

Soyada Kök Uzaması ve Çevresel Faktörlerle Etkileşimi

Uğur SEVİLMİŞ^{1*}, Deniz SEVİLMİŞ², Yaşar Ahu ÖLMEZ²

¹ Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Adana, 01375, Türkiye.

² Yağlı Tohumlar Araştırma Enstitüsü, Osmaniye, 80950, Türkiye.

*Sorumlu yazar: sevilmisugur@yahoo.com ; 0532 598 0509

Geliş Tarihi: 19.11.2019 / Kabul Tarihi: 18.12.2019

Özet

Kök uzunluğu, bir bitkinin besin ve su alma, yatma, stres toleransı ve verimi ile yakından ilgili, en önemli parametrelerden biridir. Birçok genetik ve çevresel faktör kök uzaması üzerinde etkilidir ki buna tepki olarak kökler morfolojisinde ve fizyolojisinde önemli esneklikler gösterebilmektedir. Ayrıca kök uzaması, hızlı bir fitotoksisite test yöntemi olarak, yüksek duyarlılık, basitlik, düşük maliyet ve düşük kimyasal kararlılığa sahip kimyasallar veya numunelere uygunluk gibi avantajları vardır.

Soyada kök uzaması konusunda dünyada yapılmış çalışmaların incelendiği bu çalışmada, kök uzaması konusunda farklı bitki türlerinde yapılmış çalışmalar rehberliğinde incelemeye açık alanlar da belirlenmiştir. Kök uzamasının biyotik ve abiyotik çevresel faktörlerle etkileşiminin incelenmesi sonucunda, küresel ve ülkesel soya üretimine katkı sağlayabilecek çıktılar sonuç bölümünde sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Soya, kök uzaması, rizosfer, stres

Root Elongation in Soybeans and Its Interaction with Environmental Factors

Abstract

Root length is one of the most important parameters closely related to nutrient and water uptake, lodging, stress tolerance and yield of a plant. Many genetic and environmental factors effect root elongation rate, which in turn shows significant flexibility in the morphology and physiology of the roots. Furthermore, root elongation measurements shows several advantages as a fast phytotoxicity test method in terms of high sensitivity, simplicity, low cost and suitability to chemicals or samples with low stability.

In this review, the studies on root elongation in soybean are examined and grouped, and the open areas to study were determined with the guidance of the studies carried out in

different plant species on root elongation. As a result of the analysis of the interaction of root elongation with biotic and abiotic environmental factors, resultant inferences that may contribute to global and national soybean production are presented in the conclusion section.

Keywords: Soybean, root elongation, rhizosphere, stress

1. Giriş

Kökler, bitkilerin topraktan su ve besin alan organı durumundadır ki kök sistemi mimarisi, yüksek seviyede ve istikrarlı tarımsal ürün üretimini sağlamada büyük öneme sahiptir (Obara ve ark., 2014). Kök sistemi bitkiyi toprağa bağlarken besin ve su alarak bitkinin ototrof yaşamına katkıda bulunur. Köklerin gelişim düzeyi, besin elementlerinin ve suyun mevcudiyetinden büyük ölçüde etkilenmektedir (Mohamed ve ark., 2018). Köklerin uzaması ve dallanmasının önemi, özellikle su ve gübrenin kısıtlı olması durumunda artış gösterir (Bengough, 2012). Kök sistemi mimarisi besin elementlerinin topraktaki varlığına bağlıdır çünkü besin elementleri birincil ve yan kök gelişimini şekillendirmektedir (Giehl ve ark., 2012). Besin elementi emiliminde özellikle kök uzaması ve tüsü kök oluşumu yüksek öneme sahiptir (Li ve ark. 2006).

Kök uzunluğunun, bir bitkinin besin ve su alma, yatma, kuraklık toleransı ve verimi ile yakından ilgili olan en önemli parametrelerden biri olduğu, bu nedenle, kök uzamasını kontrol eden mekanizmaları ortaya çıkarmanın agronomik olarak önemli olduğu Ichii ve Yao, (2003) tarafından bildirilmiştir. Kök sistemleri, çevresel değişkenlere tepki olarak morfolojisinde ve fizyolojisinde önemli esneklikler gösterebilmektedir. Örneğin toprakaltında su tablasının altındaki köklerin uzaması hipoksi nedeniyle yavaşlarken, yüzeye yakın kökler, uzama oranlarını artırarak bu durumu telafi etmektedir (Dresbøll ve ark., 2013). Kalın kökler, ince olanlardan daha hızlı uzama yeteneğindedir. Bununla birlikte, belirli bir bitki türünde, belirli bir çaptaki köklerin büyümesi çok değişken olabilmektedir ki bu nedenle kök çapı yalnızca kök potansiyel uzama oranının bir belirleyicisi olarak kabul edilir. Kök uzaması karbon mevcudiyeti ile yüksek oranda ilişkili olduğu için, birim uzunluk başına oluşan yanal kök sayısı (dallanma yoğunluğu), mevcut kaynaklar için gerçekleşen yerel rekabet yoluyla ayarlanmaktadır (Lecompte ve Pagès, 2007).

Bitkilerde kök büyümesi, oksin (IAA) ve etilen hormonları tarafından düzenlenmektedir (Han ve ark., 2019). Oksin hormonu, model bitki olan *Arabidopsis thaliana*'da kök gelişimini düzenleyen süreçlerin çoğunda kilit düzenleyici durumunda olup hem yanal kök konumlandırma hem de kök uzaması için önemli bir bitki hormonu durumundadır (Gottfried, 2015). Kök uzaması, meristematik bölgede hücre bölünmelerini ve uzama bölgesinde

hücrelerin uzamasını gerektirir. Hücrelerin bölünmesi ve uzaması arasındaki sınıra “geçiş bölgesi” denmektedir. Meristem bölgesinde ilk oluşan hücreler sürekli bölünür, ancak meristemin taban (bazal) kısmındaki hücreler “geçiş bölgesi”ni aşarak meristemden çıkar ve uzama bölgesine girer ki burada bölünmeleri durur ve uzamaları hızlanır. Bu ilerleme boyunca bu hücrelerde, hücre döngüsünde değişiklikler gerçekleşir (Alarcón Sánchez & Salguero Hernández, 2017). Uzama işlemi sırasında epidermal hücreler birkaç saat içinde uzunluklarını %300 arttırmaktadırlar. Uzama sona erdiğinde, hücreler farklılaşma bölgesinde son boyutlarını, şekillerini ve işlevlerini kazanırlar (Markakis ve ark., 2012).

Bitki hücre duvarı kompozisyonu, özellikle köklerde büyüme oranlarını düzenlemede önemlidir. Bununla birlikte, ne hücre duvarı bileşimi ne de transkriptom analizleri, hangi genlerin ve süreçlerin büyüme oranı ve hücre uzama oranına etki ettiğini kapsamlı bir şekilde ortaya koyamamaktadır (Wilson ve ark., 2015). Birçok gelişimsel süreçte önemli rollere sahip olan hücre duvarı proteinleri hücre uzamasında da gereklidir. Bununla birlikte hücre duvarının protein kompozisyonu hakkındaki bilgiler yeterli değildir (Zhu ve ark., 2006).

Expansin, hücre duvarlarının uzun süreli genişlemesini katalize eden ve bitkilerde hücre genişlemesini etkileyen temel bir protein ailesidir. Lee ve ark., (2003), soyada kök uzamasından sorumlu olabilecek köke özgü ilk expansin genini (GmEXP1) belirlemişlerdir. Yürüttükleri çalışmada hızlı kök uzamasının gerçekleştiği 1-5 günlük fidelerin köklerinde GmEXP1'in ekspresyon seviyelerini çok yüksek bulmuşlardır. Ayrıca, GmEXP1 mRNA, hücre uzamasının gerçekleştiği kök ucu bölgesinde bolca mevcut, ancak hücre uzamasının durduğu olgunlaşma bölgesinde çok az bulunmuştur ki bu durum ekspresyonunun kök gelişim süreçleriyle yakından ilişkili olduğunu göstermiştir.

Lin ve Key, (1968), soyada sağlam fide dokusunun hücre uzaması sırasında RNA ve protein sentezi gerekliliğini sağlam soya fidelerinde incelemişlerdir. Bu amaçla kök ucunun uzama bölgesinin 2 ve 7 mm gerisine Hint mürekkebi ile işaretler koymuşlardır. Çoğu kesilmiş bitki dokusunun aksine, bozulmamış kök hücre uzaması sırasında belirgin bir RNA ve protein sentezi gözlemişlerdir. Sikloheksimid (CH) ve aktinomisin-D (DH)'nin, soya köklerinde hücre uzamasının kuvvetli inhibitörleri olduğunu tespit etmişlerdir. İster net protein birikimi, ister 14C-leisiisin ilavesi ile ölçülmüş olsun, CH, hücre uzamasını esas olarak kısa bir gecikmeden sonra tamamen inhibe ederken protein sentezini engellemiştir. Öte yandan AD, sadece bir gecikmeden sonra hücre uzamasını neredeyse tamamen ederken, protein sentezini sadece kısmen inhibe etmiştir.

Çimlenme oranı ve kök uzaması, hızlı bir fitotoksisite test yöntemi olarak, yüksek duyarlılık, basitlik, düşük maliyet ve düşük kararlılığa sahip kimyasallar veya numunelere

uygunluk açısından çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar onları büyük ölçekli bir fitotoksosite veritabanı geliştirmek için uygun hale getirmiş ve özellikle fitotoksosite mekanizmalarını incelemek için “kantitatif yapı-aktivite ilişkisi” (QSAR) geliştirmede uygun kılınmıştır (Wang ve ark., 2001).

Kök büyümesinin dinamiklerini ölçmek, bitki örtüsünün karbon döngüsündeki rolünü karakterize etmede de büyük öneme sahiptir (Mao ve ark., 2013).

2. Toprağın fiziki ve kimyasal özelliklerinin soyada kök uzamasına etkisi

Toprak sıkışması modern tarımın karşılaştığı en büyük sorunlardan biridir. Makinelerin aşırı kullanımı, yoğun tarım, kısa ürün rotasyonu, yoğun otlatma ve uygun olmayan toprak yönetimi sıkışmaya neden olmaktadır (Jung ve ark., 2012). Toprak sıkışması nedeniyle ortaya çıkan mekanik direnç, birçok tarla toprağında kök uzamasının önündeki ana sınırlamadır (Bengough, 2012). Tarla toprakları, genelde sıkışmış katmanlar nedeniyle penetrasyon direnci gösteren bölgeler içerirken, çatlaklar ve biyolojik süreçlerle oluşmuş kanallar, köklere düşük dirençli patikalar sağlar (Bengough & Young, 1993).

Jung ve ark., (2012), toprak yapısının ve toprak profilindeki farklı sıkışma seviyelerinin soya kökünün büyümesi üzerindeki etkilerinin değerlendirmek için bir çalışma yapmışlardır. Soya bitkilerini, üç farklı tekstürdeki (killi, tınlı ve kaba tınlı) ve farklı sıkıştırma seviyelerindeki (1.25, 1.50, 1.75 ve 2.00 MPa) toprakta silindirik saksılarda yetiştirmişlerdir. Sonuçta soya gelişiminin, toprak tipinden bağımsız olarak penetrasyon direncine daha duyarlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Soya verimi ve kök yoğunluğu, hem killi hem de ince tınlı topraklarda artan toprak sıkışma seviyeleriyle birlikte önemli ölçüde azalmış, ancak kaba tınlı toprakta değişmemiştir. Kök ağırlığının yoğunluğu en yüksek kaba tınlı toprakta olmuş ve bunu sırasıyla ince tınlı ve killi toprak takip etmiştir. Toprak sıkıştırma seviyelerine göre kök büyümesi, kil, ince tınlı ve kaba tınlı topraklar için sırasıyla 1.16, 1.28 ve 1.60 MPa'dan sonra düşmeye başlamıştır.

Toprakların nem kaybedip kuruması sürecinde kök uzaması genellikle mekanik direnç ve su stresi kombinasyonu ile sınırlanmaktadır (Bengough ve ark., 2011). Toprağın sıkışması veya kurumasına bağlı olarak artan toprak direnci, kök büyümesi ve tarımsal ürün verimliliğinde önemli bir sınırlamadır. Yüksek mukavemetli topraklarda kökler uzarken daha yüksek penetrasyon kuvveti uygulamak zorundadır (Colombi ve ark., 2017).

Toprak profilinin derinlerindeki toprak suyuna erişilebilmek, kurak koşullar altındaki bitkiler için oldukça faydalıdır. Bu nedenle, ozmotik stres altında kök büyüme ve gelişimini sürdürebilen çeşitler kurak koşullarda verimliliği daha iyi sürdürebilmektedir. Toprak

suyunun mevcudiyeti, yağışa dayalı soya üreten bölgelerde, ürün veriminde çoğunlukla bir sınırlama etmeni olduğundan, su stresi altında kök büyümesinde genetik çeşitlilik olup olmadığının bilgisi, bu bölgelere adapte soya çeşitlerinde kuraklık toleransının iyileştirilmesi için faydalı bir bilgidir (Walden ve ark., 2007).

Yamaguchi ve ark., (2010), su stresi altındaki soyada primer köklerdeki uzamanın, uçtaki 4 mm'de (bölge 1), iyi sulanan köklerdeki oranlarda olduğunu, ancak iyi sulanmış köklerde maksimum uzama sergileyen bölge olan 4-8 mm arasındaki bölgede (bölge 2) kademeli olarak engellendiğini tespit etmişlerdir. Soyadaki bu tepkileri anlamak için, çözünür protein bileşiminin uzamsal profillerini analiz etmişlerdir. Değişiklikler arasında, bölgeye özgü fenilpropanoid metabolizmasının düzenlenmesinin farklı bölgelerdeki farklı büyüme tepkilerine neden olabileceğini işaret etmiştir. İzoflavonoid biyosentezi ile ilgili birkaç enzim, bölge 1'de yüksek miktarda artmıştır. Buna karşılık, lignin sentezinde rol alan caffeoyl-CoA O-metiltransferaz, bölge 2'de yüksek düzeyde uyarılmıştır. Bu tepki, bu bölgedeki büyümenin inhibisyonu ile ilişkili olabilecek daha fazla lignin birikimi ile ilişkilendirilmiştir. Su stresine maruz köklerin her iki bölgesinde de yüksek miktarda artış gösteren birçok protein, oksidatif hasardan koruma ile ilgili olanlar olmuştur. Özellikle, ferritin proteinlerinin miktarındaki artış, daha fazla demirin hapsedilmesine ve uzama bölgesinde su stresi altında aşırı serbest demir bulunmasını önlemiştir.

Sato ve ark. (1997), laboratuvar koşullarında tohum yatağında çimlendirilen ve toprakta yetiştirilen soyada kök uzaması üzerine toprağın fiziksel özelliklerinin etkisini değerlendirmek için denemeler yapmışlardır. Değişken toprak-su içeriğine ve kuru kütle yoğunluklarına sahip olan toprak, kök uzaması denemeleri için hazırlanmıştır. Zemin mekanik direnci, kökün toprağa nüfuz etmesinin ilk aşamasında kök uzamasını güçlü bir şekilde etkilemiştir. Toprağa bir gün boyunca nüfuz eden kökün uzama hızı, hem kütle yoğunluğundan hem de toprağın mekanik direncinden etkilenmiştir. Islak toprak koşullarında hava gözeneklerindeki azalma da köke yetersiz oksijen sağlanması nedeniyle uzama oranını düşürmüştür. Kuru kütle yoğunluğu, gözenek boşluğu sağlaması nedeniyle kök uzamasını etkilemiş ve uzamada ikinci baskın faktör olmuştur. Kökler, artan toprak-su içeriği sonucunda kendi gözenek alanını kolaylıkla oluşturabilip uzayabildiğinden, bu, uzamayı etkileyen üçüncü faktör olmuştur. Mekanik direnç düzeyi, toprak direnci ve kütle yoğunluğunun etkilerini de içerdiği için, kök uzaması için en önemli faktör olduğu sonucuna varmışlardır.

Bitki gelişiminin ilk aşaması olan bitki tohumu çimlenmesi ve kök uzaması, olumsuz çevresel strese duyarlıdır (Wang ve Elseth, 1990). Kuraklık ve toprak tuzluluğunun neden olduğu osmotik stres, bitki kök sisteminin büyümesini ve gelişmesini etkileyen önemli

faktörlerden biridir (Liu ve ark., 2014). Tuz stresi tohum çimlenmesini engelleyip, bitki büyümesini geciktirmekte ve yaşlanmayı hızlandırmaktadır. Soğuk veya kuraklık stresi ise hücre hasarına ve bitki ölümüne neden olabilir. Tuz, kuraklık veya soğuk stresine bitkilerin toleransını değerlendirmek için kullanılabilir parametrelerden biri olan kök uzaması, bitki yaş ağırlık artışı, tohum çimlenmesi, elektrolit sızma düzeyi veya bitki su kaybı ölçümü öne çıkmaktadır (Lee ve Zhu, 2009).

Bejaoui, (1980), tuzun soyada kök ucu büyümesine etkisini incelemiştir. NaCl mevcudiyeti, büyüme ve oksijen alımını engellemiş fakat dikey büyümeyi uyarmıştır. Bu etkiler, NaCl konsantrasyonu 50mM'den yüksek olduğunda önemli ölçüde yüksek olmuştur. Yatay köklerde NaCl'nin neden olduğu büyümenin ve O₂ alımının engellenmesi dikey köklere kıyasla daha yüksek olmuştur.

Toprak alkaliliği, dünya genelinde tarımsal ürünlerin verim ve kalitesinde büyük düşüslere neden olur. Bitki kökü, toprak alkalinitesini algılayan ilk organdır ve tepki olarak daha kısa birincil köklerin oluşumu sağlar. Bununla birlikte, kök uzamasının alkalilik stresine bağlı engellenmesinin altında yatan mekanizma henüz açıklanabilmiş değildir (Li ve ark., 2015).

Tarımsal üretimde bitki gelişimi, büyük ölçüde topraktaki azot mevcudiyetine ve köklerin azot alım etkinliğine bağlıdır. Bu nedenle, azot dalgalanmalarına kökün adaptasyonunun altında yatan moleküler olayların anlaşılması, sürdürülebilir tarım için birincil amaçlardandır. Bununla birlikte, azot mevcudiyetine moleküler tepkiler hakkındaki bilgiler esas olarak model bitki türlerinde yapılan çalışmalardan elde edilmiştir. Nitrik oksidin (NO) son zamanlarda çevresel streslere karşı bitki tepkilerinde önemli görevleri olduğu öne sürülmüş, ancak bitkilerin besinsel strese tepkilerinde rolü hala değerlendirilme aşamasındadır (Manoli ve ark., 2013). Kök sistemi mimarisinin besin elementi yetersizliğine tepkisi sürdürülebilir tarım için kritik öneme sahiptir. Nitrik oksit (NO), işleyiş mekanizması bilinmemesine rağmen, kök büyümesinin kilit bir düzenleyicisi olarak kabul edilir (Sun ve ark, 2016). Örneğin alüminyum (Al) toksisitesi asit topraklarda tarımsal üretimde en yaygın sorunlardan biridir ve nitrik oksit (NO) bitkilerde çeşitli biyotik ve abiyotik streste rol oynayan kilit bir sinyal molekülüdür (Zhou ve ark., 2012). Alüminyum (Al), asidik topraklarda Al³⁺ formunda çözüldüğünde fitotoksiktir. Al³⁺ toksisitesinin ilk ve belirgin belirtilerinden biri kök uzamasının engellenmesidir (Sun ve ark. 2009). Al toksisitesinin belirtileri genellikle membran fonksiyonu ve kök gelişiminin bozulması şeklindedir (Lenoble ve ark. 1996). Kök uzamasının Al ile kısıtlanmasının mekanizması hala iyi anlaşılmamıştır ve

Al toksisitesinin birincil lezyonlarının apoplastik mi yoksa semplastik mi olduğu tartışma konusudur (Horst ve ark., 2010).

Wang ve ark., (2017), soyada kök büyümesini Aluminium (Al) nedeniyle engellenmesinde nitrik oksit (NO) rolünü araştırmışlardır. Al stresi altında NO'nun kök uzaması, lipid peroksidasyonu, reaktif oksijen türleri (ROS) birikimi ve askorbat-glutatyon döngüsü (AsA-GSH) üzerindeki etkisini test etmek için NO vericisi ve çekicisi kullanmışlardır. Bir lipofilik antioksidan olan indirgenmiş butil hidroksianizol uygulamasıyla, Al-kaynaklı lipid peroksidasyonu ve kök büyümesinin engellenme düzeyi azaltmıştır. NO eklenmesi, Al kaynaklı kök inhibisyonunu, ROS birikimini ve lipid peroksidasyonunu hafifletirken, NO'nun eksilmesi, Al'un etkisini artırmıştır. Ayrıca, Al stresi altında kök uçlarında NO birikimine nitrat redüktaz (NR) aracılık etmiştir. Bu sonuçlar, NR ilişkili NO'nun, kök büyümesinin Al nedeniyle engellenmesini azalttığını, ardından ROS birikimini azalttığını ve böylece lipid peroksidasyonunu hafiflettiğini göstermiştir.

Toprak pH'sı 5.0'dan düşük olduğunda, toprak çözeltisine alüminyum (Al) salınır ki bu bitkiye zarar verebilir. Yu ve ark., (2012), Al stresi altında soya kökünde nitrik oksit (NO) içeriği ve antioksidan sistemdeki üç kilit enzim incelenmişlerdir. Sonuçlar, farklı konsantrasyonlardaki NO kaynağının kök üzerindeki Al toksisitesini azaltabileceğini ve antioksidan enzimleri doğrudan etkileyebileceğini göstermiştir. NO'nun bitkilerde Al toksisitesinin etkisinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığı sonucuna varmışlardır.

Silva ve ark. (2001), soyada Al rizotoksitesinin iyileştirilmesinde Mg iyonlarının etkisini araştırmışlardır. Kök uzaması Al tarafından, 800 μM CaSO_4 çözeltisinde kuvvetli bir şekilde durdurulmuş, fakat solüsyonlar Mg içerdiğinde uzama belirgin şekilde artmıştır. Konsantrasyon denemeleri göstermiştir ki Al toksisitesinin iyileştirilmesinde Mg etkisinin μM konsantrasyonlarında, Ca'un etkisinin ise mM konsantrasyonlarında sağlanmaktadır. Mg'nin kök uzamasına olan olumlu etkisi Al-duyarlı genotiplerde en yüksek olmuş ve Al-toleransı açısından genotipik farklılıkları ortadan kaldırmıştır. Al rizotoksitesine karşı Mg koruması görünüşte tüm bitki türlerinde ortaya çıkmamaktadır, çünkü Atlas ve Scout 66 buğday çeşitlerinde bu etki görülmemiştir. Mg'nin soyada Al toksisitesini μM seviyelerinde iyileştirme kabiliyeti, farklı fizyolojik faktörlerin mevcudiyetine işaret etmektedir.

Hashimoto ve ark., (2010), hidroponik ortama mikromolar düzeyde magnezyum (Mg) ilavesinin, köklerden sitrat salgılanmasını artırarak ve toksik Al türlerinin kök dışı ortamda bileşik hale gelmesini sağlayarak soyanın Al toleransını arttırdığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, soya fidelerinin köklerini asit toprak koşullarında 28 gün boyunca, üç Mg seviyesi ile (kontrol, 150 ve 300 M) ve kireçle muamele etmişlerdir. Asit topraktaki kök

büyümesi ve Mg uygulamasına toprakaltı kurumadde birikiminin tepkisi Mg uygulamasında, kireç uygulamasından daha düşük olmuştur.

Silva ve ark., (2005) tarafından N93-S-179 soya hattı ile Young ve Ransom soya çeşitlerinin kökleri, dikey olarak bölünmüş bir sistem kullanılarak değişik konsantrasyonlarda Al, Ca ve Mg'yle muamele etmişlerdir. Uygulamalarda Ca ve Mg konsantrasyonları, 0 ila 20 mmol/l arasında değişmiştir. Solüsyonlardaki Mg yoğunluğu, 0'dan 2 veya 10 mmol/l'ye yükseltildiğinde yan kök uzunluğu üç katına çıkmıştır. 15 umol/l Al mevcudiyetinde, 2 veya 10 mmol/l Mg ilavesi, kök ucu uzunluğunu dört kat ve yanal kök uzunluğunu 65 kat arttırmıştır. Mg'nin bu yüksek etkinliği, N93 ve Young genotipleri arasındaki Al toleransındaki farklılıkları maskeleymiştir. Magnezyum, Al rizotoksitesinin hafifletilmesinde Ca'dan daha etkili bulunmuş ve iyileştirici özellikleri, kök zar potansiyelindeki tahmini elektrostatik değişiklikler ve kök yüzeyindeki Al_3^+ aktivitesi ile ilişkili bulunmamıştır.

Bruce ve ark., (1988), Forrest soya çeşidini, yapısı kireçleme malzemeleri ($CaCO_3$ ve $MgCO_3$) ve çözülebilir Ca tuzları ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ve $CaCl_2 \cdot 2H_2O$) ile değiştirilmiş 21 farklı toprakta (dördü yüzey toprağı ve 17'si alt katman toprağı) yetiştirmişlerdir. Kullanılan toprakların çoğunda, çözünebilir tuzlar, çözelti içindeki Al türlerinin konsantrasyon ve aktivitelerini, kök büyümesini sınırlayan seviyelere yükseltmiştir. Kök büyümesinde ilk sınırlayıcı etmen, yüksek Al doygunluğuna ve bu topraklarda nispeten düşük pH'a rağmen, Al toksitesisi değil Ca eksikliği olmuştur.

Suthipradit ve ark., (1990), fulvik, malik ve oksalik asitlerin, alüminyumun (Al) soyada kök uzaması üzerindeki toksik etkilerini hafifletmedeki rolünü incelemişlerdir. Uygulamalar dört Al konsantrasyonu (0, 12.5, 25 ve 50 μM konsantrasyonunda Al $(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ olarak) ve malik veya oksalik asitin (0, 50 μM) veya fulvik asidinin (0, 65 mg L⁻¹ organik karbon) iki konsantrasyonundan oluşan bir faktoryal kombinasyonunda gerçekleştirilmiştir. Fulvik asit, Al'ın bütün konsantrasyonlarda soya üzerindeki toksik etkisini tamamen azaltmıştır. Toksik olmayan Al-fulvat kompleksi çözelti içinde kalmıştır. Malik asit ve oksalik asit ise test edilen konsantrasyonlarda etkisiz olmuştur.

Sartain ve Kamprath, (1978), 0, 0.25, 0.50 ve 1.0 ppm Al ve 10 ppm Ca içeren çözeltilere 48 saat süreyle maruz yuyulan 18 soya çeşidinde kök uzama ölçümleri yapmışlardır. Lee, "Bragg", "Pickett 71" ve York çeşitlerini Al'a diğer kültür bitkilerinden daha tolerant bulmuşlardır.

3. Biyotik çevresel faktörlerin soyada kök uzamasına etkisi

Soyada biyotik faktörlerin kök uzamasına etkisi konusunda çok az çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan biri olan Watt ve ark., (2003)'ün kontrollü ortamda ve tarlada yürütmüş oldukları çalışmada, rizosferde *Pseudomonas spp.* birikmesinin soyada yavaş kök uzama oranı ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar hızlı kök uzaması sayesinde bitkilerin bu birikimden kaçındığını bildirmişlerdir.

Bashan, (1991), soya fidelerinin *Azospirillum brasilense* ile aşılmasının, kök hücrelerin zar potansiyelini önemli ölçüde azalttığı ve yetiştirme koşullarını daha uygun hale getirdiğini bildirmiştir. Bu etki en çok uzama bölgesi hücrelerinde belirgin olmuştur. Kök hücrelerin membran potansiyelinin azaltılması, bakteri hücrelerinin fizyolojik durumuyla doğrudan ilgili bulunmuştur ki aktif olan bakteriler membran potansiyelini azaltmıştır. Stresli bakteriler, yani açlığa, anaerobik koşullara veya aşılardan önce yüksek seviyede streptomisine maruz kalan bakteriler membran potansiyelini etkilememiştir. Test edilen bütün suşlar soya fidelerinin büyümesini olumlu yönde etkilemiştir. Soya bitkilerinin, aktif bir metabolizmaya sahip olan canlı *A. brasilense* suşları ile aşılmasının, muhtemelen, henüz tanımlanamamış bir bakteriyel sinyal veya sinyallerin salınması yoluyla kök hücrelerin zar potansiyelini azalttığını tahmin ettiklerini bildirmişlerdir.

Walker ve ark., (1984), aflatoksinlerin (AFT'ler), bitkiden kesilip alınmış soya köklerinin kültür ortamında uzamasını ve kök içine [¹⁴C]-leucinin girişini engelleyebildiğini bildirmişlerdir. Bu durum araştırmacılara, AFT'lerin köklere girebileceğini düşündürmüştür. Suda şişirilmiş üç günlük tohumlardan kesilen kökler, 18 saat boyunca AFB1 ile kültüre alınmıştır. AFB1'in büyüme ortamına dahil edilmesi, kültürleme sırasında meydana gelen kök kuru ağırlığında zamana bağlı artışı engellemiştir. Kültür tamamlandığında, köklerin büyüme ortamı içindeki AFB1'in %24-66'sını aldığı tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Kök uzunluğu, bir bitkinin besin ve su alma, yatma, stres toleransı ve verimi ile yakından ilgili, en önemli parametrelerden biridir. Birçok genetik ve çevresel faktör kök uzaması üzerinde etkilidir ki buna tepki olarak kökler morfolojisinde ve fizyolojisinde önemli esneklikler gösterebilmektedir. Bu nedenle kök uzaması, hızlı bir fitotoksiste test yöntemi olarak, yüksek duyarlılık, basitlik, düşük maliyet ve düşük kararlılığa sahip kimyasallar veya numunelere uygunluk açısından çeşitli avantajlara sahiptir. Tuz, kuraklık veya soğuk stresine bitkilerin toleransını değerlendirmek için de kök uzaması ölçümleri uygun parametreler durumundadır. Bu durumlar soya bitkisi için de geçerlidir.

Soyada kök uzaması konusunda dünyada yapılmış çalışmaların kök hücre duvarı proteinleri; köke özgü genler; köklerde protein sentezi; soya çeşitleri arasındaki farklılıklar; toprak sıkışması; tuz stresi; su stresi; alüminyum toksisitesi; nitrik oksitin detoksifiye etkileri; toprağa Mg, Ca, fulvik, malik ve oksalik asitler uygulanması ile Al toksisitesinin azaltılması; rizosfer bakterilerinin ve aflatoksinin kök uzamasına etkisi alanlarında yoğunlaştığı görülmektedir.

Toprakların mekanik direnç düzeyi kök uzamasında çok önemli bir faktör olarak görünmektedir ki modern tarım faaliyetleri bu sorunu oldukça artırıcı etki göstermektedir. Aluminyum stresinin soyada yüksek düzeyde Ca'a kıyasla eser miktarda Mg ilavesiyle giderilebilmesi ve bunun buğday için değil fakat soya için geçerli olması durumu, dünyada büyük alanları kaplayan asidite sorunlu alanlarda tarımsal ürün verimini artırmada tür bazında yaklaşımların tohumla Mg kaplama uygulamalarıyla aşılabileceğini göstermektedir. Farklı bitki türlerinin Al stresi altında kök uzamasının Mg'a tepkisi konusunda çalışmalar yapılmasıyla global ve ülkesel tarımsal verim artışlarına önemli katkılar sağlanabileceği görülmektedir. Türkiye'de özellikle asidik yapıdaki Karadeniz bölgesi'nde, ülkesel kendine yeterliğimizin çok düşük seviyede olduğu soyanın, küçük Mg takviyeleri altında verim performanslarının araştırılmasına ihtiyaç vardır.

Kök uzaması konusunda farklı bitki türlerinde yapılmış çalışmalardan farklı olarak, azot, fosfor, potasyum, kükürt, Fe, Zn, bor ve molibden eksikliği; Cu and Cr gibi ağır metal kirleticiler, rizobium, toprağa uygulanan herbisit ve diğer tarım ilaçlarının etkisi ve alelopatinin kök uzamasına etkisini soyada inceleyen çalışmalar mevcut değildir. Bu eksik alanlarda soyaya özgü ve kök uzaması ile ilgili tüm bu alanlarda yerli soya çeşitleriyle çalışmalar yapılması ülkemizde soyanın daha yaygın hale getirilmesine katkılar sunabilecektir.

Kaynakça

- Alarcón Sánchez, M. V. & Salguero Hernández, J. (2017). Transition zone cells reach G2 phase before initiating elongation in maize root apex. *Biology open*, 6(6): 909-913.
- Bashan, Y. (1991). Changes in membrane potential of intact soybean root elongation zone cells induced by *Azospirillum brasilense*. *Canadian journal of microbiology*, 37(12), 958-963.

- Bejaoui, M. (1980). Effect of NaCl on elongation, geotropism, and oxygen uptake on apical root segments of soybean (*Glycine max*). *Physiologie Vegetale*, 18(4): 737-747.
- Bengough, A. G. (2012). Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: so what happens in field soil?. *Plant and Soil*, 360(1-2): 15-18.
- Bengough, A. G. & Young, I. M. (1993). Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. *Plant and soil*, 149(1): 129-139.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D. & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany*, 62(1): 59-68.
- Bruce, R. C., Warrell, L. A., Edwards, D. G. & Bell, L. C. (1988). Effects of aluminium and calcium in the soil solution of acid soils on root elongation of *Glycine max* cv. Forrest. *Australian Journal of Agricultural Research*, 39(3): 319-338.
- Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A. & Keller, T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant physiology*, 174(4): 2289-2301.
- Dresbøll, D. B., Thorup-Kristensen, K., McKenzie, B. M., Dupuy, L. X. & Bengough, A. G. (2013). Timelapse scanning reveals spatial variation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) root elongation rates during partial waterlogging. *Plant and Soil*, 369(1-2): 467-477.
- Giehl, R. F., Lima, J. E. & von Wirén, N. (2012). Localized iron supply triggers lateral root elongation in *Arabidopsis* by altering the AUX1-mediated auxin distribution. *The Plant Cell*, 24(1): 33-49.
- Gottfried, J. (2015). Genetic Control of Lateral Root Positioning and Root Elongation. Senior Symposium. 46.
- Han, S., Jia, M. Z., Yang, J. F. & Jiang, J. (2019). The integration of ACS2-generated ACC with GH3-mediated IAA homeostasis in NaCl-stressed primary root elongation of *Arabidopsis* seedlings. *Plant Growth Regulation*, 88(2): 151-158.
- Hashimoto, Y., Smyth, T. J., Israel, D. W. & Hesterberg, D. (2010). Lack of soybean root elongation responses to micromolar magnesium additions and fate of root-exuded citrate in acid subsoils. *Journal of plant nutrition*, 33(2): 219-239.

- Horst, W. J., Wang, Y. & Eticha, D. (2010). The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: a review. *Annals of botany*, 106(1): 185-197.
- Ichii, M. & Yao, S. G. (2003). Genetic analysis of root elongation in higher plants. In International Rice Research Conference,, Beijing, China, 16-19 September 2002. International Rice Research Institute.
- Jung, K. Y., Yun, E. Y., Park, C. Y., Hwang, J. B., Choi, Y. D., Jeon, S. H. & Lee, H. A. (2012). Effect of soil compaction levels and textures on soybean (*Glycine max* L.) root elongation and yield. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(3): 332-338.
- Lecompte, F. & Pagès, L. (2007). Apical diameter and branching density affect lateral root elongation rates in banana. *Environmental and Experimental Botany*, 59(3): 243-251.
- Lee, B. H. & Zhu, J. K. (2009). Phenotypic Analysis of Arabidopsis Mutants: Root Elongation under Salt/Hormone-Induced Stress. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2009(11), pdb-prot4968.
- Lee, D. K., Ahn, J. H., Song, S. K., Do Choi, Y. & Lee, J. S. (2003). Expression of an expansin gene is correlated with root elongation in soybean. *Plant physiology*, 131(3): 985-997.
- Lenoble, M. E., Blevins, D. G., Sharp, R. E. & Cumbie, B. G. (1996). Prevention of aluminium toxicity with supplemental boron. I. Maintenance of root elongation and cellular structure. *Plant, Cell & Environment*, 19(10): 1132-1142.
- Li, J., Xu, H. H., Liu, W. C., Zhang, X. W. & Lu, Y. T. (2015). Ethylene inhibits root elongation during alkaline stress through AUXIN1 and associated changes in auxin accumulation. *Plant physiology*, 168(4): 1777-1791.
- Li, M., Qin, C., Welti, R. & Wang, X. (2006). Double knockouts of phospholipases D ζ 1 and D ζ 2 in Arabidopsis affect root elongation during phosphate-limited growth but do not affect root hair patterning. *Plant physiology*, 140(2): 761-770.
- Lin, Y. & Key, J. L. (1968). Cell elongation in the soybean root: The influence of inhibitors of RNA and protein biosynthesis. *Plant and cell physiology*, 9(3): 553-560.
- Liu, J., Wang, B., Zhang, Y., Wang, Y., Kong, J., Zhu, L. & Zha, G. (2014). Microtubule dynamics is required for root elongation growth under osmotic stress in Arabidopsis. *Plant growth regulation*, 74(2): 187-192.

- Manoli, A., Begheldo, M., Genre, A., Lanfranco, L., Trevisan, S. & Quaggiotti, S. (2013). NO homeostasis is a key regulator of early nitrate perception and root elongation in maize. *Journal of experimental botany*, 65(1): 185-200.
- Mao, Z., Bonis, M. L., Rey, H., Saint-André, L., Stokes, A. & Jourdan, C. (2013). Which processes drive fine root elongation in a natural mountain forest ecosystem?. *Plant Ecology & Diversity*, 6(2): 231-243.
- Markakis, M. N., De Cnodder, T., Lewandowski, M., Simon, D., Boron, A., Balcerowicz, D. & Verbelen, J. P. (2012). Identification of genes involved in the ACC-mediated control of root cell elongation in *Arabidopsis thaliana*. *BMC plant biology*, 12(1): 208.
- Mohamed, S., Sentenac, H., Guiderdoni, E., Véry, A. A. & Nieves-Cordones, M. (2018). Internal Cs⁺ inhibits root elongation in rice. *Plant signaling & behavior*, 13(2): e1428516.
- Obara, M., Ishimaru, T., Abiko, T., Fujita, D., Kobayashi, N., Yanagihara, S. & Fukuta, Y. (2014). Identification and characterization of quantitative trait loci for root elongation by using introgression lines with genetic background of Indica-type rice variety IR64. *Plant biotechnology reports*, 8(3): 267-277.
- Sartain, J. B. & Kamprath, E. J. (1978). Aluminum Tolerance of Soybean Cultivars Based on Root Elongation in Solution Culture Compared with Growth in Acid Soil 1. *Agronomy Journal*, 70(1): 17-20.
- Sato, T., Suzuki, T. & Nakano, M. (1997). Effect of bulk density, water content and mechanical impedance of a soil on the penetration and elongation of soybean seminal root. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition (Japan)*.
- Silva, I. R. D., Ferrufino, A., Sanzonowicz, C., Smyth, T. J., Israel, D. W. & Carter Júnior, T. E. (2005). Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(5), 747-754.
- Silva, I. R., Smyth, T. J., Israel, D. W. & Rufty, T. W. (2001). Altered aluminum inhibition of soybean root elongation in the presence of magnesium. *Plant and Soil*, 230(2), 223-230.
- Sun, H., Bi, Y., Tao, J., Huang, S., Hou, M., Xue, R. & Shen, Q. (2016). Strigolactones are required for nitric oxide to induce root elongation in response to nitrogen and phosphate deficiencies in rice. *Plant, cell & environment*, 39(7), 1473-1484.

- Sun, P., Tian, Q. Y., Chen, J. & Zhang, W. H. (2009). Aluminium-induced inhibition of root elongation in *Arabidopsis* is mediated by ethylene and auxin. *Journal of Experimental Botany*, 61(2), 347-356.
- Suthipradit, S., Edwards, D. G. & Asher, C. J. (1990). Effects of aluminium on tap-root elongation of soybean (*Glycine max*), cowpea (*Vigna unguiculata*) and green gram (*Vigna radiata*) grown in the presence of organic acids. *Plant and Soil*, 124(2), 233-237.
- Walden, A., Earl, H. J., Wambach, T. & Lukens, L. (2007). Variation for Root Elongation Rate Under Osmotic Stress in Ontario-Adapted Soybean.
- Walker, S. J., Llewellyn, G. C., Lillehoj, E. B. & Dashek, W. V. (1984). Uptake and subcellular distribution of aflatoxin B1 by excised, cultured soybean roots and toxin effects on root elongation. *Environmental and experimental botany*, 24(2), 113-122.
- Wang, H., Li, Y., Hou, J., Huang, J. & Liang, W. (2017). Nitrate reductase-mediated nitric oxide production alleviates Al-induced inhibition of root elongation by regulating the ascorbate-glutathione cycle in soybean roots. *Plant and soil*, 410(1-2), 453-465.
- Wang, W. & Elseth, G. (1990). Millet root elongation in toxicological studies of heavy metals: a mathematical model. In *Plants for toxicity assessment*. ASTM International.
- Wang, X., Sun, C., Gao, S., Wang, L. & Shuokui, H. (2001). Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus*. *Chemosphere*, 44(8), 1711-1721.
- Watt, M., McCully, M. E. & Kirkegaard, J. A. (2003). Soil strength and rate of root elongation alter the accumulation of *Pseudomonas* spp. and other bacteria in the rhizosphere of wheat. *Functional Plant Biology*, 30(5), 483-491.
- Wilson, M. H., Holman, T. J., Sørensen, I., Cancho-Sanchez, E., Wells, D. M., Swarup, R. & Bennett, M. J. (2015). Multi-omics analysis identifies genes mediating the extension of cell walls in the *Arabidopsis thaliana* root elongation zone. *Frontiers in cell and developmental biology*, 3, 10.
- Yamaguchi, M., Valliyodan, B., Zhang, J., Lenoble, M. E., Yu, O., Rogers, E. E. & Sharp, R. E. (2010). Regulation of growth response to water stress in the soybean primary root. I. Proteomic analysis reveals region-specific regulation of phenylpropanoid metabolism and control of free iron in the elongation zone. *Plant, cell & environment*, 33(2), 223-243.

- Yu, M., Liu, M., Xia, J., Deng, C., You, J., Yang, Z. & Chen, G. (2012). Effect of NO content on soybean root elongation and antioxidant system under Al stress. *Journal of Jilin Agricultural University*, 34(6), 597-602.
- Zhou, Y., Xu, X. Y., Chen, L. Q., Yang, J. L. & Zheng, S. J. (2012). Nitric oxide exacerbates Al-induced inhibition of root elongation in rice bean by affecting cell wall and plasma membrane properties. *Phytochemistry*, 76, 46-51.
- Zhu, J., Chen, S., Alvarez, S., Asirvatham, V. S., Schachtman, D. P., Wu, Y. & Sharp, R. E. (2006). Cell wall proteome in the maize primary root elongation zone. I. Extraction and identification of water-soluble and lightly ionically bound proteins. *Plant physiology*, 140(1), 311-325.