

Polietilen Glikol (PEG) ile Oluşturulan Kuraklık Stresine Karşı Farklı Turp (*Raphanus sativus* L.) Çeşitlerinin *In Vitro* Tepkileri

Ecem Kara¹ 

¹Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi Sivas, Türkiye

Geliş Tarihi / Received Date: 16.10.2025

Kabul Tarihi / Accepted Date: 11.12.2025

Öz

Bu çalışma, iki farklı turp çeşidinin (*Raphanus sativus* L.) *in vitro* koşullarda farklı düzeylerde polietilen glikol (PEG) kullanılarak oluşturulan yapay kuraklık stresine verdikleri morfolojik tepkileri belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, Kırmızı inci (TP1) ve Chery belle (TP2) turp çeşitleri kullanılmış olup, PEG'in dört farklı konsantrasyonu (%0, %2, %4 ve %6) Murashige ve Skoog (MS) besin ortamına ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, PEG düzeyindeki artışın tüm incelenen parametreler üzerinde istatistiksel olarak anlamlı düzeyde olumsuz etki oluşturduğunu göstermiştir. PEG konsantrasyonu yükseldikçe çimlenme oranı, kök ve gövde uzunluğu ile yaş ve kuru ağırlık değerleri azalmıştır. Bununla birlikte, çeşitler arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir; Kırmızı inci (TP1) çeşidi, özellikle gövde ve kök yaş/kuru ağırlığı ile çimlenme oranı bakımından Chery belle (TP2) çeşidine kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Sonuçlar, artan PEG konsantrasyonlarının bitkilerde su alımını ve hücre uzamasını sınırlayarak metabolik faaliyetleri yavaşlattığını, ancak bazı genotiplerin bu strese karşı daha yüksek tolerans kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Raphanus sativus* L., polietilen glikol (PEG), *in vitro*, kuraklık stresi

In Vitro Responses of Different Radish (*Raphanus sativus* L.) Varieties to Drought Stress Induced by Polyethylene Glycol (PEG)

Abstract

This study was carried out to determine the morphological responses of two different radish varieties (*Raphanus sativus* L.) to artificial drought stress induced by using different levels of polyethylene glycol (PEG) under *in vitro* conditions. Kırmızı inci (TP1) and Chery belle (TP2) radish varieties were used, and four PEG concentrations (0%, 2%, 4%, and 6%) were added to the Murashige and Skoog (MS) basal medium. The results indicated that increasing PEG concentration had a statistically significant negative effect on all evaluated parameters. As the PEG level increased, germination rate, root and shoot length, fresh and dry weights decreased. However, significant varietal differences were observed and the Kırmızı inci (TP1) variety exhibited higher values, particularly in shoot and root fresh/dry weight and germination rate, compared to Chery belle (TP2). The findings suggest that higher PEG concentrations limit water uptake and cell elongation, leading to reduced metabolic activity in plants, while certain genotypes exhibit a greater tolerance capacity to water deficit conditions.

Keywords: *Raphanus sativus* L., polyethylene glycol (PEG), *in vitro*, drought stress

Giriş

Kuraklık stresi, küresel ölçekte tarımsal üretimi kısıtlayan en önemli abiyotik stres faktörlerinden biri olarak kabul edilmekte ve dünya genelinde tarımsal üretimi sınırlandıran başlıca abiyotik stres faktörü olarak tanımlanmaktadır (Henschel vd., 2023; Yadav vd., 2025). İklim değişikliğiyle birlikte kurak ve yarı kurak alanların genişlemesi, çölleşme riskinin artması ve yağış rejimlerindeki düzensizlikler; özellikle tarım alanlarında ciddi verim kayıplarına yol açmaktadır (Seleiman vd., 2021). Son yıllarda yapılan çalışmalar, kuru alanların önemli bir kısmında toprak bozulumu olduğunu, su kıtlığının hızla arttığını ve bitkisel üretimin sürekliliğinin tehdit altında olduğunu vurgulamaktadır (Mehmandar vd., 2023). Normalin altında seyreden uzun süreli yağış dönemleri ve artan sıcaklıklar nedeniyle, hidrolojik, tarımsal ve meteorolojik kuraklık türleri, önemli tarım ürünleri için suyun bulunabilirliğini farklı biçimlerde etkileyerek bitki gelişimi ve verimi üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Khan vd., 2025). Bitkiler, kuraklığın olumsuz etkilerini birbiriyle ilişkili karmaşık adaptif mekanizmalar dizisi aracılığıyla yönetmekte olup, bu strese verdikleri tepkilerin ve uyum süreçlerinin anlaşılması, kuraklığa dayanıklı tür ve genotiplerin geliştirilmesi açısından bitki ıslahı ve genetik çalışmalarında büyük önem taşımaktadır (Nour vd., 2024; Peršić vd., 2022). Bu bağlamda, bitkilerin su kısıtına verdiği tepkilerin ayrıntılı biçimde ortaya konulması ve kuraklığa dayanıklı genotiplerin geliştirilmesi, güncel bitki ıslahı ve biyoteknoloji çalışmalarının temel öncelikleri arasına girmiştir (Peršić vd., 2022).

Kuraklık stresi, bitkilerde öncelikle su ilişkilerini bozarak hücre turgorunun azalmasına, stomaların kapanmasına, fotosentetik aktif alanın daralmasına ve karbon asimilasyonunun düşmesine neden olur. Buna paralel olarak reaktif oksijen türleri (ROS) birikimi artmakta, membran lipidleri ve proteinler oksidatif hasara uğramakta; bunun sonucunda büyüme, gelişme ve verim parametrelerinde belirgin azalmalar gözlenmektedir (Mehmandar vd., 2023). Bitki türüne ve gelişim evresine bağlı olarak kuraklık stresi, metabolik ve fizyolojik süreçleri çok yönlü biçimde bozmakta; söz konusu bozulmalar tarımsal üretimde genellikle %30 ile %90 arasında değişen verim kayıplarıyla sonuçlanmaktadır (Khan vd., 2025). Stres şiddeti, süresi, bitki türü ve gelişim dönemi gibi faktörler bu yanıtların düzeyini belirlerken, genotipler arası tolerans farkları ise ıslah çalışmalarının temel dayanağını oluşturmaktadır (Nour vd., 2024; Peršić vd., 2022).

Turp (*Raphanus sativus*), Brassicaceae familyasına ait olup, dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen hem kökleri hem de yaprakları tüketilebilen önemli bir sebze türüdür (Manivannan vd., 2019). Turplar, genellikle çiğ olarak salatalarda gevrek yapısı nedeniyle tercih edilmektedir. Turplar; boyut, tat, renk ve olgunlaşma süresi bakımından çok sayıda çeşide sahiptir (Kumar vd., 2024). Son yıllarda yapılan sistematik derlemeler, turpun kök, yaprak, sürgün ve tohumlarının yüksek düzeyde glukozinolatlar, fenolik bileşikler, flavonoidler, karotenoidler ve C vitamini içerdiğini; bu nedenle fonksiyonel gıda olarak dikkat çektiğini ortaya koymaktadır (Gamba vd., 2021). Turpun yerüstü ve yeraltı kısımlarından hazırlanan ekstraktlar, halk hekimliğinde antik dönemlerden bu yana mide rahatsızlıkları, idrar yolu enfeksiyonları, karaciğer iltihaplanmaları, kalp-damar hastalıkları ve ülserlerin tedavisinde kullanılmaktadır. Turpun farmasötik potansiyeli, içerdiği yararlı sekonder metabolitler olan glukozinolatlar, polifenoller ve izotiyosiyanatlar ile ilişkilidir (Manivannan vd., 2019). Turp köklerinin istenen çap, renk ve doku özelliklerini kazanabilmesi için vejetasyon süresince düzenli bir su temini gereklidir; su kısıtı koşullarında kök biyokütlesi ve pazar kalitesi hızla düşmektedir (Stagnari vd., 2018). Bu nedenle, kuraklık stresi altında farklı turp genotiplerinin büyüme ve fizyolojik tepkilerinin ortaya konulması hem verim stabilitesinin sağlanması hem de ıslah programlarına öncelikli materyal kazandırılması açısından önem taşımaktadır (Moura vd., 2022; Wang vd., 2013).

Doku kültürü, stres toleransının geliştirilmesi, farklı genotiplerde stres toleransının taranması ve stres sırasında meydana gelen fizyolojik ile biyokimyasal değişimlerin aydınlatılması için güçlü ve çok yönlü bir araç olarak kabul edilmektedir. Kontrollü çevre koşullarında ve sınırlı alanlarda yürütülen *in vitro* seleksiyon çalışmaları hem zaman hem de maliyet bakımından yüksek etkinlik göstermekte; çok sayıda genotipin kısa sürede ve tekrarlanabilir şekilde değerlendirilebilmesine olanak tanımaktadır (Wijerathna-Yapa ve Hiti-Bandaralage, 2023). *In vitro* doku kültürü yaklaşımlarında besin ortamının

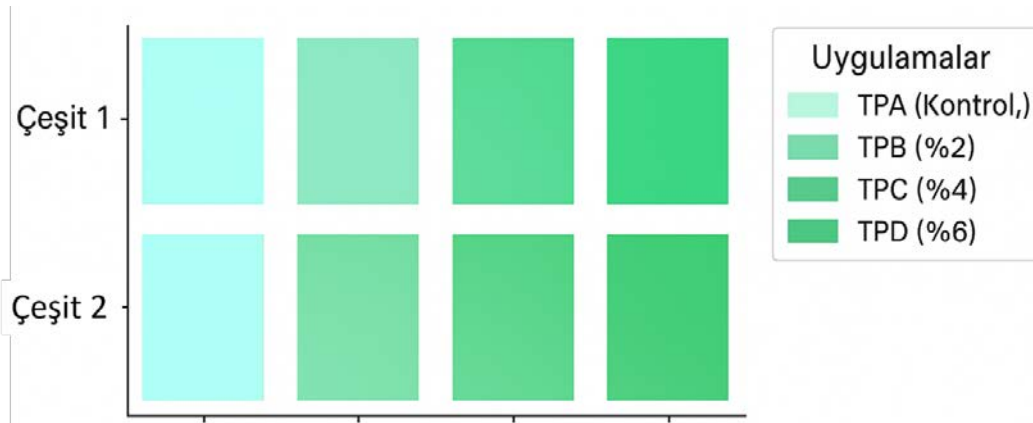
bileşiminin hassas bir biçimde uygulanabilmesi, çevresel değişkenliğin (sıcaklık, ışık, nem vb.) minimize edilmesi ve izlenebilmesi, kuraklık gibi abiyotik streslere verilen yanıtların güvenilir biçimde karşılaştırılmasını mümkün kılmaktadır (Sakthivelu vd., 2008). Böylece doku kültürü, stres toleransının hızlı taranmasında önemli bir metodolojik üstünlük sağlamaktadır (Rai vd., 2011).

Kuraklık stresinin kontrollü koşullarda modellenmesinde en yaygın yaklaşımlardan biri, büyüme ortamının ozmotik potansiyelinin polietilen glikol (PEG) gibi inert osmotik ajanlarla düşürülmesidir. Polietilen glikol (özellikle PEG 6000), nötr yapıda ve yüksek molekül ağırlıklı bir polimer olup, suyla çok sayıda hidrojen bağı oluşturarak bitkiler tarafından kullanılabilir suyu kısıtlamakta ve bu yolla su eksikliği koşullarını taklit etmektedir (Hanász vd., 2022; Kara vd., 2024; Mozafari vd., 2018; Vuksanović vd., 2023). Yüksek molekül ağırlığı sayesinde hücre duvarından içeri giremeyen, iyonik toksisitesi oluşturmayan ve ortamda konsantrasyonu nispeten sabit kalan PEG, bu özellikleri nedeniyle *in vitro* koşullarda “fizyolojik kuraklık” oluşturmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir (Mehmandar vd., 2023). Son yıllarda PEG ile simüle edilen kuraklık stresi, özellikle erken gelişim dönemlerinde genotip taraması için önemli bir araç hâline gelmiş; küçük hacimlerde çok sayıda genotipin, kontrollü osmotik stres koşulları altında morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal yanıtları temelinde karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır (Hanász vd., 2022; Kara vd., 2024; Mozafari vd., 2018; Vuksanović vd., 2023).

Bu çalışmada, iki farklı turp çeşidinin *in vitro* doku kültürü koşullarında polietilen glikol (PEG) kullanılarak oluşturulan yapay kuraklık stresine karşı dayanıklılık potansiyelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Besin ortamına sırasıyla %0 (kontrol), %2, %4 ve %6 PEG ilave edilerek kademeli su kısıtı koşulları oluşturulmuştur. Elde edilen bitkilerin gelişim parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Böylece, doku kültürü tabanlı PEG uygulamalarının, turp genotiplerinin kuraklık toleransı bakımından hızlı ve güvenilir bir tarama aracı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, hem *Raphanus sativus*’ta kuraklık toleransının anlaşılmasına katkı sağlayacak hem de ileride yürütülecek ıslah ve adaptasyon çalışmalarına ön bilgi sunacaktır.

Materyal ve Yöntem

Araştırma, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi bitki doku kültürü laboratuvarında yürütülmüştür. Bitkisel materyal olarak, iki farklı turp çeşidi Kırmızı inci (TP1) ve Chery belle (TP2) kullanılmıştır. Kuraklık koşullarını oluşturmak amacıyla, Murashige ve Skoog (1962) besin ortamına polietilen glikol (PEG)’ün dört farklı konsantrasyonu %0 (kontrol), %2, %4 ve %6 kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Turp Çeşitleri ve Denemede Kullanılan Ortamların İsimlendirilmesi

Denemede kullanılan turp tohumları, yüzey sterilizasyonu amacıyla %20’lik sodyum hipoklorit (NaOCl) çözeltisinde 20 dakika bekletilmiştir. Sterilizasyonun ardından tohumlar, steril saf su ile 4-5 kez durulanmıştır. Sterilize edilen tohumlar, steril kabin içerisinde önceden hazırlanmış ve besin

ortamı içeren 60 mm çaplı steril petrilere her bir uygulamada 100 tohum olacak şekilde, ekilmiştir. Ekimi tamamlanan petrilere, $25 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık, 16 saat aydınlık / 8 saat karanlık olacak şekilde ayarlanan bir fotoperiyot rejiminde ve yaklaşık 3.000 lüks ışık şiddeti altında inkübe edilmiştir.

Denemede Yapılan Ölçümler

Çalışma süresince, bitkilerin fizyolojik ve morfolojik tepkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli büyüme ve gelişme parametreleri incelenmiştir. Bu kapsamda, her çeşit için çimlenme oranı (%), gövde yaş ağırlığı (g), gövde kuru ağırlığı (g), kök yaş ağırlığı (g), kök kuru ağırlığı (g), gövde uzunluğu (mm) ve kök uzunluğu (mm) ölçülmüştür.

Çimlenme oranı (%): Her PEG konsantrasyonu ve her turp çeşidi için elde edilen çimlenme oranları, yapay kuraklık koşullarında çimlenme performansının karşılaştırılması amacıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda her uygulama için ekilen toplam tohum sayısı ve çimlenen tohum sayısı günlük olarak izlenerek çimlenme değerleri kaydedilmiştir. Bir tohum, radikula uzunluğunun en az 2 mm'ye ulaştığı durumda "çimlenmiş" kabul edilmiştir. Çimlenme oranı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır: Çimlenme oranı (%): (çimlenen tohum sayısı / ekilen toplam tohum sayısı) $\times$ 100

Gövde ve kök uzunluğu (mm): Her uygulamadaki bitkicikler besin ortamından çıkarılarak kök sistemi zarar görmeyecek şekilde ortam kalıntılarından temizlenmiştir. Ardından bitkilerde gövde ve kök uzunluğu ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler milimetre (mm) hassasiyetinde bir dijital kumpas yardımıyla gerçekleştirilmiş; her tekerrürde ölçülen bitkiciklere ait değerlerin ortalaması ilgili uygulamanın gövde/kök uzunluğu değeri olarak kullanılmıştır.

Gövde ve kök yaş ağırlığı (g): Her bir bitkinin gövde ve kök kısımları ayrı ayrı hassas terazi üzerinde tartılmıştır. Ölçümler gram (g) cinsinden kaydedilmiş; her tekerrürdeki bitkiciklere ait gövde ve kök yaş ağırlıkları ortalanarak ilgili uygulamanın gövde yaş ağırlığı ve kök yaş ağırlığı değerleri elde edilmiştir.

Gövde ve kök kuru ağırlığı (g): Bitkilerin kök ve gövdeleri birbirlerinden ayrılarak etüvde kurutulmuştur. Kurutma işlemi, örneklerin sabit ağırlığa ulaşana kadar sürdürülmüştür (laboratuvar koşullarına göre süre gerektiğinde uzatılabilir). Kurutma sonrasında örnekler hassas terazi ile tartılarak, gövde kuru ağırlığı ve kök kuru ağırlığı (g) olarak kaydedilmiştir.

İstatistiksel Analiz

Verilerin değerlendirilmesinde, JMP istatistik paket programı kullanılmış olup analizler "Tasadüf Parsellerinde Faktöriyel Deneme Deseni" esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Her uygulama için 4 tekerrür kullanılmış, her tekerrür 20 petriden oluşmuştur ve her petride 5 tohum olacak şekilde planlama yapılmıştır. Ortalamalar arasındaki farklar LSD testi ile belirlenmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada farklı turp genotiplerinin, PEG içeren besin ortamlarında çimlenme ve gelişme performansları üzerinden yapay kuraklık koşullarına verdikleri erken dönem tepkiler ortaya konulmuştur. Çimlenme oranı, PEG ile oluşturulan osmotik stres altında genotiplerin su kısıtına duyarlılıklarını değerlendirmede temel göstergelerden biridir. Bu kapsamda Tablo 1 ve Şekil 2'de, farklı PEG konsantrasyonları içeren besin ortamlarında yetiştirilen turp çeşitlerine ait ortalama çimlenme oranları gösterilmektedir. Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda; çeşit, ortam ve çeşit $\times$ ortam etkileşimi faktörlerinin tamamının çimlenme oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etki oluşturduğu belirlenmiştir. Farklı ortamlar karşılaştırıldığında, en yüksek ortalama çimlenme oranı %89.00 ile TPA ortamında, en düşük oran ise %58.50 ile TPD ortamında kaydedilmiştir. Çeşit ortalamaları açısından değerlendirildiğinde, en yüksek çimlenme oranı %82.50 ile 2 numaralı çeşitte tespit edilmiştir.

Çalışmamızda elde edilen bulgular, farklı PEG konsantrasyonlarının çimlenme oranı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle çeşit, ortam ve çeşit $\times$ ortam etkileşiminin

anamlı bulunması, genetik farklılıkların yanı sıra çevresel koşulların da çimlenme performansını önemli ölçüde şekillendirdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde farklı bitki türleri üzerinde yapılan çalışmalarla da örtüşmektedir.

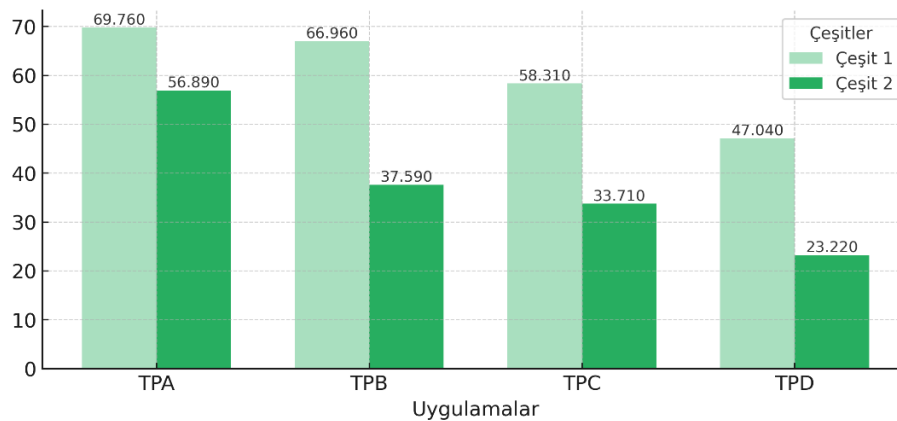
Muscolo (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, dört farklı mercimek genotipi beş farklı polietilen glikol (PEG-6000) düzeyine (%0, %10, %15, %18 ve %21) maruz bırakılmıştır. Çimlenme testinin başlangıcından itibaren 24, 48 ve 72 saat sonrasında; çimlenme yüzdesi, kök uzunluğu, doku su içeriği (WC), α - ve β -amilaz, α -glukosidaz aktiviteleri ve osmotik içeriği değerlendirilmiştir. Su stresinin, tüm çeşitlerde farklı derecelerde olmak üzere, tohum çimlenme oranını, kök uzunluğunu ve fide dokularındaki su içeriğini azalttığı bildirilmiştir. Muscolo (2014) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, bizim çalışmamızda da su stresinin artan PEG düzeyleri ile birlikte çimlenme oranını ve kök gelişimini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, Adem (2024) ve Ergül (2025) tarafından yapılan araştırmalarda da PEG konsantrasyonlarının artışına paralel olarak çimlenme oranlarının düştüğü, ayrıca genotipler arasında belirgin farklılıkların bulunduğu bildirilmiştir. Bu durum, mevcut çalışmada da gözlemlendiği üzere, farklı genotiplerin kuraklık stresine karşı gösterdikleri tolerans düzeylerinin değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Bouchyoud vd. (2024) tarafından tespit edilen yüksek ozmotik potansiyel koşullarında çimlenme oranındaki ciddi azalış eğilimi, bizim çalışmamızda gözlemlenen sonuçlarla da uyumlu olup, PEG uygulamalarının su alımını kısıtlayarak çimlenme sürecini baskıladığını doğrulamaktadır. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar, kuraklık koşullarının taklit edildiği PEG uygulamalarında tür ve genotip seçiminin önemli olduğunu ve çimlenme başarısının bu faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir.

Tablo 1. Farklı Turp Çeşitlerinin Farklı PEG Konsantrasyonları İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Çimlenme Oranları (%)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	86.00b	92.00a	89.00A
TPB	76.00d	88.00b	82.00B
TPC	59.00f	82.00c	70.50C
TPD	49.00g	68.00e	58.50D
Çeşit Ort.	67.50B	82.50A	
LSD _{çeşit} ***:1.730 LSD _{ortam} ***:2.448 LSD _{çeşitxortam} ***:3.462			

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur. ** $P \leq 0.05$. *** $p \leq 0.001$



Şekil 2. Farklı Turp Çeşitlerinin PEG ile Oluşturulan Kuraklık Stresinde Ortalama Çimlenme Yüzdeleri

Farklı turp çeşitleri ve farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış PEG içeren besin ortamlarında elde edilen gövde yaş ağırlığı değerleri Tablo 2, Şekil 3'de sunulmuştur. Yapılan istatistiksel değerlendirmeler sonucunda, çeşit ortalaması, ortam ortalaması ve çeşit × ortam etkileşimi faktörlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Gövde yaş ağırlığı açısından incelendiğinde, en yüksek ortalama değer 1 numaralı çeşitte (0.315 g) tespit edilmiştir. Özellikle 1 numaralı çeşidin en yüksek gövde yaş ağırlığı göstermesi, genetik farklılıkların kuraklık stresine karşı toleransta önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ortam ortalamaları dikkate alındığında ise, en yüksek gövde yaş ağırlığı TPA ortamında (0.364 g), en düşük değerler ise TPC (0.170 g) ve TPD (0.165 g) ortamlarında kaydedilmiştir.

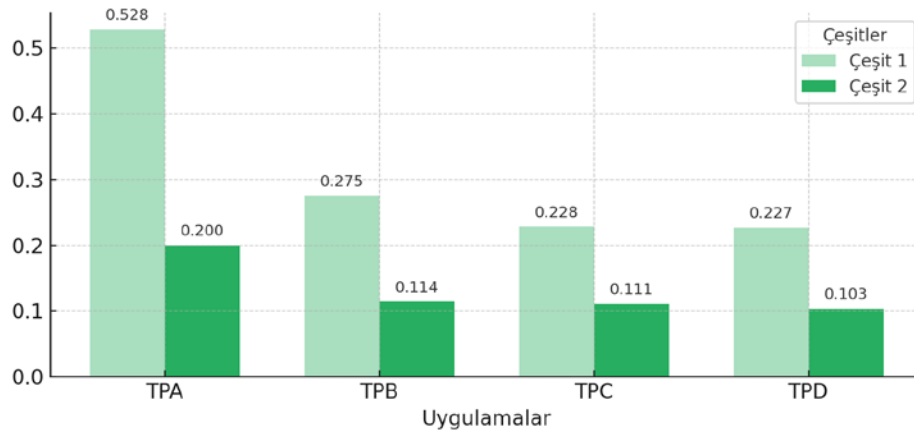
Elde edilen sonuçlar, daha önce farklı bitki türlerinde yapılan çalışmalarla da benzerlik göstermektedir. Vuksanović vd. (2023) tarafından ak kavak klonlarında gerçekleştirilen çalışmada, PEG 6000 düzeyinin artmasıyla birlikte morfolojik özelliklerin ve fotosentetik pigment miktarlarının azaldığı, özellikle yüksek PEG konsantrasyonlarında gövde yaş ağırlığında belirgin düşüşlerin meydana geldiği bildirilmiştir. Wang vd. (2024) ise hıyar fidelerinde hafif kuraklık stresinin büyüme parametreleri üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını, ancak PEG oranı arttıkça gövde ve toplam bitki ağırlığında belirgin azalmalar gözlemlendiğini rapor etmiştir. Bu sonuçlar, mevcut çalışmamızda da benzer şekilde PEG düzeylerinin yükselmesiyle birlikte turp fidelerinde gövde yaş ağırlığının azalmasıyla örtüşmektedir.

Kara ve Baktemur (2025) tarafından yürütülen çalışmada da PEG konsantrasyonundaki artışa paralel olarak gövde ve köklerin yaş ve kuru ağırlıkları ile bitki boyunda anlamlı azalmalar meydana gelmiştir. Bu literatür bulguları ile çalışmamızda elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PEG uygulamalarının bitkilerin su alım kapasitesini azaltarak hücrel genişlemeyi sınırlandırdığı, bunun da doğrudan biyokütle üretimini ve gövde gelişimini olumsuz etkilediği sonucuna varılabilir. Dolayısıyla, su stresi koşullarında genotip seçimi kadar, uygulanan PEG seviyesinin de morfolojik yanıtlar üzerinde belirleyici bir faktör olduğu söylenebilir.

Tablo 2. Farklı Turp Çeşitlerinin Farklı PEG Konsantrasyonları İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Gövde Yaş Ağırlıkları (g)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	0.528a	0.200c	0.364A
TPB	0.275b	0.114d	0.195B
TPC	0.228c	0.111d	0.170BC
TPD	0.227c	0.103d	0.165C
Çeşit Ort.	0.315A	0.132B	
LSD _{çeşit} ***:0.019 LSD _{ortam} ***:0.027 LSD _{çeşitxortam} ***:0.039			

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur. ** $P \leq 0.05$. *** $p \leq 0.001$



Şekil 3. PEG Uygulamalarıyla Oluşturulan Kuraklık Koşullarında Farklı Turp Çeşitlerinin Ortalama Gövde Yaş Ağırlıkları (g)

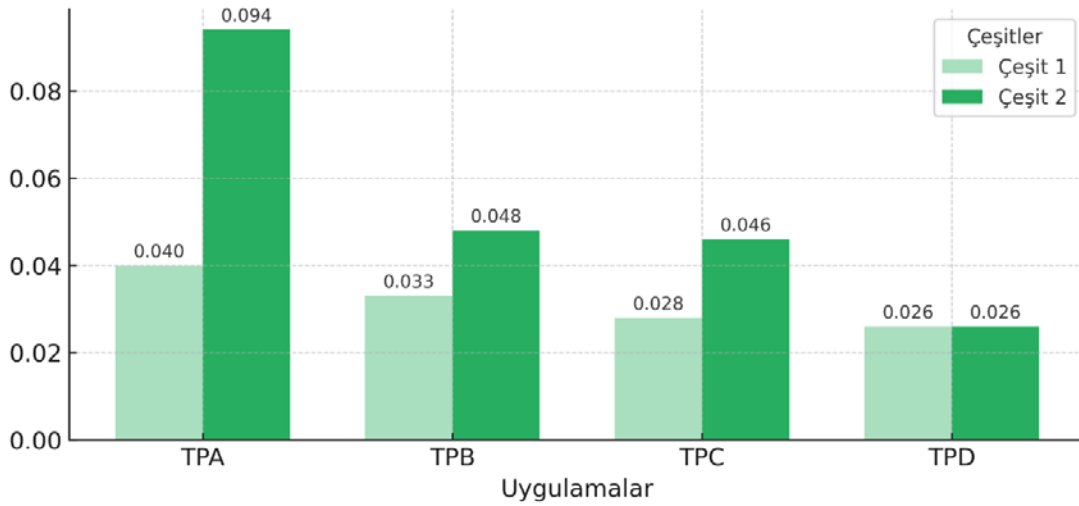
Şekil 4’de farklı turp çeşitleri ve farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış PEG içeren besin ortamlarında elde edilen gövde kuru ağırlıkları verilmiştir (Tablo 3). Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, incelenen tüm faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılık gösterdiği görülmüştür. Gövde kuru ağırlığı açısından en yüksek ortam ortalamaları TPA ortamında (0.067 g) bulunmuştur. Çeşit ortalaması bakımından ise en yüksek değer 2 numaralı (0.054 g) çeşitte elde edilmiştir. Zhu ve ark. (2024), artan tuzluluk seviyelerinde turp bitkisinin yaprak alanının ve yaş ağırlığının baskılandığını, buna karşın kök/gövde oranının 4.2 dS/m seviyesine kadar artış göstererek bitkinin su alım kapasitesini korumaya çalıştığını bildirmiştir.

Tablo 3. Farklı Turp Çeşitlerinin Farklı PEG Konsantrasyonlarını İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Gövde Kuru Ağırlıkları (g)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	0.040bcd	0.094a	0.067A
TPB	0.033bcd	0.048b	0.041B
TPC	0.028cd	0.046bc	0.037BC
TPD	0.026d	0.026d	0.026C
Çeşit Ort.	0.032B	0.054A	
LSD _{çeşit} ***:0.009 LSD _{ortam} ***:0.014 LSD _{çeşitxortam} ***:0.019			

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur.

** $P \leq 0.05$. *** $p \leq 0.001$



Şekil 4. PEG Uygulamalarıyla Oluşturulan Kuraklık Koşullarında Farklı Turp Çeşitlerinin Ortalama Gövde Kuru Ağırlıkları (g)

Farklı PEG konsantrasyonları içeren besin ortamlarında yetiştirilen turp çeşitlerine ait ortalama kök yaş ağırlığı değerleri Tablo 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, çeşit ortalaması, ortam ortalaması ve çeşit × ortam etkileşimi faktörlerinin tamamının istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Çeşit ortalaması açısından incelendiğinde, en yüksek kök yaş ağırlığı 1 numaralı genotipte (0.342 g) belirlenmiştir. Ortam ortalamaları dikkate alındığında ise, en yüksek değer kontrol grubunu temsil eden TPA ortamından (0.426 g) elde edilmiştir. Bu ortamı sırasıyla TPB (0.168 g), TPC (0.081 g) ve TPD (0.062 g) ortamları izlemiştir. Ortam ortalamaları dikkate alındığında, TPA ortamında en yüksek değerlerin elde edilmesi, PEG konsantrasyonundaki artışın kök gelişimini baskıladığını açıkça ortaya koymaktadır.

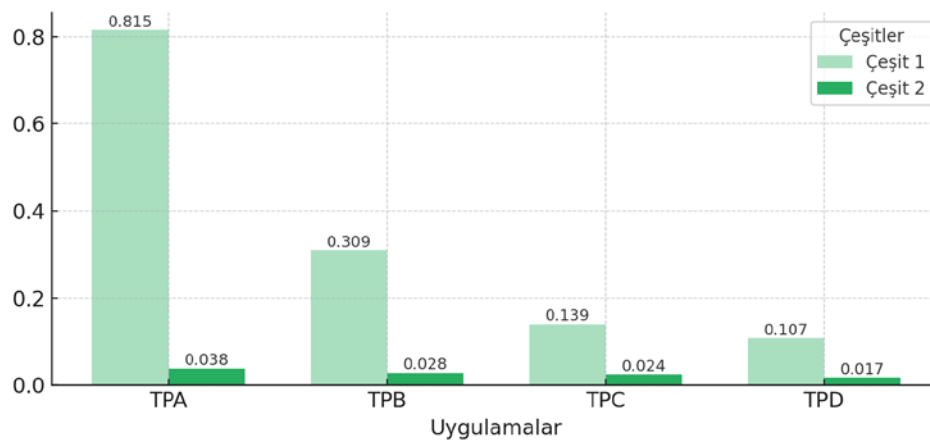
Bu sonuçlar, farklı bitki türlerinde yürütülen çalışmalarla da uyum göstermektedir. Yıldırım vd. (2020) tarafından yapılan araştırmada, su kısıtlamasının artmasıyla birlikte fasulye bitkisinde yaprak, gövde ve köklerin yaş ve kuru ağırlıklarında anlamlı azalmalar meydana geldiği bildirilmiştir. Benzer şekilde, Ahmed vd. (2025) tarafından yürütülen bir çalışmada, PEG ile oluşturulan ozmotik stresin buğday fidelerinde kök ve sürgün yaş/kuru ağırlıkları dahil olmak üzere tüm büyüme parametrelerinde önemli düşüslere yol açtığı, azalmanın %30 ile %95 arasında değiştiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, mevcut çalışmada da gözlemlendiği gibi, artan PEG konsantrasyonunun kök gelişimini ciddi şekilde sınırladığını desteklemektedir.

Baktemur ve Kara (2025) tarafından gerçekleştirilen araştırmada da acur bitkisinde PEG düzeylerindeki artışın kök uzunluğu ve kök ağırlığında anlamlı azalışlara neden olduğu bildirilmiştir. Ayrıca Chishti vd. (2025), kuraklık stresinin turp bitkisinde kök gelişimi dahil tüm büyüme parametrelerini olumsuz etkilediğini; ancak α -tokoferol uygulamasının bu etkileri hafifleterek kök yaş ağırlığı gibi özelliklerde iyileşme sağladığını ortaya koymuştur. Bu literatür sonuçları, çalışmamızda elde edilen verilerle birlikte değerlendirildiğinde, PEG kaynaklı su stresinin bitkilerde ozmotik dengenin bozulmasına, hücrel turgor kaybına ve sonuç olarak kök biyokütlesinin azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, kök gelişimi üzerine PEG'in olumsuz etkilerinin genotipik tolerans düzeyine bağlı olarak değişebileceği ve stres koşullarında uygun genotip seçiminin kritik öneme sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 4. Farklı Turp Çeşitlerinin, Farklı PEG Konsantrasyonları İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Kök Yaş Ağırlıkları (g)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	0.815a	0.038d	0.426A
TPB	0.309b	0.028d	0.168B
TPC	0.139c	0.024d	0.081C
TPD	0.107c	0.017d	0.062C
Çeşit Ort.	0.342A	0.0268B	
LSD _{çeşit} ***:0.027 LSD _{ortam} ***:0.038 LSD _{çeşitxortam} ***:0.054			

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur. *** $p \leq 0.001$

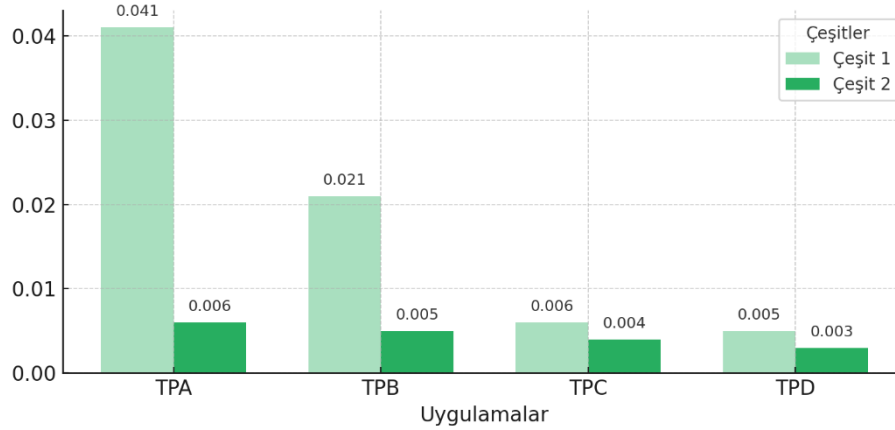
**Şekil 5.** PEG Uygulamalarıyla Oluşturulan Kuraklık Koşullarında Farklı Turp Çeşitlerinin Ortalama Kök Yaş Ağırlıkları (g)

Farklı turp çeşitlerinin farklı dozlarda PEG içeren besin ortamlarında ortalama kök yaş ağırlığı değerleri Tablo 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda; çeşit ortalaması, ortam ortalaması ve çeşit × ortam etkileşimi faktörlerinin tamamının istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Çeşitler arasındaki istatistiksel farklılıklar incelendiğinde, kök kuru ağırlığı bakımından 1 numaralı çeşidin 0.018 g'lık ortalama değeriyle diğer çeşide kıyasla daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir. Çeşit × ortam etkileşimi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama kök kuru ağırlığı, 1 numaralı çeşidin TPA ortamından (0.041 g) elde edilmiştir. Ortam ortalaması bakımından ise en yüksek sonuçlar TPA (0.024 g), en düşük sonuçlar ise istatistiksel olarak aynı grupta yer alan TPC (0.05 g) ve TPD (0.04 g) ortamlarında belirlenmiştir.

Tablo 5. Farklı Turp Çeşitlerinin Farklı PEG Konsantrasyonları İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Kök Kuru Ağırlıkları (g)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	0.041a	0.006c	0.024A
TPB	0.021b	0.005c	0.013B
TPC	0.006c	0.004c	0.005C
TPD	0.005c	0.003c	0.004C
Çeşit Ort.	0.018A	0.005B	
LSD _{çeşit} ***:0.002	LSD _{ortam} ***:0.002	LSD _{çeşitxortam} ***:0.004	

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur. ** $p \leq 0.05$. *** $p \leq 0.001$

**Şekil 6.** PEG Uygulamalarıyla Oluşturulan Kuraklık Koşullarında Farklı Turp Çeşitlerinin Ortalama Kök Kuru Ağırlıkları (g)

Farklı turp çeşitlerinin PEG içeren besin ortamlarında gövde uzunluğu bakımından verdikleri tepkiler incelendiğinde, çeşit, ortam ve çeşit $\times$ ortam etkileşimi faktörlerinin tamamının istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkili olduğu belirlenmiştir (Şekil 7, Tablo 6). Gövde uzunluğu ortam ortalamaları en yüksek TPA (43.19 mm), en düşük TPD (25.90 mm) ortamlarında görülmüştür. Bu durum, artan ozmotik stresin gövde uzamasını sınırladığını açıkça ortaya koymaktadır. Çeşit $\times$ ortam etkileşimini bakımından en yüksek değer, 2 numaralı çeşitte ve TPA (43.19 mm) ortamında saptanmıştır.

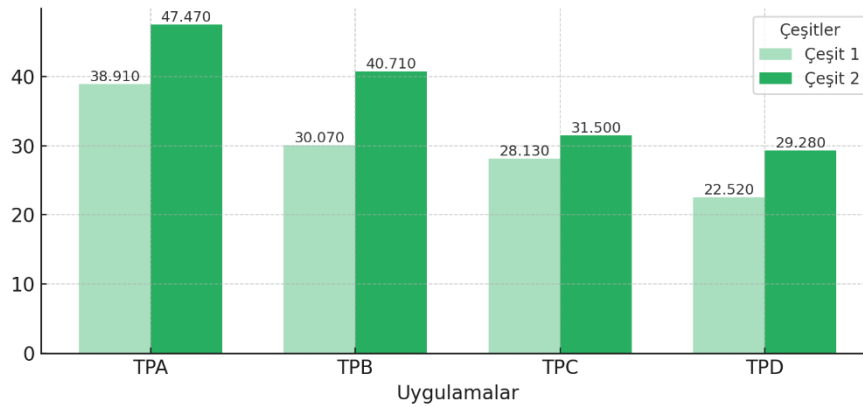
Wickramasinghe ve Seran (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, domatesin KC-1 çeşidine ait tohumlarda farklı polietilen glikol (PEG) düzeylerinin çimlenme ve erken fide gelişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneme, 30, 60 ve 90 g/L PEG konsantrasyonları ile bir kontrol grubundan oluşacak şekilde *in vitro* koşullarda yürütülmüştür. Domates üzerinde gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar, artan PEG konsantrasyonlarının fide gelişimini anlamlı şekilde yavaşlattığını ve özellikle kök ve gövde uzunluklarında belirgin azalmalar meydana geldiğini göstermiştir. Özellikle kök ve gövde uzunlukları, yaş ve kuru ağırlık değerleri ile klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil içerikleri PEG düzeyinin yükselmesiyle birlikte istatistiksel olarak anlamlı bir biçimde azalmıştır. Benzer şekilde, Ashwin Bernald vd. (2023) tarafından yürütülen araştırmada, 95 farklı pirinç genotipinin kuraklık stresine tepkileri, PEG-6000 kullanılarak oluşturulan yapay su kısıtı koşullarında değerlendirilmiştir. Deneme, dört farklı PEG düzeyini (%0 – kontrol, %15, %20 ve %25) kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, PEG konsantrasyonu arttıkça tüm fide gelişim göstergelerinde belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Özellikle çimlenme oranı, sürgün ve kök uzunlukları, fide yaş ve kuru ağırlıkları, toplam fide uzunluğu, göreceli su içeriği ve fide canlılık indeksi değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı düşüşler kaydedilmiştir.

Tablo 6. Farklı Turp Çeşitlerinin Farklı PEG Konsantrasyonları İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Gövde Uzunlukları (mm)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	38.91b	47.47a	43.19A
TPB	30.07c	40.71b	35.39B
TPC	28.13c	31.50c	29.84C
TPD	22.52d	29.28c	25.90D
Çeşit Ort.	29.92B	37.24A	
LSD _{çeşit} ***:1.738 LSD _{ortam} ***:2.458 LSD _{çeşitxortam} *:3.477			

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur.

** $P \leq 0.05$. *** $p \leq 0.001$

**Şekil 7.** PEG Uygulamalarıyla Oluşturulan Kuraklık Koşullarında Farklı Turp Çeşitlerinin Ortalama Gövde Uzunlukları (mm)

Tablo 7 ve Şekil 8’de farklı turp çeşitleri ve farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış PEG içeren besin ortamlarında elde edilen kök uzunlukları verilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, incelenen tüm faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılık gösterdiği görülmüştür. Kök uzunluğu çeşit ortalaması açısından incelendiğinde, en yüksek sonuç 1 numaralı çeşitte (60.52 mm) tespit edilmiştir. Ortam ortalamaları bakımından en yüksek değer, kontrol grubunu temsil eden TPA ortamında (63.32 mm) bulunmuştur.

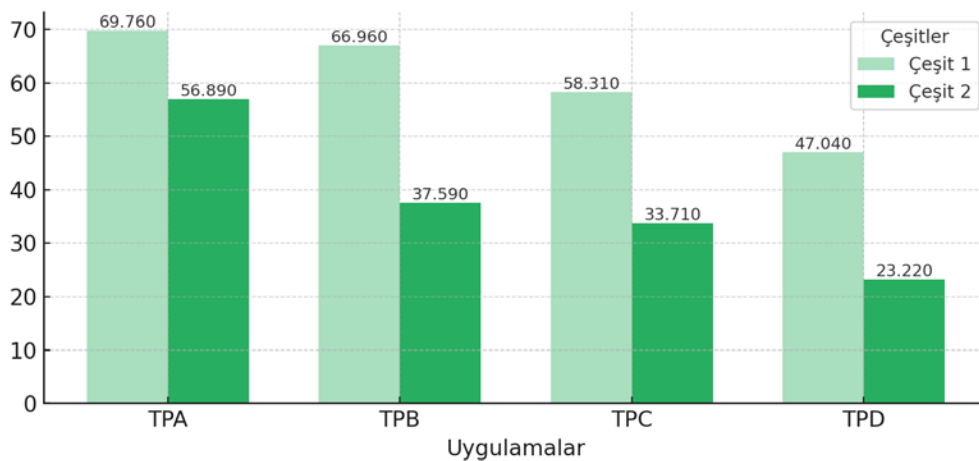
Sivakumar vd. (2014), 32 farklı domates genotipinin kuraklık stresine dayanıklılık potansiyellerini PEG-6000 ile oluşturulan yapay su stresi koşulları altında değerlendirmiştir. Denemede, çimlenme oranı, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, fide kuru ağırlığı ve canlılık indeksi gibi fide gelişim parametreleri dikkate alınmıştır. *In vitro* tarama sonuçları, PEG uygulamasıyla oluşturulan yapay su stresi altında kök uzunluğu dahil tüm fide gelişim parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı azalmalar ortaya koymuştur. Mahpara vd. (2022) polietilen glikol (PEG) uygulamalarıyla oluşturulan su stresi altında sekiz buğday genotipinin çimlenme ve erken fide gelişimini değerlendirmiştir. Deneme kapsamında, kontrol (0 MPa) ve iki farklı ozmotik potansiyel seviyesi (-0.6 MPa ve -1.2 MPa) uygulanmıştır. Bulgular, PEG düzeyindeki artışın çimlenme oranı, kök ve sürgün uzunluğu, taze ve kuru ağırlıklar gibi tüm büyüme parametrelerini anlamlı düzeyde azalttığını göstermiştir. Bukan vd. (2024) tarafından PEG-8000 kullanılarak oluşturulan yapay kuraklık koşulları altında 32 farklı soya genotipi değerlendirilmiş ve kök ile sürgün özelliklerinin stres karşısındaki morfolojik plastisitesi araştırılmıştır. Sonuçlar, kuraklık stresi koşullarında kazık kök uzunluğu (RL), sürgün uzunluğu (SL), kök yaş ağırlığı (RFW) ve sürgün yaş ağırlığında (SFW) sırasıyla %11, %17, %38 ve %34 oranında azalma olduğunu göstermiştir.

Bizim çalışmamızda elde edilen sonuçlar da bu bulgularla paralellik göstermekte olup, PEG uygulamalarının ozmotik potansiyeli düşürerek kök hücrelerinde su alımını kısıtladığını ve buna bağlı olarak kök büyümesinin sınırlandığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, kuraklık stresine karşı kök uzunluğunu koruyabilen genotiplerin belirlenmesi, su kısıtlı koşullara adaptasyon açısından önemli bir ıslah kriteri olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 7. Farklı Turp Çeşitlerinin Farklı PEG Konsantrasyonları İçeren Besin Ortamlarındaki Ortalama Kök Uzunlukları (mm)

Ortam	Çeşit		Ortalama
	1	2	
TPA	69.76a	56.89b	63.32A
TPB	66.96a	37.59d	52.28B
TPC	58.31b	33.71d	46.01C
TPD	47.04d	23.22d	35.13D
Çeşit Ort.	60.52A	37.85B	
LSD _{çeşit} ***:3.003	LSD _{ortam} ***:4.246	LSD _{çeşitxortam} **:6.005	

Aynı sütunda ayrı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki istatistiksel farklılıklar önemli bulunmuştur. ** $p \leq 0.05$. *** $p \leq 0.001$



Şekil 8. PEG Uygulamalarıyla Oluşturulan Kuraklık Koşullarında Farklı Turp Çeşitlerinin Ortalama Kök Uzunlukları (mm)

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, iki farklı turp çeşidinin (Kırmızı inci ve Chery belle), *in vitro* koşullarda polietilen glikol (PEG) kullanılarak oluşturulan yapay kuraklık stresine verdikleri morfolojik tepkileri ortaya koymak amacıyla yürütülmüştür. Elde edilen bulgular, PEG konsantrasyonundaki artışın tüm büyüme ve gelişme parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı düzeyde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Genel olarak, PEG oranı arttıkça çimlenme oranı, gövde ve kök uzunluğu, yaş ve kuru ağırlık değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Çeşitler arasındaki farklılıklar incelendiğinde, Kırmızı inci (TP1) çeşidinin birçok parametrede Chery belle (TP2) çeşidine göre daha yüksek değerler sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, TP1 genotipinin kuraklık stresi koşullarına karşı daha iyi bir fizyolojik adaptasyon ve yüksek su kullanım etkinliği gösterdiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, bu araştırma *in vitro* PEG uygulamalarının, turp genotiplerinde kuraklık toleransının taranması için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, Kırmızı inci (TP1) genotipinin PEG ile oluşturulan su kısıtı koşullarında daha iyi performans gösterdiğini ve bu nedenle kuraklığa dayanıklı turp çeşitlerinin geliştirilmesinde potansiyel ıslah materyali olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Gelecekte yapılacak araştırmalarda, PEG stresine ek olarak fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeyde analizlerin yapılması, kuraklık toleransını belirleyen mekanizmaların daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

ORCID

Ecem Kara  <https://orcid.org/0000-0002-0118-2673>

Kaynaklar

- Adem E. İ. (2024). Bazı domates (*Solanum lycopersicum* L.) Çeşitlerinin *In Vitro* kuraklık stresi koşullarında performanslarının belirlenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi.
- Ahmed, K., Shabbir, G., & Ahmed, M. (2025). Exploring drought tolerance for germination traits of diverse wheat genotypes at seedling stage: a multivariate analysis approach. *BMC Plant Biology*, 25(1), 390. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06345-9>
- Ashwin Bernald, G., Kingsly, N. J., Gokul, M., Ramchander, S., Joseph, P. A., & Kumar, D. (2023). Evaluating drought tolerance in rice through *In-Vitro* PEG screening and analysing the effectiveness of drought tolerant traits through correlation. *Biological Forum – An International Journal*, 15(9), 415-423.
- Baktemur, G., & Kara, E. (2025). Acur (*Cucumis melo* var. *flexuosus*) Bitkisinin kuraklık stresine karşı *In Vitro* yanıtlarının araştırılması. 8. Uluslararası Akdeniz Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, 22-23 Ağustos 2025, Antalya, Türkiye, s. 286-293.
- Bouchyoua, A., Kouighat, M., Hafid, A., Ouardi, L., Khabbach, A., Hammani, K., & Nabloussi, A. (2024). Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes for tolerance to PEG (polyethylene glycol) induced drought at germination and early seedling growth. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100928. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.10092>
- Bukan, M., Kereša, S., Pejić, I., Sudarić, A., Lovrić, A., & Šarčević, H. (2024). Variability of root and shoot traits under PEG-induced drought stress at an early vegetative growth stage of soybean. *Agronomy*, 14(6), 1188. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061188>
- Chishti, M. S., Shahbaz, M., Kaleem, M., Shafi, S., Mehmood, A., Qingzhu, Z., Mansha, M., Shehzadi, N., Rana, S., Shahid, H., Hashem, A., Alfagham, A., & Abd-Allah, E. F. (2025). Fertigation with alpha-tocopherol enhances morphological, physiological, and antioxidant responses in radish (*Raphanus sativus* L.) under drought stress. *BMC Plant Biology*, 25(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06052-5>
- Ergül, B. (2025). Yazlık Kabak (*Cucurbita pepo* L.) Çeşitlerinin *In Vitro* kuraklık stresi koşullarında tolerans düzeylerinin belirlenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi.
- Gamba, M., Asllanaj, E., Raguindin, P. F., Glisic, M., Franco, O. H., Minder, B., ... & Muka, T. (2021). Nutritional and phytochemical characterization of radish (*Raphanus sativus*): A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 205-218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.045>

- Hanász, A., Dobránszki, J., Mendler-Drienyovszki, N., Zsombik, L., & Magyar-Tábori, K. (2022). Responses of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Breeding Lines to Osmotic Stress Induced in *In Vitro* Shoot Culture. *Horticulturae*, 8(7), 591. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070591>
- Henschel, J. M., Dantas, E. F. O., de Azevedo Soares, V., Dos Santos, S. K., da Silva Gomes, D., Ferreira, L. M., Lopes, A. S., Dias, T. J., & Batista, D. S. (2023). Drought stress mitigation by foliar application of L-carnitine and its effect on radish morphophysiology. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29(4), 579-590. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01308-6>
- Kara, E., & Baktemur, G. (2025). Maydanoz bitkisinin *In Vitro* ortamda kuraklık koşullarına verdiği tepkilerin araştırılması. 8. Uluslararası Akdeniz Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, 22-23 Ağustos 2025, Antalya, Türkiye, pp. 278-285.
- Kara, E., Taşkın, H., & Baktemur, G. (2024). Farklı kuraklık dozlarının *İn Vitro* koşullarda rokanın (*Eruca sativa* L.) gelişimi üzerine etkisi. 8th International Halich Congress on Multidisciplinary Scientific Research. December 3-5, 2024, İstanbul, Türkiye, pp. 625-634.
- Khan, A. A., Wang, Y. F., Akbar, R., & Alhoqail, W. A. (2025). Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1547452. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1547452>
- Kumar, S., Gulzar, M., Rajbhar, P., & Rajbhar, R. (2024). Advances in Breeding of Radish. *Breeding Approaches In Vegetable Crops*, 140.
- Mahpara, S., Zainab, A., Ullah, R., Kausar, S., Bilal, M., Latif, M. I., Arif, M., Akhtar, I., Al-Hashimi, A., Elshikh, M. S., Zivcak, M., & Zuan, A. T. K. (2022). The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Plos one*, 17(2), e0262937. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262937>
- Manivannan, A., Kim, J. H., Kim, D. S., Lee, E. S., & Lee, H. E. (2019). Deciphering the nutraceutical potential of *Raphanus sativus*—A comprehensive overview. *Nutrients*, 11(2), 402. <https://doi.org/10.3390/nu11020402>
- Mehmandar, M.N., Rasouli, F., Giglou, M.T., Zahedi, S.M., Hassanpouraghdam, M.B., Aazami, M.A., Tajaragh, R.P., Ryant, P., & Mlcek, J. (2023). Polyethylene glycol and sorbitol-mediated *In Vitro* screening for drought stress as an efficient and rapid tool to reach the tolerant *Cucumis melo* L. Genotypes. *Plants*, 12, 870. <https://doi.org/10.3390/plants12040870>
- Moura, L. M. D. F., da Costa, A. C., Vital, R. G., da Silva, A. A., Rodrigues, A. D. A., Cândido-Sobrinho, S. A., & Müller, C. (2022). Root traits in *Crambe abyssinica* Hochst and *Raphanus sativus* L. contribute to tolerance to water deficit. *PeerJ*, 10, e13595. <https://peerj.com/articles/13595/>
- Mozafari, A. A., Havas, F., & Ghaderi, N. (2018). Application of iron nanoparticles and salicylic acid in in vitro culture of strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.) to cope with drought stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 132(3), 511-523. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1347-8>
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497. <http://wolfe91.free.fr/MMBI/milieu%20MS/Murashige.pdf>
- Muscolo, A., Sidari, M., Anastasi, U., Santonoceto, C., & Maggio, A. (2014). Effect of PEG-induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 354-363. <https://doi.org/10.1080/17429145.2013.835880>
- Nour, M. M., Aljabi, H. R., AL-Huqail, A. A., Horneburg, B., Mohammed, A. E., & Alotaibi, M. O. (2024). Drought responses and adaptation in plants differing in life-form. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1452427. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1452427>

- Peršić, V., Ament, A., Antunović, Dunić, J., Drezner, G., & Cesar, V. (2022). PEG-induced physiological drought for screening winter wheat genotypes sensitivity-integrated biochemical and chlorophyll *a* fluorescence analysis. *Front Plant Sci.*, 13, 987702. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.987702>
- Rai, M. K., Kalia, R. K., Singh, R., Gangola, M. P., & Dhawan, A. K. (2011). Developing stress tolerant plants through *in vitro* selection—an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 71(1), 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.10.021>
- Sakthivelu, G., Akitha Devi, M. K., Giridhar, P., Rajasekaran, T., Ravishankar, G. A., Nedev, T., & Kosturkova, G. (2008). Drought-induced alterations in growth, osmotic potential and *in vitro* regeneration of soybean cultivars. *General and Applied Plant Physiology*, 34(1-2), 103-112. http://www.bio21.bas.bg/ippg/bg/wp-content/uploads/2011/06/08_pisa_1-2_103-112.pdf
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Sivakumar, R., Devi, D. D., & Chandrasekar, C. N. (2014). In-vitro Screening of Tomato Genotypes for Drought Tolerance. *Madras Agricultural Journal*, 101.
- Stagnari, F., Galieni, A., D'Egidio, S., Pagnani, G., & Pisante, M. (2018). Responses of radish (*Raphanus sativus*) to drought stress. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(2), 171-182. <https://doi.org/10.1111/aab.12409>
- Vuksanović, V., Kovačević, B., Kebert, M., Pavlović, L., Kesić, L., Čukanović, J., & Orlović, S. (2023). *In vitro* selection of drought-tolerant white poplar clones based on antioxidant activities and osmoprotectant content. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1280794. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1280794>
- Wang, J., Li, Y., Zhu, F., Teng, Y., & Li, L. (2013). Physiological responses of radish (*Raphanus sativus* L.) to drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(10), 3079-3084. <https://doi.org/10.1111/aab.12409>
- Wang, X., Sun, H., Lian, X., Feng, J., Zhao, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2024). Physiological and biochemical characteristics of cucumber seedlings under different levels of drought stress (PEG 6000 concentrations). *Horticultural Science*, 51(3). <https://doi.org/10.17221/53/2023-HORTSCI>
- Wickramasinghe, I. M., & Seran, T. H. (2019). Assessing *in vitro* germination and seedling growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv KC-1 in response to polyethylene glycol-induced water stress. *Sri Lanka Journal of Food and Agriculture*, 5(2), 7-16. <https://doi.org/10.4038/sljfa.v5i2.72>
- Wijerathna-Yapa, A., & Hiti-Bandaralage, J. (2023). Tissue culture—A sustainable approach to explore plant stresses. *Life*, 13(3), 780. <https://doi.org/10.3390/life13030780>
- Yadav, P.K., Bhujel, P., Bhandari, N., Sharma, S., & Sharma, A. (2025). Screening tomato genotypes for early-stage drought tolerance using polyethylene glycol-induced osmotic stress. *BMC Plant Biol.*, 25(1), 1476. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07508-4>
- Yıldırım, E., Kılıçaslan, S.C., Ekinci, M., & Kul, R. (2020). Kuraklık stresinin fasulyede bitki gelişimi, bazı fizyolojik ve biyokimyasal özellikler üzerine etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 36(2), 264-273. <https://dergipark.org.tr/en/pub/erciyesfen/article/631065>
- Zhu, H., Liu, M., Xu, H., Feng, D., & Sun, X. (2024). Effects of Salt Water on Growth and Quality of *Raphanus sativus* L. and Physiological Responses against Salt Stress. *Agronomy*, 14(6), 1190. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061190>