GENOTYPE × IRRIGATION INTERACTIONS IN DURUM WHEAT UNDER HEAT STRESS: EFFECTS ON PHYSIOLOGICAL TRAITS AND YIELD

Merve BAYHAN
Dr., Dicle University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Diyarbakır, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-3220-4548

Remzi ÖZKAN
Asst.Prof. Dr., Hakkâri University, Yüksekova Vocational School, Department of Plant and Animal Production, Hakkari, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-6457-5802

Yunus AKTAR
Asst.Prof. Dr., Dicle University, Graduate School of Science, Department of Field Crops, Diyarbakır, Turkey
ORCID ID: 0000-0001-8595-7984

Mehmet YILDIRIM
Prof. Dr., Dicle Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Diyarbakır, Türkiye.
ORCID ID: 0000-0003-2421-4399

ABSTRACT
This study aimed to evaluate the performance of durum wheat (Triticum durum L.) genotypes grown under different treatments in late sowing conditions in terms of physiological traits and grain yield, and to determine their responses to environmental conditions. The experiment was conducted in 2018 at the Faculty of Agriculture, Dicle University, using a randomized complete block design with four replications under both rainfed and irrigated (supplemental irrigation) conditions. The plant material consisted of five commercial cultivars (Cesare, Fırat-93, Hasanbey, Sena, and Svevo) and three advanced durum wheat lines (Hat-300, TBT16-7, and TBT16-9) developed by the Faculty of Agriculture of Dicle University. The traits evaluated in this study included flag leaf chlorophyll content (SPAD), normalized difference vegetation index (NDVI), canopy temperature (CT), leaf area index (LAI), and grain yield (GY). The results indicated that irrigation had a significant effect on all examined traits. Significant differences among genotypes were observed, particularly for SPAD, NDVI, LAI, and grain yield. Irrigated conditions increased NDVI and leaf area index while reducing canopy temperature; however, SPAD values varied depending on the genotype. The genotype × treatment interaction revealed that some genotypes responded more sensitively to the irrigation conditions. In terms of grain yield, irrigation significantly increased yield in all genotypes; the average yield increased from 177.73 kg da^{-1} under rainfed conditions to 343.23 kg da^{-1} under irrigated conditions, representing an increase of approximately 93.1%. Among the genotypes, Hat-300 had the highest average grain yield (302.98 kg da^{-1}). TBT16-9 (184.9%) and Hasanbey (149.6%) showed the greatest yield responses to irrigation, whereas Sena exhibited the lowest increase (45.5%). Overall, irrigation under late-sowing conditions substantially contributed to plant growth, photosynthetic activity, and yield. However, genotypic responses varied considerably, highlighting the critical importance of selecting suitable genotypes for sustainable production and breeding programs.
Keywords: Canopy temperature, Diyarbakır, irrigation, NDVI, leaf area index

SICAK STRESİ ALTINDA MAKARNALIK BUĞDAYDA GENOTİP × SULAMA ETKİLEŞİMİ: FİZYOLOJİK ÖZELLİKLER VE VERİM ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, geç ekim koşullarında farklı uygulamalar altında yetiştirilen makarnalık buğday (Triticum durum L.) genotiplerinin fizyolojik özellikler ve tane verimi açısından performanslarını belirlemek ve genotiplerin çevresel koşullara tepkilerini ortaya koymaktır. Araştırma, 2018 yılında Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesinde, tesadüf blokları deneme desenine göre dört tekerrürlü olarak kuru (yağmura dayalı) ve sulu (destek sulamalı) koşullarda yürütülmüştür. Bitki materyali olarak beş ticari çeşit (Cesare, Fırat-93, Hasanbey, Sena, Svevo) ile üç ileri kademe makarnalık buğday hattı (Hat-300, TBT16-7, TBT16-9) kullanılmıştır. Çalışmada bayrak yaprak klorofil içeriği (SPAD), normalize edilmiş vejetasyon indeksi (NDVI), bitki örtüsü sıcaklığı (BÖS), yaprak alan indeksi (YAİ) ve tane verimi (TV) incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sulama uygulamasının tüm özellikler üzerinde belirleyici etkisi olduğunu göstermiştir. Genotipler arasındaki farklılıklar özellikle SPAD, NDVI, YAİ ve tane verimi bakımından anlamlı bulunmuştur. Sulu koşullar NDVI ve yaprak alan indeksini artırırken, bitki örtüsü sıcaklığını düşürmüş; SPAD değerlerinin ise genotiplere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Genotip × uygulama etkileşimi, bazı genotiplerin sulama koşullarına daha duyarlı tepki verdiğini ortaya koymuştur. Tane verimi açısından, sulama tüm genotiplerde belirgin artış sağlamış; ortalama verim kuru koşullarda 177.73 kg da^{-1} iken sulu koşullarda 343.23 kg da^{-1}'e yükselmiş ve yaklaşık %93.1 oranında artmıştır. Genotipler arasında Hat-300, 302,98 kg da^{-1} ile en yüksek ortalama verimi vermiştir. TBT16-9 (%184.9) ve Hasanbey (%149.6) genotipleri sulamaya en yüksek verim artışıyla yanıt verirken, Sena genotipi %45.5 ile en düşük artışı göstermiştir. Geç ekim koşullarında sulama uygulamasının bitki gelişimi, fotosentetik aktivite ve verim üzerine önemli katkılar sağladığı; ancak genotiplerin bu koşullara verdikleri tepkilerin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, uygun genotip seçiminin sürdürülebilir üretim ve ıslah çalışmaları açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Bitki örtüsü sıcaklığı, Diyarbakır, sulama, NDVI, yaprak alan indeksi

GİRİŞ

Buğday, dünya genelinde en yaygın olarak yetiştirilen gıda ürünü olup, insan beslenmesinde önemli bir yer tutarak küresel protein ve kalori alımının yaklaşık %20'sini karşılamaktadır (Miner ve ark., 2022). Özellikle makarnalık buğday (Triticum durum L.), hem besin değeri hem de endüstriyel kullanım alanları açısından stratejik bir öneme sahiptir. Ancak buğday üretiminin %75'inden fazlası, su kaynaklarının sınırlı olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde gerçekleştirilmektedir (Zhao ve ark., 2021).

Su kıtlığı, mevsimsel ve yıllık yağışlardaki güçlü değişkenlikle birlikte, yağmurla beslenen üretime ciddi kısıtlamalar getirmekte ve düşük ve istikrarsız verimlere yol açmaktadır (Wang ve ark., 2016). Bu nedenle, sulama, buğday verimini istikrara kavuşturmada çok önemli bir rol oynamakta olup, nihai amacı uygun yöntemlerin ve planlamanın entegrasyonu yoluyla birim su veya besin girdisi başına verimi en üst düzeye çıkarmaktır (Jiao ve ark., 2022).

Sulamanın etkinliği, toprak, iklim ve gübreleme yönetimine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Toprağın su tutma kapasitesi, organik madde içeriği ve besin elementi düzeyi, bitkilerin suya verdiği tepkiyi doğrudan etkilemektedir, (Wang ve ark., 2009; Zheng ve ark., 2019; Cheng ve ark., 2021). Kuru topraklarda sulama verimi artırırken (Zhang ve ark., 2025), besin açısından fakir topraklarda sulama ile bile verimlilik sınırlıdır. Gübreleme, toprak işleme, sulama zamanlaması ve yöntemi, buğday performansını şekillendirmek için etkileşim halindedir (Liu ve ark., 2022; Li ve ark., 2022).

Özellikle kritik gelişme dönemlerinde ortaya çıkan su eksikliği, başak oluşumu ve tane dolum süreçlerini olumsuz etkileyerek verimde önemli kayıplara yol açmaktadır (Tari, 2016).
Fizyolojik açıdan değerlendirildiğinde, sulama uygulamaları kök gelişimini, fotosentetik aktiviteyi ve biyokütle birikimini artırarak tane verimini olumlu yönde etkilemektedir (Wang ve ark., 2025). Verim, kardeş sayısı, başakta tane sayısına ve tane ağırlığı gibi bileşenlere bağlı olup, bu bileşenler özellikle kuraklık stresine karşı oldukça hassastır (Denčić ve ark., 2000). Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir kısmı sulamanın etkilerini tekil faktörler üzerinden değerlendirmiş olup; su uygulama zamanı, miktarı veya yöntemi gibi değişkenleri ayrı ayrı ele almıştır (Du ve ark., 2024; Feng ve ark., 2023; Liu ve ark., 2024). Sulama uygulamalarının ve agronomik değişkenlerin birleşik etkilerini kapsamlı bir şekilde inceleyen çalışma sayısı azdır.
Yağmurla beslenen birçok ortamda, toprak neminde yetersizlik genellikle bitki büyümesinin en hassas aşamalarında (çiçeklenme ve tane dolumu) meydana gelir ve bu da bitki büyümesini ve verimi ciddi şekilde etkileyebilir. Kritik bitki büyüme aşamalarında sınırlı miktarda su uygulanması, kuraklığın şiddetli etkilerini azaltarak verimi ve su verimliliğini önemli ölçüde artırabilir (Oweis, 1997; Alexander, 2005). Ayrıca, tam sulama, verim gelir kaybını karşılamak için sulama seviyesini düşürmeye yönelen çoğu üretici için ekonomik olarak uygulanabilir olmaktan çıkar (Payero ve ark., 2009). Hassas büyüme aşamalarında ek sulama, bitkinin fotosentez oranını artırmasına ve karbonhidratın tanelere taşınması için ek süre sağlamasına yardımcı olabilir; bu da tane boyutunu iyileştirebilir ve böylece tane verimini artırabilir (Ayed ve ark., 2017). Hassas büyüme aşamalarında sınırlı ek sulama kullanımı, su kullanım verimliliğini ve buğday verimini artırabilir (Wang ve ark., 2017).
Sonuç olarak, istikrarlı ve yüksek verimli buğday üretimi için sulama yönetiminin optimize edilmesi şarttır. Bu çalışmanın amacı, geç ekim koşullarında farklı uygulamalar altında yetiştirilen makarnalık buğday genotiplerinin bazı fizyolojik özellikler ile verim bakımından performanslarını belirlemek ve genotiplerin çevresel koşullara verdikleri tepkileri ortaya koymaktır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma, 2018 yılında Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesine ait araştırma ve uygulama alanında yürütülmüştür. Çalışmada 5 ticari makarnalık buğday çeşidi (Cesare, Fıat-93, Hasanbey, Sena, Svevo) ile Dicle Üniversitesi Ziraat Fakültesi tarafından geliştirilen 3 adet ileri kademe makarnalık buğday hattı (Hat-300, TBT16-7, TBT16-9) bitki materyali olarak kullanılmıştır. Araştırma, tesadüf blokları deneme desenine göre 4 tekerrürlü olarak kuru (yağmura dayalı) ve sulu koşullarda (destek sulamalı) kurulmuştur.
Araştırmanın yürütüldüğü 2018 yılına ve uzun yıllara ait bazı iklim verileri Tablo1'de verilmiştir. 2018 yılı yetiştirme sezonunda sıcaklıklar uzun yıllar ortalamasının üzerinde, toplam yağış ise uzun yıllara yakın ancak dağılım açısından düzensiz gerçekleşmiştir. Denemenin kurulduğu Mart ayında yağışların düşük olması, bitkilerin erken gelişim döneminde sınırlı su koşullarına maruz kalmasına neden olmuş olabilir. Buna karşın, izleyen dönemde özellikle Mayıs ayında gerçekleşen yüksek yağışlar, bitkilerin generatif gelişim evresinde su gereksinimini karşılamış, ancak Haziran ayındaki yüksek sıcaklık ve düşük yağış koşulları olgunlaşma sürecini hızlandırmıştır (Tablo1).

Tablo 1. Araştırma dönemine ve uzun yıllara ait bazı iklim verileri

Aylar	Aylık ortalama sıcaklık (^{0}C)	Uzun yıllar ortalama sıcaklık (^{0}C)	Aylık toplam yağış (mm)	Uzun yıllar toplam yağış (mm)
Mart	12,45	8,30	11,6	65,6
Nisan	15,91	13,70	48,8	69,5
Mayıs	19,52	19,20	157,8	44,2
Haziran	26,61	26,00	14,4	8,8
Genel ortalama/toplam	12,91	10,76	439,6	455,0

Araştırma alanı topraklarının hafif alkali reaksiyon gösterdiği, tuzluluk açısından herhangi bir stres unsuru taşımadığı, orta düzeyde kireç içerdiği ve organik madde bakımından yetersiz olduğu belirlenmiştir. Besin elementi durumu incelendiğinde ise azot ve fosfor açısından eksiklik söz konusu iken, potasyum düzeyinin yeterli hatta yüksek olduğu tespit edilmiştir (Özkan, 2024).

Denemenin ekim işlemi 09.03.2018 tarihinde parsel mibzeri ile 500 adet/m2 tohum hesabıyla yapılmıştır. Her bir parsel 5 m uzunluğunda, 0.2 m sıra aralığında ve 6 sıra olarak belirlenmiştir. Gübreleme işlemi için ekimle birlikte saf olarak 6 kg da-1 N ve 6 kg da-1 P2O5 uygulanırken, sapa kalkma döneminde de 6 kg da-1 N uygulanmıştır. Araştırmada sapa kalkma, başaklanma ve tane dolum dönemi olmak üzere üç kez damla sulama sistemi ile sulama yapılmış, ancak verilen su miktarı hesaplanmamıştır. Hasat 01.07.2018 tarihinde parsel biçerdöveri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Farklı yetiştirme koşullarında makarnalık buğday genotiplerinin fenolojik gelişme tarihleri

Yetiştirme ortamı	Başaklanma tarihi	Çiçeklenme tarihi	Fizyolojik olum tarihi
Kuru koşullar	17 Mayıs 2018	19 Mayıs 2018	19 Haziran 2018
Sulu koşullar	20 Mayıs 2018	23 Mayıs 2018	22 Haziran 2018

Araştırmada; bayrak yaprak klorofil içeriği (SPAD), normalleştirilmiş vejetasyon fark indeksi (NDVI), bitki örtüsü sıcaklığı (BÖS - 0C) ve yaprak alan indeksi (YAİ) gibi fizyolojik özellikler ile tane verimi (TV - kg da-1) değeri belirlenmiştir. İncelenen bu özelliklerden elde edilen değerler JMP 17 istatistik paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Genotip, uygulama ve genotip × uygulama etkileşiminin etkilerini belirlemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Ortalamalar arasındaki farklılıklar %5 önem düzeyinde AÖF (Asgari Önemli Farklılık) testi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca incelenen özelliklere ait yüzde değişim değerleri, kuru koşullar referans alınarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda yüzde değişim, sulu ve kuru koşullarda elde edilen değerler arasındaki farkın kuru koşul değerine oranlanmasıyla belirlenmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Araştırmaya ait varyans analiz sonuçları (Tablo 3), genotip ve uygulamanın bazı özellikler üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. SPAD, NDVI, YAİ ve TV hem genotip hem de uygulamadan anlamlı şekilde etkilenmiş, genotip x uygulama etkileşimleri de önemli bulunmuştur, bu da genotiplerin uygulamaya farklı tepkiler verdiğini göstermektedir. BÖS ise yalnızca uygulamadan etkilenmiş, genotip ve etkileşim etkileri önemsiz bulunmuştur. Genel olarak, uygulama çoğu özellikte baskın faktör olup, genotipler bazı özelliklerde farklı performans göstermiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Araştırmaya ait bazı varyans analiz sonuçları

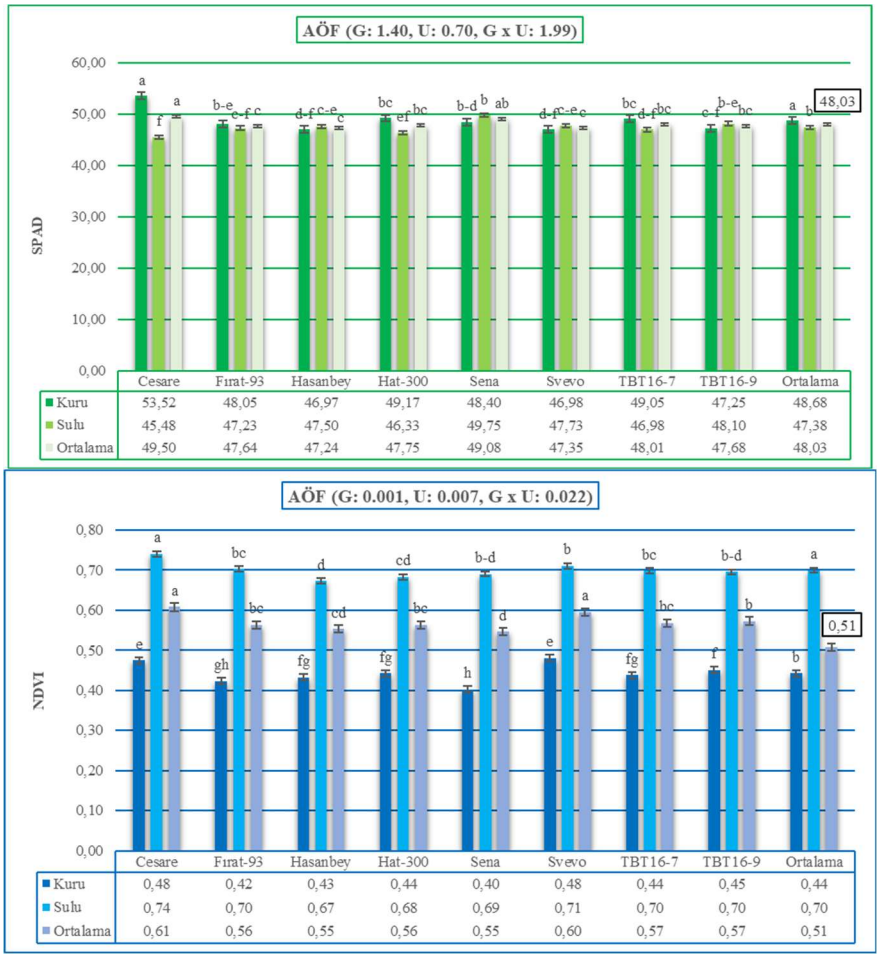
Özellikler	Varyans kaynağı	SD	Kareler ortalaması	F değeri	Önemlilik	DK (%)
SPAD	Tekerrür	3	9,29766	4,7408	0,0059	2,91
	Genotip	7	5,37391	2,7401	0,0186 *	
	Uygulama	1	26,65141	13,5893	0,0006 **	
	Genotip x Uygulama	7	19,41962	9,9018	<,0001 **	
NDVI	Tekerrür	3	0,000472	1,8553	0,1508	2,78
	Genotip	7	0,003453	13,5629	<,0001 **	
	Uygulama	1	1,048064	4116,221	<,0001 **	
	Genotip x Uygulama	7	0,00085	3,3375	0,0060 **	
BÖS	Tekerrür	3	0,838	1,9146	0,1408	2,10
	Genotip	7	0,121	0,2752	0,9604 öd.	
	Uygulama	1	1585,035	3619,347	<,0001 **	
	Genotip x Uygulama	7	0,897	2,0473	0,0696 öd.	
YAİ	Tekerrür	3	0,09432	0,5407	0,6569	10,83
	Genotip	7	0,61623	3,5327	0,0042 **	
	Uygulama	1	93,84766	538,0123	<,0001 **	
	Genotip x Uygulama	7	0,81908	4,6957	0,0005 **	
TV	Tekerrür	3	989,8	0,7562	0,5246	11,88
	Genotip	7	6603,6	5,0452	0,0003 **	
	Uygulama	1	438244	334,8214	<,0001 **	
	Genotip x Uygulama	7	5661,3	4,3252	0,001 **	

*:%5 ve **: %1 seviyesinde önemli, öd: Önemli değil, SD: Serbestlik derecesi, DK: Düzeltme katsayısı. SPAD: Bayrak yaprak klorofil içeriği, NDVI: Normalleştirilmiş vejetasyon fark indeksi, BÖS: Bitki örtüsü sıcaklığı, YAİ: Yaprak alan indeksi, TV: Tane verimi.

Bayrak yaprak klorofil içeriği (SPAD) genotipler ve sulama uygulamalarına göre farklılıklar göstermiştir (Şekil 1). Genel olarak, kuru koşullar SPAD değerlerini sulu koşula göre daha yüksek seviyede tutmuş; ortalama değerler kuru koşulda 48.68 iken, sulu koşulda 47.38 olmuştur. Bu durum, geç ekimde erken dönemde bitkilerin su stresi altında daha yoğun klorofil sentezi yapabileceğini, sulu koşulda ise bitkilerin daha hızlı büyümesi ve yaprak genişlemesi ile klorofil yoğunluğunun azalmış olabileceğini düşündürmektedir. Genotipler arasında Cesare çeşidi, kuru koşulda en yüksek SPAD değeri (53.52) ile öne çıkarken, Sena sulu koşulda en yüksek değer (49.75) göstermiştir. Diğer genotipler orta seviyede SPAD değerleri göstermiş olup, sulama ve genotip etkileşimi bitki klorofil içeriğini farklı derecelerde etkilemiştir. Bu bulgular, geç ekim koşullarında genotiplerin klorofil içeriklerinin ve fotosentetik potansiyellerinin sulama yönetimi ile değişebileceğini ortaya koymaktadır.

Yüksek gece sıcaklıkları karanlık solunumu artırarak erken yaprak yaşlanmasını hızlandırmaktadır. Bu nedenle ısı toleransı, klorofil stabilitesinin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Genotipler arasında fotosentetik termostabilite açısından farklılıklar bulunmakta olup, modern çeşitlerin yüksek sıcaklık altında daha toleranslı ve fotosentetik olarak daha aktif olduğu gösterilmiştir (Brestic ve ark., 2012; 2018).

NDVI değerleri, genotipler ve sulama koşullarına göre farklılık göstermiştir (Şekil 1). Genel olarak, geç ekim koşullarında sulama faktörü, tüm genotiplerde NDVI değerlerini belirgin şekilde artırmış olup, kuru koşuldaki ortalama 0,44 olan değer sulu koşulda 0,70'e yükselmiştir. Bu durum, bitkilerin büyüme döneminde yeterli suya erişiminin, yaprak gelişimi ve fotosentetik aktiviteyi destekleyerek bitki sağlığını iyileştirdiğini göstermektedir. Genotipler arasında, Cesare ve Svevo, hem kuru hem sulu koşullarda nispeten yüksek NDVI değerleri (0,60-0,61) sergileyerek geç ekim ve sulama kombinasyonuna iyi uyum sağlamışken, Sena özellikle kuru koşulda düşük NDVI (0,40) ile kuraklığa daha duyarlı bir profil göstermiştir.



Şekil 1. Makarnalık buğday genotiplerinde bayrak yaprak klorofil içeriği (SPAD) ve normalize edilmiş vejetasyon indeksine (NDVI) ait ortalama değerler ve oluşan gruplar
*Aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark yoktur.

Diğer genotipler ise orta seviyede NDVI değerleri ile değişen çevre koşullarına farklı derecelerde yanıt vermiştir. GreenSeeker, ürünün durumunu hızlı bir şekilde belirleyerek biyokütle değişimlerinin izlenmesine ve bitkinin besin (özellikle azot) durumunun değerlendirilmesine olanak sağlar (Teal ve ark., 2006; Lofton ve ark., 2012). NDVI'nin, ürüne verilen azot miktarındaki değişimlerle iyi korelasyon gösterdiği bilinmektedir (Choudhary ve ark., 2021). Ayrıca farklı gelişim dönemlerinde NDVI'nin, azot konsantrasyonundan ziyade azot alımı ile daha güçlü ilişki gösterdiği bildirilmiştir (Li ve ark., 2009).
NDVI, bitki örtüsü uzaktan algılamasında en önemli ve yaygın kullanılan indekslerden biridir (Inman ve ark., 2008; Wang ve ark., 2014). Bitki yaprak alan indeksi (YAİ) gibi birçok bitki parametresi ile yakın ilişki göstermektedir (Yang ve ark., 2013) ve bitki gelişiminin izlenmesinde uzun süredir kullanılmaktadır (Clevers ve ark., 1996).
Bitki örtü sıcaklığı, kuraklık ve ısı stresine toleransı belirlemede basit, hızlı ve güvenilir bir yöntemdir. Özellikle terminal stres koşullarında en iyi performansı gösterir. Araştırmaya ait bitki örtüsü sıcaklığı değerleri, genotipler ve sulama koşullarına göre önemli farklılıklar göstermiştir (Şekil 2). Genel olarak, kuru koşullarda ortalama BÖS değeri 36,26 °C iken, sulu koşullarda 26,31 °C'ye düşmüş ve tüm genotiplerde yaklaşık %25–30 oranında azalma belirlenmiştir. Bu durum, sulama ile artan transpirasyon ve stomatal aktiviteye bağlı olarak bitki sıcaklığının düşmesiyle açıklanabilir ve bitkilerin su stresinin azaldığını göstermektedir.

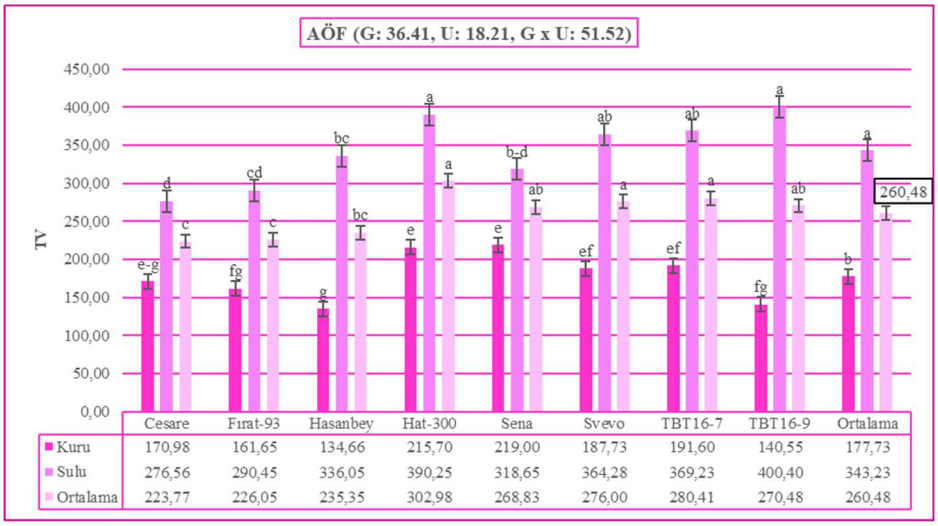
Genotipler arasında kuru ve sulu koşullarda ölçülen değerler birbirine yakın olup, sulama ile tüm genotipler benzer şekilde serinlemiş; buna karşın Sena çeşidi, sulu koşulda diğer genotiplere göre hafif daha yüksek sıcaklık değerleri sergileyerek suya tepkisinin biraz daha sınırlı olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, geç ekim uygulamalarında sulamanın bitki sağlığını korumada ve sıcaklık stresini azaltmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bitki örtü sıcaklığı değerlerinin kuraklık ve ısı stresi koşullarında tane verimi ile anlamlı ilişkisi olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir (Gao ve ark., 2016; Liang ve ark., 2018; Sohail ve ark., 2020). Bitki örtü sıcaklığında 1 °C'lik azalışın verimde yaklaşık 1.5-1.7 q ha-1 artışla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Kaur ve ark., 2018). Bu nedenle bitki örtü sıcaklığı, farklı ülkelerde de ıslah programlarında önemli bir seleksiyon kriteri olarak değerlendirilmektedir (Al-Ghzawi ve ark., 2018; Thapa ve ark., 2018). Bitki örtü sıcaklığı; stomatal iletkenlik, yaprak yaşlanması, mum tabakası, kök gelişimi ve bin tane ağırlığı gibi kuraklık ve ısıya adaptasyonla ilişkili birçok özellik ile de yakından ilişkilidir.

Yaprak alan indeksi (YAİ) değeri genotipler ve sulama uygulamalarına göre belirgin farklılıklar göstermiştir (Şekil 2). Sulu yetiştirme tüm genotiplerde YAİ değerlerini artırmış olup, ortalama 1,75 olan kuru koşul değerleri sulu koşulda 4,18'e yükselmiştir. Bu durum, sulamanın yaprak gelişimini destekleyerek bitki örtüsünün yoğunluğunu artırdığını göstermektedir. Genotipler arasında, Cesare hem kuru hem sulu koşullarda yüksek YAİ değerleri (3,36) ile öne çıkarak hem sulama faktörüne hem de geç ekim koşullarına iyi uyum sağlamıştır. Hat-300, Svevo, TBT16-7 ve TBT16-9 sulu koşulda orta-yüksek yaprak alanı yoğunluğu sergilerken, Hasanbey ve Fırat-93 özellikle kuru koşulda düşük YAİ değerleri ile su stresine daha duyarlı bir profil göstermiştir. Yaprak alan indeksi, tek taraflı yaprak yüzey alanının toprak yüzey alanına oranı olarak tanımlanır. YAI, bitki gelişim modellerinde biyofiziksel süreçlerin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Darvishzadeh ve ark., 2008; Pu ve Gong, 2004). Bu nedenle, büyüme sezonu boyunca YAİ'nin düzenli olarak izlenmesi; tarla yönetimi, biyokütle tahmini ve verim öngörüsü açısından büyük önem taşımaktadır (Jégo ve ark., 2012).



Şekil 2. Makarnalık buğday genotiplerinde bitki örtüsü sıcaklığı (BÖS) ve yaprak alan indeksine (YAİ) ait ortalama değerler ve oluşan gruplar
*Aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark yoktur.

Makarnalık buğday genotiplerinin geç ekim koşullarında kuru ve sulu yetiştirme sistemlerine ait tane verimi (TV) değerleri karşılaştırıldığında; sulu koşulların tüm genotiplerde kuru koşullara göre belirgin şekilde daha yüksek verim sağladığı belirlenmiştir. Ortalama verim kuru koşulda 177,73 kg da-1 iken, sulu koşulda 343,23 kg da-1'a yükselmiştir. Genotipler arasındaki farklılıklara bakıldığında ise Hat-300, her iki yetiştirme koşulunda da en yüksek verimi gösterirken, Hasanbey genotipi de düşük verim değerlerinde yerini korumuştur. Kuru koşullarda genotipler arası verim farkları daha belirgin olup, Cesare ve Fırat-93 orta düzey verim göstermiştir, buna karşın sulu koşullarda genotipler arasında verim farklılıkları nispeten azalmakta, çoğu genotip yüksek verim aralığında kümelenmektedir. Bu bulgular, geç ekimde sulamanın genotiplerin verim kapasitesini artırmada ve stres koşullarına karşı performanslarını iyileştirmede önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, sulu koşulların tüm genotiplerde verimi artırdığı, genotiplerin verim potansiyellerinin su yönetimi ile optimize edilebileceği ve Hat-300 gibi genotiplerin kurak koşullara göre daha toleranslı olduğu söylenebilir. Farklı çalışmalarda da buğday çeşitlerinin çiçeklenme ve tane dolum dönemlerindeki sıcaklık stresine verdikleri tepkilerde önemli genotipik farklılıklar olduğu bildirilmiştir (Schittenhelm ve ark., 2020; Fernie ve ark., 2022). Fizyolojik, verim ve kalite özelliklerindeki doğal genetik varyasyonun anlaşılması ve etkin şekilde kullanılması hem geleneksel hem de yenilikçi yaklaşımlarla ısı toleransına yönelik ıslah çalışmalarını hızlandırabilir (Fu ve ark., 2023).



Şekil 3. Makarnalık buğday genotiplerinde tane verimine (TV) ait ortalama değerler ve oluşan gruplar

*Aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark yoktur.

Geç ekim koşullarında sulama uygulamaları, genotiplerin SPAD, NDVI, BÖS, YAİ ve TV üzerinde belirgin etkiler göstermiştir (Tablo 4). Genel olarak, sulama ve geç ekim kombinasyonu bitki biyoması ve fotosentetik aktiviteyi önemli ölçüde artırmış, ortalama NDVI %57,8 ve YAİ %138,1 artış göstermiştir. Bitki örtüsü sıcaklığı ise ortalama %27,4 azalarak sulamanın sıcaklık stresini azaltıcı etkisini ortaya koymuştur (Tablo 4).

Tablo 4. Makarnalık buğday genotiplerinde incelenen özelliklere ait % değişimler

Genotip	SPAD	NDVI	BÖS	YAİ	TV
Cesare	-15,032	55,789	-29,952	195,588	61,753
Fırat-93	-1,717	66,272	-25,798	228,302	79,678
Hasanbey	1,128	55,491	-27,083	118,033	149,559
Hat-300	-5,786	54,237	-26,947	97,647	80,923
Sena	2,789	71,429	-25,330	176,667	45,502
Svevo	1,597	47,917	-26,524	71,111	94,047
TBT16-7	-4,230	59,429	-28,855	97,531	92,706
TBT16-9	1,799	54,444	-29,012	185,714	184,881
Ortalama	-2,652	57,798	-27,447	138,146	93,118

SPAD: Bayrak yaprak klorofil içeriği, NDVI: Normalleştirilmiş vejetasyon fark indeksi, BÖS: Bitki örtüsü sıcaklığı, YAİ: Yaprak alan indeksi, TV: Tane verimi.

SPAD değerleri genotiplere göre farklılık göstermiş olup, ortalamada hafif bir düşüş gözlenmiş; Cesare (-15,03%) klorofil yoğunluğunda en büyük azalmayı gösterirken, Sena (+2,79%) ve Hasanbey (+1,13%) artış sergilemiştir. Verim açısından sulama faktörü, ortalama %93,118 artış sağlayarak verim potansiyelini iki katına çıkarmış; en yüksek artışlar TBT16-9 (+184,9%) ve Hasanbey (+149,6%) genotiplerinde, en düşük artış ise Sena (+45,5%) genotipinde gözlenmiştir (Tablo4). Araştırmacılar, sulama faktörünün buğday verimini %32,47 oranında artırdığını bildirmiştir (Yang ve ark., 2025). Sonuç olarak sulama uygulaması NDVI, YAİ ve tane verimi üzerinde belirgin artışlara neden olurken, SPAD değerlerinde sınırlı değişimler gözlenmiş, BÖS değerlerinde ise tüm genotiplerde azalma belirlenmiştir. En yüksek oransal artış YAİ ve tane veriminde tespit edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada geç ekim koşullarında makarnalık buğday genotiplerinin kuru ve sulu yetiştirme sistemlerine tepkileri SPAD, NDVI, BÖS, YAİ ve tane verimi üzerinden değerlendirilmiştir. Sonuçlar, sulamanın tüm özellikler üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sulama uygulaması NDVI ve YAİ değerlerini artırmış, BÖS değerini düşürmüş ve tane verimini yaklaşık iki kat yükseltmiştir. Bu durum, suyun bitki gelişimi ve verim üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuştur.

Genotipler arasında önemli farklılıklar belirlenmiş; Hat-300 en yüksek verimi gösterirken, Cesare ve Svevo yüksek vejetatif gelişim ile öne çıkmıştır. Hasanbey ise düşük verim ve gelişim değerleri ile su stresine daha duyarlı bulunmuştur. Genel olarak, geç ekim sulama verimi ve bitki performansını önemli ölçüde artırmış, genotiplerin çevreye verdiği tepkiler ise ıslah çalışmalarında genotip seçiminin önemini vurgulamıştır.

KAYNAKLAR

Alexander R. (2005). Crop production under deficit irrigation. (M.S. thesis), Department of civil and architectural engineering - University of Wyoming, USA.

Al-Ghzawi A.L.A., Khalaf Y.B., Al-Ajlouni Z.I., AL-Quraan N.A., Musallam I., Hani N.B. (2018). The effect of supplemental irrigation on canopy temperature depression, chlorophyll content, and water use efficiency in three wheat (Triticum aestivum L. and T. durum Desf.) varieties grown in dry regions of Jordan. Agriculture., 8(5): 67. https://doi.org/10.10.3390/agriculture8050067

Ayed S., Rezgui M., Othmani A., Rezgui M., Trad H., Silva J. A., Ben Younes M., Ben Salah H., & Kharrat M. (2017). Response of Tunisian durum (Triticum turgidum ssp. durum) and bread (Triticum aestivum L.) wheats to water stress, Agrociencia. (2017) 51, 13–26.

Bergkamp, B., Impa, S.M., Asebedo, A.R., Fritz, A.K., Jagadish, S.K. (2018). Prominent winter wheat varieties response to post-flowering heat stress under controlled chambers and field based heat tents. Field Crops Res., 222: 143–152. https://doi.org/10.10.1016/j.fcr.2018.03.009

Bheemanahalli R., Sunoj V.J., Saripalli G., Prasad P.V., Balyan H.S., Gupta P.K., Grant N., Gill K.S., Jagadish S.K. (2019). Quantifying the impact of heat stress on pollen germination, seed set, and grain filling in spring wheat. Crop Sci., 59: 684–696. https://doi.org/10.10.2135/cropsci2018.05.0292

Brestic, M., Zivcak, M., Hauptvogel, P., Misheva, S., Kocheva, K., Yang, X., Li, X., Allakhverdiev, S.I. (2018). Wheat plant selection for high yields entailed improvement of leaf anatomical and biochemical traits including tolerance to non-optimal temperature conditions. Photosynthesis Research, 136: 245–255.

Brestic, M., Zivcak, M., Kalaji, H.M., Carpentier, R., Allakhverdiev, S.I. (2012). Photosystem II thermo-stability in situ: environmentally induced acclimation and genotypespecific reactions in Triticum aestivum L. Plant Physiology and Biochemistry, 57: 93–105.

Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Wang, X., Sun, X., Yang, L., Zhang, S., Xiang, Y., & Zhang, F. (2021). Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis. Agricultural Water Management, 256, 107105. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107105

Choudhary, S.S., Biswal, S., Saha, R., Chatterjee, C. (2021). A non-destructive approach for assessment of nitrogen status of wheat crop using unmanned aerial vehicle equipped with RGB camera. Arab. J. Geosci., 14, 1739.

Clevers, J.G.P.W., & Leeuwen, H.J.C.V. (1996). Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. Remote Sens. Environ. 56, 42–51.

Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F., & Cho, M. (2008). LAI and chlo-rophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. ISPRS Journalof Photogrammetry and Remote Sensing, 63(4), 409–426.

Denčić, S., Kastori, R., Kobiljski, B. et al. (2000). Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near optimal and drought conditions. Euphytica 113, 43–52. https://doi.org/10.1023/A:1003997700865

Du, C., Liu, Y., Guo, J., Zhang, W., Xu, R., Zhou, B., Xiao, X., Zhang, Z., Gao, Z., Zhang, Y., Sun, Z., Zhou, X., & Wang, Z. (2024). Novel annual nitrogen management strategy improves crop yield and reduces greenhouse gas emissions in wheat-maize rotation systems under limited irrigation. Journal of Environmental Management, 353, 120236. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120236

Feng, S., Ding, W., Shi, C., Zhu, X., Hu, T., & Ru, Z. (2022). Optimizing the spatial distribution of roots by supplemental irrigation to improve grain yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. Agricultural Water Management, 275, 107989. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107989

Fernie E., Tan D.K.Y., Liu S.Y., Ullah N., Khoddami A. Post-Anthesis Heat Influences Grain Yield, Physical and Nutritional Quality in Wheat: A Review. Agriculture. 2022;12:886. https://doi.org/10.10.3390/agriculture12060886

Fu J., Bowden R.L., Jagadish S.K., Prasad P.V. Genetic variation for terminal heat stress tolerance in winter wheat. Front. Plant Sci. 2023;14:1132108. https://doi.org/10.10.3389/fpls.2023.1132108

Gao, F., Liu, J., Yang, L., Wu, X., Xiao, Y., Xia, X., He, Z. (2016). Genome-wide linkage mapping of QTL for physiological traits in a Chinese wheat population using the 90K SNP array. Euphytica, 209(3): 789- 804. https://doi.org/10.1007/s10681-016-1682-6

Inman, D., Khosla, R., Reich, R. M. & Westfall, D. G. (2008). Normalized difference vegetation index and soil color-based management zones in irriga maize. Agron. J. 100, 60–66.

Jégo, G., Pattey, E., & Liu, J. (2012). Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in theSTICS crop model for predicting yield and biomass of field crops. Field Crops Research, 131,63–74.

Jiao, F., Hong, S., Cui, J., Zhang, Q., Li, M., Shi, R., Han, H., & Li, Q. (2022). Subsoiling combined with irrigation improves carbon emission and crop water productivity of winter wheat in North China Plain. Agricultural Water Management, 269, 107685. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107685

Kaur S., Singh S.P., Kingra P.K. (2018). Canopy temperature as indicator of thermal and nutrient stresses in wheat crop. Mausam, 69(2): 309-314

Li, F., Miao, Y., Zhang, F., Cui, Z., Li, R., Chen, X., Zhang, H., Schroder, J., Raun, W.R., Jia, L. (2009). In-season optical sensing improves nitrogen use efficiency for winter wheat. Soil Sci. Soc. Am. J., 73: 1566–1574.

Li, J., Wang, Z., Song, Y., Li, J., & Zhang, Y. (2022). Effects of reducing nitrogen application rate under different ırrigation methods on grain yield, water and nitrogen utilization in winter wheat. Agronomy, 12(8), 1835. https://doi.org/10.3390/agronomy12081835

Liang, X., Liu, Y., Chen, J., Adams, C. (2018). Late-season photosynthetic rate and senescence were associated with grain yield in winter wheat of diverse origins. J. Agron. Crop Sci., 204(1): 1-12. https://doi.org/10.10.1111/jac.12231

Liu, BY., Liu, WS., Lin, BJ. et al. (2022). Sustainable management practices to improve the water use efficiency of winter wheat in the North China Plain: a meta-analysis. Agron. Sustain. Dev., 42, 33. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00766-8

Liu, X., Yin, B., Bao, X., Hou, X., Wang, T., Shang, C., Yang, M., & Zhen, W. (2024). Optimization of irrigation period improves wheat yield by regulating source-sink relationship

under water deficit. European Journal of Agronomy, 156, 127164. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127164

Lofton, J., Tubana, B.S., Kanke, Y., Teboh, J., Viator, H., Dalen, M. (2012). Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. Sensors, 12, 7529–7547.

Miner, G.L., Delgado, J.A., Ippolito, J.A., Johnson, J.J., Kluth, D.L., & Stewart, C.E. (2022). Wheat grain micronutrients and relationships with yield and protein in the U.S. Central Great Plains. Field Crops Research, 279, 108453. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108453

Narayanan, S., Prasad, P.V.P., Fritz, A.K., Boyle, D.L., Gill, B.S. (2014). Impact of high night and high day temperature stress in winter wheat. Journal of Agronomy and Crop Science, 201: 206–218.

Oweis, T. (1997). Supplemental irrigation: A highly efficient water-use practice. ICARDA.

Özkan, R., (2024). Water use and yield performance of durum wheat genotypes under supplemental irrigation and rainfed-based growth conditions. Genetika 56(3):401-414 https://doi.org/10.2298/GENSR240312002O

Payero, J.O., Tarkalson, D.D., Irmak, S., Davison, D., & Petersen, J.L. (2009). Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass, Agricultural Water Management., 96, 10, 1387–1397, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.022

Prasad, P.V.P., Pisipati S.R., Ristic Z., Bukovnik, U., Fritz, A.K. (2008): Impact of night time temperature on physiology and growth of spring wheat. Crop Science, 48: 2372–2380.

Pu, R., & Gong, P. (2004). Wavelet transform applied to EO-1 hyperspectral data for forest LAI andcrown closure mapping. Remote Sensing of Environment, 91(2), 212–224.

Schittenhelm, S., Langkamp-Wedde, T., Kraft, M., Kottmann, L., Matschiner, K. (2020). Effect of two-week heat stress during grain filling on stem reserves, senescence, and grain yield of European winter wheat cultivars. J. Agron. Crop Sci., 206: 722–733. https://doi.org/10.1111/jac.12410

Sohail, M., Hussain, I., Qamar, M., Tanveer, S.K., Abbas, S.H., Ali Z., Imtiaz, M. (2020). Evaluation of spring wheat genotypes for climatic adaptability using canopy temperature as physiological indicator. Pak. J. Agric. Sci., 33(1): 89-96. https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.1. 89.96

Tari, A.F. (2016). The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 167, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.023

Teal, R.K., Tubana, B., Girma, K., Freeman, K.W., Arnall, D.B., Walsh, O., Raun, W.R. (2006). In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. Agron. J., 98, 1488–1494.

Thapa, S., Jessup, K.E., Pradhan, G.P., Rudd, J.C., Liu, S., Mahan, J.R., Devkota, R.N., Baker, J.A., Xue Q. (2018). Canopy temperature depression at grain filling correlates to winter wheat yield in the U.S. Southern High Plains. Field Crops Res., 217:11-19. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.005

Wang B., Liu D. L., Asseng S., Macadam I., & Yu Q. (2017). Modelling wheat yield change under CO2 increase, heat and water stress in relation to plant available water capacity in eastern Australia, European Journal of Agronomy, 90, 152–161, https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.08.005

Wang, L. et al. (2014). Multi-temporal detection of rice phenological stages using canopy spectrum. Rice Sci. 21, 108–115.

Wang, L., Liu, S., Lu, S., Lv, T., Ma, D., Kang, G., Xie, Y., Sun, J., & Wang, C. (2025). Irrigation and nitrogen fertilizer increase wheat productivity by improving root-shoot

population coordination. Agricultural Water Management, 316, 109589. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109589

Wang, X., Cai, D., Wu, H., Hoogmoed, W.B., & Oenema, O. (2016). Effects of variation in rainfall on rainfed crop yields and water use in dryland farming areas in China. Arid Land Research and Management, 30(1), 1–24. https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1012686

Wang, Y., Zhang, X., & Huang, C. (2009). Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. Geoderma, 150 (1-2), 141-149. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.021

Yang, Q. et al. (2013). Effect of canopy geometry on estimation of leaf area index in winter wheat using multi-angle spectrum. Int. J. Agric. Biol., 15, 1187–1192.

Yang, Y., Wang, Z., Ma, Y., Wang, Y., Bai, J., & Zhang, R. (2025). Balancing yield and water productivity in wheat: A meta-analysis of irrigation, soil, and climate interactions. Tarımsal Su Yönetimi, 322, 109999. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109999

Zhang, Z., Yu, Z., Shi, Y., & Zhang, Y. (2025). Effects of soil moisture on 13C assimilate redistribution and grain yield components in wheat. Frontiers in Plant Science, 16, 1527224. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1527224

Zhao, H., Mao, A., Yang, H., Wang, T., Dou, Y., Wang, Z., & Malhi, S. (2021). Increased dryland wheat economic returns, and decreased greenhouse gas emissions by year-round straw mulching in dryland areas of China. Journal of Cleaner Production, 325, 129337. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129337

Zheng, H., Ying, H., Yin, Y., Wang, Y., He, G., Bian, Q., Cui, Z., & Yang, Q. (2019). Irrigation leads to greater maize yield at higher water productivity and lower environmental costs: A global meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 273, 62-69. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.12.009