

Bazı Vasküler Bitkilerin Yaprak Damar Ağının Karşılaştırılması

Mustafa Kemal AKBULUT¹, Gülcan ŞENEL², Şenay SÜNGÜ ŞEKER^{*3}

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lapseki Meslek Yüksekokulu, Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, 17800, Çanakkale, Türkiye

^{2,3}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 55420, Samsun, Türkiye

(Alınış / Received: 08.12.2020, Kabul / Accepted: 06.04.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 15.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Areol,
Ağ mimarisi,
Dikotil,
Yaprak damar sistemi

Özet: Bu çalışmada 14 bitki türüne ait ve farklı morfolojik özellikleri olan yaprakların damar anatomileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bitkilere ait örnekler Samsun ilinin çeşitli lokalitelerinden toplanmıştır. Örneklerden alınan taze yapraklar kurutularak stoklanmıştır. Stok yapraklara saydamlaştırma ve boyama işlemi uygulanarak damar yapıları analiz edilmiştir. Taksonların yapraklarında toplam yaprak çevresi ve alanı, damar ve boğum sayısı, toplam damar uzunluğu, toplam damar alanı, ortalama damar uzunluğu, ortalama damar genişliği, ortalama damar 2D, 3D yüzey alanları ve ortalama damar hacmi gibi karakterler açısından önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre damarlanmanın morfometrik özellikleri saydamlaştırma ve boyama aşamaları dikkatli uygulandığında sistematik, fizyoloji ve ekoloji gibi birçok alanda yapılacak araştırmalara katkı sağlayacak güvenilir karakterler sunabilir.

Comparative Leaf Vein Architectures of Some Vascular Plants

Keywords

Areole,
Network architecture,
Dicotyledoneae,
Leaf venation

Abstract: In this research, the vein architecture of leaves belonging to 14 plant species having different morphological features were comparatively analyzed. Plant leaf samples were collected from various localities in Samsun province and were dried. The vein patterns were analyzed by applying a clearing and staining process to dried leaves. Significant differences were determined across the leaves of the studied species in terms of characters such as leaf perimeter and area, no of nodes and edges, total network length and total network area, mean length, mean width, mean 2D and 3D surface areas and mean volume of the edges. When the clearing and staining stages are applied carefully, the morphometric properties of the vascularization may provide reliable characters that will contribute to the research in many fields such as systematic, physiology and ecology.

1. Giriş

Vasküler bitkilerde kök, gövde ve yaprak arasında madde taşınmasını sağlayan iletim demetleri yapraklarda damarlar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Karasal bitki yaprakları damarlanma yapısı açısından çok çeşitlilik göstermektedir [1]. Bu damarlanma bazı bitkilerde çok basit olup sadece bir damardan oluşmakta (örn. koniferler / iğne yapraklılar), bazı bitkilerde ise çoğunlukla paralel yönde (örn. monokotiller / tek çenekliler) ya da ağsı yapıda (örn. dikotiller / çift çenekliler) oldukça karmaşık bir düzen göstermektedir. Damarlanma şekilleri, çeşitli uzunlukta ve dallanma seviyelerinde uzamsal farklılıklar içermektedir. Yapraklardaki ana damar primer damar, primer damardan ayrılan damarlar da sekonder damar olarak isimlendirilmektedir.

Sekonder damarlardan da çok daha küçük olan (üçüncül) damarlar ayrılmaktadır. Yapraklarda damarlar ile çevrelenmiş, damar elementi içermeyen en küçük yaprak alanına areol adı verilmektedir [2].

Yapraklardaki damarlanmanın geometrik yapısı biyolojik işlev açısından da önemlidir. Damarlanma şeklinin madde iletimi (fotosentez ve terleme), hasara karşı direnç (düşük su potansiyeli altında iletimi engelleyen emboli oluşumu (trakeal elementlerin hava ya da su buharı ile dolması sonucu su iletiminin kesintiye uğraması) ya da rüzgar, herbivor kaynaklı doku hasarı), mekanik destek ya da dokunun bitkiye maliyeti (damarlardaki lignin birimi) gibi pek çok işlevsel süreçle ilişkili olduğu görülmektedir [3-12]. Damarlanma şekli bitkilerin filogenetik yeri / yapısı ya da genetik özelliklerinin

*İlgili yazar: senay.sungu@omu.edu.tr

yanı sıra içinde bulunduğu ekolojik şartlardan da etkilenmektedir [13]. Dolayısıyla damarlanma şekli ve damar anatomisi pek çok disipline ait çalışmaya temel teşkil etmektedir [14-16].

Damarlar ile ilgili detaylı çalışmalar damar uzunluğu [17], ksilem uzunluğu ve genişliği [18-21] ile ağaçların farklı bileşenleri arasında su direnci üzerinde yapılmıştır [22-24]. Ancak areollerin ya da damarların yüzey alanı ya da hacmi, boğumların yapısı gibi pek çok karakterin ölçümü uzun işlemler gerektirdiğinden araştırmalarda pratik ya da kullanışlı olmamaktadır.

Pek çok araştırmacı, bitki sınıflandırmasında yararlanmak üzere yaprak görüntülerinin çeşitli yazılımlarla analizine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiş ve bu çalışmalarda genellikle yaprak şekli [25, 26], yaprak rengi [27, 28] tekstürü [29, 30], ya da boyutları [31] gibi karakterleri göz önüne almışlardır. Fakat son yıllarda yaprak damar yapısı ile ilgili geometrik morfometri çalışmaları disiplinler arası araştırmalarda daha güvenilir veriler sunmaktadır.

Bu çalışmada benzer ekolojik koşullarda yetişen çok yıllık 14 bitki türüne ait farklı morfolojiye sahip yaprakların damar anatomileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu sayede damar yapısı ve dağılımı ile ilgili bazı sorulara cevap aranmıştır:

- Damar özellikleri ve yaprak morfolojileri arasında bir ilişki var mıdır?
- Pratik ve düşük maliyetli olması sebebiyle başvurulan bu yöntemle elde edilen verilerin kullanılabilirliği nedir?

2. Materyal ve Metot

Bitkilere ait örnekler Nisan ve Haziran ayları arasında Karadeniz Bölgesi'ndeki farklı lokalitelerden toplanmıştır (Tablo 1). Belirlenen karakterler için her bir türe ait ortalama 10 yaprak örneği üzerinden incelemeler gerçekleştirilmiştir. Örneklerden alınan taze yapraklar 60°C'de birkaç gün süre ile preslenerek kurutulmuştur.

2.1. Saydamlaştırma

Stok yapraklara saydamlaştırma işlemi uygulanarak damar yapıları incelenmiştir. Saydamlaştırma yöntemi Vasco ve ark. (2014) referans alınarak uygulanmıştır [32]. Buna göre kuru yaprak örnekleri %5'lik NaOH çözeltisinde 40-54°C'de 1-3 gün süre ile muamele edilmiştir. Saf su ile yıkanmış örnekler % 4.5-5.5 'lik sodyum hipoklorid ile 20sn-10dk arasında değişen sürelerde saydamlaştırılmıştır. Yaprak örnekleri dereceli etanol serilerinden geçirilerek (%50, %70, %95) safranin ile standart prosedür uygulanarak boyanmıştır.

Tablo 1. Araştırma konusunu oluşturan taksonlara ait örnekleme bilgileri

Takson	Familiya	Lokaliye
<i>Acer campestre</i> L.	Sapindaceae	A5 Samsun: Kurupelit, Gölet mevki, ormanlık alan, 270m, 11.07.2015, Akbulut (AK111).
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn. subsp. <i>barbata</i> (C.A.Mey.) Yalt.	Betulaceae	A6 Samsun: Çarşamba, Hürriyet köyü, ormanlık alan, 9m, 05.08.2015, Akbulut (AK117).
<i>Cerasus avium</i> (L.) Moench	Rosaceae	A6 Samsun: Terme, Gölyazı köyü, ormanlık alan, 8m, 09.07.2015, Akbulut (AK110).
<i>Cionura erecta</i> (L.) Griseb.	Apocynaceae	A5 Samsun: Kurupelit, Irmak mevki, ormanlık alan, 170m, 07.08.2015, Akbulut (AK118).
<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	Rosaceae	A6 Samsun: Çarşamba, Hürriyet köyü, ormanlık alan, 9m, 08.07.2015, Akbulut (AK108).
<i>Fagus orientalis</i> Lipsky	Fagaceae	A6 Samsun: Terme, Özyurt köyü, ormanlık alan, 8m, 04.06.2015, Akbulut (AK102).
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	Fabaceae	A6 Samsun: Terme, Özyurt köyü, çayırılık alan, 8m, 04.06.2015, Akbulut (AK101).
<i>Juglans regia</i> L.	Juglandaceae	A5 Samsun: Ondokuzmayıs, Çakırlar korusu, ormanlık alan, 10m, 19.07.2015, Akbulut (AK114).
<i>Platanus orientalis</i> L.	Platanaceae	A6 Samsun: Çarşamba, Hürriyet köyü, ormanlık alan, 9m, 08.07.2015, Akbulut (AK109).
<i>Populus nigra</i> L.	Salicaceae	A5 Samsun: Kurupelit, Gölet mevki, çayırılık alan, 260m, 14.07.2015, Akbulut (AK112).
<i>Quercus cerris</i> L.	Fagaceae	A5 Samsun: Kurupelit, Irmak mevki, ormanlık alan, 170m, 09.06.2015, Akbulut (AK104).
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	Fabaceae	A5 Samsun: Kurupelit, Gölet mevki, ormanlık alan, 250m, 02.07.2015, Akbulut (AK105).
<i>Smilax excelsa</i> L.	Smilacaceae	A5 Samsun: Ondokuzmayıs, Çakırlar korusu, ormanlık alan, 10m, 16.07.2015, Akbulut (AK113).
<i>Tilia rubra</i> DC. subsp. <i>caucasica</i> (Rupr.) V.Engl.	Malvaceae	A5 Samsun: Kurupelit, Gölet mevki, çayırılık alan, 260m, 04.08.2015, Akbulut (AK116).

1.2. Fotoğraf üstveri ve analizi

Yapraklar NIKON D700 marka 18-105 mm lens ataşmanlı fotoğraf makinası ile aynı uzaklıktan ölçek eklenerek fotoğraflanmıştır. Fotoğraflar LEAF GUI [33] programı yardımıyla analiz edilmiştir. Bir seri kesme ve temizleme işleminden sonra damar, boğum ve areol özelliklerini hesaplayabilmek için RGB fotoğraflar gri-tonlamalı fotoğraflara dönüştürülmüştür. Eşik değeri belirlenirken geniş kapsamlı ve bölgesel uyarlanabilir eşik değeri tanımlama algoritmaları (global and local adaptive thresholding approaches) birlikte uygulanmıştır. Bu algoritmalar damar bölgelerini 1, damara ait olmayan bölgeleri 0 ile temsil eden ikili imgeler elde etmek için kullanılmıştır. Böylece gri-tonlamalı fotoğraflar üzerinden damar segmentasyonu yapılmıştır. Daha sonra tüm görüntüyü iskeletleştirerek (ağın tek bir piksel genişliğinde temsili sağlanarak) düğümler ve damar uçları belirlenmiştir. Sonraki adımda her damar pikselinden, damara ait olmayan en yakın piksele olan mesafenin kaydedildiği bir damar ağını temsil eden fotoğraflar elde edilmiştir. Damarlar ve tüm yaprağa ait metrik hesaplamalar yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Morfometrik özelliklere ait pareto grafikleri excel kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2).

3. Bulgular

İncelenen türlerin yapraklarında toplam yaprak çevresi ve alanı, damar sayısı, boğum sayısı, toplam damar uzunluğu, toplam damar alanı, ortalama damar uzunluğu, ortalama damar genişliği, ortalama 2D ve 3D damar yüzey alanları ve ortalama damar hacmi gibi karakterler açısından önemli farklılıklar tespit edilmiştir (Şekil1). Yaprak boyutu (yaprak alanı ve çevresi) *Platanus orientalis*, *Juglans regia*, *Populus nigra* türlerinde en yüksek değerde ölçülmüştür. Ayrıca *Quercus cerris*'de yaprak alanına kıyasla yaprak çevre uzunluğu fazladır. Bunun nedeni yaprak kenarlarının loblu veya oymalı olmasıdır.

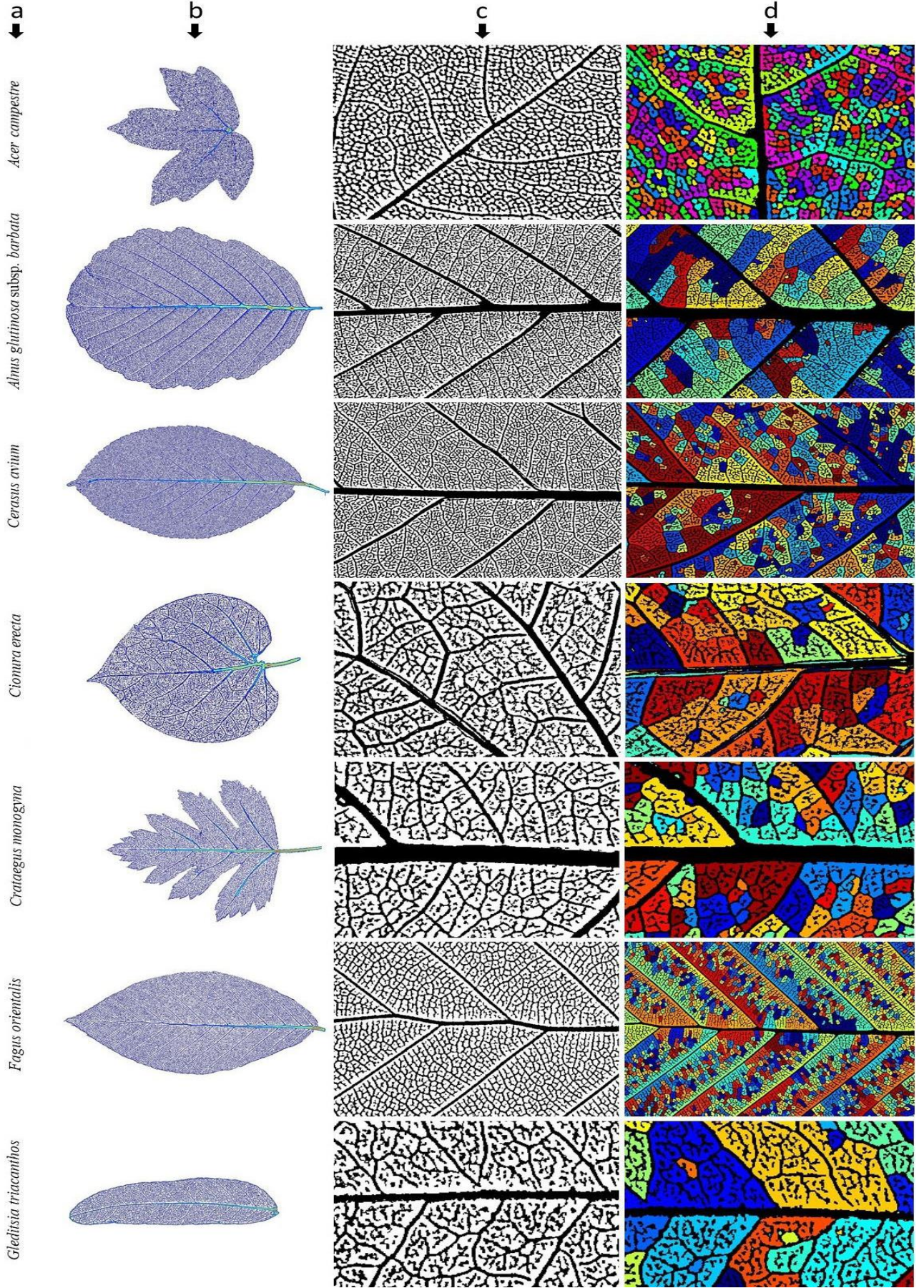
Robinia pseudoacacia ve *Gleditsia triacanthos*'un yaprak boyutlarının yazılım tarafından küçük ölçülmesi (yaprakçık çevresi ve alanı, damar ve boğum sayısı) bileşik yaprak ayasındaki yaprakçıkların analiz edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Toplam damar uzunluğu, toplam damar alanı, toplam damar ve boğum sayısı da türler arasında yaprak boyutları ile benzer eğilimi göstermektedir. Damar ve boğum sayısı *Juglans regia* ve *Platanus orientalis*'de en yüksek değerde; *Cionura erecta* ve *Gleditsia triacanthos*'da en düşük değerde ölçülmüştür. Toplam damar uzunluğu *Populus nigra*'da; toplam damar alanı ise *Platanus orientalis*'te en fazladır. Bu sonuçlara göre her bir yaprağa ait toplam damar uzunluğu ve toplam damar alanı gibi özellikler

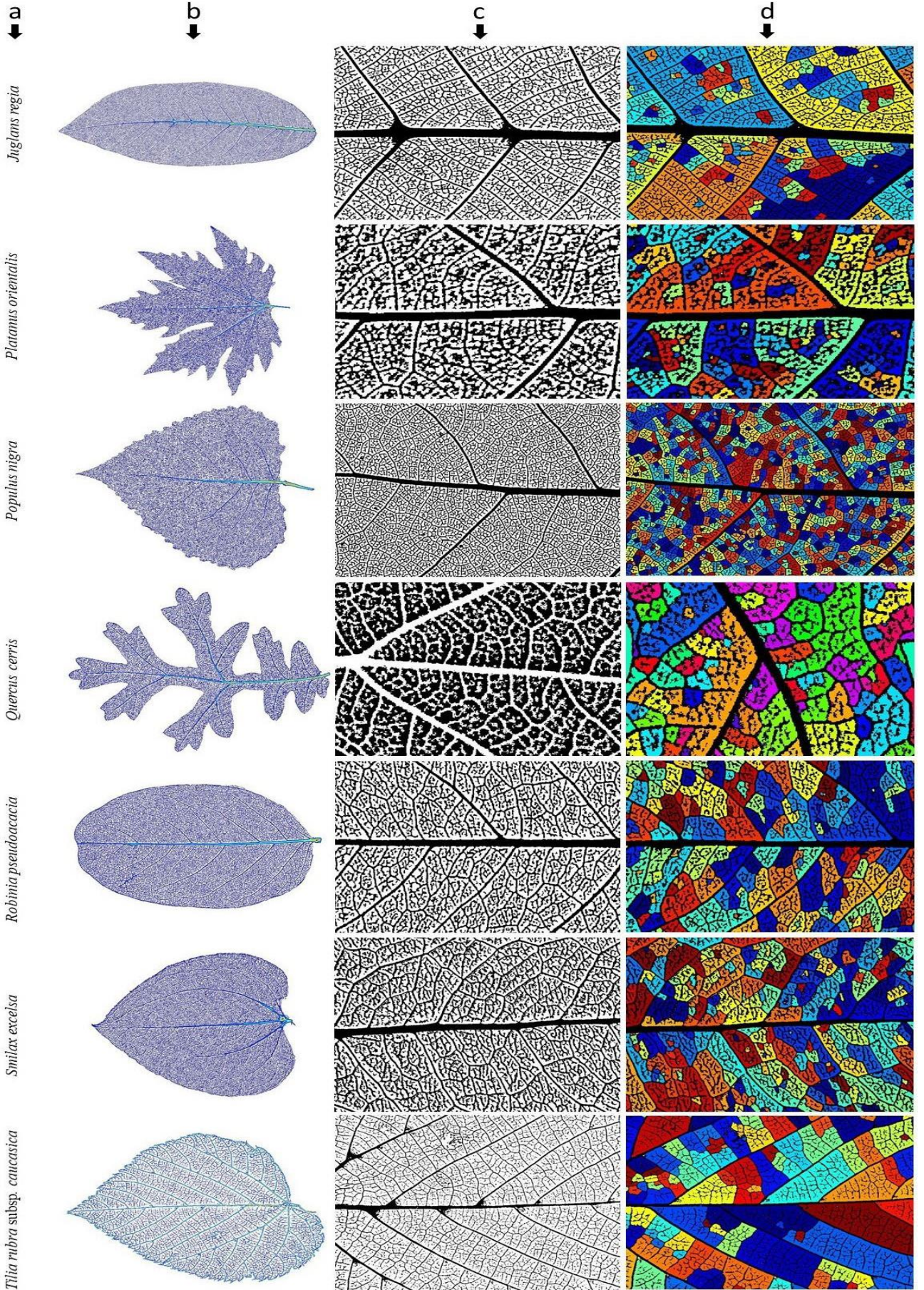
yaprak alanı ve yaprak çevresi ile ilişkili olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle yaprağın yüzey alanı arttıkça daha fazla damar ağına sahip olması beklenen bir sonuçtur.

Diğer taraftan ortalama damar boyutları, damar yüzey alanı ve hacmi gibi özelliklerde durum farklıdır. Yazılım iki ya da daha fazla damar elementinin birleşme noktasını boğum; iki boğum arasında kalan damar segmentlerini ise damar olarak tanımlamaktadır. *Cionura erecta* ve *Gleditsia triacanthos*; toplam yaprak boyutları ve damar boyutları ile boğum ve damar sayısı açısından en düşük değerleri göstermelerine rağmen ortalama damar boyu, ortalama damar genişliği, ortalama 2D damar alanı, ortalama 3D yüzey alanı ve damar hacmi en yüksek olan türlerdir. Bu özellikler açısından en düşük değerler ise *Alnus glutinosa* subsp. *barbata*, *Crataegus monogyna* ve *Tilia rubra* subsp. *caucasica* taksonlarında görülmektedir. *Tilia rubra* subsp. *caucasica*'da yaprak boyutları ve toplam damar özellikleri yüksek olmasına rağmen ortalama damar karakterleri düşük değerlerde seyretmektedir. Bu sonuçlar; ortalama damar boyutları ile toplam damar ya da yaprak boyutları gibi karakterler arasında ilişkinin olmadığını göstermektedir. Ancak damar boyu ile boğum ve damar sayısı arasında negatif ilişki göze çarpmaktadır. Damar boyu arttıkça boğum ve damar sayısı azalmaktadır (Şekil 2). Ayrıca birim alandaki areol sayısının; birim alandaki damar uzunluğu ile ilişkili olduğunu bildirilmiştir [15]. Bu nedenle areol sayısı da damar ve boğum sayısı ile birlikte değerlendirilmektedir. Fakat areol şekli de türler arasında çeşitlilik gösterir. Bazı yapraklarda areoller bulunmazken (üst kategorideki damarların serbest uçlu olmaları nedeniyle) bazı areoller ise damarlara benzer şekilde birkaç kategoride sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda bazı çalışmalar areol morfolojisi üzerinde yoğunlaşmaktadır [34, 35]. Araştırmamızda da areol şekli ile ilgili çeşitlilik göze çarpmaktadır. Bu nedenle areol morfolojisini de değerlendiren yazılımlara ihtiyaç olduğu görülmektedir.

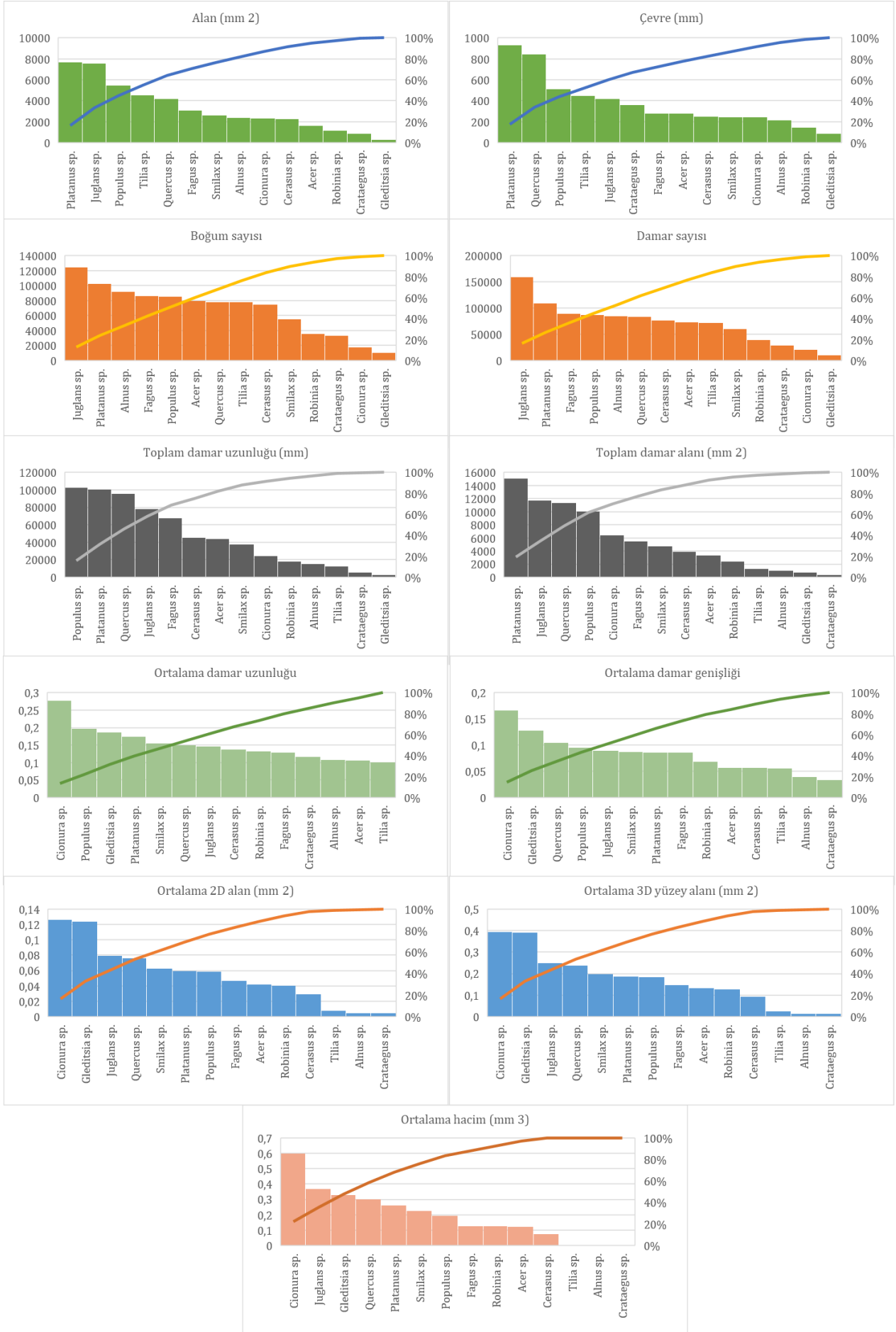
Alnus glutinosa subsp. *barbata* türü için detaylı inceleme yapıldığında bu türe ait yapraklardaki tüm özelliklerin düşük seviyede seyretmesine rağmen damar ve boğum sayısının yüksek olması dikkat çekicidir (Şekil 2). Ancak bu taksonun yaprak örneklerinde saydamlaştırma ve boyama aşamasında üçüncül damarlardaki netliğin yeterli olmadığı ve yazılımın segmentasyon verilerini olumsuz etkilediği açıkça görülmektedir. Bu nedenle bu taksona ait damar ve boğum sayısındaki fazlalık gerçeği yansıtmamaktadır. Dolayısıyla damar ve boğum sayısı gibi karakterler sistematik ya da ekolojik farklılıkları belirlemede kullanılacaksa saydamlaştırma ve boyama protokollerinin dikkatli uygulanması gerekmektedir.



Şekil 1. Damar segmentasyonu ve mesafe dönüşümü sonuçlarını gösteren 14 taksonun (a) yaprak örnekleri; (b) damarlar üzerindeki mesafe dönüşümünü ifade eden genel yaprak görüntüsü. (damar genişliği arttıkça damarın rengi maviden kırmızıya doğru değişen spektrumda farklı renklendirilmiştir), (c) damarların siyah, damar olmayan bölgelerin beyaz gösterildiği ikili imgeler, (d) renk etiketli areollerin görüntüsü (her bir renk farklı areölü temsil etmektedir).



Şekil 1 (Devam). Damar segmentasyonu ve mesafe dönüşümü sonuçlarını gösteren 14 taksonun (a) yaprak örnekleri; (b) Damarlar üzerindeki mesafe dönüşümünü ifade eden genel yaprak görüntüsü. (damar genişliği arttıkça damarın rengi maviden kırmızıya doğru değişen spektrumda farklı renklendirilmiştir), (c) damarların siyah, damar olmayan bölgelerin beyaz gösterildiği ikili imgeler, (d) renk etiketli areollerin görüntüsü (her bir renk farklı areölü temsil etmektedir).



Şekil 2. Damar morfometrik verilerine ait Pareto grafikleri

4. Tartışma ve Sonuç

Vasküler bitkiler yaprak morfolojisindeki çeşitliliğin yanı sıra damarlanma organizasyonu bakımından da oldukça farklı özelliklere sahiptirler. Yapılan bazı araştırmalar paralel ya da ağısı damarlanma gibi birincil damar organizasyonu evrimsel çerçevede korunsun da daha alt kategorideki damar düzenlenmesinin kolayca değiştiğini ve gelişimsel esneklik gösterdiğini savunmaktadır [2,36]. Araştırma sonuçlarımız bu görüşü destekler niteliktedir. Yaprak boyutları ile toplam damar boyutları, damar ve boğum sayısı arasındaki korelasyon göz önünde bulundurulduğunda gelişimsel çalışmalarda tür içi varyasyonun değerlendirilmesinde bu karakterlerin kullanılabilirliği düşünülmektedir. Ayrıca yaprak boyutunu etkileyen ekolojik faktörlerle ilgili araştırmalarda da bu karakterler değerlendirilebilir. Dolayısıyla damarlanmanın detaylı morfolojik ve metrik özellikleri tanımlamada, sınıflandırmada ya da ekolojik özelliklere bağlı tür içi varyasyonun incelenmesinde kullanışlı karakterler sunabilir.

Yaprak damarlanma şekli, yaprak işlevinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Örneğin ana damarların; daha alt kategorideki damarlara kıyasla çok fazla miktarda lignin içermeleri nedeniyle mekanik direnç ya da maliyet ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [10]. Küçük damarların ise doku içerisinde yakın mesafeli ağ oluşturmaları ve hidrolik direnç üzerindeki aşırı etkisi nedeniyle fotosentez ve su iletimine katkısı daha fazladır [6, 37,38]. Ayrıca damarlanmanın geometrik yapısı kuraklık ya da donma kaynaklı embolizm gibi yaprakların ekofizyolojik özelliklerinin incelenmesinde de kullanılmaktadır [39]. Araştırmamızda yaprak boyutları ile toplam damar boyutlarından bağımsız olarak ortalama damar boyu, ortalama damar genişliği, ortalama 2D damar alanı, ortalama 3D yüzey alanı ve damar hacmi gibi özelliklerin farklı eğilim gösterdiği ve çalışılan yapraklar arasında oldukça çeşitli olduğu görülmektedir. Damar boyu; boğum sayısı ve areol yoğunluğu ile negatif ilişkilidir. Bu nedenle damar uzunluğunun fazla olması areol alanının büyük olmasına ya da diğer bir deyişle yapraktaki damar içermeyen bölgelerin artması anlamına gelir. Bu durum teorik olarak fotosentez hızını/ya da verimini etkileyecektir. Ayrıca damar uzunluğu arttıkça damarlar arası bağlantılar (boğum sayısı) azalmaktadır. Dolayısıyla çeşitli stres faktörleri kaynaklı emboli oluşumu durumunda damarlar arası bağlantıların az olması alternatif iletim yollarının yeterli olmaması anlamına gelir. Bu nedenle söz konusu damar özelliklerinin belirlenmesi türün ekolojik faktörlerle ilişkili fotosentez verimi, ya da olası stres koşullarındaki tutumu hakkında ön değerlendirme sunabilecek modelleri de ortaya koyarak ekofizyolojik çalışmalara da katkı sağlayabilir.

Yazılım *Alnus glutinosa* subsp. *barbata* yapraklarında damar ve boğum sayısını yüksek ölçmüştür. Detaylı incelemeler programının bir dezavantajı olarak saydamlaştırma ve boyama yönteminde optimizasyonun gerekli olduğunu göstermektedir. Düşük kaliteli fotoğraflarda kayıp pikseller damar ve boğum sayısını hatalı ölçmektedir. Her yaprak örneğinin yapısal özelliği (yaprak kalınlığı, tüyler gibi epidermal dokuların yapısı, destek elemanlarının miktarı vb.) farklı olduğundan saydamlaştırma ve boyama aşamalarının türe özgü olarak optimize edilmesi sonuçların güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Sonuç olarak ön hazırlık prosedürleri doğru ve dikkatli gerçekleştirildiğinde bu yöntemle pek çok amaçla farklı bitki gruplarında uygulanabilecek düşük maliyetli, kolay, hızlı ve güvenilir verilerin elde edilebileceği görülmektedir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Roth-Nebelsick, A., Uhl, D., Mosbrugger, V., Kerp, H. 2001. Evolution and Function of Leaf Venation Architecture: A Review. *Annals of Botany*, 87(5), 553-566.
- [2] Ellis, B., Daly, D., Hickey, L. 2009. *Manual of Leaf Architecture*. New York, USA: New York Botanical Garden.
- [3] Vincent, J. F. 1982. The Mechanical Design of Grass. *Journal of Materials Science*, 17(3), 856-860.
- [4] Niklas, K. J. 1999. A Mechanical Perspective on Foliage Leaf Form and Function. *The New Phytologist*, 143(1), 19-31.
- [5] Givnish, T. J., Pires, J. C., Graham, S. W., McPherson, M. A., Prince, L. M., Patterson, T. B., Rai, H. S., Roalson, E. H., Evans, T. M., Hahn, W. J., Millam, K. C., Meerow, A. W., Molvray, M., Kores, P. J., O'Brien, H. E., Hall, J. C., Kress, W. J., Sytsma, K. J. 2005. Repeated Evolution of Net Venation and Fleshy Fruits Among Monocots In Shaded Habitats Confirms a Priori Predictions: Evidence From An *ndhF* Phylogeny. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1571), 1481-1490.
- [6] Brodribb, T. J., Feild, T. S., Jordan, G. J. 2007. Leaf Maximum Photosynthetic Rate and Venation are Linked by Hydraulics. *Plant Physiology*, 144(4), 1890-1898.

- [7] Agrawal, A. A., Konno, K. 2009. Latex: A Model for Understanding Mechanisms, Ecology, and Evolution of Plant Defense Against Herbivory. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 40, 311-331.
- [8] Katifori, E., Szöllősi, G. J., Magnasco, M. O. 2010. Damage and Fluctuations Induce Loops in Optimal Transport Networks. *Physical Review Letters*, 104(4), 048704.
- [9] Brodribb, T. J., Bienaimé, D., Marmottant, P. 2016. Revealing Catastrophic Failure of Leaf Networks under Stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(17), 4865-4869.
- [10] John, G. P., Scoffoni, C., Buckley, T. N., Villar, R., Poorter, H., Sack, L. 2017. The Anatomical and Compositional Basis of Leaf Mass per Area. *Ecology Letters*, 20(4), 412-425.
- [11] Blonder, B., Salinas, N., Bentley, L. P., Shenkin, A., Chambi Porroa, P. O., Valdez Tejeira, Y., Espinoza, T. E. B., Goldsmith, G. R., Enrico, L., Martin, R., Asner, G. P., Díaz, S., Enquist, B. J., Malhi, Y. 2018. Structural and Defensive Roles of Angiosperm Leaf Venation Network Reticulation Across an Andes-Amazon Elevation Gradient. *Journal of Ecology*, 106(4), 1683-1699.
- [12] Ohtsuka, A., Sack, L., Taneda, H. 2018. Bundle Sheath Lignification Mediates the Linkage of Leaf Hydraulics and Venation. *Plant, Cell and Environment*, 41(2), 342-353.
- [13] Sack, L., Scoffoni, C., McKown, A. D., Frole, K., Rawls, M., Havran, J. C., Tran, H., Tran, T. 2012. Developmentally Based Scaling of Leaf Venation Architecture Explains Global Ecological Patterns. *Nature Communications*, 3(1), 1-10.
- [14] Nelson, T., Dengler, N. 1997. Leaf Vascular Pattern Formation. *The Plant Cell*, 9(7), 1121.
- [15] Blonder, B., Violle, C., Bentley, L. P., Enquist, B. J. 2011. Venation Networks and The Origin of the Leaf Economics Spectrum. *Ecology Letters*, 14(2), 91-100.
- [16] Price, C. A., Weitz, J. S. 2014. Costs and Benefits of Reticulate Leaf Venation. *BMC Plant Biology*, 14(1), 234.
- [17] Tyree, M. T., Zimmermann, M. H. 2013. *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Springer Science and Business Media.
- [18] Anfodillo, T., Carraro, V., Carrer, M., Fior, C., Rossi, S. 2006. Convergent Tapering of Xylem Conduits in Different Woody Species. *New Phytologist*, 169(2), 279-290.
- [19] Weitz, J. S., Ogle, K., Horn, H. S. 2006. Ontogenetically Stable Hydraulic Design in Woody Plants. *Functional Ecology*, 191-199.
- [20] Coomes, D. A., Jenkins, K. L., Cole, L. E. 2007. Scaling of Tree Vascular Transport Systems Along Gradients of Nutrient Supply and Altitude. *Biology Letters*, 3(1), 87-90.
- [21] Mencuccini, M., Hölttä, T., Petit, G., Magnani, F. 2007. Sanio's Laws Revisited. Size-Dependent Changes in the Xylem Architecture of Trees. *Ecology Letters*, 10(11), 1084-1093.
- [22] Tyree, M. T., Sperry, J. S. 1989. Vulnerability of Xylem to Cavitation and Embolism. *Annual Review of Plant Biology*, 40(1), 19-36.
- [23] Turcotte, D. L., Pelletier, J. D., Newman, W. I. 1998. Networks with Side Branching in Biology. *Journal of Theoretical Biology*, 193(4), 577-592.
- [24] McCulloh, K. A., Sperry, J. S., Adler, F. R. 2003. Water Transport in Plants Obeys Murray's Law. *Nature*, 421(6926), 939-942.
- [25] Agarwal, G., Belhumeur, P., Feiner, S., Jacobs, D., Kress, W. J., Ramamoorthi, R., Bourg, N. A., Dixit, N., Ling, H., Mahajan, D., Russell, R., Shirdhonkar, S., Sunkavalli, K., White, S. 2006. First Steps Toward an Electronic Field Guide for Plants. *Taxon*, 55(3), 597-610.
- [26] Solé-Casals, J., Travieso, C. M., Alonso, J. B., Ferrer, M. A. 2009. Improving a Leaves Automatic Recognition Process using PCA. In *2nd International Workshop on Practical Applications of Computational Biology and Bioinformatics (IWPACBB 2008)*, pp. 243-251, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [27] Horgan, G. W., Talbot, M., Davey, J. 1998. Towards Automatic Recognition of Plant Varieties. *Challenge of Image Retrieval*, 5 February, Newcastle, UK, 1-8.
- [28] Perez, A. J., Lopez, F., Benlloch, J. V., Christensen, S. 2000. Colour and Shape Analysis Techniques for Weed Detection in Cereal Fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(3), 197-212.
- [29] Im, C., Nishida, H., Kunii, T. L. 1998. Recognizing Plant Species by Leaf Shapes-A Case Study of the Acer Family. *Fourteenth International Conference on Pattern Recognition*, 20 August, Brisbane, Queensland, Australia, 1171-1173.
- [30] Golzarian, M. R., Frick, R. A. 2011. Classification of Images of Wheat, Ryegrass and Brome Grass Species at Early Growth Stages using Principal Component Analysis. *Plant Methods*, 7(1), 28.
- [31] Bayırlı, M., Selvi, S., Çakılcıoğlu, U. 2014. Determining Different Plant Leaves' Fractal Dimensions: a New Approach to Taxonomical Study of Plants. *Bangladesh Journal of Botany*, 43(3), 267-275.
- [32] Vasco, A., Thadeo, M., Conover, M., Daly, D. C. 2014. Preparation of Samples for Leaf Architecture Studies, a Method for Mounting

- Cleared Leaves. Applications in Plant Sciences, 2(9), 1400038.
- [33] Price, C. A., Symonova, O., Mileyko, Y., Hilley, T., Weitz, J. S. 2011. Leaf Extraction And Analysis Framework Graphical User Interface: Segmenting and Analyzing the Structure of Leaf Veins and Areoles. *Plant Physiology*, 155(1), 236-245.
- [34] Mileyko, Y., Edelsbrunner, H., Price, C. A., Weitz, J. S. 2012. Hierarchical Ordering of Reticular Networks. *PLoS One*, 7(6), e36715.
- [35] Katifori, E., Magnasco, M. O. 2012. Quantifying loopy network architectures. *PloS One*, 7(6), e37994.
- [36] Sack, L., Scoffoni, C. 2013. Leaf Venation: Structure, Function, Development, Evolution, Ecology and Applications in the Past, Present and Future. *New Phytologist*, 198, 983-1000.
- [37] McKown, A. D., Cochard, H., Sack, L. 2010. Decoding Leaf Hydraulics with a Spatially Explicit Model: Principles of Venation Architecture and Implications for its Evolution. *American Naturalist*, 175, 447-460.
- [38] Hua, L., He, P., Goldstein, G., Liu, H., Yin, D., Zhu, S., Ye, Q. 2019. Linking Vein Properties to Leaf Biomechanics Across 58 Woody Species from a Subtropical Forest. *Plant Biology*, 22, 212-220.
- [39] Kang, J., Dengler, N. 2004. Vein Pattern Development in Adult Leaves of *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Plant Sciences*, 165(2), 231-242.

Ekler

Ek A. Yaprak damar karakterlerine ait ortalama morfometrik veriler

Takson/Karakterleri	Yaprak özellikleri		Damar özellikleri								
	Alan (mm ²)	Çevre (mm)	Damar sayısı	Boğum sayısı	Toplam damar uzunluğu (mm)	Toplam damar alanı (mm ²)	Ortalama damar uzunluğu	Ortalama genişlik	Ortalama 2D alan (mm ²)	Ortalama 3D yüzey alanı (mm ²)	Ortalama hacim (mm ³)
<i>Acer campestre</i>	1646,185	276,9655	73283	80055	43950	3376	0,1064	0,057199	0,042334	0,133	0,12259
<i>Alnus glutinosa</i> subsp. <i>barbata</i>	2421,892	217,0631	85033	91995	15080	1063	0,10846	0,03911	0,004861	0,015271	0,000576
<i>Cerasus avium</i>	2271,974	250,6428	77220	75044	45448	3895,5	0,13868	0,057094	0,029448	0,092514	0,075635
<i>Cionura erecta</i>	2357,393	243,4086	21005	17546	24205,33	6442,757	0,278124	0,166081	0,126093	0,396134	0,600007
<i>Crataegus monogyna</i>	851,1523	361,5062	29633	33362	5388,866	349,3508	0,116608	0,033384	0,004701	0,014768	0,00045
<i>Fagus orientalis</i>	3104,645	277,6523	90071	86738	68076	5543,2	0,12886	0,08593	0,046607	0,14642	0,12886
<i>Gleditsia triacanthos</i>	278,5467	87,77991	10078	10972	2693,205	756,6635	0,186806	0,127878	0,124381	0,390753	0,329302
<i>Juglans regia</i>	7601,16	419,3154	160005	125005	78398	11780	0,14628	0,089237	0,079326	0,24921	0,37081
<i>Platanus orientalis</i>	7662,859	933,4946	109005	103005	100305	15128	0,17539	0,08669	0,059481	0,18687	0,26312
<i>Populus nigra</i>	5490,051	510,9013	87405	85651	103005	10058	0,19748	0,096038	0,058763	0,18461	0,19316
<i>Quercus cerris</i>	4224,585	847,074	84306	78577	95853	11354	0,15026	0,10468	0,076218	0,23944	0,30057
<i>Robinia pseudoacacia</i>	1147,057	144,5248	39607	35538	18470,15	2396,405	0,132992	0,069114	0,040496	0,127222	0,126236
<i>Smilax excelsa</i>	2611,204	244,3095	60134	55184	37665,18	4739,27	0,15539	0,087244	0,063182	0,198491	0,226312
<i>Tilia rubra</i> subsp. <i>caucasica</i>	4518,538	450,0509	72438	78218	12535	1314,8	0,10149	0,055638	0,007768	0,024403	0,001606