttä, T.S., Lehner, I., Lindroth, A., Santin, C., Kljun, N., 2024. Boreal forest tree growth and sap flow after a low-severity wildfire. *Agricultural and Forest Meteorology*, 347, 109899.
- Ehrenberger, W., Rüger, S., Fitzke, R., Vollenweider, P., Günthardt-Goerg, M., Kuster, T., Zimmermann, U., Arend, M., 2012. Concomitant dendrometer and leaf patch pressure probe measurements reveal the effect of microclimate and soil moisture on diurnal stem water and leaf turgor variations in young oak trees. *Functional Plant Biology*, 39(4): 297-305.
- Genc, M., Deligöz, A., Gültekin, H., 2005. Stress resistance of the *Juniperus oxycedrus* and *J. foetidissima*, *J. excelsa*, *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*, *Cedrus libani* and *Picea orientalis* seedlings. *Ladin Sempozyumu*, 20-22 Ekim 2005, Trabzon, Türkiye, pp. 474-482.
- Gruber, A., Strobl, S., Veit, B., Oberhuber, W., 2010. Impact of drought on the temporal dynamics of wood formation in *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 30(4): 490-501.
- Güney, A., Gülsoy, S., Şentürk, Ö., Niessner, A., Küppers, M., 2019. Environmental control of daily stem radius increment in the montane conifer *Cedrus libani*. *Journal of Forestry Research*, 31(4): 1159-1171.
- Güney, A., Küppers, M., Rathgeber, C., Şahin, M., Zimmermann, R., 2017. Intra-annual stem growth dynamics of Lebanon Cedar along climatic gradients. *Trees*, 31: 587-606.
- Güney, A., Zweifel, R., Türkan, S., Zimmermann, R., Wachendorf, M., Güney, C.O., 2020. Drought responses and their effects on radial stem growth of two co-occurring conifer species in the Mediterranean mountain range. *Annals of Forest Science*, 77(4): 1-16.
- Herzog, K.M., Häsler, R., Thum, R.J.T., 1995. Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees*, 10: 94-101.
- Huang, J. G., Ma, Q., Rossi, S., Biondi, F., Deslauriers, A., Fonti, P., . . . Ziaco, E., 2020. Photoperiod and temperature as dominant environmental drivers triggering secondary growth resumption in Northern Hemisphere conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(34): 20645-20652.
- Köcher, P., Horna, V., Leuschner, C., 2012. Environmental control of daily stem growth patterns in five temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 32: 1021-1032.
- Lazzarin, M., Zweifel, R., Anten, N., Sterck, F.J., 2018. Does phloem osmolality affect diurnal diameter changes of twigs but not of stems in Scots pine? *Tree Physiology*, 39(2): 275-283.
- Martínez-Sancho, E., Treydte, K., Lehmann, M. M., Rigling, A., Fonti, P., 2022. Drought impacts on tree carbon sequestration and water use—evidence from intra-annual tree-ring characteristics. *New Phytologist*, 236(1): 58-70.
- Moran, E., Lauder, J., Musser, C., Stathos, A., Shu, M., 2017. The genetics of drought tolerance in conifers. *New Phytologist*, 216(4): 1034-1048.
- Oberhuber, W., Hammerle, A., Kofler, W., 2015. Tree water status and growth of saplings and mature Norway spruce (*Picea abies*) at a dry distribution limit. *Frontiers in Plant Science*, 6:703.
- Özçelik, M.S., Şengönül, K., Gökbülak, F., 2016. Orman ağaçlarında bitki özsuyu akış ölçüm yöntemleriyle transpirasyonun belirlenmesi ve havza yönetimi çalışmaları için önemi. *Turkish Journal of Forestry*, 17(2): 208-214.
- Rigling, A., Bigler, C., Eilmann, B., Feldmeyer-Christe, E., Gimmi, U., Ginzler, C., Graf, U., Mayer, P., Vacchiano, G., Weber, P., 2013. Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biology*, 19(1): 229-240.
- Rossi, S., Anfodillo, T., Menardi, R., 2006. Trephor: a new tool for sampling microcores from tree stems. *Iawa Journal*, 27(1): 89-97.
- Rossi, S., Deslauriers, A., 2007. Intra-annual time scales in tree rings. *Dendrochronologia*, 25(2): 75-77.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Carraro, V., 2007. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152(1): 1-12.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Morin, H., Saracino, A., Motta, R., Borghetti, M., 2006. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *The New Phytologist*, 170(2): 301-310.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Morin, H., 2003. Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development. *Dendrochronologia*, 21(1): 33-39.
- Saderi, S., Rathgeber, C.B., Rozenberg, P., Fournier, M., 2019. Phenology of wood formation in larch (*Larix decidua* Mill.) trees growing along a 1000-m elevation gradient in the French Southern Alps. *Annals of Forest Science*, 76(3): 1-17.
- Salomon, R. L., Peters, R. L., Zweifel, R., Sass-Klaassen, U. G. W., Stegehuis, A. I., Smiljanic, M., . . . Steppe, K., 2022. The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests. *Nature communications*, 13(1): 1-11.
- Scharnweber, T., Smiljanic, M., Cruz-García, R., Manthey, M., Wilmking, M., 2020. Tree growth at the end of the 21st century—the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. *Environmental Research Letters*, 15(7): 074022.
- Scholander, P.F., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E., Hammel, H., 1965. Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668): 339-346.
- Urrutia-Jalabert, R., Rossi, S., Deslauriers, A., Malhi, Y., Lara, A., 2015. Environmental correlates of stem radius change in the endangered *Fitzroya cupressoides* forests of southern Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200: 209-221.
- Vieira, J., Rossi, S., Campelo, F., Freitas, H., Nabais, C., 2013. Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180: 173-181.
- Vieira, J., Rossi, S., Campelo, F., Freitas, H., Nabais, C., 2014. Xylogenesis of *Pinus pinaster* under a Mediterranean climate. *Annals of Forest Science*, 71(1): 71-80.
- Zeide, B., 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* 39: 594-616.
- Ziaco, E., Truettner, C., Biondi, F. and Bullock, S., 2018. Moisture-driven xylogenesis in *Pinus ponderosa* from a Mojave Desert mountain reveals high phenological plasticity. *Plant, Cell & Environment*, 41(4): 823-836.
- Zweifel, R., 2016. Radial stem variations—a source of tree physiological information not fully exploited yet. *Plant, Cell & Environment*, 39(2): 231-232.
- Zweifel, R., Haeni, M., Buchmann, N., Eugster, W., 2016. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytologist*, 211(3): 839-849.
- Zweifel, R., Häsler, R., 2000. Frost-induced reversible shrinkage of bark of mature subalpine conifers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102(4): 213-222.
- Zweifel, R., Item, H., Häsler, R., 2000. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees*, 15(1): 50-57.
- Zweifel, R., Zimmermann, L., Newbery, D., 2005. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiology*, 25(2): 147-156.
- Zweifel, R., Zimmermann, L., Zeugin, F., Newbery, D.M., 2006. Intra-annual radial growth and water relations of trees: implications towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany*, 57(6): 1445-1459.