

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOLOJİ ANABİLİM DALI**

**İYONLAŞTIRICI RADYASYON STRESİNE MARUZ BIRAKILAN BUĞDAY (*Triticum aestivum* L.)  
TOHUMLARINDA DIŞTAN MELATONİN UYGULAMASININ ANTIOKSİDAN SAVUNMA SİSTEMİ  
ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Aynur ÇELEBİ**

**NİSAN 2021  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOLOJİ ANABİLİM DALI**

**İYONLAŞTIRICI RADYASYON STRESİNE MARUZ BIRAKILAN BUĞDAY (*Triticum aestivum* L.) TOHUMLARINDA DIŞTAN MELATONİN UYGULAMASININ ANTIOKSİDAN SAVUNMA SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN İNCELENMESİ**

**Aynur ÇELEBİ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (BİYOLOJİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 / 03 / 2021**

**Tezin Savunma Tarihi : 15 / 04 / 2021**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Faik Ahmet AYAZ**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca tez danışmanlığımı üstlenerek gerek konu seçimi gerekse çalışmalarımın yürütülmesi ve değerlendirilmesi sırasında yol gösteren, destek ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesini her zaman ilgiyle paylaşan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Faik Ahmet AYAZ'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın gelişmesi açısından benimle değerli bilgi ve görüşlerini paylaşan tez izleme jüri üyesi hocalarım sayın Prof. Dr. Hüseyin İNCEER ve sayın Prof. Dr. Ali GÜNDOĞDU'ya şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarımı yürütebilmem için ortam ve olanak sağlayan Biyoloji Bölüm Başkanımız sayın Prof. Dr. Bilal KUTRUP'a ve lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimime katkıda bulunan ve biyoloji alanında yetişmemi sağlayan tüm KTÜ Biyoloji Bölümü hocalarıma teşekkür ederim. Bilgi ve görüşlerini, laboratuvar imkanlarını ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Sema AYAZ ve sayın Doç. Dr. Hülya TORUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle yanımda olan çalışma ekibimizin değerli üyesi sayın Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ÇOLAK'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca diğer çalışma arkadaşlarım Buğra ERTUĞRUL ve Rızky FAUZAN'a, arkadaşlığını benimle paylaşan Belgizar KARAYİĞİT'e teşekkür ederim. Çalışmamda kullandığım buğday tohumlarının temini için Mısır Araştırma Enstitüsü'ne teşekkürü borç bilirim. Yaşamım boyunca beni seven, bana inanan, dualarını her zaman kalbimde hissettiğim kıymetli annem ve babam başta olmak üzere tüm kardeşlerime ve sevgili eşim Oktay ÇELEBİ'ye doktora çalışmam boyunca beni sabır ve anlayışla karşıladıklarından ve maddi/manevi destekleriyle yanımda olduklarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak “İyonlaştırıcı radyasyon stresine maruz bırakılan buğday (*Triticum aestivum* L.) tohumlarında dıştan melatonin uygulamasının antioksidan savunma sistemi üzerindeki rolünün incelenmesi” başlıklı bu tez çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2017-6978'dir. Desteklerinden dolayı KTÜ Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne ayrıca teşekkür ederim.

Aynur ÇELEBİ  
Trabzon 2021

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “İyonlaştırıcı radyasyon stresine maruz bırakılan buğday (*Triticum aestivum* L.) tohumlarında dıştan melatonin uygulamasının antioksidan savunma sistemi üzerindeki rolünün incelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Faik Ahmet AYZ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.  
15/04/2021

Aynur ÇELEBİ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Stres ve Stres Çeşitleri.....	4
1.3. İyonlaştırıcı Radyasyon (IR).....	6
1.3.1. İyonize Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Biyolojik Etkileri.....	8
1.3.2. İyonize Radyasyonun Bitki Büyüme ve Gelişmesi Üzerine Olan Etkileri..	10
1.4. Serbest Radikaller ve Reaktif Oksijen Türleri.....	12
1.5. Bitkilerde Antioksidan Savunma Sistemi.....	14
1.5.1. Enzimatik Antioksidanlar.....	14
1.5.1.1. Süperoksit Dismutaz (SOD; EC 1.15.1.1) Enzimi.....	14
1.5.1.2. Guaiakol Peroksidaz (POX; EC 1.11.1.7) Enzimi.....	15
1.5.1.3. Katalaz (CAT; EC 1.11.1.6) Enzimi.....	15
1.5.1.4. Askorbat Peroksidaz (APX; EC 1.11.1.11) Enzimi.....	16
1.5.1.5. Glutasyon Redüktaz (GR; EC 1.6.4.2) Enzimi.....	16
1.5.1.6. Monodehidroaskorbat Redüktaz (MDHAR; EC 1.6.5.4) Enzimi.....	17
1.5.1.7. Dehidroaskorbat Redüktaz (DHAR; EC 1.8.5.1) Enzimi.....	17
1.5.2. Enzimatik Olmayan Antioksidanlar.....	17
1.5.2.1. Glutasyon (GSH).....	17
1.5.2.2. Fenolik Bileşikler.....	18
1.5.2.3. Flavonoidler.....	18
1.5.2.4. Fenolik Asitler.....	19

1.6.	Bitkilerde Çözünebilir Şekerler.....	20
1.6.1.	Fruktanlar .....	21
1.7.	Melatonin (Mel) .....	22
1.7.1.	Melatonin Biyosentezi.....	23
1.7.2.	Melatonin Bitkilerdeki Fizyolojik ve Biyokimyasal Rollerini .....	25
1.8.	Ekim Öncesi Tohum Uygulamaları: Priming.....	27
1.9.	Buğday ( <i>Triticum L.</i> ) .....	28
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	33
2.1.	Bitkilerin Yetiştirilmesi.....	33
2.2.	Stres Tolerans İndekslerinin Belirlenmesi.....	34
2.3.	Yaprak Ozmotik Potansiyelinin ( $\Psi_s$ ) Belirlenmesi.....	36
2.4.	Yaprakların Klorofil Floresans ( $F_v/F_m$ ) Değerlerinin Belirlenmesi .....	36
2.5.	Yaprakların Toplam Klorofil (Tkl) ve Toplam Karotenoid (Tkar) İçeriklerinin Belirlenmesi.....	36
2.6.	Kök ve Sürgünlerde Antioksidan Enzim Aktivitelerinin Belirlenmesi .....	37
2.6.1.	Enzim Özütlerinin Hazırlanması .....	37
2.6.2.	Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi .....	37
2.6.3.	Peroksidaz (POX) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi .....	37
2.6.4.	Katalaz (CAT) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi .....	38
2.6.5.	Glutasyon Redüktaz (GR) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi.....	38
2.6.6.	Monodehidroaskorbat Redüktaz (MDHAR) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi .....	38
2.6.7.	Askorbat Peroksidaz (APX) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi .....	39
2.6.8.	Dehidroaskorbat Redüktaz (DHAR) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi.....	39
2.7.	Kök ve Sürgünlerde Fenilalanin Amonyum Liyaz (PAL) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi .....	39
2.8.	Kök ve Sürgünlerde Çözünebilir Protein Miktarının Belirlenmesi .....	40
2.9.	Kök ve Sürgünlerde Toplam Fenolik Madde İçeriğinin Belirlenmesi için Özütlerin Hazırlanması .....	40
2.9.1.	Toplam Çözünebilir Fenolik Madde (TFM) İçeriğinin Belirlenmesi.....	40
2.9.2.	Toplam Flavonoid (TF) İçeriğinin Belirlenmesi .....	41
2.10.	Kök ve Sürgünlerin Antioksidan Kapasite (AK) Değerlerinin Belirlenmesi .....	40

2.10.1.	2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) Radikal Temizleme Aktivitesinin Belirlenmesi .....	41
2.10.2.	FRAP (Ferrik İyon İndirgeme Antioksidan Kapasite) Analizi.....	41
2.10.3.	CUPRAC (Kuprik İyon İndirgeme Antioksidan Kapasite) Analizi .....	42
2.11.	Fenolik Asit (FA) İçeriğinin LC-MS/MS Analizleri ile Belirlenmesi .....	42
2.12.	Kök ve Sürgünlerin Hidrojen Peroksit (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) İçeriğinin Belirlenmesi .....	43
2.13.	Kök ve Sürgünlerin Lipid Peroksidasyonunun Belirlenmesi .....	43
2.14.	Kök ve Sürgünlerin Glutasyon (GSH) İçeriğinin Belirlenmesi.....	44
2.15.	Kök ve Sürgünlerin Prolin İçeriğinin Belirlenmesi.....	44
2.16.	Kök ve Sürgünlerin Çözünabilir Şeker İçeriğinin Belirlenmesi.....	44
2.17.	İstatistiksel Analizler.....	45
3.	BULGULAR.....	46
3.1.	Gama ışınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Temel Büyüme Parametreleri Üzerine Olan Etkisi.....	46
3.2.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Sürgün Ozmotik Potansiyeli ( $\Psi_s$ ) Üzerine Olan Etkisi .....	51
3.3.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Bitkinin Kök ve Sürgünlerinde Prolin (pro) İçeriğine Olan Etkisi.....	52
3.4.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Bitkinin Kök ve Sürgün Kısımlarındaki Çözünabilir Şeker ve Fruktoz İçeriklerine Olan Etkisi .....	54
3.5.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Klorofil Floresans ( $F_v/F_m$ ) Değerleri Üzerine Olan Etkisi.....	57
3.6.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Fidlerdeki Fotosentetik Pigment (kl <i>a</i> , kl <i>b</i> ), Toplam klorofil (Tkl) ve Toplam Karotenoid (Tkar) İçeriğine Etkisi.....	58
3.7.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerine Ait Antioksidan Enzim Aktiviteleri Üzerine Olan Etkisi.....	59
3.7.1.	Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzim Aktivitesi Değişimi.....	59
3.7.2.	Katalaz (CAT) Enzim Aktivitesi Değişimi .....	61
3.7.3.	Guaiakol Peroksidaz (POX) Enzim Aktivitesi Değişimi .....	62
3.7.4.	Askorbat Peroksidaz (APX) Enzim Aktivitesi Değişimi .....	64
3.7.5.	Glutasyon Redüktaz (GR) Enzim Aktivitesi Değişimi.....	66
3.7.6.	Monodehidroaskorbat Redüktaz (MDHAR) Enzim Aktivitesi Değişimi ....	68

3.7.7.	Dehidroaskorbat Redüktaz (DHAR) Enzim Aktivitesi Değişimi.....	70
3.8.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerindeki Fenolik Madde İçeriği ve Antioksidan Kapasite Değerleri Üzerine Olan Etkisi .....	71
3.9.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Fidelerin Kök ve Sürgünlerindeki Fenolik Asit İçeriği Üzerine Olan Etkisi.....	75
3.10.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Fenilalanin Amonyum Liyaz (PAL) Aktivitesine Etkisi .....	87
3.11.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Hidrojen Peroksit (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) İçeriğine Etkisi .....	87
3.12.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerindeki Tiyobarbitürik Asit Reaktif Ürünleri (TBARS) Eşdeğerine Olan Etkisi .....	90
3.13.	Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarından Elde Edilen Fidelere Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Glutasyon (GSH) İçeriğine Etkisi .....	92
3.14.	İyonlaştırıcı radyasyon ile Ekim Öncesi ve Ekim Sonrası Melatonin Uygulamalarının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Morfometrik Parametre Sonuçları ile Antioksidan Aktivite ve Kapasite Değerleri Arasındaki İlişki .....	94
4.	TARTIŞMA .....	99
5.	SONUÇLAR .....	119
6.	ÖNERİLER .....	122
7.	KAYNAKLAR .....	124

## ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

İYONLAŞTIRICI RADYASYON STRESİNE MARUZ BIRAKILAN BUĞDAY (*Triticum aestivum* L.) TOHUMLARINDA DIŞTAN MELATONİN UYGULAMASININ ANTIÖKSİDAN SAVUNMA SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN İNCELENMESİ

Aynur ÇELEBİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Faik Ahmet AYAZ

2021, 139 Sayfa

Bu çalışmada, radyoaktif kobalt ( $^{60}\text{Co}$ ) gama ışını kullanılarak farklı dozlarda (100, 200, 300, 400 Gy) iyonlaştırıcı radyasyon (IR)'a maruz bırakılan buğday (*Triticum aestivum* L. 'Bezostaya-1') tohumlarından elde edilen fidelerin kök ve sürgünlerinde, ekim öncesi ve ekim sonrası melatonin uygulamalarının iyileştirici etkisi fizyolojik ve biyokimyasal düzeyde araştırılmıştır. Bu amaçla kök ve sürgünlerin morfolitik parametreleri (kök ve sürgün boyu, kuru ve taze ağırlık, yaprak alanı), ozmolit içeriği (prolin, sükroz, fruktoz, glukoz ve fruktan içeriği, ozmotik potansiyel), fotosentetik parametreler (klorofil ve karotenoid içeriği,  $F_v/F_m$  oranı), enzimatik olan (SOD, POX, CAT, APX, GR, MDHAR, DHAR) ve olmayan (TFM, fenolik asit, GSH) antioksidan savunma sistemi bileşenleri belirlenmiştir. Ekim öncesi melatonin uygulaması başta olmak üzere her iki melatonin uygulaması, IR stresinin buğday fidelerinin büyüme parametreleri, sürgün ozmotik potansiyeli ve fotosentetik pigment içeriğinde oluşturduğu azalmayı iyileştirmiştir. Melatoninin antioksidan enzimler üzerinde oluşturduğu etki IR dozuna, enzim çeşidine ve melatonin uygulama yöntemine bağlı olarak değişmiştir. İyonize radyasyon uygulaması ile artan TFM ve PAL aktiviteleri, ekim öncesi melatonin uygulamasıyla azalırken ekim sonrası melatonin uygulamasıyla artmıştır. Melatonin ve IR uygulamaları fenolik asit ve GSH içeriğini doz bağımlı olarak değiştirmiştir. Hem ekim öncesi ve hem de ekim sonrası melatonin uygulamaları IR stresi ile artan prolin ve şeker içeriklerini azaltmıştır. Sonuç olarak, dışarıdan uygulanan melatoninin, özellikle ekim öncesi melatonin uygulamasının, IR stresine karşı buğday fidelerine yüksek tolerans kazandırdığı ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** İyonlaştırıcı radyasyon, Gama ışını, Melatonin, Priming, *Triticum aestivum* L.

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE ROLE OF EXOGENOUS MELATONIN APPLICATION ON THE ANTIOXIDANT DEFENSE SYSTEM IN THE SEEDS OF WHEAT (*Triticum aestivum* L.) EXPOSED TO IONISING RADIATION STRESS

Aynur ÇELEBİ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Biology Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Faik Ahmet AYAZ  
2021, 139 Pages

In this study, ameliorative effects of two types of melatonin treatments, pre-sowing priming and application during growth, in roots and shoots of wheat (*Triticum aestivum* L. 'Bezostaya-1') seedlings exposed to different radiation doses (100, 200, 300, and 400 Gy) of radioactive cobalt (<sup>60</sup>Co) gama rays were investigated at physiological and biochemical levels. For this purpose, morphometric parameters (root and shoot length, fresh and dry weight, leaf area), osmolyte content (proline, sucrose, fructose, glucose and fructan contents, osmotic potential), photosynthetic parameters (chlorophyll and carotenoid contents, *Fv/Fm* ratio), enzymatic (SOD, POX, CAT, APX, GR, MDHAR, DHAR) and non-enzymatic (TFM, phenolic acids, GSH) antioxidant defense system components were determined. Both melatonin applications, being more apperent in pre-sowing melatonin, improved IR stress induced decreases in growth parameters, shoot osmotic potential and photosynthetic pigment content in the wheat seedling. The effects of melatonin on the antioxidant enzymes varied depending on the IR dose, enzyme type and method of melatonin application. The TFM content and PAL activity, which increased with IR stress, enhanced with post-sowing melatonin application while decreased with pre-sowing melatonin application. Melatonin and IR applications changed the phenolic acids and GSH content depending on the dose. Both of pre and post-sowing melatonin applications decreased proline and sugar contents which increased with IR stress. In conclusion, both melatonin applications, particularly pre-sowing melatonin, provide high tolerance to the wheat seedlings against to IR stress. Taken all together, it has been demonstrated that exogenous applied melatonin, especially pre-sowing melatonin application, provides the wheat seedlings high tolerance against IR stress.

**Key Words:** Ionising radiation, Gamma ray, Melatonin, Priming, *Triticum aestivum* L.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1.	Başlıca çevresel stres çeşitleri ..... 5
Şekil 1.2.	Elektromanyetik dalga spektrumu..... 7
Şekil 1.3.	Suyun radyolizinin şematik gösterimi..... 9
Şekil 1.4.	Moleküler oksijenin indirgenmesi sırasında oluşan başlıca reaktif oksijen türleri..... 13
Şekil 1.5.	Bitkilerde askorbat-glutatyon döngüsü ..... 17
Şekil 1.6.	Fruktanlara (1-kestoz) ait genel bir kimyasal görünüm ..... 22
Şekil 1.7.	Melatoninin kimyasal yapısı ..... 22
Şekil 1.8.	Melatoninin bitkilerdeki ve hayvanlardaki genel biyosentez yolu ..... 24
Şekil 1.9.	Normal çimlenme süreci ile tohum priming sürecinin şematik diyagramı.. 28
Şekil 3.1.	Bezstaya-1 buğday çeşidinin IR ve Mel uygulama gruplarına ait morfolojik görünümü ..... 47
Şekil 3.2.	Ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının IR koşullarında buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki tolerans indeksi değişimi..... 50
Şekil 3.3.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgün ozmotik potansiyeli üzerine olan etkisi..... 51
Şekil 3.4.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki pro içeriği üzerine olan etkisi..... 53
Şekil 3.5.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerdeki pro içeriği üzerine olan etkisi..... 53
Şekil 3.6.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının kök ve sürgünlerin fruktan içeriğine etkisi ..... 56
Şekil 3.7.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının yaprak klorofil floresans ( $F_v/F_m$ ) değerlerine etkisi..... 57
Şekil 3.8.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki SOD enzim aktivitesi üzerine olan etkisi..... 60
Şekil 3.9.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin SOD enzim aktivitesi üzerine olan etkisi..... 60
Şekil 3.10.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki CAT enzim aktivitesi üzerine olan etkisi..... 61

Şekil 3.11.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin CAT enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	62
Şekil 3.12.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki POX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	63
Şekil 3.13.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin POX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	63
Şekil 3.14.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına melatonin uygulamasının köklerdeki APX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	65
Şekil 3.15.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin APX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	66
Şekil 3.16.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına melatonin uygulamasının köklerdeki GR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi .....	67
Şekil 3.17.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin GR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi .....	67
Şekil 3.18.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamalarının köklerdeki MDHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi..	69
Şekil 3.19.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin MDHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi ...	69
Şekil 3.20.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki DHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	70
Şekil 3.21.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin DHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi.....	71
Şekil 3.22.	Farklı dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına melatonin uygulamasının fidelerin kök ve sürgünlerindeki ham özüt, serbest, ester, glikozit ve ester-bağlı formlarındaki toplam hidroksibenzoik asit ( $\Sigma$ HBA), toplam hidroksisinnamik ( $\Sigma$ HSA) asit ve toplam fenolik asit ( $\Sigma$ FPA) içeriğine etkisi .....	86
Şekil 3.23.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki PAL aktivitesi üzerine olan etkisi .....	88
Şekil 3.24.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerdeki PAL aktivitesi üzerine olan etkisi .....	88
Şekil 3.25.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerde $H_2O_2$ içeriği üzerine olan etkisi.....	89
Şekil 3.26.	Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerde $H_2O_2$ içeriği üzerine olan etkisi.....	89

- Şekil 3.27. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerde TBARS eşdeğeri üzerine olan etkisi ..... 91
- Şekil 3.28. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerdeki TBARS eşdeğeri üzerine olan etkisi ..... 92



## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Farklı radyasyon dozlarının bitkilerin büyüme parametreleri üzerine olan etkisi.....	11
Tablo 1.2. Bitkilerdeki başlıca fenolik asit çeşitleri.....	20
Tablo 1.3. Dünya genelinde buğday üretimi.....	30
Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan su, melatonin ve ışınlama işlemlerini gösteren deney grupları.....	33
Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan kontrol ve uygulama gruplarına ait uygulama protokolü.....	35
Tablo 3.1. Gama ışınlamasına (IR) maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi (ön-Mel) ve ekim sonrası (Mel) melatonin uygulamalarının fidelerin sürgün ve kök uzunluğuna, yaş ağırlığına, kuru ağırlığına ve yaprak alanına olan etkisi.....	48
Tablo 3.2. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının kök ve sürgünlerin çözünebilir şeker içeriğine (mg 100 g <sup>-1</sup> TA) etkisi .....	55
Tablo 3.3. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının klorofil ve karotenoid içeriğine (mg/100 g TA) olan etkisi.....	58
Tablo 3.4. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının fidelerin kök ve sürgünlerindeki TFM ve TF içeriğine (mg/100 g TA) ve AK (DPPH, FRAP ve CUPRAC, µmol Trolox g <sup>-1</sup> TA)'sine etkisi .....	73
Tablo 3.5. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının ham özütteki fenolik asit içeriğine (ng g <sup>-1</sup> TA) olan etkisi .....	77
Tablo 3.6. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının serbest formda fenolik asit içeriğine (ng g <sup>-1</sup> TA) etkisi .....	79
Tablo 3.7. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının ester formda fenolik asit içeriğine (ng g <sup>-1</sup> TA) olan etkisi .....	81
Tablo 3.8. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının glikozit formundaki fenolik asit içeriğine (ng g <sup>-1</sup> TA) etkisi.....	83

Tablo 3.9. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının ester-bağlı formdaki fenolik asit içeriğine ( $\text{ng g}^{-1}$ TA) olan etkisi	..... 85
Tablo 3.10. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının kök ve sürgünlerindeki GSH ve GSSG içeriğine ( $\text{nmol g}^{-1}$ TA) etkisi	..... 93
Tablo 3.11. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin kök boy uzunluğu (KU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan ve prolin içeriklerinin Pearson ( $r$ ) korelasyonları.....	95
Tablo 3.12. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin kök uzunluğu (KU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR ve DHAR aktiviteleri ile toplam TFM, TF, TBARS, $\text{H}_2\text{O}_2$ , PAL ve toplam GSH içeriklerinin Pearson ( $r$ ) korelasyonları.....	96
Tablo 3.13. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin sürgün uzunluğu (SU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), yaprak alanı (YA), ozmotik potansiyel ( $\Psi_s$ ), fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan, prolin, Tkl, Tkar içerikleri ile klorofil floresans değerinin Pearson ( $r$ ) korelasyonları .....	97
Tablo 3.14. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin sürgün uzunluğu (SU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), yaprak alanı (YA), POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR ve DHAR aktiviteleri ile toplam TFM, TF, TBARS, $\text{H}_2\text{O}_2$ , PAL ve $\sum$ GSH içeriklerinin Pearson ( $r$ ) korelasyonları.....	98

## SEMBOLLER DİZİNİ

AANAT	: Arilalkilamin N-asetiltransferaz
AK	: Antioksidan Kapasite
AlCl <sub>3</sub>	: Alüminyum Klorür
ANOVA	: Varyans Analizi
APX	: Askorbat Peroksidaz
AsA	: Askorbik Asit
ASMT	: N-asetilserotonin metiltransferaz
B	: Bor
BSA	: Sığır Serum Albumin
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CAT	: Katalaz
Cd	: Kadmiyum
CFCs	: Kloroflorokarbonlar
CHS	: Kalkon Sentaz
Co	: Kobalt
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
COMT	: Kafeik asit O-metiltransferaz
Cs	: Sezyum
CH <sub>4</sub>	: Metan
Cu	: Bakır
CUPRAC	: Kuprik İyon İndirgeme Antioksidan Kapasite
DHA	: Dehidroaskorbat
DHAR	: Dehidroaskorbat Oksidaz
DPPH	: 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil
EDTA	: Etilendiamintetraasetikasit
eV	: Elektron Volt
FA	: Fenolik Asit
FAO	: Gıda ve Tarım Örgütü
FC	: Folin–Ciocalteu



Fe	: Demir
FeA	: Ferulik Asit
FRAP	: Ferrik İyon İndirgeme Antioksidan Kapasite
GaA	: Gallik Asit
GR	: Glutasyon Redüktaz
GSSG	: Yükseltgenmiş Glutasyon
GSH	: İndirgenmiş Glutasyon
Gy	: Gray
HBA	: Hidroksibenzoik Asit
HIOMT	: Hidroksiindol-O-metiltransferaz
HPLC	: Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi
HSA	: Hidroksisinnamik Asit
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	: Hidrojen Peroksit
IAA	: İndol-3-Asetik Asit
IR	: İyonlaştırıcı Radyasyon
K	: Potasyum
KA	: Kuru Ağırlık
KaA	: Kafeik Asit
KFE	: Katı Faz Ekstraksiyonu
KIA	: Klorojenik Asit
LC-MS/MS	: Sıvı Kromatografisi-Kütle Spektrometresi/Kütle Spektrometresi
MDA	: Malondialdehit
MDHAR	: Monodehidroaskorbat Redüktaz
Mel	: Melatonin
MgCl <sub>2</sub>	: Magnezyum Klorür
µl	: Mikrolitre
mM	: Milimolar
Mn	: Manganez
MPa	: Megapaskal
NaCl	: Sodyum Klorür
N <sub>2</sub> O	: Nitröz Oksit
NADH	: Nikotinamid Adenin Dinükleotit
NADPH	: Nikotinamid Adenin Dinükleotit Fosfat

NBT	: Nitro Blue Tetrazolium
PAL	: Fenilalanin Amonyum Liyaz
Pb	: Kurşun
<i>p</i> -KuA	: Kumarik Asit
POX	: Peroksidaz
Pro	: Prolin
PS	: Fotosistem
PVP	: Polivinilpirolidon
RID	: Refraktif İndeks Dedektörü
ROT	: Reaktif Oksijen Türleri
Ra	: Radyum
SaA	: Salisilik Asit
SiA	: Sinapik Asit
SNAT	: Serotonin N-asetiltransferaz
SOD	: Süperoksit Dismutaz
SPSS	: Statistical Package for Social Sciences
Sv	: Sievert
SyA	: Syringik Asit
T5H	: Triptofan-5-hidroksilaz
TA	: Taze Ağırlık
TAEK	: Türkiye Atom Enerji Kurumu
TBA	: Tiobarbitirik Asit
TBARS	: Tiyobarbitirik Asit Reaktif Ürünleri
TCA	: Trikarboksilik Asit Döngüsü
TDC	: Triptofan Dekarboksilaz
TFM	: Toplam Fenolik Madde
TF	: Toplam Flavonoid
TI	: Tolerans İndeksi
Tkl	: Toplam Klorofil
Tkar	: Toplam Karotenoid
TPTZ	: 2,4,6-tripiridil-s-triazin
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
U	: Uranyum

UV	: Ultraviyole
Ü	: Ünite
VaA	: Vanilik Asit
Vis	: Görünür ışık
v	: Frekans
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
YA	: Yaprak Alanı
Zn	: Çinko
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
$\lambda$	: Dalgaboyu

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

İnsanların yaşamlarını aktif ve sağlıklı bir şekilde sürdürebilmeleri için besin ihtiyaçlarını karşılayacak yeterli, güvenli ve besleyici gıdaya fiziksel, sosyal ve ekonomik yönden sürekli olarak erişebilmeleri gerekir. Bu durum “gıda güvenliği” olarak adlandırılır (Schmidhuber ve Tubiello, 2007). Gıda güvenliğinin sağlanmasında önemli bir nokta, ulusların gıda ihtiyaçlarını bireysel düzeyde garanti altına alabilecekleri parasal veya parasal olmayan kaynaklara sahip olup olmadıklarıdır. Bu açıdan tarım büyük bir önem taşımaktadır. Tarım sadece bir gıda kaynağı olmasıyla değil, aynı zamanda bir gelir kaynağı olmasıyla da gıda güvenliğini arttırmaktadır (Schmidhuber ve Tubiello, 2007). Ne var ki küresel ısınma ile meydana gelen iklim değişikliği, tarımı ve dolayısıyla gıda güvenliğini önemli boyutta tehdit etmektedir (FAO, 2017). Son zamanlarda yapılan bilimsel çalışmalar, iklim sistemi üzerinde meydana gelen değişikliklerin biyolojik çeşitliliği ve mahsul üretimini hızla değiştirebileceğini göstermektedir (Lobell vd., 2008; Vermeulen vd., 2012; Kumar, 2016). İklim değişikliği altında küresel gıda üretimini arttırmak için sürdürülebilir tarım uygulamalarının teşvik edilmesinin, yerel ve uluslararası kaynakların sağlanmasına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir (Schmidhuber ve Tubiello, 2007). Bu nedenle daha verimli ve strese dayanıklı bitkilere olan talep gün geçtikçe artmaktadır (Nowicka et al., 2018).

Dış çevresi ile sürekli etkileşim halinde bulunan bitkiler, hem doğal ve hem de tarımsal koşullar altında sıklıkla büyüme ve gelişmelerini engelleyen ve ürün verimliliğini azaltan olumsuz şartlarla karşı karşıya kalmaktadır (Taiz ve Zaiger, 2008). Bitkilerin büyüme ve gelişmesi üzerinde sınırlayıcı etki oluşturan koşullar arasında sıcaklık, kuraklık, tuzluluk ve ağır metaller gibi çeşitli abiyotik faktörler yer almaktadır (Hirayama ve Shinozaki, 2010). Bunların yanı sıra farklı fiziko-kimyasal faktörlerin de bitkiler üzerindeki etkilerinin araştırılması bilimsel açıdan önem taşımaktadır. Bu faktörlerden bir tanesi, son yıllarda da oldukça ilgi çekici bir konu olan iyonlaştırıcı radyasyon (IR)'dur (Kovacs ve Keresztes, 2002; Arena vd., 2014; Beyaz vd., 2016).

Dünya üzerindeki tüm canlılar, milyonlarca yıldan bu yana uzaydan gelen kozmik ışınlar ve yerkürede bulunan radyoaktif maddelerden yayılan radyasyona doğal olarak

maruz kalmaktadır (TAEK, 2020). Maruz kalınan radyasyonun yaklaşık %88'ini doğal radyasyon kaynakları, geri kalanını da yapay kaynaklar oluşturmaktadır (Hacıosmanoğlu, 2017). Türkiye Atom Enerjisi Kurumunun (TAEK) yayınladığı verilerde, doğal radyasyon yolu ile alınan ortalama yıllık etkin doz miktarının 2,4 mSv (1 Gy = 1 Sv) civarında olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte bu miktarın, yaşanan bölgenin jeolojik özelliklerine (enlem ve denizden yükseklik gibi ) göre değiştiği ve bazı ülkelerde 10 mSv'in üzerine çıktığı rapor edilmektedir. Dünya genelinde maruz kalınan doğal radyasyon kaynaklarının %49'unu kozmik ışınlar, %21'ini gama ışını, %17'sini radon gazı ve %13'ünü ise solunum ve sindirim yolu ile vücuda alınan radyoizotopların neden olduğu vücut içi ışınlamalar oluşturmaktadır. Ayrıca, doğal gama radyasyonu nedeniyle alınan yıllık toplam etkin doz değeri yaklaşık 0.48 mSv olarak kaydedilmiştir (TAEK, 2020).

Dünya yüzeyinden yaklaşık 50 – 85 km yukarıda bulunan stratosferik ozon tabakası, güneş sisteminden gelen zararlı ışınları tutarak Dünya'daki yaşamı korur. Ancak son yıllarda atmosferdeki çeşitli sera gazlarının [nitroz oksit (N<sub>2</sub>O) ve kloroflorokarbonlar (CFCs) gibi] artması sonucu ozon tabakasının kalınlığında incelmeler oluşmuştur. Bu durum, daha fazla radyasyonun Dünya yüzeyine ulaşmasına ve canlılar tarafından maruz kalınan radyasyon miktarının artmasına neden olmaktadır (Ali vd., 2015). Bunun yanı sıra küresel öneme sahip nükleer santraller, atom bombası test alanları, doğal olarak oluşan radyoaktif alanlar (Hindistan, Kelara, Ramsar ve İran'da) da potansiyel kirleticiler olarak gösterilmektedir (Mousseau ve Møller, 2020). Geçmişte, Çernobil (1986 - Ukrayna) ve Fukuşima (2011 - Japonya) gibi, nükleer enerji santrallerinde yaşanan erime kazalarından sonra nükleer malzemelerin çevreye salınması ile oluşan insan kaynaklı radyoaktif kirlenmeler sonucu birçok canlı türü yüksek dozda radyasyona maruz kalarak zarar görmüştür. Bununla birlikte günümüzde dahi canlılar üzerindeki olumsuz etkileri devam etmektedir (Gudkov vd., 2019; Caplin vd., 2020). Yakın geçmişe kadar yapılan çalışmalarda, radyoaktif olarak kirlenen alanlarda yetişen bitkilerde oluşan mutasyonların, kontamine olmamış alanlarda yetiştirilen bitkilere kıyasla çok daha yüksek olduğu kaydedilmiştir (Geraskin vd., 2003; Real vd., 2004). Çeşitli IR kaynaklarının bitki morfolojisi, anatomisi, biyokimyası ve fizyolojisi üzerinde meydana getirdiği etkilere yönelik araştırmalar son zamanlarda önemli ölçüde artmıştır (Esnault vd., 2010; Gudkov vd., 2019; Caplin vd., 2020). Genel olarak IR çalışmalarında ele alınan konular, maruz kalınan radyasyon türü, dozu ve uygulandığı bitki kısmı olup IR'in bitki üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler (büyümenin engellenmesi, çimlenmenin gecikmesi, besin

değeri kaybı gibi) ortaya konulmuştur. Ancak iyonlaştırıcı radyasyonun bitkilerde oluşturduğu olumsuz etkileri azaltmaya ya da tamamen gidermeye yönelik çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Ekilebilir tarım arazilerindeki azalma ve IR stresi gibi olası çevresel stres faktörleri, tarımı olumsuz yönde etkilemekte ve tarımdan elde edilen mahsul miktarının gıda talebini tek başına karşılamasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle ürün kaybını azaltan, birim alandaki verim kapasitesini arttıran, bitki büyümesini düzenleyen ve insan sağlığı açısından güvenli olan organik ve biyolojik ajanların (ozmotik koruyucular ve antioksidan bileşikler gibi) etkili uygulama yöntemleri ile birlikte araştırılması ve literatüre kazandırılması gerekmektedir.

Melatonin ( $C_{13}H_{16}N_2O_2$ , Mel), canlı organizmaların birçoğunda hücre, doku ve organ düzeyinde bulunan ve biyolojik, hormonal ve fizyolojik süreçlerde çoklu görevler üstlenen bir biyomoleküldür (Salehi vd., 2019). Bitkilerde Mel; tohum çimlenmesi, fide büyümesi, fotoperiyodik cevaplar, çiçek gelişimi ve senesensin ertelenmesi gibi çeşitli fizyolojik fonksiyonları düzenlemede görev yapar (Szafranska vd., 2016). Ayrıca Mel, bitkilerde stres toleransının gelişmesinde önemli bir role sahiptir (Zhang vd., 2015). Stres koşulları altında yetişen bitkilerde içsel melatonin seviyesinin arttığı ve Mel'in bitkiyi korumada bir antioksidan olarak hareket ettiği rapor edilmiştir (Wei vd., 2015; Salehi vd., 2019). Bunun yanında dıştan Mel uygulamasının da kuraklık, tuzluluk, ağır metal, UV radyasyon, sıcaklık, patojenler ve herbisitler gibi çeşitli biyotik ve abiyotik streslere karşı bitki savunmasını arttırdığı bildirilmiştir (Zhang vd., 2015; Nawaz vd., 2016; Salehi vd., 2019). Bitkilere melatonin uygulaması; yaprağa püskürtme, toprakta sulama, topraksız ortamda Hoagland (Hoagland ve Arnon, 1950) çözeltilisine ekleme gibi çeşitli yöntemler ile gerçekleştirilmektedir (Wang vd., 2013a; Ye vd., 2016; Siddiqui vd., 2019). Bunların yanı sıra, "ekim öncesi tohumlara melatonin uygulanması" en etkili yöntemlerden bir tanesidir (Szafranska vd., 2016; Zhang vd., 2016).

Tohumlara ekim öncesinde doğal ya da sentetik bileşiklerin uygulanması metodu; tohum kalitesini arttıran ve bitkilerde stres toleransı için oldukça etkili, düşük maliyetli ve uygulaması nispeten kolay bir yöntemdir. "Tohum uygulamaları" ya da "ekim öncesi uygulamalar" olarak da adlandırılan bu yöntemi ifade ederken çoğunlukla "priming" kelimesi tercih edilmektedir. Tohumlara priming uygulaması ile çimlenme hızlarının artması ve sonrasında daha homojen fidelerin büyümesi sağlanmaktadır (Raj ve Raj, 2019). Bu teknik, tohumların çimlendirilmeden önce kontrollü bir şekilde hidratlanmasına

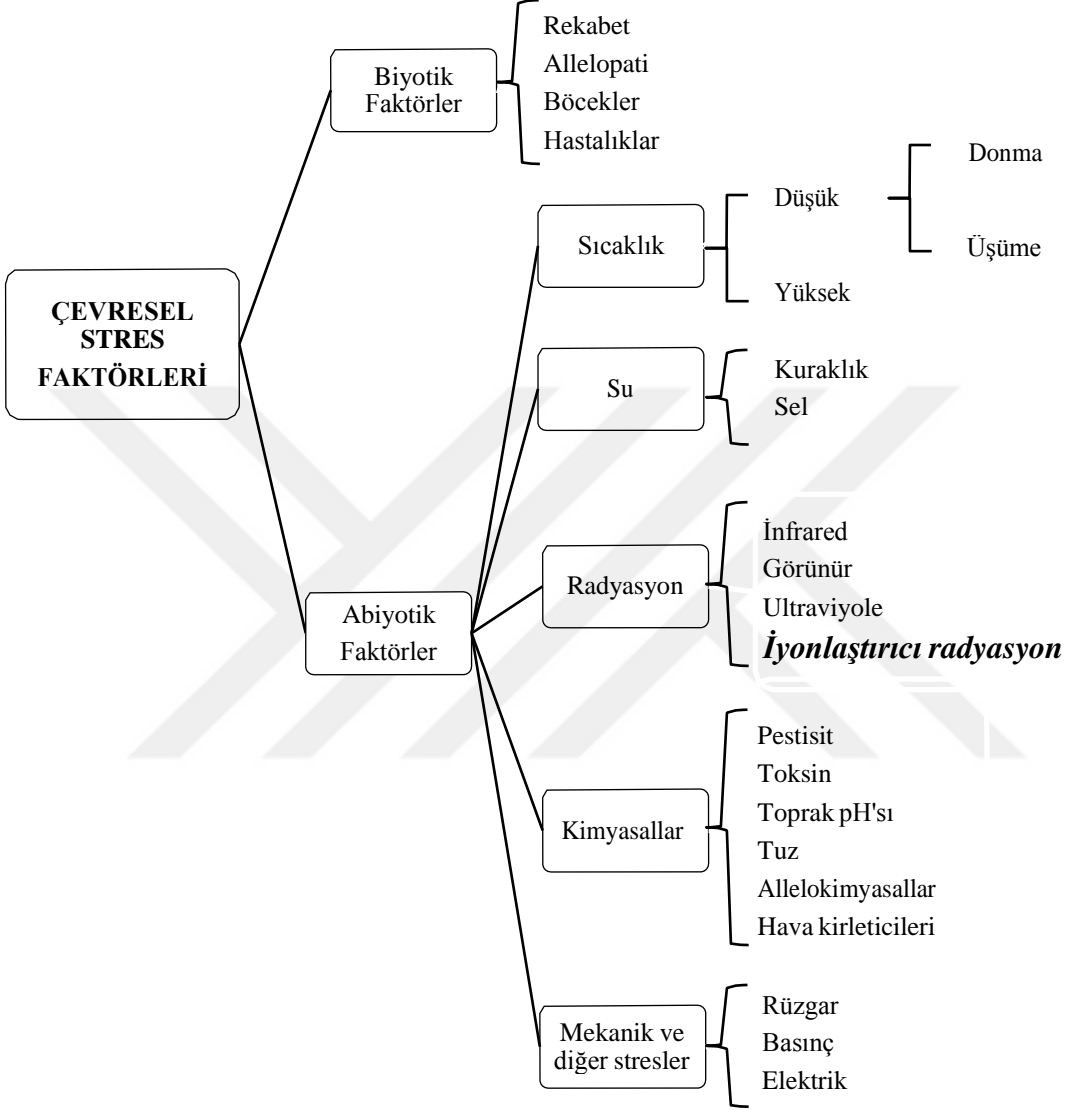
(tohumların zamana ve sıcaklığa bağlı olarak su ve ya sulu bir çözelti içinde belirli bir nem yüzdesine kadar tutulması) dayanır. Bu sayede, bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal fonksiyonları üzerinde olumlu etkiler gözlenir (Jisha vd., 2013; Ibrahim, 2016). Farklı abiyotik stres faktörleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, tohumlara ekim öncesi Mel uygulamasının tohum ve fide canlılığını iyileştirdiği ve bitki stres toleransını geliştirdiği rapor edilmiştir (Li vd., 2012; Wei vd., 2015; Balabusta vd., 2016).

Bu çalışmada önemli bir potansiyele sahip olan ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L. 'Bezostaya-1') bitkisine belirli bir derişimde ekim öncesi tohum uygulaması (priming) olarak veya yetiştirme sırasında (ekim sonrası) besin çözeltisine eklenerek uygulanan Mel'in IR stresi ve antioksidan sistem üzerine olan etkilerinin fizyolojik ve biyokimyasal düzeyde araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla buğday tohumlarına uygulanan  $\gamma$ -ışınlamalarının (100, 200, 300 ve 400 Gy) buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerde oluşturacağı fizyolojik ve biyokimyasal hasarın ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları ile iyileştirilmesi; çeşitli büyüme parametreleri, fotosentetik mekanizma, ozmotik düzenleme ve enzimatik olan (CAT, SOD, POX ve APX gibi) ve enzimatik olmayan (toplam fenolik madde, glutasyon ve fenolik asitler gibi) antioksidan sistem bileşenleri düzeyinde çalışılmıştır.

## 1.2. Stres ve Stres Çeşitleri

Bir bitkinin canlılığı, ürün verimliliği, biyokütle birikimi ve primer özümleme (CO<sub>2</sub> ve mineral alımı) gibi normal büyüme ve gelişme parametreleri üzerinde olumsuz etki oluşturan dışsal herhangi bir etmen “stres” olarak tanımlanır. Bitki uygun olmayan koşullarda canlı kalabiliyorsa ve hayatını devam ettirebiliyorsa strese dayanıklı olduğu anlamına gelir. Stres sonunda bitkinin kendi metabolizmasını değiştirerek uyum sağlaması “alışma” ya da “aklimatizasyon” olarak adlandırılır. Strese dayanıklılık stresten sakınma veya strese tolerans şeklinde meydana gelebilir. Stres sakınması; dışarıdan gelen stres faktörünün, bitkinin bünyesinde stres oluşturmada önlenmesidir. Stres toleransı ise bitkinin uygunsuz ortam koşulları ile başa çıkma potansiyeli olarak ifade edilir (Taiz ve Zeiger, 2008). Stres etmenlerinin neden olduğu zarar bitkinin türüne, tolerans ve alışma kabiliyetine bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte stresin miktarı ve süresi de stresin bitki üzerindeki etkisini önemli boyutta değiştirir. Genellikle kısa ve orta dereceli stres koşulları bitkide geçici hasara neden olurken; uzun ve yüksek şiddetli stres koşullarında

bitki savunma mekanizması yetersiz kalabilmekte bitkinin ölümüyle sonuçlanmaktadır (Yordanov vd., 2000).



Şekil 1.1. Başlıca çevresel stres çeşitleri (Taiz ve Zaiger, 1991).

Çevresi ile sürekli etkileşim halinde olan bitkiler, genellikle biyotik ve abiyotik stres faktörlerine maruz kalırlar (Şekil 1.1). Mahsul kaybının %31-42'sinden sorumlu olan biyotik stres hasat sonrasında da %6-20 kadar kayba neden olurken, abiyotik stresin mahsule verdiği hasar genellikle %6 ila 20 arasındadır. Bitkiler; stres alımı, etkileşim, tepki, direnç, tolerans ve adaptasyon olmak üzere karmaşık savunma mekanizmalarına sahiptir. Bitkilerde stres tepkisini, toleransını, direncini ve uyarılmaları yönlendiren



mekanizmalar araştırmacıların ilgi odağı durumundadır. Stres tepkisindeki moleküler adımları anlamak; stresle m¼cadele etmede, y¼ksek verimli ¼r¼n ¼eřitleri ¼retmede ve bitki ¼rt¼s¼nden kaynaklanan kaybın etkisini azaltmada kritik bir ¼neme sahiptir (Shameer vd., 2019).

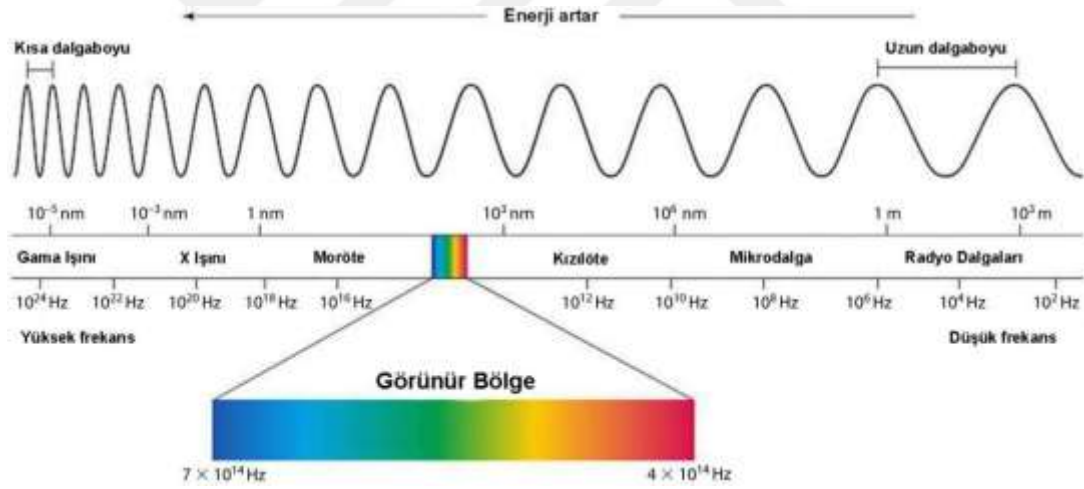
### 1.3. İyonlaştırıcı Radyasyon (IR)

Atom, maddenin t¼m ¼zelliklerini yansıtan yapı taşıdır. Bir atomda bulunan proton ( $p^+$ ) ve n¼tronların ( $n$ ) sayısındaki dengesizlik atom ¼ekirdeđinin kararsız olmasına neden olur. Kararsız haldeki atom ¼ekirdeđi kararlı hale gelirken ge¼en s¼re¼te s¼rekli olarak fazladan enerji a¼ıđa ¼ıkartır. Bu enerji, radyasyon (ışıma) olarak adlandırılır. Radyasyon, iyonlaştırıcı/iyonize radyasyon (IR) ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (nIR) olmak ¼zere ikiye ayrılır. Bu iki radyasyon tipini ayırmada kullanılan temel parametre, iyonlaşma enerjisidir. İyonlaşma enerjisi, bir elektronu serbest bir atomdan ayırmak i¼in gereken minimum enerji miktarıdır (Gudkov vd., 2019). İyonizasyon olayı i¼in harcanan enerji yaklaşık 33 elektron volt (eV) olup, bu enerji g¼¼l¼ kimyasal bağları kırmak i¼in gerekli olan enerjiden ¼ok daha fazladır (Ward, 1988; Goodwin vd., 1970). N¼tr atomlar i¼in iyonlaşma enerjisi 3,9 ila 24,6 eV arasında değişirken canlı sistemlerin ana bileşeni olan su i¼in bu değer 12,6 eV'dir (Gudkov vd., 2019).

Radyasyon tipi, atom ya da molek¼llerde iyonlaşma oluşturacak kadar enerjiye sahip olmadığında “iyonlaştırıcı olmayan radyasyon” adını alır. Radyasyonun yaklaşık %70'lik kısmını kapsar. İletiminde kullanılan radyo dalgaları, mikro dalgalar ve g¼r¼n¼r ışık iyonlaştırıcı olmayan ve dalga hareketi ile yayılan radyasyon t¼rlerine ¼rnektir.

Radyasyon n¼tr durumdaki atom veya molek¼llerden bir veya birden fazla elektron ayıracak kadar g¼ce sahip olduğunda iyonlaşmalar oluşur. Bunu ger¼ekleřtirebilen radyasyon tipi “iyonlaştırıcı/iyonize radyasyon” olarak adlandırılır (Gudkov vd., 2019). İyonlaştırıcı radyasyon genel olarak par¼acık ve dalga (elektromanyetik) tipi olmak ¼zere iki gruba ayrılır. Par¼acık tipi radyasyona alfa ( $\alpha$ ) ve beta ( $\beta$ ) partik¼lleri, proton, n¼tron, elektron ( $e^-$ ) ve hızlandırılmış partik¼ller ¼rnek olarak g¼sterilebilir. Uzayda dalga hareketi ile yayılan X ve gama ( $\gamma$ ) ışınları ise başlıca elektromanyetik iyonlaştırıcı radyasyon ¼eřitleridir (Kovacs ve Keresztes, 2002; Gudkov vd., 2019). Alfa partik¼lleri ve protonlar pozitif;  $\beta$ -partik¼lleri ve elektronlar ise negatif y¼kl¼ olup lineer hızlandırıcı veya betatron gibi cihazlar yardımıyla hızlandırılabilirler. Protonun k¼tlesine yakın bir k¼tleye sahip olan

nötronlar ise yüksüz olup herhangi bir cihaz ile hızlandırılmayan parçacık tipi radyasyonlardır. Elektromanyetik radyasyon tipleri olan X- ve  $\gamma$ - ışınlarının, parçacık radyasyon tipinin aksine, yük ya da kütlesi olmadığından foton denilen enerji paketleri halinde yayılırlar. Elektromanyetik radyasyon türleri dalga boylarına göre mor ötesi, görünür ve kızıl ötesi ışın olmak üzere üçe ayrılır. Hepsi sabit ışık hızında olup enerjileri dalga boyu ( $\lambda$ ) ve frekansa ( $\nu$ ) bağlı olarak değişir. Işınlardan dalga boyu azaldıkça frekans ve enerjileri artar (Şekil 1.2). X-ışınları, 5 MeV enerji seviyesinde veya daha aşağısında çalışan makine kaynaklarından elektronların yüksek bir enerji ile hızlandırıp hedefte aniden durdurulması tekniğiyle üretilir. Gama ışınları ise radyo izotopların kırılma ya da bozulması sırasında serbest bıraktıkları fazlalık enerji olarak açığa çıkar. Biyolojik sistemler ile yapılan deneylerde genellikle X- ve  $\gamma$  ışınları kullanılmakla birlikte gıda ışınlamalarında özellikle  $\gamma$  ışını tercih edilmektedir (Beir, 1980; Kovacs ve Keresztes, 2002).



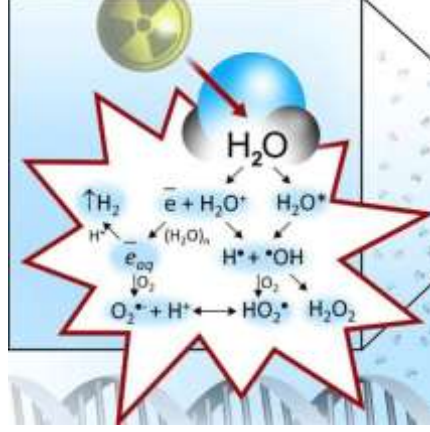
Şekil 1.2. Elektromanyetik dalga spektrumu (URL-1, 2021).

Gama ışını, elektromanyetik radyasyonun en yüksek enerji seviyesine sahip olan IR türüdür. Enerjisi 10 ila birkaç yüz keV arasında değişebilir (Kovacs ve Keresztes, 2002). Elektromanyetik spektrumun bir parçası olan X ışınının aksine,  $\gamma$ - ışınları daha fazla enerji tuttıkları için maddeye nüfuz etme konusunda daha büyük bir kapasiteye sahiptir. X ışınlarının yanı sıra  $\alpha$ - ve  $\beta$  partiküllerine göre de madde üzerinde giricilik güçleri daha yüksektir (Marjeed vd., 2018). Gama ışınları doğal olarak galaksilerden, kozmik ışınlar olarak güneş radyasyonundan ve dünyada doğal olarak bulunan radyum-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ),

potasyum-40 ( $^{40}\text{K}$ ), uranyum-238 ( $^{238}\text{U}$ ), kurşun-206 ( $^{206}\text{Pb}$ ) ve karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ) gibi izotopları içeren radyoaktif maddelerin çekirdeklerinin parçalanmasından kaynaklanmaktadır. Belirli atomların radyoaktif izotopları, zamanla bozunma sürecine girerek  $\gamma$ -ışınlarının üretilmesine neden olur (Underhill, 1995). Yapay  $\gamma$ -ışını kaynakları olarak genellikle kobalt-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) veya sezyum-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) gibi radyo izotoplar kullanılmaktadır. Radyolojik tıbbi kaynaklar, endüstriyel kurulumlar ve nükleer silahlar  $\gamma$ -ışınlarının yayılmasına katkıda bulunan önemli yapay kaynaklardan bazılarıdır. Gama ışınlarının canlı organizmanın sağlığı için son derece tehlikeli olarak kabul edilmesine rağmen tarım, tıp ve elektrik üretimi gibi bazı alanlarda faydalı uygulamalara da sahiptir. Gama ışınları, tarımsal ürünlerin depolama ömrünü artırmak için sterilizasyon işleminde kullanılmaktadır. Ayrıca  $\gamma$ -ışını uygulaması ile bitkilerin mutasyon ıslahı, istenilen özellikteki bitkilerin elde edilmesinde kullanılan potansiyel yararlı uygulamalardan biridir (Marjeed vd., 2018).

### 1.3.1. İyonize Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Biyolojik Etkileri

Radyasyon canlı bir sistem üzerinde doğrudan ya da dolaylı olmak üzere iki şekilde etki göstermektedir. Doğrudan etki (*i*), radyasyon enerjisinin hücre içindeki DNA ya da enzim gibi özel biyolojik moleküller tarafından direkt olarak soğurulması sonucu oluşan etkidir. Bu etki, soğurucu atomik yapı üzerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişmelere neden olur. Atomik yapıyı ve DNA'yı bozar, hatta çift sarmal üzerinde kırılmalara dahi neden olabilir (Marjeed vd., 2018; Esnault vd., 2010; Gudkov vd., 2019). Dolaylı etkide (*ii*), radyasyon enerjisi biyolojik molekül tarafından direkt olarak soğurulmaz. Bunun yerine radyasyon, biyolojik moleküllerin bulunduğu ortamda geçtiği materyaller boyunca absorbe edilir ve hızlı hareket eden yüklü parçacıkların/serbest radikallerin oluşmasını sağlar. Bu yüklü parçacıklar hızla yayılarak önemli hedeflere ulaşırlar ve biyolojik hasara neden olurlar. Dolaylı etkinin oluşmasına büyük oranda hücrenin yaklaşık %80'ini oluşturan su molekülleri aracılık eder (Esnault vd., 2010; Sengupta vd., 2013).



Şekil 1.3. Suyun radyolizinin şematik gösterimi (Gudkov vd., 2019).

İyonizasyon sürecinde suyun ve diğer kimyasal bileşiklerin IR ile parçalanması “radyoliz” olarak adlandırılır (Gudkov vd., 2019). Suyun radyolizi sırasında birincil uyarılma ve iyonizasyon tepkimeleri nedeniyle iyonize su molekülü ( $H_2O^+$ ) ile hidrojen ( $H^\bullet$ ) ve hidroksil ( $HO^\bullet$ ) radikalleri meydana gelir. Oluşan iyonlaşmalar biyolojik dokular boyunca devam eder ve hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ), hidro peroksit ( $HO_2^\bullet$ ), süperoksit anyonu ( $O_2^{\bullet -}$ ), ve singlet oksijen ( $^1O_2$ ) gibi ikincil serbest radikaller üreten zincir reaksiyonuna yol açar (Şekil 1.3). Reaktif oksijen türleri ise güçlü oksidan özelliğe sahip oldukça reaktif serbest radikallerdir. Strese maruz kalan bitkilerde ROT’ların aşırı artması, hücrelerde oksidatif stresin gelişmesine yol açar. Strese, protein ve nükleik asitlerin oksidatif modifikasyonu ve lipid peroksidasyonu gibi hücrelerin yaşam aktivitesi için tehlikeli olan bir takım yıkıcı süreçler eşlik eder (Gudkov vd., 2019). Ayrıca IR’in DNA moleküllerine doğrudan ya da dolaylı olarak etkisi canlı sistemlerde ölümle sonuçlanacak kadar ciddi hasarlara yol açar (Marjeed vd., 2018; Gudkov vd., 2019). İyonize radyasyondan kaynaklanan DNA hasarının önemli bir kısmına (~%70 – 80) suyun radyolizi sırasında oluşan ROT’lar neden olurken, hasarın sadece %20 – 30’luk kısmı yüksek enerjili IR’in hedef molekül tarafından doğrudan soğurulmasından kaynaklanır (Gudkov vd., 2019). Radyasyon enerjisinin doğrudan ya da dolaylı olarak emilimi, DNA’nın tek veya çift sarmalında kopmalara neden olur. DNA yapısında meydana gelen hasar, hasarın yoğunluğuna ve tipine bağlı olarak, nükleotid eksizyon onarım mekanizması ile onarılabilir (Marjeed vd., 2018; Ali vd., 2015). Ancak bazen onarım sırasında ortaya çıkan hatalar kromozomal anormalliklere yol açmaktadır. Bu durum popülasyonda çeşitli mutasyonların ortaya çıkmasına ve sonraki nesillere aktarılmasına neden

olabilmektedir (Gudkov vd., 2019). Radyasyona maruz kalan bitki tohumlarının DNA'sında oluşan kromozomal anormallikler, sonraki nesillerinde çimlenme, morfoloji ve büyüme gibi çeşitli parametreler üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Diğer taraftan bu parametrelerin, DNA'nın onarımına ve genlerin yeniden aşağı/yukarı düzenlenmesine bağlı olarak olumlu yönde etkilenmesi de mümkündür. Radyasyon yoğunluğu ve maruz kalma süresi bitkinin anormal veya istenilen özelliklere sahip nesillerinin oluşmasında önemli belirleyicilerdir (Marjeed vd., 2018).

### **1.3.2. İyonize Radyasyonun Bitki Büyüme ve Gelişmesi Üzerine Olan Etkileri**

İyonize radyasyonun bitki büyümesi, gelişmesi ve morfolojisi üzerindeki etkileri çok eski tarihlerden beri ilgi alanı olmuştur. Genel olarak IR'nin bitkilerde oluşturduğu etki bitkinin türüne ve çeşidine, gelişim aşamasına ve bitkinin fizyolojik durumuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Bununla birlikte uygulanan IR türü, radyasyon dozunun miktarı ve maruz kalma süresi de önemli faktörlerdir (Marjeed vd., 2018; Gudkov vd., 2019). Birçok çalışmada, düşük radyasyon dozlarının genellikle bitkilerin çimlenme ve büyüme parametreleri üzerinde olumlu etki gösterdiği; yüksek dozların ise çimlenmenin gecikmesinden çeşitli büyüme anormalliklerine ve hatta bitkinin ölümüne kadar birçok olumsuz etkiye neden olduğu bildirilmiştir (Kim vd., 2004; Arena vd., 2014; Beyaz vd., 2016). Tablo 1.1'de farklı dozlardaki IR uygulamalarının bazı bitki türlerinin büyüme özellikleri üzerine olan etkisi verilmiştir.

Genel olarak, bitkilere düşük dozlarda  $\gamma$ - ışını uygulaması hücre bölünmesini, büyümesini ve gelişmesini uyarmaktadır (Wi vd., 2007). Düşük dozlarda  $\gamma$ - ışınına maruz kalan bitkilerin çimlenme ve büyüme özelliklerinde meydana gelen iyileşmeler; bu özellikleri kontrol eden genler üzerindeki olumlu mutasyon etkilerine ve hızlı DNA onarım mekanizmasına bağlanmaktadır. Ayrıca çimlenme ve büyüme süreçlerinde aktif olarak yer alan hormon ve enzimler IR'e maruz kalan bitkilerin büyümesinde olumlu etki gösterebilmektedir (Marjeed vd., 2018). Düşük dozlardaki ışınlamaların bitki hücrelerindeki hormonal sinyal ağını değiştirerek ve hücrelerin antioksidan kapasitesini arttırarak bitki büyümesini teşvik edebileceği kaydedilmiştir (Wi vd., 2007). Tahıllarda 20 Gy'lik bir dozun ana sürgün uzamasını baskımlarken yanal büyüme merkezlerini aktive etmesi, oksin ve etilen dengesindeki değişikliklerden kaynaklanan apikal sürgün hakimiyetinin iptal edilmesi olarak açıklanmıştır (Gordon ve Weber, 1955).

Yüksek dozlardaki  $\gamma$ -ışınlanmasına yanıt olarak tohumlarda düşük çimlenme ve bitkilerde büyümenin azalması, genel olarak hücrelerdeki suyun iyonlaşması ve sonrasında birçok serbest radikalin ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{HO}^\bullet$  gibi) oluşması ile açıklanmaktadır (Marjeed vd., 2018). Gama ışınına yanıt olarak bitki hücrelerinde serbest radikal oluşmasının, antioksidan yanıtlarını arttırabileceği ve hücre zarının geçirgenliğinin değişmesine neden olan protein, lipid, enzim ve hücresel molekülleri etkileyebileceği rapor edilmiştir (Marcu vd., 2013). Bu radikallerin ışınlanma seviyesine bağlı olarak da bitkilerin hücresel yapı ve metabolizmasında tilakoid zarların genişlemesi, fotosentezde değişiklik, antioksidatif sistemin modülasyonu ve fenolik bileşiklerin birikmesi gibi önemli değişikliklere neden olabileceği rapor edilmiştir (Kovacs ve Keresztes, 2002; Kim vd., 2004; Wi vd., 2007).

Tablo 1.1. Farklı radyasyon dozlarının bitkilerin büyüme parametreleri üzerine olan etkisi

Bitki Türü	Uygulama dozu	Büyüme özellikleri	Literatür
<i>Triticum aestivum</i> L. (tohum)	100 - 400 Gy (gama ışını)	100 Gy → kök uzunluğu ↑ sürgün uzunluğu ↑ >100 Gy → kök uzunluğu ↓ sürgün uzunluğu ↓	Borzouei vd., 2010
<i>Lathyrus chrysanthus</i> Boiss. (tohum)	50 – 250 Gy (gama ışını)	50 – 150 Gy → tohum çimlenmesi ↑ 150 – 250 Gy → tohum çimlenmesi ↓	Beyaz vd., 2016
<i>Phaseolus vulgaris</i> L. (tohum)	0,3 – 100 Gy (X-ışını)	0,3 – 10 Gy → yaprak alanı ↑ 10 – 100 Gy → yaprak alanı ↓	Arena vd., 2014
<i>Triticum</i> sp. (tohum)	5 – 100 Gy (gama ışını)	5 – 100 Gy → kök ağırlığı ↑ sürgün ağırlığı ↑	Singh vd., 2013
<i>Hordeum vulgare</i> L. (vejetatif kısım)	10 Gy (X ışını)	10 Gy → kök uzunluğu ↓	Colak vd., 2015
<i>Arabidopsis thaliana</i> L. (vejetatif kısım)	3,9 – 58,8 Gy (gama ışını)	3,9 – 58,8 Gy → kök ağırlığı ↑ Sürgün ağırlığı ↑	Vanhoudt vd., 2010
<i>Hordeum vulgare</i> (tohum)	2 – 50 Gy (gama ışını)	10 – 20 Gy → kök uzunluğu ↑ sürgün uzunluğu ↑ tohum çimlenmesi ↑ 25 – 50 Gy → kök uzunluğu — sürgün uzunluğu ↓ tohum çimlenmesi ↓	Geras'kin vd., 2017

İyonize radyasyona maruz kalan bitki kısımlarının doza karşı verdiği yanıtlar farklılık gösterebilir. Genel olarak tohumlar bitkinin vejetatif kısımlarına göre daha yüksek

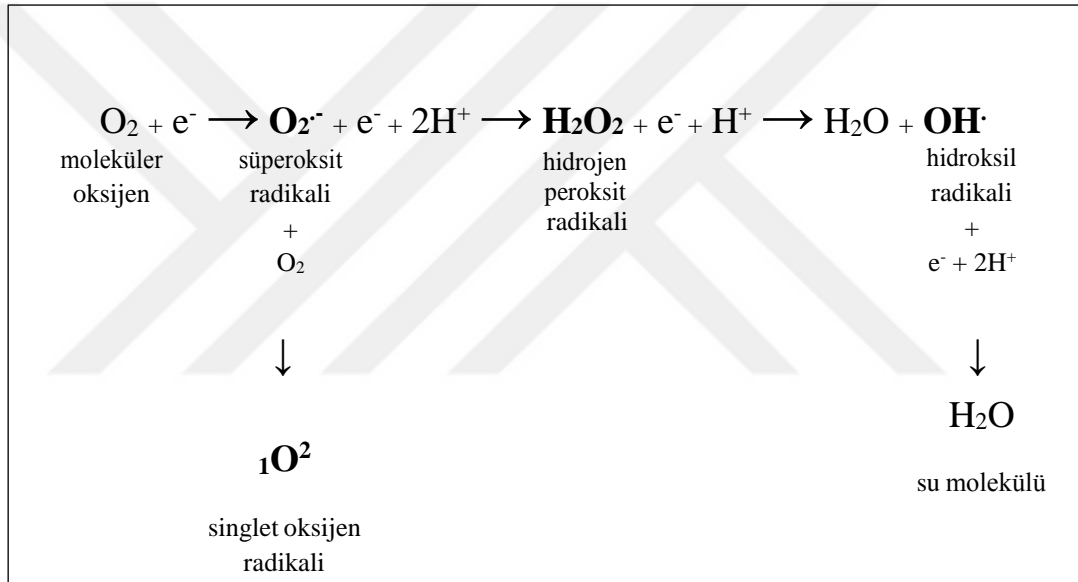
radyasyon dozlarını tolere edebilmektedir. Örneğin; bitkinin tohum kısmına uygulanan 5 – 20 Gy (Gray, bir kilogram maddeye 1 joule enerji veren radyasyon miktarı) düşük, 20 – 100 Gy orta ve 100 Gy üzeri radyasyon yüksek doz olarak kabul edilirken vejetatif bitkilerin ışınlanmasında bu değerler sırasıyla 1 – 5 Gy, 5 – 50 Gy ve >50 Gy'dir. Genel olarak, bitkinin fizyolojik sürecinde inhibisyonun başlamasından sonraki dozlar yüksek doz olarak kabul edilmektedir (Gudkov vd., 2019).

#### 1.4. Serbest radikaller ve Reaktif Oksijen Türleri

Serbest radikaller, son yörüngelerinde bir veya daha fazla eşlenmemiş elektrona sahip olan ve bu sebeple kararsız yapıda bulunan kimyasal bileşiklerdir (Marcu vd., 2013). Kararsız yapıda olduklarından hızla başka molekül veya bileşiklerle reaksiyona girme eğilimi gösterirler. En basit serbest radikal, yalnızca bir elektrona sahip olan atomik hidrojenidir. Radikaller, normal yapıdaki bir atom veya molekülden tek bir elektron çıkarılması veya eklenmesi ile veya atomlar arasındaki kovalent bağların kopması sonucu oluşurlar. Atomlar arasındaki kovalent bağların kopması için X ve  $\gamma$ - ışınları gibi yüksek enerjilere ihtiyaç vardır. X ve  $\gamma$ - ışınları, su molekülündeki oksijen ve hidrojen arasındaki kovalent bağları koparabilecek kadar yüksek enerjilidir. Su moleküllerinin iyonizasyonu sonucu oluşan radikaller, IR tarafından canlı organizmalara verilen hasarın büyük bir kısmını oluşturur (Halliwell, 2006). Canlı sistemlerde meydana gelen radikaller, düşünülenin aksine, canlı içerisinde her zaman zararlı değildir. Örneğin tüm aerobik canlılar için çok önemli bir element olan oksijen, termodinamik olarak güçlü bir oksitleyici ajandır. Ancak biyokimyasal tepkimelerde kullanılabilmesi için reaktif formlarına çevrilmesi gerekir (Halliwell, 2006). Temel durumda  $O_2$ , paralel spinlerde iki eşleşmemiş elektrona sahiptir (Sharma vd., 2012). Oksijen molekülünden yalnızca bir elektron indirgenğinde  $O_2^{\cdot-}$ , iki elektron indirgenğinde  $H_2O_2$ , üç elektron indirgenğinde ise  $HO^{\cdot}$  oluşmaktadır. Ayrıca süperoksit radikali, elektromanyetik radyasyona maruz kaldığında  $O_2$  ile birleşip  $^1O^2$  radikalini oluşturmaktadır (Şekil 1.4) (Buechter, 1988).

Oksijen kaynaklı serbest radikaller ya da diğer bir ifade ile ROT'lar, bitkilerde moleküler oksijenin uyarılması veya indirgenmesiyle sentezlenen ve normal hücrel metabolizmanın istenmeyen zararlı yan ürünleri olarak meydana gelen bir grup serbest radikal türleridir (Halliwell, 2006). Bilinen en aktif ROT'lar;  $O_2^{\cdot-}$ ,  $HOO^{\cdot}$ ,  $HO^{\cdot}$ ,  $H_2O_2$  ve  $^1O_2$ 'dir (Sharma vd., 2012). Bitkilerde ROT'lar,  $O_2^{\cdot-}$  ve  $HO^{\cdot}$  gibi iyonik formda ya da

$\text{H}_2\text{O}_2$  ve  $^1\text{O}_2$  gibi moleküler formda bulunabilmektedir. Reaktif oksijen türleri bitkilerde ayrı genler tarafından düzenlendiğinden biyokimyasal ve fizyolojik reaksiyonlar üzerinde farklı oksidatif kapasiteye sahiptirler (Khan vd., 2020). Hidroksil radikali kısa ömürlü ve oldukça reaktif bir oksidan olup lipid peroksidasyonuna, protein hasarına ve hatta hücrelölüme neden olur. Aksine  $\text{H}_2\text{O}_2$  hücrede direkt ölümüne neden olmayan uzun ömürlü ve daha az aktif bir oksidandır. Düşük derişimlerde, fotosentez, senesens ve fotorespirasyon gibi başlıca fizyolojik süreçlerde sinyal molekülü olarak hareket ederken; yüksek derişimlerde birçok enzimin aktivitesini yok eder. Hidrojen peroksit,  $\text{O}_2^{\cdot-}$  gibi, orta derece reaktif olup farklı reaktif türlere dönüştüğünde daha çok zararlı olur (Das ve Roychoudhury, 2014).



Şekil 1.4. Moleküler oksijenin indirgenmesi sırasında oluşan başlıca reaktif oksijen türleri (Buechter, 1988).

Reaktif oksijen türleri bitkilerin normal gelişimi boyunca; kloroplastlarda fotosentez reaksiyonlarında, mitokondrilerde sitrik asit döngüsünde ve peroksizomlarda çeşitli enzimlerin etkisiyle üretilirler (Büyük vd., 2012). Normal büyüme koşulları altında düşük düzeylerde üretilen ROT'lar, bitkinin antioksidan savunma mekanizması ile aralarındaki hassas redoks dengesi sayesinde zararlı etki oluşturmaz (Van Breusegem vd., 2006). Bununla birlikte bitki hücrelerinde çeşitli tepkimelere aracılık eden sinyal molekülleri olarak da işlev görürler (Sharma vd., 2012). Ancak bitki herhangi bir stres faktörüne maruz kaldığında hücredeki hassas redoks dengesi bozulur ve bu da yüksek seviyede ROT



üretimine neden olur (Van Breusegem vd., 2006). Bitki hücrelerindeki aşırı ROT birikimi antioksidan koruma sistemleri tarafından idare edilebilecek seviyenin üzerine çıktığında bitkilerde “oksidatif stres” gelişir. Oksidatif strese hücrelerin yaşam aktivitesi için tehlikeli olan lipid peroksidasyonu ve nükleik asit ve proteinlerin modifikasyonu gibi süreçler eşlik eder (Gudkov vd., 2019). DNA ve protein gibi biyomoleküller önemli düzeyde hasar görür ve lipidlerin yapısı bozarak hücreler parçalanır (Halliwell, 2006).

## **1.5. Bitkilerde Antioksidan Savunma Sistemi**

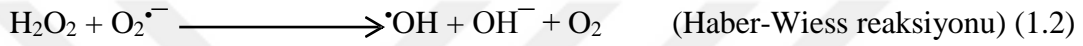
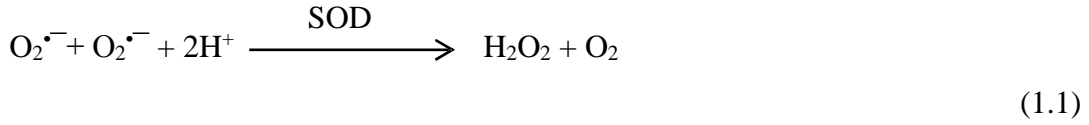
Gama radyasyonu bitki hücrelerinde ROT üretimini önemli seviyede arttırarak oksidatif strese yol açar (Al-Rumaih ve Al-Rumaih, 2008). Bitkilerde ROT’ların hücrel hasara yol açmadan bir sinyal molekülü olarak hareket etmesi, ROS üretimi ve süpürme mekanizması arasındaki hassas dengeye bağlıdır. Bitkilerde oksidatif hasarı önlemek ya da hasarlı hücrel yapıların onarımını hızlandırmak için ROS seviyesini kontrol altında tutan bir takım mekanizmalar mevcuttur. Bu mekanizmalardan biri, enzimatik olan ve enzimatik olmayan antioksidan savunma sistemidir (Khan vd., 2020). Enzimatik antioksidanlar arasında askorbat-glutasyon (AsA-GSH) döngüsündeki enzimler [askorbat peroksidaz (APX), monodehidroaskorbat redüktaz (MDHAR), dehidroaskorbat redüktaz (DHAR) ve glutasyon redüktaz (GR)] ile süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT), guaiakol peroksidaz (POX) gibi enzimler bulunur. Fenolik bileşikler, indirgenmiş glutasyon (GSH), karotenoidler, E ve C vitamini ise enzimatik olmayan antioksidanlar arasında yer alır (Gudkov vd., 2019; Khan vd., 2020). Antioksidanlar ROT’ları genel olarak; (I) zayıf bir moleküle çevirme, (II) bir hidrojen ekleme, (III) bağlama veya (IV) oluşan hasarı ortadan kaldırma gibi mekanizmalarla etkisiz hale getirirler.

### **1.5.1. Enzimatik Antioksidanlar**

#### **1.5.1.1. Süperoksit Dismutaz (SOD; EC 1.15.1.1) Enzimi**

Süperoksit dismutaz, oksidatif strese duyarlı tüm organizmalarda mevcut olup  $O_2^{\cdot-}$ ’in  $H_2O_2$  ve  $O_2$ ’e dönüştürülmesini katalizler. Bu nedenle, SOD aktivitesi hidroksil radikallerini üreten Haber-Weiss reaksiyonunun iki bileşeninin nispi oranlarını da belirler.

Bunun yanı sıra oksidatif strese karşı ilk savunma hattını oluşturur ve hücreyi savunmada merkezi bir rol oynar. Metaloenzimler sınıfına dahil olan SOD'un Mn-SOD, Fe-SOD ve Cu/Zn-SOD olmak üzere üç izoenzimi mevcuttur. Bunlardan Mn-SOD mitokondride, Fe-SOD kloroplastta ve Cu/Zn-SOD ise kloroplast, peroksizom ve sitozolde yoğun olarak bulunur (Das ve Roychoudhury, 2014). SOD izoenzimlerinden Cu/Zn-SOD siyanür ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'ye karşı duyarlı iken Fe-SOD yalnızca H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'ye duyarlıdır. Mn-SOD ise bunların hiçbirinden etkilenmemektedir (Cakmak, 2000).



#### 1.5.1.2. Guaiakol Peroksidaz (POX; EC 1.11.1.7) Enzimi

Peroksidazlar, normal metabolizma ya da stres sırasında belirli bir substratı oksitlemek için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'i kullanan bir enzim grubudur. Guaiakol peroksidazlar, indirgeyici substrat olarak guaiakol ve pyragallol gibi aromatik bileşikleri kullanır. Hücre içinde vakuol ve sitozolde, hücre çeperinde ve hücre dışında aktif olduklarından H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'in uzaklaştırılmasında anahtar enzim olarak kabul edilirler (Das ve Roychoudhury, 2014). Peroksidazlar bitkilerde, ayrıca, hücre çeperinin lignifikasyonu, oksin (IAA) bozunması, etilen biyosentezi, yara iyileşmesi ve bitkileri oksidatif strese karşı savunma gibi birçok fizyolojik ve biyokimyasal süreçte rol alır (Diaz vd., 2001; El-Beltagi ve Mohamed, 2013).



#### 1.5.1.3. Katalaz (CAT; EC 1.11.1.6) Enzimi

Katalaz, tüm oksijenli solunum yapan canlılarda iki molekül H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'in H<sub>2</sub>O ve O<sub>2</sub>'e dönüşmesini katalizleyen tetramerik bir enzimdir. Yağ asitlerinin β-oksidasyonunda, fotorespirasyonda ve pürin katabolizmasında rol alan oksidazların ürettiği H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'in uzaklaştırılmasında görev alır. Katalaz enziminin, ikisi peroksizom ve sitozolde (CAT1 ve CAT2) ve biri de mitokondride (CAT3) lokalize olan üç ana izoformu bulunur. Birçok

antioksidan enzimlerin aksine indirgeyici bir eşdeğer gerektirmez. Bu sayede hücreler enerji açısından strese girdiklerinde oluşan  $H_2O_2$ 'i etkin bir şekilde su ve oksijene dönüştürmektedir (El-Beltagi ve Mohamed, 2013).



#### 1.5.1.4. Askorbat Peroksidaz (APX; EC 1.11.1.11) Enzimi

Askorbat peroksidaz, iki molekül askorbik asidi (AsA) substrat olarak kullanır ve  $H_2O_2$ 'i  $H_2O$ 'ya ve iki molekül monodehidroaskorbat (MDHA)'a indirger. Askorbat peroksidaz, kloroplastlarda  $H_2O_2$ 'i indirgeyen temel sistem olan AsA-GSH döngüsünün anahtar enzimlerinden biridir. Yüksek bitkilerin sitozol, mitokondri, peroksizom ve kloroplast gibi farklı hücre alt bölümlerinde beş izoenzimi bulunur ve hücre içi ROS seviyesini önemli ölçüde kontrol eder (El-Beltagi ve Mohamed, 2013). Katalaz (CAT) enzimi çoğunlukla peroksizomlarda  $H_2O_2$ 'i temizlerken, APX hücre içerisine daha geniş alanlara yayılarak aynı işlevi görür. Bu sebeple CAT enzimine göre daha verimli bir  $H_2O_2$  temizleyicisidir (Das ve Roychoudhury, 2014).



#### 1.5.1.5. Glutatyon Redüktaz (GR; EC 1.6.4.2) Enzimi

Askorbat-glutatyon döngüsünün bir diğer önemli enzimi olan GR, yükseltgenmiş glutatyonun (GSSG) indirgenmiş glutatyona (GSH) dönüşmesini katalizler. Glutatyon redüktaz, elektron vericisi olarak NADPH'ı kullanır ve NADPH/NADP<sup>+</sup> oranının ayarlanmasına yardımcı olur. Ayrıca GSH/GSSG oranını düzenleyerek hücrenin redoks dengesini korumada önemli bir rol oynar. Çoğunlukla mitokondri, kloroplast ve sitozolde aktivite gösterir (Das ve Roychoudhury, 2014).

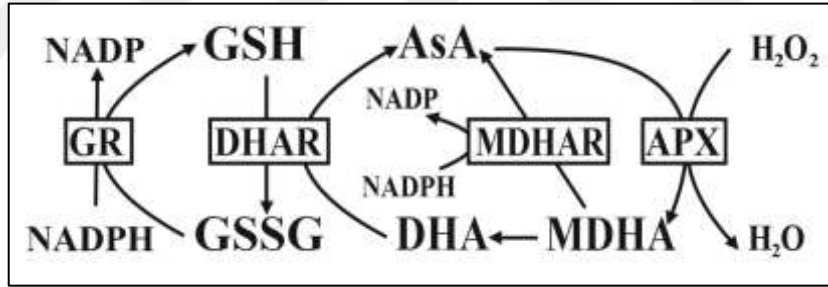


### 1.5.1.6. Monodehidroaskorbat Redüktaz (MDHAR; EC 1.6.5.4) Enzimi

Monodehidroaskorbat redüktaz, oksidoredüktazlar sınıfına dahil olup, AsA-GSH döngüsünde işlev gören enzimlerden biridir. Elektron vericisi olarak NADPH'ı kullanır ve kısa ömürlü MDHA'dan AsA'nın yeniden oluşmasını katalizler. Böylece AsA havuzunun yenilenmesine yardımcı olur. MDHAR, askorbatı yeniden ürettiği için mitokondri ve peroksizomlarda APX ile birlikte bulunur (Khan vd., 2020).

### 1.5.1.7. Dehidroaskorbat Redüktaz (DHAR; EC 1.8.5.1) Enzimi

Bitkilerdeki AsA-GSH döngüsüne ait bir enzim olan DHAR, indirgeyici substrat olarak GSH'ı kullanır ve dehidroaskorbat (DHA)'ın AsA'a indirgenmesini katalizler. Bu da AsA havuzunun yenilenmesinde DHAR aktivitesinin de rol aldığını gösterir (Das ve Roychoudhury, 2014).



Şekil 1.5. Bitkilerde askorbat-glutasyon döngüsü (Zechman, 2014).

## 1.5.2. Enzimatik Olmayan Antioksidanlar

### 1.5.2.1. Glutatyon (GSH)

Glutatyon ( $\gamma$ -L-glutamil -L-sisteinil-glisin, GSH), tripeptid yapılı, düşük moleküler ağırlıklı ve sülfür içeren bir bileşiktir. Sitozol, mitokondri, kloroplast, peroksizom ve apoplast gibi hemen hemen tüm hücresel alt bölümlerde bulunur (Das ve Roychoudhury, 2014). Abiyotik ve biyotik stres koşullarına karşı bitki savunmasında anahtar role sahip bir antioksidandır. Reaktif oksijen türlerinin doğrudan temizlenmesi veya AsA-GSH döngüsü

yoluyla etkisizleştirmesinde rol oynar. Ayrıca, gen ifadesinin ve enzim aktivitelerinin düzenlenmesinde, fitoşelatinlerin sentezinde, ksenobiyotiklerin etkisizleştirilmesinde ve proteinlerin oksidasyondan korunmasında da görev alır (Khan vd., 2020). Glutasyon yüksek bir indirgeyici güce sahiptir. Askorbattan GSSG üretmede hayati bir öneme sahiptir. Üretilen GSSG, GR enzim aktivitesi ile tekrar GSH'a geri dönüştürülür. Böylece hücrel GSH havuzu yenilenir ve hücrenin redoks durumunu korumak üzere GSH/GSSG arasındaki hassas denge sağlanmış olur. Ağır stres koşullarında bu GSH/GSSG oranı genellikle bozulur (Das ve Roychoudhury, 2014).

### **1.5.2.2. Fenolik Bileşikler**

Fenolik bileşikler, bitkilerde esas olarak pentoz fosfat, şikimat ve fenilpropanoid yollarından türetilen sekonder metabolitlerdir (Bravo, 1998). Stres altındaki bitkilerde fenilalanin aminyoil transferaz (PAL) ve kalkon sentaz (CHS) genlerinin yukarı düzenlenmesi ile fenolik biyosentezi artar. Böylece abiyotik stres faktörlerine karşı bitkilerin toleransı da artmış olur (Şamec vd., 2021). Fenolik bileşikler, aromatik bir hidrokarbon (C<sub>6</sub>) grubuna bağlı bir ya da daha fazla hidroksil (-OH) grubu ile karakterize edilir. Sahip oldukları fenol gruplarının sayısına göre basit fenolik moleküllerden yüksek derecede polimerize bileşiklere kadar değişiklik gösterirler. Başlıca fenolik bileşikler basit fenolikler, flavonoidler, fenolik asitler, kumarinler, stilbenler, hidrolizlenebilir ve kondense taninler, lignanlar ve ligninlerdir. Bitki dokularında bol miktarda bulunan fenolik bileşikler, çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçte yer alır. Antimikrobiyal, antialerjik, antiinflamatuvar ve antioksidan özelliklere sahiptirler (Balasundram vd., 2006). Polifenoller, serbest radikal temizleme aktivitesi için ideal bir kimyasal yapıya sahiptir. Polifenollerin antioksidan özellikleri, onların hidrojen ve elektron vericileri olarak yüksek aktivite göstermelerinden, metal iyonlarını şelatlama özelliklerinden ve eşleşmemiş elektronları stabilize etme yeteneklerinden kaynaklanır (El-Beltagi ve Mohamed, 2013).

### **1.5.2.3. Flavonoidler**

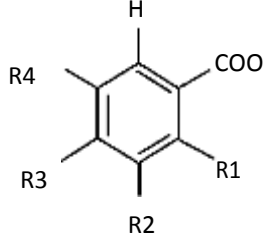
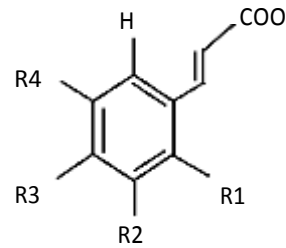
Flavonoidler, fenolik bileşiklerin en geniş alt grubunu oluşturur. Sitolde sentezlenen flavonoidlerin başlangıç bileşeni fenilalanindir. Bitkilerde yaygın olarak

yaprak, çiçek ve polen tanelerinde bulunurlar (Balasundram vd., 2006). Flavonoidler kimyasal yapılarına göre flavonoller, flavonlar, flavan-3-oller, flavanonoller, flavanonlar, izoflavonlar ve andantosiyeninler olmak üzere altı ana gruba ayrılırlar (Şamec vd., 2021). Tüm flavonoidlerin yapısı temel olarak, merkezde heterosiklik bir halka ve bu halkaya bağlı iki aromatik halkadan (C6-C3-C6) oluşur (Balasundram vd., 2006). Bu polifenolik yapıları sayesinde flavonoidler, serbest radikalleri temizleyerek ve geçiş metalleri şelatlayarak güçlü bir antioksidan özellik sergilerler. Böylece bitkilerin biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı korunmasına yardımcı olurlar. Flavonoidler ayrıca lipid peroksidasyonu üzerinde de etkilidir. Bitki hücrelerinde lipid paketleme düzenini ve böylece membran akışkanlığını değiştirirler. Bu sayede lipid peroksidasyonu kısıtlanarak serbest radikallerin yayılması engellenir (Arora vd., 2000).

#### 1.5.2.4. Fenolik Asitler

Fenolkarboksilik asit olarak da adlandırılan fenolik asitler bitkilerde yaygın olarak bulunan polifenollerdir. Bitkilerde serbest halde olabilirler. Ayrıca ester, ester bağlı ya da glikozit formları halinde de bulunabilirler. Fenolik asitler, bir bitki hücresinin yapısal bileşenlerine (selüloz ve protein gibi) bağlanabilecekleri gibi daha küçük organik bileşiklere (glukoz ve tartarik asit gibi) veya daha büyük polifenollere (flavonoidler gibi) de bağlanabilirler (Şamec vd., 2021). Kimyasal yapıları bir fenolik halka (C6) ve en az bir karboksilik asitten oluşur. Genel olarak aynı temel iskelet yapısına sahip olan fenolik asitler, fenolik halkalarına bağlı -OH grubunun sayısına ve konumuna göre çeşitlenirler (Goleniowski vd., 2013). Fenolik asitlerin içerdiği -OH grubunun miktarı, onların antioksidan kapasitelerini de değiştirmektedir (Rice-Evans vd., 1996). Fenolik asitlerin iki ana alt grubu hidroksibenzoik asitler (HBA) ve hidroksisinnamik asitler (HSA)'dir. Hidroksibenzoik asitler bir karbonlu yan zincire (C6-C1) sahip iken HSA'lar üç karbonlu yan zincire sahip (C6-C3) aromatik bileşiklerdir (Balasundram vd., 2006). Bitkilerde yaygın olarak bulunan fenolik asit çeşitleri Tablo 1.2'de verilmiştir. Bitkilerde antioksidan sistemin aktivasyonu, fenolik asit sentezini de içeren fenilpropanoid yolunun uyarılmasıyla sonuçlanır. Böylece fenolik asitler farklı abiyotik stres faktörleri altındaki bitkilerde ROT'ları temizleyen güçlü antioksidanlar olarak hareket ederler (Şamec vd., 2021). Ayrıca fenolik asitler bitkilerin sinyal iletiminde de önemli bir rol alırlar (Mandal vd., 2010).

Tablo 1.2. Bitkilerdeki başlıca fenolik asit çeşitleri (Robbins, 2003).

Fenolik Asitler									
Hidroksibenzoik Asit					Hidroksisinnamik Asit				
									
	R1	R2	R3	R4		R1	R2	R3	R4
<i>p</i> -hidroksibenzoik asit	H	H	OH	H	Sinamik asit	H	H	H	H
Vanilik asit	H	OCH <sub>3</sub>	OH	H	Kafeik asit	H	OH	OH	H
Gallik asit	H	OH	OH	OH	Ferulik asit	H	OCH <sub>3</sub>	OH	H
Syringik asit	H	OCH <sub>3</sub>	OH	OCH <sub>3</sub>	Sinapik asit	H	OCH <sub>3</sub>	OH	OCH <sub>3</sub>
Salisilik asit	OH	H	H	H	<i>p</i> -kumarik asit	H	H	OH	H
Benzoik asit	H	H	H	H	<i>o</i> -kumarik asit	OH	H	H	H
Protokateşik asit	H	OH	OH	H	<i>m</i> -kumarik asit	H	OH	H	H

### 1.6. Bitkilerde Çözünabilir Şekerler

Çözünabilir şekerler, temel olarak bitki hücrelerinin yapısal bileşenleri ve enerji sağlayıcılarıdır (Rosa vd., 2009). Bitkilerde esasen üç ana suda çözünabilir karbohidrat türü stres tepkisine dahil olmaktadır. Bunlar disakkaritler (sükroz, trehaloz), oligosakkaritler ailesinden rafinoz ve fruktanlardır (Keunen vd., 2013). Sükroz glukoz ve früktoz monosakkaritlerinden oluşan ve doğada yaygın olarak bulunan bir disakkarittir. Fotosentezin ana ürünü olup büyüme, gelişme, depolama, sinyal ve strese duyarlılık gibi birçok süreçte yer alır. Bu nedenle bitki metabolizmasında anahtar şeker olarak kabul edilir (Salerno ve Curatti, 2003). Bitkilerde çözünabilir şekerler çevresel stres faktörlerinin etkisiyle sıklıkla birbirine dönüşebilmektedir (sükrozun parçalanarak glukoz ve früktoza ayrılması ya da früktoz ve glukozdan sükroz oluşması gibi). Çevresel stres tepkileriyle oldukça ilişkili olan rafinoz, sükroza galaktozil eklenmesiyle oluşur. Rafinoz ve fruktanlar birlikte, ROT sinyal yollarıyla etkileşime girebilen süksinil oligosakkaritleridir (Keunen vd., 2013).

Çözünabilir şekerler bitki metabolizması, büyümesi ve gelişmesinde merkezi bir rol oynarlar (Yuanyuan vd., 2009). Bununla birlikte, bitkilerin çeşitli biyotik ve abiyotik stres koşullarında da önemli işlevlere sahiptirler (Couée vd., 2006). Bitkilerde oksidatif stres sırasında genellikle çözünabilir şeker içeriği artmakta ve bu da ROT seviyesi ile ilişkili

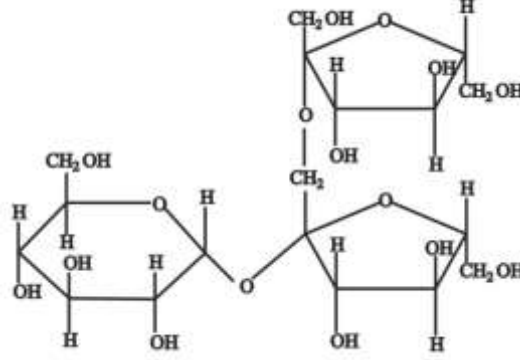
olduklarını göstermektedir (Keunen vd., 2013). Çözünebilir şekerler yüksek seviyede bulduklarında antioksidan olarak hareket ederek kloroplast, mitokondri ve peroksizomlarda üretilen ROT'ların süpürülmesine yardımcı olurken düşük derişimlerde bulduklarında sinyal molekülleri olarak davranırlar (Keunen vd., 2013). Çözünebilir şekerlerin bitkilerde, hormonlar gibi, birincil haberciler olarak hareket ederek bitki büyümesi, fotosentez ve solunum gibi birçok süreçte gen ifadelerini kontrol eden sinyalleri düzenlemede görev aldıkları bildirilmiştir (Rosa vd., 2009). Çözünebilir şekerler fotosentez, mitokondriyal solunum ve yağ asidi  $\beta$ -oksidasyonu ile de yakından ilişkilidir. Bu nedenle bitki hücrelerinin redoks dengesinde merkezi bir önem taşırlar (Couée vd., 2006). Bunların yanı sıra çözünebilir şekerler, bitkilerin önemli ozmotik koruyucularıdır. Çevresel stres koşullarında hücre zarını stabilize ederek ve turgor basıncını korurlar ve hücre içi su dengesini korurlar (Keunen vd., 2013).

### 1.6.1. Frukthanlar

Frukthanlar (Şekil 1.6), vakuolde sentezlenen ve sükrozdan türevlenen fruktoz polimerleridir (Keunen vd., 2013). Kısa zincir uzunluğuna sahip olduklarından fruktooligosakkaritler olarak da bilinirler. Bitkilerdeki başlıca frukthanlar; inülinler, levanlar ve dallanmış frukthanlar (graminin)'dir (Livingston vd., 2009). Tropikal ve subtropikal bölgelerde yetişen bitkilerde başlıca depo karbohidratları sükroz ve nişasta iken ılıman bölge bitkilerde frukthanlar da biriktirilir. Bu nedenle ılıman bölgelerde yetişen buğday (*T. aestivum*) ve arpa (*H. vulgare*) gibi tahıl bitkilerinin kök ve yapraklarında normal koşullarda yaklaşık %15-20 oranında bulunurlar (Begović vd., 2020). Frukthanlar bitkinin normal metabolizma sürecinde ya da stres koşullarında üretilebilirler (del Pozo vd., 2019). Bitkilerde sükroz miktarı kritik düzeylere geldiğinde frukthan sentezi başlar. Bu nedenle bitkilerde stres koşullarında sıklıkla kısa süreli olarak sentezlenirler ve alternatif enerji kaynakları olarak kullanılırlar (Livingston vd., 2009). Frukthanlar suda yüksek çözünürlüğe sahiptir ve düşük sıcaklıklarda dahi işlev görebilirler. Bu sayede sıfırın alındaki sıcaklıklarda zar lipidlerinin arasına girerek sistemden su çıkışını önlerler ve hücre zarına zarar veren kristalleşmeye karşı direnç gösterebilirler (Livingston vd., 2009; Keunen vd., 2013). Stres koşullarında frukthan ve sükrozun vauolden apoplasta taşınarak zarı stabilize ettikleri ve hücresel bütünlüğe katkıda buldukları rapor edilmiştir (Valluru vd., 2008). Bunların yanı sıra diğer çözünebilir şekerler gibi, frukthanlar da ROT'ların süpürülmesinde



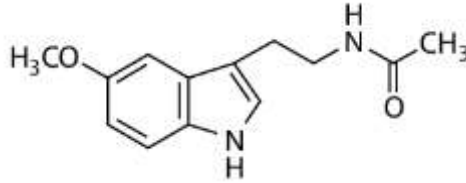
doğrudan yer alabilir ya da diğer özgün antioksidan savunma mekanizmalarını uyararak dolaylı yoldan etki gösterebilirler. Ayrıca fruktanlar bitkilerdeki önemli ozmotik düzenleyiciler arasında yer alır (Keunen vd., 2013).



Şekil 1.6. Fruktanlara (1-kestoz) ait genel bir kimyasal görünüm (Livingston vd., 2009).

### 1.7. Melatonin

Melatonin (*N*-asetil 5-metoksi triptamin) (Şekil 1.7), triptofan amino asidinden türetilen düşük moleküler ağırlıklı (MA:232 g/mol) bir indolamindir (Nawaz vd., 2016). Hem suda ve hem de yağda çözünebilme özelliğine sahiptir. Melatoninin küçük boyutu ve amfifilik özelliği, hücre zarından kolayca geçmesini ve hücrenin tüm alt bölümlerine girmesini sağlar (Salehi vd., 2019).



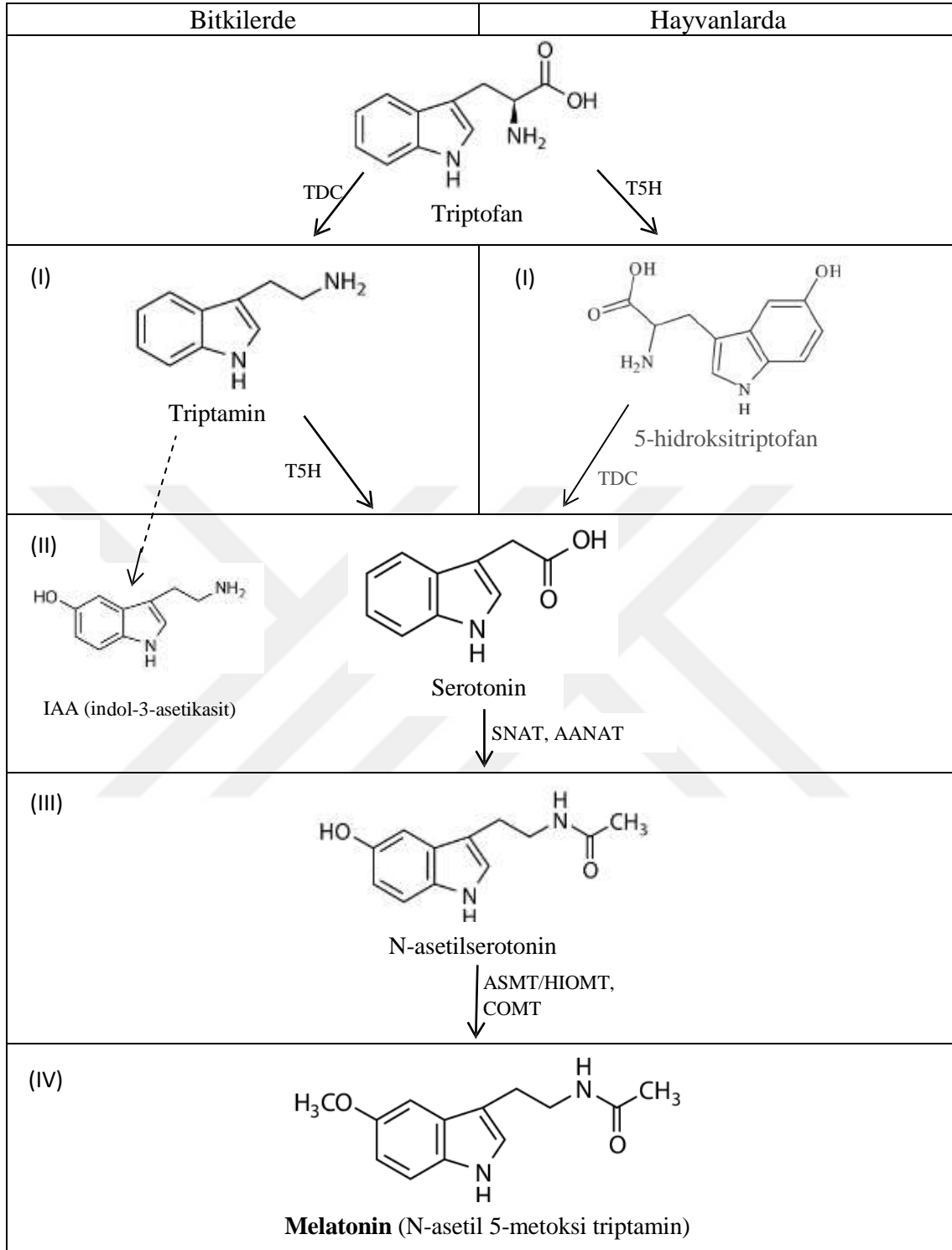
Şekil 1.7. Melatoninin kimyasal yapısı (Salehi vd., 2019).

Melatonin bakterilerden memelilere ve bitkilere kadar hemen hemen her çeşit canlıda bulunan, birden fazla özellik üzerine biyolojik aktivite gösteren ve bu nedenle günümüzde yaygın çalışma konusu olan bir biyomoleküldür (Hardeland, 2016; Nawaz vd., 2016). İlk

olarak 1958 yılında sığır epifiz bezinde keşfedilmiştir (Lerner vd., 1958). Başta yalnızca memelilerde bulunan bir hormon olarak düşünülmüş olsa da 1995 yılında bitkilerde de var olduğu tamamen kanıtlanmıştır (Dubbels vd., 1995; Hattori vd., 1995). Melatoninin hayvan ve bitkilerdeki ortak biyolojik işlevi, serbest radikalleri temizleyerek antioksidan savunmada rol almasıdır (Salehi vd., 2019). Melatonin hayvanlarda ve insanlarda özellikle sirkadiyen ritim, ruh hali, uyku, cinsel davranış ve mevsimsel üreme gibi çeşitli fizyolojik olayların modülatörü olarak işlev görür (Arnao ve Hernández-Ruiz vd., 2006; Zhang vd., 2015; Nawaz vd., 2016). Ayrıca inflamasyon ve nörodejeneratif bozukluklara verdiği hücrel yanıt ile hücrelerin yenilenmesi ve bağışıklığı artırma bilinen diğer işlevleridir (Zhang vd., 2015). Hayvanlardakine benzer şekilde, Mel bitkilerde de geniş bir biyolojik fonksiyon yelpazesine sahiptir. Bunlardan bazıları stres koşullarında bir büyüme düzenleyicisi olarak hareket etmesi, biyostimulator olması ve antioksidan özelliklere sahip olmasıdır (Wang vd., 2019a).

### 1.7.1. Melatonin Biosentezi

Hem hayvanlarda ve hem de bitkilerde Mel biyosentez yolu (Şekil 1.2) benzerlik göstermektedir. Genel olarak Mel biyosentezi art arda gerçekleşen dört enzimatik adım ile meydana gelir. Bitkilerde biyosentezin ilk basamağında triptofan, triptofan dekarboksilaz (TDC) yardımı ile triptamine; ikinci basamağında da triptamin triptofan-5-hidroksilaz enzimi ile serotonine dönüştürülür (Zhang vd., 2015). Bitkiler için önemli bir büyüme hormonu olan indol-3-asetikasit (IAA) de ikinci basamakta üretilir (Kaur vd., 2015) (Şekil 1.8). Melatonin biyosentezinin son iki basamağında sırasıyla asetillenme ve metillenme aşamaları gerçekleşir. Bu aşamalarda kullanılan enzimler canlı türleri arasında ya da hücrel olarak değişiklik göstermektedir. Biyosentezin üçüncü basamağında serotonin, genellikle serotonin N-asetiltransferaz (SNAT) enzimi ile N-asetilserotonine dönüştürülür. Bazı yüksek bitkilerde ve yeşil alglerde AANAT (arilalkilamin N-asetiltransferaz) enziminin de bu işlemde rol aldığı rapor edilmiştir (Okazaki vd., 2009; Zhang vd., 2015). Dördüncü ve son basamakta, N-asetilserotonin metiltransferaz (ASMT) ya da diğer adıyla hidroksiindol-O-metiltransferaz (HIOMT) enziminin metilasyon aktivitesi ile N-asetil serotonininden 'N-asetil 5-metoksi triptamin' yani 'melatonin' sentezlenmiş olur (Zhang vd., 2015). *Arabidopsis thaliana* bitkisinde COMT (kafeik asit O-metiltransferaz) enziminin de son enzimatik basamakta yer aldığı rapor edilmiştir (Byeon vd., 2014).



Şekil 1.8. Melatoninin bitkilerdeki ve hayvanlardaki genel biyosentez yolu. TDC: triptofan dekarboksilaz, T5H: triptofan-5-hidroksilaz, SNAT: serotonin N-asetiltransferaz, AANAT: arilalkilamin N-asetiltransferaz, ASMT: N-asetilserotonin metiltransferaz, HIOMT: hidroksiindol-O-metiltransferaz, COMT: kafeik asit O-metiltransferaz (Zhang vd., 2015).

Bitkilerde dört basamaklı melatonin biyosentezinde yer alan enzimler (TDC, T5H, SNAT, AANAT, ASMT, COMT gibi ) melatonin üretimi için çoklu yolların varlığını göstermektedir. Biyosentez yolunda kullanılan son enzime göre melatoninin üretildiği hücre bölümü (kloroplast, mitokondri, sitoplazma gibi) de değişmektedir. Bitkinin melatonin üretimi için farklı alt hücresel bölgelerde çoklu biyosentez yollarına sahip olmasının, stres faktörlerine karşı bir yanıt olabileceği düşünülmektedir (Back vd., 2016).

Bitkilerdeki melatonin derişimi hayvanlarda bulunan seviyeden çok daha yüksektir (Salehi vd., 2019). Bitkilerdeki yüksek melatonin derişimi, çevresel stres faktörlerinden ya da başka nedenlerden kaynaklanabilmektedir (Nawaz vd., 2016; Salehi vd., 2019). Bunlardan bir tanesi, hayvanlardaki mitokondriye karşılık bitkilerin sahip olduğu iki organelde de (mitokondri ve kloroplast) melatonin biyosentezinin gerçekleşmesidir. Hayvanların aksine, bitkilerin melatonin öncüsü olan triptofanı sentezleyebilmeleri, bir diğer muhtemel nedendir. Bunların yanı sıra bitkiler melatoninini buldukları ortamdaki eksojen olarak alıp yüksek derişimlerde biriktirme potansiyeline sahiptir. Bu özellik de bitkilerdeki yüksek derişimi açıklamaya yardımcı olabilir. Her ne şekilde olursa olsun, bitkilerin sahip olduğu yüksek melatonin içeriği, onları insanlar için dışarıdan da alabilecekleri önemli bir melatonin/indolamin kaynağı yapmaktadır (Salehi vd., 2019; Zhang vd., 2015). Yüksek melatonin içeriğine sahip bitki materyallerinin tüketilmesinin, kandaki melatonin seviyesini değiştirebileceği ve makromoleküllerin oksidatif hasara karşı korunmasını sağlayabileceği daha önce yapılan bir çalışmada rapor edilmiştir (Dubbels vd., 1995).

### **1.7.2. Melatoninin Bitkilerdeki Fizyolojik ve Biyokimyasal Roller**

Melatonin bitkilerde çoğunlukla kök, tohum, yaprak, tomurcuk ve çiçek kısımlarında bulunup tohum çimlenmesinden fide büyümesine ve senesensin ertelenmesine kadar birçok süreçte yer alır (Shi vd., 2016; Nawaz vd., 2016). Bunlardan bir tanesi melatoninin bitki büyümesini doğrudan uyaran bir sinyal molekülü olarak işlev görmesidir (Nawaz vd., 2016). Ayrıca oksin, etilen, absisik asit ve salisilik asidin de dahil olduğu bazı fitohormonlarla benzer etkilere sahiptir (Hardeland, 2016). Melatoninin bir başka işlevi, bitkilerde fotosentez verimliliğini arttırmasıdır. Bunu; (I) klorofillerin bozulmasını geciktirme, (II) CO<sub>2</sub> alımını arttırma ve (III) elektron taşınmasını hızlandırma gibi farklı yollarla gerçekleştirmektedir (Salehi vd., 2019). Ayrıca melatonin bir antioksidan

moleküldür ve çok düşük derişimlerde dahi serbest radikalleri temizleyerek bitkilerde stres toleransının gelişmesine önemli katkı sağlar (Shi vd., 2016). Melatoninin bitkinin antioksidan savunması üzerindeki bazı olumlu etkileri; reaktif oksijen türlerini (ROT) doğrudan temizleme, antioksidan enzim aktivitesini hızlandırma, oksidatif hasara karşı bitkiyi koruma ve diğer antioksidanlarla sinerjistik hareket sergilemedir. Ayrıca, mitokondriyal solunum zincirindeki elektron taşıma etkinliğini artırarak serbest radikallerin aşırı üretimini sınırlandırma, melatoninin bitkinin antioksidan savunmasını arttırmaya yardımcı işlevlerindedir (Salehi vd., 2019).

Melatoninin bitkilerde en yüksek seviyede bulunduğu yer çoğunlukla tohumdur. Tohum kısmının yüksek melatonin içermesinin nedeni, muhtemelen bitkinin çevresel stres faktörlerine karşı etkili bir savunma ihtiyacından kaynaklandığı düşünülmektedir (Salehi vd., 2019). Öte yandan, melatonin derişimi türler arasında ve hatta aynı türün farklı çeşitleri arasında bile farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılık çoğunlukla çevresel koşullardan kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalarda melatonin açısından zengin bitki türlerinin, daha fazla stres tolerans kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir (Zhang vd., 2015; Shi vd., 2016).

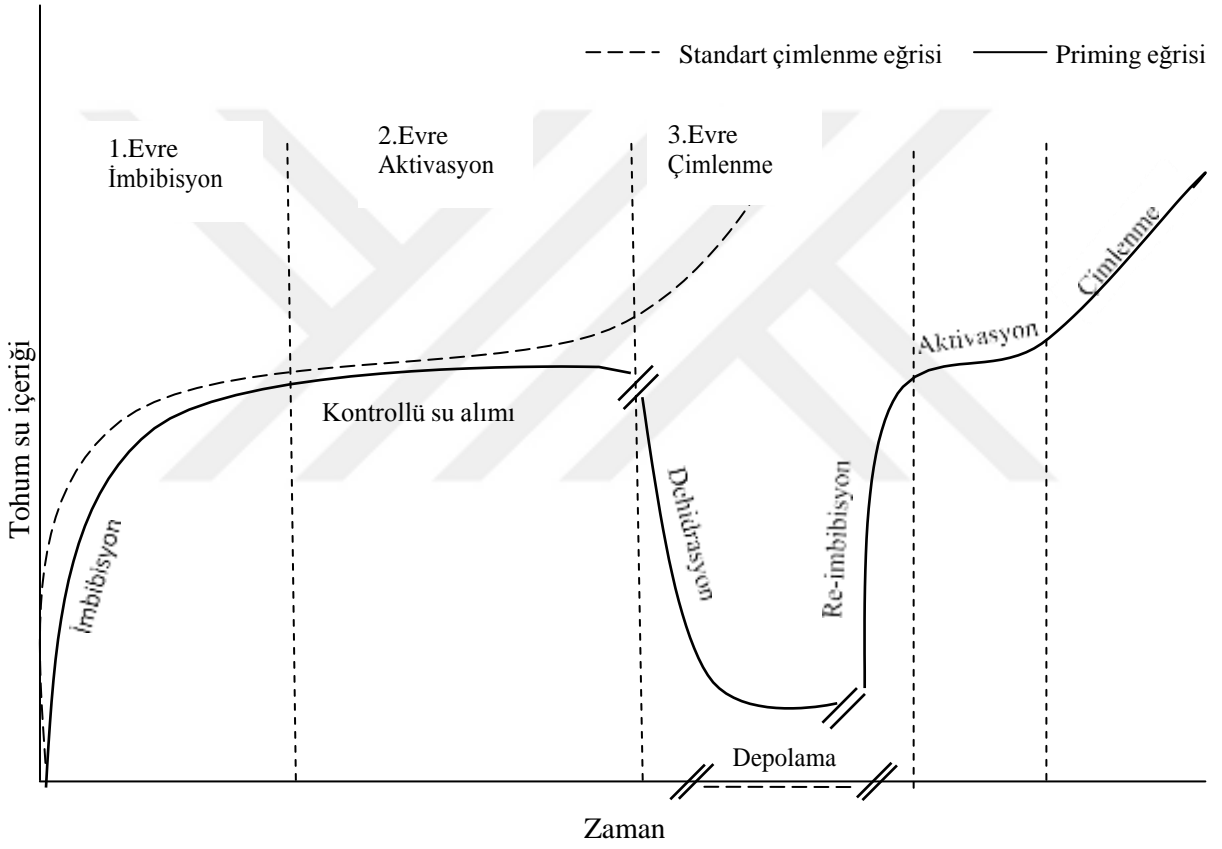
İçsel melatonin seviyesi, çalışılan bitki çeşidine ve meyve gelişim evresine göre değişkenlik gösterir (Nawaz vd., 2016). Bununla birlikte farklı çevresel koşullar ve özellikle stres koşulları, bitkilerdeki melatonin biyosentezini önemli seviyede etkilemektedir (Zhang vd., 2015). Güneş altında yetişen bitkilerin, yapay ışık ortamında yetiştirilenlere kıyasla kök ve yapraklarında yaklaşık iki üç kat daha fazla melatonin biriktirdiği kaydedilmiştir (Tan vd., 2007). Ayrıca hemen hemen tüm stres faktörleri de bitkilerdeki melatonin biyosentezini arttırmaktadır (Zhang vd., 2015). Stres altındaki bitkilerde yüksek melatonin üretiminin, olumsuz çevresel koşulları gidermek için bitkinin bir çeşit adaptasyon mekanizması olduğu düşünülmektedir (Zhang vd., 2015). İçsel melatoninin yanı sıra dışarıdan melatonin uygulamasının da sıcaklık, tuzluluk ve ağır metal gibi çeşitli stres faktörlerine karşı bitki stres toleransını arttırdığı yönünde çeşitli çalışmalar rapor edilmiştir (Sun vd., 2018; Ye vd., 2016; Turk vd., 2014; Li vd., 2012). Stres toleransını düzenlemede melatoninin muhtemel işlevlerinden bazıları; antioksidan enzim sistemini koruma, hücresel homeostazı iyileştirme, oksidatif stresi azaltma, fotosentezi koruma ve sinyal iletiminde yer alan strese duyarlı genlerin ifadesini düzenlemedir. Bu sayede melatonin bitkinin stres toleransını geliştirir ve bitki verimliliğinin artmasına yardımcı olur (Li vd., 2012; Wei vd., 2015).

### 1.8. Ekim Öncesi Tohum Uygulamaları: Priming

Priming işlemi, tohumların yalnızca su veya sulu bir çözelti içerisinde, belirli bir süre boyunca kısmi hidrasyonuna izin veren ve ekim öncesi yapılan bir tohum uygulamasıdır (Raj ve Raj, 2019). Genel olarak, dormant (uyku) halde olmayan kuru bir tohumun suya bırakıldıktan sonraki çimlenme süreci üç evrede gerçekleşir; imbibisyon, aktivasyon ve çimlenme. İlk evre ‘imbibisyon’ yani suyun tohum tarafından alınması işlemidir. ‘Gecikme evresi’ olarak da adlandırılan ikinci evrede çimlenme öncesi metabolik aktivasyon süreci başlamış olur. Üçüncü ve sonuncu evre ise tohum kabuğu içerisinde radikulanın çıkması ve çimlenme işleminin başlamasıdır. Ekim öncesi tohum uygulamalarında imbibisyon ve aktivasyon evreleri gerçekleştirilirken tohumun nem seviyesinin gerçek çimlenme için gerekli olan seviyeden daha aşağıda olması ve radikulanın ortaya çıkmasına izin vermeyecek şekilde hidrasyon işleminin durdurulması gerekmektedir. Bu süre, çimlenme öncesi metabolizma ile ilgili fizyolojik süreçlerin çoğunun başlaması için yeterli bir süredir. Hidrasyon işleminin durdurulması ile tohumun tamamen çimlenmeye doğru geçişi de önlenmiş olur. Radikula çıktıktan sonra kurutma işlemine başlanması durumunda tohum gücü ve canlılığı zarar göreceğinden priming işlemi yapılırken ikinci evrenin zamanında durdurulması önem taşımaktadır. İkinci evrenin doğru zamanda sonlandırılması ile tohumların su içerikleri, dehidrasyon (genellikle oda sıcaklığında kurutma şeklinde) ile ilk seviyesine kadar indirilir (Raj ve Raj, 2019). Ekim öncesi uygulama yapılan tohumların uzun ömürlü olması dehidrasyon işlemine ve saklama koşullarına bağlıdır. Hızlı bir dehidrasyon işlemi tohum ömrünün azalmasına veya çözünebilir karbohidrat içeriğinin değişmesine neden olabilir. Yavaş bir dehidrasyon işlemi ile tohum ömrü uzatılmış ve kalitesi artırılmış olur (İbrahim, 2016). Normal çimlenme süreci ile tohum priming sürecinin şematik diyagramı Şekil 1.9’da verilmiştir.

Yüksek kaliteli tohumlar ürün veriminin temelini oluşturur. Bu bakımdan ekim öncesi tohum uygulamaları, bitkilerde tohum kalitesini ve stres toleransını arttıran, çiftçiler tarafından kolayca uygulanabilecek basit ve uygun maliyetli bir tekniktir (Szafranska vd., 2016). Tohum canlılığını ve strese karşı bitki toleransını arttırmak amacıyla geliştirilen ve başarıyla kullanılan birçok tohum uygulama tekniği mevcuttur. Bunlardan birkaçı hidropriming, ozmopriming, katı-matris primingi ve hormonal primingdir (Raj ve Raj, 2019). Ekim öncesi tohum uygulamaları sayesinde daha kısa zamanda, daha geniş sıcaklık aralığında ve daha az oksijen ortamında çimlenebilen, hızlı radikula gelişimi sergileyen,

yüksek çimlenme yüzdesine sahip ve olumsuz çevre faktörlerine karşı daha dayanıklı tohumlar elde edilmektedir (Corbineau ve Come, 1990; Bray, 1995; Posmyk vd., 2008). Tohumlara ekim öncesinde melatonin uygulanması da bitkilerde stres toleransını geliştirmede oldukça etkili bir yöntemdir. Tohumlara ekim öncesi melatonin uygulamasının çeşitli stres faktörleri altında yetişen bitkilerde bitki büyümesini geliştirdiği, ürün miktarını arttırdığı ve bitkiye stres toleransı sağladığı rapor edilmiştir ( Szafranska vd., 2016; Korkmaz vd., 2017; Wei vd., 2015; Balabusta vd., 2016).



Şekil 1.9. Normal çimlenme süreci ile tohum priming sürecinin şematik diyagramı (Rajjou vd., 2012).

### 1.9. Buğday (*Triticum L.*)

Tahıllar, Poaceae familyasına ait bitkilerin meyvesi ya da tohumu olarak tanımlanan ve 'hububat' olarak da adlandırılan tarım ürünleridir (Rebello vd., 2014). Tohum yapısına, meyve çeperine (perikarp) sıkı bir şekilde kaynaşan tohum kabuğu (testa) da katılır. Buğday, mısır ve yulafta genellikle tohum olarak bilinen yapılar aslında tek tohumlu

açılmayan kuru meyvelerdir ve bunların her biri ‘karyopsis’ olarak adlandırılır (Mauseth, 2012). Tahılların tohum yapısı temel olarak; tohum kütlelerinin büyük bir kısmını kapsayan ‘endosperm’, tohumun dış tabakası olan ‘kepek’ ve tohumun tabanında bulunan ‘embriyo (germ, rüşeym)’ olmak üzere üç kısımdan oluşur (Slavin, 2004; De Moura vd., 2009). Tohumun çimlenmesi esnasında embriyo için ana enerji kaynağı olan nişasta, embriyonun yaklaşık %50 ila 75’ini oluşturur. Bu yüksek oran, beslenmede tahılların başlıca enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlar. Nişasta içeriğinin yanı sıra tohumun endosperm kısmı; %8 ila 18 arasında protein ve nispeten daha az miktarda vitamin (E ve B vitaminleri), mineral (demir, çinko, bakır, magnezyum, selenyum) ve diğer çeşitli fitokimyasalları içerir (Slavin, 2004). Bununla birlikte tohumun kepek ve embriyo kısımları da çeşitli proteinler, mineraller, vitaminler ve fenolik bileşikler açısından zengin bir çeşitliliğe sahiptir. Bu nedenle beslenmede tahılların, tohumun tüm kısımlarını içeren, ‘tam tahıl’ olarak tüketilmeleri büyük önem taşımaktadır. Çeşitli epidemiyolojik çalışmalarda, tam tahılların sahip oldukları makro- ve mikro besinler ile diğer biyoaktif bileşenler sayesinde kalp damar hastalıkları, diyabet ve kanser gibi çeşitli kronik hastalıkların oluşma riskini azalttıkları rapor edilmiştir (Slavin, 2004; He vd., 2010; Jacobs Jr vd., 1998).

Tahıllar, dünyanın ekonomik olarak en değerli ve tarım ürünleri arasında ekim alanı en yüksek olan bitki grubunu oluşturmaktadır. Tahılların ekonomik değeri diğer tarım ürünlerine göre çok daha yüksektir. Dünyada başlıca tüketilen tahıllar arasında buğday (*Triticum L.*), çeltik (*Oryza L.*), mısır (*Zea L.*), yulaf (*Avena L.*), çavdar (*Secale L.*), arpa (*Hordeum L.*) ve darı (*Panicum L.*) gelmektedir (Fardet, 2010). Dünyada 2020 yılına ait toplam tahıl üretiminin yaklaşık 2.765 milyon ton, toplam buğday üretiminin ise yaklaşık 774 milyon ton olduğu rapor edilmiştir (FAO, 2021). Türkiye’de ise buğday, yaklaşık 19 milyon ton ile en fazla üretilen ve ayrıca en fazla ekim alanına sahip tahıl bitkisi durumundadır. Türkiye’de tarım yapılan alanların yaklaşık %40,8’ini tahıllar ve toplam tahıl ekimi yapılan alanların da yaklaşık %49’unu buğday oluşturmaktadır (TÜİK, 2019). Ülkemiz buğday üretimi bakımından dünyada onuncu sırada yer almaktadır. Dünyada genelinde buğday üretim miktarları ile ülkelerin toplam buğday üretimi üzerindeki katkı oranları Tablo 1’de verilmiştir.



Tablo 1.3. Dünya genelinde 2019 yılı buğday üretimi (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2019).

Sıra	Ülke adı	Üretim ( milyon ton)	Üretim oranı (%)
1	Avrupa Birliği	153	20
2	Çin	132	17
3	Hindistan	102	13
4	Rusya	74	10
5	ABD	52	7
6	Kanada	33	4
7	Ukrayna	29	4
8	Pakistan	25	3
9	Arjantin	20	3
<b>10</b>	<b>Türkiye</b>	<b>19</b>	<b>3</b>
11	Diğer	123	16
	<b>Toplam</b>	<b>762</b>	<b>100</b>

Buğday, yaklaşık 10.000 yıl önce kültür edilmeye başlanmıştır. Buğdayın en eski kültüre alınan formları diploid (AA, BB, DD) ve tetraploid (AABB) yapıda olup, genetik ilişkileri buğdayın Türkiye'nin güneydoğusundan geldiğini göstermektedir. Hekzaploid (AABBDD) buğdayların ortaya çıkmasıyla birlikte yakın doğuya ve tüm dünyaya yayılmışlardır. Günümüzde, dünya genelinde yetiştirilen buğdayların yaklaşık %95'ini hekzaploid ekmeklik buğdaylar, kalan %5'lik kısmın çoğunu da tetraploid makarnalık buğdaylar oluşturmaktadır (Shewry, 2009). Şu anda ülkemizde ve tüm dünyada tarımı yapılan başlıca buğdaylar kalite ve kullanım amacına göre; ekmeklik (*T. aestivum* L.), bisküvilik (*T. compactum* Host.), ve makarnalık (*T. durum* Desf.) olmak üzere üç türdür. Tetraploid (AABB;  $2n=4x=28$ ) yapısında olan makarnalık buğdaylar kalite özellikleri bakımından hekzaploid (AABBDD;  $2n=6x=42$ ) yapıdaki *T. aestivum* ve *T. compactum* buğday türlerinden farklılık gösterir. Genom yapılarındaki farklılık, endosperm tekstür özellikleri (sertlik ve yumuşaklık gibi fiziksel özelliklerin tamamı) ile protein içeriği ve kalitesi (viskoelastik özellik sağlayan gluten proteini gibi) gibi özellikler buğday türlerinin kullanım alanlarını belirlemede kullanılmaktadır (Shewry, 2009; Aydoğan vd., 2019). Örneğin *T. durum* sert endosperm yapısına sahiptir ve makarna, bulgur, kuskus ve irmik

yapımında kullanılır. Bununla birlikte *T. aestivum* türünün hem sert ve hem de yumuşak endosperme sahip çeşitleri bilinmektedir. Sert endosperme sahip olan çeşitler daha çok ekmek, poğaç ve simit yapımında; yumuşak endosperme sahip olanlar ise bisküvi, kek, waffle, kraker gibi unlu mamullerin üretiminde kullanılır. *T. compactum* türü de diğer iki türe göre tarımı daha az yapılan, yumuşak endosperm yapısına sahip ve bisküvi yapımına uygun bir buğday türüdür (Yuksel vd., 2011; Aydoğan vd., 2019). Genel olarak buğday; farklı iklim bölgelerinde yetiştirilebilecek bir genetik çeşitlilik göstermesi, düşük su içeriği sayesinde tohumlarının kolayca depo edilebilmesi ve ekmek, makarna, buldur, gofret gibi lezzetli ve tatmin edici yiyeceklerin üretiminde vazgeçilmez bir hammadde olması nedeniyle yüksek üretim potansiyeline sahip bir tarım bitkisidir (Shewry, 2009; Yuksel vd., 2011).

Ülkemizde buğday üretimi, tüketimini karşılayabilecek durumdadır. Ancak buğdaya dayalı mamul madde ihracatı giderek arttığından, buğdaya olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Buğdaya dayalı mamul madde üretim sektörünün sürdürülebilmesi ve geliştirilebilmesi için hammadde ihtiyacının yurtiçinden sağlanması ülkemize ekonomik açıdan büyük ölçüde bir kazanç sağlayacaktır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2019). Ülkemize getireceği ekonomik kazancın yanı sıra günlük diyeteye kattığı zengin biyoaktif bileşik içeriği de, buğday üretiminin ne derece önemli olduğunu göstermektedir. Son yıllarda sağlıklı beslenmeye yönelik artan bir talep vardır. Sahip olduğu yüksek besin içeriği ve biyoaktif bileşik kompozisyonu sayesinde buğday, bu talebi karşılamada tüm tarım bitkileri arasında önemli bir potansiyele sahiptir (Shewry, 2009).

İyonlaştırıcı radyasyonun bitkiler üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmasına rağmen, IR stresinin bitkiler üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiyi azaltmayla ilgili literatürde çok az çalışma yer almaktadır. Ayrıca Mel'in çeşitli stres faktörlerine karşı bitkilerde iyileştirici role sahip olduğu bilinmektedir. Ancak IR stresinin neden olduğu hasarı iyileştirip iyileştirmediği konusunda literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut tez çalışmasında dışarıdan (ekzojenik) Mel uygulamasının IR stresine karşı olan etkisi, aynı derişimdeki iki farklı Mel uygulama şekli (ekim öncesi Mel primingi ve ekim sonrasında yetiştirme boyunca besin çözeltilisine ekleme) kullanılarak ve etkinlikleri birbiriyle karşılaştırılarak araştırılmıştır. Bu araştırma kapsamında buğday tohumlarına artan dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamalarının (100, 200, 300 ve 400 Gy) fidelerde oluşturduğu hasara karşı ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının iyileştirici etkilerinin; enzimatik olan (POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR, DHAR) ve olmayan

antioksidan bileşenler (GSH, TFM, TF, fenolik asitler) düzeyinde çalışılması planlanmıştır. Ayrıca bu bileşenlerin, morfolometrik parametreler (boy uzunluğu, taze ve kuru ağırlık gibi), fotosentetik mekanizma (fotosentetik pigmentler ve klorofil floresansı) ve bazı ozmotik düzenleyiciler (sükroz, glukoz, fruktan ve prolin gibi) ile de desteklenmesi amaçlanmıştır.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Bitkilerin Yetiştirilmesi

Çalışmada kullanılan buğday çeşidine (*T. aestivum* 'Bezostaya-1') ait tohumlar (karyopsis) Mısır Araştırma Enstitüsü (Sakarya, Türkiye)'nden temin edildi. Tohumların bir kısmına su (hidropriming, ön-su uygulaması) ile diğer kısmına ise Mel (Mel primingi, ön-Mel uygulaması) ile iki ayrı ön işlem yapıldı. Su ile yapılan ön işlemde tohumlar saf su içerisinde 6 saat imbibe edildikten sonra kuru ve karanlık bir ortamda beş gün kurutuldu. Ekim öncesi ön-Mel uygulaması için ayrılan tohumlar ise ön deneme çalışmalarıyla belirlenen derişimdeki (25 µM) melatonin çözeltisi içerisinde 6 saat imbibe edilerek diğer tohumlarla aynı şartlarda kurutuldu. Ön işlemin süresi, çimlenme süresince tohumlardan kotiledonların çıkmasına izin vermeyecek şekilde belirlendi. Dehidrasyon süresi ise tohumların başlangıçtaki ve sondaki su içerikleri dikkate alınarak yapıldı.

Çalışmada kullanılan gama ( $\gamma$ ) ışınlama dozları, ön deneme (50, 100, 200, 300, 400, 500 Gy) çalışmaları ve literatür çalışmaları (Borzouei vd., 2010, Colak vd., 2015) da dikkate alınarak 100 Gy, 200 Gy, 300 Gy ve 400 Gy olarak belirlendi. Ön-su ve ön-Mel uygulaması yapılan tohumlardan, belirlenen dozlarda ışınlanmak üzere Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK, Ankara, Türkiye)'na gönderildi. Ön işlem gören tohumlar, Co-60 gama kaynağı (Ob-Servo Sanguis Co-60) kullanılarak 355 Gy/saat doz hızında ışınlandı. Işınlanan tohumlardan ön-Mel uygulaması yapılanlar ön-Mel grubu olarak ayrıldı. Ön-su uygulaması yapılanlar ise; herhangi bir Mel uygulamasına tabi tutulmayan kontrol ve IR'li gruplar ve yetiştirme boyunca Mel uygulaması yapılan gruplar olmak üzere ikiye bölündü (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Çalışmada kullanılan su, melatonin ve ışınlama işlemlerini gösteren deney grupları

Ön-su / IR	Ön-Mel / IR	Ön-su / IR / Mel
1) Kontrol	6) ön-Mel	11) Mel
2) 100 Gy	7) ön-Mel + 100 Gy	12) 100 Gy + Mel
3) 200 Gy	8) ön-Mel + 200 Gy	13) 200 Gy + Mel
4) 300 Gy	9) ön-Mel + 300 Gy	14) 300 Gy + Mel
5) 400 Gy	10) ön-Mel + 400 Gy	15) 400 Gy + Mel

Her bir deneme grubuna ait tohumlardan alınarak 6 saat süreyle saf su ile imbibe edildi. Daha sonra tohumlar, saf su (kontrol, yalnız IR, ön-Mel, ön-Mel + IR) veya Mel çözeltilisi (Mel, IR + Mel) ile nemlendirilen kurutma kağıtları arasında petri kaplarına eşit aralıklarla yerleştirilerek çimlendirmeye bırakıldı. Çimlendirme işlemi, 24 °C sıcaklık ve % 65 nem koşullarına ayarlanan iklim dolabında (BINDER KBWF 720, Germany) bir gün karanlığa maruz bırakılarak gerçekleştirildi. Birinci günün sonunda her grup için eşit çimlenme koşullarındaki tohumlar hızlıca seçilerek kontrol ve uygulama grupları halinde düzenlenen Hoagland (Hoagland ve Arnon, 1950) yetiştirme ortamlarına aktarıldı. Aynı büyüme koşullarında 5 gün daha karanlıkta çimlenmeye bırakılan tohumlar, beşinci günün sonunda aydınlık ortama alınarak onuncu güne kadar 16 saat ışık (25 °C ve %65 nem) ve 8 saat karanlık (20 °C sıcaklık ve %70 nem) fotoperiyot koşullarında kontrollü bitki büyütme kabininde (BINDER KBWF 720, Germany) büyümeye alındı. Yetiştirme esnasında Hoagland ortamı her üç günde bir yenilendi. Ekim sonrası Mel uygulaması yapılacak gruplara, çimlendirme aşamasından itibaren Mel (çimlenme sırasında saf suya ve yetiştirme sırasında Hoagland çözeltilisine eklenerek) verildi. Onuncu günün sonunda morfometrik ölçümler için 5 farklı yetiştirme ortamından seçilen her bir gruba ait 20'şer fidenin kök ve sürgün boyları ölçülerek fotoğraflandı (Şekil 3.1). Sürgün ve köklerin taze ve kuru ağırlıkları bitki başına mg olacak şekilde hesaplandı. Buğday fideleri hasat edilerek kök ve sürgün örnekleri sıvı azotla (-196 °C) muamele edildi ve biyokimyasal analizler için -80 °C'de muhafaza edildi. Kontrol ve uygulama gruplarına ait uygulama ve zamanlama protokolü Tablo 2.2'de verilmiştir.

## 2.2. Stres Tolerans İndekslerinin Belirlenmesi

Stres tolerans indekslerinin (TI) hesaplanmasında fidelerin kök ve sürgünlerine ait boy ölçümleri ile taze ve kuru ağırlıkları kullanıldı. Stres tolerans indekslerinin hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda verilmiştir (Kausar vd., 2012).

- Kök/Sürgün uzunluğu stres TI (%) =  $100 \times (\text{uygulama grubu kök/sürgün uzunluğu}) / (\text{kontrol grubunun kök/sürgün uzunluğu})$
- Kök/Sürgün taze ağırlığı stres TI (%) =  $100 \times (\text{uygulama grubu kök/sürgün taze ağırlığı}) / (\text{kontrol grubunun kök/sürgün taze ağırlığı})$
- Kök/Sürgün kuru ağırlığı stres TI (%) =  $100 \times (\text{uygulama grubu kök/sürgün kuru ağırlığı}) / (\text{kontrol grubunun kök/sürgün kuru ağırlığı})$

Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan kontrol ve uygulama gruplarına ait uygulama protokolü

		<b><i>T. aestivum</i> 'Bezostaya-1' buğday tohumları</b>			
Tohum uygulaması		Ön-su (hidropriming) uygulaması		Ön-Mel uygulaması (25µM)	
		Kurutma işlemi (25 °C, beş gün)		Kurutma işlemi (25 °C, beş gün)	
		γ-ışını uygulaması (100, 200, 300 ve 400 Gy)		γ-ışını uygulaması (100, 200, 300 ve 400 Gy)	
		Yalnızca ışınlamaya maruz bırakılan tohumlar (IR)	Işınlamaya maruz bırakıldıktan sonra yetiştirme boyunca Mel uygulaması yapılan tohumlar (IR + Mel)	Ön-Mel uygulaması yapılan ve ışınlamaya maruz bırakılan tohumlar (ön-Mel + IR)	
Bitkilerin yetiştirilmesi		1.gün	İmbibisyon (saf su, 6 saat)	İmbibisyon (saf su, 6 saat)	İmbibisyon (saf su, 6 saat)
		1.gün	Çimlendirme (saf su, 1 gün)	Çimlendirme (25 µM Mel çözeltisi, 1 gün)	Çimlendirme (saf su, 1 gün)
		2.gün	Hoagland ortamına aktarma (sadece Hoagland)	Hoagland ortamına aktarma (Mel + Hoagland)	Hoagland ortamına aktarma (sadece Hoagland)
		3.gün	Çimlendirme (22 °C sıcaklık ve %65 nem)	Çimlendirme (22 °C sıcaklık ve %65 nem)	Çimlendirme (22 °C sıcaklık ve %65 nem)
		5.gün	-Bitkilerin aydınlık ortama alınması (16 saat ışık / 8 saat karanlık) - Hoagland çözeltilerinin yenilenmesi	-Bitkilerin aydınlık ortama alınması (16 saat ışık / 8 saat karanlık) - Hoagland çözeltilerinin (Mel + Hoagland) yenilenmesi	-Bitkilerin aydınlık ortama alınması (16 saat ışık / 8 saat karanlık) - Hoagland çözeltilerinin yenilenmesi
		8.gün	Hoagland çözeltilerinin yenilenmesi	Hoagland çözeltilerinin (Mel + Hoagland) yenilenmesi	Hoagland çözeltilerinin yenilenmesi
		10.gün	Hasat	Hasat	Hasat

### 2.3. Sürgün Ozmotik Potansiyelinin ( $\Psi_s$ ) Belirlenmesi

Hasattan sonra, buğday fidelerine ait yapraklar özütlendi ve santrifüjlendi. Elde edilen süpernatanttan bir ozmometre (Wescor Vapro Pressure Osmometer 5600, Logan, USA) yardımıyla sürgünlerin ozmotik potansiyel ( $\Psi_s$ )'leri belirlendi. Ozmotik potansiyel sonuçları MPa olarak ifade edildi.

### 2.4. Yaprakların Klorofil Floresans ( $F_v/F_m$ ) Değerlerinin Belirlenmesi

Klorofil floresans analizleri florometre (Plant Efficiency Analyzer, Hansatech, UK) kullanılarak gerçekleştirildi. Hasattan önce her uygulama grubuna ait bitki yaprakları klipsler kullanılarak 20 dakika süreyle karanlığa alıştırıldı. Süre sonunda yaprakların başlangıç floresansları ( $F_o$ ) ölçüldü. Klorofil floresansı için maksimum klorofil floresans uyarılması ( $F_m$ ) ve değişken floresans ( $F_v = F_m - F_o$ ) ile  $F_v/F_m$  oranları belirlendi.

### 2.5. Yaprakların Toplam Klorofil (Tkl) ve Toplam Karotenoid (Tkar) İçeriklerinin Belirlenmesi

Yaprakların toplam klorofil miktarı Arnon (1949)'un yöntemine ve TKar miktarı ise Jaspars (1965)'in belirlediği yöntemine göre tayin edildi. Her bir gruba ait fidelerin yaprak kısmından 0,5'er gram örnek alınarak %80 aseton ile homojenize edildi. Daha sonra homojenat 5000 rpm'de santrifüjlendi. Elde edilen süpernatantların absorpsiyonları UV-Vis spektrofotometre (Thermo e-201, England) kullanılarak sırasıyla 663, 645 ve 450 nm dalgaboylarında ölçüldü. Aşağıdaki formüller kullanılarak klorofil *a* (kl *a*), klorofil *b* (kl *b*) miktarı ile toplam klorofil (Tkl) ve toplam karotenoid (Tkar) içerikleri belirlendi. Fotosentetik pigment (kl *a*, kl *b*, Tkl ve Tkar) miktarları mg 100 g<sup>-1</sup> taze ağırlık (TA) olarak ifade edildi.

$$kl\ a = \Delta A_{663} \times 12,7 - \Delta A_{645} \times 2,69$$

$$kl\ b = \Delta A_{645} \times 22,9 - \Delta A_{663} \times 4,68$$

$$Tkl = 20,2 \times A_{645} + 8,02 \times A_{663}$$

$$Tkar = (\Delta A_{450} \times 4,07) - [(0,0435 \times kl\ a) + (0,3367 \times kl\ b)]$$

## 2.6. Kök ve Sürgünlerde Antioksidan Enzim Aktivitelerinin Belirlenmesi

### 2.6.1. Enzim Özütlerinin Hazırlanması

Hasat edilen kök ve sürgün örneklerinden 0,5'er gram taze örnek alınarak sıvı azot yardımıyla havanda soğuk koşullarda toz haline getirildi. Parçalanmış örnekler üzerine, polivinilpirolidon (PVP, %1) ve 1 mM EDTA (etilendiamin tetraasetik asit) içeren fosfat tamponu (50 mM; pH 7,0) eklenerek homojenize edildi. Elde edilen özüt +4 °C'de ve 15,000 rpm'de 20 dakika santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant kısımlar SOD, CAT, POX, GR ve MDHAR enzim aktivitelerinin ölçülmesinde kullanıldı.

### 2.6.2. Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi

Süperoksit dismutaz enzim aktivitesi, Dhindsa ve Matowe (1981) tarafından geliştirilen yöntem ile belirlendi. Enzim aktivite tayini için 0,1 mM EDTA, 13 mM metionin, 75 µM nitro blue tetrazolium (NBT) ve 2 µM riboflavin içeren 50 mM fosfat tamponuna (pH 7) 50 µL enzim özütü eklenerek 3 mL'lik bir küvette karıştırıldı. Küvet 16 W lamba altına yerleştirilerek reaksiyon başlatıldı. On beş dakika sonunda ışık kaynağı uzaklaştırılarak reaksiyon sonlandırıldı. Oluşan reaksiyon ürünü bir UV-Vis spektrofotometre (Thermo e-201, England) ile 560 nm dalga boyunda ölçüldü ve absorbansı kaydedildi. Aktivite, enzim özütündeki 1 mg protein başına ünite enzim (Ü mg<sup>-1</sup> protein TA) olarak ifade edildi.

### 2.6.3. Peroksidaz (POX) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi

Guaiakol bağımlı peroksidaz aktivitesi Mika ve Lüthje (2003)'nin yöntemine göre belirlendi. Reaksiyon karışımı; 25 mM sodyum asetat (pH 5,0) tamponu, 10 mM guaiakol, 10 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve enzim özütünün son hacim 1 mL olacak şekilde birleştirilmesiyle hazırlandı. Hazırlanan reaksiyon karışımının absorbansı UV-Vis spektrofotometrede 470 nm'de 1 dakika süre boyunca ölçüldü. Absorbanstaki artış POX enzim aktivitesi olarak kaydedildi. Özgün enzim aktivitesinin bir ünitesi dakikada harcanan µmol mL<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



olarak hesaplandı ve sonuçlar enzim özütündeki 1 mg protein başına ünite enzim ( $\text{Ü mg}^{-1}$  protein TA) olarak ifade edildi.

#### **2.6.4. Katalaz (CAT) Enzim Aktivitesini Belirlenmesi**

Katalaz enzim aktivitesi Aebi (1984) tarafından geliştirilen yöntem ile belirlendi. Enzim aktivitesini belirlemek üzere 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7,0), 30 mM  $\text{H}_2\text{O}_2$  ve sulandırılmış enzim özütü içeren 1 mL'lik reaksiyon karışımının absorpsiyonu UV-Vis spektrofotometrede 240 nm dalgaboyunda 3 dakika boyunca ölçüldü. Absorbanstaki düşüşün kaydedilmesi ile CAT enzim aktivitesi belirlendi. Aktivite sonuçları,  $39,4 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  ekstinksiyon ( $\epsilon$ ) katsayısından yararlanılarak hesaplandı ve mg protein başına dakikada harcanan  $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$  ( $\mu\text{mol mL}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2 \text{ mg}^{-1}$  protein TA) olarak ifade edildi.

#### **2.6.5. Glutasyon Redüktaz (GR) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi**

Glutasyon redüktaz aktivitesi Foyer ve Halliwell (1976)'in yöntemine göre belirlendi. Enzim aktivitesi tayini için 50 mM Tris-HCl tamponu (pH 7,8), 10 mM yükseltgenmiş glutasyon (GSSG), 50 mM NADPH, 0,5 mM EDTA ve enzim özütü içeren reaksiyon karışımı hazırlandı. Glutasyon redüktaz aktivitesini belirlemek için, GSSG miktarındaki azalma UV-Vis spektrofotometrede 340 nm dalga boyunda 3 dakika boyunca ölçüldü. Hesaplama  $\epsilon$  katsayısı,  $6,2 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  olarak kullanıldı. Enzim aktivitesi 1 mg protein başına dakikada indirgenen 1 mmol  $\text{mL}^{-1}$  GSSG miktarı ( $\text{mmol mL}^{-1}$  GSSG  $\text{mg}^{-1}$  protein TA) olarak ifade edildi.

#### **2.6.6. Monodehidroaskorbat Redüktaz (MDHAR) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi**

Monodehidroaskorbat redüktaz aktivitesi Hossain vd. (1984)'nin yöntemine göre tayin edildi. Özgün enzim aktivitesi tayini için 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7,8), 150  $\mu\text{M}$  NADH, 50  $\mu\text{M}$  askorbik asit ve 100  $\mu\text{L}$  enzim ekstraktı içeren reaksiyon karışımı hazırlandı. Monodehidroaskorbat redüktaz aktivitesi, reaksiyon karışımının UV-Vis spektrofotometrede 340 nm dalgaboyunda 3 dakika boyunca ölçülmesiyle belirlendi.

Aktivite,  $6,22 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1} \epsilon$  katsayısından yararlanılarak hesaplandı ve enzim özütündeki 1 mg protein başına ünite enzim ( $\text{Ü mg}^{-1} \text{ protein TA}$ ) olarak ifade edildi.

#### **2.6.7. Askorbat Peroksidaz (APX) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi**

Kök ve sürgün kısımlarından alınan örnekler (0,5 g TA) örnek numuneleri 50 mM fosfat tamponu, 1 mM EDTA, 5 mM askorbik asit ve %2 PVPP içeren tampon içerisinde homojenize edildikten sonra 15,000 rpm'de 20 dakika  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant APX enzim aktivitesinin belirlenmesinde kullanıldı. Askorbat peroksidaz enzim aktivitesinin tayini Nakano ve Asada (1981)'ya göre belirlendi. Reaksiyon karışımı 50 mM sodyum fosfat tamponu (pH 7,0), 250  $\mu\text{M}$  askorbat, 5 mM  $\text{H}_2\text{O}_2$  ve enzim özütü karıştırılarak hazırlandı. Aktivite, reaksiyon karışımının UV-Vis spektrofotometrede 290 nm dalgaboyunda 3 dakika boyunca ölçülmesiyle tayin edildi. Enzim aktivitesi 1 mg protein başına dakikada yükseltgenen 1 mmol  $\text{mL}^{-1}$  askorbik asit ( $\text{mmol mL}^{-1} \text{ AsA mg}^{-1} \text{ protein TA}$ ) olarak ifade edildi.

#### **2.6.8. Dehidroaskorbat Redüktaz (DHAR) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi**

Dehidroaskorbat redüktaz aktivitesi Hossain ve Asada (1984)'ya göre belirlendi. Her gruba ait bitki kısımlarından (kök ve sürgün) alınan 0,5'er g taze örnek, 50 mM Tris-HCl (pH 7,4), 100 mM NaCl, 2 mM EDTA ve 1mM  $\text{MgCl}_2$  içeren tampon çözeltisi içerisinde homojenize edildikten sonra 15,000 rpm'de 15 dakika  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant DHAR enzim aktivitesinin tayini için kullanıldı. Özgün enzim aktivitesinin belirlenmesi için 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 6,5), 0,5 g DHA, 1 mM GSH ve 100  $\mu\text{L}$  enzim özütü içeren reaksiyon karışımı UV-Vis spektrofotometrede 265 nm dalgaboyunda ölçüldü. Aktivite, enzim özütündeki 1 mg protein başına ünite enzim ( $\text{Ü mg}^{-1} \text{ protein TA}$ ) olarak ifade edildi.

#### **2.7. Kök ve Sürgünlerde Fenilalanin Amonyum Liyaz (PAL) Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi**

Fenilalanin amonyum liyaz aktivitesi Wang vd. (2006)'ne göre belirlendi. Enzim özütünün elde edilebilmesi için 0,25 g taze örnek 2,5 mL 50 mM Tris-HCl tamponu (pH

8,8) ile özütlendi ve 10,000 rpm'de 30 dakika +4 °C'de santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant enzim aktivitesinin belirlenmesinde kullanıldı. Bir mL ekstraksiyon tamponu, 0,5 mL L-fenilalanin, 0,4 mL deiyonize su ve 0,1 mL enzim özütünün birleştirilmesiyle hazırlanan reaksiyon karışımı, 37 °C'de 1 saat bekletildi. Bir saatin sonunda reaksiyon karışımının üzerine 0,5 mL 6M HCl eklenerek reaksiyon sonlandırıldı. Reaksiyon sonucu oluşan sinamik asit 30 mL etilasetat ile ekstrakte edildi. Organik faz (etilasetat) evaporatör yardımı ile kuruluğa kadar uçuruldu. Geriye kalan sinamik asit 3 mL 0,05 M NaOH ile çözüldükten sonra UV-Vis spektrofotometrede 290 nm dalgaboyunda sinamik asit standardına karşı okutuldu. Fenilalanin amonyum liyaz aktivitesinin bir ünitesi mg protein başına  $\mu\text{mol}$  sinamik asit ( $\mu\text{mol mL}^{-1}$  SiA  $\text{mg}^{-1}$  protein TA) olarak belirlendi.

## **2.8. Kök ve Sürgünlerde Çözünabilir Protein Miktarının Belirlenmesi**

Her bir enzimin aktivite tayinini ölçmek için hazırlanan özütlerin ayrı ayrı çözünabilir protein içerikleri belirlendi. Protein ölçümü Bradford (1976)'un yöntemine göre yapıldı. Sulandırılan enzim özütü üzerine 1 mL reaktif (Coomassie Brilliant Blue G-250, Sigma) eklenerek 5 dakika karanlıkta bekletildi. Süre sonunda örneklerin absorbans değerleri UV-Vis spektrofotometrede 595 nm dalgaboyunda BSA (Bovin Serum Albumin) standardına karşılık okutuldu. Absorbanslara karşılık gelen  $\mu\text{g}$  protein değerleri belirlendi.

## **2.9. Kök ve Sürgünlerde Toplam Fenolik Madde İçeriğinin Belirlenmesi İçin Özütlerin Hazırlanması**

Sürgün ve kök kısımlarına ait her bir gruptan 1'er gram taze örnek %80 metanol içerisinde 45 °C'de 5 dakika ısıtıldı. Örnekler homojen hale getirildikten sonra 10,000 rpm'de 15 dakika santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant; toplam çözünabilir fenolik madde (TFM), toplam flavonoid (TF) ve antioksidan kapasite (AK) belirleme çalışmalarında kullanıldı.

### **2.9.1. Toplam Çözünabilir Fenolik Madde (TFM) İçeriğinin Belirlenmesi**

Toplam fenolik madde içeriği Slinkard ve Singleton (1977)'un yönteminin biraz değiştirilmesiyle Folin-Ciocalteu (FC) reaktifi kullanılarak belirlendi. Reaksiyon karışımı,

500 µL örnek üzerine 500 µL saf su, 100 µL FC ve 1900 µL sodyum bikarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) eklenerek hazırlandı. Karışım, 30 dakika karanlıkta bekletildikten sonra UV-Vis spektrofotometrede 750 nm dalgaboyunda gallik asit (GaA) standardına (0,5 – 10 µg GaA/1000 mL) karşı okutuldu. Toplam fenolik madde içeriği kök ve sürgünün 100 gramında bulunan mg gallik asit ( mg GaAE 100 g<sup>-1</sup> TA) olarak ifade edildi.

### **2.9.2. Toplam Flavonoid (TF) İçeriğinin Belirlenmesi**

Toplam flavonoid içeriği Huang vd. (2004)'ne göre belirlendi. Reaksiyon karışımı, 500 µL örnek üzerine 500 µL %2'lik AlCl<sub>3</sub> eklenerek hazırlandı. Yarım saat karanlıkta bekletilen reaksiyon karışımı, UV-Vis spektrofotometrede 415 nm dalgaboyunda ölçüldü. Toplam flavonoid içeriği kök ve sürgünün 100 gramındaki mg kuarsetin (mg QE 100 g<sup>-1</sup> TA) olarak ifade edildi.

### **2.10. Kök ve Sürgünlerin Antioksidan Kapasite (AK) Değerlerinin Belirlenmesi**

#### **2.10.1. 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) Radikal Temizleme Aktivitesinin Belirlenmesi**

Kök ve sürgünlere ait DPPH radikal temizleme aktivitesi Blois (1958)'e göre belirlendi. Reaksiyon karışımı, 500 µL örnek üzerine saf metanol ile taze olarak hazırlanan 1 mL DPPH çözeltisi (1 mg/30 mL) eklenerek hazırlandı. Karışım yarım saat karanlıkta bekletildikten sonra UV-Vis spektrofotometrede 520 nm dalgaboyunda ölçüldü ve içerik µmol g<sup>-1</sup> Trolox TA olarak ifade edildi.

#### **2.10.2. FRAP (Ferrik İyon İndirgeme Antioksidan Kapasite) Analizi**

Kök ve sürgünlerin FRAP aktivitesi Benzie ve Strain (1996)'in yönteminin biraz değiştirilmesiyle belirlendi. Stok çözelti, 10:1:1 oranında 300 mM asetat tamponu (pH 3,6), 10 mM TPTZ (2,4,6- tripiridil -s- triazin) ve 20 mM FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O karıştırılarak elde edildi. Örnek özütünden 150 µL ve stok çözeltiden 2850 µL alınarak hazırlanan reaksiyon karışımı, karanlıkta 37 °C'de 30 dakika boyunca bekletildi. Ferrik iyon indirgeme antioksidan aktivitesi, reaksiyon sonucu oluşan mor renkli demir tripiridil triazin

kompleksinin UV-Vis spektrofotometrede 593 nm dalgaboyunda ölçülmesiyle belirlendi. Sonuçlar  $\mu\text{mol Trolox g}^{-1}$  TA olarak ifade edildi.

### 2.10.3. CUPRAC (Kuprik İyon İndirgeme Antioksidan Kapasite) Analizi

Kök ve sürgünlere ait CUPRAC aktivitesi Apak vd. (2004)'ne göre belirlendi. Reaksiyon karışımı, sulandırılmış 250  $\mu\text{L}$  bitki özütü üzerine 250'şer  $\mu\text{L}$  10 mM  $\text{CuCl}_2$ , 7,5 mM neocuproine ve 1M amonyum asetat tamponu (pH 7,0) eklenerek hazırlandı. Reaksiyon karışımı, oda sıcaklığında 30 dakika bekletildikten sonra UV-Vis spektrofotometrede 450 nm dalgaboyunda ölçüldü. Sonuçlar  $\mu\text{mol Trolox g}^{-1}$  TA olarak ifade edildi.

### 2.11. Fenolik Asit (FA) İçeriğinin LC-MS/MS Analizleri ile Belirlenmesi

Fenolik asit ekstraksiyonu Ayaz vd. (2005)'ne göre yapıldı. Her bir gruba ait kök ve sürgünlerden 2'şer gram taze örnek, % 0,01 BHT (butilhidroksitoluen) içeren %80 metanol (h/h) içerisinde ve 45 °C'de 5 dakika ısıtılarak özütlendi. Homojenat 8000 rpm'de santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant kısmı; F0 (doğrudan birincil ekstrakt, ham özüt), F1 (serbest formdaki fenolik asitler), F2 (ester formdaki fenolik asitler) ve F3 (glikozit formdaki fenolik asitler) fraksiyonlarının ve pellet kısmı ise F4 fraksiyonunun (ester-bağlı formdaki fenolik asitler) analizinde kullanılmak üzere ayrıldı.

Sıvı kromatografi-kütle spektrometresi/kütle spektrometresi (LC-MS/MS) analizleri, negatif modda çalışan elektrosprey iyonizasyon (ESI) kaynağı ile donatılmış üçlü kuadropole kütle spektrometresi ile Ultra Performance LCMS 8050 sistemi (Shimadzu, Japonya)'nde gerçekleştirildi. Örnekler, uygun ön kolon ile bir Acquity BEH C18 kolonuna (1.7  $\mu\text{m}$ , 3.0 mm x 50 mm, Waters, Milford, MA, USA) enjekte edildi ve kolon sıcaklığı 40 °C'de tutuldu. Su (A) ve asetonitril (B) içindeki 10 mmol  $\text{L}^{-1}$  formik asitten oluşan mobil faz, 0,4 mL/dakikalık akış hızında verildi. Doğrusal gradyan: %5 B'den 0,7 dk, %5-15 B'den 1,3 dk, izokratik 1 dk, %15-30 B'den 1,5 dk, %30-70 B'den 1,5 dk, %70-100 B'den 0,1 dk, izokratik 0,5 dk, %5 B'den 0,1 dk şeklinde uygulandı. Geri basınç, kromatografik çalışma sırasında 35 ila 45 MPa arasında değişti. Akan maddeler, bir elektrosprey kaynağına (desolvasyon sıcaklığı 300 °C, ısı bloğu sıcaklığı 400 °C ve kapillar voltaj 3,0 kV) verildi.

Hedef bileşiklerin standart çözeltileri ilk olarak 1 mM'lık derişimde metanol içinde hazırlandı. Daha sonra, mobil fazda kademeli olarak 0,01 ila 50 µM arasında değişen çalışma konsantrasyonlarına seyreltildi. Her bir ekstre, kuruyana kadar buharlaştırıldı ve 50 µL mobil faz ile yeniden çözüldü, 5 dakika süreyle sonikasyona tabi tutuldu ve enjeksiyondan önce 12,400 rpm'de 5 dakika santrifüjlendi. Tüm standartlar ve reaktifler (Sigma Aldrich Company, Çekya) mümkün olan en yüksek saflığa sahipti. Ölçümler üç tekrarlı olarak gerçekleştirildi ve sonuçlar ng g<sup>-1</sup> TA olarak ifade edildi.

### **2.12. Kök ve Sürgünlerin Hidrojen Peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) İçeriğinin Belirlenmesi**

Hidrojen peroksit içeriği Liu vd. (2000)'ne göre belirlendi. Taze örnekler (1 g) 3 mL %5 trikloroasetik asit (TCA) içerisinde homojenize edildikten sonra 10,000 rpm'de +4 °C'de 30 dakika santrifüjlendi. Reaksiyon karışımı, 1 mL özüt üzerine 0,5 mL %0,1 TiCl<sub>4</sub> (tityum klorür) ilave edilerek hazırlandı ve anında 410 nm dalgaboyunda UV-Vis spektrofotometrede ölçüldü. Sonuçlar nmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> TA olarak ifade edildi.

### **2.13. Kök ve Sürgünlerin Lipid Peroksidasyonunun Belirlenmesi**

Tiyobarbitirik Asit Reaktif Ürünleri (TBARS) içeriği Madhava-Rao ve Stresty (2000)'nin yöntemine göre belirlendi. Kök ve sürgün kısımlarına ait 1'er gram taze örnek %1 TCA (trikarboksilik asit) içerisinde homojenize edildi. Homojenat 10,000 rpm'de 15 dakika santrifüjlendi. Elde edilen süpernatanttan 1 mL alınarak üzerine 4 mL %0,5 TBA (tiyobarbitirik asit) eklenerek çözelti 95 °C'de 30 dakika boyunca inkübe edildi. Süre sonunda hazırlanan örnekler reaksiyonun durması için buzda 10 dakika bekletildi. Daha sonra 10,000 rpm'de ve 25 °C'de 5 dakika santrifüjlendi. Elde edilen süpernatant UV-Vis spektrofotometrede 520 nm dalgaboyunda ölçüldü. TBARS derişimi MDA (malondialdehit)'nin 155 mM<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup> ekstinksiyon (E) katsayısı kullanılarak belirlendi. Sonuçlar nmol g<sup>-1</sup> TA olarak ifade edildi.

#### 2.14. Kök ve Sürgünlerin Glutasyon (GSH) İçeriğinin Belirlenmesi

Glutasyon (GSH) içeriği Griffith (1980)'e göre belirlendi. Taze örnekler (0,5 g) 1 mM EDTA (etilendiamin tetraasetik asit) içeren %5'lik metafosforik asit içinde homojenize edildikten sonra homojenat 10,000 rpm'de 15 dakika santrifüjlendi. Elde edilen süpernatanttan 25 µL alınarak üzerine 250 mM K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 200 mM NADPH, 600 µM DTNB, 0,3 glutasyon redüktaz son hacim 1 mL olacak şekilde eklendi. Absorbans değişimi 3 dakika boyunca UV-Vis spektrofotometrede 412 nm dalgaboyunda ölçüldü. Ölçüm sonucunda GSH + GSSG (glutasyon disülfid) miktarı elde edildi. GSSG miktarını belirlemek için 25 µL ekstrakta 2-vinilpiridin eklenip 90 dakika 25 °C'de inkübe edildi. Glutasyon miktarı 0 - 5 µM konsantrasyonlarda GSH'nin kullanılmasıyla elde edilen standart grafik üzerinden hesaplandı. Sonuçlar µmol 100 g<sup>-1</sup> TA olarak ifade edildi.

#### 2.15. Kök ve Sürgünlerin Prolin İçeriğinin Belirlenmesi

Prolin içeriği Bates vd. (1973)'ne göre yapıldı. Kök ve sürgün kısımlarına ait kuru örnekler (0,1 g) 10 mL sülfosalisilik asit içerisinde (%3, *h/h*) homojenize edildikten sonra 5,000 rpm'de 20 dakika santrifüjlendi. Elde edilen süpernatantın 1 mL alınarak üzerine 1 mL glacial asetik asit ve 1 mL ninhidrin çözeltisi eklendi. Elde edilen karışım 1 saat boyunca 100 °C'ye ayarlanmış ETÜV (Nüve, FN 120, Ankara, Türkiye)'de bekletildi. Süre sonunda reaksiyon karışımı 10 dakika buzda bekletilerek reaksiyon sonlandırıldı. Daha sonra reaksiyon karışımına 3 mL toluen eklendi ve UV-Vis spektrofotometrede 520 nm dalgaboyunda ölçüldü. Sonuçlar µg g<sup>-1</sup> kuru ağırlık (KA) olarak ifade edildi.

#### 2.16. Kök ve Sürgünlerin Çözünabilir Şeker İçeriğinin Belirlenmesi

Şeker analizi için buğday fidelerinin sürgün ve kök kısımlarına ait 0,1'er gram liyofilize kuru örnek %80 (*h/h*) metanol ile homojenize edilerek santrifüjlendi. Elde edilen süpernatantın metanol içeriği evaporator (Heidolph, Germany) yardımıyla uzaklaştırıldı ve kalan su liyofilizatör (Christ, Alpha 1-2LD plus, Martin Christ Freeze Dryers, Osterode, Germany) ile tamamen kurutuldu. Kuru numuneler 5 mL deiyonize suda çözüldükten sonra

katı faz ekstraksiyonu (KFE) ile fraksiyonlandı. Katı faz ekstraksiyonundan elde edilen sulu fraksiyon şeker analizi için kullanıldı.

Şeker analizi için analiz koşulları Güney vd. (2013)'ne yöntemine göre yapıldı. Analizler; Refraktif İndeks Dedektörü (RID), dörtlü bir HPLC pompası, mikro vakum degazörü (MVD), UV/VIS dedektör, termostatik kolon bölmesi (TTC) ve standart mikro ve hazırlayıcı oto örnekleyici ile donatılmış bir Agilent 1100 HPLC (Palo, Alto, CA, USA) ile yapıldı. Kolon sıcaklığı 25 °C olan Nükleosil C18 karbohidrat analitik kolon (250 x 4.0 mm iç çap, 10 µm parçacık boyutu) kullanıldı. İzokratik elüsyon için akış hızı 2 mL/dakikaya ayarlandı ve mobil faz olarak asetonitril:su (79:21, *v/v*) kullanıldı. Tüm şekerlerin standart kalibrasyon eğrileri her bir şeker için kendi standardının alıkonma zamanı ile karşılaştırılarak hesaplandı. HP ChemStation (Hewlett- Packord, Palo, Alto, CA, USA) yazılımı pik alanlarını hesaplamak için kullanıldı. Çözünebilir şeker içeriği mg/100 g TA olarak ifade edildi. Toplam şeker içeriği, HPLC-RID'de belirlenen her bir bireysel şekerin toplamı olarak verildi.

## 2.17. İstatistiksel Analizler

Bütün analizler üç ( $n = 3$ ) tekerrürlü olarak yapıldı. Sonuçlar aritmetik ortalama  $\pm$  standart hata olarak verildi. Analizlerin sonunda elde edilen veriler Statistical Package for Social Sciences (SPSS Statistics Ver. 22.0, Chicago, USA) paket programı içerisinde yer alan tek-yönlü varyans analizi (one-way ANOVA) ile analiz edildi. Duncan çoklu aralık testi ve Dunnett testi ile ortalamalar arasındaki farklar  $P < 0,05$  önem seviyesinde karşılaştırıldı.



### 3. BULGULAR

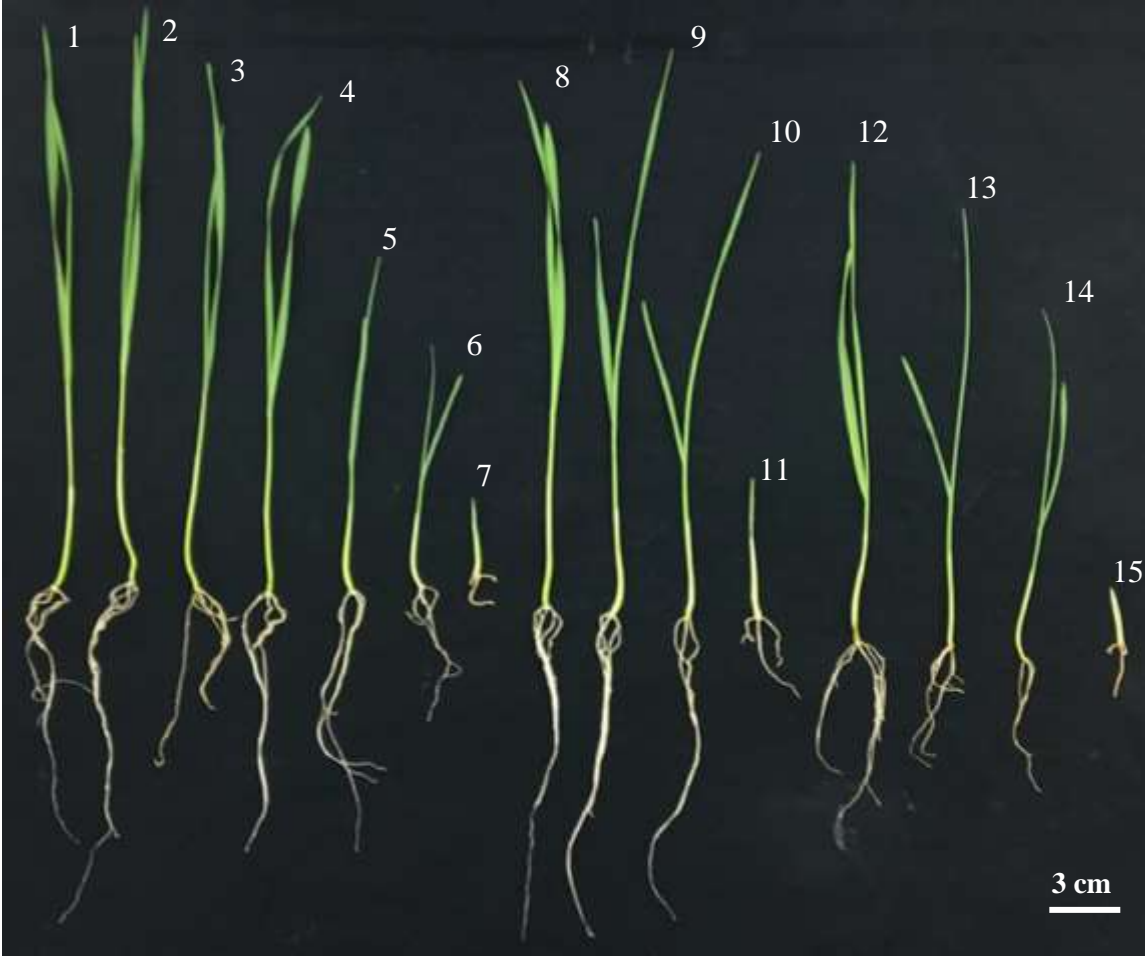
Bu çalışmada iyonize radyasyon ve Mel uygulamasının (ön-Mel veya Mel), buğday fidelerinin kök ve sürgününe ait morfolojik ölçümlere (uzunluk, yaprak alanı, taze ve kuru ağırlık), sürgün ozmotik potansiyeline, prolin ve çözünebilir şeker içeriğine, fotosentetik parametrelere (kl *a*, kl *b*, *Tkl*, *Tkar*, *Fv/Fm*), antioksidan enzim aktivitelerine (POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR, DHAR), PAL aktivitesine, TFM ve TF içeriğine, antioksidan kapasite (DPPH, FRAP ve CUPRAC) değerlerine, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğine, fenolik asit içeriğine, TBARS eşdeğerine ve toplam GSH (GSH + GSSG) içeriğine olan etkileri belirlenmiştir.

#### 3.1. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Temel Büyüme Parametreleri Üzerine Olan Etkisi

İyonize radyasyon (100, 200, 300 ve 400 Gy'lik  $\gamma$ -ışınlamaları) koşullarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları yapılan buğday fidelerinin morfolojik görünüşleri Şekil 3.1'de; kök ve sürgün kısımlarına ait boy uzunluğu, taze ağırlık, kuru ağırlık ve yaprak alanı değerleri ise Tablo 3.1'de yer almaktadır. Ayrıca bu uygulamaların buğday fidelerinin kök ve sürgünlerine ait tolerans indeksi (TI) Şekil 3.2'de verilmiştir.

Buğday fidelerin kök uzunluğu, IR uygulamaları ile birlikte istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalma göstermiştir. Kontrol grubunda kök uzunluğu 11,58 cm iken 100 Gy'de 10,18 cm'den 400 Gy'de 1,35 cm'ye kadar azalmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması, IR'in neden olduğu kök uzunluğundaki azalmayı tüm uygulama gruplarında iyileştirmiş ve kök uzunluğunu arttırmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise 100 ve 200 Gy radyasyon dozlarında kök uzunluğunu azaltmış, 300 ve 400 Gy'de ise IR'li kontrollerine kıyasla istatistiksel olarak önemli ( $P < 0,05$ , Tablo 3.1) bir değişme göstermemiştir (Şekil 3.1).

Buğday tohumlarına artan dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamaları, fidelerin sürgün uzunluğunu, kontrol grubuna kıyasla, istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Kontrol grubunda ortalama 26,62 cm olan sürgün uzunluğu, 400 Gy uygulama grubunda ortalama 3,36 cm'ye kadar azalmıştır. Bununla birlikte ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları sürgün uzunluğunu IR'li kontrollerine kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır (Tablo 3.1). Her iki Mel uygulamasında da sürgün uzunluğundaki en fazla artışın 300 Gy'de (ön-Mel  $\rightarrow$  2,1 kat, Mel  $\rightarrow$  1,4 kat) olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.1. Bezostaya-1 buğday çeşidinin IR ve Mel uygulama gruplarına ait morfolojik görünümü. Gruplar soldan sağa: 1) Kontrol, 2) ön-Mel, 3) Mel, 4) 100 Gy, 5) 200 Gy, 6) 300 Gy, 7) 400 Gy, 8) ön-Mel + 100 Gy, 9) ön-Mel + 200 Gy, 10) ön-Mel + 300 Gy, 11) ön-Mel + 400 Gy, 12) 100 Gy + Mel, 13) 200 Gy + Mel, 14) 300 Gy + Mel, 15) 400 Gy + Mel, Gy; Gray, Mel; melatonin, IR; iyonlaştırıcı radyasyon.

Kök kısmına ait taze ve kuru ağırlıklar yalnız IR uygulamaları yapılan gruplarda istatistiksel olarak önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azalmıştır. Gama ışını uygulamaları köklerde bitki başına taze ağırlığı kontrolde 65,48 mg'dan 400 Gy'de 12,3 mg'a; kuru ağırlığı ise kontrolde 4,92 mg'dan 400 Gy'de 1,35 mg'a kadar azaltmıştır. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları kök kısmına ait taze ve kuru ağırlıkları IR'li kontrollerine kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artırmıştır. Her iki Mel uygulamasında da kök taze ağırlığındaki en fazla artış 300 Gy'de (ön-Mel ile 2,3 kat ve Mel ile 1,2 kat artış), kuru ağırlıktaki ise 200 Gy'de (ön-Mel ile 2,1 kat ve Mel ile 1,2 kat artış) belirlenmiştir (Tablo 3.1).

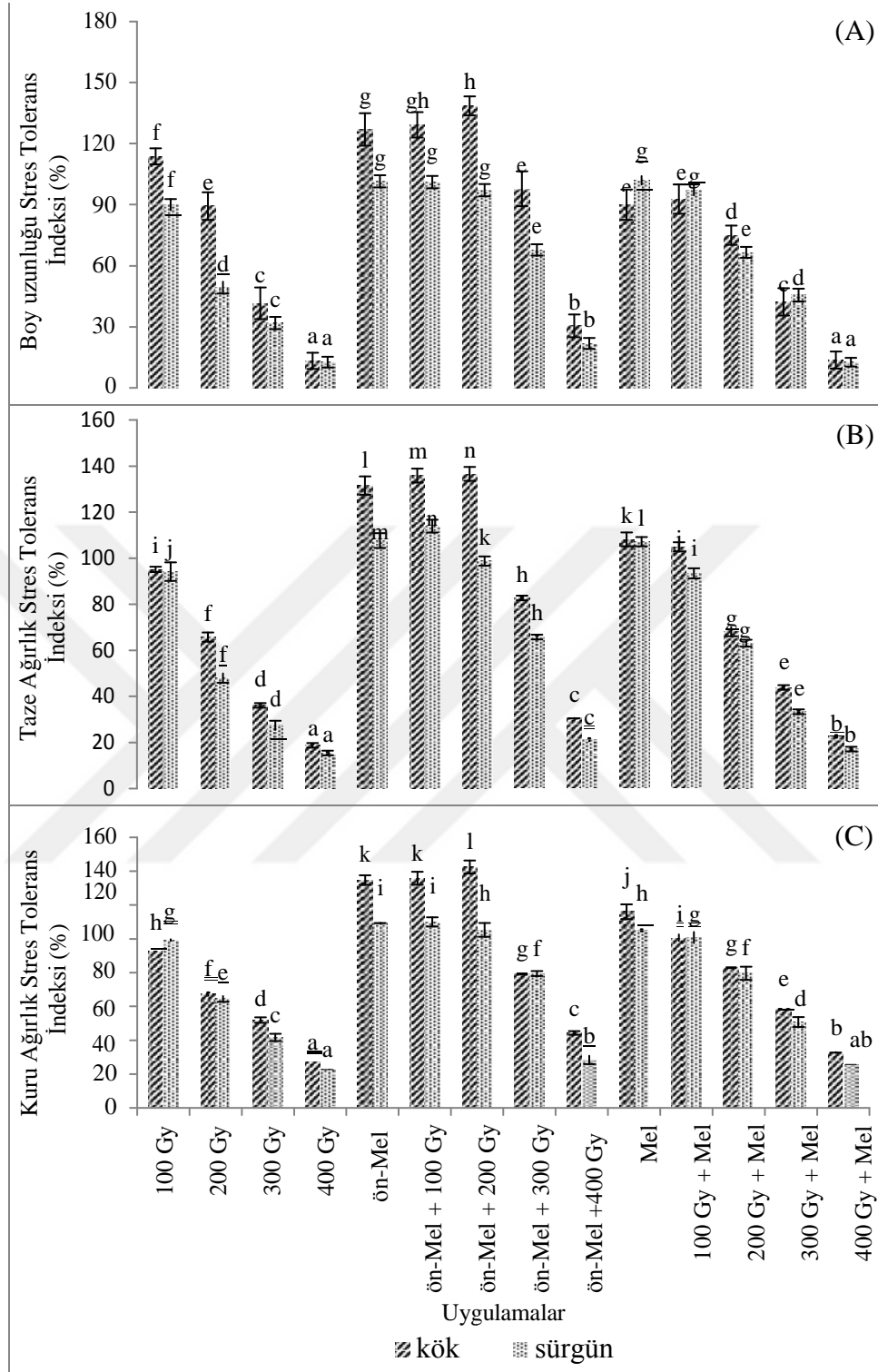
Tablo 3.1. Gama ışınlamasına (IR) maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi (ön-Mel) ve ekim sonrası (Mel) melatonin uygulamalarının fidelerin sürgün ve kök uzunluğuna, yaş ağırlığına, kuru ağırlığına ve yaprak alanına olan etkisi. Her değer ortalama  $\pm$  standart hata olarak belirtilmiştir (n = 3). Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Uygulama	Sürgün			
	Taze ağırlık (mg)	Kuru ağırlık (mg)	Uzunluk (cm)	Yaprak alanı (cm <sup>2</sup> )
kontrol (0 Gy)	232,29 $\pm$ 1,62 <sup>h</sup>	25,19 $\pm$ 0,41 <sup>g</sup>	26,62 $\pm$ 0,50 <sup>j</sup>	4,96 $\pm$ 0,14 <sup>j</sup>
100 Gy	216,69 $\pm$ 4,70 <sup>g</sup>	25,0 $\pm$ 0,35 <sup>g</sup>	23,95 $\pm$ 0,74 <sup>h</sup>	4,05 $\pm$ 0,13 <sup>h</sup>
200 Gy	111,76 $\pm$ 6,10 <sup>e</sup>	16,28 $\pm$ 0,46 <sup>e</sup>	13,11 $\pm$ 0,77 <sup>e</sup>	1,61 $\pm$ 0,07 <sup>e</sup>
300 Gy	63,93 $\pm$ 3,39 <sup>c</sup>	10,50 $\pm$ 0,46 <sup>c</sup>	8,48 $\pm$ 0,80 <sup>c</sup>	1,24 $\pm$ 0,07 <sup>c</sup>
400 Gy	36,05 $\pm$ 1,90 <sup>a</sup>	5,72 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	3,36 $\pm$ 0,70 <sup>a</sup>	0,48 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>
Ön-Mel	250,81 $\pm$ 7,18 <sup>i*</sup>	27,53 $\pm$ 0,22 <sup>i*</sup>	27,02 $\pm$ 0,80 <sup>k</sup>	5,39 $\pm$ 0,09 <sup>k*</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	265,41 $\pm$ 8,60 <sup>j*</sup>	27,70 $\pm$ 0,69 <sup>i*</sup>	26,92 $\pm$ 0,81 <sup>k*</sup>	4,99 $\pm$ 0,15 <sup>j*</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	230,15 $\pm$ 6,59 <sup>h*</sup>	26,52 $\pm$ 0,92 <sup>h*</sup>	25,87 $\pm$ 0,79 <sup>i*</sup>	3,89 $\pm$ 0,11 <sup>g*</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	151,95 $\pm$ 5,01 <sup>f*</sup>	20,02 $\pm$ 0,41 <sup>f*</sup>	18,04 $\pm$ 0,74 <sup>g*</sup>	2,85 $\pm$ 0,04 <sup>f*</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	48,19 $\pm$ 4,15 <sup>b*</sup>	7,15 $\pm$ 0,50 <sup>b*</sup>	5,81 $\pm$ 0,71 <sup>b*</sup>	1,11 $\pm$ 0,06 <sup>b*</sup>
Mel	248,53 $\pm$ 5,66 <sup>i</sup>	26,47 $\pm$ 0,19 <sup>h*</sup>	27,14 $\pm$ 0,55 <sup>k</sup>	5,04 $\pm$ 0,11 <sup>j</sup>
100 Gy + Mel	219,4 $\pm$ 5,63 <sup>g</sup>	25,38 $\pm$ 0,78 <sup>g</sup>	25,89 $\pm$ 0,72 <sup>i*</sup>	4,34 $\pm$ 0,17 <sup>i*</sup>
200 Gy + Mel	146,97 $\pm$ 6,71 <sup>f*</sup>	20,05 $\pm$ 0,84 <sup>f*</sup>	17,71 $\pm$ 0,71 <sup>f*</sup>	1,73 $\pm$ 0,04 <sup>e</sup>
300 Gy + Mel	77,63 $\pm$ 3,82 <sup>d*</sup>	12,79 $\pm$ 0,62 <sup>d*</sup>	12,13 $\pm$ 0,84 <sup>d*</sup>	1,38 $\pm$ 0,05 <sup>d*</sup>
400 Gy + Mel	40,09 $\pm$ 1,20 <sup>b*</sup>	6,48 $\pm$ 0,05 <sup>b*</sup>	3,37 $\pm$ 0,57 <sup>a</sup>	0,51 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>
Kök				
kontrol (0 Gy)	65,48 $\pm$ 3,10 <sup>h</sup>	4,92 $\pm$ 0,16 <sup>j</sup>	11,58 $\pm$ 0,52 <sup>h</sup>	
100 Gy	62,31 $\pm$ 1,57 <sup>g</sup>	4,56 $\pm$ 0,13 <sup>i</sup>	10,18 $\pm$ 0,40 <sup>g</sup>	
200 Gy	43,07 $\pm$ 3,14 <sup>e</sup>	3,32 $\pm$ 0,16 <sup>f</sup>	9,09 $\pm$ 0,69 <sup>e</sup>	
300 Gy	23,64 $\pm$ 3,03 <sup>c</sup>	2,56 $\pm$ 0,01 <sup>d</sup>	4,23 $\pm$ 0,79 <sup>c</sup>	
400 Gy	12,3 $\pm$ 1,50 <sup>a</sup>	1,35 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	1,35 $\pm$ 0,40 <sup>a</sup>	
Ön-Mel	86,14 $\pm$ 2,58 <sup>j</sup>	6,63 $\pm$ 0,12 <sup>l*</sup>	12,92 $\pm$ 0,81 <sup>i*</sup>	
Ön-Mel + 100 Gy	88,97 $\pm$ 2,68 <sup>j*</sup>	6,69 $\pm$ 0,01 <sup>l*</sup>	13,16 $\pm$ 0,63 <sup>i*</sup>	
Ön-Mel + 200 Gy	89,45 $\pm$ 1,68 <sup>j</sup>	7,02 $\pm$ 0,01 <sup>m*</sup>	14,11 $\pm$ 0,47 <sup>j*</sup>	
Ön-Mel + 300 Gy	53,81 $\pm$ 3,69 <sup>f*</sup>	3,90 $\pm$ 0,01 <sup>g*</sup>	9,96 $\pm$ 0,87 <sup>g*</sup>	
Ön-Mel + 400 Gy	19,6 $\pm$ 1,12 <sup>b*</sup>	2,18 $\pm$ 0,11 <sup>c*</sup>	3,1 $\pm$ 0,57 <sup>b*</sup>	
Mel	70,52 $\pm$ 2,01 <sup>i</sup>	5,71 $\pm$ 0,01 <sup>k*</sup>	9,16 $\pm$ 0,76 <sup>e*</sup>	
100 Gy + Mel	68,37 $\pm$ 2,62 <sup>hi</sup>	4,95 $\pm$ 0,01 <sup>j*</sup>	9,44 $\pm$ 0,73 <sup>f*</sup>	
200 Gy + Mel	44,59 $\pm$ 2,31 <sup>e</sup>	4,08 $\pm$ 0,11 <sup>h*</sup>	7,63 $\pm$ 0,48 <sup>d*</sup>	
300 Gy + Mel	28,71 $\pm$ 0,75 <sup>d*</sup>	2,89 $\pm$ 0,11 <sup>e*</sup>	4,3 $\pm$ 0,68 <sup>c</sup>	
400 Gy + Mel	14,88 $\pm$ 1,22 <sup>a*</sup>	1,61 $\pm$ 0,01 <sup>a*</sup>	1,39 $\pm$ 0,42 <sup>a</sup>	

Buğday tohumlarına  $\gamma$ -ışını uygulaması (100 – 400 Gy), sürgün taze ve kuru ağırlığını, kontrol grubuna kıyasla (sırasıyla, 232,29 ve 25,19 mg/bitki), istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. En fazla azalma 400 Gy uygulanan grupta (sırasıyla, 36,05 ve 5,72 mg/bitki) kaydedilmiştir (Tablo 3.1). Her iki Mel uygulaması da sürgün taze ve kuru ağırlıklarını, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması sürgün taze ve kuru ağırlıklarını en fazla 300 Gy’de (sırasıyla ~2,4 ve 1,9 kat) arttırırken, ekim sonrası Mel uygulaması en iyi artışı 200 Gy’de (sırasıyla ~1,3 ve 1,2 kat) sağlamıştır.

Buğday fidelerine ait yaprak alanı, artan dozlarda (100 – 400 Gy)  $\gamma$ -ışını uygulamaları ile kontrol grubuna kıyasla istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalmıştır. Kontrol fidelerinde 4,96 cm<sup>2</sup> olan yaprak alanı, 100 Gy’de 4,05 cm<sup>2</sup>’den 400 Gy’de 0,48 cm<sup>2</sup>’ye kadar toplamda yaklaşık 10 katlık bir azalma göstermiştir. Bununla birlikte ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları yaprak alanını IR’li kontrollerine kıyasla önemli derecede ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Yalnız IR uygulaması yapılan kontrollerine kıyasla, yaprak alanındaki artışın ön-Mel uygulaması ile en fazla 200 Gy uygulamasında (~2,4 kat), ekim sonrası Mel uygulaması ile de en fazla 300 Gy uygulamasında (~1,1 kat) olduğu belirlenmiştir.

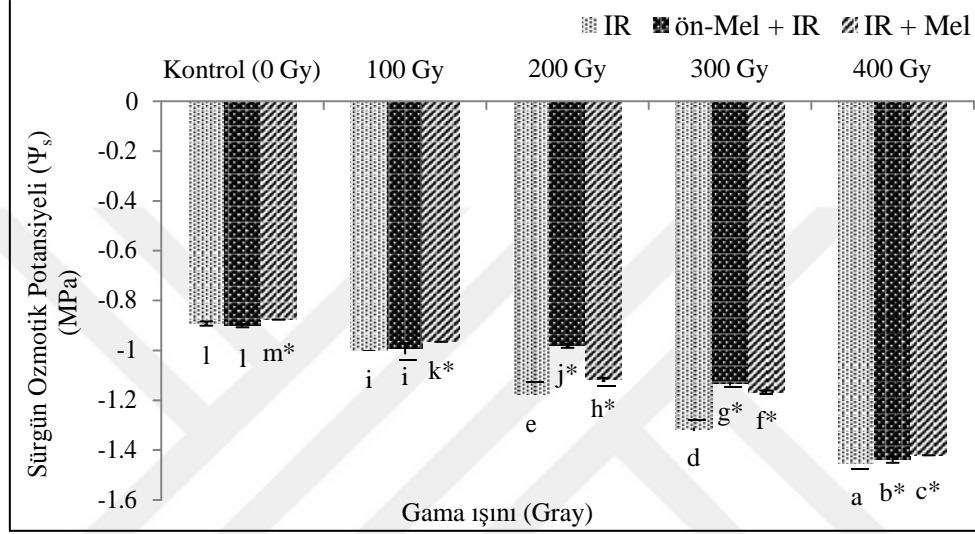
Şekil 3.2A, Şekil 3.2B ve Şekil 3.2C’de görüldüğü gibi, IR uygulaması (100 – 400 Gy,  $\gamma$ -ışını) yapılarak yetiştirilen buğday fidelerinde kök ve sürgünlerin uzunluklarına, taze ağırlıklarına ve kuru ağırlıklarına ait stres tolerans indeksleri artan IR uygulamaları boyunca istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalmıştır. Kök ve sürgünlerde stresin şiddeti ile birlikte azalan stres tolerans indeksi, ön-Mel uygulaması ile önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) iyileştirilmiştir. Yalnızca radyasyon uygulaması yapılan gruplara kıyasla, kök ve sürgün uzunluklarına ve taze ve kuru ağırlıklarına ait stres tolerans indekslerinin ön-Mel uygulaması yapılan gruplarda daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte ekim sonrası Mel uygulamasının, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, kök uzunluğuna ait stres tolerans indeksini düşük dozlardaki (100 – 200 Gy) uygulamalarda daha da azalttığı, yüksek dozdaki (300 – 400 Gy) uygulamalarda ise önemli bir fark oluşturacak düzeyde ( $P < 0,05$ ) etki göstermediği belirlenmiştir. Buna karşın sürgün uzunluğuna ait stres tolerans indeksini IR’li kontrollerine kıyasla daha da arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca ekim sonrası Mel uygulamasının, kök ve sürgünlerin taze ve kuru ağırlıklarına ait stres tolerans indekslerini, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığı belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının IR koşullarında buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki tolerans indeksi değişimi. A) kök/sürgün uzunluğuna ait stres tolerans indeksi, B) Kök/sürgün taze ağırlığına ait stres tolerans indeksi, C) Kök/sürgün kuru ağırlığına ait stres tolerans indeksi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir.

### 3.2. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Sürgün Ozmotik Potansiyeli ( $\Psi_s$ ) Üzerine Olan Etkisi

Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının sürgün ozmotik potansiyeli ( $\Psi_s$ ) üzerindeki etkisi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgün ozmotik potansiyeli üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

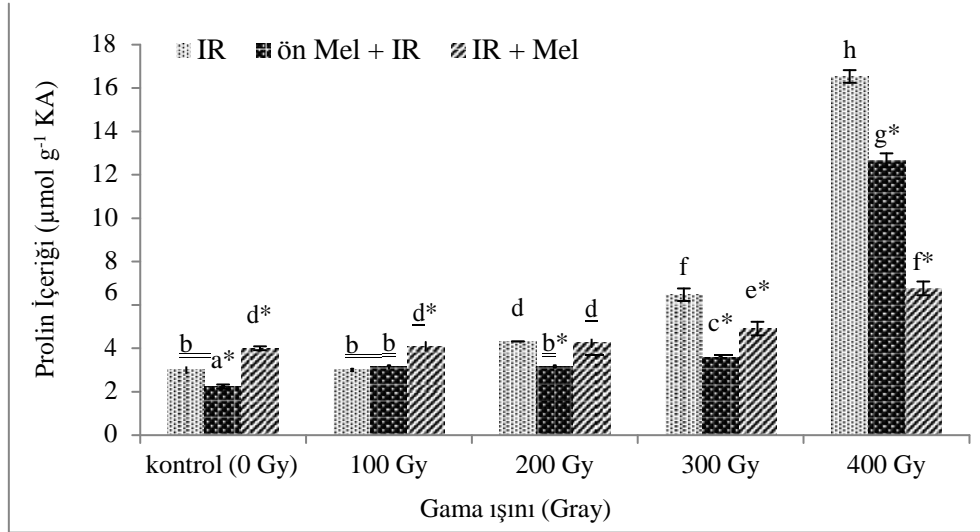
Buğday tohumlarına artan dozlarda gama ışını muamelesi sürgünlerin  $\Psi_s$  seviyesini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Herhangi bir uygulama yapılmayan bitkilerde -0,89 MPa olan  $\Psi_s$ , radyasyon uygulaması ile birlikte 100 Gy'de -1,00 MPa'dan 400 Gy'de -1,46 MPa'ya kadar kademeli bir şekilde azalma göstermiştir. Osmotik potansiyel seviyesi, ön-Mel uygulamasında 100 Gy'de -0,99 MPa'dan 400 Gy'de -1,44 Mpa'ya; ekim sonrası Mel uygulamasında ise 100 Gy'de -0,96'dan 400 Gy'de -1,42 MPa'ya kadar azalmıştır. Her iki Mel uygulamasının da, yalnızca IR uygulaması yapılan gruplara kıyasla,  $\Psi_s$ 'li arttırdığı saptanmıştır. Ayrıca, en yüksek  $\Psi_s$  artışının ön-Mel uygulaması ile 200 ve 300 Gy'de (~%17 ve ~%14'lük artış), ekim sonrası Mel uygulaması ile de 300 Gy'de (~%11'lik bir artış) olduğu belirlenmiştir.

### 3.3. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Bitkinin Kök ve Sürgünlerinde Prolin (pro) İçeriğine Olan Etkisi

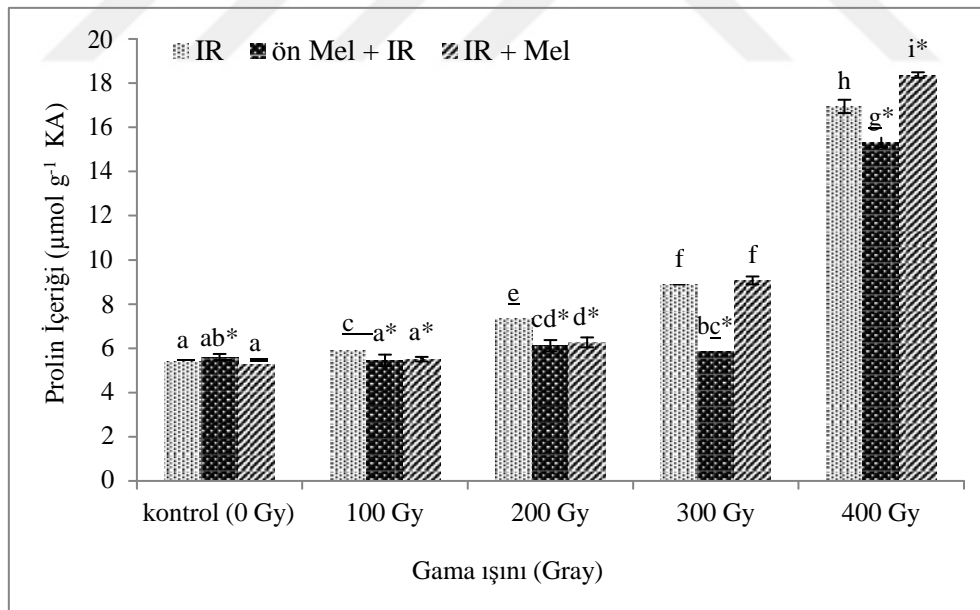
Artan dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi (ön-Mel) ve ekim sonrası Mel uygulamalarının bitkinin kök ve sürgün kısımlarındaki prolin (pro) içeriğine olan etkisi Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.

Buğday tohumlarına  $\gamma$ -ışını uygulaması, buğday fidelerinin köklerindeki pro içeriğini artan  $\gamma$ -ışınlama dozlarına paralel olarak önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Özellikle 400 Gy uygulanan bitkilerin köklerindeki pro birikimi ( $16,53 \mu\text{mol g}^{-1} \text{KA}$ ), herhangi bir uygulamaya maruz bırakılmayan kontrol grubuna kıyasla ( $2,99 \mu\text{mol g}^{-1} \text{KA}$ ), yaklaşık 5,5 kat artmıştır. İyonize radyasyondan kaynaklanan pro birikimi her iki Mel uygulama tipi ile (ön-Mel, Mel) istatistiksel olarak önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azalma göstermiştir. Yalnızca IR uygulanan gruplarla karşılaştırıldığında, ekim öncesi Mel uygulamasının 200, 300 ve 400 Gy dozlarında kök kısmındaki pro içeriğini sırasıyla yaklaşık 1,4, 1,8 ve 1,3 kat azalttığı kaydedilmiştir. Ayrıca ekim sonrası Mel uygulamasının, IR'li kontrollerine kıyasla, 100 Gy'de pro birikimini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığı, 200 Gy'de önemli bir fark oluşturacak seviyede ( $P < 0,05$ ) etki göstermediği, 300 ve 400 Gy'lik radyasyon uygulamalarında ise prolin birikimini istatistiksel olarak önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azalttığı (sırasıyla ~1,3 ve 2,4 kat azalma) belirlenmiştir.

Bitkinin kök kısmına benzer şekilde sürgün kısmında da pro içeriği artan dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamaları (100 – 400 Gy) ile istatistiksel olarak önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) artmıştır. Herhangi bir uygulamaya maruz bırakılmayan kontrol bitkilerinde pro içeriği  $5,40 \mu\text{mol g}^{-1} \text{KA}$  iken 100 Gy'den 400 Gy'e kadar tüm IR uygulamaları boyunca (100 Gy;  $5,91 \rightarrow 400 \text{ Gy}$ ;  $16,95 \mu\text{mol g}^{-1} \text{KA}$ ) kademeli bir artış sergilemiştir. İyonize radyasyon uygulamaları ile sürgünlerde artan pro içeriği, her iki Mel uygulaması ile (ön-Mel, Mel) de genel olarak değişmiştir. Ekim öncesi Mel uygulamasının 100 Gy'de önemli ( $P < 0,05$ ) bir değişmeye neden olmadığı, ancak 200, 300 ve 400 Gy uygulamalarında yüksek pro içeriğini, IR'li kontrollerine kıyasla, önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı (sırasıyla ~1,2, 1,5 ve 1,1 kat) tespit edilmiştir. Bununla beraber ekim sonrası Mel uygulamasının ise sürgünlerdeki pro içeriğini, IR'li kontrollerine kıyasla, 100 ve 200 Gy uygulanan gruplarda azalttığı ve 300 Gy'de ise istatistiksel olarak önemli ( $P < 0,05$ ) bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir. Buna karşın 400 Gy'de pro içeriğini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.4. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki pro içeriği üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.5. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerdeki pro içeriği üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



### 3.4. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Bitkinin Kök ve Sürgün Kısımlarındaki Çözünebilir Şeker ve Fruktan İçeriklerine Olan Etkisi

Farklı gama ışınlama dozlarına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi (ön-Mel) ve ekim sonrası Mel uygulamalarının bitkinin kök ve sürgünlerindeki çözünebilir şeker içerikleri üzerine olan etkisi Tablo 3.2’de, fruktan içeriğine etkisi ise Şekil 3.6’da verilmiştir.

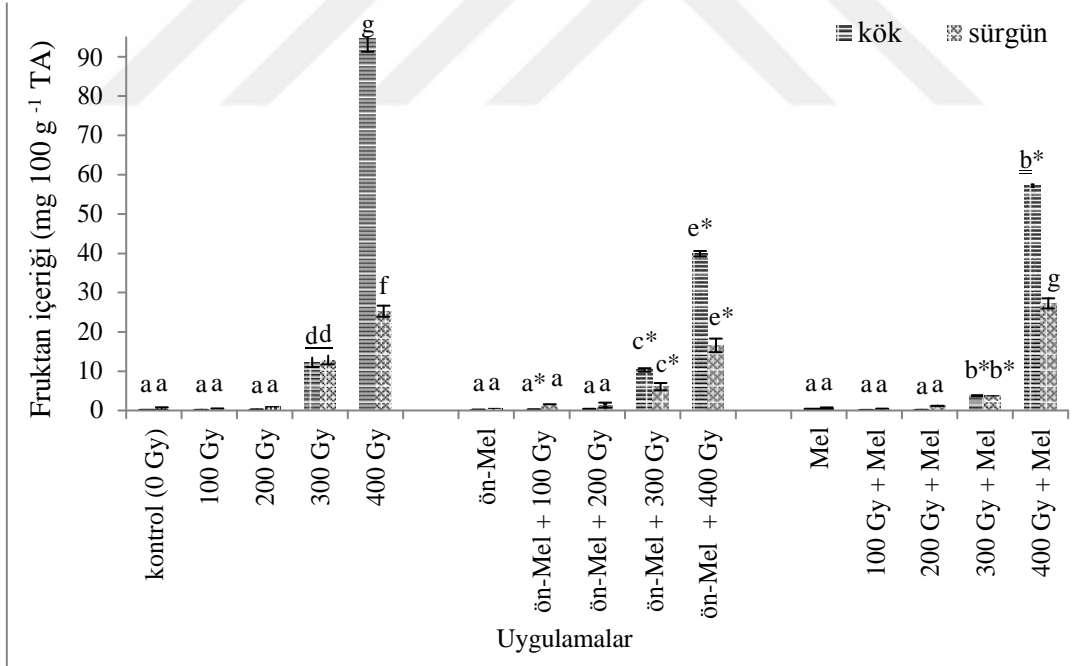
Çalışmada buğday fidelerinin köklerine ait IR uygulama gruplarında fruktoz, glukoz ve sükroz içeriklerinin kontrol grubuna kıyasla (sırasıyla 78,39, 107,02 ve 53,66 mg 100 g<sup>-1</sup>) önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) arttığı belirlenmiştir. En fazla artışın meydana geldiği 400 Gy radyasyon dozunda fruktoz, glukoz ve sükroz içeriklerinin kontrole kıyasla sırasıyla yaklaşık 2,5, 2,9 ve 10,8 kat artıkları tespit edilmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları, köklerdeki şeker içeriğini IR’li kontrollerine göre önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) değiştirmiştir. Ekim öncesi Mel uygulaması fruktoz, sükroz ve toplam şeker içeriklerini, 400 Gy hariç, tüm IR dozlarında; glukoz içeriğini ise IR’li kontrollerine kıyasla tüm gruplarda azaltmıştır. Ayrıca ekim sonrası Mel uygulamasının, yalnızca IR uygulanan gruplarıyla karşılaştırıldığında, kök sükroz içeriğini tüm IR uygulamalarında azalttığı; fruktoz, glukoz ve toplam şeker içeriklerini düşük dozlarda IR uygulanan gruplarda (100 – 200 Gy) arttırdığı yüksek dozlarda (300 – 400 Gy) ise azalttığı belirlenmiştir.

Artan dozlarda IR uygulamaları buğday fidelerinin sürgünlerindeki bireysel şeker ve toplam şeker içeriklerini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Sürgünlerde toplam şeker içeriği IR uygulamaları ile birlikte kontrolde 547,53’ten 400 Gy’de 3315,07 mg 100 g<sup>-1</sup>’a kadar yaklaşık 6 kat artmıştır. Ayrıca söz konusu artış; fruktozda 4,5 kat, glukozda 5,2 kat ve sükrozda ise 10,5 kat olarak kaydedilmiştir. Herhangi bir uygulamaya maruz bırakılmamış kontrol grubu ile karşılaştırıldığında, ön-Mel uygulaması 400 Gy radyasyon dozunda fruktoz içeriğini 1,8 kat, glukoz içeriğini 3,2 kat, sükroz içeriğini 4,7 kat ve toplam şeker içeriğini ise 3,2 kat arttırarak IR’in neden olduğu şeker birikimini önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azaltmayı sağlamıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması, IR’li kontrollerine kıyasla, sürgündeki sükroz içeriğini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Kontrol grubuna göre, 400 Gy’de 10,5 kat artan sükroz içeriği, ekim sonrası Mel uygulaması ile (400 Gy + Mel) sadece 2,5 katlık bir artış göstermiştir. Ayrıca ekim sonrası Mel uygulaması, sürgündeki diğer bireysel (fruktoz ve glukoz) ve toplam şeker içeriklerini de IR’li kontrollerine kıyasla (özellikle 300 ve 400 Gy’de) azaltmıştır.

Tablo 3.2. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının kök ve sürgünlerin çözünabilir şeker içeriğine ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$  TA) etkisi. Her değer ortalama  $\pm$  standart hata olarak belirtilmiştir ( $n = 3$ ). Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

<b>Kök</b>				
<b>Uygulamalar</b>	<b>Fruktoz</b>	<b>Glukoz</b>	<b>Sükroz</b>	<b><math>\Sigma</math>Şeker</b>
kontrol (0 Gy)	78,39 $\pm$ 2,37 <sup>b</sup>	107,02 $\pm$ 2,78 <sup>a</sup>	53,66 $\pm$ 4,82 <sup>c</sup>	240,38 $\pm$ 6,58 <sup>b</sup>
100 Gy	87,66 $\pm$ 3,21 <sup>bcd</sup>	109,80 $\pm$ 3,36 <sup>a</sup>	44,05 $\pm$ 1,10 <sup>bc</sup>	239,67 $\pm$ 2,73 <sup>b</sup>
200 Gy	122,27 $\pm$ 3,67 <sup>e</sup>	170,42 $\pm$ 0,0 <sup>b</sup>	135,62 $\pm$ 8,49 <sup>f</sup>	518,76 $\pm$ 17,75 <sup>g</sup>
300 Gy	155,11 $\pm$ 8,34 <sup>f</sup>	216,60 $\pm$ 8,03 <sup>c</sup>	312,93 $\pm$ 8,03 <sup>h</sup>	677,18 $\pm$ 27,79 <sup>i</sup>
400 Gy	194,90 $\pm$ 6,13 <sup>g</sup>	306,72 $\pm$ 29,96 <sup>d</sup>	581,47 $\pm$ 11,17 <sup>j</sup>	1069,79 $\pm$ 19,56 <sup>j</sup>
Ön-Mel	58,68 $\pm$ 4,25 <sup>a</sup>	82,90 $\pm$ 13,96 <sup>a</sup>	18,40 $\pm$ 7,14 <sup>a*</sup>	159,99 $\pm$ 21,49 <sup>a</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	81,47 $\pm$ 6,03 <sup>b</sup>	83,80 $\pm$ 1,97 <sup>a</sup>	19,54 $\pm$ 0,01 <sup>a*</sup>	175,05 $\pm$ 0,01 <sup>a*</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	84,41 $\pm$ 0,71 <sup>bc*</sup>	95,27 $\pm$ 3,89 <sup>a*</sup>	20,27 $\pm$ 2,17 <sup>a*</sup>	188,48 $\pm$ 3,21 <sup>a*</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	115,52 $\pm$ 2,24 <sup>e*</sup>	130,69 $\pm$ 10,03 <sup>a*</sup>	70,14 $\pm$ 11,35 <sup>d*</sup>	344,09 $\pm$ 28,17 <sup>d*</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	268,95 $\pm$ 21,26 <sup>h*</sup>	305,71 $\pm$ 8,38 <sup>d</sup>	603,24 $\pm$ 27,02 <sup>k</sup>	1085,25 $\pm$ 14,56 <sup>j</sup>
Mel	96,43 $\pm$ 0,01 <sup>cd</sup>	150,53 $\pm$ 12,35 <sup>b*</sup>	33,21 $\pm$ 0,01 <sup>ab*</sup>	285,76 $\pm$ 0,01 <sup>c*</sup>
100 Gy + Mel	99,24 $\pm$ 3,65 <sup>d*</sup>	155,45 $\pm$ 1,81 <sup>b*</sup>	26,80 $\pm$ 5,18 <sup>a*</sup>	294,22 $\pm$ 24,10 <sup>c*</sup>
200 Gy + Mel	123,50 $\pm$ 5,55 <sup>e</sup>	157,92 $\pm$ 9,37 <sup>b*</sup>	94,83 $\pm$ 11,07 <sup>e*</sup>	377,66 $\pm$ 24,83 <sup>e*</sup>
300 Gy + Mel	146,38 $\pm$ 19,30 <sup>f*</sup>	164,62 $\pm$ 10,50 <sup>b</sup>	190,97 $\pm$ 9,14 <sup>g*</sup>	425,69 $\pm$ 13,11 <sup>f*</sup>
400 Gy + Mel	149,78 $\pm$ 17,80 <sup>f</sup>	171,78 $\pm$ 22,15 <sup>b*</sup>	344,19 $\pm$ 17,08 <sup>i*</sup>	648,49 $\pm$ 45,75 <sup>f*</sup>
<b>Sürgün</b>				
kontrol (0 Gy)	155,58 $\pm$ 8,62 <sup>b</sup>	285,15 $\pm$ 0,35 <sup>a</sup>	109,99 $\pm$ 12,89 <sup>ab</sup>	547,53 $\pm$ 3,18 <sup>a</sup>
100 Gy	233,51 $\pm$ 15,18 <sup>e</sup>	469,35 $\pm$ 21,70 <sup>b</sup>	155,92 $\pm$ 0,67 <sup>de</sup>	861,93 $\pm$ 50,64 <sup>c</sup>
200 Gy	321,72 $\pm$ 2,35 <sup>i</sup>	702,46 $\pm$ 75,16 <sup>d</sup>	233,58 $\pm$ 20,06 <sup>f</sup>	1315,93 $\pm$ 50,93 <sup>g</sup>
300 Gy	468,38 $\pm$ 17,4 <sup>j</sup>	1104,12 $\pm$ 59,57 <sup>f</sup>	715,78 $\pm$ 16,31 <sup>i</sup>	2331,96 $\pm$ 31,40 <sup>j</sup>
400 Gy	694,71 $\pm$ 9,63 <sup>l</sup>	1494,82 $\pm$ 48,01 <sup>h</sup>	1160,11 $\pm$ 14,88 <sup>j</sup>	3315,07 $\pm$ 17,27 <sup>k</sup>
Ön-Mel	201,07 $\pm$ 0,01 <sup>c*</sup>	548,08 $\pm$ 35,57 <sup>c*</sup>	172,61 $\pm$ 14,98 <sup>e*</sup>	997,60 $\pm$ 97,31 <sup>d*</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	138,16 $\pm$ 4,04 <sup>a*</sup>	416,01 $\pm$ 2,52 <sup>b*</sup>	128,47 $\pm$ 4,19 <sup>bc*</sup>	708,01 $\pm$ 48,26 <sup>b*</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	145,05 $\pm$ 11,72 <sup>ab*</sup>	419,64 $\pm$ 19,95 <sup>b*</sup>	135,55 $\pm$ 4,54 <sup>cd*</sup>	712,06 $\pm$ 38,04 <sup>b*</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	220,62 $\pm$ 18,57 <sup>de*</sup>	579,98 $\pm$ 52,42 <sup>c*</sup>	138,30 $\pm$ 8,72 <sup>cd*</sup>	936,15 $\pm$ 36,72 <sup>d*</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	268,64 $\pm$ 5,54 <sup>g*</sup>	927,67 $\pm$ 65,74 <sup>e*</sup>	519,87 $\pm$ 21,83 <sup>h*</sup>	1750,41 $\pm$ 38,94 <sup>h*</sup>
Mel	214,07 $\pm$ 3,67 <sup>cd</sup>	477,90 $\pm$ 19,10 <sup>b*</sup>	93,58 $\pm$ 2,12 <sup>a*</sup>	766,40 $\pm$ 36,95 <sup>b*</sup>
100 Gy + Mel	249,64 $\pm$ 6,08 <sup>f</sup>	656,67 $\pm$ 20,14 <sup>d*</sup>	140,93 $\pm$ 3,03 <sup>cd*</sup>	1077,97 $\pm$ 23,46 <sup>e*</sup>
200 Gy + Mel	302,65 $\pm$ 1,94 <sup>h*</sup>	726,10 $\pm$ 39,13 <sup>d</sup>	168,66 $\pm$ 2,70 <sup>e*</sup>	1161,74 $\pm$ 52,83 <sup>f*</sup>
300 Gy + Mel	477,51 $\pm$ 8,22 <sup>j</sup>	1089,19 $\pm$ 33,00 <sup>f</sup>	245,41 $\pm$ 23,07 <sup>f*</sup>	1802,03 $\pm$ 32,26 <sup>h*</sup>
400 Gy + Mel	524,43 $\pm$ 5,22 <sup>k*</sup>	1225,60 $\pm$ 36,20 <sup>g*</sup>	270,65 $\pm$ 33,98 <sup>g*</sup>	2043,79 $\pm$ 10,97 <sup>i*</sup>

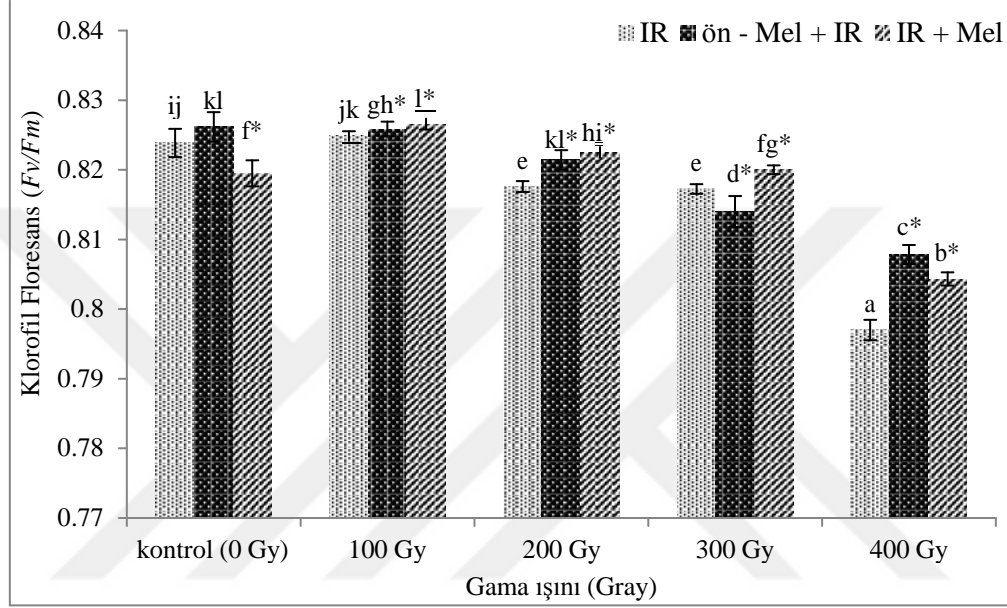
Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, buğday fidelerinin kök ve sürgün kısımlarına ait fruktan içeriği düşük dozdaki IR uygulamalarında (100 ve 200 Gy) istatistiksel olarak farklılık göstermezken, yüksek dozlarda (300 ve 400 Gy) kontrol grubuna kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artış göstermiştir. Kök fruktan içeriği kontrol grubunda  $0,15 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  iken 300 Gy radyasyon uygulamasında  $12,26 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  ve 400 Gy’de ise  $94,72 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  olarak kaydedilmiştir. Sürgün fruktan içeriği ise kontrol grubunda  $0,46 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ , 300 ve 400 Gy radyasyon dozlarında ise sırasıyla  $12,86$  ve  $25,28 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  olarak tespit edilmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi de buğday fidelerinin köklerinde ve sürgünlerinde IR’den kaynaklanan yüksek fruktan içeriğini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Kökte ön-Mel uygulaması, yalnızca IR uygulanan gruplarıyla karşılaştırıldığında, 300 ve 400 Gy’de fruktan içeriğini sırasıyla 1,2 ve 2,4 kat; sürgünde ise sırasıyla 2,1 ve 1,5 kat azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise kök ve sürgünlerde, özellikle 300 Gy’de fruktan birikimi üzerinde önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) bir azalma (sırasıyla 3,2 ve 3,5 kat) göstermiştir.



Şekil 3.6. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının kök ve sürgünlerin fruktan içeriğine etkisi. Kök ve sürgünler ayrı olacak şekilde her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

### 3.5. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Klorofil Floresans ( $F_v/F_m$ ) Değerleri Üzerine Olan Etkisi

Artan dozlarda  $\gamma$ -ışınlamalarına maruz bırakılan buğday tohumlarında ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının klorofil floresans ( $F_v/F_m$ ) değerleri üzerine olan etkisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının yaprak klorofil floresans ( $F_v/F_m$ ) değerlerine etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Fotosistem II (PS II) etkinliği olarak da ifade edilen klorofil floresansı ( $F_v/F_m$ )’nın, IR uygulama gruplarında, kontrol grubuna kıyasla (0,824), istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalma gösterdiği ve en fazla azalmanın 400 Gy’de (0,797) olduğu belirlenmiştir. Ön -Mel uygulaması, klorofil floresans değerlerinde stres kaynaklı oluşan indirgenmeyi tüm IR uygulamalarında (300 Gy hariç) önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Benzer şekilde, ekim sonrası Mel uygulaması, IR uygulamalarının neden olduğu azalmayı tüm gruplarda iyileştirmiştir. IR uygulaması ile en fazla azalmanın gerçekleştiği 400 Gy radyasyon dozunda  $F_v/F_m$  oranı; ön-Mel uygulaması ile 0,808, ekim sonrası Mel uygulaması ile 0,804 olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.7).

### 3.6. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Fidelerdeki Fotosentetik Pigment (kl *a*, kl *b*), Toplam klorofil (Tkl) ve Toplam Karotenoid (Tkar) İçeriğine Etkisi

Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının, fidelerin yaprak kısmındaki fotosentetik pigment (kl *a*, kl *b*), Tkl ve Tkar içeriğine olan etkisi Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının klorofil ve karotenoid içeriğine (mg/100 g TA) olan etkisi. Her değer ortalama  $\pm$  standart hata olarak belirtilmiştir (n = 3). Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Uygulama	kl <i>a</i>	kl <i>b</i>	kl <i>a/b</i>	Tkl	Tkar
<b>kontrol (0 Gy)</b>	72,59 $\pm$ 0,79 <sup>f</sup>	24,85 $\pm$ 0,28 <sup>d</sup>	2,92 $\pm$ 0,03 <sup>ij</sup>	97,41 $\pm$ 0,92 <sup>e</sup>	15,43 $\pm$ 0,09 <sup>g</sup>
<b>100 Gy</b>	90,2 $\pm$ 0,61 <sup>h</sup>	29,9 $\pm$ 0,82 <sup>h</sup>	2,98 $\pm$ 0,01 <sup>k</sup>	120,48 $\pm$ 0,69 <sup>g</sup>	16,29 $\pm$ 0,10 <sup>i</sup>
<b>200 Gy</b>	103,01 $\pm$ 0,07 <sup>l</sup>	35,25 $\pm$ 0,75 <sup>j</sup>	2,89 $\pm$ 0,03 <sup>i</sup>	138,71 $\pm$ 1,51 <sup>k</sup>	18,20 $\pm$ 0,14 <sup>k</sup>
<b>300 Gy</b>	65,7 $\pm$ 0,71 <sup>d</sup>	26,82 $\pm$ 0,54 <sup>f</sup>	2,45 $\pm$ 0,04 <sup>e</sup>	93,08 $\pm$ 1,81 <sup>d</sup>	7,73 $\pm$ 0,18 <sup>d</sup>
<b>400 Gy</b>	10,3 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup>	7,91 $\pm$ 0,41 <sup>a</sup>	1,30 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	21,99 $\pm$ 0,57 <sup>a</sup>	1,71 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup>
<b>Ön-Mel</b>	93,02 $\pm$ 1,83 <sup>i*</sup>	32,13 $\pm$ 0,52 <sup>i*</sup>	2,89 $\pm$ 0,01 <sup>i</sup>	125,12 $\pm$ 2,34 <sup>h*</sup>	17,58 $\pm$ 0,35 <sup>j*</sup>
<b>Ön-Mel + 100 Gy</b>	105,28 $\pm$ 0,81 <sup>m*</sup>	35,58 $\pm$ 0,35 <sup>jk*</sup>	2,96 $\pm$ 0,01 <sup>jk</sup>	136,31 $\pm$ 0,61 <sup>i*</sup>	18,50 $\pm$ 0,17 <sup>k*</sup>
<b>Ön-Mel + 200 Gy</b>	100,62 $\pm$ 0,35 <sup>k*</sup>	35,71 $\pm$ 0,32 <sup>jk</sup>	2,82 $\pm$ 0,02 <sup>h*</sup>	140,83 $\pm$ 1,15 <sup>l*</sup>	20,12 $\pm$ 0,03 <sup>l*</sup>
<b>Ön-Mel + 300 Gy</b>	69,53 $\pm$ 0,95 <sup>e*</sup>	28,53 $\pm$ 0,34 <sup>g*</sup>	2,44 $\pm$ 0,01 <sup>e</sup>	98,04 $\pm$ 1,29 <sup>e*</sup>	14,28 $\pm$ 0,25 <sup>e*</sup>
<b>Ön-Mel + 400 Gy</b>	30,64 $\pm$ 0,14 <sup>b*</sup>	15,8 $\pm$ 0,35 <sup>b*</sup>	1,94 $\pm$ 0,03 <sup>b*</sup>	46,43 $\pm$ 0,48 <sup>b*</sup>	3,06 $\pm$ 0,04 <sup>b*</sup>
<b>Mel</b>	71,81 $\pm$ 0,36 <sup>f</sup>	25,69 $\pm$ 0,87 <sup>e</sup>	2,75 $\pm$ 0,02 <sup>g*</sup>	97,91 $\pm$ 0,5 <sup>e</sup>	14,70 $\pm$ 0,39 <sup>f*</sup>
<b>100 Gy + Mel</b>	87,55 $\pm$ 0,99 <sup>g*</sup>	28,44 $\pm$ 0,23 <sup>g*</sup>	2,97 $\pm$ 0,01 <sup>k</sup>	116,14 $\pm$ 1,01 <sup>f*</sup>	15,89 $\pm$ 0,28 <sup>h*</sup>
<b>200 Gy + Mel</b>	94,83 $\pm$ 1,63 <sup>i*</sup>	36,2 $\pm$ 0,90 <sup>k</sup>	2,58 $\pm$ 0,04 <sup>f*</sup>	132,36 $\pm$ 0,17 <sup>h*</sup>	18,38 $\pm$ 0,21 <sup>k</sup>
<b>300 Gy + Mel</b>	65,46 $\pm$ 0,59 <sup>d</sup>	28,18 $\pm$ 0,32 <sup>g*</sup>	2,32 $\pm$ 0,02 <sup>d*</sup>	93,62 $\pm$ 0,83 <sup>d</sup>	7,91 $\pm$ 0,29 <sup>d</sup>
<b>400 Gy + Mel</b>	35,29 $\pm$ 0,38 <sup>c*</sup>	17,05 $\pm$ 0,69 <sup>c*</sup>	2,07 $\pm$ 0,06 <sup>c*</sup>	52,33 $\pm$ 1,07 <sup>c*</sup>	4,46 $\pm$ 0,20 <sup>c*</sup>

Yapraklardaki tüm fotosentetik pigment (kl *a*, kl *b*, Tkl ve Tkar) içerikleri, kontrol grubuyla kıyaslandığında, düşük dozlarda (100 ve 200 Gy) artarken yüksek dozlarda (300 ve 400 Gy) azalarak IR uygulama grupları boyunca benzer bir eğilim sergilemiştir. Klorofil *a/b* oranı ise 100 Gy'de kontrole kıyasla artış gösterip, sonraki artan IR dozlarında ise azalmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması buğday yapraklarında, yalnızca IR uygulaması yapılan gruplara kıyasla, tüm IR dozları boyunca daha yüksek fotosentetik pigment (kl *a*,

kl *b*, Tkl ve Tkar) içeriği ile sonuçlanmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise özellikle kl *a* içeriğini 400 Gy'de, kl *b* ve Tkar içeriklerini 200, 300 ve 400 Gy'lerde, Tkl içeriğini ise 300 ve 400 Gy'lerde IR'li kontrollerine kıyasla arttırmayı sağlamıştır. Ayrıca ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisinde de kl *a/b* oranı, 400 Gy hariç tüm IR uygulama gruplarında, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla azalma göstermiştir. Klorofil *a/b* oranı, 400 Gy uygulama grubunda ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi ile de artış göstermiştir.

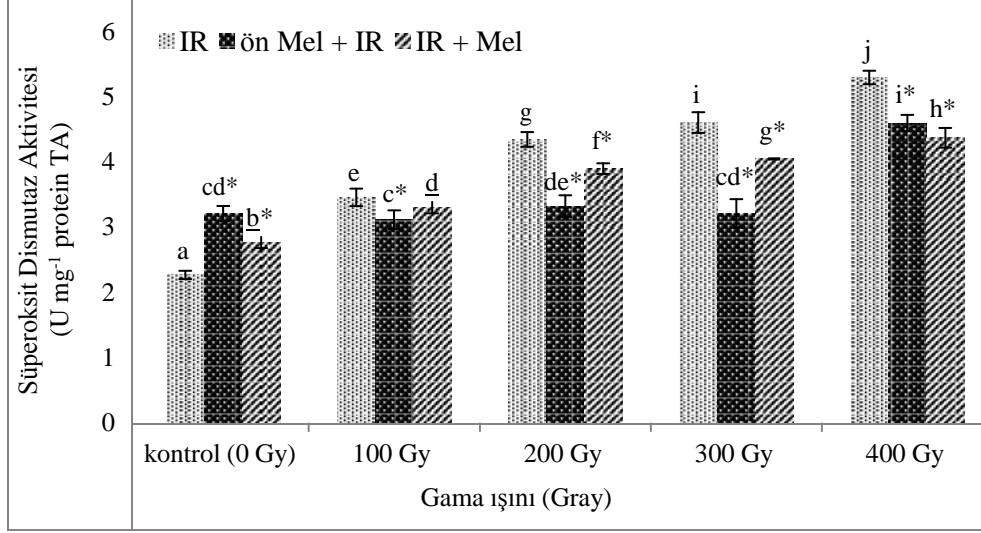
### **3.7. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatoninin Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerine Ait Antioksidan Enzim Aktiviteleri Üzerine Olan Etkisi**

#### **3.7.1. Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzim Aktivitesi Değişimi**

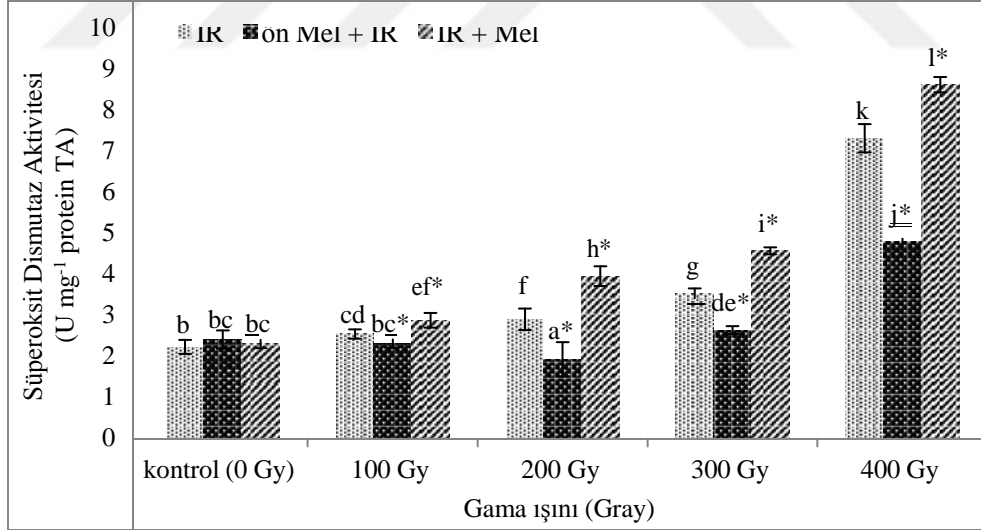
Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerde SOD enzim aktivitesine etkisi Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.

Genel olarak,  $\gamma$ -ışını radyasyon uygulaması kök kısmındaki SOD enzimi aktivitesini arttırmıştır. Süperoksit dismutaz aktivitesindeki en yüksek artışın, kontrol grubuna kıyasla (2,28 U mg<sup>-1</sup> protein), 400 Gy uygulama grubunda (5,31 U mg<sup>-1</sup> protein) olduğu tespit edilmiştir. Ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi de IR stresi ile birlikte artan SOD aktivitesini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Kökteki SOD aktivitesinin herhangi bir uygulamaya maruz bırakılmayan kontrol grubuna kıyasla, 400 Gy'de yaklaşık 2,32 kat arttığı buna karşın, ön-Mel uygulaması ile yaklaşık 2 kat ve Mel uygulaması ile de yaklaşık 1,9 kat arttığı kaydedilmiştir.

Sürgünlerde SOD enzim aktivitesi, artan IR uygulamalarına paralel olarak kontrol grubuna kıyasla (2,23 U mg<sup>-1</sup> protein) önemli düzeyde artış ( $P < 0,05$ , 100 Gy  $\rightarrow$  2,55 - 400 Gy  $\rightarrow$  7,32 U mg<sup>-1</sup> protein) göstermiştir. En yüksek enzim aktivitesi 400 Gy uygulama grubunda (kontrole kıyasla yaklaşık 3,3 kat) kaydedilmiştir. Ön-Mel uygulaması, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla daha düşük enzim aktivitesi (100 Gy  $\rightarrow$  2,31 - 400 Gy  $\rightarrow$  4,82 U mg<sup>-1</sup> protein) sergilerken; ekim sonrası Mel uygulaması SOD enzim aktivitesindeki artışı (100 Gy  $\rightarrow$  2,88 - 400 Gy  $\rightarrow$  8,62 U mg<sup>-1</sup> protein) daha da teşvik etmiştir. Ön-Mel uygulamasının 400 Gy'deki SOD enzim aktivitesini kontrole kıyasla yaklaşık 2,2 kat arttırdığı, Mel uygulamasının ise yaklaşık 3,9 kat azalttığı kaydedilmiştir.



Şekil 3.8. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki SOD enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

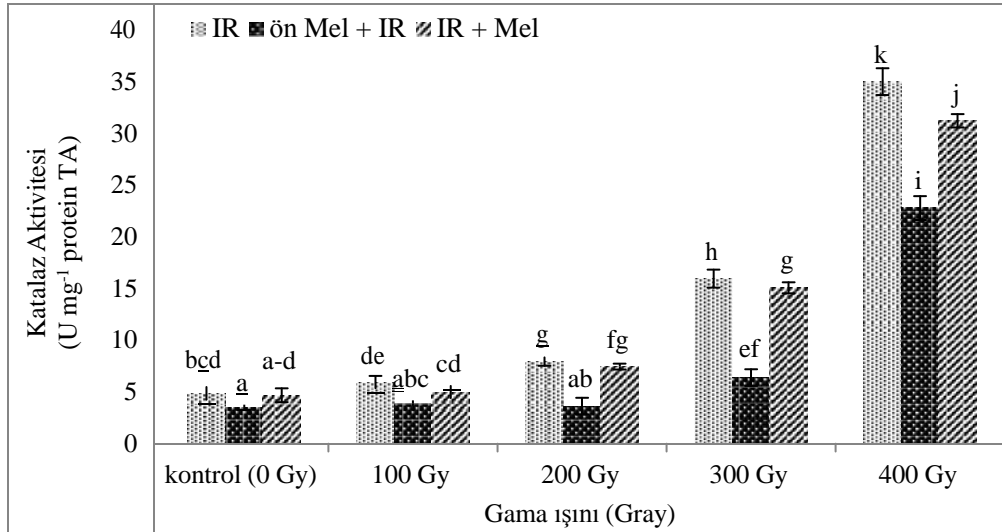


Şekil 3.9. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin SOD enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

### 3.7.2. Katalaz (CAT) Enzim Aktivitesi Değişimi

Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerdeki CAT enzim aktivitesi üzerine olan etkisi Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.

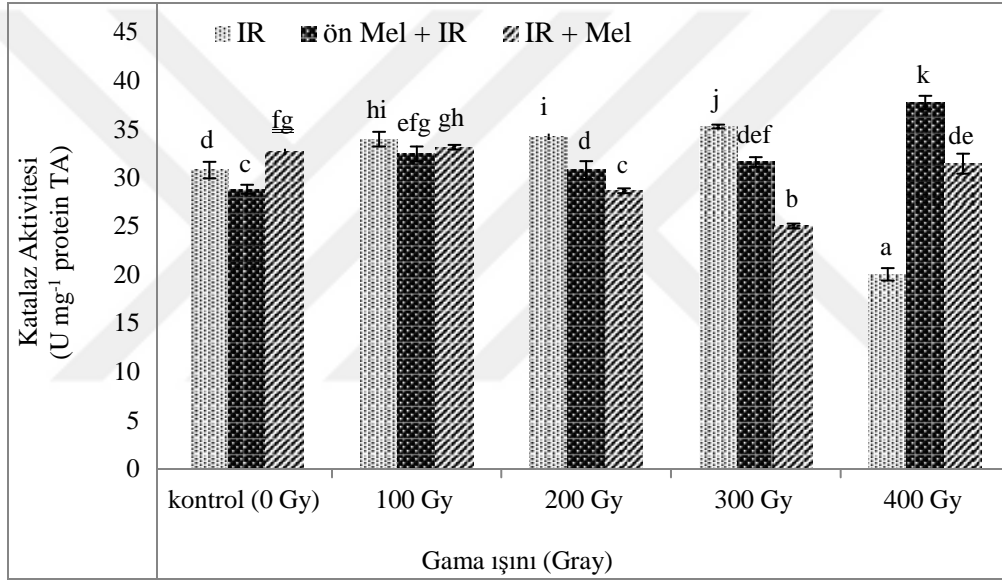
Buğday fidelerinin köklerinde CAT enzim aktivitesi artan gama radyasyonu dozuna bağlı olarak (100 – 400 Gy) istatistiksel anlamda önemli ( $P < 0,05$ ) bulunmuştur. İyonize radyasyon uygulamaları boyunca kademeli bir şekilde artan CAT aktivitesi, kontrol grubundan 400 Gy’e kadar yaklaşık 7 katlık bir artış sergilemiştir. Ancak ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamaları, CAT aktivitesini yalnız IR uygulanan gruplara kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Kontrol grubu ile karşılaştırıldığında; ön-Mel uygulaması CAT aktivitesini 400 Gy radyasyon dozunda yaklaşık 5 kat artırırken, ekim sonrası Mel uygulaması aynı IR dozunda CAT aktivitesini yaklaşık 6 kat arttırmıştır. Bunun yanı sıra ekim öncesi Mel uygulamasının; yalnızca IR ( $\gamma$ -ışını) uygulanan ve IR ile birlikte yetiştirme boyunca Mel uygulanan gruplara kıyasla daha düşük CAT aktivitesi ile sonuçlandırığı kaydedilmiştir.



Şekil 3.10. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki CAT enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



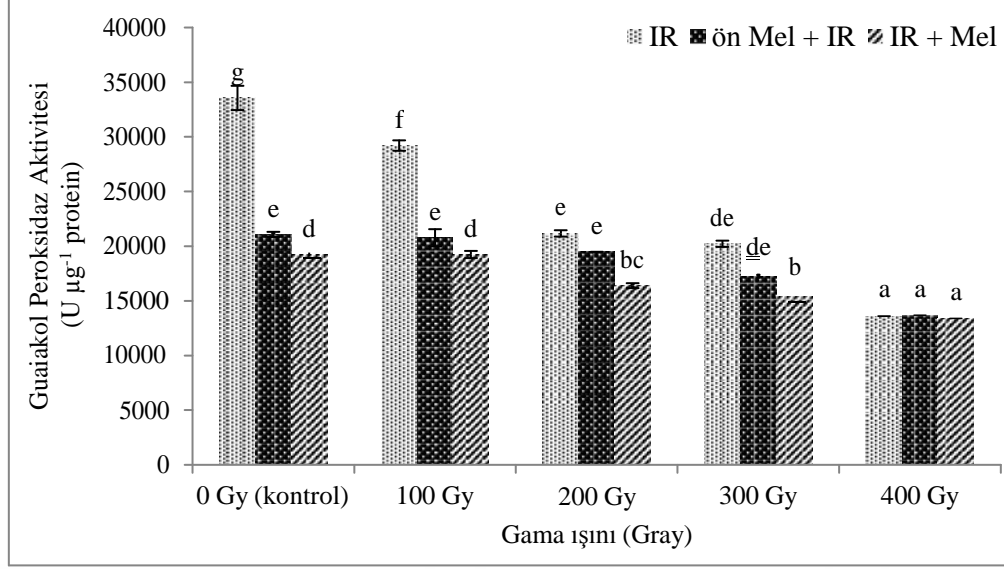
Mevcut çalışmada,  $\gamma$ -ışını radyasyon uygulamalarının buğday sürgünlerinde CAT aktivitesindeki artışı 100 Gy'den 300 Gy'e kadar teşvik ettiği (34,04 – 35,34 U mg<sup>-1</sup> protein) , 400 Gy radyasyon dozunda ise kontrol grubuna (30,85 U mg<sup>-1</sup> protein) kıyasla CAT aktivitesini yaklaşık 1,5 kat azalttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, her iki Mel uygulamasının da IR'li kontrollerine kıyasla CAT aktivitesini 100, 200 ve 300 Gy'lerde azalttığı, buna karşın 400 Gy'de arttırdığı kaydedilmiştir. Melatonin uygulaması ile CAT aktivitesinde oluşan artışın, yalnız 400 Gy uygulanan grupla kıyaslandığında, ön-Mel uygulaması ile yaklaşık 1,9 kat, ekim sonrası Mel uygulaması ile de yaklaşık 1,6 kat olduğu tespit edilmiştir.



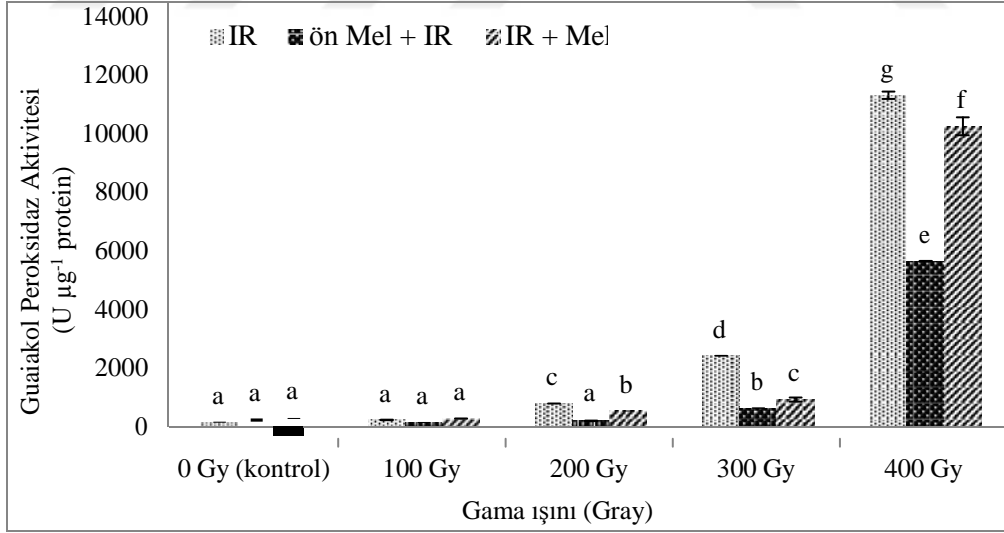
Şekil 3.11. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin CAT enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

### 3.7.3. Guaiakol Peroksidaz (POX) Enzim Aktivitesi Değişimi

Artan dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerindeki POX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.12. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki POX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.13. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin POX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Gama ışını uygulaması buğday fidelerinin köklerindeki POX enzim aktivitesini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Herhangi bir uygulama yapılmamış kontrol grubuna kıyasla artan IR dozları (100 → 400 Gy) ile POX aktivitesi 400 Gy'e kadar yaklaşık 2,5 kat azalma göstermiştir. Bununla birlikte ön-Mel uygulamasının POX aktivitesini 200 Gy ve 400 Gy'de, IR'li kontrollerine kıyasla, istatistiksel olarak değiştirmedigi, ancak kontrol, 100 Gy ve 300 Gy'de önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı belirlenmiştir. Yetiştirme koşullarında uygulanan Mel'in ise kontrol grubuna ve yalnızca IR uygulanan tüm gruplara kıyasla POX aktivitesini daha da indirmediği tespit edilmiştir.

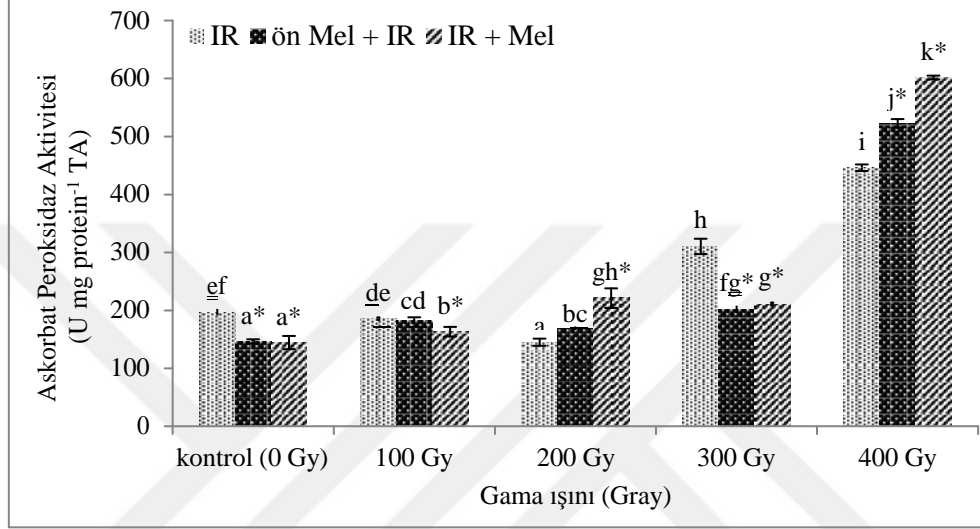
İyonize radyasyon stresi buğday fidelerinin sürgünlerinde POX aktivitesini herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubuna kıyasla istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Peroksidaz aktivitesinin, kontrol grubundan (173,63 U mg<sup>-1</sup> protein) 400 Gy'e (11317,36 U mg<sup>-1</sup> protein) kadar yaklaşık 65 katlık bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının; herhangi bir uygulamanın yapılmadığı kontrol grubuna ve yalnız 100 Gy uygulanan gruba kıyasla POX aktivitesinde istatistiksel olarak önemli ( $P < 0,05$ ) bir fark oluşturmadığı, ancak 200, 300 ve 400 Gy uygulamalarında POX aktivitesini, IR'li kontrollerine kıyasla, önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı tespit edilmiştir. Gerçekleşen azalmanın (yalnız 200, 300 ve 400 Gy uygulanan gruplara kıyasla), ön-Mel uygulaması yapılan gruplarda sırasıyla yaklaşık 3,7, 3,7 ve 2 kat olduğu; ekim sonrası Mel uygulaması yapılan gruplarda ise sırasıyla yaklaşık 1,5, 2,6 ve 1,1 kat olduğu kaydedilmiştir.

#### **3.7.4. Askorbat Peroksidaz (APX) Enzim Aktivitesi Değişimi**

İyonize radyasyon ( $\gamma$ -ışını) ve Mel uygulama koşullarında buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki APX enzim aktivitesinin değişimi Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.

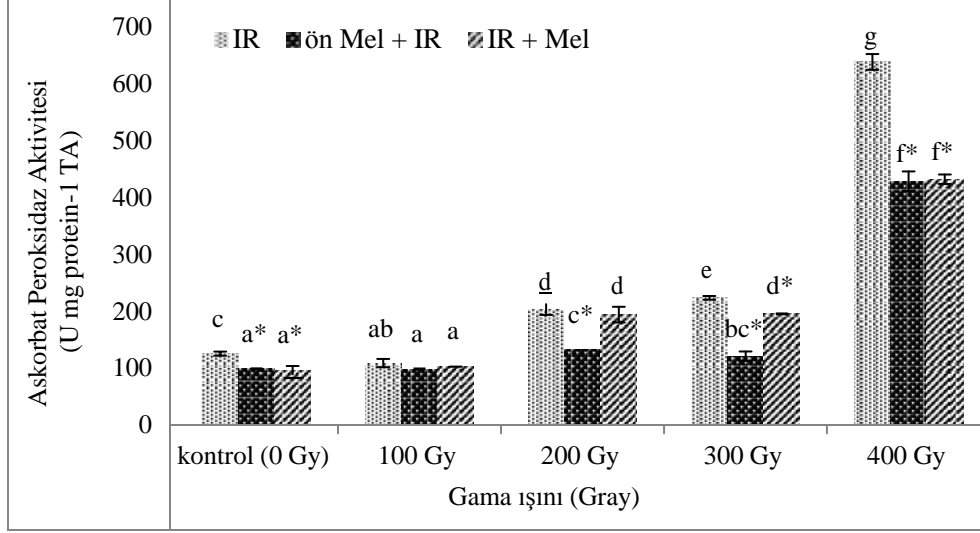
Çalışmada buğday fidelerinin kök kısmındaki APX aktivitesinin uygulama grupları arasında istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Özgün enzim aktivitesinin, kontrol grubuna kıyasla (196,89 U mg<sup>-1</sup> protein) 100 Gy (185,65 U mg<sup>-1</sup> protein) ve 200 Gy (145,01 U mg<sup>-1</sup> protein) radyasyon uygulanan gruplarda azaldığı; 300 (310,30 U mg<sup>-1</sup> protein) ve 400 Gy (446,02 U mg<sup>-1</sup> protein) uygulamalarında ise arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.14). Bununla birlikte, her iki Mel uygulamasının da (ön-Mel, Mel) kontrol, 100 ve 300 Gy uygulama gruplarına ait fidelerin

köklerinde APX aktivitesini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı; 200 ve 400 Gy'de ise arttırdığı kaydedilmiştir. Askorbat peroksidaz aktivitesinin, kontrolden 400 Gy'e kadar, ekim öncesi Mel uygulamasıyla 146,33 ila 522,43 U mg<sup>-1</sup> protein arasında değiştiği; ekim sonrası Mel uygulamasıyla da 144,40 ila 601,68 U mg<sup>-1</sup> protein arasında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 3.14. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına melatonin uygulamasının köklerdeki APX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Deney koşullarında uygulama yapılan buğday fidelerinin sürgünlerinde APX enzim aktivitesi, 100 Gy hariç, tüm IR uygulamalarında istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artmıştır. Bu artış, kontrol grubuna kıyasla (126,20 U mg<sup>-1</sup> protein) en yüksek 400 Gy uygulama grubunda (~5,1 kat) tespit edilmiştir. Her iki Mel uygulaması da tüm IR uygulamalarında APX enzim aktivitesini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması IR uygulamaları ile artan APX aktivitesini, 100 Gy'de ~1,1 kat, 200 Gy'de ~1,5 kat, 300 Gy'de ~1,8 kat ve 400 Gy'de ise ~1,5 kat azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise yüksek APX aktivitesini ön-Mel uygulamasına kıyasla daha düşük oranda (100 – 400 Gy; ~1,1 – 1,5 kat) azaltmıştır.

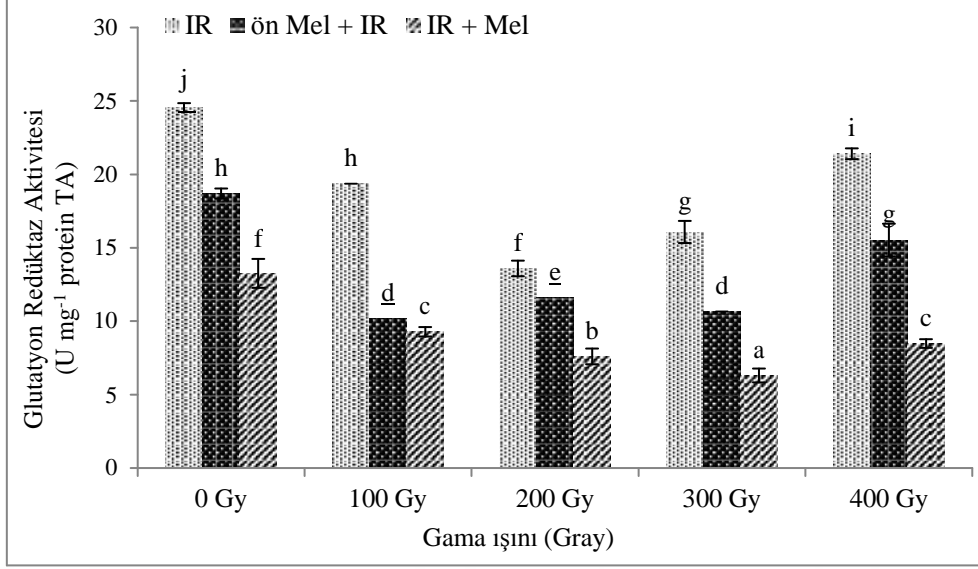


Şekil 3.15. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin APX enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

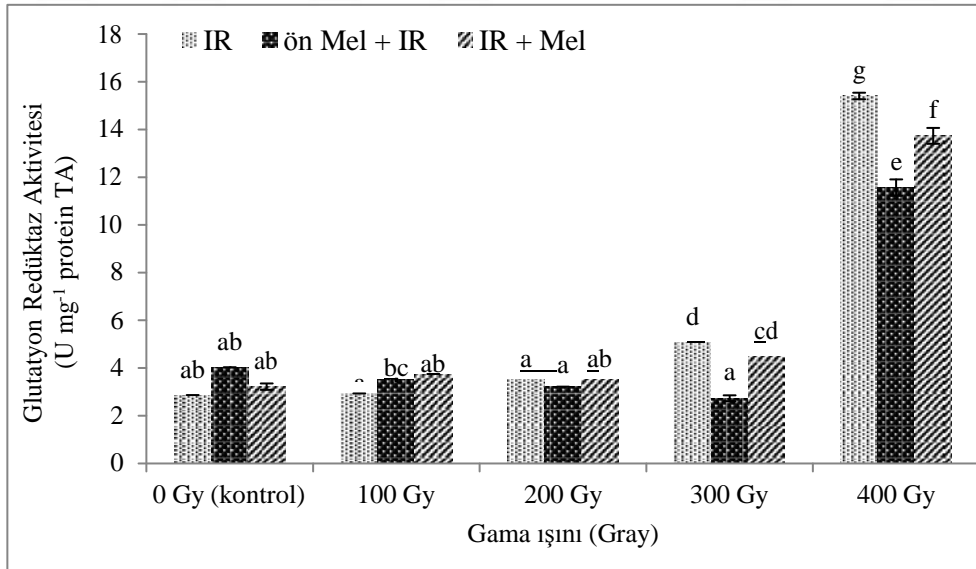
### 3.7.5. Glutatyon Redüktaz (GR) Enzim Aktivitesi Değişimi

İyonize radyasyon ( $\gamma$ -ışını) ve Mel uygulama koşullarında buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki GR enzim aktivitesinin değişimi Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir.

Buğday fidelerine düşük dozlarda uygulanan radyasyon uygulamaları (100 Gy; 19,36 U mg<sup>-1</sup> protein – 200 Gy; 13,53 U mg<sup>-1</sup> protein), köklerdeki GR enzim aktivitesini kontrol grubuna kıyasla (24,52 U mg<sup>-1</sup> protein) azaltmıştır. Yüksek dozlardaki uygulamalar (300 Gy; 16,07, 400 Gy; 21,40 U mg<sup>-1</sup> protein) ise, kontrol grubundan daha az olmak üzere GR aktivitesini teşvik etmiştir. Her iki Mel uygulamasının da yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla GR aktivitesini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı kaydedilmiştir. Yüksek dozlardaki IR uygulamalarına (300 ve 400 Gy) ait GR enzim aktivitesi, IR’li kontrolleriyle karşılaştırıldığında, ekim öncesi Mel uygulamasında ortalama 1,4 kat azalırken, ekim sonrası Mel uygulamasında bu azalma ortalama 2,5 kat olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.16. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına melatonin uygulamasının köklerdeki GR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



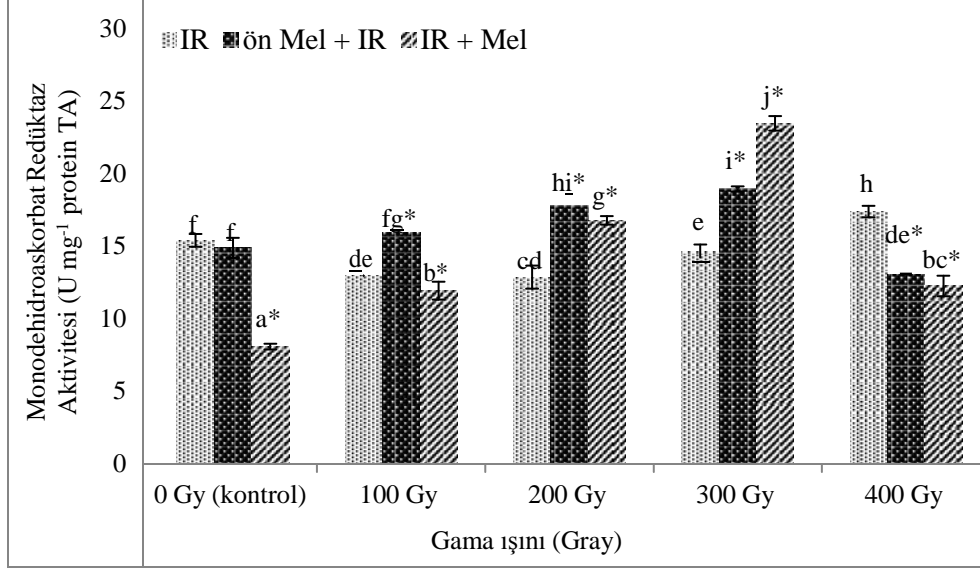
Şekil 3.17. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin GR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Kontrol ve uygulama gruplarındaki fidelerin sürgünlerinde GR enzim aktivitesinin, artan gama ışınlama dozları boyunca istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttığı belirlenmiştir. Bu artışın kontrol grubuna kıyasla ( $2,87 \text{ U mg}^{-1} \text{ protein}$ ), yalnızca 400 Gy uygulanan bitkilerde yaklaşık olarak 5,4 kat fazla olduğu kaydedilmiştir. Strese bağlı olarak sürgün GR enzim aktivitesindeki artışın ön-Mel uygulaması ile 300 ve 400 Gy radyasyon dozlarına maruz bırakılan gruplarda önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaldığı (sırasıyla  $\sim 1,9$  kat ve  $\sim 1,3$  kat) tespit edilmiştir. Benzer şekilde, radyasyon muamelesi sonrasında yetiştirme boyunca yapılan Mel uygulamasının da strese bağlı olarak artan GR aktivitesini özellikle 300 Gy ( $\sim 1,1$  kat) ve 400 Gy ( $\sim 1,1$  kat) uygulanan gruplarda önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azalttığı belirlenmiştir.

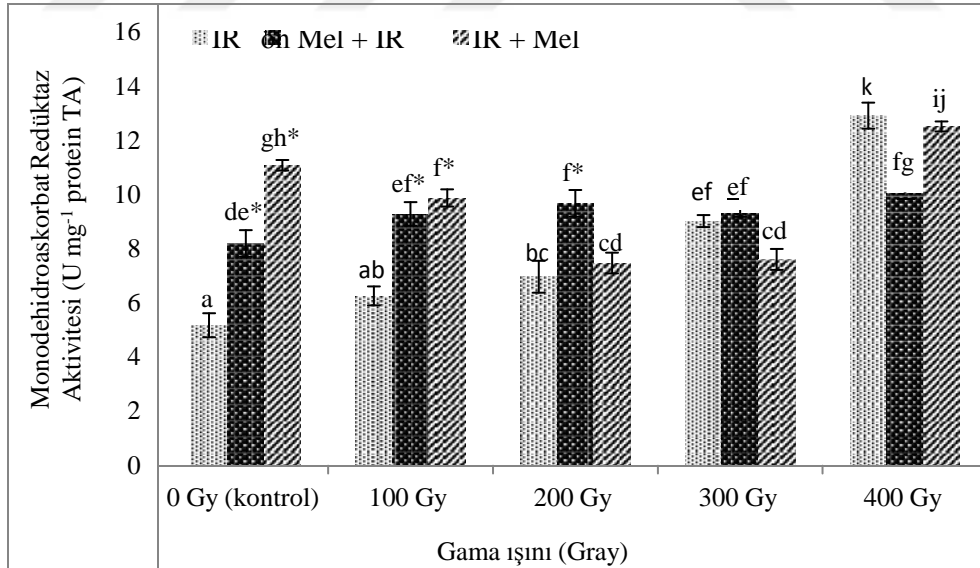
### 3.7.6. Monodehidroaskorbat Redüktaz (MDHAR) Enzim Aktivitesi Değişimi

İyonize radyasyon ve Mel uygulama koşullarında buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki MDHAR aktivitesinin değişimi Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilmiştir. Buğday fidelerinin köklerindeki MDHAR enzim aktivitesinin, kontrol grubuna kıyasla ( $15,45 \text{ U mg}^{-1} \text{ protein}$ ), 100 ve 200 Gy IR uygulama gruplarında ortalama 1,2 kat azaldığı, 300 ve 400 Gy uygulanan gruplarda ise ortalama 1,1 kat arttığı tespit edilmiştir. Ekim öncesi Mel uygulaması kök kısmındaki MDHAR aktivitesini, 400 Gy hariç, tüm IR dozlarında istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise IR'li kontrollerine kıyasla kökteki MDHAR aktivitesini 100 ve 400 Gy'de ( $\sim 1,1$  ve  $\sim 1,4$  kat) azaltırken, 200 ve 300 Gy uygulama gruplarında ( $\sim 1,3$  ve  $\sim 1,6$  kat) arttırmıştır.

İyonize radyasyon stresi, buğday fidelerinin sürgünlerinde MDHAR aktivitesini herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubuna ( $5,19 \text{ U mg}^{-1} \text{ protein}$ ) kıyasla istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Gama ışınlamasına bağlı IR uygulamaları ile artan MDHAR aktivitesi 400 Gy'de kontrole kıyasla yaklaşık 2,3 katlık bir artış göstermiştir. Ön-Mel uygulamasının, IR stresinden kaynaklanan MDHAR enzim aktivitesindeki artışı, 100 ve 200 Gy'lerde arttırdığı, 400 Gy'de azalttığı ve 300 Gy'de ise istatistiksel olarak önemli bir fark oluşturmadığı belirlenmiştir. Ayrıca ekim sonrası Mel uygulamasının da sürgünlerde IR stresi ile artan enzim aktivitesini, 100 ve 200 Gy'lerde daha da arttırdığı, 300 ve 400 Gy'lerde ise azalttığı kaydedilmiştir.



Şekil 3.18. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamalarının köklerdeki MDHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



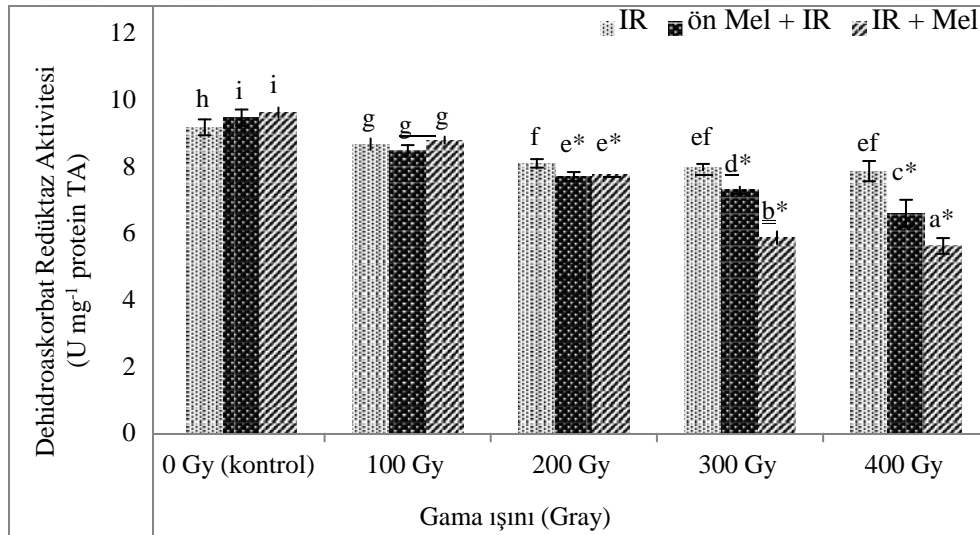
Şekil 3.19. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin MDHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



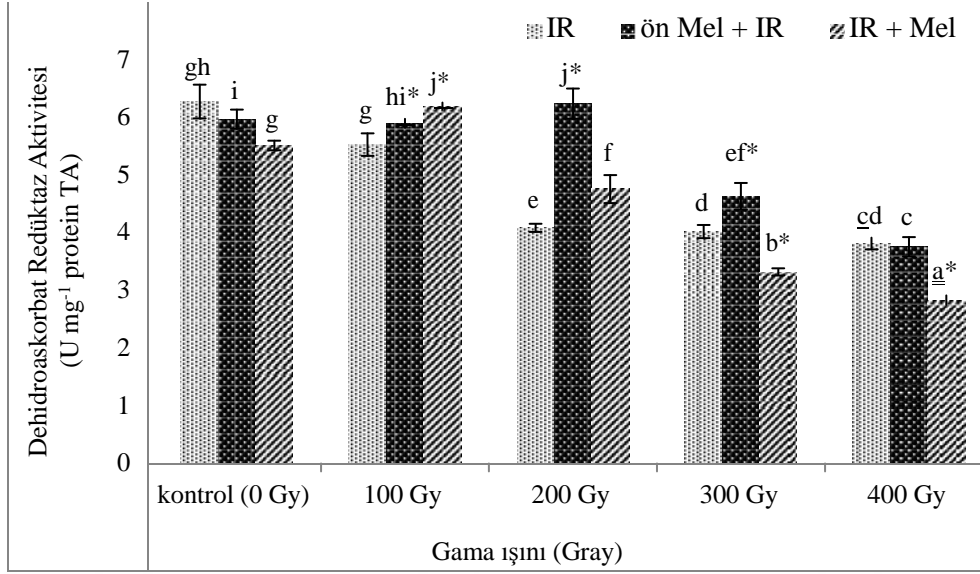
### 3.7.7. Dehidroaskorbat Redüktaz (DHAR) Enzim Aktivitesi Değişimi

Artan dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerindeki DHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’te verilmiştir.

Çalışmada gama radyasyonuna maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerin kök kısmındaki DHAR enzim aktivitesinin IR uygulamaları boyunca istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaldığı ve en düşük DHAR aktivitesinin 400 Gy’de olduğu tespit edilmiştir. Kontrol grubunda 9,18 U mg<sup>-1</sup> protein olan spesifik enzim aktivitesi, 400 Gy’de 7,88 U mg<sup>-1</sup> protein’e kadar azalma sergilemiştir. Yalnızca IR uygulaması yapılan gruplara paralel olarak, ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarında da DHAR enzim aktivitesi önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azalmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması yapılan gruplarda 9,47 ila 6,61 U mg<sup>-1</sup> protein arasında değişen DHAR aktivitesinin, ekim sonrası Mel uygulanan gruplarda 9,63 ila 5,50 U mg<sup>-1</sup> protein arasında değiştiği kaydedilmiştir. Ayrıca her iki Mel uygulamasının da DHAR aktivitesini, 100 Gy hariç, tüm IR dozlarında IR’li kontrollerine kıyasla önemli derecede azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 3.20. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki DHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.21. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerin DHAR enzim aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olarak önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Çalışmada kullanılan buğday fidelerinin sürgünlerine ait DHAR enzim aktivitesi artan radyasyon dozları boyunca (100 → 400 Gy), kontrol grubuna kıyasla ( $6,28 \text{ U mg}^{-1}$  protein), istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalma göstermiştir. Sürgünlerdeki DHAR aktivitesinin, artan dozlarda IR uygulamaları ile  $5,53 - 3,81 \text{ U mg}^{-1}$  protein aralığında değiştiği belirlenmiştir. Ön-Mel uygulaması IR'li kontrollerine kıyasla DHAR aktivitesini 100 Gy (1,1 kat), 200 Gy (1,5 kat) ve 300 Gy (1,2 kat) uygulama gruplarında artırırken, 400 Gy (1,1 kat)'de azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise enzim aktivitesini, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, düşük dozlarda artırıp (100 Gy; 1,1 kat, 200 Gy; 1,2 kat) yüksek dozlarda (300 Gy; 1,2 kat, 400 Gy; 1,3 kat) azaltmıştır.

### 3.8. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerindeki Fenolik Madde İçeriği ve Antioksidan Kapasite Değerleri Üzerine Olan Etkisi

Mevcut çalışmada; IR ve Mel uygulama koşullarında yetiştirilen buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki toplam fenolik madde (TFM) ve toplam flavonoid (TF) içerikleri

belirlenmiş olup; antioksidan kapasite (AK) değerlerinin (DPPH, FRAP ve CUPRAC) uygulamalar arasındaki değişimleri saptanmıştır.

Artan dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerindeki TFM ve TF içerikleri ile AK (DPPH, FRAP ve CUPRAC) değerleri üzerine olan etkisi Tablo 3.4'te verilmiştir.

Kontrol ve uygulama gruplarındaki buğday fidelerinin köklerine ait TFM içeriği, IR uygulamaları ile istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artmıştır. Herhangi bir muamele yapılmamış kontrol grubu (26,09 mg 100 g<sup>-1</sup> TA) ile karşılaştırıldığında, TFM içeriği 400 Gy radyasyon uygulaması ile yaklaşık 3,2 kat artış göstermiştir. Bununla birlikte, ekim öncesi Mel uygulaması IR stresine bağlı olarak artan TFM içeriğini tüm IR dozlarında önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Toplam fenolik madde içeriğinin en yüksek olduğu 400 Gy'de, ön-Mel uygulaması TFM içeriğini IR'li kontrolüne kıyasla yaklaşık 1,2 kat azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise sadece 300 (~1,9 kat) ve 400 Gy (2,2 kat) radyasyon dozlarındaki yüksek TFM içeriğini azaltmıştır. Düşük dozlarda ise (100 ve 200 Gy) TFM birikimini teşvik etmiştir.

Buğday fidelerinin sürgün kısmındaki TFM içeriği kontrol ve IR dozlarında istatistiksel olarak önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) farklılık göstermiştir. Kontrol grubuna kıyasla, TFM içeriğinin 100 Gy'den 300 Gy'e kadarki IR uygulamalarında arttığı, ancak 400 Gy radyasyon uygulama dozunda 300 Gy'e kıyasla bir miktar azaldığı belirlenmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi de TFM içeriğini tüm gruplarda, IR'li kontrollerine kıyasla, istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır.

Buğday fidelerinin köklerine ait TF içeriği, kontrol grubuna kıyasla 100 Gy'de istatistiksel olarak önemli ( $P < 0,05$ ) bir fark göstermemiştir. Ancak 200, 300 ve 400 Gy'lerde kontrol grubuna kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artmıştır. Kontrolde 3,51 mg 100 g<sup>-1</sup> olan TF içeriği, 400 Gy radyasyon uygulamasında 6,70 mg 100 g<sup>-1</sup> ile yaklaşık 2 katlık bir artış göstermiştir (Tablo 3.4). Ekim öncesi Mel uygulaması köklerde IR uygulamaları ile artan TF içeriğini, tüm gruplarda önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise 400 Gy radyasyon dozunda (~1,2 kat) yüksek TF içeriğini azaltırken; 100, 200 ve 300 Gy radyasyon dozlarında ise TF içeriğini ortalama 1,1 kat arttırmıştır.

Tablo 3.4. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının fidelerin kök ve sürgünlerindeki TFM ve TF içeriğine (mg/100 g TA) ve AK (DPPH, FRAP ve CUPRAC,  $\mu\text{mol Trolox g}^{-1}$  TA)'sine etkisi. Her değer ortalama  $\pm$  standart hata olarak belirtilmiştir (n = 3). Her bir kolonlardaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

Kök					
Uygulama	TFM	TF	DPPH	FRAP	CUPRAC
kontrol (0 Gy)	26,09 $\pm$ 0,75 <sup>b</sup>	3,51 $\pm$ 0,07 <sup>b</sup>	0,08 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	1,06 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	1,34 $\pm$ 0,02 <sup>c</sup>
100 Gy	32,24 $\pm$ 0,27 <sup>c</sup>	3,45 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup>	0,13 $\pm$ 0,01 <sup>c</sup>	1,34 $\pm$ 0,05 <sup>c</sup>	1,31 $\pm$ 0,05 <sup>bc</sup>
200 Gy	37,34 $\pm$ 1,07 <sup>d</sup>	3,96 $\pm$ 0,02 <sup>d</sup>	0,3 $\pm$ 0,01 <sup>e</sup>	1,99 $\pm$ 0,05 <sup>e</sup>	1,56 $\pm$ 0,04 <sup>d</sup>
300 Gy	50,05 $\pm$ 0,37 <sup>f</sup>	4,57 $\pm$ 0,03 <sup>f</sup>	0,87 $\pm$ 0,03 <sup>i</sup>	2,81 $\pm$ 0,06 <sup>g</sup>	1,86 $\pm$ 0,04 <sup>f</sup>
400 Gy	83,38 $\pm$ 0,78 <sup>i</sup>	6,7 $\pm$ 0,11 <sup>j</sup>	1,32 $\pm$ 0,03 <sup>l</sup>	4,6 $\pm$ 0,14 <sup>i</sup>	3,07 $\pm$ 0,03 <sup>i</sup>
Ön-Mel	27,11 $\pm$ 0,15 <sup>b</sup>	3,48 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>	0,03 $\pm$ 0,02 <sup>a*</sup>	0,98 $\pm$ 0,02 <sup>a*</sup>	1,25 $\pm$ 0,03 <sup>b*</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	21,37 $\pm$ 2,01 <sup>a*</sup>	3,03 $\pm$ 0,01 <sup>a*</sup>	0,03 $\pm$ 0,01 <sup>a*</sup>	1,08 $\pm$ 0,05 <sup>a*</sup>	1,01 $\pm$ 0,03 <sup>a*</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	32,79 $\pm$ 0,25 <sup>c*</sup>	3,44 $\pm$ 0,02 <sup>b*</sup>	0,12 $\pm$ 0,01 <sup>bc*</sup>	1,23 $\pm$ 0,07 <sup>b*</sup>	1,3 $\pm$ 0,04 <sup>bc*</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	31,84 $\pm$ 1,01 <sup>c*</sup>	3,67 $\pm$ 0,01 <sup>c*</sup>	0,36 $\pm$ 0,04 <sup>f*</sup>	1,56 $\pm$ 0,05 <sup>d*</sup>	1,65 $\pm$ 0,04 <sup>e*</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	66,33 $\pm$ 2,15 <sup>h*</sup>	6,16 $\pm$ 0,16 <sup>i*</sup>	1,26 $\pm$ 0,03 <sup>k</sup>	3,81 $\pm$ 0,16 <sup>h*</sup>	2,92 $\pm$ 0,02 <sup>h*</sup>
Mel	39,82 $\pm$ 0,68 <sup>e*</sup>	3,84 $\pm$ 0,02 <sup>d*</sup>	0,22 $\pm$ 0,01 <sup>d*</sup>	1,52 $\pm$ 0,02 <sup>d*</sup>	1,27 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>
100 Gy + Mel	38,2 $\pm$ 0,49 <sup>d*</sup>	3,64 $\pm$ 0,06 <sup>e*</sup>	0,27 $\pm$ 0,01 <sup>e*</sup>	1,62 $\pm$ 0,01 <sup>d*</sup>	1,25 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>
200 Gy + Mel	38,54 $\pm$ 0,7 <sup>de</sup>	4,27 $\pm$ 0,06 <sup>e*</sup>	0,52 $\pm$ 0,03 <sup>g*</sup>	2,11 $\pm$ 0,03 <sup>f*</sup>	1,54 $\pm$ 0,03 <sup>d</sup>
300 Gy + Mel	48,81 $\pm$ 0,71 <sup>f</sup>	4,92 $\pm$ 0,06 <sup>g*</sup>	0,63 $\pm$ 0,01 <sup>h*</sup>	2,81 $\pm$ 0,07 <sup>g</sup>	1,85 $\pm$ 0,02 <sup>f</sup>
400 Gy + Mel	56,58 $\pm$ 1,58 <sup>g*</sup>	5,43 $\pm$ 0,03 <sup>h*</sup>	1,12 $\pm$ 0,03 <sup>j*</sup>	3,80 $\pm$ 0,09 <sup>h*</sup>	2,52 $\pm$ 0,01 <sup>g*</sup>
Sürgün					
kontrol (0 Gy)	69,33 $\pm$ 0,57 <sup>a</sup>	40,02 $\pm$ 0,71 <sup>i</sup>	3,55 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>	4,41 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	5,18 $\pm$ 0,04 <sup>ef</sup>
100 Gy	71,99 $\pm$ 0,34 <sup>b</sup>	40,64 $\pm$ 0,16 <sup>j</sup>	3,71 $\pm$ 0,03 <sup>c</sup>	4,48 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>	5,34 $\pm$ 0,04 <sup>g</sup>
200 Gy	72,82 $\pm$ 0,7 <sup>bc</sup>	34,63 $\pm$ 0,03 <sup>f</sup>	3,85 $\pm$ 0,05 <sup>d</sup>	4,61 $\pm$ 0,03 <sup>c</sup>	5,21 $\pm$ 0,03 <sup>f</sup>
300 Gy	86,67 $\pm$ 0,09 <sup>g</sup>	29,11 $\pm$ 0,11 <sup>c</sup>	4,46 $\pm$ 0,01 <sup>h</sup>	5,86 $\pm$ 0,09 <sup>g</sup>	5,05 $\pm$ 0,04 <sup>d</sup>
400 Gy	73,89 $\pm$ 0,59 <sup>cd</sup>	13,73 $\pm$ 0,14 <sup>a</sup>	3,83 $\pm$ 0,03 <sup>d</sup>	4,18 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>	3,66 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>
Ön-Mel	69,64 $\pm$ 0,33 <sup>a</sup>	40,58 $\pm$ 0,37 <sup>j</sup>	3,46 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	4,39 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>	5,12 $\pm$ 0,07 <sup>de</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	75,09 $\pm$ 1,61 <sup>d*</sup>	48,03 $\pm$ 0,07 <sup>l*</sup>	3,76 $\pm$ 0,06 <sup>cd</sup>	4,96 $\pm$ 0,02 <sup>d*</sup>	5,51 $\pm$ 0,01 <sup>h*</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	77,4 $\pm$ 1,31 <sup>e*</sup>	39,10 $\pm$ 0,32 <sup>h*</sup>	3,96 $\pm$ 0,01 <sup>e*</sup>	5,13 $\pm$ 0,04 <sup>e*</sup>	5,29 $\pm$ 0,09 <sup>g</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	89,23 $\pm$ 0,41 <sup>h*</sup>	33,33 $\pm$ 0,39 <sup>e*</sup>	4,55 $\pm$ 0,06 <sup>hi</sup>	6,2 $\pm$ 0,04 <sup>h*</sup>	5,19 $\pm$ 0,01 <sup>ef*</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	98,39 $\pm$ 1,72 <sup>j*</sup>	31,6 $\pm$ 0,3 <sup>d*</sup>	4,22 $\pm$ 0,12 <sup>f*</sup>	5,61 $\pm$ 0,09 <sup>f*</sup>	4,7 $\pm$ 0,02 <sup>c*</sup>
Mel	78,67 $\pm$ 1,28 <sup>e*</sup>	40,35 $\pm$ 0,33 <sup>ij</sup>	4,02 $\pm$ 0,07 <sup>e*</sup>	5,17 $\pm$ 0,01 <sup>e*</sup>	5,36 $\pm$ 0,03 <sup>g*</sup>
100 Gy + Mel	95,7 $\pm$ 1,27 <sup>i*</sup>	44,43 $\pm$ 0,17 <sup>k*</sup>	4,6 $\pm$ 0,07 <sup>i*</sup>	7,03 $\pm$ 0,03 <sup>k*</sup>	6,35 $\pm$ 0,03 <sup>j*</sup>
200 Gy + Mel	87,33 $\pm$ 0,09 <sup>g*</sup>	38,58 $\pm$ 0,44 <sup>h*</sup>	4,31 $\pm$ 0,01 <sup>g*</sup>	6,44 $\pm$ 0,03 <sup>i*</sup>	5,73 $\pm$ 0,09 <sup>i</sup>
300 Gy + Mel	90,42 $\pm$ 0,69 <sup>h*</sup>	35,32 $\pm$ 0,3 <sup>g*</sup>	4,48 $\pm$ 0,06 <sup>h</sup>	6,78 $\pm$ 0,13 <sup>j*</sup>	5,5 $\pm$ 0,05 <sup>h*</sup>
400 Gy + Mel	81,53 $\pm$ 0,24 <sup>f*</sup>	18,77 $\pm$ 0,1 <sup>b*</sup>	3,85 $\pm$ 0,06 <sup>d</sup>	4,38 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>	4,09 $\pm$ 0,02 <sup>b*</sup>

Buğday fidelerinin sürgünlerinde TF içeriği artan gama ışını radyasyon dozları boyunca istatistiksel olarak önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azalmıştır. Toplam flavonoid içeriği, herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubu ( $40,02 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ) ile kıyaslandığında, 400 Gy'de yaklaşık 2,5 katlık bir azalma göstermiştir. Buğday fidelerinin sürgünlerinde IR uygulamaları ile azalan TF içeriğinin, ön-Mel uygulaması yapılan gruplarda önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) arttığı (400 Gy'de ~2 kat) kaydedilmiştir. Benzer şekilde, ekim sonrası Mel uygulamasının da IR'in neden olduğu TF içeriğindeki indirgenmeyi 100, 200, 300 ve 400 Gy radyasyon dozları uygulanan tüm gruplarda önemli derecede ( $P < 0,05$ ) arttırdığı belirlenmiştir.

Buğday fidelerinin kök kısmına ait DPPH radikal temizleme kapasitesi artan IR dozlarına paralel olarak kontrol grubuna kıyasla ( $0,08 \text{ } \mu\text{mol Trolox g}^{-1}$ ) önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artış (400 Gy  $\rightarrow$  ~16,7 kat) göstermiştir. Ekim öncesi Mel uygulaması IR'den kaynaklanan DPPH aktivitesindeki artışı tüm IR uygulamalarında önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise DPPH aktivitesini düşük dozlarda (100 – 200 Gy) daha da artırıp, yüksek radyasyon uygulanan dozlarda (300 – 400 Gy) ise azaltmıştır.

Buğday fidelerinin sürgünlerine ait DPPH radikal temizleme aktivitesinin, 100 Gy'den 300 Gy'e kadar uygulanan radyasyon dozlarında artış gösterdiği buna karşın 400 Gy radyasyon dozunda azaldığı belirlenmiştir. Ekim öncesi Mel uygulamasının IR uygulaması yapılan tüm gruplarda DPPH radikal temizleme aktivitesini daha da arttırdığı saptanmıştır. Ekim sonrası Mel uygulamasının ise DPPH aktivitesini 100 ve 200 Gy'lik radyasyon dozlarında arttırdığı, 300 Gy'de azalttığı ve 400 Gy'de ise istatistiksel olarak önemli ( $P < 0,05$ ) bir değişmeye neden olmadığı saptanmıştır.

Çalışmada kullanılan buğday fidelerinin köklerine ait FRAP radikal temizleme aktivitesi, DPPH kapasitesine benzer şekilde artan dozlarda IR uygulamaları ile (100 – 400 Gy) önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artmıştır. FRAP aktivitesi; kontrol grubunda  $1,06 \text{ } \mu\text{mol Trolox g}^{-1}$  iken 400 Gy'de  $4,60 \text{ } \mu\text{mol Trolox g}^{-1}$  ile yaklaşık 4,3 kat artış göstermiştir. Bununla birlikte, ön-Mel uygulamasının IR uygulamaları artan FRAP antioksidan kapasitesini önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azalttığı kaydedilmiştir. Ancak ekim sonrasında yapılan Mel uygulamasının IR stresinden kaynaklanan FRAP aktivitesindeki artışı yalnızca 400 Gy radyasyon dozunda azalttığı (~1,2 kat), 300 Gy'de etki göstermediği, 100 (~1,2 kat) ve 200 Gy (~1,1 kat) uygulanan gruplarda ise arttırdığı belirlenmiştir.

Buğday fidelerinin sürgünlerine ait FRAP radikal temizleme kapasitesi, dört farklı IR uygulama dozu arasında, TFM içeriği ve DPPH radikal temizleme kapasitesi ile uyumlu olarak, önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) farklılık göstermiştir. Genel olarak FRAP aktivitesinin; kontrol grubuna kıyasla ( $4,41 \mu\text{mol Trolox g}^{-1}$ ), 300 Gy'e kadar artış ( $300 \text{ Gy} \rightarrow \sim 1,3$  kat) gösterdiği, 400 Gy radyasyon uygulaması yapılan fidelerde ise kontrole göre daha da azaldığı ( $\sim 1,1$  kat) kaydedilmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, tüm IR dozlarında FRAP kapasitesini uyarıcı yönde bir etki gösterdiği belirlenmiştir.

Buğday fidelerinin köklerindeki CUPRAC radikal temizleme kapasitesi, DPPH ve FRAP kapasitelerine benzer şekilde, IR uygulamaları ile istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artmıştır. Gama ışını radyasyon uygulama dozlarının artmasına paralel olarak CUPRAC kapasitesi, kontrole kıyasla ( $1,34 \mu\text{mol Trolox g}^{-1}$ ), 400 Gy'de yaklaşık 2,3 katlık bir artış göstermiştir. İyonize radyasyon stresi ile birlikte artan CUPRAC kapasitesinin, ekim öncesi Mel uygulaması ile tüm IR dozlarında, ekim sonrası Mel uygulaması ile de yalnızca 400 Gy'de istatistiksel olarak önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) azaldığı tespit edilmiştir.

Fidelerin sürgünlerinde CUPRAC radikal temizleme kapasitesinin genel olarak, gama ışını uygulamaları (100 Gy hariç) ile azaldığı belirlenmiştir. Herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubu ( $5,18 \mu\text{mol Trolox g}^{-1}$ ) ile karşılaştırıldığında, 400 Gy radyasyon uygulaması yapılan fidelerdeki CUPRAC radikal temizleme kapasitesinin yaklaşık 1,4 kat azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi de IR uygulaması yapılan tüm gruplarda CUPRAC radikal temizleme kapasitesini artırıcı yönde etki göstermiştir. Özellikle 400 Gy uygulanan fidelerde oluşan yaklaşık 1,4 katlık indirgenme; ön-Mel uygulaması ile yaklaşık 0,3 kat, ekim sonrası Mel uygulaması ile de yaklaşık 0,2 kat artırılmıştır.

### **3.9. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Fidelerin Kök ve Sürgünlerindeki Fenolik Asit İçeriği Üzerine Olan Etkisi**

Buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerde IR ve Mel uygulamalarının fenolik asit (ham özüt, serbest, ester, glikozit ve ester bağlı formları) içeriğine etkisi sırasıyla Tablo 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8'de, toplam fenolik asit içeriğine etkisi ise Şekil 3.22'de verilmiştir.

Kromatografi analizleri sonucunda buğday fidelerinin köklerinden elde edilen ham özütte 9 farklı fenolik asit (Tablo 3.5)'in varlığı belirlenmiştir. Bunlardan 4-hidroksibenzoik asit (4-HBA), vanilik asit (VaA), *p*-kumarik asit (*p*-KuA) ve ferulik asit (FeA) içeriklerinin 3-hidroksibenzoik asit (3-HBA), siringik asit (SyA), salisilik asit (SaA), sinapik asit (SiA) ve kafeik asit (KaA) içeriklerine göre çok daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Buğday fidelerinin köklerinde IR uygulamaları ile artan FeA, SaA ve VaA içerikleri ön-Mel uygulaması ile tüm gruplarda (100 – 400 Gy) önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalma göstermiştir. Bununla birlikte 4-HBA, 3-HBA ve *p*-KoA içeriklerinin 100 – 300 Gy arasında azalmasına rağmen 400 Gy'de bu içeriklerde artış belirlenmiştir. Ekim sonrası Mel uygulaması da IR uygulamasıyla yüksek miktarda artan FeA, SaA, *p*-KoA, 3-HBA ve VaA içeriklerini önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Kökte ham özütteki toplam fenolik asit ( $\Sigma$ Fa) içeriğinin, kontrolde 646,69 ng g<sup>-1</sup> TA iken yalnızca IR uygulaması yapılan gruplarda 833,39 – 1858,24 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değiştiği ve artan IR dozları boyunca arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca  $\Sigma$ Fa içeriğinin, ekim öncesi Mel uygulamasında 384,31 – 1073,89 ng g<sup>-1</sup> TA arasında ve ekim sonrası Mel uygulamasında ise 537,04 – 904,71 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değiştiği ve her iki Mel uygulamasının da  $\Sigma$ Fa içeriğini IR'li kontrollerine kıyasla azalttığı kaydedilmiştir (Şekil 3.22a).

Buğday fidelerinin sürgünlerinde köklerine benzer şekilde 9 farklı fenolik asidin varlığı tespit edilmiştir (Tablo 3.5). İyonize radyasyon stresi sürgün kısmındaki 4-HBA, 3-HBA, VaA, SyA, SiA, FeA ve KaA içeriklerini kontrol grubuna kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Ekim öncesi (ön-Mel) ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi de VaA ve SyA içeriklerini yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla daha da arttırırken, 4-HBA, 3-HBA, SaA, *p*-KoA, SiA ve KaA içeriklerini IR dozuna bağlı olarak arttırma ya da azaltma yönünde değiştirmiştir. Sürgünlerin toplam hidroksisinamik asit ( $\Sigma$ HSA) içeriği kontrole kıyasla 300 Gy'e kadar artış gösterirken 400 Gy'de azalmıştır. Toplam hidroksibenzoik asit ( $\Sigma$ HBA) ve  $\Sigma$ Fa içerikleri ise artan IR dozları boyunca artış göstermiştir. Ekim öncesi Mel uygulaması  $\Sigma$ HSA,  $\Sigma$ HBA ve  $\Sigma$ Fa içeriklerini IR'li kontrollerine kıyasla daha da arttırmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması;  $\Sigma$ HBA içeriğini tüm IR gruplarında,  $\Sigma$ HSA ve  $\Sigma$ Fa içeriklerini ise, 400 Gy hariç, tüm uygulama gruplarda arttırmıştır (Şekil 3.22b).

Tablo 3.5. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının ham özütteki fenolik asit içeriğine (ng g<sup>-1</sup> TA) olan etkisi.

Uygulama	Kök								
	4-HBA	3-HBA	VaA	SyA	SaA	p-KuA	SiA	FeA	KaA
kontrol (0 Gy)	236,50 ± 0,81 <sup>j</sup>	6,68 ± 0,01 <sup>a</sup>	685,62 ± 0,09 <sup>a</sup>	500,17 ± 1,15 <sup>a</sup>	18,53 ± 0,17 <sup>b</sup>	81,39 ± 0,58 <sup>a</sup>	72,72 ± 1,15 <sup>b</sup>	479,01 ± 1,73 <sup>a</sup>	1,43 ± 0,01 <sup>b</sup>
100 Gy	220,90 ± 2,01 <sup>h</sup>	11,76 ± 0,01 <sup>b</sup>	798,40 ± 0,94 <sup>c</sup>	548,51 ± 0,68 <sup>b</sup>	21,42 ± 0,15 <sup>c</sup>	123,70 ± 1,15 <sup>f</sup>	94,56 ± 2,31 <sup>e</sup>	502,33 ± 1,15 <sup>b</sup>	1,53 ± 0,01 <sup>c</sup>
200 Gy	140,09 ± 0,55 <sup>e</sup>	20,44 ± 0,01 <sup>d</sup>	880,67 ± 0,97 <sup>d</sup>	648,89 ± 0,57 <sup>c</sup>	64,10 ± 0,13 <sup>l</sup>	172,83 ± 2,88 <sup>i</sup>	101,02 ± 0,58 <sup>f</sup>	800,76 ± 4,61 <sup>h</sup>	3,32 ± 0,01 <sup>i</sup>
300 Gy	159,21 ± 0,58 <sup>f</sup>	33,34 ± 0,02 <sup>k</sup>	887,09 ± 0,85 <sup>e</sup>	658,69 ± 0,59 <sup>d</sup>	41,99 ± 0,57 <sup>l</sup>	141,26 ± 1,15 <sup>g</sup>	167,72 ± 0,57 <sup>k</sup>	873,69 ± 1,73 <sup>j</sup>	3,46 ± 0,01 <sup>k</sup>
400 Gy	281,02 ± 0,57 <sup>k</sup>	34,94 ± 0,01 <sup>l</sup>	1789,41 ± 2,65 <sup>k</sup>	737,53 ± 1,5 <sup>g</sup>	40,61 ± 0,11 <sup>h</sup>	105,62 ± 0,58 <sup>d</sup>	122,37 ± 1,10 <sup>h</sup>	742,63 ± 1,15 <sup>g</sup>	7,45 ± 0,01 <sup>o</sup>
Ön-Mel	295,28 ± 0,56 <sup>l</sup>	28,41 ± 0,01 <sup>i</sup>	773,58 ± 0,67 <sup>b</sup>	676,73 ± 1,73 <sup>e</sup>	12,63 ± 0,11 <sup>a</sup>	97,58 ± 0,58 <sup>bc</sup>	86,65 ± 1,15 <sup>d</sup>	543,95 ± 4,21 <sup>c</sup>	0,54 ± 0,01 <sup>a</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	46,22 ± 0,13 <sup>b</sup>	48,16 ± 0,02 <sup>o</sup>	997,63 ± 0,04 <sup>g</sup>	726,74 ± 1,15 <sup>f</sup>	40,10 ± 0,34 <sup>h</sup>	166,89 ± 1,46 <sup>h</sup>	70,12 ± 0,06 <sup>a</sup>	724,68 ± 2,31 <sup>f</sup>	2,29 ± 0,01 <sup>e</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	229,01 ± 0,95 <sup>i</sup>	41,44 ± 0,02 <sup>n</sup>	1015,01 ± 0,95 <sup>h</sup>	762,69 ± 5,77 <sup>h</sup>	41,90 ± 0,06 <sup>i</sup>	188,99 ± 0,86 <sup>k</sup>	188,44 ± 1,15 <sup>m</sup>	742,94 ± 1,15 <sup>g</sup>	3,04 ± 0,01 <sup>g</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	43,69 ± 0,05 <sup>a</sup>	22,76 ± 0,01 <sup>g</sup>	1246,53 ± 1,94 <sup>i</sup>	1179,47 ± 1,15 <sup>m</sup>	36,26 ± 0,11 <sup>g</sup>	116,98 ± 1,73 <sup>e</sup>	140,79 ± 1,73 <sup>i</sup>	854,16 ± 2,31 <sup>i</sup>	3,38 ± 0,01 <sup>j</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	433,29 ± 0,85 <sup>o</sup>	21,82 ± 0,01 <sup>f</sup>	2560,51 ± 9,71 <sup>o</sup>	1190,64 ± 2,89 <sup>n</sup>	33,11 ± 0,29 <sup>f</sup>	99,97 ± 0,58 <sup>c</sup>	170,98 ± 0,58 <sup>l</sup>	1038,41 ± 5,77 <sup>m</sup>	5,95 ± 0,01 <sup>l</sup>
Mel	71,41 ± 0,68 <sup>e</sup>	20,76 ± 0,01 <sup>e</sup>	991,34 ± 0,29 <sup>f</sup>	728,79 ± 1,15 <sup>f</sup>	26,22 ± 0,23 <sup>e</sup>	177,60 ± 0,57 <sup>j</sup>	80,88 ± 0,01 <sup>c</sup>	647,47 ± 5,77 <sup>d</sup>	2,12 ± 0,01 <sup>d</sup>
100 Gy + Mel	127,08 ± 0,95 <sup>d</sup>	24,76 ± 0,02 <sup>h</sup>	1293,63 ± 0,58 <sup>l</sup>	1160,46 ± 5,77 <sup>l</sup>	61,32 ± 0,11 <sup>k</sup>	121,87 ± 3,46 <sup>f</sup>	165,53 ± 1,73 <sup>k</sup>	930,10 ± 5,20 <sup>k</sup>	2,41 ± 0,01 <sup>f</sup>
200 Gy + Mel	325,19 ± 1,44 <sup>m</sup>	32,68 ± 0,01 <sup>j</sup>	2153,43 ± 2,91 <sup>m</sup>	1020,33 ± 6,87 <sup>k</sup>	23,68 ± 0,58 <sup>d</sup>	118,35 ± 1,15 <sup>e</sup>	119,72 ± 1,22 <sup>g</sup>	957,91 ± 1,15 <sup>l</sup>	3,06 ± 0,01 <sup>h</sup>
300 Gy + Mel	342,26 ± 1,02 <sup>n</sup>	38,10 ± 0,02 <sup>m</sup>	2192,05 ± 0,91 <sup>n</sup>	822,17 ± 3,46 <sup>j</sup>	76,81 ± 0,56 <sup>m</sup>	107,53 ± 2,31 <sup>d</sup>	209,67 ± 1,18 <sup>n</sup>	1759,87 ± 5,77 <sup>n</sup>	6,29 ± 0,01 <sup>m</sup>
400 Gy + Mel	198,53 ± 0,59 <sup>g</sup>	20,15 ± 0,06 <sup>c</sup>	1835,5 ± 0,82 <sup>l</sup>	779,65 ± 1,15 <sup>i</sup>	56,20 ± 1,15 <sup>j</sup>	95,73 ± 1,73 <sup>b</sup>	150,17 ± 1,13 <sup>j</sup>	693,24 ± 2,88 <sup>e</sup>	7,31 ± 0,01 <sup>n</sup>
Sürgün									
kontrol (0 Gy)	130,17 ± 0,58 <sup>e</sup>	-	291,16 ± 3,46 <sup>e</sup>	-	8,62 ± 0,06 <sup>f</sup>	156,17 ± 0,58 <sup>l</sup>	3,04 ± 0,01 <sup>a</sup>	57,34 ± 0,58 <sup>e</sup>	0,19 ± 0,05 <sup>a</sup>
100 Gy	132,93 ± 1,15 <sup>f</sup>	16,02 ± 0,07 <sup>b</sup>	356,51 ± 1,15 <sup>g</sup>	-	9,81 ± 0,03 <sup>g</sup>	220,80 ± 1,15 <sup>j</sup>	3,72 ± 0,01 <sup>b</sup>	93,35 ± 0,67 <sup>f</sup>	0,25 ± 0,01 <sup>b</sup>
200 Gy	192,01 ± 1,16 <sup>k</sup>	54,82 ± 0,06 <sup>i</sup>	395,96 ± 0,57 <sup>i</sup>	1,44 ± 0,01 <sup>a</sup>	14,32 ± 0,05 <sup>k</sup>	313,10 ± 0,68 <sup>n</sup>	10,68 ± 0,06 <sup>f</sup>	173,36 ± 1,15 <sup>l</sup>	0,39 ± 0,01 <sup>d</sup>
300 Gy	203,10 ± 0,67 <sup>m</sup>	115,22 ± 1,15 <sup>j</sup>	608,79 ± 3,46 <sup>n</sup>	161,44 ± 0,57 <sup>g</sup>	15,41 ± 0,04 <sup>l</sup>	366,41 ± 1,56 <sup>o</sup>	23,81 ± 0,11 <sup>l</sup>	362,18 ± 1,04 <sup>n</sup>	1,88 ± 0,01 <sup>f</sup>
400 Gy	111,33 ± 0,59 <sup>c</sup>	20,58 ± 0,03 <sup>c</sup>	433,85 ± 1,15 <sup>j</sup>	292,17 ± 1,15 <sup>h</sup>	26,57 ± 0,01 <sup>o</sup>	251,09 ± 1,73 <sup>k</sup>	75,14 ± 0,06 <sup>o</sup>	516,79 ± 1,73 <sup>o</sup>	-
Ön-Mel	117,20 ± 1,32 <sup>d</sup>	-	102,84 ± 2,24 <sup>a</sup>	-	2,65 ± 0,01 <sup>a</sup>	120,01 ± 2,31 <sup>d</sup>	4,17 ± 0,01 <sup>c</sup>	37,44 ± 0,57 <sup>b</sup>	-
Ön-Mel + 100 Gy	92,55 ± 1,22 <sup>b</sup>	24,31 ± 0,05 <sup>f</sup>	232,68 ± 1,15 <sup>d</sup>	-	7,52 ± 0,04 <sup>e</sup>	131,56 ± 0,57 <sup>e</sup>	8,97 ± 0,01 <sup>e</sup>	48,24 ± 0,68 <sup>d</sup>	0,35 ± 0,01 <sup>c</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	190,37 ± 1,71 <sup>k</sup>	34,21 ± 0,04 <sup>h</sup>	341,17 ± 0,97 <sup>f</sup>	37,72 ± 0,11 <sup>f</sup>	10,25 ± 0,01 <sup>h</sup>	218,65 ± 3,61 <sup>i</sup>	11,41 ± 0,02 <sup>g</sup>	101,48 ± 0,58 <sup>g</sup>	-
Ön-Mel + 300 Gy	136,79 ± 0,55 <sup>g</sup>	19,37 ± 0,06 <sup>d</sup>	442,71 ± 2,01 <sup>k</sup>	-	12,19 ± 0,11 <sup>j</sup>	260,49 ± 2,88 <sup>l</sup>	11,56 ± 0,01 <sup>h</sup>	103,76 ± 1,21 <sup>h</sup>	-
Ön-Mel + 400 Gy	140,21 ± 0,54 <sup>h</sup>	22,02 ± 0,05 <sup>e</sup>	381,12 ± 0,69 <sup>h</sup>	19,33 ± 0,06 <sup>e</sup>	18,90 ± 0,03 <sup>m</sup>	275,19 ± 1,64 <sup>m</sup>	12,41 ± 0,05 <sup>i</sup>	204,71 ± 1,15 <sup>m</sup>	-
Mel	188,20 ± 0,55 <sup>j</sup>	-	471,47 ± 0,67 <sup>m</sup>	-	3,28 ± 0,01 <sup>b</sup>	206,33 ± 1,73 <sup>h</sup>	7,98 ± 0,01 <sup>d</sup>	27,45 ± 0,11 <sup>a</sup>	-
100 Gy + Mel	86,37 ± 1,15 <sup>a</sup>	7,99 ± 0,01 <sup>a</sup>	459,92 ± 0,58 <sup>l</sup>	-	4,03 ± 0,03 <sup>c</sup>	196,93 ± 1,64 <sup>g</sup>	14,81 ± 0,05 <sup>j</sup>	41,29 ± 0,05 <sup>c</sup>	0,24 ± 0,01 <sup>b</sup>
200 Gy + Mel	201,58 ± 0,61 <sup>l</sup>	17,30 ± 0,04 <sup>c</sup>	105,99 ± 1,15 <sup>b</sup>	2,51 ± 0,06 <sup>b</sup>	4,72 ± 0,01 <sup>d</sup>	97,62 ± 0,58 <sup>c</sup>	16,15 ± 0,06 <sup>k</sup>	105,64 ± 2,31 <sup>l</sup>	0,25 ± 0,01 <sup>b</sup>
300 Gy + Mel	349,60 ± 1,73 <sup>n</sup>	20,34 ± 0,01 <sup>e</sup>	106,45 ± 1,19 <sup>b</sup>	3,65 ± 0,01 <sup>c</sup>	12,11 ± 0,04 <sup>i</sup>	87,52 ± 0,02 <sup>b</sup>	28,85 ± 0,02 <sup>m</sup>	110,25 ± 1,73 <sup>j</sup>	-
400 Gy + Mel	148,69 ± 0,58 <sup>i</sup>	32,54 ± 0,03 <sup>g</sup>	115,85 ± 0,57 <sup>c</sup>	4,87 ± 0,01 <sup>d</sup>	19,53 ± 0,05 <sup>n</sup>	58,53 ± 0,69 <sup>a</sup>	30,21 ± 0,01 <sup>n</sup>	126,34 ± 0,84 <sup>k</sup>	0,48 ± 0,01

Kısaltmalar: 4-HBA; 4-hidroksibenzoik asit, 3-HBA; 3- hidroksibenzoik asit, VaA; vanilik asit, SyA; siringik asit, SaA; salisilik asit, p-KuA; p-kumarik asit, SiA; sinapik asit, FeA; ferulik asit, KaA; kafeik asit



Buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerde serbest formdaki fenolik asit değişimleri Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Her iki bitki kısmında da 4-HBA, 3-HBA, VaA, SyA, SaA, *p*-KuA ve FeA olmak üzere 7 farklı serbest formda fenolik asidin varlığı belirlenmiştir. Buğday fidelerinin köklerinde serbest formdaki bireysel fenolik asitlerden 3-HBA, SyA, SaA, ve FeA içerikleri artan IR dozları ile kontrol grubuna kıyasla istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artmıştır. Vanilik asit, 4-HBA ve *p*-KuA içeriklerinin ise 100 Gy'den 300 Gy'e kadar önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artış gösterdiği, buna karşın 400 Gy radyasyon uygulamasında bu fenolik asit içeriklerinin azaldığı tespit edilmiştir. İyonize radyasyon uygulaması ile fidelerin köklerinde artan serbest formdaki tüm fenolik asit (SaA hariç) içeriğinin, ekim öncesi Mel uygulaması ile önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaldığı kaydedilmiştir. Salisilik asit içeriğinin ise ön-Mel uygulaması ile yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla 100 Gy'de azaldığı 200, 300 ve 400 Gy radyasyon dozlarının uygulandığı gruplarda ise daha da arttığı belirlenmiştir. Ekim sonrası Mel uygulamasının ise bireysel fenolik asit içeriği üzerinde genel olarak düşük dozlarda arttırıcı, yüksek dozlarda ise azaltıcı yönde etki gösterdiği tespit edilmiştir. Toplam fenolik asit içeriğinin, kontrol grubuna kıyasla ( $84,34 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$ ) 100 Gy'den 300 Gy'e kadar arttığı ( $98,28 - 242,55 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$ ) 400 Gy ( $222,23 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$ )'de ise bir miktar azaldığı belirlenmiştir. Her iki Mel uygulamasının da (ön-Mel, Mel) IR'den kaynaklanan  $\Sigma\text{FA}$  içeriğini 100 – 300 Gy'de azalttığı, 400 Gy'de ise IR'li kontrole kıyasla arttırdığı kaydedilmiştir (Şekil 3.22c).

Buğday fidelerinin sürgünlerinde serbest formda bulunan 4-HBA, VaA ve SaA içerikleri kontrol grubuna kıyasla 100 Gy'den 300 Gy'e kadar önemli düzeyde artarken, 400 Gy'de ise azalmıştır. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları artan 4-HBA, VaA ve SaA içeriğini 100, 200 ve 300 Gy'lerde azaltıp, 400 Gy'de ise arttırmıştır. Sürgünde serbest formdaki  $\Sigma\text{HBA}$ ,  $\Sigma\text{HSA}$  ve  $\Sigma\text{FA}$  içerikleri kontrol grubunda sırasıyla  $103,27$ ,  $12,36$  ve  $115,63 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  olarak tespit edilmiştir. İyonize radyasyon uygulamaları ile  $\Sigma\text{HBA}$  içeriğinin  $194,46 - 436,45 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  arasında,  $\Sigma\text{HSA}$  içeriğinin  $17,66 - 104,77 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  arasında ve  $\Sigma\text{FA}$  içeriğinin  $212,12 - 541,22 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  arasında olduğu ve hepsinin 300 Gy'e kadar arttığı, 400 Gy'de ise 300 Gy'e kıyasla önemli kabul edilecek düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Ekim öncesi Mel uygulamasının IR'den kaynaklanan  $\Sigma\text{HBA}$ ,  $\Sigma\text{HSA}$  ve  $\Sigma\text{FA}$  içeriğindeki artışı (100 – 300 Gy) azalttığı kaydedilmiştir. Ekim sonrası Mel uygulaması ile de  $\Sigma\text{HBA}$  içeriği  $94,10 - 313,48 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  arasında,  $\Sigma\text{HSA}$  içeriği  $6,96 - 131,59 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  arasında ve  $\Sigma\text{FA}$  içeriği  $101,06 - 445,07 \text{ ng g}^{-1} \text{ TA}$  arasında belirlenmiştir (Şekil 3.22d).

Tablo 3.6. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının serbest formda fenolik asit içeriğine (ng g<sup>-1</sup> TA) etkisi.

<b>Kök</b>							
<b>Uygulama</b>	<b>4-HBA</b>	<b>3-HBA</b>	<b>VaA</b>	<b>SyA</b>	<b>SaA</b>	<b>p-KuA</b>	<b>FeA</b>
0 Gy (kontrol)	19,73 ± 0,63 <sup>c</sup>	1,04 ± 0,01 <sup>d</sup>	30,68 ± 0,28 <sup>d</sup>	2,67 ± 0,34 <sup>a</sup>	1,05 ± 0,20 <sup>bcd</sup>	20,87 ± 0,08 <sup>c</sup>	8,30 ± 0,28 <sup>c</sup>
100 Gy	21,50 ± 0,99 <sup>d</sup>	1,11 ± 0,01 <sup>e</sup>	36,58 ± 1,01 <sup>f</sup>	3,35 ± 0,17 <sup>bcd</sup>	1,39 ± 0,11 <sup>d</sup>	25,40 ± 0,25 <sup>ef</sup>	8,95 ± 0,36 <sup>cde</sup>
200 Gy	27,81 ± 1,13 <sup>f</sup>	1,18 ± 0,01 <sup>f</sup>	44,56 ± 0,69 <sup>i</sup>	3,91 ± 0,01 <sup>d</sup>	2,03 ± 0,03 <sup>e</sup>	28,32 ± 0,37 <sup>j</sup>	10,64 ± 0,19 <sup>f</sup>
300 Gy	50,51 ± 0,11 <sup>l</sup>	1,54 ± 0,01 <sup>h</sup>	92,65 ± 2,05 <sup>o</sup>	20,60 ± 0,37 <sup>j</sup>	2,17 ± 0,12 <sup>e</sup>	45,23 ± 0,16 <sup>l</sup>	29,85 ± 0,48 <sup>k</sup>
400 Gy	41,45 ± 1,27 <sup>k</sup>	1,74 ± 0,02 <sup>j</sup>	74,48 ± 1,36 <sup>n</sup>	38,49 ± 0,33 <sup>k</sup>	3,40 ± 0,28 <sup>f</sup>	26,32 ± 0,37 <sup>gh</sup>	36,35 ± 0,28 <sup>l</sup>
Ön-Mel	9,91 ± 0,70 <sup>a</sup>	0,59 ± 0,01 <sup>a</sup>	18,90 ± 0,16 <sup>a</sup>	2,25 ± 0,06 <sup>a</sup>	0,60 ± 0,02 <sup>a</sup>	21,93 ± 0,43 <sup>d</sup>	5,64 ± 0,26 <sup>a</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	17,21 ± 0,43 <sup>b</sup>	0,67 ± 0,01 <sup>b</sup>	21,26 ± 0,10 <sup>b</sup>	2,82 ± 0,21 <sup>ab</sup>	0,66 ± 0,06 <sup>ab</sup>	22,35 ± 0,33 <sup>d</sup>	7,04 ± 0,47 <sup>b</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	20,58 ± 0,09 <sup>cd</sup>	1,13 ± 0,06 <sup>ef</sup>	22,81 ± 0,15 <sup>c</sup>	3,61 ± 0,29 <sup>cd</sup>	2,16 ± 0,20 <sup>e</sup>	16,40 ± 0,21 <sup>a</sup>	8,52 ± 0,39 <sup>cd</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	21,18 ± 0,67 <sup>d</sup>	1,64 ± 0,02 <sup>i</sup>	32,40 ± 0,10 <sup>e</sup>	6,33 ± 0,19 <sup>f</sup>	2,21 ± 0,34 <sup>e</sup>	27,69 ± 0,21 <sup>i</sup>	9,40 ± 0,46 <sup>c</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	38,90 ± 0,49 <sup>j</sup>	1,48 ± 0,01 <sup>g</sup>	70,92 ± 0,23 <sup>m</sup>	16,37 ± 0,56 <sup>i</sup>	4,20 ± 0,15 <sup>g</sup>	26,81 ± 0,01 <sup>h</sup>	27,45 ± 0,27 <sup>j</sup>
Mel	23,17 ± 0,67 <sup>e</sup>	1,70 ± 0,09 <sup>j</sup>	40,02 ± 0,29 <sup>g</sup>	3,28 ± 0,32 <sup>bc</sup>	0,89 ± 0,14 <sup>abc</sup>	25,18 ± 0,13 <sup>e</sup>	9,05 ± 0,76 <sup>de</sup>
100 Gy + Mel	24,32 ± 1,22 <sup>e</sup>	1,87 ± 0,01 <sup>k</sup>	42,33 ± 0,10 <sup>h</sup>	3,47 ± 0,02 <sup>cd</sup>	1,11 ± 0,01 <sup>cd</sup>	25,95 ± 0,63 <sup>fg</sup>	10,17 ± 0,40 <sup>f</sup>
200 Gy + Mel	30,74 ± 0,01 <sup>g</sup>	2,40 ± 0,01 <sup>l</sup>	64,72 ± 0,24 <sup>k</sup>	5,65 ± 0,17 <sup>e</sup>	1,84 ± 0,22 <sup>e</sup>	30,27 ± 0,52 <sup>k</sup>	15,84 ± 0,29 <sup>g</sup>
300 Gy + Mel	33,93 ± 0,27 <sup>h</sup>	2,49 ± 0,01 <sup>m</sup>	67,47 ± 1,15 <sup>l</sup>	8,71 ± 0,06 <sup>g</sup>	3,86 ± 0,15 <sup>g</sup>	48,76 ± 0,52 <sup>m</sup>	21,27 ± 0,16 <sup>i</sup>
400 Gy + Mel	36,63 ± 0,22 <sup>i</sup>	0,75 ± 0,01 <sup>c</sup>	57,47 ± 1,52 <sup>j</sup>	14,99 ± 0,82 <sup>h</sup>	9,42 ± 0,59 <sup>h</sup>	19,38 ± 0,34 <sup>b</sup>	20,02 ± 0,35 <sup>h</sup>
<b>Sürgün</b>							
0 Gy (kontrol)	21,98 ± 2,24 <sup>a</sup>	1,69 ± 0,19 <sup>b</sup>	70,84 ± 2,21 <sup>b</sup>	6,93 ± 0,51 <sup>b</sup>	1,83 ± 0,07 <sup>c</sup>	11,64 ± 0,62 <sup>ef</sup>	0,72 ± 0,13 <sup>a</sup>
100 Gy	74,54 ± 0,97 <sup>g</sup>	2,24 ± 0,03 <sup>cd</sup>	106,34 ± 3,09 <sup>de</sup>	8,99 ± 1,61 <sup>b</sup>	2,35 ± 0,07 <sup>e</sup>	15,18 ± 0,32 <sup>hi</sup>	2,48 ± 0,03 <sup>a</sup>
200 Gy	77,87 ± 3,02 <sup>hi</sup>	2,53 ± 0,17 <sup>e</sup>	156,95 ± 7,55 <sup>h</sup>	110,39 ± 5,55 <sup>i</sup>	6,40 ± 0,38 <sup>k</sup>	15,37 ± 0,50 <sup>hi</sup>	63,12 ± 3,33 <sup>g</sup>
300 Gy	79,70 ± 1,03 <sup>i</sup>	2,58 ± 0,28 <sup>e</sup>	256,43 ± 16,01 <sup>i</sup>	90,20 ± 0,85 <sup>h</sup>	7,54 ± 0,07 <sup>l</sup>	16,64 ± 0,56 <sup>i</sup>	88,13 ± 1,82 <sup>i</sup>
400 Gy	33,70 ± 0,08 <sup>b</sup>	4,83 ± 0,15 <sup>g</sup>	86,93 ± 5,36 <sup>c</sup>	25,21 ± 3,65 <sup>d</sup>	2,11 ± 0,17 <sup>d</sup>	9,16 ± 0,10 <sup>cd</sup>	19,87 ± 0,81 <sup>c</sup>
Ön-Mel	33,58 ± 2,05 <sup>b</sup>	0,71 ± 0,12 <sup>a</sup>	68,42 ± 4,62 <sup>b</sup>	1,58 ± 0,12 <sup>a</sup>	1,02 ± 0,03 <sup>a</sup>	7,92 ± 0,28 <sup>bc</sup>	0,30 ± 0,08 <sup>a</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	34,25 ± 1,27 <sup>b</sup>	1,99 ± 0,06 <sup>c</sup>	104,02 ± 4,55 <sup>d</sup>	20,20 ± 1,35 <sup>c</sup>	1,72 ± 0,02 <sup>c</sup>	10,29 ± 0,23 <sup>de</sup>	8,36 ± 0,25 <sup>b</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	55,62 ± 0,54 <sup>e</sup>	2,17 ± 0,14 <sup>cd</sup>	117,42 ± 4,36 <sup>ef</sup>	34,69 ± 0,83 <sup>e</sup>	2,55 ± 0,06 <sup>e</sup>	13,71 ± 0,43 <sup>gh</sup>	8,90 ± 0,14 <sup>b</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	76,84 ± 2,38 <sup>gh</sup>	2,43 ± 0,26 <sup>de</sup>	126,49 ± 7,86 <sup>fg</sup>	33,11 ± 0,34 <sup>e</sup>	4,86 ± 0,08 <sup>h</sup>	14,19 ± 0,66 <sup>gh</sup>	23,64 ± 0,48 <sup>d</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	42,73 ± 2,22 <sup>c</sup>	2,56 ± 0,15 <sup>e</sup>	132,74 ± 7,63 <sup>g</sup>	35,54 ± 0,99 <sup>e</sup>	3,71 ± 0,11 <sup>g</sup>	8,97 ± 0,35 <sup>cd</sup>	41,15 ± 0,22 <sup>e</sup>
Mel	31,69 ± 0,14 <sup>b</sup>	0,74 ± 0,03 <sup>a</sup>	51,13 ± 1,08 <sup>a</sup>	9,41 ± 0,58 <sup>b</sup>	1,13 ± 0,13 <sup>a</sup>	4,77 ± 4,10 <sup>a</sup>	2,19 ± 0,09 <sup>a</sup>
100 Gy + Mel	32,08 ± 0,82 <sup>b</sup>	0,93 ± 0,08 <sup>a</sup>	52,98 ± 1,79 <sup>a</sup>	52,11 ± 2,59 <sup>f</sup>	1,43 ± 0,04 <sup>b</sup>	6,24 ± 0,30 <sup>ab</sup>	23,21 ± 1,28 <sup>d</sup>
200 Gy + Mel	49,71 ± 1,64 <sup>d</sup>	0,83 ± 0,13 <sup>a</sup>	129,23 ± 1,26 <sup>g</sup>	92,14 ± 3,16 <sup>h</sup>	5,11 ± 0,06 <sup>i</sup>	12,45 ± 0,28 <sup>fg</sup>	73,58 ± 1,60 <sup>h</sup>
300 Gy + Mel	67,12 ± 0,55 <sup>f</sup>	2,11 ± 0,08 <sup>c</sup>	154,62 ± 0,40 <sup>h</sup>	83,95 ± 1,41 <sup>g</sup>	5,68 ± 0,10 <sup>j</sup>	12,84 ± 0,30 <sup>fg</sup>	118,75 ± 2,78 <sup>i</sup>
400 Gy + Mel	44,72 ± 0,99 <sup>c</sup>	4,51 ± 0,15 <sup>f</sup>	114,66 ± 8,74 <sup>de</sup>	49,77 ± 1,49 <sup>f</sup>	3,04 ± 0,14 <sup>f</sup>	18,73 ± 0,54 <sup>j</sup>	48,68 ± 1,42 <sup>f</sup>

Kısaltmalar: 4-HBA; 4-hidroksibenzoik asit, 3-HBA; 3- hidroksibenzoik asit, VaA; vanilik asit, SyA; siringik asit, SaA; salisilik asit, p-KuA; p-kumarik asit, FeA; ferulik asit

Buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerde ester formda fenolik asit içeriği değişimleri Tablo 3.7’de verilmiştir. Her iki bitki kısmında da 4-HBA, 3-HBA, VaA, SyA, SaA, *p*-KuA, FeA, SiA, FeA ve KaA içeriğine ek olarak gallik asit (GaA) de olmak üzere ester formda 10 farklı fenolik asidin varlığı belirlenmiştir. Kökte en yüksek miktarda içerilen ester formdaki fenolik asit, FeA (kontrol; 235,42 ng g<sup>-1</sup> TA) olmuştur. Gallik asit kontrol, 100 ve 200 Gy uygulamalarında ve ön-Mel uygulamalarının hiçbirinde (400 Gy hariç) belirlenememiştir. Ancak yüksek dozda IR uygulamasının yapıldığı gruplarda (300 Gy; 1,06 ng g<sup>-1</sup> TA ve 400 Gy; 3,11 ng g<sup>-1</sup> TA) ve ekim sonrası Mel uygulamasına ait tüm gruplarda (0,40 – 6,15 ng g<sup>-1</sup> TA) belirlenmiştir. Kök kısmında ΣHBA içeriğinin IR uygulama gruplarında 288,40 – 1203,31 ng g<sup>-1</sup> TA arasında, ekim öncesi Mel uygulama gruplarında 379,86 – 1031,69 ng g<sup>-1</sup> TA arasında ve ekim sonrası Mel uygulama gruplarında ise 601,92 – 1007,16 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değiştiği saptanmıştır. Ayrıca ΣHSA içeriğinin IR uygulama gruplarında 434,8 – 3103,11 ng g<sup>-1</sup> TA arasında, ekim öncesi Mel uygulama gruplarında 430,63 – 2599,29 ng g<sup>-1</sup> TA arasında ve ekim sonrası Mel uygulama gruplarında ise 879,85 – 2251,99 ng g<sup>-1</sup> TA arasında olduğu belirlenmiştir. Yalnızca IR uygulaması yapılan gruplarda ester formunda ΣFA içeriğinin kontrol grubuna kıyasla (631,66 ng g<sup>-1</sup> TA) arttığı, bu artışın ön-Mel uygulaması ile 200, 300 ve 400 Gy dozlarında, ekim sonrası Mel uygulaması ile de tüm IR dozlarında azaldığı saptanmıştır (Şekil 3.22e).

Sürgünde en yüksek miktarda içerilen ester formdaki başlıca fenolik asitler FeA (7503,12 – 3295,54 ng g<sup>-1</sup> TA), *p*-KuA (2631,75 – 427,06 ng g<sup>-1</sup> TA) ve SyA (1785,24 – 820,95 ng g<sup>-1</sup> TA) olup, miktarları kontrol grubuna kıyasla 400 Gy uygulama dozuna kadar azalma göstermiştir. En düşük miktarda içerilen fenolik asitler ise GaA (0,38 ng g<sup>-1</sup> TA) ve SaA (0,84 ng g<sup>-1</sup> TA) olmuştur. Gallik asit, köklerin aksine, sürgünlere ait tüm uygulama gruplarında tespit edilmiştir. Kontrol grubunda 0,38 ng g<sup>-1</sup> TA olan GaA içeriği, yalnız IR uygulanan gruplarda 0,60 – 6,27 ng g<sup>-1</sup> TA, ön-Mel uygulamasında 0,28 – 3,36 ng g<sup>-1</sup> TA ve ekim sonrası Mel uygulamasında ise 0,5 – 3,88 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değişme göstermiştir. Sürgünlerde ester formdaki ΣFA içeriğinin, IR uygulamaları ile kontrol grubuna kıyasla (12569,62 ng g<sup>-1</sup> TA) azaldığı ve 400 Gy’de yaklaşık 2,2 katlık bir azalmanın olduğu saptanmıştır. Ekim öncesi Mel uygulamasının ΣFA içeriğini IR’li kontrollerine kıyasla daha da azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulamasının ise ΣFA içeriğini yalnızca 300 ve 400 Gy uygulanan gruplarda azalttığı, buna karşın 100 ve 200 Gy’lerde IR’li kontrollerine kıyasla ΣFA içeriğini arttırdığı kaydedilmiştir (Şekil 3.22f).

**Tablo 3.7.** Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının ester formda fenolik asit içeriğine (ng g<sup>-1</sup> TA) olan etkisi.

Kök											
Uygulama	4-HBA	3-HBA	GaA	VaA	SyA	SaA	p-KuA	SiA	FeA	KaA	
kontrol (0 Gy)	40,31 ± 0,01 <sup>a</sup>	4,19 ± 0,04 <sup>c</sup>	-	93,45 ± 0,41 <sup>b</sup>	105,07 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,27 ± 0,01 <sup>a</sup>	69,04 ± 1,15 <sup>b</sup>	83,36 ± 1,15 <sup>b</sup>	235,42 ± 1,15 <sup>c</sup>	0,55 ± 0,03 <sup>b</sup>	
100 Gy	48,49 ± 0,01 <sup>c</sup>	5,31 ± 0,14 <sup>cd</sup>	-	103,05 ± 0,02 <sup>c</sup>	131,23 ± 1,12 <sup>b</sup>	0,32 ± 0,01 <sup>b</sup>	83,46 ± 1,16 <sup>d</sup>	103,77 ± 1,73 <sup>d</sup>	246,89 ± 2,06 <sup>e</sup>	0,68 ± 0,02 <sup>c</sup>	
200 Gy	50,44 ± 0,02 <sup>d</sup>	5,68 ± 0,38 <sup>d</sup>	-	144,29 ± 1,20 <sup>f</sup>	136,33 ± 1,15 <sup>c</sup>	0,49 ± 0,01 <sup>d</sup>	97,52 ± 0,57 <sup>e</sup>	127,50 ± 1,25 <sup>g</sup>	285,92 ± 2,92 <sup>g</sup>	0,79 ± 0,01 <sup>d</sup>	
300 Gy	107,90 ± 0,01 <sup>i</sup>	6,01 ± 0,41 <sup>d</sup>	1,06 ± 0,01 <sup>b</sup>	278,15 ± 0,99 <sup>i</sup>	270,67 ± 0,57 <sup>i</sup>	1,20 ± 0,01 <sup>j</sup>	179,62 ± 1,15 <sup>h</sup>	436,44 ± 0,01 <sup>j</sup>	882,34 ± 3,91 <sup>j</sup>	3,74 ± 0,01 <sup>h</sup>	
400 Gy	221,84 ± 0,10 <sup>n</sup>	18,93 ± 1,38 <sup>gh</sup>	3,11 ± 0,01 <sup>f</sup>	592,94 ± 2,31 <sup>m</sup>	362,19 ± 0,68 <sup>m</sup>	4,30 ± 0,06 <sup>n</sup>	214,55 ± 2,27 <sup>j</sup>	1007,04 ± 1,32 <sup>n</sup>	1868,57 ± 0,51 <sup>n</sup>	12,95 ± 0,01 <sup>m</sup>	
On-Mel	45,34 ± 0,34 <sup>b</sup>	1,72 ± 0,14 <sup>a</sup>	-	83,94 ± 1,21 <sup>a</sup>	165,79 ± 1,73 <sup>d</sup>	0,78 ± 0,01 <sup>i</sup>	44,82 ± 0,58 <sup>a</sup>	59,85 ± 0,59 <sup>a</sup>	147,74 ± 1,12 <sup>a</sup>	0,26 ± 0,01 <sup>a</sup>	
On-Mel + 100 Gy	50,32 ± 0,21 <sup>d</sup>	2,94 ± 0,38 <sup>b</sup>	-	95,47 ± 1,15 <sup>b</sup>	374,52 ± 0,57 <sup>n</sup>	0,99 ± 0,01 <sup>i</sup>	133,91 ± 2,89 <sup>g</sup>	122,76 ± 3,46 <sup>g</sup>	263,65 ± 1,71 <sup>f</sup>	0,63 ± 0,01 <sup>e</sup>	
On-Mel + 200 Gy	57,75 ± 0,25 <sup>f</sup>	2,97 ± 0,05 <sup>b</sup>	-	143,32 ± 3,24 <sup>f</sup>	175,42 ± 0,45 <sup>e</sup>	0,40 ± 0,01 <sup>e</sup>	79,44 ± 0,58 <sup>c</sup>	110,71 ± 1,15 <sup>e</sup>	239,95 ± 1,52 <sup>d</sup>	0,53 ± 0,01 <sup>b</sup>	
On-Mel + 300 Gy	84,54 ± 0,32 <sup>g</sup>	2,15 ± 0,27 <sup>ab</sup>	-	119,69 ± 0,95 <sup>d</sup>	194,72 ± 2,28 <sup>f</sup>	0,60 ± 0,01 <sup>e</sup>	111,21 ± 1,55 <sup>f</sup>	120,98 ± 0,01 <sup>f</sup>	265,64 ± 1,28 <sup>f</sup>	0,81 ± 0,02 <sup>d</sup>	
On-Mel + 400 Gy	174,75 ± 0,12 <sup>i</sup>	19,52 ± 0,79 <sup>h</sup>	2,19 ± 0,01 <sup>d</sup>	490,70 ± 0,61 <sup>j</sup>	340,71 ± 1,12 <sup>i</sup>	3,82 ± 0,01 <sup>m</sup>	209,17 ± 0,58 <sup>i</sup>	764,98 ± 2,31 <sup>m</sup>	1617,9 ± 0,57 <sup>m</sup>	7,20 ± 0,10 <sup>k</sup>	
Mel	56,63 ± 0,25 <sup>e</sup>	10,49 ± 0,13 <sup>e</sup>	0,40 ± 0,01 <sup>a</sup>	126,01 ± 1,90 <sup>e</sup>	223,78 ± 1,14 <sup>g</sup>	0,83 ± 0,01 <sup>g</sup>	84,32 ± 0,34 <sup>d</sup>	89,56 ± 0,57 <sup>c</sup>	204,59 ± 2,22 <sup>b</sup>	2,06 ± 0,02 <sup>g</sup>	
100 Gy + Mel	90,81 ± 0,14 <sup>h</sup>	16,43 ± 0,79 <sup>i</sup>	1,22 ± 0,01 <sup>e</sup>	204,48 ± 2,03 <sup>g</sup>	288,04 ± 0,56 <sup>i</sup>	0,94 ± 0,01 <sup>h</sup>	179,77 ± 1,22 <sup>h</sup>	214,49 ± 2,25 <sup>h</sup>	483,58 ± 2,31 <sup>h</sup>	2,01 ± 0,01 <sup>f</sup>	
200 Gy + Mel	110,50 ± 0,41 <sup>j</sup>	18,60 ± 0,14 <sup>g</sup>	2,74 ± 0,03 <sup>e</sup>	259,21 ± 1,12 <sup>h</sup>	306,42 ± 0,58 <sup>k</sup>	1,31 ± 0,01 <sup>k</sup>	223,92 ± 1,15 <sup>k</sup>	353,92 ± 1,13 <sup>i</sup>	639,30 ± 1,15 <sup>i</sup>	4,13 ± 0,01 <sup>i</sup>	
300 Gy + Mel	168,58 ± 0,25 <sup>k</sup>	27,65 ± 0,77 <sup>i</sup>	6,15 ± 0,01 <sup>h</sup>	406,11 ± 2,25 <sup>j</sup>	394,93 ± 2,31 <sup>o</sup>	3,74 ± 0,01 <sup>l</sup>	225,75 ± 2,25 <sup>l</sup>	522,31 ± 3,44 <sup>k</sup>	1176,91 ± 1,73 <sup>k</sup>	5,29 ± 0,03 <sup>j</sup>	
400 Gy + Mel	183,62 ± 0,11 <sup>m</sup>	31,58 ± 0,86 <sup>j</sup>	3,18 ± 0,01 <sup>g</sup>	465,64 ± 2,15 <sup>k</sup>	243,36 ± 2,87 <sup>h</sup>	9,17 ± 0,4 <sup>o</sup>	214,18 ± 2,11 <sup>j</sup>	636,28 ± 1,02 <sup>l</sup>	1393,37 ± 1,78 <sup>l</sup>	8,16 ± 0,01 <sup>l</sup>	
Sürgün											
kontrol (0 Gv)	291,49 ± 1,38 <sup>j</sup>	4,55 ± 0,14 <sup>a</sup>	0,38 ± 0,01 <sup>ab</sup>	298,76 ± 0,91 <sup>c</sup>	1785,24 ± 0,20 <sup>k</sup>	0,84 ± 0,01 <sup>ab</sup>	2631,75 ± 6,56 <sup>m</sup>	31,26 ± 0,02 <sup>a</sup>	7503,12 ± 9,21 <sup>m</sup>	22,23 ± 0,45 <sup>d</sup>	
100 Gy	229,84 ± 1,38 <sup>h</sup>	8,58 ± 0,02 <sup>d</sup>	0,60 ± 0,02 <sup>c</sup>	460,85 ± 0,02 <sup>h</sup>	1608,18 ± 1,98 <sup>j</sup>	1,04 ± 0,01 <sup>ab</sup>	2149,95 ± 1,64 <sup>j</sup>	67,36 ± 0,26 <sup>d</sup>	6834,69 ± 1,21 <sup>l</sup>	45,96 ± 0,18 <sup>h</sup>	
200 Gy	225,46 ± 1,38 <sup>g</sup>	11,65 ± 0,28 <sup>h</sup>	1,49 ± 0,02 <sup>d</sup>	487,90 ± 1,68 <sup>j</sup>	1482,08 ± 0,20 <sup>j</sup>	2,70 ± 0,14 <sup>g</sup>	2012,46 ± 3,28 <sup>i</sup>	108,62 ± 0,25 <sup>h</sup>	6093,78 ± 1,94 <sup>j</sup>	51,51 ± 0,18 <sup>k</sup>	
300 Gy	154,48 ± 2,76 <sup>d</sup>	15,94 ± 0,03 <sup>c</sup>	1,95 ± 0,07 <sup>e</sup>	650,69 ± 0,01 <sup>i</sup>	1103,14 ± 0,11 <sup>f</sup>	2,97 ± 0,13 <sup>h</sup>	1988,60 ± 2,13 <sup>h</sup>	288,82 ± 0,21 <sup>i</sup>	5923,03 ± 2,21 <sup>h</sup>	76,92 ± 0,21 <sup>n</sup>	
400 Gy	126,11 ± 1,49 <sup>d</sup>	28,21 ± 0,80 <sup>m</sup>	6,27 ± 0,01 <sup>i</sup>	461,06 ± 1,62 <sup>h</sup>	820,95 ± 0,21 <sup>b</sup>	3,56 ± 0,16 <sup>i</sup>	427,06 ± 1,64 <sup>b</sup>	415,08 ± 2,24 <sup>o</sup>	3295,54 ± 3,88 <sup>b</sup>	48,07 ± 0,36 <sup>i</sup>	
OnMel	229,12 ± 2,76 <sup>h</sup>	6,77 ± 0,06 <sup>b</sup>	0,28 ± 0,03 <sup>a</sup>	304,86 ± 1,68 <sup>d</sup>	1798,08 ± 0,11 <sup>l</sup>	1,17 ± 0,01 <sup>c</sup>	2280,09 ± 0,95 <sup>f</sup>	81,15 ± 0,34 <sup>e</sup>	6510,66 ± 3,88 <sup>k</sup>	24,92 ± 0,04 <sup>e</sup>	
On-Mel + 100 Gy	176,66 ± 1,38 <sup>f</sup>	7,72 ± 0,07 <sup>c</sup>	0,32 ± 0,02 <sup>a</sup>	225,20 ± 1,09 <sup>a</sup>	1143,25 ± 1,14 <sup>h</sup>	0,88 ± 0,01 <sup>a</sup>	1960,98 ± 1,89 <sup>g</sup>	96,26 ± 0,02 <sup>g</sup>	4570,12 ± 2,21 <sup>d</sup>	38,61 ± 0,36 <sup>g</sup>	
On-Mel + 200 Gy	139,33 ± 0,14 <sup>c</sup>	9,23 ± 0,08 <sup>e</sup>	0,58 ± 0,03 <sup>c</sup>	270,19 ± 0,97 <sup>b</sup>	1114,3 ± 1,14 <sup>g</sup>	1,42 ± 0,14 <sup>d</sup>	1748,71 ± 2,21 <sup>i</sup>	124,3 ± 1,29 <sup>i</sup>	5015,36 ± 1,94 <sup>e</sup>	20,65 ± 0,38 <sup>c</sup>	
On-Mel + 300 Gy	125,06 ± 0,41 <sup>b</sup>	9,88 ± 0,14 <sup>f</sup>	1,58 ± 0,01 <sup>d</sup>	388,16 ± 0,16 <sup>g</sup>	989,19 ± 0,21 <sup>d</sup>	2,62 ± 0,01 <sup>g</sup>	1415,06 ± 3,28 <sup>d</sup>	140,13 ± 0,26 <sup>f</sup>	5605,39 ± 1,21 <sup>f</sup>	14,02 ± 0,39 <sup>a</sup>	
On-Mel + 400 Gy	162,09 ± 1,47 <sup>e</sup>	19,80 ± 0,12 <sup>l</sup>	3,36 ± 0,17 <sup>g</sup>	533,24 ± 0,17 <sup>k</sup>	916,39 ± 1,15 <sup>c</sup>	3,89 ± 0,12 <sup>j</sup>	1085,45 ± 4,13 <sup>c</sup>	294,04 ± 2,24 <sup>m</sup>	4304,81 ± 2,94 <sup>c</sup>	72,4 ± 0,18 <sup>m</sup>	
Mel	255,91 ± 1,38 <sup>i</sup>	13,04 ± 0,03 <sup>i</sup>	0,5 ± 0,01 <sup>b</sup> <sup>c</sup>	387,09 ± 0,34 <sup>g</sup>	2957,93 ± 1,98 <sup>o</sup>	1,07 ± 0,01 <sup>bc</sup>	2242,29 ± 1,64 <sup>k</sup>	41,64 ± 0,13 <sup>b</sup>	6275,71 ± 1,94 <sup>j</sup>	19,47 ± 0,18 <sup>b</sup>	
100 Gy + Mel	312,23 ± 2,76 <sup>k</sup>	19,51 ± 0,08 <sup>k</sup>	1,56 ± 0,10 <sup>d</sup>	479,56 ± 0,09 <sup>i</sup>	2470,41 ± 0,12 <sup>n</sup>	2,36 ± 0,14 <sup>i</sup>	2911,78 ± 3,28 <sup>n</sup>	49,99 ± 4,48 <sup>c</sup>	7620,61 ± 2,75 <sup>n</sup>	63,47 ± 0,36 <sup>f</sup>	
200 Gy + Mel	360,69 ± 0,32 <sup>l</sup>	10,46 ± 0,14 <sup>g</sup>	2,72 ± 0,17 <sup>f</sup>	744,86 ± 0,12 <sup>m</sup>	2284,64 ± 1,14 <sup>m</sup>	3,96 ± 0,14 <sup>j</sup>	2930,22 ± 0,95 <sup>o</sup>	85,84 ± 0,26 <sup>f</sup>	8629,03 ± 1,68 <sup>o</sup>	49,82 ± 0,25 <sup>i</sup>	
300 Gy + Mel	153,0 ± 0,28 <sup>d</sup>	6,91 ± 0,08 <sup>b</sup>	2,85 ± 0,17 <sup>f</sup>	372,30 ± 1,68 <sup>f</sup>	1061,58 ± 0,19 <sup>e</sup>	2,72 ± 0,08 <sup>g</sup>	1663,31 ± 1,64 <sup>e</sup>	144,20 ± 1,29 <sup>k</sup>	5720,65 ± 1,54 <sup>g</sup>	50,39 ± 1,81 <sup>j</sup>	
400 Gy + Mel	91,69 ± 0,14 <sup>a</sup>	11,38 ± 0,14 <sup>h</sup>	3,88 ± 0,01 <sup>h</sup>	338,57 ± 0,34 <sup>e</sup>	613,90 ± 0,21 <sup>a</sup>	2,14 ± 0,13 <sup>e</sup>	316,44 ± 1,15 <sup>a</sup>	409,95 ± 2,15 <sup>n</sup>	2889,57 ± 1,94 <sup>a</sup>	29,72 ± 0,36 <sup>f</sup>	

Kısaltmalar: 4-HBA; 4-hidroksibenzoik asit, 3-HBA; 3- hidroksibenzoik asit, GaA; gallik asit, VaA; vanilik asit, SyA; siringik asit, SaA; salisilik asit, p-KuA; p-kumarik asit, SiA; sinapik asit, FeA; ferulik asit, KaA; kafeik asit.

Buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerde glikozit formda fenolik asit içeriği değişimleri Tablo 3.8’de verilmiştir. Her ikisinde de, ester formdaki fenolik asitlerle aynı olacak şekilde, glikozit formda 10 farklı fenolik asidin varlığı tespit edilmiştir. Kökte en fazla miktarda içerilen fenolik asit SyA olmuştur. İyonize radyasyon uygulamaları ile SyA içeriği 106,24 ila 671,14 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değişmiştir. Kökte içerilen diğer başlıca fenolik asitler VaA (74,07 – 414,49 ng g<sup>-1</sup> TA) ve FeA (27,27 – 526,42 ng g<sup>-1</sup> TA) olup, miktarları IR uygulamaları boyunca artmıştır. Gallik asit ise yalnızca 400 Gy (0,43 ng g<sup>-1</sup> TA), ön-Mel + 400 Gy (0,23 ng g<sup>-1</sup> TA) ve ekim sonrası tüm gruplarda (0,19 – 0,77 ng g<sup>-1</sup> TA) en düşük miktardaki fenolik asitlerden biri olarak belirlenmiştir. Ayrıca SaA (0,13 ng g<sup>-1</sup> TA) ve KaA (0,20 ng g<sup>-1</sup> TA) içeriklerinin de GaA gibi düşük miktarlarda olduğu belirlenmiştir. Kökte glikozit formdaki ΣHBA, ΣHSA ve ΣFA içerikleri artan IR dozları boyunca (100 → 400 Gy) dereceli olarak artmıştır. İyonize radyasyon uygulamaları, glikozit formda ΣHBA içeriğini 222,69 – 1321,15 ng g<sup>-1</sup> TA arasında, ΣHSA içeriğini 68,12 – 868,49 ng g<sup>-1</sup> TA arasında ve ΣFA içeriğini ise 290,80 – 2189,64 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değiştirmiştir. Ekim öncesi Mel uygulaması ΣHBA, ΣHSA ve ΣFA içeriklerini IR’li kontrollerine kıyasla tüm gruplarda azaltırken; ekim sonrası Mel uygulaması bu toplam içerikleri tüm uygulama gruplarında arttırmıştır (Şekil 3.22g).

Sürgünlerde en yüksek miktarda içerilen glikozit formda başlıca fenolik asitler FeA (740,35 – 1127,79 ng g<sup>-1</sup> TA), SyA (164,52 – 265,82 ng g<sup>-1</sup> TA) ve *p*-KuA (164,43 – 291,1 ng g<sup>-1</sup> TA) olarak belirlenmiştir. Gallik asit (0,27 – 0,54 ng g<sup>-1</sup> TA) ve SaA (0,34 – 0,91 ng g<sup>-1</sup> TA) ise en düşük miktarda içerilen glikozit formdaki fenolik asitler olarak belirlenmiştir. Sürgünlerde glikozit formda içerilen tüm bireysel fenolik asitlerin kontrol grubuna kıyasla genel olarak 100 Gy’den 300 Gy’e kadar arttığı, 400 Gy’de ise 300 Gy’e kıyasla bir miktar azaldığı kaydedilmiştir. Ayrıca bu artış ve azalışların istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) olduğu bulunmuştur. Ayrıca ΣHBA içeriğinin ΣHSA içeriğine kıyasla daha düşük olduğu saptanmıştır. Sürgünde glikozit formdaki ΣFA içeriğinin kontrol grubuna kıyasla (1259,12 ng g<sup>-1</sup> TA), 100 Gy’den 300 Gy’e kadar arttığı (1324,79 – 2014,58 ng g<sup>-1</sup> TA), 400 Gy IR uygulamasında ise azaldığı (680,50 ng g<sup>-1</sup> TA) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, toplam fenolik asit içeriğinin ön-Mel uygulaması ile 840,19 – 2084,79 ng g<sup>-1</sup> TA arasında, ekim sonrası Mel uygulaması ile 587,74 – 2031,28 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 3.22h).

**Tablo 3.8.** Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının glikozit formundaki fenolik asit içeriğine (ng g<sup>-1</sup> TA) etkisi.

Uygulamalar	Kök									
	4-HBA	3-HBA	GaA	VaA	SyA	SaA	p-KuA	SiA	FeA	KaA
kontrol (0 Gy)	24,32 ± 1,78 <sup>a</sup>	2,91 ± 0,09 <sup>b</sup>	-	74,07 ± 0,05 <sup>c</sup>	106,24 ± 0,19 <sup>c</sup>	0,13 ± 0,01 <sup>a</sup>	8,84 ± 0,16 <sup>a</sup>	21,61 ± 0,35 <sup>a</sup>	27,27 ± 0,63 <sup>a</sup>	0,20 ± 0,01 <sup>a</sup>
100 Gy	26,46 ± 1,15 <sup>a</sup>	3,33 ± 0,17 <sup>ac</sup>	-	77,60 ± 3,07 <sup>c</sup>	115,12 ± 0,46 <sup>c</sup>	0,17 ± 0,01 <sup>a</sup>	9,57 ± 0,16 <sup>b</sup>	22,13 ± 0,82 <sup>a</sup>	36,21 ± 3,77 <sup>c</sup>	0,21 ± 0,01 <sup>a</sup>
200 Gy	30,19 ± 0,37 <sup>b</sup>	3,61 ± 0,04 <sup>c</sup>	-	84,42 ± 0,30 <sup>d</sup>	127,56 ± 0,01 <sup>f</sup>	0,55 ± 0,24 <sup>abc</sup>	12,25 ± 0,04 <sup>d</sup>	33,17 ± 0,08 <sup>e</sup>	42,80 ± 0,17 <sup>d</sup>	0,26 ± 0,01 <sup>ab</sup>
300 Gy	43,25 ± 2,81 <sup>d</sup>	6,54 ± 0,07 <sup>d</sup>	-	111,80 ± 0,031 <sup>g</sup>	145,93 ± 0,64 <sup>g</sup>	1,10 ± 0,03 <sup>d</sup>	19,52 ± 0,24 <sup>g</sup>	57,74 ± 0,18 <sup>g</sup>	96,98 ± 3,87 <sup>g</sup>	0,73 ± 0,01 <sup>cd</sup>
400 Gy	202,31 ± 1,0 <sup>i</sup>	24,83 ± 0,53 <sup>f</sup>	0,43 ± 0,01 <sup>d</sup>	414,49 ± 2,25 <sup>i</sup>	671,14 ± 1,16 <sup>n</sup>	7,95 ± 0,10 <sup>g</sup>	82,40 ± 0,57 <sup>i</sup>	254,20 ± 0,76 <sup>k</sup>	526,42 ± 2,68 <sup>j</sup>	5,47 ± 0,18 <sup>g</sup>
OnMel	34,51 ± 3,83 <sup>c</sup>	1,62 ± 0,01 <sup>a</sup>	-	91,33 ± 1,05 <sup>e</sup>	109,76 ± 1,86 <sup>d</sup>	0,15 ± 0,01 <sup>a</sup>	13,21 ± 0,25 <sup>e</sup>	23,90 ± 0,57 <sup>b</sup>	32,0 ± 0,08 <sup>b</sup>	0,21 ± 0,01 <sup>a</sup>
On-Mel + 100 Gy	30,82 ± 1,77 <sup>b</sup>	3,16 ± 0,15 <sup>bc</sup>	-	105,54 ± 3,70 <sup>f</sup>	111,45 ± 0,29 <sup>d</sup>	0,66 ± 0,10 <sup>bc</sup>	10,45 ± 0,31 <sup>c</sup>	30,68 ± 0,01 <sup>d</sup>	38,40 ± 0,02 <sup>c</sup>	0,28 ± 0,01 <sup>ab</sup>
On-Mel + 200 Gy	26,61 ± 0,36 <sup>a</sup>	1,86 ± 0,21 <sup>a</sup>	-	66,19 ± 0,33 <sup>b</sup>	91,73 ± 0,92 <sup>b</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>ab</sup>	8,91 ± 0,10 <sup>a</sup>	22,08 ± 0,18 <sup>a</sup>	36,10 ± 0,07 <sup>c</sup>	0,62 ± 0,02 <sup>c</sup>
On-Mel + 300 Gy	23,59 ± 0,16 <sup>a</sup>	1,38 ± 0,01 <sup>a</sup>	-	62,08 ± 0,99 <sup>a</sup>	84,90 ± 0,79 <sup>a</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>ab</sup>	9,98 ± 0,05 <sup>bc</sup>	26,10 ± 0,17 <sup>c</sup>	36,14 ± 0,27 <sup>c</sup>	0,37 ± 0,01 <sup>b</sup>
On-Mel + 400 Gy	74,64 ± 2,07 <sup>g</sup>	16,54 ± 0,07 <sup>e</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>b</sup>	239,06 ± 1,84 <sup>k</sup>	359,93 ± 0,35 <sup>i</sup>	4,16 ± 0,55 <sup>e</sup>	45,94 ± 0,92 <sup>k</sup>	118,69 ± 1,71 <sup>i</sup>	280,15 ± 0,24 <sup>i</sup>	2,51 ± 0,25 <sup>f</sup>
Mel	62,96 ± 2,91 <sup>f</sup>	35,45 ± 0,06 <sup>i</sup>	0,19 ± 0,01 <sup>a</sup>	144,24 ± 2,73 <sup>i</sup>	164,49 ± 1,41 <sup>i</sup>	0,44 ± 0,01 <sup>abc</sup>	18,60 ± 0,23 <sup>f</sup>	47,78 ± 0,07 <sup>f</sup>	73,95 ± 0,94 <sup>e</sup>	0,66 ± 0,01 <sup>c</sup>
100 Gy + Mel	54,11 ± 2,69 <sup>e</sup>	33,61 ± 0,06 <sup>h</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>b</sup>	133,08 ± 2,62 <sup>h</sup>	188,84 ± 0,07 <sup>j</sup>	0,50 ± 0,12 <sup>abc</sup>	22,15 ± 0,43 <sup>h</sup>	57,61 ± 0,63 <sup>f</sup>	76,91 ± 3,93 <sup>e</sup>	0,85 ± 0,02 <sup>d</sup>
200 Gy + Mel	51,99 ± 0,29 <sup>e</sup>	27,66 ± 0,83 <sup>g</sup>	0,33 ± 0,02 <sup>c</sup>	112,62 ± 4,29 <sup>g</sup>	150,55 ± 0,29 <sup>h</sup>	0,74 ± 0,21 <sup>cd</sup>	22,55 ± 0,30 <sup>g</sup>	57,64 ± 1,91 <sup>f</sup>	82,59 ± 1,81 <sup>f</sup>	0,85 ± 0,01 <sup>d</sup>
300 Gy + Mel	86,25 ± 0,18 <sup>h</sup>	43,32 ± 0,02 <sup>j</sup>	0,66 ± 0,01 <sup>e</sup>	176,01 ± 2,23 <sup>j</sup>	203,99 ± 2,23 <sup>k</sup>	5,62 ± 0,16 <sup>f</sup>	39,13 ± 0,41 <sup>j</sup>	97,29 ± 0,01 <sup>h</sup>	218,27 ± 0,22 <sup>h</sup>	1,49 ± 0,01 <sup>e</sup>
400 Gy + Mel	273,47 ± 3,18 <sup>g</sup>	65,85 ± 0,30 <sup>k</sup>	0,77 ± 0,01 <sup>f</sup>	440,64 ± 0,22 <sup>m</sup>	599,77 ± 1,62 <sup>m</sup>	30,81 ± 0,64 <sup>h</sup>	114,54 ± 0,31 <sup>m</sup>	249,54 ± 0,91 <sup>j</sup>	625,89 ± 2,48 <sup>k</sup>	5,39 ± 0,04 <sup>g</sup>
Sürgün										
kontrol (0 Gy)	44,49 ± 0,61 <sup>c</sup>	4,25 ± 0,07 <sup>b</sup>	0,27 ± 0,01 <sup>c</sup>	71,13 ± 0,90 <sup>c</sup>	164,52 ± 3,65 <sup>d</sup>	0,34 ± 0,01 <sup>b</sup>	164,43 ± 4,40 <sup>e</sup>	55,90 ± 2,61 <sup>c</sup>	740,35 ± 8,36 <sup>c</sup>	13,44 ± 0,88 <sup>d</sup>
100 Gy	49,89 ± 1,31 <sup>d</sup>	6,26 ± 0,26 <sup>e</sup>	0,39 ± 0,01 <sup>h</sup>	76,50 ± 0,51 <sup>d</sup>	179,71 ± 0,65 <sup>e</sup>	0,54 ± 0,03 <sup>d</sup>	196,37 ± 5,57 <sup>f</sup>	56,02 ± 0,69 <sup>c</sup>	744,38 ± 2,47 <sup>c</sup>	14,73 ± 0,50 <sup>e</sup>
200 Gy	94,48 ± 2,11 <sup>k</sup>	6,94 ± 0,14 <sup>fg</sup>	0,46 ± 0,03 <sup>i</sup>	88,08 ± 1,51 <sup>f</sup>	250,17 ± 0,46 <sup>h</sup>	0,77 ± 0,06 <sup>g</sup>	203,92 ± 4,02 <sup>f</sup>	72,87 ± 3,40 <sup>d</sup>	1093,59 ± 15,86 <sup>ef</sup>	17,79 ± 0,48 <sup>g</sup>
300 Gy	70,18 ± 2,02 <sup>j</sup>	7,86 ± 0,36 <sup>h</sup>	0,54 ± 0,03 <sup>j</sup>	147,37 ± 3,80 <sup>j</sup>	265,82 ± 2,03 <sup>j</sup>	0,91 ± 0,01 <sup>h</sup>	291,1 ± 0,63 <sup>h</sup>	78,02 ± 1,53 <sup>e</sup>	1127,79 ± 20,20 <sup>f</sup>	24,99 ± 0,52 <sup>j</sup>
400 Gy	30,20 ± 0,44 <sup>b</sup>	8,86 ± 0,18 <sup>ij</sup>	0,36 ± 0,01 <sup>g</sup>	81,04 ± 1,85 <sup>e</sup>	140,77 ± 1,11 <sup>c</sup>	0,59 ± 0,01 <sup>e</sup>	44,64 ± 0,20 <sup>b</sup>	46,28 ± 2,11 <sup>b</sup>	319,14 ± 1,33 <sup>a</sup>	8,64 ± 0,09 <sup>b</sup>
On-Mel	32,41 ± 0,73 <sup>b</sup>	2,88 ± 0,13 <sup>a</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>cd</sup>	42,02 ± 0,77 <sup>a</sup>	135,90 ± 3,77 <sup>c</sup>	0,22 ± 0,01 <sup>a</sup>	119,32 ± 6,52 <sup>d</sup>	42,21 ± 0,72 <sup>a</sup>	528,28 ± 12,04 <sup>b</sup>	9,01 ± 0,05 <sup>b</sup>
On-Mel + 100 Gy	54,62 ± 0,25 <sup>e</sup>	5,57 ± 0,47 <sup>d</sup>	0,18 ± 0,01 <sup>a</sup>	51,26 ± 1,09 <sup>b</sup>	139,86 ± 0,91 <sup>c</sup>	0,45 ± 0,01 <sup>c</sup>	169,27 ± 3,33 <sup>e</sup>	52,93 ± 0,83 <sup>c</sup>	752,57 ± 3,06 <sup>c</sup>	13,27 ± 0,47 <sup>cd</sup>
On-Mel + 200 Gy	87,07 ± 0,90 <sup>i</sup>	4,96 ± 0,44 <sup>c</sup>	0,24 ± 0,01 <sup>d</sup>	71,48 ± 0,99 <sup>c</sup>	267,88 ± 8,0 <sup>i</sup>	0,67 ± 0,02 <sup>f</sup>	274,16 ± 3,80 <sup>g</sup>	85,20 ± 4,0 <sup>f</sup>	1092,18 ± 14,70 <sup>ef</sup>	20,45 ± 0,27 <sup>f</sup>
On-Mel + 300 Gy	81,12 ± 2,26 <sup>h</sup>	8,57 ± 0,03 <sup>i</sup>	0,34 ± 0,02 <sup>f</sup>	103,0 ± 3,02 <sup>g</sup>	226,39 ± 5,14 <sup>g</sup>	0,77 ± 0,01 <sup>g</sup>	307,84 ± 2,02 <sup>f</sup>	88,0 ± 0,48 <sup>g</sup>	1242,67 ± 1,99 <sup>g</sup>	26,09 ± 0,62 <sup>k</sup>
On-Mel + 400 Gy	29,54 ± 0,70 <sup>b</sup>	6,74 ± 0,12 <sup>f</sup>	0,30 ± 0,01 <sup>e</sup>	72,72 ± 0,84 <sup>c</sup>	109,01 ± 0,78 <sup>a</sup>	0,53 ± 0,01 <sup>d</sup>	77,38 ± 0,88 <sup>c</sup>	43,75 ± 0,56 <sup>ab</sup>	487,87 ± 5,29 <sup>b</sup>	12,35 ± 0,04 <sup>c</sup>
Mel	81,41 ± 0,83 <sup>h</sup>	7,19 ± 0,41 <sup>fg</sup>	0,20 ± 0,01 <sup>ab</sup>	80,94 ± 2,0 <sup>e</sup>	302,29 ± 1,53 <sup>j</sup>	0,49 ± 0,01 <sup>cd</sup>	269,82 ± 1,82 <sup>g</sup>	84,87 ± 0,88 <sup>f</sup>	1023,77 ± 38,69 <sup>d</sup>	16,17 ± 0,49 <sup>f</sup>
100 Gy + Mel	77,30 ± 3,34 <sup>g</sup>	7,38 ± 0,30 <sup>g</sup>	0,22 ± 0,01 <sup>bc</sup>	82,63 ± 1,76 <sup>e</sup>	304,63 ± 2,28 <sup>j</sup>	0,68 ± 0,04 <sup>f</sup>	284,29 ± 7,46 <sup>h</sup>	89,80 ± 1,52 <sup>g</sup>	1054,05 ± 46,98 <sup>de</sup>	17,20 ± 1,13 <sup>g</sup>
200 Gy + Mel	83,60 ± 1,16 <sup>h</sup>	9,81 ± 0,23 <sup>k</sup>	0,35 ± 0,01 <sup>fg</sup>	121,43 ± 1,71 <sup>h</sup>	326,81 ± 4,22 <sup>k</sup>	0,78 ± 0,02 <sup>g</sup>	270,08 ± 9,30 <sup>g</sup>	79,81 ± 1,01 <sup>e</sup>	1120,35 ± 71,05 <sup>f</sup>	18,26 ± 1,15 <sup>gh</sup>
300 Gy + Mel	89,97 ± 3,15 <sup>g</sup>	10,86 ± 0,14 <sup>l</sup>	0,29 ± 0,02 <sup>e</sup>	139,22 ± 4,09 <sup>i</sup>	218,71 ± 7,59 <sup>j</sup>	1,32 ± 0,09 <sup>i</sup>	270,25 ± 9,43 <sup>g</sup>	73,64 ± 3,22 <sup>d</sup>	1235,57 ± 34,58 <sup>g</sup>	19,17 ± 0,53 <sup>h</sup>
400 Gy + Mel	25,63 ± 0,68 <sup>a</sup>	9,16 ± 0,10 <sup>g</sup>	0,29 ± 0,01 <sup>e</sup>	71,63 ± 3,46 <sup>c</sup>	116,28 ± 4,59 <sup>b</sup>	0,60 ± 0,01 <sup>e</sup>	35,03 ± 0,33 <sup>a</sup>	44,92 ± 2,52 <sup>ab</sup>	277,452 ± 5,59 <sup>a</sup>	6,75 ± 0,58 <sup>a</sup>

Kısaltmalar: 4-HBA; 4-hidroksibenzoik asit, 3-HBA; 3- hidroksibenzoik asit, GaA; gallik asit, VaA; vanilik asit, SyA; siringik asit, SaA; salisilik asit, p-KuA; p-kumarik asit, SiA; sinapik asit, FeA; ferulik asit, KaA; kafeik asit.

Buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde ester-bağlı formda fenolik asit içeriklerine ait değişimler Tablo 3.9'da verilmiştir. Her iki bitki kısmında da 4-HBA, 3-HBA, VaA, SyA, SaA, *p*-KuA, FeA, SiA, FeA ve KaA olmak üzere ester-bağlı formda 9 farklı fenolik asidin varlığı tespit edilmiştir. Tüm uygulama gruplarında en yüksek miktarda içerilen fenolik asitlerin sırasıyla FeA (20550,36 – 29637,48 ng g<sup>-1</sup> TA) ve *p*-KuA (6403,74 – 8862,37 ng g<sup>-1</sup> TA) olduğu belirlenmiştir. Salisilik asit (0,16 – 0,22 ng g<sup>-1</sup> TA), 3-HBA (3,11 – 10,47 ng g<sup>-1</sup> TA) ve KaA (3,32 – 3,44 ng g<sup>-1</sup> TA) ise köklerde en düşük miktardaki bireysel fenolik asitler olarak kaydedilmiştir. Köklerde yapılan analizlerde ester-bağlı formdaki ΣHBA, ΣHSA ve ΣFA içerikleri kontrol grubuna kıyasla, 100 – 300 Gy uygulama gruplarında artıp 400 Gy'de azalmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması ΣHBA, ΣHSA ve ΣFA içeriklerini 200 ve 300 Gy uygulamalarında azaltıp, 400 Gy'de arttırmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise ΣHBA, ΣHSA ve ΣFA içeriklerini 100 Gy'de arttırıp; 200, 300 ve 400 Gy uygulamalarında IR'li kontrollerine kıyasla azaltmıştır (Şekil 3.22i).

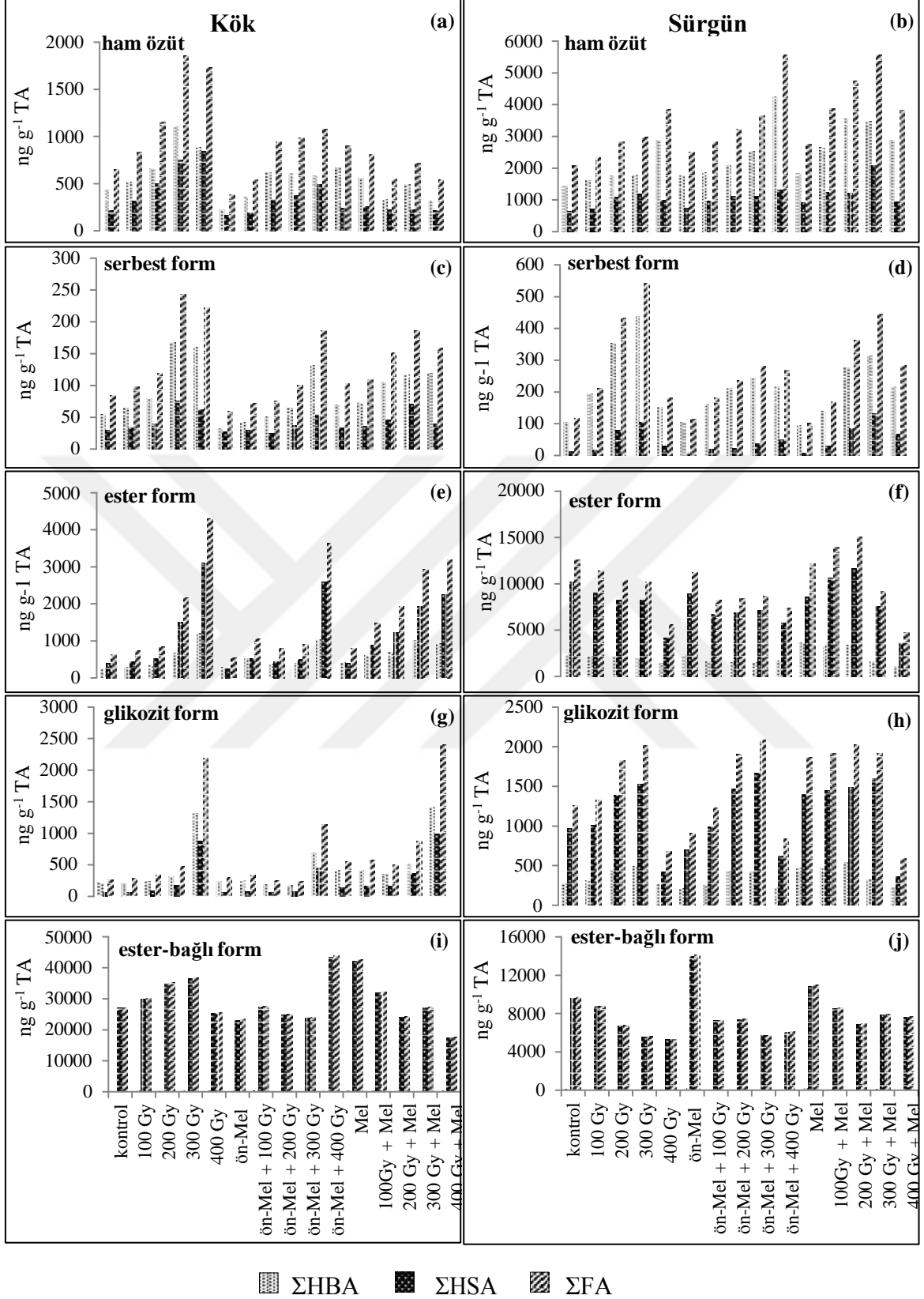
Sürgünlerde en yüksek miktarda içerilen ester-bağlı formdaki başlıca fenolik asitler FeA (7802,69 – 4599, 23 ng g<sup>-1</sup> TA) ve *p*-KuA (1798,51 – 675,76 ng g<sup>-1</sup> TA) olarak belirlenmiştir. En düşük miktarda belirlenen bireysel fenolik asitler ise SaA (0,16 – 0,53 ng g<sup>-1</sup> TA), 3-HBA (4,69 – 2,51 ng g<sup>-1</sup> TA), SiA (7,12 – 1,03 ng g<sup>-1</sup> TA) ve KaA (14,01 – 4,41 ng g<sup>-1</sup> TA) olmuştur. Ester-bağlı fenolik asitlerin artan dozlarda IR uygulamaları ile birlikte genel olarak azaldığı saptanmıştır. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının bireysel fenolik asitlerini arttırma ve azaltma yönündeki etkisi uygulanan IR dozuna ve fenolik asit türüne göre değişmiştir. Kontrol ve IR uygulama gruplarında ΣHSA içeriğinin (9622,33 – 5280,43 –ng g<sup>-1</sup> TA) ΣHBA içeriğine (115,62 – 39,33 ng g<sup>-1</sup> TA) kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının ester-bağlı formdaki ΣHSA ve ΣHBA içeriklerini IR'li kontrollerine kıyasla genel olarak arttırdığı belirlenmiştir. Sürgünde ΣFA içeriğinin (kontrolde 9737,95 ng g<sup>-1</sup> TA), IR uygulamaları ile 8790,99 – 5319,76 ng g<sup>-1</sup> TA arasında değişti ve artan IR uygulamaları ile giderek azaldığı saptanmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması yapılan grupların sürgünlerinde ester-bağlı formdaki ΣFA içeriğinin 14141,54 – 5736,34 ng g<sup>-1</sup> TA arasında; ekim sonrası Mel uygulaması yapılan gruplarda ise 11005,57 – 6969,55 ng g<sup>-1</sup> TA arasında olduğu kaydedilmiştir (Şekil 3.22j).

Tablo 3.9. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerde melatonin uygulamasının ester-bağlı formdaki fenolik asit içeriğine (ng g<sup>-1</sup> TA) olan etkisi.

Uygulamalar	Kök									
	4-HBA	3-HBA	VaA	SyA	SaA	p-KuA	SiA	FeA	KaA	
0 Gy (kontrol)	56,82 ± 0,22 <sup>b</sup>	3,11 ± 0,06 <sup>a</sup>	86,87 ± 6,92 <sup>b</sup>	21,09 ± 0,89 <sup>d</sup>	0,16 ± 0,01 <sup>ab</sup>	6403,74 ± 80,43 <sup>g</sup>	12,90 ± 0,57 <sup>b</sup>	20550,36 ± 227,59 <sup>h</sup>	3,32 ± 0,01 <sup>fg</sup>	
100 Gy	67,25 ± 0,56 <sup>cd</sup>	3,96 ± 0,51 <sup>b</sup>	119,24 ± 1,15 <sup>ef</sup>	24,55 ± 0,99 <sup>e</sup>	0,17 ± 0,01 <sup>cd</sup>	7109,24 ± 46,41 <sup>i</sup>	16,66 ± 0,11 <sup>d</sup>	22696,86 ± 66,05 <sup>i</sup>	3,34 ± 0,08 <sup>fg</sup>	
200 Gy	78,76 ± 0,05 <sup>f</sup>	5,97 ± 0,13 <sup>c</sup>	129,17 ± 1,91 <sup>g</sup>	30,86 ± 0,28 <sup>g</sup>	0,18 ± 0,01 <sup>cd</sup>	8862,37 ± 57,04 <sup>i</sup>	24,12 ± 0,73 <sup>f</sup>	26008,38 ± 39,45 <sup>k</sup>	3,44 ± 0,09 <sup>g</sup>	
300 Gy	79,64 ± 3,58 <sup>f</sup>	10,47 ± 0,09 <sup>h</sup>	134,99 ± 3,06 <sup>g</sup>	31,99 ± 0,50 <sup>g</sup>	0,21 ± 0,01 <sup>e</sup>	6768,34 ± 65,32 <sup>h</sup>	31,70 ± 0,73 <sup>h</sup>	29637,48 ± 156,56 <sup>l</sup>	3,17 ± 0,11 <sup>ef</sup>	
400 Gy	94,89 ± 4,76 <sup>g</sup>	3,77 ± 0,21 <sup>b</sup>	113,57 ± 6,21 <sup>de</sup>	30,21 ± 0,53 <sup>f</sup>	0,22 ± 0,01 <sup>f</sup>	5130,02 ± 36,59 <sup>c</sup>	42,24 ± 0,49 <sup>j</sup>	20205,35 ± 343,86 <sup>g</sup>	2,89 ± 0,14 <sup>cd</sup>	
On-Mel	58,0 ± 5,0 <sup>b</sup>	7,43 ± 0,01 <sup>g</sup>	123,85 ± 4,72 <sup>g</sup>	17,39 ± 0,86 <sup>bc</sup>	0,17 ± 0,01 <sup>cd</sup>	5812,20 ± 27,64 <sup>f</sup>	13,74 ± 0,02 <sup>b</sup>	17350,38 ± 160,60 <sup>e</sup>	2,68 ± 0,18 <sup>c</sup>	
On-Mel + 100 Gy	70,97 ± 0,26 <sup>de</sup>	6,33 ± 0,3 <sup>ef</sup>	128,10 ± 2,82 <sup>g</sup>	21,95 ± 0,08 <sup>d</sup>	0,17 ± 0,01 <sup>bc</sup>	7549,63 ± 15,21 <sup>k</sup>	15,89 ± 0,61 <sup>cd</sup>	19831,06 ± 67,65 <sup>f</sup>	2,89 ± 0,16 <sup>cd</sup>	
On-Mel + 200 Gy	44,90 ± 1,96 <sup>a</sup>	3,64 ± 0,46 <sup>ab</sup>	95,94 ± 0,90 <sup>c</sup>	15,30 ± 0,40 <sup>a</sup>	0,16 ± 0,01 <sup>a</sup>	5276,82 ± 38,21 <sup>d</sup>	15,10 ± 0,24 <sup>c</sup>	19597,76 ± 163,02 <sup>e</sup>	1,92 ± 0,12 <sup>a</sup>	
On-Mel + 300 Gy	45,45 ± 4,51 <sup>a</sup>	4,65 ± 0,14 <sup>c</sup>	4,65 ± 0,14 <sup>c</sup>	17,78 ± 0,31 <sup>c</sup>	0,18 ± 0,01 <sup>d</sup>	5643,66 ± 19,07 <sup>e</sup>	10,12 ± 0,68 <sup>a</sup>	18158,53 ± 3,18 <sup>d</sup>	2,99 ± 0,01 <sup>de</sup>	
On-Mel + 400 Gy	188,15 ± 6,95 <sup>h</sup>	6,69 ± 0,38 <sup>f</sup>	203,86 ± 0,81 <sup>i</sup>	60,82 ± 0,41 <sup>i</sup>	0,35 ± 0,01 <sup>i</sup>	8863,75 ± 78,33 <sup>i</sup>	68,53 ± 1,96 <sup>k</sup>	34395,03 ± 66,26 <sup>n</sup>	7,85 ± 0,15 <sup>k</sup>	
Mel	73,87 ± 0,87 <sup>ef</sup>	6,14 ± 0,53 <sup>ef</sup>	296,97 ± 3,58 <sup>j</sup>	37,12 ± 1,06 <sup>n</sup>	0,20 ± 0,01 <sup>e</sup>	10604,19 ± 83,74 <sup>m</sup>	33,24 ± 0,34 <sup>i</sup>	31536,91 ± 35,12 <sup>m</sup>	5,04 ± 0,33 <sup>j</sup>	
100 Gy + Mel	76,16 ± 6,25 <sup>ef</sup>	5,30 ± 0,35 <sup>d</sup>	129,01 ± 1,83 <sup>g</sup>	22,17 ± 0,44 <sup>d</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>fg</sup>	7543,27 ± 23,61 <sup>k</sup>	24,24 ± 0,36 <sup>f</sup>	24397,24 ± 80,16 <sup>j</sup>	4,06 ± 0,02 <sup>i</sup>	
200 Gy + Mel	72,22 ± 0,57 <sup>de</sup>	6,14 ± 0,06 <sup>ef</sup>	111,70 ± 1,31 <sup>d</sup>	21,74 ± 1,12 <sup>d</sup>	0,25 ± 0,01 <sup>h</sup>	7260,11 ± 3,12 <sup>j</sup>	20,09 ± 0,19 <sup>e</sup>	16733,95 ± 98,70 <sup>p</sup>	3,81 ± 0,15 <sup>h</sup>	
300 Gy + Mel	62,28 ± 0,65 <sup>bc</sup>	7,46 ± 0,41 <sup>g</sup>	90,14 ± 0,35 <sup>b</sup>	15,11 ± 0,94 <sup>a</sup>	0,23 ± 0,01 <sup>g</sup>	4678,70 ± 25,26 <sup>b</sup>	16,711 ± 0,14 <sup>d</sup>	22514,03 ± 64,94 <sup>i</sup>	2,34 ± 0,08 <sup>b</sup>	
400 Gy + Mel	98,51 ± 1,60 <sup>g</sup>	4,14 ± 0,63 <sup>bc</sup>	114,88 ± 3,28 <sup>de</sup>	16,53 ± 0,80 <sup>b</sup>	0,45 ± 0,02 <sup>j</sup>	3087,24 ± 1,65 <sup>a</sup>	29,70 ± 0,54 <sup>g</sup>	14287,63 ± 59,54 <sup>a</sup>	3,22 ± 0,05 <sup>ef</sup>	
Sürgün										
0 Gy (kontrol)	21,53 ± 0,92 <sup>f</sup>	4,69 ± 0,35 <sup>f</sup>	42,39 ± 0,46 <sup>f</sup>	46,84 ± 1,69 <sup>n</sup>	0,17 ± 0,01 <sup>a</sup>	1798,51 ± 43,04 <sup>g</sup>	7,12 ± 0,30 <sup>f</sup>	7802,69 ± 1,05 <sup>k</sup>	14,01 ± 1,42 <sup>e</sup>	
100 Gy	11,58 ± 0,33 <sup>fg</sup>	4,08 ± 0,10 <sup>de</sup>	33,35 ± 1,12 <sup>ef</sup>	22,54 ± 1,51 <sup>e</sup>	-	1108,09 ± 21,91 <sup>d</sup>	3,75 ± 0,33 <sup>ef</sup>	7598,04 ± 51,76 <sup>j</sup>	9,56 ± 0,44 <sup>bc</sup>	
200 Gy	10,21 ± 0,46 <sup>de</sup>	-	32,07 ± 0,87 <sup>e</sup>	11,65 ± 0,82 <sup>b</sup>	-	818,89 ± 36,29 <sup>bc</sup>	2,41 ± 0,23 <sup>bc</sup>	5882,15 ± 22,88 <sup>e</sup>	8,39 ± 0,35 <sup>b</sup>	
300 Gy	8,70 ± 0,20 <sup>bc</sup>	2,51 ± 0,03 <sup>bc</sup>	27,02 ± 1,28 <sup>c</sup>	12,37 ± 0,41 <sup>b</sup>	0,22 ± 0,01 <sup>c</sup>	718,23 ± 52,17 <sup>ab</sup>	2,31 ± 0,23 <sup>b</sup>	4839,79 ± 19,74 <sup>b</sup>	4,91 ± 0,27 <sup>a</sup>	
400 Gy	6,08 ± 0,35 <sup>a</sup>	4,22 ± 0,20 <sup>e</sup>	17,06 ± 1,11 <sup>a</sup>	11,81 ± 1,17 <sup>b</sup>	0,16 ± 0,01 <sup>a</sup>	675,76 ± 51,24 <sup>a</sup>	1,03 ± 0,01 <sup>a</sup>	4599,23 ± 21,67 <sup>a</sup>	4,41 ± 0,54 <sup>a</sup>	
On-Mel	39,35 ± 1,26 <sup>k</sup>	2,40 ± 0,04 <sup>bc</sup>	72,14 ± 0,52 <sup>k</sup>	68,35 ± 1,67 <sup>i</sup>	0,20 ± 0,01 <sup>b</sup>	3171,27 ± 126,26 <sup>f</sup>	3,18 ± 0,13 <sup>d</sup>	10752,65 ± 40,50 <sup>m</sup>	32,00 ± 1,69 <sup>h</sup>	
On-Mel + 100 Gy	11,00 ± 0,69 <sup>ef</sup>	1,75 ± 0,19 <sup>a</sup>	24,04 ± 0,83 <sup>b</sup>	22,87 ± 1,25 <sup>e</sup>	-	1252,18 ± 118,26 <sup>c</sup>	3,33 ± 0,24 <sup>de</sup>	5981,52 ± 25,67 <sup>f</sup>	12,02 ± 0,64 <sup>d</sup>	
On-Mel + 200 Gy	9,45 ± 0,19 <sup>cd</sup>	1,74 ± 0,29 <sup>a</sup>	38,88 ± 0,07 <sup>h</sup>	18,11 ± 0,46 <sup>d</sup>	0,53 ± 0,01 <sup>d</sup>	1227,76 ± 84,90 <sup>e</sup>	3,96 ± 0,09 <sup>f</sup>	6115,18 ± 50,01 <sup>g</sup>	10,33 ± 0,65 <sup>c</sup>	
On-Mel + 300 Gy	8,75 ± 0,95 <sup>bc</sup>	2,69 ± 0,04 <sup>c</sup>	35,01 ± 0,07 <sup>g</sup>	15,74 ± 0,31 <sup>c</sup>	0,16 ± 0,01 <sup>a</sup>	902,45 ± 73,24 <sup>c</sup>	2,87 ± 0,58 <sup>cd</sup>	4759,31 ± 37,68 <sup>b</sup>	9,36 ± 0,18 <sup>bc</sup>	
On-Mel + 400 Gy	9,67 ± 0,38 <sup>cd</sup>	2,13 ± 0,23 <sup>b</sup>	29,16 ± 0,19 <sup>d</sup>	12,22 ± 0,36 <sup>b</sup>	-	669,69 ± 66,01 <sup>a</sup>	2,42 ± 0,39 <sup>bc</sup>	5347,45 ± 36,41 <sup>c</sup>	5,30 ± 0,74 <sup>a</sup>	
Mel	24,13 ± 0,29 <sup>j</sup>	1,53 ± 0,30 <sup>a</sup>	59,39 ± 0,67 <sup>j</sup>	71,63 ± 1,94 <sup>i</sup>	-	2042,98 ± 35,89 <sup>h</sup>	11,46 ± 0,22 <sup>k</sup>	8772,44 ± 38,44 <sup>i</sup>	22,01 ± 0,70 <sup>g</sup>	
100 Gy + Mel	16,09 ± 0,73 <sup>h</sup>	2,69 ± 0,32 <sup>c</sup>	34,46 ± 1,46 <sup>g</sup>	37,36 ± 1,40 <sup>g</sup>	-	1583,32 ± 82,86 <sup>f</sup>	7,77 ± 0,40 <sup>j</sup>	6921,61 ± 162,07 <sup>i</sup>	15,98 ± 0,83 <sup>t</sup>	
200 Gy + Mel	12,65 ± 0,48 <sup>g</sup>	2,21 ± 0,07 <sup>b</sup>	30,43 ± 0,35 <sup>d</sup>	26,53 ± 1,27 <sup>f</sup>	-	1113,82 ± 47,62 <sup>d</sup>	5,58 ± 0,42 <sup>h</sup>	5766,68 ± 34,97 <sup>d</sup>	11,65 ± 0,54 <sup>d</sup>	
300 Gy + Mel	12,45 ± 0,67 <sup>g</sup>	3,75 ± 0,11 <sup>d</sup>	41,64 ± 0,49 <sup>i</sup>	21,23 ± 1,09 <sup>e</sup>	-	1023,68 ± 30,09 <sup>d</sup>	4,91 ± 0,32 <sup>g</sup>	6783,83 ± 10,67 <sup>h</sup>	13,63 ± 0,61 <sup>e</sup>	
400 Gy + Mel	7,79 ± 0,26 <sup>b</sup>	-	18,11 ± 1,05 <sup>a</sup>	8,48 ± 0,44 <sup>a</sup>	-	714,78 ± 13,55 <sup>ab</sup>	3,23 ± 0,11 <sup>d</sup>	6923,99 ± 29,49 <sup>i</sup>	5,34 ± 0,64 <sup>a</sup>	

Kısaltmalar: 4-HBA; 4-hidroksibenzoik asit, 3-HBA; 3- hidroksibenzoik asit, VaA; vanilik asit, SyA; siringik asit, SaA; salisilik asit, p-KuA; p-kumarik asit, SiA; sinapik asit, FeA; ferulik asit, KaA; kafeik asit.





Şekil 3.22. Farklı dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına melatonin uygulamasının fidelerin kök ve sürgünlerindeki ham özüt, serbest, ester, glikozit ve ester-bağlı formlarındaki toplam hidroksibenzoik asit (ΣHBA), toplam hidroksisinnamik (ΣHSA) asit ve toplam fenolik asit (ΣFA) içeriğine etkisi

### 3.10. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarına Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Fenilalanin Amonyum Liyaz (PAL) Aktivitesine Etkisi

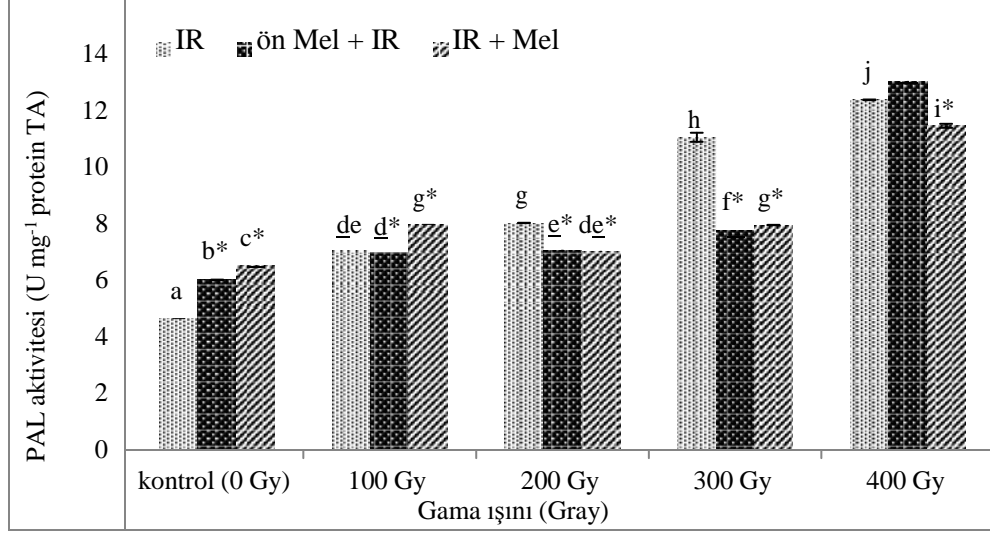
Artan dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerindeki PAL aktivitesi üzerine olan etkisi Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’te verilmiştir.

Buğday fidelerinde artan dozlarda gama ışını uygulamasının, köklerdeki PAL aktivitesini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığı tespit edilmiştir. Kökteki PAL aktivitesinin kontrol grubuna kıyasla ( $4,65 \text{ U mg}^{-1}$  protein) artan IR uygulama dozları boyunca kademeli bir şekilde arttığı ve en yüksek PAL aktivitesinin 400 Gy uygulama grubunda ( $12,4 \text{ U mg}^{-1}$  protein) olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte, PAL aktivitesinin ön-Mel uygulama gruplarında 6,03 ila 13,05  $\text{U mg}^{-1}$  protein arasında, yetiştirme sırasında Mel uygulanan gruplarda ise 6,53 ila 11,48 arasında değiştiği ve genel olarak yalnızca IR uygulaması yapılan gruplara kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalma gösterdiği belirlenmiştir.

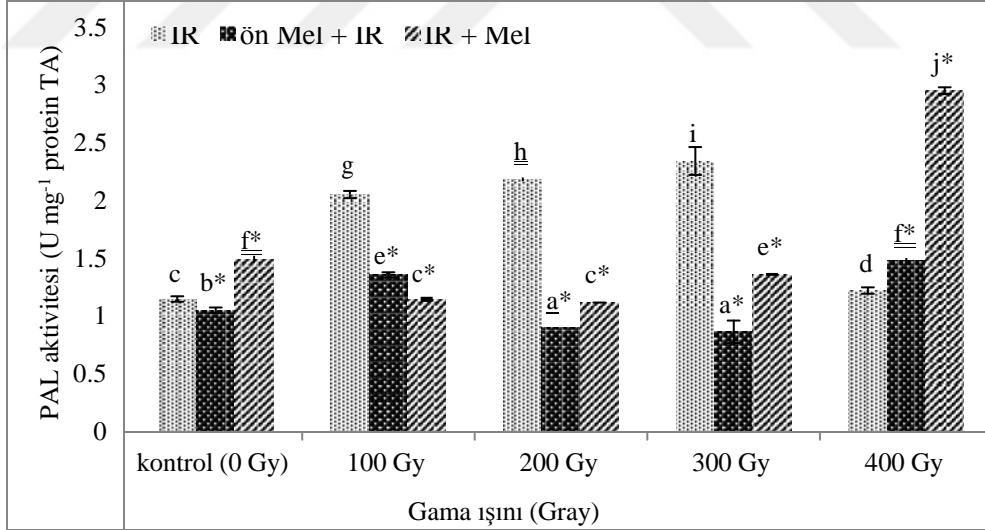
Buğday fidelerinin sürgünlerindeki PAL aktivitesinin IR uygulamaları ile istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) değiştiği belirlenmiştir. Kontrol grubuna kıyasla ( $1,15 \text{ U mg}^{-1}$  protein), PAL aktivitesinin 100 Gy’den 300 Gy’e kadar arttığı ( $2,05 \rightarrow 2,35 \text{ U mg}^{-1}$  protein) buna karşın, 400 Gy uygulama grubunda ( $1,22 \text{ U mg}^{-1}$  protein) önceki dozlarla kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaldığı belirlenmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları IR stresi ile artan PAL aktivitesini (sırasıyla, 100 Gy;  $\sim 1,5$  ve  $\sim 1,8$  kat, 200 Gy;  $\sim 2,4$  ve  $\sim 1,9$  kat; 300 Gy;  $\sim 2,7$  ve  $\sim 1,7$  kat) önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. İyonize radyasyon uygulaması (400 Gy) ile azalan PAL aktivitesi, ekim öncesi ( $\sim 1,2$  kat) ve ekim sonrası ( $\sim 2,4$  kat) Mel uygulamalarıyla artma yönünde teşvik edilmiştir.

### 3.11. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Hidrojen Peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) İçeriğine Etkisi

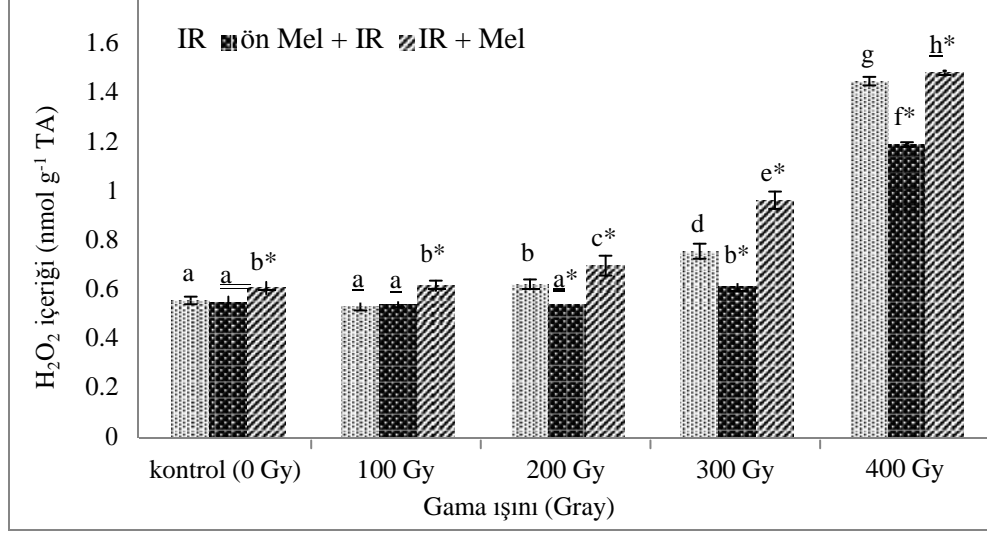
Farklı dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarına ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerdeki  $\text{H}_2\text{O}_2$  içeriği üzerine olan etkisi Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da verilmiştir.



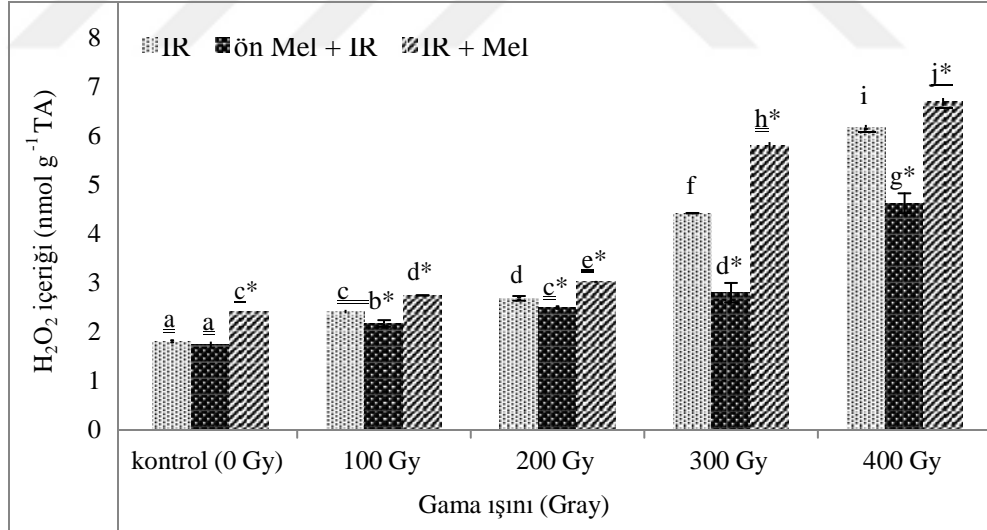
Şekil 3.23. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerdeki PAL aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.24. Gama ışınlanmasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerdeki PAL aktivitesi üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.25. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.26. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

İyonlaştırıcı radyasyon stresinin, fidelerin köklerinde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği üzerine 100 Gy'de önemli bir etki göstermediği, ancak 200, 300 ve 400 Gy uygulanan gruplarda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığı tespit edilmiştir. Hidrojen peroksit içeriğinin, herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubuna kıyasla (0,56 nmol g<sup>-1</sup>), 400Gy'de yaklaşık 2,6 kat arttığı saptanmıştır. Ekim öncesi Mel uygulaması, IR stresinin neden olduğu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğindeki artışı, 200 Gy (~1,2 kat), 300 Gy (~1,2 kat) ve 400 Gy (~1,2 kat) IR uygulamalarında önemli derecede ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise IR uygulaması ile birlikte artan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğini IR'li kontrollerine kıyasla tüm gruplarda (100 Gy; ~1,2 kat, 200 Gy; ~1,1 kat, 300 Gy; ~1,3 kat ve 400 Gy; ~1 kat) daha da arttırmıştır.

Sürgüne ait H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğinin, artan gama ışını radyasyon dozları boyunca önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttığı tespit edilmiştir. Gerçekleşen bu artışın herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubuna kıyasla (2,15 nmol g<sup>-1</sup>), 100 Gy'de ~1,1 kat, 200 Gy'de ~1,3 kat, 300 Gy'de ~2,1 kat ve 400 Gy'de ~2,9 kat olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte, ön-Mel uygulamasının H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğini IR dozu uygulanan tüm gruplarda önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı belirlenmiştir. Buna karşın, ekim sonrası Mel uygulamasının ise sürgün kısmındaki H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğini, IR uygulaması yapılan gruplara kıyasla daha da arttırdığı saptanmıştır.

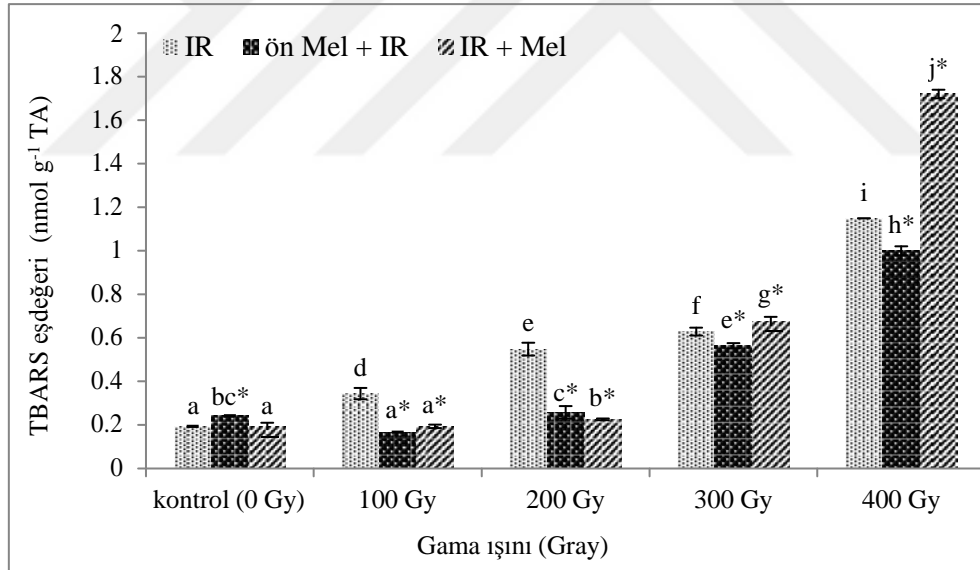
### **3.12. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarında Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerindeki Tiyobarbitürik Asit Reaktif Ürünleri (TBARS) Eşdeğerine Olan Etkisi**

İyonlaştırıcı radyasyon ve Mel uygulamalarından elde edilen fidelerin kök ve sürgünlerdeki TBARS değişimi Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de verilmiştir.

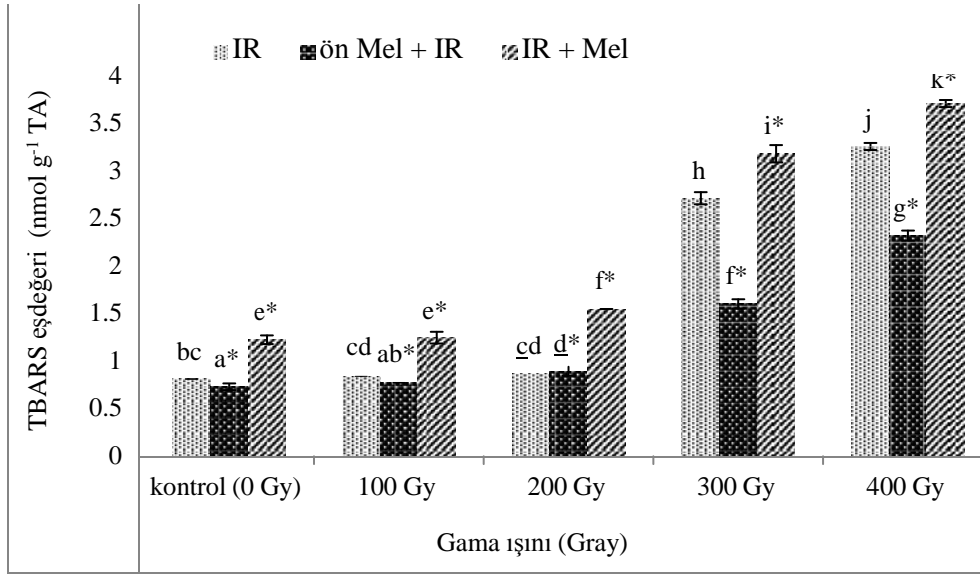
Buğday tohumlarına artan dozlarda gama ışını uygulamasının, fidelerin köklerinde TBARS içeriğini istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığı ve en yüksek artışın 400 Gy uygulama grubunda gerçekleştiği belirlenmiştir. Köklerdeki TBARS içeriği, kontrol grubuna kıyasla 400 Gy radyasyon dozuna kadar yaklaşık 6 kat artmıştır. Dıştan Mel uygulaması (ön-Mel veya Mel), stresin artan şiddetiyle birlikte TBARS içeriğinde oluşan artışı önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Özellikle ön-Mel uygulamasının tüm radyasyon dozlarında TBARS içeriğini azaltarak lipid peroksidasyonu üzerinde iyileştirici bir etki gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte yetiştirme koşullarında Mel

uygulanması yapılan gruplarda, melatoninin TBARS içeriğini azaltmadaki etkisi yalnızca 100 ve 200 Gy'lik radyasyon dozlarında gerçekleştiği; buna karşın 300 ve 400 Gy'lik radyasyon dozlarında TBARS içeriğindeki artışı uyardığı belirlenmiştir.

Buğday fidelerinin köklerindeki benzer şekilde, sürgünlerde de TBARS içeriğinin artan gama ışını radyasyon dozları boyunca istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) artış gösterdiği ve bu artışın 300 ile 400 Gy radyasyon dozlarında oldukça yüksek olduğu saptanmıştır. Sürgünlerin TBARS içeriği, kontrole karşılaştırıldığında ( $0,81 \text{ nmol g}^{-1}$ ), 300 Gy'de yaklaşık 3,4 kat ve 400 Gy'de de yaklaşık 4 kat arttığı belirlenmiştir. Buna karşın ekim öncesi Mel uygulaması, TBARS içeriğindeki artışı her iki uygulama dozunda da (300 ve 400 Gy) IR'li kontrollerine kıyasla yaklaşık 1,7 ve 1,4 kat azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise IR stresinden kaynaklanan TBARS içeriğindeki artışı kontrolden itibaren artan radyasyon dozları boyunca daha da arttırmıştır (kontrole kıyasla, 400 Gy'e kadar  $\sim 4,5$  kat).



Şekil 3.27. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının köklerde TBARS eşdeğeri üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.



Şekil 3.28. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının sürgünlerdeki TBARS eşdeğeri üzerine olan etkisi. Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığını göstermektedir.

### 3.13. Gama Işınlamasına Maruz Bırakılan Buğday Tohumlarından Elde Edilen Fidelerde Melatonin Uygulamasının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Glutatyon (GSH) İçeriğine Etkisi

Artan dozlarda gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerin kök ve sürgünlerindeki GSH ve GSSG içeriğine olan etkisi Tablo 3.10'da verilmiştir.

İyonlaştırıcı radyasyon stresine maruz bırakılan tohumlardan elde edilen fidelerin köklerine ait GSH içeriğinin IR uygulamaları ile istatistiksel olarak önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) arttığı tespit edilmiştir. Köklerde GSH içeriği, herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubu ile kıyaslandığında ( $20,12 \text{ nmol g}^{-1}$ ), 400 Gy'e kadar yaklaşık 6 kat artmıştır. Bununla birlikte ön-Mel uygulaması, IR'den kaynaklanan GSH içeriğindeki artışı önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır. Özellikle 300 Gy'de GSH içeriği ön-Mel uygulaması ile yaklaşık 2,6 kat azalmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise GSH içeriğini IR'li kontrollerine kıyasla, 100 ve 300 Gy uygulanan gruplarda (sırasıyla ~1,4 ve 1,3 kat) artırırken, 200 ve 400 Gy uygulanan gruplarda yaklaşık 1,3 kat azaltmıştır. Köklerdeki GSSG içeriği genel olarak, IR, ön-Mel + IR ve IR + Mel uygulamalarında GSH içeriği ile

uyumlu bir şekilde değişmiştir. Bir istisna olarak, yalnızca 400 Gy uygulanan fidelerdeki GSSH içeriğinde 300 Gy'e göre önemli kabul edilecek düzeyde ( $P < 0,05$ ) bir azalma (~1,1 kat) kaydedilmiştir.

Tablo 3.10. Gama ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarında melatonin uygulamasının kök ve sürgünlerindeki GSH ve GSSG içeriğine ( $\text{nmol g}^{-1}$  TA) etkisi. Her değer ortalama  $\pm$  standart hata olarak belirtilmiştir ( $n = 3$ ). Her bir kolondaki farklı harfler, Duncan çoklu aralık testine göre istatistiksel olan önemli farklılıkları ( $P < 0,05$ ) göstermektedir. \* her bir Mel uygulaması ile yalnızca IR muamelesi yapılan ilgili grup arasındaki istatistiksel farkın  $P < 0,05$  önemlilik düzeyinde Dunnett testine göre yapıldığı göstermektedir.

Uygulama	Kök		Sürgün	
	GSH	GSSG	GSH	GSSG
0 Gy (kontrol)	20,12 $\pm$ 1,83 <sup>a</sup>	17,63 $\pm$ 0,29 <sup>a</sup>	143,62 $\pm$ 0,27 <sup>c</sup>	102,56 $\pm$ 1,1 <sup>c</sup>
100 Gy	47,32 $\pm$ 1,53 <sup>e</sup>	33,30 $\pm$ 1,07 <sup>c</sup>	168,64 $\pm$ 1,67 <sup>d</sup>	134,55 $\pm$ 2,76 <sup>f</sup>
200 Gy	90,78 $\pm$ 1,45 <sup>j</sup>	73,83 $\pm$ 0,97 <sup>h</sup>	201,49 $\pm$ 0,73 <sup>j</sup>	163,1 $\pm$ 0,51 <sup>jk</sup>
300 Gy	106,49 $\pm$ 0,49 <sup>l</sup>	85,01 $\pm$ 1,71 <sup>j</sup>	221,99 $\pm$ 3,41 <sup>k</sup>	184,04 $\pm$ 1,13 <sup>m</sup>
400 Gy	125,08 $\pm$ 1,04 <sup>n</sup>	74,57 $\pm$ 1,05 <sup>h</sup>	102,13 $\pm$ 0,53 <sup>a</sup>	75,08 $\pm$ 1,69 <sup>a</sup>
Ön-Mel	53,42 $\pm$ 1,04 <sup>f*</sup>	41,72 $\pm$ 1,45 <sup>e*</sup>	143,91 $\pm$ 1,57 <sup>c</sup>	113,2 $\pm$ 1,23 <sup>d*</sup>
Ön-Mel + 100 Gy	44,38 $\pm$ 0,02 <sup>d*</sup>	38,44 $\pm$ 0,35 <sup>d*</sup>	177,1 $\pm$ 1,92 <sup>f*</sup>	143,5 $\pm$ 1,05 <sup>g*</sup>
Ön-Mel + 200 Gy	78,4 $\pm$ 1,03 <sup>i*</sup>	74,49 $\pm$ 0,96 <sup>h</sup>	174,16 $\pm$ 2,31 <sup>e*</sup>	125,34 $\pm$ 1,51 <sup>e*</sup>
Ön-Mel + 300 Gy	41,51 $\pm$ 1,12 <sup>c*</sup>	33,11 $\pm$ 0,74 <sup>c*</sup>	192,97 $\pm$ 0,87 <sup>h*</sup>	149,64 $\pm$ 2,36 <sup>h*</sup>
Ön-Mel + 400 Gy	122,64 $\pm$ 1,84 <sup>m</sup>	77,07 $\pm$ 1,7 <sup>i*</sup>	181,86 $\pm$ 0,56 <sup>g*</sup>	159,58 $\pm$ 1,78 <sup>i*</sup>
Mel	36,32 $\pm$ 1,27 <sup>a*</sup>	25,79 $\pm$ 0,79 <sup>b*</sup>	182,17 $\pm$ 2,28 <sup>g*</sup>	149,14 $\pm$ 1,45 <sup>h*</sup>
100 Gy + Mel	66,42 $\pm$ 0,41 <sup>g*</sup>	39,67 $\pm$ 0,17 <sup>d*</sup>	197,9 $\pm$ 1,43 <sup>i*</sup>	164,92 $\pm$ 0,14 <sup>k*</sup>
200 Gy + Mel	70,27 $\pm$ 0,09 <sup>h*</sup>	55,79 $\pm$ 1,49 <sup>f*</sup>	202,1 $\pm$ 1,69 <sup>j</sup>	161,89 $\pm$ 0,53 <sup>j</sup>
300 Gy + Mel	136,41 $\pm$ 1,49 <sup>o*</sup>	84,29 $\pm$ 1,56 <sup>j</sup>	234,85 $\pm$ 2,81 <sup>l*</sup>	176,12 $\pm$ 0,54 <sup>l*</sup>
400 Gy + Mel	96,25 $\pm$ 2,11 <sup>k*</sup>	64,36 $\pm$ 0,07 <sup>g*</sup>	141,21 $\pm$ 1,37 <sup>b*</sup>	90,57 $\pm$ 2,64 <sup>b*</sup>

Buğday fidelerinin sürgün kısmına ait GSH ve GSSG içeriklerinin, kontrol grubuna kıyasla (143,62 ve 102,56  $\text{nmol g}^{-1}$ ), artan IR dozları boyunca 300 Gy'e kadar arttığı (~1,5 ve ~1,8 kat), 400 Gy'de ise azaldığı (~1,4 ve ~1,4 kat) belirlenmiştir. Ekim öncesi Mel uygulamasının hem GSH ve hem de GSSG içeriklerini IR'li kontrollerine kıyasla 200 Gy'de yaklaşık 1,2 ve 1,3 kat ve 300 Gy'de ise yaklaşık 1,2 ve 1,2 kat azalttığı kaydedilmiştir. Buna karşın GSH ve GSSG içeriklerini 100 Gy'de yaklaşık 1,1 ve 1,1 kat



ve 400 Gy'de de yaklaşık 1,8 ve 2,1 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Ekim sonrası Mel uygulaması, sürgün kısmındaki GSH içeriğini tüm IR dozlarında kontrole kıyasla önemli seviyede ( $P < 0,05$ ) artırmıştır. Bununla birlikte GSSG içeriğini 100 ve 400 Gy'de IR'li kontrollerine kıyasla arttırırken (~ 1,2 kat); 200 ve 300 Gy uygulanan fidelerde bu içerikleri istatistiksel olarak önemli kabul edilecek düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaltmıştır (~1 kat).

### **3.14. İyonlaştırıcı radyasyon ile Ekim Öncesi ve Ekim Sonrası Melatonin Uygulamalarının Buğday Fidelerinin Kök ve Sürgünlerinde Morfometrik Parametre Sonuçları ile Antioksidan Aktivite ve Kapasite Değerleri Arasındaki İlişki**

İyonlaştırıcı radyasyon ve Mel uygulamalarının buğday fidelerinin kök uzunluğu (KU), taze ve kuru ağırlık (TA, KA) ile fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan ve prolin içerikleri Tablo 3.11'de; antioksidan enzim aktivitesi (POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR, DHAR), TFM, TF, TBARS, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PAL ve  $\Sigma$ GSH (GSH + GSSG) içeriği değerleri ise Tablo 3.12'de istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

İyonlaştırıcı radyasyon ve Mel uygulamaları yapılan buğday fidelerinin köklerine ait sonuçlar birbirleri ile istatistiki olarak ilişkilendirildiğinde, KU, TA, KA sonuçlarının, fruktoz (sırasıyla -0,829\*\*, -0,831\*\*, -0,804\*\*,  $P < 0,01$ ), glukoz (sırasıyla -0,846\*\*, -0,834\*\*, -0,816\*\*,  $P < 0,01$ ), sükroz (sırasıyla -0,865\*\*, -0,851\*\*, -0,831\*\*,  $P < 0,01$ ), fruktan (sırasıyla -0,759\*\*, -0,702\*\*, -0,715\*\*,  $P < 0,01$ ) ve prolin (sırasıyla -0,775\*\*, -0,736\*\*, -0,727\*\*,  $P < 0,01$ ) içerikleri ile yüksek düzeyde negatif bir korelasyona ( $r$ ) sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kök fruktoz, glukoz ve sükroz içeriklerinin fruktan (sırasıyla 0,678\*\*, 0,754\*\*, 0,855\*\*,  $P < 0,01$ ) ve prolin (0,860\*\*, 0,935\*\*, 0,945\*\*,  $P < 0,01$ ) içerikleri ile istatistiksel olarak yüksek seviyede ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bunların yanı sıra köke ait KU, TA, KA sonuçlarının CAT, SOD, APX ve DHAR enzim aktiviteleri ve TFM, TF, TBARS, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PAL ve GSH içerikleri ile istatistiksel olarak yüksek ( $P < 0,01$ ) korelasyonlara sahip oldukları kaydedilmiştir (Tablo 3.12).

İyonlaştırıcı radyasyon stresine maruz bırakılan tohumlardan elde edilen fidelerin sürgün kısmına ait SU, TA, KA ve yaprak alanı (YA) sonuçları ile klorofil floresans ve  $\Psi_s$  değerleri ve fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan, prolin ve fotosentetik pigment içerikleri (Tkl, Tkar) Tablo 3.13'te istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.11. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin kök boy uzunluğu (KU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan ve prolin içeriklerinin Pearson (*r*) korelasyonları

Değişken	TA	KA	fruktoz	glukoz	sükroz	Σşeker	fruktan	prolin
<b>KU</b>	0,962**	0,943**	-0,829**	-0,846**	-0,865**	-0,486	-0,759**	-0,775**
<b>TA</b>	-	0,987**	-0,831**	-0,834**	-0,851**	-0,409	-0,702**	-0,736**
<b>KA</b>	-	-	-0,804**	-0,816**	-0,831**	-0,397	-0,715**	-0,727**
<b>fruktoz</b>	-	-	-	0,936**	0,938**	0,155	0,678**	0,860**
<b>glukoz</b>	-	-	-	-	0,937**	0,392	0,754**	0,935**
<b>sükroz</b>	-	-	-	-	-	0,285	0,855**	0,945**
<b>Σşeker</b>	-	-	-	-	-	-	0,469	0,388
<b>fruktan</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,899**

\*  $P < 0,05$

\*\*  $P < 0,01$

Buğday fidelerinin sürgünlerine ait sonuçlar birbirleri ile istatistiki olarak ilişkilendirildiğinde, SU, TA, KA ve YA sonuçlarının,  $\Psi_s$  değerleri (sırasıyla 0,982\*\*, 0,958\*\*, 0,972\*\*, 0,938\*\*,  $P < 0,01$ ) ile yüksek düzeyde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca SU, TA, KA ve YA sonuçlarının fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan ve prolin içerikleriyle negatif, Tkl, Tkar ve  $Fv/Fm$  değerleriyle pozitif yönde yüksek korelasyona ( $P < 0,01$ ) sahip oldukları saptanmıştır. Bunların yanı sıra sürgündeki  $Fv/Fm$  ve  $\Psi_s$  değerleri ile prolin, fotosentetik pigment, fruktan ve şeker içeriklerinin birbirleriyle istatistiksel olarak yüksek düzeyde ilişkili olduğu kaydedilmiştir.

Tablo 3.14'te yer alan sonuçlara bakıldığında, sürgün SU, TA, KA ve YA değerlerinin POX (sırasıyla -0,811\*\*, -0,744\*\*, -0,818\*\*, -0,696\*\*,  $P < 0,01$ ), SOD (sırasıyla -0,845\*\*, -0,804\*\*, -0,847\*\*, -0,781\*\*,  $P < 0,01$ ), APX (sırasıyla -0,863\*\*, -0,814\*\*, -0,872\*\*, -0,780\*\*,  $P < 0,01$ ), GR (sırasıyla -0,800\*\*, -0,733\*\*, -0,815\*\*, -0,674\*\*,  $P < 0,01$ ), DHAR (sırasıyla, 0,939\*\*, 0,941\*\*, 0,927\*\*, 0,924\*\*,  $P < 0,01$ ), TF (0,881\*\*, 0,848\*\*, 0,878\*\*, 0,809\*\*,  $P < 0,01$ ) ve TBARS (sırasıyla -0,873, -0,875\*\*, -0,894\*\*, -0,826\*\*,  $P < 0,01$ ) içerikleriyle yüksek düzeyde ilişkili olduğu saptanmıştır. Ayrıca  $H_2O_2$  içeriğinin SU, TA, KA ve YA değerleri ile  $P < 0,01$  düzeyinde negatif yönde yüksek korelasyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Sürgünlere PAL ve GSH içeriklerinin ise genel olarak tüm parametrelerle düşük veya orta ( $P < 0,05$ ) düzeyde ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.12. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin kök uzunluğu (KU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR ve DHAR aktiviteleri ile toplam TFM, TF, TBARS, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PAL ve toplam GSH içeriklerinin Pearson (*r*) korelasyonları

Değişken	POX	CAT	SOD	APX	GR	MDHAR	DHAR	TFM	TF	TBARS	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	PAL	ΣGSH
<b>KU</b>	0,613*	-0,913**	-0,814**	-0,820**	0,082	-0,036	0,656**	-0,901**	-0,918**	-0,841**	-0,900**	-0,851**	-0,715**
<b>TA</b>	0,516*	-0,866**	-0,819**	-0,773**	0,021	-0,123	0,678**	-0,843**	-0,882**	-0,817**	-0,834**	-0,807**	-0,714**
<b>KA</b>	0,472	-0,859**	-0,808**	-0,760**	-0,009	-0,096	0,657**	-0,824**	-0,854**	-0,827**	-0,819**	-0,802**	-0,663**
<b>POX</b>	-	-0,597*	-0,653**	-0,542*	0,581*	-0,176	0,639*	-0,645**	-0,651**	-0,588*	-0,661**	-0,679**	-0,663**
<b>CAT</b>	-	-	0,817**	0,912**	0,071	0,070	-0,632*	0,923**	0,941**	0,927**	0,980**	0,879**	0,685**
<b>SOD</b>	-	-	-	0,672**	-0,066	0,145	-0,584*	0,0845**	0,833**	0,728**	0,754**	0,879**	0,881**
<b>APX</b>	-	-	-	-	0,029	-0,077	-0,660**	0,786**	0,842**	0,915**	0,920**	0,863**	0,545*
<b>GR</b>	-	-	-	-	-	-0,211	0,515*	0,093	0,075	-0,070	-0,041	-0,035	-0,236
<b>MDHAR</b>	-	-	-	-	-	-	-0,453	0,032	0,101	0,028	0,072	-0,046	0,351
<b>DHAR</b>	-	-	-	-	-	-	-	-0,509	-0,596*	-0,755**	-0,686**	-0,608*	-0,699**
<b>TFM</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	0,976**	0,771**	0,897**	0,887**	0,743**
<b>TF</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,815**	0,934**	0,874**	0,748**
<b>TBARS</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,931**	0,824**	0,618*
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,838**	0,663**
<b>PAL</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,757**
<b>ΣGSH</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\*  $P < 0,05$

\*\*  $P < 0,01$

Tablo 3.13. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin sürgün uzunluğu (SU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), yaprak alanı (YA), ozmotik potansiyel ( $\Psi_s$ ), fruktoz, glukoz, sükroz, toplam şeker, fruktan, prolin, Tkl, Tkar içerikleri ile klorofil floresans değerinin Pearson ( $r$ ) korelasyonları.

Değişken	TA	KA	YA	$\Psi_s$	fruktoz	glukoz	sükroz	$\Sigma$ şeker	fruktan	prolin	TKl	Tkar	$Fv/Fm$
SU	0,989**	0,994**	0,963**	0,982**	-0,845**	-0,912**	-0,728**	-0,878**	-0,861**	-0,882**	0,744**	0,855**	0,852**
TA	-	0,988**	0,975**	0,958**	-0,840**	-0,903**	-0,698**	-0,861**	-0,801**	-0,830**	0,712**	0,838**	0,804**
KA	-	-	0,944**	0,972**	-0,847**	-0,917**	-0,742**	-0,886**	-0,868**	-0,894**	0,793**	0,898**	0,854**
YA	-	-	-	0,938**	-0,816**	-0,869**	-0,643**	-0,815**	-0,742**	-0,777**	0,595*	0,727**	0,765**
$\Psi_s$	-	-	-	-	-0,787**	-0,882**	-0,750**	-0,862**	-0,885**	-0,894**	0,744**	0,845**	0,861**
fruktoz	-	-	-	-	-	0,964**	0,790**	0,952**	0,777**	0,765**	-0,702**	-0,789**	-0,754**
glukoz	-	-	-	-	-	-	0,807**	0,972**	0,841**	0,844**	-0,753**	-0,863**	-0,797**
sükroz	-	-	-	-	-	-	-	0,920**	0,737**	0,685**	-0,723**	-0,754**	-0,746**
$\Sigma$ şeker	-	-	-	-	-	-	-	-	0,834**	0,813**	-0,764**	-0,850**	-0,805**
fruktan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,958**	-0,878**	-0,885**	-0,923**
prolin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,865**	-0,889**	-0,903**
kl a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,997**	0,952**	0,889**
kl b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,983**	0,900**	0,836**
Tkl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,949**	0,872**
Tkar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,832**

\*  $P < 0,05$

\*\*  $P < 0,01$

Tablo 3.14. İyonlaştırıcı radyasyon ve melatonin uygulamalarının buğday fidelerinin sürgün uzunluğu (SU), taze ağırlık (TA), kuru ağırlık (KA), yaprak alanı (YA), POX, CAT, SOD, APX, GR, MDHAR ve DHAR aktiviteleri ile toplam TFM, TF, TBARS, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PAL ve  $\Sigma$ GSH içeriklerinin Pearson (*r*) korelasyonları.

Değişken	POX	CAT	SOD	APX	GR	MDHAR	DHAR	TFM	TF	TBARS	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	PAL	$\Sigma$ GSH
SU	-0,811**	0,163	-0,845**	-0,863**	-0,800**	-0,426	0,939**	-0,347	0,881**	-0,873	-0,894**	-0,516*	0,059
TA	-0,744**	0,168	-0,804**	-0,814**	-0,733**	-0,355	0,941**	-0,416	0,848**	-0,875**	-0,887**	-0,475	-0,035
KA	-0,818**	0,170	-0,847**	-0,872**	-0,815**	-0,429	0,927**	-0,373	0,878**	-0,894**	-0,910**	-0,491	0,066
YA	-0,696**	0,190	-0,781**	-0,780**	-0,674**	-0,329	0,924**	-0,406	0,809**	-0,826**	-0,853**	-0,459	-0,08
POX	-	-0,34	0,934**	0,954**	0,983**	0,685**	-0,678**	0,073	-0,912**	0,791**	0,832**	0,407	-0,568*
CAT	-	-	-0,385	-0,374	-0,302	-0,158	0,154	0,258	0,391	-0,353	-0,364	0,346	0,447
SOD	-	-	-	0,881**	0,912**	0,598*	-0,798**	0,196	-0,867**	0,887**	0,920**	0,481	-0,396
APX	-	-	-	-	0,961**	0,570*	-0,707**	0,132	-0,898**	0,767**	0,821**	0,293	-0,462
GR	-	-	-	-	-	0,681**	-0,659**	0,139	-0,855**	0,768**	0,819**	0,349	-0,536*
MDHAR	-	-	-	-	-	-	-0,361	0,279	-0,551*	0,554*	0,559*	0,156	-0,306
DHAR	-	-	-	-	-	-	-	-0,364	0,778**	-0,867**	-0,879**	-0,566*	-0,093
TFM	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,061	0,449	0,428	0,054	0,549*
TF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,845**	-0,850**	-0,530*	0,395
TBARS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,980**	0,422	-0,082
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,516*	-0,129
PAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,023
$\Sigma$ GSH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\*  $P < 0,05$

\*\*  $P < 0,01$

#### 4. TARTIŞMA

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)'nün verilerine göre, dünyada 820 milyondan fazla insan açlık sıkıntısıyla mücadele etmektedir (FAO, 2019). Ayrıca günümüzde her yedi kişiden biri yetersiz beslenmekte ve bir milyardan fazla kişi de vitamin, mineral ve protein bakımından eksik gıdalarla beslenerek “gizli açlık” sıkıntısı çekmektedir (Godfray vd., 2010; Kumar, 2016). Aktif ve sağlıklı yaşamın vazgeçilmez bir parçası olan bitkilerin gıda güvenliğinin korunması ve sürdürülmesindeki önemi büyüktür. Bitkilerde oluşabilecek biyotik veya abiyotik kaynaklı herhangi bir zarar gıda erişimini ve bulunabilirliğini azaltıp maliyetini arttırarak gıda güvenliğini tehdit etmektedir (FAO, 2017). Bu durum özellikle gıda üretimi ve alım gücü düşük olan ülkeler için kritik bir öneme sahiptir (Schmidhuber ve Tubiello, 2007). Bir ülkenin dış ülkelere olan ticari ve teknolojik bağımlılığı, artan nüfus oranı ile birleştiğinde o ülke için yoksulluk ve açlık sorununu da beraberinde getirmektedir. Gelişmiş ülkeler insan sağlığı üzerindeki etkilerinin henüz aydınlatılmadığı genetiği değiştirilmiş ürünler ile dünyadaki açlık sorununu çözmeye çalışsa da bu çalışmalar açlık ve yoksulluk sorununu gidermede yetersiz kalmaktadır (Aktaş, 2006). Günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliği ile birlikte bitkilerde stres oluşturan koşullar verimli toprak arazilerini ve bitki biyoçeşitliliğini azaltmakta ve birim alan başına düşen verimle birlikte ürün kalite ve miktarını azaltmaktadır (Vermeulen vd., 2012; Campillo vd., 2012; Schmidhuber ve Tubiello 2007). Bu durum açlık sorununun küresel boyutlara ulaşmasına neden olmaktadır (Schmidhuber ve Tubiello 2007). Gelecekte sağlıklı gıda kaynaklarının sağlanması ve sürdürülebilir tarımın devam ettirilebilmesi için atmosferik süreçlerin bitkiler üzerindeki etkilerine yönelik çalışmaların arttırılması gerekmektedir. Ayrıca tarımda verimi arttırabilecek kısa süreli ve tekrarlı çözümler yerine ürün verimini ve kalitesini arttıran uzun vadeli çözüm yöntemleri geliştirilmelidir.

Dünya çapında geniş bir ekim alanına sahip olan tahıllar, insanlar için başlıca besin kaynağı olup gıda güvenliğinin de temelini oluştururlar. İnsanların günlük harcadığı kaloringin çoğu karbohidrat, lif, vitamin, mineral ve protein bakımından zengin olan tahıllardan sağlanmaktadır. Tahıllar aynı zamanda insan sağlığına faydalı birçok biyoaktif fitokimyasal bileşikler de içermektedir (Loskutov ve Khlestkina, 2021). Tahılların zengin fitokimyasal içeriklerinin yanı sıra üretimlerinin ucuz olması, kuru olarak uzun süre

saklanabilmeleri ve kolayca depolanabilmeleri onların tarımda daha fazla tercih edilmesinin nedenlerindedir (McKevith, 2004). Dünyada yetiştirilen başlıca tahıl çeşitleri arasında buğday önemli bir yer almaktadır. Buğday; un, nişasta, bulgur, kuskus, irmik ve makarna gibi çeşitli ürünlerin hammaddesini oluşturmakta ve ekmekek, kek, bisküvi gibi birçok gıdanın da üretiminde kullanılmaktadır. Geniş kullanım alanına sahip olmasından ve ayrıca kolay ve hızlı yetişmesinden dolayı buğday, stres çalışmaları ve besin içeriği gibi farklı fizyolojik ve biyokimyasal araştırmalarda sıklıkla tercih edilen bir bitkidir (McKevith, 2004).

İyonlaştırıcı radyasyonun bitkiler üzerine olan etkisi geçmişten günümüze kadar farklı amaçlar doğrultusunda araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar, genellikle çevrenin radyoaktif kirlenmesinin sonuçlarını değerlendirmeye (Geraskin vd., 2003; Real vd., 2004; Aleksakhin vd., 2006), uzaydan gelen radyasyonun bitki büyümesi üzerindeki etkilerini anlamaya (De Micco vd., 2011) ya da yüksek verime sahip bitkileri seçmek için bitkilerin ıslahına (Maity vd., 2005) yönelik olmuştur. Islah çalışmalarında, bitkilere uygulanan radyasyon yoğunluğu ve maruz kalma süresi bitkilerin anormal ya da arzu edilen mutantlarının oluşturulmasında kritik bir önem taşımaktadır (Alikamanoglu vd., 2011; Marjeed vd., 2018). Tohumlara uygulanan  $\gamma$ -ışını gibi yüksek iyonizasyon potansiyeline sahip IR kaynakları, genlerin yeniden düzenlenmesine bağlı olarak bitkiler üzerinde olumlu etki gösterebileceği gibi hücre döngüsünde, hormonal düzenlemede, enzimatik sistem üzerinde ve çeşitli metabolik yollarda değişikliklere neden olarak büyümeyi engelleyebilir ve DNA üzerinde kalıcı hasarlara neden olabilir (Marjeed vd., 2018). İyonlaştırıcı radyasyon ile bitki büyümesi ve gelişmesine ilişkin birçok çalışma yapılmış olsa da IR'nin bitkilerin biyokimyasal ve fizyolojik süreçleri üzerine olan etkileri tamamen aydınlatılmış değildir ve bu konuyla ilgili daha ayrıntılı çalışmaların gerekliliği önemle vurgulanmaktadır (Esnault vd., 2010; Gudkov vd., 2019).

Melatonin (Mel,  $C_{13}H_{16}N_2O_2$ ) hayvanlarda ve bitkilerde çeşitli fizyolojik işlevleri olan bir indolamindir. Bitkilerde büyüme düzenleyicisi ve antioksidan olarak işlev görür. Ayrıca bitkilerin strese karşı savunmasında da önemli bir role sahiptir. Çeşitli çevresel stres faktörlerinin bitkilerde oluşturduğu zararlı etkilerin dışarıdan Mel uygulaması ile azaldığı birçok çalışmada bildirilmiştir (Posmyk vd., 2008; Li vd., 2012; Zhang vd., 2013; Hernandez vd., 2015). Ancak dışarıdan uygulanan Mel'in, IR stresine maruz kalan bitkilerin strese karşı oluşturduğu cevabı ne şekilde etkilediği konusunda literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Mevcut tez çalışmasında 'Bezostaya-1' buğday (*T. aestivum*) çeşidinin tohumlarına gama ışınlaması (100, 200, 300, 400 Gy) yapıldıktan sonra çimlendirilmeleriyle elde edilen fidelerin strese karşı vermiş olduğu yanıt ve bu yanıtı karşı ekim öncesi ve ekim sonrası Mel (25 µM) uygulamalarının rolü incelenmiştir. Bu bağlamda, enzimatik olan ve olmayan antioksidan savunma sistemi bileşenlerinin karmaşık örgüsü birtakım temel büyüme ve gelişme parametreleriyle fizyolojik ve biyokimyasal düzeyde aydınlatılmaya çalışılmıştır.

İyonlaştırıcı radyasyonun bitkilerin büyümesi, metabolizması ve üremesi üzerindeki etkileri radyasyon tipine ve uygulama dozuna bağlı olarak değişmektedir. Düşük dozlardaki radyasyon uygulamalarının bitki büyümesini uyardığı, orta ve yüksek seviyelerin ise genellikle bitkilerde belirgin hasarlara neden olduğu birçok çalışmada rapor edilmiştir (Kim vd., 2004; Melki ve Marouani, 2010; Singh vd., 2013; Beyaz vd., 2016). Radyasyon etkisinin şiddeti, uygulanan doz miktarının ve çeşidinin yanı sıra bitkinin türü, çeşidi, gelişim aşaması ve bitki kısmı (tohum, yaprak gibi) gibi diğer faktörlere göre de değişiklik göstermektedir. İyonlaştırıcı radyasyon, bitkilerde genellikle daimi dokulara doğrudan zarar verirken tohum, meristem veya üreme hücrelerine dolaylı etki göstererek genetik değişikliklere neden olur (Arena vd., 2014). Mevcut tez çalışmasında 'Bezostaya-1' buğday çeşidinin tohumlarına gama ışını (0, 100, 200, 300 ve 400 Gy) uygulamalarının, kök ve sürgünlerin boy uzunluğunu, taze ve kuru ağırlığını ve yaprak alanını azaltarak buğday fidelerinin büyümesini engellediği belirlenmiştir. Ayrıca söz konusu büyüme parametreleri üzerinde oluşan indirgenmelerin özellikle yüksek dozlarda (300 ve 400 Gy) çok daha belirgin olduğu ortaya konulmuştur. Benzer şekilde, Alikamanoglu vd. (2011) soya fasulyesi (*Glycine max* L. Merrill) tohumlarına yaptıkları gama ışınlamasının (100, 200, 300, 400 ve 500 Gy) fidelerin ortalama boy uzunluğunu ve taze ağırlığını giderek azalttığını bildirmiştir. Ayrıca mutasyon ıslah çalışmalarında fide büyümesini %50 azaltan en uygun doz limitinin (GR<sub>50</sub>) de 258 Gy olduğunu rapor etmişlerdir. Yüksek dozlarda IR uygulamalarının, bitkilerin morfolojik parametrelerini (uzunluk, taze ve kuru ağırlık vs.) olumsuz etkileyerek büyümelerini engellediği diğer çalışmalarda da bildirilmiştir (Marcu vd., 2013; İlyas ve Naz, 2014; Marjeed vd., 2016; Hong vd., 2018).

Melatoninin, bazı çevresel stres faktörlerine karşı bitkilerde çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerde önemli işlevlere sahip olduğu rapor edilmiştir (Posmyk vd., 2008; Wei vd., 2015; Wang vd., 2019b; Siddiqui et al, 2019). Ancak tahıllarda IR stresinin neden olduğu oksidatif hasarın ekim öncesi veya ekim sonrası Mel uygulaması ile iyileştirilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada ekim



öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları, IR'ye maruz bırakılan tohumlardan elde edilen fidelerin KU, SU, TA, KA ve YA değerlerini, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırmıştır. Tezden sağlanan bu sonuçlar, ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamalarının, IR'nin morfometrik parametreler üzerindeki olumsuz etkilerini hafiflettiğini ortaya koymuştur. Ayrıca stres tolerans indeksinden (Şekil 3.2) de anlaşılacağı üzere; IR stresinin morfolojik parametreler üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiyi azaltmada, ekim öncesi Mel uygulaması, ekim sonrası Mel uygulamasına kıyasla çok daha fazla etkili olmuştur. Yaprak alanı ve kuru ağırlık birlikte değerlendirildiğinde, Mel uygulaması yapılan tüm gruplarda, yaprak alanının fazla olması birim alandaki fotosentez miktarını artırarak (bkz. Tablo 3.3, fotosentetik pigmentler) daha fazla fotosentez ürününün açığa çıkmasına ve böylece buğday fidelerinin kuru ağırlığının veya diğer ifade ile biyokütlesinin artmasına yardımcı olduğu söylenebilir.

Bitkiler, stres faktörlerinin zararlı etkileriyle başa çıkmada çeşitli koruyucu mekanizmalar (ozmotik düzenleme, oksidatif koruma, fotosentetik kontrol, moleküler sinyalleşme ve gen düzenlenmesi gibi) geliştirmiştir (Siddiqui vd., 2019b). Bu koruyucu mekanizmalardan bir tanesi, ozmotik düzenleme (ozmoregülasyon)'dir. Çeşitli çevresel stres faktörleri koşullarında yetişen bitkiler genellikle hücre içinde düşük moleküler ağırlığa sahip bazı çözünebilir organik maddeleri (şeker, fruktan, prolin, aminoasit vb.) biriktirerek hücrenin ozmotik potansiyelini ( $\Psi_s$ ) azaltır (Antoniou vd., 2017; Maswada vd., 2018; Mahmood vd., 2020). Bitkilerdeki bu ozmotik düzenleme sayesinde hücrelere su alımı kolaylaşır ve hücre içi su dengesi korunmuş olur (Tariq vd., 2018; Mahmood vd., 2020). Mevcut çalışmada sürgünlerin  $\Psi_s$  seviyesinin artan IR uygulamaları boyunca (100 → 400 Gy) giderek azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte hem ekim öncesi ve hem de ekim sonrası Mel uygulamaları, IR stresli bitkilerde sürgünlerin  $\Psi_s$  seviyesini artırarak kontrol grubuna yaklaşmasını sağlamıştır. Ayrıca ön-Mel uygulaması, yetiştirme sırasında yapılan Mel uygulamasına kıyasla IR'li bitkilerde  $\Psi_s$  seviyesini arttırmada çok daha etkili olmuştur. Bitki hücrelerinde organik madde sentezi enerji gerektiren bir reaksiyon olduğundan (Tariq vd., 2018), Mel uygulamasının IR'e maruz kalan bitkilerde ozmolitlerin birikimini azaltarak  $\Psi_s$  seviyesini artırması, Mel uygulanan bitkilerin büyümesi sırasında enerjinin etkili bir şekilde kullanıldığına kanıttır. Bununla birlikte mevcut bulgular, Mel uygulamasının hücre içi ozmolit (solut, çözünebilir madde) birikimini azaltarak bitki hücrelerinin ozmotik dengesinin korunmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Çalışma sonuçlarımıza benzer şekilde, Ye ve arkadaşları (2016) dıştan uygulanan Mel'in kuraklık

koşullarındaki mısır fidelerinde yaprak ozmotik potansiyelini azaltarak bitkinin su durumunun düzenlenmesine yardımcı olduğunu bildirmiştir.

Prolin, bitkilerde birincil metabolik yoldan üretilen ve büyüme ve gelişme dahil bir çok fizyolojik sürecin düzenlenmesinde rolü olan önemli bir aminoasittir (Slama vd., 2015). Bitkilerde su kaybı hasarına karşı koruyucu madde olarak özel bir işlev üstlenir. Stres koşullarında diğer tüm aminoasitlerin toplamının birkaç katı olacak kadar yüksek seviyelerde biriktirilebilir. Bununla birlikte çok yüksek derişimlerde dahi enzimler üzerinde inhibitor etki göstermez (Heldt ve Piechulla, 2015). Prolin, bitkilerde etkili bir ozmotik düzenleyici ve serbest radikal süpürücü moleküldür (Slama vd., 2015). Kuraklık, tuzluluk ve soğuk gibi çeşitli stres faktörlerinin varlığında prolin üretimi veya birikimi, geniş bir bitki yelpazesinde rapor edilmiştir (Özdemir vd., 2004; Bai vd., 2019; El-Shazoly vd., 2019). Ancak bitkilerin strese karşı bir tepki olarak mı yoksa stres toleransı sağlamak amacıyla mı prolin biriktirdiği halen bir tartışma konusudur (Kishor ve Sreenivasulu, 2014; Kaur ve Asthir, 2015). Mevcut çalışmadaki bulgular, IR stresinin, buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki prolin içeriğini kontrole kıyasla önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, Borzouei vd. (2010), buğday (*T. aestivum* L.) tohumlarına gama ışını uygulamalarının (100, 200 ve 300 Gy) fidelerdeki prolin içeriğini artırdığını rapor etmiştir. Çeşitli abiyotik stres faktörlerine maruz kalan bitkilerde prolin seviyesindeki aşırı artışın, prolin bakımından zengin proteinlerin hidrolizinden, protein sentezinde daha az prolin kullanılmasından, prolin bozunumunun azalmasından ya da de-novo sentezinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Kaur ve Asthir, 2015). Bu çalışmada, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının (özellikle ekim öncesi Mel uygulaması), kök ve sürgünlerde IR stresinden kaynaklanan prolin birikimini, IR'li kontrollerine kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı saptanmıştır. Benzer şekilde, kuraklık stresi altındaki yonca bitkilerinde ön Mel uygulaması ile prolin içeriğinin azaldığı rapor edilmiştir (Antoniou vd., 2017). Dışsal Mel uygulaması ile prolin içeriğinde oluşan azalmanın, prolinin hücrel solunumda enerji kaynağı olarak veya alternatif bir substrat olarak kullanılmasından kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Antoniou vd., 2017). Mevcut sonuçlar, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde prolin metabolizmasını düzenleyerek bitkiyi IR stresine karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermektedir.

Çözünebilir şekerler, bitkilerde bir seri metabolik olayda yer alan ve ozmotik potansiyelin düzenlenmesine katkıda bulunan bileşiklerdir (Khan vd., 2019). Fotosentez,

sükroz metabolizması ve ozmolit senteziyle ilgili genlerin düzenlenmesinde sinyal molekülleri olarak işlev görürler (Rosa vd., 2009). Ayrıca basit şekerler ve polisakkaritler, hücre zarının korunmasına yardımcı olur (Keunen vd., 2013). Bunların yanı sıra çözünebilir şekerler, bitkilerde antioksidanlar olarak da rol alır (Couée vd., 2006). Son yıllarda, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanların yanı sıra disakkaritler, oligosakkaritler ve fruktanlar gibi suda çözünebilen karbohidratların farklı organellerde (kloroplast, mitokondri ve peroksizom gibi) antioksidan özellik göstererek doğrudan ROT'ların süpürülmesine dahil oldukları ve böylece abiyotik stres toleransına katkıda buldukları bildirilmiştir (Couée vd., 2006; Bolouri-Moghaddam vd., 2010; Keunen vd., 2013). Mevcut tez çalışmasında, IR stresinin buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde fruktoz, glukoz, sükroz ve toplam şeker içeriklerini tüm uygulama gruplarında kontrollerine kıyasla artırdığı, ekim öncesi (400 Gy uygulanan fidelerin kökleri hariç) ve ekim sonrası yapılan Mel uygulamalarının ise IR uygulamaları ile artan bireysel şeker içeriklerini genel olarak azalttığı kaydedilmiştir. Bu durum, Mel'in bitkinin fotosentetik sürecini düzenlemek için karbohidrat metabolizmasıyla ilgili genlerin ifadesini farklı şekilde düzenlemesinden kaynaklanmış olabilir. Melatoninin birçok fizyolojik süreçte gen ekspresyonunda önemli değişikliklere neden olduğu ve karbohidrat metabolizmasını düzenlediği başka çalışmalarda da rapor edilmiştir (Zhang vd., 2017a; Arnao ve Hernández- Ruiz, 2019; Siddiqui vd., 2019). Bitkilerde fotosentez esnasında sentezlenen karbohidratlar enerji metabolizmasında organik karbon kaynağı olarak kullanılmakta ve genellikle düşük şeker içeriği fotosentez seviyesini artırmaktadır (Kobylińska vd., 2018). Bu açıdan bakıldığında, IR stresine maruz kalan fidelerde Mel uygulamasının fotosentetik mekanizmayı sürdürmek için çözünebilir şeker tüketimini arttırdığı ve bitkinin büyümesi için yeterli karbon iskeleti sağladığı söylenebilir. Nitekim buğday fidelerinin kök ve sürgünlerine ait büyüme parametreleri (KU, SU, TA, KA) ile fruktoz, glukoz ve sükroz içerikleri arasında negatif yönde ve yüksek düzeyde ( $P < 0,05$ ) bir korelasyonun olduğu tespit edilmiştir (bkz. Tablo 3.11 ve Tablo 3.13). Öte yandan, Mel uygulaması ile birlikte bireysel şeker içeriklerinin IR'li kontrollerine göre daha az olması, Mel'in buğday fidelerine daha etkili bir enerji kullanımı sağladığını göstermektedir. Ancak 400 Gy uygulanan fidelerin köklerinde ön-Mel uygulaması fruktoz, sükroz ve toplam şeker içeriklerini IR'li kontrollerine kıyasla daha da arttırmıştır. Bu durum yukarıda bahsi geçen şekerlerin, 400 Gy IR uygulaması ile köklerde oluşan yüksek oksidatif stresi azaltmak için antioksidan olarak hareket etmeleriyle ilişkili olabilir. Farklı buğday çeşitleriyle yapılan bir

çalışmada, kuraklık stresinin yakın genotiplerdeki buğday çeşitlerinde aşırı glukoz, fruktoz ve sükroz birikimine neden olduğu rapor edilmiştir (Marček vd., 2019). El-Shazoly vd. (2019), buğday bitkisinde bor (B) stresinin neden olduğu yüksek çözünebilir şeker içeriğinin, salisilik asit (SaA) ve tiamin uygulamaları ile önemli düzeyde azaldığını bildirmiştir.

Bitkilerde çözünebilir karbohidratlardan bir diğeri de fruktanlardır (Marček vd., 2019). Fruktoz, glukoz ve sükroz gibi fruktanlar da stres koşullarında bitkilerin ozmotik durumunun korunmasına yardımcı olan önemli şeker molekülleridir (Keunen vd., 2013). Bunun yanı sıra  $H_2O_2$  ve  $OH^*$  gibi ROT'ların temizlenmesinde de görev alır (del Pozo vd., 2019). Daha önce yapılan çalışmalarda bitki hücrelerindeki fruktan içeriğinin çevresel koşullara bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir (Livingston vd., 2009; Keunen vd., 2013; del Pozo vd., 2019). Mevcut tez çalışmasında, buğday fidelerinin kök ve sürgünlerine ait fruktan içeriğinin artan IR uygulamaları (100 → 400 Gy) boyunca giderek arttığı ve özellikle 300 ve 400 Gy doz uygulamalarının yüksek fruktan birikimine neden olduğu belirlenmiştir. Buradan gama ışınlamalarının kök ve sürgünlerdeki fruktan içeriğini doza bağımlı olarak değiştirdiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının 100 ve 200 Gy uygulama gruplarındaki fruktan içeriği üzerinde istatistiksel olarak ( $P < 0,05$ ) önemli bir değişime neden olmadığı; ancak 300 ve 400 Gy'de meydana gelen aşırı fruktan birikimini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azalttığı kaydedilmiştir. Melatonin uygulamaları (ön-Mel ya da Mel) ile özellikle yüksek dozlarda aşırı fruktan birikiminin azalması, Mel'in bitki hücrelerinin ozmotik durumu üzerinde düzenleyici etkisinin olduğunu göstermektedir.

Fotosentez, bitki üretiminin temelini oluşturan ve bitkilerin ışık enerjisini kullanarak organik bileşikleri sentezledikleri temel bir fizyolojik süreçtir (Ye vd., 2016). Bitkilerin büyümesi ve gelişmesi için gerekli olan fotosentez, IR'nin de başlıca hedeflerindedir (Gudkov vd., 2019). Bu nedenle IR'nin bitki büyümesine ek olarak fotosentez üzerindeki etkileri, araştırmacılar için oldukça ilgi çekici bir konu haline gelmiştir (Kiong vd., 2008; Gudkov vd., 2019). Mevcut tez çalışmasındaki sonuçlar,  $\gamma$ -ışınlamasının buğday fidelerindeki fotosentetik pigment (kl *a*, kl *b*, Tkl ve Tkar) içeriğini düşük dozlarda (100 – 200 Gy) arttırarak ve yüksek dozlarda (300 – 400 Gy) azaltarak, doza bağımlı bir şekilde artma ya da azalma yönünde etkilediğini göstermektedir. Çalışma sonuçlarımıza benzer şekilde, fotosentetik pigment içeriğinin IR uygulama dozlarına bağımlı olarak değiştiği ve maruz kalınan yüksek dozların klorofil ve karotenoid içeriğini azalttığı, farklı bitkilerle

yapılan çalışmalarda de rapor edilmiştir (Kim vd., 2004; Alikamanoglu vd., 2011; Marcu vd., 2013; Sengupta vd., 2013; Beyaz et al, 2016; Marjeed vd., 2018). Fotosentetik pigment içeriğinde oluşan azalmanın, IR'nin pigment sentezinden sorumlu genlere doğrudan etki etmesinden ve genlerin tamir edilemez şekilde hasar almasından kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Gudkov vd., 2019). Bunun yanı sıra, kloroplastların bitkilerde başlıca ROT oluşum yerleri olduğu bilinmektedir (Gechev vd., 2006). Bu nedenle, oksidatif stresten dolayı artan ROT'ların etkisi ile pigmentlerin oksidasyonu veya stres etkisi ile kloroplastların boyutunda ve sayısındaki azalma da pigment içeriğinin azalmasının diğer muhtemel nedenleri arasında gösterilmektedir (Gudkov vd., 2019). Herhangi bir şekilde,  $\gamma$ -ışınlamanın pigment içeriğini azaltması, fotosentez oranını düşürmekte ve böylece bitki büyümesini engellemektedir (Sengupta vd., 2013). İyonlaştırıcı radyasyon muamelesi sonrası klorofil pigmentlerinin azalmasıyla uyumlu olarak, karotenoidlerin de azalması bitkiyi ROT'ların neden olduğu oksidatif hasara karşı daha savunmasız hale getirmektedir. Mevcut çalışmada, fidelerin kl *a* içeriğinin kl *b* içeriğinden nispeten daha yüksek olduğu ve kl *a/b* oranının artan IR uygulamaları boyunca giderek azaldığı saptanmıştır. Buradan, kl *b*'nin kl *a*'ya kıyasla IR stresine karşı daha dirençli olduğu ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, Gudkov ve arkadaşları (2019) da IR stresine karşı kl *b*'nin kl *a*'ya kıyasla daha dirençli olduğunu ve bu durumun fotosistem I (PSI) ve fotosistem II (PSII) komplekslerinin içeriğiyle ilişkili olabileceğini bildirmiştir.

Buğday fidelerinde ekim öncesi veya ekim sonrası Mel uygulamalarının IR stresinin neden olduğu hasarı iyileştirmedeki rolünün incelendiği bu çalışmada, IR uygulamaları ile azalan fotosentetik pigment içeriğinin ekim öncesi veya ekim sonrası Mel uygulamaları ile önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttığı kaydedilmiştir. Ayrıca, ön-Mel uygulamasının IR'nin neden olduğu pigment bozunmasını tüm gruplarda azalttığı ancak, ekim sonrası Mel uygulamasının yalnızca yüksek dozlarda ve özellikle 400 Gy'de fotosentetik pigment içeriği üzerinde iyileştirici bir etki sergilediği belirlenmiştir. Mahdavian vd. (2008), ultraviyole radyasyon (UV-A, UV-B ve UV-C) ile muamele ettikleri biber (*Capsicum annuum* L.) fidelerinde kl *a*, kl *b* ve Tkar içeriklerinin kontrol grubuna kıyasla azaldığını, ancak yapraklara püskürtme yoluyla uyguladıkları salisilik asidin fotosentetik pigment içeriğini arttırarak UV radyasyonun zararlı etkilerini azalttığını bildirmiştir. Dıştan Mel uygulamasının kuraklık, tuzluluk, sıcaklık ve donma gibi farklı çevresel stres koşullarında, fotosentetik pigment derişimini arttırdığı geniş bir bitki yelpazesinde bildirilmiştir (Szafranska vd., 2016; Antoniou vd., 2017; Zhang vd., 2017b; Siddiqui vd., 2019).

Bitkilerde önemli sinyal bileşiği olan Mel'in stres koşullarında klorofillerin bozunmasını geciktirerek, CO<sub>2</sub> alımını artırarak ve elektron taşınmasını hızlandırarak bitkilerde fotosentetik verimi arttırabileceği vurgulanmaktadır (Salehi vd., 2019). Mevcut sonuçlar, dıştan Mel uygulamasının IR stresine maruz kalan buğday fidelerinin yapraklarında fotosentetik pigment içeriğini arttırdığını göstermektedir. Melatoninin sahip olduğu antioksidan özelliği sayesinde, fotosentetik süreçte aşırı miktarda üretilen ROT'ları temizleyerek, stres koşullarındaki bitkilerde klorofil içeriğini arttırabileceği bildirilmiştir (Ye vd., 2016).

Fotosistem II (PS II)'nin maksimum kuantum verimi olan klorofil floresans oranı ( $F_v/F_m$ ), ışığa bağımlı reaksiyonların ne derece verimli ilerlediğini gösteren bir katsayıdır (Szafrńska vd., 2016). Genellikle fotoinhibisyonun bir göstergesi olarak kullanılan  $F_v/F_m$  oranı, bitkinin çevresel stres faktörlerine karşı cevabında önemli bir rol oynar (Zhang vd., 2017b). Bu tez çalışmasında; buğday yapraklarına ait  $F_v/F_m$  oranının, kontrol grubuna kıyasla 100, 200 ve 300 Gy ışınlama dozlarında çok az değiştiği ve 400 Gy uygulama grubunda ise keskin bir azalma gösterdiği kaydedilmiştir. Bitkilerde  $F_v/F_m$  oranının IR stresine karşı dirençli olduğu ve uygulanan IR dozuna bağlı olarak bir miktar artıp azalabileceği daha önce Gudkov vd. (2019) tarafından bildirilmiştir. De Micco vd. (2011) IR stresinin, bitkilerde fotosentetik zarlar üzerinde foto-oksidasyona yol açan birtakım serbest radikalleri oluşturduğunu ve PSII'nin işlevsel kaybına neden olduğunu rapor etmiştir. Bu çalışmada, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının IR uygulaması yapılan fidelerde  $F_v/F_m$  oranını arttırdığı saptanmıştır. Zhang vd. (2017b) soğuk stresi koşullarında yetiştirdikleri kavun bitkisinde, Mel uygulamasının PSII verimliliğini arttırdığını bildirmiştir. Ayrıca Mel'in fotosentetik sistem üzerindeki koruyucu etkisinin, açık PSII reaksiyon merkezleri tarafından enerji yakalama verimliliğine bağlanmıştır (Zhang vd., 2017b). Mevcut çalışmadaki sonuçlar, ekim öncesi veya ekim sonrası uygulanan Mel'in, IR stresinin neden olduğu fotoinhibisyonu hafiflettiğini ve PSII'nin fotosentetik verimliliğinin korunmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Melatonin muhtemelen bunu, fotosentetik süreçte IR stresi ile oluşan ROT'ların aşırı birikimini engelleyerek gerçekleştirmiştir. Nitekim, Mel'in doğrudan antioksidan özellik sergileyerek, antioksidan mekanizmaları düzenleyerek ya da elektron taşıma zincirinde elektron taşıma etkinliğini artırarak aşırı ROT birimini azalttığı rapor edilmiştir (Salehi vd., 2019).

Bitkilerde normal koşullar altında ROT'ların oluşumu ve yıkımı arasında dinamik bir denge vardır. Ancak herhangi bir çevresel strese maruz kalma durumunda bu denge

bozular ve bitkilerde aşırı ROT birikimi gerçekleşir (Mittler, 2002). Reaktif oksijen türlerinin, bitkilerin enzimatik veya enzimatik olmayan savunma mekanizmaları tarafından kontrol altına alınamayacak seviyeye gelmesi durumunda bitki hücrelerinde oksidatif stres oluşur (Sharma ve Zheng, 2019). Kloroplast, mitokondri ve plazma zarında  $e^-$  taşınması esnasında yan ürün olarak üretilen ROT'lar, bitkilerde fotooksidasyona yol açarak fotosentetik mekanizmayı olumsuz etkiler (De Micco vd. 2011). Ayrıca suyun radyolizi ile oluşan ROT'lar bitkilerde, lipid peroksidasyonuna, protein oksidasyonuna, nükleik asit hasarına ve enzim inhibisyonuna yol açar (Sharma ve Zheng, 2019). Diğer stres faktörleri gibi IR stresi de bitki hücrelerinde ROT oluşturur (Zaka vd., 2002; Esnault vd., 2010; Hong vd., 2018; Gudkov vd., 2019). Bitkilerde diğer ROT'larla birlikte özellikle  $H_2O_2$  seviyesi, oksidatif stresin derecesinin iyi bir göstergesidir (Sofu vd., 2015). Wi vd. (2007), gama ışınlamasına maruz bıraktıkları kabak bitkisinde,  $H_2O_2$  birikiminin genel olarak plazma zarında, orta lamelde ve özellikle yaprak dokularında olduğunu ve bu birikimin hücre tipine bağlı olarak değiştiğini rapor etmiştir. Mevcut çalışmada, buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde  $H_2O_2$  içeriğinin kontrol grubuna kıyasla arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, ekim öncesi Mel uygulaması ile  $H_2O_2$  içeriğinin, IR uygulanan gruplara kıyasla, daha düşük olduğu ancak; ekim sonrası Mel uygulaması ile daha da yükseldiği kaydedilmiştir. Colak vd. (2015), arpa (*H. vulgare* L.) bitkisine uyguladıkları 10 Gy'lik X-ışınlamasının, köklerdeki  $H_2O_2$  içeriğini arttırdığını buna karşın, yaban mersininden hazırladıkları antosiyanince zengin bitki özütünün, sahip olduğu antioksidan özellik sayesinde, IR'den kaynaklanan  $H_2O_2$  birikimini önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde, Mel'in serbest radikallere karşı antioksidan aktiviteye sahip olduğu ve ROT'larla etkileşime girerek stres koşullarında onların seviyesini azalttığı bazı çalışmalarda rapor edilmiştir (Tan vd., 2000; Arnao ve Hernández-Ruiz, 2006; Ye vd., 2016; Li vd., 2019). Bu durum, mevcut çalışmamızda ön-Mel uygulaması ile  $H_2O_2$  içeriğindeki azalmanın, Mel'in antioksidan özelliği ile ilişkili olabileceğini göstermektedir.

Reaktif oksijen türleri, hücre zarında lipid peroksidasyonu ve protein modifikasyonlarına yol açarak bitkiler için hayati bir öneme sahip olan zar geçirgenliğini değiştirir (De Micco vd. 2011). Alikamanoglu vd. (2011), soya fasulyesi (*G. max*) bitkisinde  $\gamma$ -ışınlamasının lipid peroksidasyonunu arttırdığını bildirmiştir. Benzer şekilde mevcut çalışmada, artan dozlarda  $\gamma$ -ışını IR uygulamalarının buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki TBARS içeriğini arttırarak lipid peroksidasyonunu arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca ön-Mel uygulamasının TBARS içeriğindeki artışı önemli düzeyde azalttığı, ancak

ekim sonrası Mel uygulamasının ise TBARS içeriğini genel olarak daha da arttırdığı saptanmıştır. Lipid peroksidasyonunun aşırı ROT birikimiyle ilgili olduğu dikkate alındığında, ekim öncesi Mel uygulamasının ekim sonrası Mel uygulamasına kıyasla IR stresinden kaynaklanan ROT'ların temizlenmesinde daha etkili olduğu sonucuna varılmaktadır. Manda vd. (2007), 10 Gy'lik X-ışınına maruz bıraktıkları fare hücrelerinde artan lipid peroksidasyonunun bir Mel metaboliti olan AFMK (*N*<sup>1</sup>-asetil-*N*<sup>2</sup>-formil-5-metoksikinuramin) uygulaması ile azaldığını bildirmiştir. Melatonin ve türevlerinin sahip oldukları amfifilik özellikleri (hem suda ve hem de yağda çözünebilme yeteneği) ile hidrofilik ve hidrofobik ortamlarda hareket edebildikleri ve bu sayede zar lipidlerini peroksidasyona karşı korudukları rapor edilmiştir (Posmyk vd., 2008).

Bitkiler, oksidatif stres ile başa çıkmak için ROT seviyesini kontrol altında tutan çeşitli koruyucu mekanizmalar geliştirmiştir (Mittler, 2002). Bu koruyucu mekanizmalardan biri de enzimatik (SOD, POX ve CAT gibi ) ve enzimatik olmayan (glutasyon, karotenoid ve fenolikler gibi) antioksidan moleküllerin oluşmasıdır (Gechev vd., 2006). Bu tez çalışmasında, IR stresine maruz bırakılan buğday tohumlarına ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları ile, fidelerin kök ve sürgünlerindeki antioksidan enzim aktivitelerinde istatistiksel olarak önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) değişimler belirlenmiştir. Bitki hücrelerinin tüm bölmelerinde bulunan ve son derece reaktif olan SOD enzimi,  $O_2^{\cdot-}$ 'i  $H_2O_2$ 'ye dönüştürerek bitkinin ilk savunma hattını oluşturur (Mittler, 2002). Farklı bitkiler üzerinde yapılan çalışmalarda genel olarak  $\gamma$ -ışınlamasının bitkilerdeki SOD aktivitesini arttırdığı rapor edilmiştir (Zaka vd., 2002; Kim vd., 2005; Alikamanoglu vd., 2011). Benzer şekilde mevcut çalışmada, buğday tohumlarına artan dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamalarının, fidelerin kök ve sürgünlerindeki SOD aktivitesini arttırdığı kaydedilmiştir. Ancak ön-Mel uygulaması, IR'in neden olduğu oksidatif hasarı hafifleterek, serbest radikallerin temizlenmesinde etkili olan SOD enziminin aşırı ekspresyonunu (ifadesini) bastırmıştır. Ayrıca yetiştirme sırasında uygulanan Mel, SOD aktivitesini köklerde aşağı ve sürgünlerde ise yukarı yönde düzenleyerek IR stresinin neden olduğu oksidatif hasarı hafifletmiştir. Melatoninin oksidatif stresi hafifletmek için SOD aktivitesini aşağı/yukarı yönde düzenlediği farklı stres faktörleriyle yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir (Turk vd., 2014; Zhang vd., 2017; Martinez vd., 2018; Hodžić vd., 2019). Ayrıca SOD aktivitesinin bitki türleri, bitki kısımları, uygulanan Mel derişimi, maruz kalma süresi gibi çeşitli faktörlerden dolayı farklılık gösterebileceği bildirilmiştir (Khan vd., 2020).



Strese maruz kalan bitkilerde CAT, peroksizom ve glioksizomlarda toksik düzeydeki  $H_2O_2$ 'nin azaltılmasında rol alan anahtar bir antioksidan enzimdir. Bu enzim, iki molekül  $H_2O_2$ 'nin doğrudan  $H_2O$  ve  $O_2$ 'ye dönüşmesini sağlar (Sofu vd., 2015). Herhangi bir indirgeme gücü olmaksızın  $H_2O_2$ 'yi indirgeyebildiğinden dolayı CAT aktivasyonu bitkilerde enerji açısından verimli bir yoldur. Bununla birlikte, CAT nispeten yüksek  $H_2O_2$  düzeylerinde aktifken;  $H_2O_2$ 'nin daha düşük düzeyleri, askorbat ve glutatyon gibi çeşitli indirgeyicileri kullanan APX ve POX enzimleriyle giderilir (Gechev vd., 2006). Mevcut çalışmada, artan dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamalarının, buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerdeki (400 Gy hariç) CAT aktivitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, CAT enzim aktivitesinin  $\gamma$ -ışınlanması ile arttığı *Nicotiana tabacum* (Wada vd., 1998) ve *T. aestivum* (Hong vd., 2018) bitkilerinde de bildirilmiştir. Bu çalışmada, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının, IR stresinden kaynaklanan CAT aktivitesindeki artışı hem kök ve hem de sürgünde (400 Gy hariç) azalttığı kaydedilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta; CAT enzim aktivitesinin engellendiği 400 Gy'de, her iki Mel uygulamasının da enzim inhibisyonunu kaldırarak CAT aktivitesini arttırmasıdır. Bu durum Mel'in, IR stresinin neden olduğu oksidatif hasarı azaltabilmek için IR dozuna bağımlı olarak CAT aktivitesini düzenlediğini göstermektedir. Farklı stres faktörleriyle yapılan çalışmalarda, Mel'in sinyal iletim mekanizması yoluyla gen ifadesini düzenleyerek enzimlerin üretimini arttırabileceği ya da doğrudan antioksidan özelliğini kullanarak enzim aktivitesini uyarabileceği rapor edilmiştir (Ye vd., 2016; Ke vd., 2018).

Çeşitli izoenzimlere sahip olan POX, oksidatif strese karşı bitkileri korumada rol alan enzimlerden biridir (Büyük vd., 2012). Stres koşullarındaki bitkilerde POX enzimi, GSH'yi bir indirgeme ajanı olarak kullanır ve  $H_2O_2$ 'nin  $H_2O$ 'ya dönüşmesini sağlar (Sofu vd., 2015). Bu çalışmada, artan dozlarda IR uygulamaları, buğday köklerindeki POX aktivitesini azaltırken, sürgünlerde arttırmıştır. Kök kısmında POX aktivitesinin azalması, POX ile aynı substratı kullanan CAT enziminden kaynaklanabilir. Bu duruma uyumlu olarak, Apel ve Hirt (2004) bitkilerde ROT süpürücü enzimlerden birinin dengesinde meydana gelen bir değişimin diğerlerinin çalışmasını etkileyebileceğini (CAT aktivitesinin azalması ile GPX ve APX enzimlerinin yukarı düzenlenmesi gibi) bildirmiştir. Al-Rumaih ve Al-Rumaih (2008), üç farklı *Trigonella L.* türü (*T. stellata*, *T. hamosa* ve *T. anguina*) ile yaptığı çalışmada, tohumlara  $\gamma$ -ışını uygulamalarının (400, 600, 800, 1000 Gy) kök ve sürgün kısımlarındaki CAT aktivitesini azaltırken POX aktivitesini arttırdığını rapor etmiştir. Mevcut çalışmada, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel

uygulamalarının, kök ve sürgünlerdeki POX aktivitesini, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, azalttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar; dışsal Mel uygulamasının (özellikle ön-Mel uygulaması), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> birikimini doğrudan antioksidan özelliği sayesinde ya da diğer mekanizmalar yardımıyla engellemiş olabileceği fikrini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Ni vd. (2018), kadmiyum (Cd) stresi koşullarında yetiştirilen buğday fidelerinde Mel uygulamasının (10 µM) POX aktivitesini Cd uygulaması yapılan gruplara kıyasla azalttığını bildirmiştir.

Askorbat-glutasyon (AsA-GSH) döngüsü; APX, MDHAR, GR ve DHAR enzimleriyle katalizlenen ve AsA, GSH ve NADPH'nin ardışık yükseltgenme ve indirgenmesini içeren bir tepkimeler grubudur. Hallivwel-Asada yolu olarak da adlandırılan AsA-GSH döngüsü kloroplast, mitokondri, sitozol ve peroksizomlarda bulunur ve ROT'ların temizlenmesine yardımcı olur. Bitkiler, AsA'nın DHA'ya ve GSH'nin GSSG'ye oranındaki değişikliklerle oksidatif stresi algılayıp buna göre yanıt verdiklerinden AsA-GSH döngüsü çevresel stresin neden olduğu oksidatif strese karşı bitkiyi savunmada önem taşır (Sharma ve Zheng, 2019).

Askorbat-glutasyon döngüsünün merkezi enzimlerinden biri olan APX, elektron vericisi olarak AsA'yı kullanarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin suya indirgenmesini sağlar (Sofu vd., 2015). Bu tez çalışmasında, artan dozlarda  $\gamma$ -ışınlamasına tabi tutulan buğday tohumlarının yetiştirilmesiyle elde edilen fidelerin köklerindeki APX aktivitesinin düşük dozlarda (100 – 200 Gy) azalarak ve yüksek dozlarda (300 – 400 Gy) ise artarak doza bağımlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, APX aktivitesinin sürgün kısmında artan IR dozları boyunca sürekli arttığı (100 – 400 Gy) kaydedilmiştir. Colak vd. (2015), 10 Gy X-ışını uyguladıkları arpa fidelerinde kök kısmındaki APX aktivitesinin kontrol grubuna kıyasla arttığını bildirmiştir. Bitki hücrelerinde toksik seviyede bulunan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin azaltılmasında, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin enzimatik temizleme mekanizmasını temsil eden APX, CAT ve POX aktivitelerinin dengesi oldukça önemlidir (Apel ve Hirt, 2004). Tablo 3.12 ve 3.14'te de görüldüğü gibi, APX aktivitesi köklerde CAT ile ( $r = 0,912^{**}$ ) ve sürgünlerde ise POX ile ( $r = 0,954^{**}$ ) yüksek ( $P < 0.01$ ) pozitif bir korelasyon göstermiştir. Bu durum yukarıda bahsi geçen enzimlerin, literatür ile (Apel ve Hirt, 2004) uyumlu olarak, IR stresinin neden olduğu oksidatif stresi hafifletmede eşgüdümlü olarak çalıştıklarını göstermektedir. Mevcut çalışma sonuçları ile ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının kök ve sürgünlerdeki APX aktivitesini IR uygulama gruplarına kıyasla azalttıkları ortaya çıkarılmıştır. Li vd. (2017), tuz stresi koşullarındaki karpuz fidelerinde APX aktivitesinin

50  $\mu$ M Mel uygulanan gruplarda azaldığını, 150  $\mu$ M uygulananlarda ise arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca kuraklık, tuzluluk ve soğuk stresi gibi abiyotik stres faktörleriyle yapılan bazı çalışmada, Mel'in APX enziminin gen ifadesini arttırarak enzim aktivitesini arttırdığı bildirilmiştir (Wang vd., 2016; Ye vd., 2016; Ding vd., 2017).

Askorbat-glutasyon döngüsünde işlev gören GR ve MDHAR enzim aktivitelerinin de, APX aktivitesine benzer şekilde, IR uygulamaları ile köklerde 100 Gy'den 200 Gy'e kadar azaldığı, 300 Gy'den 400 Gy'e kadar arttığı; sürgün kısmında ise tüm IR uygulamaları boyunca arttığı belirlenmiştir. İlginç bir şekilde, kök ve sürgünlere ait DHAR enzim aktivitesi artan  $\gamma$ -ışını uygulamaları boyunca azalma göstermiştir. Enzim aktivitelerinde gerçekleşen artma veya azalmaların; uygulanan IR tipine, doz seviyesine, bitki türünün duyarlılığına ve bitki kısmına bağlı olarak değişebileceği bildirilmiştir (Zaka vd., 2002; Wi vd., 2007). Al-Rumaih ve Al-Rumaih (2008), *Trigonella* L. türleri ile ilgili yaptığı çalışmada tohumlara 400, 600, 800 ve 1000 Gy  $\gamma$ -ışını uygulamalarının kök ve sürgünlerdeki GR aktivitesini arttırdığını rapor etmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının etkisi, IR ile muamele edilen grupların kök ve sürgünlerinde genel olarak farklılık göstermiştir. Örnek olarak kök ve sürgünlerde IR stresinden dolayı azalan DHAR aktivitesi, ön-Mel uygulaması ile sürgünlerde artarken, kök kısmında daha da azalmıştır. Genel olarak bakıldığında, IR stresi kök ve sürgünlerin enzimatik antioksidan aktiviteleri üzerinde belirgin değişmelere neden olmuştur ve ekim öncesi veya ekim sonrası Mel uygulamaları bu dalgalanmaları zayıflatarak veya güçlendirerek oksidatif strese tepki vermiştir. Benzer şekilde, abiyotik stres koşullarındaki bitkilere ekzojen olarak uygulanan Mel'in, AsA-GSH döngüsünde yer alan anahtar enzimlerin (APX, DHAR, MDHAR ve GR) ifadelerini düzenleyerek bitki hücrelerindeki oksidatif stresi azalttığı daha önce yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Wang vd., 2013b; Ding vd., 2018; Xia vd., 2020).

Bitkilerde enzimatik olmayan antioksidanların başında sekonder metabolitlerin önemli bir grubu olan fenolik bileşikler gelir. L-fenilalanin amonyum liyaz (PAL) ile fenilalanin aminoasidinden sentezlenen fenolik bileşikler, karboksil (-COOH) ve hidroksil (-OH) grupları sayesinde ROT'ları süpürme potansiyeline sahiptir (Michalak, 2006). Bitki savunmasına, çiftleşmemiş e<sup>-</sup>ları yakalayarak ya da oksidan maddeleri inhibe ederek etki ederler (Turk vd., 2014). Düşük moleküler ağırlıklı antioksidanlar olarak, fenolik bileşiklerin bitkilerdeki içerikleri çevresel stres koşullarına bağlı olarak değişir (Turk vd., 2014; Jiang vd., 2016). Fenolik bileşikler, bitkilerin IR stresine karşı savunmasında da önemli bir rol üstlenir (Lee vd., 2009; El-Beltagi vd., 2011). İyonize radyasyon stresinin

bitkilerde fenolik bileşiklerin birikimine neden olduğu daha önce yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Harrison ve Were, 2007; Štajner vd., 2007; Khatta ve Simpson, 2008; Arena vd., 2014). Mevcut çalışmada, artan dozlarda  $\gamma$ -ışınlamasına maruz bırakılan buğday tohumlarından elde edilen fidelerin kök TFM ve TF içeriklerinin tüm IR uygulamaları boyunca arttığı; sürgünde ise TFM içeriğinin 300 Gy'e kadar arttığı ve 400 Gy'de azaldığı, TF içeriğinin genel olarak azaldığı kaydedilmiştir. Mevcut sonuçlara benzer şekilde,  $\gamma$ -ışınlamasının *Trigonella foenum-graecum* L. bitkisi üzerindeki fizyolojik etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, bitkinin TFM ve TF içeriklerinin düşük IR dozlarında (25, 50, 100 ve 200 Gy) arttığı, ancak yüksek dozda (400 Gy) azaldığı bildirilmiştir (Hanafy ve Akladious, 2018). Bitkilerde IR'nin etkisiyle fenolik bileşik içeriğinde oluşan artışın, polimer yapıdaki fenolik bileşiklerin stres esnasında üretilen ROT'larla glikozidik bağlarının kırılarak monomerlerine ayrılmasından (ör. prosiyanidin heksamerinin prosiyanidin monomerlerine ayrılması) kaynaklanabileceği rapor edilmiştir (Lee vd., 2009). Bunun yanı sıra, toplam fenolik madde içeriğindeki artış, fenolik bileşiklerin sentez enzimlerinden biri olan PAL aktivitesine de bağlanabilir. Nitekim TFM içeriğine benzer şekilde, mevcut çalışmada, PAL aktivitesinin köklerde tüm IR uygulamaları boyunca arttığı, sürgünlerde ise 100 – 300 Gy'e kadar arttığı ve 400 Gy'de azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar,  $\gamma$ -ışınlamalarının PAL aktivitesini arttırdığını ve bunun da kök ve sürgünlerde fenolik madde birikimiyle sonuçlandığını göstermektedir. Öte yandan, yüksek IR seviyesinin (400 Gy) neden olduğu düşük fenolik bileşik içeriğinin, fenolik bileşiklerin yapılarının bozunmasından veya çözünmez hale gelmelerinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Hanafy ve Akladious, 2018).

Ekim öncesi veya ekim sonrası Mel uygulamalarının, IR stresi ile büyüyen buğday fidelerinin kök ve sürgünlerine ait TFM ve TF içeriklerinde önemli değişimlere neden olduğu gözlenmiştir. Ekim öncesi Mel uygulaması TFM ve TF içeriklerini, IR uygulanan fidelere kıyasla, köklerde azaltırken sürgünlerde arttırmıştır. Ekim sonrası Mel uygulaması ise TFM ve TF içeriklerini hem köklerde ve hem de sürgünlerde IR'li kontrollerine kıyasla genel olarak daha da arttırmıştır. Ön-Mel ve ekim sonrası Mel uygulamasının bitkideki TFM ve TF birikimlerine farklı şekilde cevap vermesi, uygulama yönteminden kaynaklanabilir. Örneğin tohumlara ekim öncesi Mel uygulaması, buğday tohumlarını gen düzeyinde etkileyerek ya da doğrudan antioksidan yeteneğini kullanarak düşük fenolik bileşik içeriği ile fidelerin strese karşı direncini arttırmış olabilir. Diğer taraftan ekim sonrası Mel uygulaması, IR'den kaynaklanan oksidatif stresi azaltmak için farklı metabolik

süreçler üzerinde biyostimülatör etki göstererek stres altında çalışan çeşitli bileşiklerin üretimini teşvik etmiş olabilir. Mevcut sonuçlara dair önemli bir diğer nokta, çalışmada kullanılan IR dozlarından 400 Gy'in, sürgünlerde, enzimatik olmayan antioksidan savunmada oldukça önemli olan fenolik bileşiklerin (TFM, TF, fenolik asitler) birikimini ve PAL aktivitesini engelleyecek kadar yüksek bir doz olduğunun tespitidir. Ekim öncesi veya ekim sonrası Mel uygulamalarının 400 Gy'de azalan PAL aktivitesini ve fenolik bileşik içeriğini arttırması, Mel'in bu engeli ortadan kaldırarak bitkinin strese karşı direncini arttırdığını göstermektedir.

Bitkilerde antioksidan kapasite (AK) ile fenolik bileşikler arasında önemli düzeyde bir ilişkinin olduğu daha önce yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Pérez vd., 2007; Colak vd., 2015). Štajner vd. (2007),  $\gamma$ -ışınlamasının soya fasulyesi tohumlarının fenolik içeriğine ve lipid ve protein oksidasyonuna etkisini araştırdıkları bir çalışmada, ışınlama sonrası bitki polifenollerini ile antioksidan kapasite (DPPH, FRAP) değerleri arasında yüksek bir korelasyonun olduğunu bildirmiştir. Mevcut çalışmada, IR stresine maruz bırakılan tohumların yetiştirilmesiyle elde edilen fidelerin kök ve sürgünlerindeki AK (DPPH, FRAP ve CUPRAC) değerlerinin, TFM içeriğine benzer şekilde, değiştiği saptanmıştır. Köklerde DPPH, FRAP ve CUPRAC değerlerinin yalnızca IR uygulamaları yapılan tüm gruplarda arttığı, sürgünlerde 300 Gy'e kadar artış gösterip, 400 Gy'de ise azaldığı kaydedilmiştir. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının köklerde IR muamelesi ile artış gösteren AK içeriklerini genel olarak azalttığı, sürgün kısmında ise daha da arttırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, AK ve TFM içeriğinin buğday fidelerini IR stresine karşı korumada birlikte etkili olduklarını göstermektedir. Şimdiye kadar yapılan birçok çalışmada TFM içeriğiyle AK arasında doğrudan pozitif bir ilişkinin olduğu rapor edilmiştir (Pérez vd., 2007; Colak vd., 2015; Tomaz vd., 2019; Hermosín- Gutiérrez vd., 2020; Kurt-Celebi vd., 2020).

Fenolik asitler (FA), bitkilerde polifenolik yapıya sahip sekonder metabolitlerdir. Nadiren serbest formda bulunan FA'lar genellikle ester, ester bağlı veya glikozit formda bulunurlar (Šamec vd., 2021). Fenolik asitler, yapılarına bağlı olarak hidroksibenzoik asitler (HBA) ve hidroksisinnamik asitler (HSA) olmak üzere iki gruba ayrılır. Başlıca HBA'lar; salisilik (SaA), gallik (GaA), vanilik (VaA), 4-hidroksibenzoik (4-HBA), 3-hidroksibenzoik (3-HBA) ve syringik (SyA) asittir. Bunun yanı sıra başlıca HSA'ları da *p*-kumarik (*p*-KuA), kafeik (KaA), ferulik (FeA), sinapik (SiA) ve klorojenik (KlA) asit oluşturur (Balasundram vd., 2006). Fenolik asitler, diğer fenolik bileşikler gibi, yüksek

antioksidan özellik gösterirler. Yapılarında bulunan hidroksil (–OH) gruplarının sayısı, FA'ların ve türevlerinin antioksidan kapasitesini belirler. Aromatik halkalarına bağlı –OH gruplarının sayısı arttıkça, antioksidan özellikleri de artar (Šamec vd., 2021). Bunun yanı sıra, FA'lar arasında yer alan *p*-HBA, VaA ve SyA'ler lignin biyosentezinin prekürsörleridir. Bu durum FA'ların, çevresel stres faktörlerine tepki olarak bitkilerde ligninleşme işleminde de yer aldıklarını göstermektedir (Michalac, 2006; Šamec vd., 2021). Bitkiler biyotik ve abiyotik stres koşullarında, dokularında ligninleşmeyi arttırarak dışarıya karşı bir bariyer oluşturur. Bu sayede patojen veya ağır metallerin bitki hücrelerine geçişi, lignince zengin dokular tarafından sınırlandırılmış olur (Šamec vd., 2021). Mevcut tez çalışmasında, buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerin serbest, ester, glikozit ve ester-bağlı formdaki FA içeriklerinin IR ve Mel uygulamaları ile farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Kök kısmındaki FA'ların toplamı ( $\Sigma$ ) değerlendirildiğinde, dört formda da (serbest, ester, glikozit ve ester-bağlı)  $\Sigma$ FA içeriklerinin artan IR dozları boyunca kontrole kıyasla genel olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca sürgünlerde IR uygulamaları ile serbest ve glikozit formlarındaki  $\Sigma$ FA içeriklerinin arttığı (400 Gy hariç) ancak ester ve ester-bağlı formların ise azaldığı kaydedilmiştir. Bitkilerde çeşitli stres faktörlerine karşı bir tolerans mekanizması olarak fenolik asit içeriğinin artışı bazı bitki türlerinde de rapor edilmiştir (Martinez vd., 2016; Colak vd., 2019; Linić vd., 2019; Wang vd., 2019b). Mevcut sonuçlarda, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları, dört ayrı formda bulunan  $\Sigma$ FA içeriklerini genellikle düşük dozlarda azaltıp yüksek dozlarda (çoğunlukla 400 Gy) arttırmıştır. Bitkilerde HCA'ların yan zincirlerinden (CH = CH-COOH) dolayı HBA'lara kıyasla daha fazla hidrojen verici ve radikal temizleme özelliğine sahip oldukları ve bu nedenle daha yüksek antioksidan aktivite sergiledikleri rapor edilmiştir (Linić vd., 2019). Bu çalışmada, buğday fidelerine ait kök ve sürgünlerdeki FA'ların çoğunlukla ester ve ester-bağlı formlarda bulunduğu ve bu iki formdaki  $\Sigma$ HSA içeriğinin  $\Sigma$ HBA içeriğine kıyasla çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, Ramabulana vd. (2015), fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) yapraklarına artan dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamalarının bitkideki HSA içeriğini önemli düzeyde arttırdığını rapor etmiştir. Ayrıca, HSA türevlerinin UV-B radyasyondan kaynaklanan oksidatif hasarı azaltmada önemli bir rol oynadığı daha önce yapılan çalışmalarda da kaydedilmiştir (Landry vd., 1995; Hsieh vd., 2005).

Çalışmamızda en yüksek miktarda belirlenen bireysel FA'ların genel olarak VaA, *p*-KuA ve FeA; en düşük miktardakilerin ise SaA, GaA, 3-HBA ve KaA olduğu tespit

edilmiştir. Hidroksisinnamik asit grubunda yer alan FeA'nın, yapısından dolayı, serbest radikal temizleyici olarak hareket ettiği ve antioksidan özelliğe sahip çeşitli enzimlerin aktivitelerini arttırdığı bildirilmiştir (Šamec vd., 2021). Mevcut çalışmada IR uygulamaları ile FeA içeriğinin kök ve sürgünlerde genel olarak arttığı (sürgünlerde ester ve ester-bağlı olanlar hariç); ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının ise bu artışı genel olarak azalttığı (sürgünlerde ester ve ester-bağlı olanlar hariç) belirlenmiştir. Bir bitki hormonu olarak kabul edilen SaA'nın bitki büyüme ve gelişmesindeki rolünün yanı sıra, bitkilerde çeşitli metabolik süreçleri düzenleyerek onları abiyotik stres koşullarına karşı koruduğu rapor edilmiştir (Khan vd., 2015 ; Hernández-Ruiz ve Arnao, 2018). Bu çalışmada, artan dozlarda IR uygulamalarının kök ve sürgünlerde düşük miktarda tespit edilen SaA içeriğini dört formda da genel olarak arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, ön-Mel uygulamasının SaA içeriğini, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, düşük dozlarda azaltıp ve yüksek dozlarda arttırarak etki gösterdiği; ekim sonrası Mel uygulamasının ise bu içeriği genel olarak daha da arttırdığı kaydedilmiştir. Salisilik asidin yanı sıra, bitkilerde önemli bir sinyal molekülü olan GaA'nın, çalışma gruplarına ait buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde diğer FA'lara kıyasla oldukça düşük miktarda bulunduğu ve içeriğinin, tüm formlarda belirlenemese de, IR uygulamaları ile genel olarak artma yönünde bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının GaA içeriğindeki artışı, yalnızca IR uygulanan gruplara kıyasla, genel olarak azaltıcı yönde etki gösterdikleri kaydedilmiştir. Variyar (1998),  $\gamma$ -ışınlamasının (10 kGy) bazı bitki türlerinin FA'ları üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada, radyasyona tabi tutulan karanfil ve Hindistan cevizi bitkilerinde GaA içeriklerinin yaklaşık 2 ila 6 kat arasında arttığını bildirmiştir. Ayrıca aynı çalışmada SyA içeriğinin de IR uygulaması ile bu iki bitki türlerinde önemli düzeyde arttığı ve FA içeriklerinde oluşan bu artışların tanenlerin parçalanmasıyla ilgili olabileceği rapor edilmiştir (Variyar, 1998). Bu çalışmada SyA içeriğinin IR uygulamaları ile köklerde genel olarak arttığı; sürgünlerde serbest ve glikozit formda 300 Gy'e kadar artıp 400 Gy'de azaldığı, ester ve ester-bağlı formda ise azaldığı kaydedilmiştir. Fenolik asit sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; artan  $\gamma$ -ışını IR uygulamalarının buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki FA içeriğini arttırdığı, 400 Gy'in sürgünlerde FA birikimini engellediği ve dıştan uygulanan Mel'in (ön-Mel ve Mel) IR'den kaynaklanan FA değişimlerini artma veya azalma yönünde etkileyerek dengelediği anlaşılmaktadır.

Bitkilerde enzimatik yapıda olmayan önemli antioksidanlardan biri de glutatyon (GSH)'dur. Glutatyon, hücre içerisinde tripeptit ( $\gamma$ -L-glutamik-L-cystein-glisin) olarak sentezlenir ve NADPH'yi kullanarak indirgenir (Zechmann, 2014). Bitkilerde genellikle indirgenmiş formda bulunan GSH, ROT'ları temizleyerek bitki dokularını doğrudan savunma işlevi görür (Linić vd., 2019). Bitki savunmasının yanı sıra hücre genişlemesinden yaşlanmaya ve hücre ölümüne kadar olan süreçleri düzenleyerek bitki büyüme ve gelişmesini etkiler (Sharma vd., 2012). Mevcut çalışmada, GSH ve GSSG (yükseltgenmiş glutatyon) içeriklerinin IR uygulamaları boyunca (100 → 400 Gy) köklerde genel olarak arttığı, sürgünlerde ise 300 Gy'e kadar arttığı ve 400 Gy'de kontrole kıyasla önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) azaldığı tespit edilmiştir. Gama ışını IR uygulamaları ile kök ve sürgünde GSH içeriğinin artması, GSH'nin antioksidan özelliğinden kaynaklanabilir. Nitekim, GSH'nin antioksidan role sahip olduğu ve ROT'ların süpürülmesinde rol aldığı bilinmektedir (Sharma vd., 2012; Khan vd., 2020). Çalışma sonuçlarımıza benzer şekilde, Rezk vd. (2019), bamya (*Hibiscus esculantus* L.) tohumlarına artan dozlarda (0,5, 1, 2,5, 5, 10, 25, 50, 75 ve 100 Gy) X-ışını uygulamasının fidelerdeki GSH içeriğini düşük dozlarda ( $< 5$  Gy) arttırdığını ve yüksek dozlarda ( $> 5$  Gy) ise azalttığını bildirmiştir. El-Beltagi vd. (2011), dört haftalık biberiye (*Rosmarinus officinalis* L.) kallus hücrelerine düşük dozlarda  $\gamma$ -ışını uygulamalarının (5, 10, 15 ve 20 Gy) bitkinin GSH içeriğini önemli düzeyde ( $P < 0,05$ ) arttırdığını rapor etmiştir. Ayrıca aspir bitkisiyle yapılan bir çalışmada, tohumlara  $\gamma$ -ışını uygulamalarının (50, 100 ve 150 Gy) yapraklardaki GSH içeriğinde önemli bir artışa neden olduğu belirlenmiştir (Abdullah, 2019). Bu çalışmada, ön-Mel uygulamasının buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde (400 Gy hariç) IR stresinden kaynaklanan GSH ve GSSG birikimlerini önemli düzeyde azalttığı kaydedilmiştir. Ayrıca ekim sonrası Mel uygulamasının, IR uygulamaları ile artan GSH ve GSSG içerikleri üzerindeki yanıtının daha çok doza bağlı olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Huang vd. (2019) kuraklık stresi koşullarındaki mısır fidelerinde, yaprağa püskürme yoluyla uyguladıkları Mel'in köklerdeki GSH içeriğini etkilemediğini, ancak kökten sulama yoluyla uyguladıkları Mel'in GSH içeriğini arttırdığını bildirmiştir. Bu da, Mel'in bitkilere uygulama yönteminin bitki dokularındaki GSH düzeyini etkileyebileceğini göstermektedir. Buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde GSH ve GSSG içeriklerinin ön-Mel uygulanan grupta daha az olması, bu grupta stres yoğunluğunun azaldığına işaret etmektedir. Bununla birlikte ön-Mel uygulamasının 400 Gy uygulanan fidelerin sürgünlerinde GSH – GSSG içeriklerini artırması, antioksidan savunma sistemini aktive ederek dokulardaki redoks homeostazını



koruyabildiğini ve böylece buğday fidelerinin IR stresine karşı direncini artırdığını göstermektedir.



## 5. SONUÇLAR

1) Çalışmada kullanılan buğday çeşidinde ölçümü yapılan temel morfometrik parametreler 100 ila 400 Gy arasında doz bağımlı olarak azalma göstermiştir. Ancak ekim öncesi ve ekim sonrası yapılan Mel uygulamaları, morfometrik parametreleri IR'li kontrollerine kıyasla doz bağımlı olarak arttırmıştır. Ayrıca her iki Mel uygulama yöntemi karşılaştırıldığında, IR stresinin temel fizyolojik büyüme parametrelerinde oluşturduğu hasarın iyileştirilmesinde ekim öncesi uygulanan Mel'in daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir.

2) İyonize radyasyon uygulaması sürgünlerin  $\Psi_s$ 'ni kademeli olarak azaltırken ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları  $\gamma$ -ışınlaması yapılan IR'li gruplara kıyasla  $\Psi_s$ 'i artırmıştır.

3) Artan dozlarda  $\gamma$ -ışını radyasyon uygulamaları, kök ve sürgünlerdeki prolin içeriğini arttırmıştır. Uyarılan aşırı prolin birikimi, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarında genel olarak azalmıştır.

4) Buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde çözünebilir şeker içeriği IR uygulamaları boyunca doz bağımlı olarak artmıştır. Ancak, ön-Mel uygulaması (köklerde 400 Gy'de hariç) ve ekim sonrası Mel uygulaması (kök ve sürgünlerde 100 Gy'de hariç) IR stresi ile artan bireysel ve toplam şeker içeriklerini azaltmıştır.

5) Kök ve sürgünlerin fruktan içeriği düşük IR dozlarında (100 ve 200 Gy) istatistiksel olarak önemli bir farklılık göstermezken, yüksek IR dozlarında (300 ve 400 Gy) dikkate değer bir şekilde artmıştır. Bununla birlikte, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi de kök ve sürgünlerin yüksek fruktan birikimini azaltmıştır.

6) Buğday bitkisinin yapraklarındaki fotosentetik pigment ( $kl_a$ ,  $kl_b$ ,  $Tkl$  ve  $Tkar$ ) içeriği 100 ve 200 Gy  $\gamma$ -ışını uygulama dozlarında artarken, 300 ve 400 Gy uygulamalarında azalmıştır. Ekim öncesi yapılan Mel uygulaması, IR uygulanan tüm gruplarda fotosentetik pigment içeriğini arttırırken; yetiştirme esnasında yapılan Mel uygulaması daha çok yüksek IR uygulama dozlarında (300 ve 400 Gy) fotosentetik pigment içeriğini artırıcı yönde etki göstermiştir.

7) Yaprakların  $Fv/Fm$  oranı  $\gamma$ -ışınlaması koşullarında doz bağımlı olarak azalmıştır. Genel olarak, ekim öncesi (300 Gy hariç) ve ekim sonrası Mel uygulamaları yaprakların  $Fv/Fm$  oranını IR'li kontrollerine kıyasla arttırmıştır.

**8)** Buğday fidelerinin kök ve sürgünlerindeki bir seri antioksidan enzim aktivitesi enzimin çeşidine, IR uygulama dozunun miktarına ve bitkinin kısmına göre değişiklik göstermiştir. Bununla birlikte ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları, IR'nin neden olduğu oksidatif hasarın iyileştirilmesinde enzim aktivitesi üzerine atırcı veya azaltıcı yönde etki göstermiştir.

**9)** Köklerde toplam fenolik madde içeriği IR uygulamaları boyunca doz bağımlı olarak artmıştır. Sürgünlerde ise bu artış kısmi olarak doz bağımlı (100 – 300 Gy) gerçekleşmiştir. İyonize radyasyon uygulanan kontrolleriyle karşılaştırıldığında, ön-Mel uygulaması TFM içeriğini köklerde azaltmış sürgünlerde ise arttırmıştır. Ekim sonrası Mel uygulamasında ise hem kök ve hem de sürgünlerde TFM içeriği daha da artmıştır.

**10)** Kök ve sürgünlerin PAL aktivitesi artan IR uygulamaları boyunca 400 Gy hariç doz bağımlı olarak artış göstermiştir. Ancak ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları PAL aktivitesini genel olarak azaltmıştır (sürgünlerde 400 Gy hariç).

**11)** Gama ışınlaması IR uygulamaları kök ve sürgün (400 Gy hariç)'lerde antioksidan kapasite (DPPH, FRAP ve CUPRAC) değerlerini arttırırken, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamaları bu değerleri genel olarak IR'li kontrollerine kıyasla köklerde azalıp sürgünlerde daha da artmıştır.

**12)** Köklerde serbest, ester, glikozit ve ester-bağlı fenolik asit içerikleri IR dozuna bağımlı olarak kontrole kıyasla genel olarak artmıştır. Sürgünlerde ise ester ve ester bağımlı fenolik asitlerin içerikleri doz bağımlı olarak azalırken, serbest ve glikozit formda olanların içeriği 400 Gy hariç artmıştır. Ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının bireysel fenolik asit havuzu üzerindeki etkileri, fenolik asit çeşidine ve IR dozuna bağımlı olarak değişmiştir.

**13)** Buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde IR uygulamalarının teşvik ettiği  $H_2O_2$  içeriği, ekim öncesi Mel uygulamasıyla azalırken ekim sonrası Mel uygulamasıyla daha da artmıştır.

**14)** İyonize radyasyon stresiyle artan TBARS içeriği, ekim öncesi Mel uygulamasıyla IR'li kontrollerine kıyasla azalma gösterirken ekim sonrası Mel uygulamasında bu artış daha da uyarılmıştır.

**15)** İyonize radyasyon uygulamaları (400 Gy hariç) kök ve sürgünde artan GSH ve GSSG içeriğini arttırmış, ön-Mel uygulaması ise azaltmıştır. Ekim sonrası Mel uygulamasıyla GSH ve GSSG içeriği sürgün kısmında genel olarak daha da artmış, kök kısmında ise uygulanan doz miktarına bağımlı olarak artma ya da azalma göstermiştir.

**16)** İyonize radyasyon ve Mel uygulaması yapılan buğday fidelerinin köklerine ait KU, SU, TA ve KA değerleri şeker içeriği (fruktan dahil), prolin, CAT, SOD, APX, DHAR, TFM, TF, TBARS, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, PAL ve toplam GSH içerikleri ile çok yüksek ( $P < 0,01$ ) düzeyde korelasyon göstermiştir. Ayrıca sürgünlerden alınan KU, SU, TA, KA ve YA değerleri şeker, prolin, fotosentetik pigment ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği,  $\Psi_s$  ve  $F_v/F_m$  değerleri, POX, SOD, APX, GR ve DHAR aktivite değerleri ile çok yüksek ( $P < 0,01$ ) düzeyde korelasyon göstermiştir.

Genel olarak mevcut sonuçlar değerlendirildiğinde; tohumlara 100 Gy'den 400 Gy'e kadar uygulanan  $\gamma$ -ışını radyasyon uygulamalarının buğday fidelerinin çeşitli fizyolojik süreçlerini olumsuz etkileyerek büyümelerini indirdiği ya da inhibe ettiği buna karşın, başta ekim öncesi Mel uygulaması olmak üzere her iki Mel uygulamasının IR stresinin oluşturduğu oksidatif hasara karşı iyileştirici bir rolünün olduğu açığa çıkarıldı. Bunun yanı sıra, zirai uygulamalar açısından ön-Mel uygulamasının ya da diğer ifade ile priming etkisinin bu tip dost kimyasal ajanlar için daha ucuz ve etkili bir yöntem olduğu bu sonuçlarla ortaya konuldu.

## 6. ÖNERİLER

İyonize radyasyon (IR), insanlar ve hayvanlar kadar, bitkiler için de son derece önemli olan bir çevresel faktördür. İyonize radyasyonun bitkiler üzerindeki etkilerinin bilinmesi, bitkilerde stres fizyolojisi açısından son derece yararlı olup radyobiyojoloji alanındaki gelişmeler için de büyük bir önem taşımaktadır. İyonize radyasyonun bitkileri ne şekilde etkilediğiyle ilgili birçok araştırma yapılmasına rağmen, IR'nin bitkiler üzerinde oluşturduğu olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada artan dozlarda (100, 200, 300 ve 400 Gy)  $\gamma$ -ışını uygulanan buğday tohumlarında, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının fidelerdeki enzimatik olan ve olmayan antioksidan savunma sistemleri üzerine olan etkileri ve fenolik madde havuzundaki değişimler, IR'nin neden olduğu oksidatif hasarla ilişkilendirilerek aydınlatılmaya çalışılmıştır.

Mevcut çalışmada ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının her ikisi ile de IR stresine karşı olumlu sonuçlar elde edilmiş ve ekim öncesi Mel uygulamasının IR stresinin neden olduğu oksidatif hasarın azaltılmasında ya da iyileştirilmesinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Tohumlara ekim öncesi Mel uygulaması nispeten daha etkili, ekonomik ve kolay bir yol olduğundan bitkilerin strese karşı toleransını arttırmada tarımda ürün bitkilerine kolaylıkla uygulanabilir.

İyonize radyasyon stresine karşı ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının buğday fidelerinin enzimatik olan ve olmayan antioksidan savunma bileşenleri üzerindeki uyarıcı etkileri birbirinden farklılık göstermiştir. Bu durum, tohumlara ekim öncesi uygulanan Mel'in, strese duyarlı genlerin ifadesini farklı şekilde düzenlenmesiyle (yukarı/aşağı düzenleme) alakalı olabilir. Bu nedenle, konuyla ilgili moleküler düzeyde araştırmaların yapılması ve antioksidan sistemleri kodlayan transkriptlerin ifadelerinin araştırılması, ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının IR stresine duyarlı gen ifadelerini ne şekilde düzenlediğini açıklamaya yardımcı olacaktır.

Melatonin bitkilerde oksin, etilen, absisik asit ve salisilik asit gibi bazı bitki hormonlarıyla benzer etkilere sahiptir. Bu nedenle ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının diğer bitki hormonları üzerine olan etkisi (crosstalk, cross regülasyon) araştırılabilir ve hormon-antioksidan savunma sistemi ilişkisinde daha ileri çalışmalar yapılabilir.

Bu çalışmada, IR uygulaması yapılan buğday tohumlarında ekim öncesi ve ekim sonrası Mel uygulamalarının etkileri 10 günlük buğday fidelerinde çalışılmıştır. Bu nedenle her iki Mel uygulamasının IR stresi koşullarında buğday bitkisinin tane verimi üzerindeki etkileri araştırılabilir. Ayrıca dıştan Mel uygulamalarının (ekim öncesi ve ekim sonrası uygulamalar) sonraki nesillerde IR stresinin olumsuz etkilerini azaltmada etkili olup olmayacağı da araştırılabilir.

Mevcut sonuçlar, ileride yapılacak olan mutasyon ıslah çalışmalarında buğday için en uygun miktardaki radyasyon dozların seçilmesine katkıda bulunabilir. Ayrıca günümüzde iyonlaştırıcı radyasyonun bitkiler üzerinde oluşturduğu hasarın iyileştirilmesine yönelik çalışmalar oldukça sınırlı olduğundan, bu tez çalışmasından elde edilen veriler, bitkilerde IR stresinin hafifletilmesine yönelik bilgi açığını/eksikliğini kapatmaya yardımcı olabilecek niteliktedir.

Son yıllarda Mel'in farklı abiyotik stres faktörlerinin (kuraklık, tuzluluk ve soğuk gibi) zararlı etkilerinin iyileştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir. Bu tez çalışmasının bitkilere dıştan uygulanan Mel'in iyonlaştırıcı radyasyon stresine karşı cevabının değerlendirilmesine önemli bir katkı sunacağı kanaatindeyiz.

## 7. KAYNAKLAR

- Abdullah, A., K., 2019. Effect of Exogenous Salicylic Acid on the Antioxidant System of Safflower Plant Exposed to Gamma Irradiation, International Conference on Agricultural, Biological and Environmental Sciences, Milan, Italy, 55-60.
- Aebi, H., 1984. Catalase in Vitro, Methods in Enzymology, 105, 121-126.
- Aksoy, Y., 2002. The Role of Glutathione in Antioxidant Mechanism, Türkiye Klinikleri Tıp Bilimleri Dergisi, 22, 4, 442-448.
- Aktaş, E., 2006. Globalisation, Poverty and Genetically Modified Agricultural Product, VII. National Congress of Agricultural Economics, University of Akdeniz, 2, 614-620.
- Aleksakhin, R., M., Sanzharova, N., I. ve Fesenko, S., V., 2006. Radioecology and the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, Atomic Energy, 100, 4, 257-263.
- Ali, H., Ghori, Z., Sheikh, S. ve Gul, A., 2015. Effects of Gamma Radiation on Crop Production. Crop Production and Global Environmental Issues, Springer, Cham. 27-78 s.
- Alikamanoglu, S., Yaycili, O. ve Sen, A., 2011. Effect of Gamma Radiation on Growth Factors, Biochemical Parameters, and Accumulation of Trace Elements in Soybean Plants (*Glycine max* L. Merrill), Biological Trace Element Research, 141, 1-3, 283-293.
- Al-Rumaih, M., M. ve Al-Rumaih, M., M., 2008. Influence of Ionizing Radiation on Antioxidant Enzymes in Three Species of *Trigonella*, American Journal of Environmental Sciences, 4, 2, 151.
- Antoniou, C., Chatzimichail, G., Xenofontos, R., Pavlou, J., J., Panagiotou, E., Christou, A. ve Fotopoulos, V., 2017. Melatonin Systemically Ameliorates Drought Stress-Induced Damage in *Medicago sativa* Plants by Modulating Nitro- Oxidative Homeostasis and Proline Metabolism, Journal of Pineal Research, 62, 4, e12401.
- Apak, R., Guclu, K., Ozyurek, M. ve Karademir, S., E., 2004. Novel Total Antioxidant Capacity Index for Dietary Polyphenols and Vitamins C and E, Using Their Cupric Ion Reducing Capability in the Presence of Neocuproine: CUPRAC Method, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52, 26, 7970-7981.
- Apel, K. ve Hirt, H., 2004. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction, Annual Review of Plant Biology, 55, 373-399.
- Arena, C., De Micco, V. ve De Maio, A., 2014. Growth Alteration and Leaf Biochemical Responses in *Phaseolus vulgaris* Exposed to Different Doses of Ionising Radiation, Plant Biology, 16, 194-202.

- Arnao, M., B. ve Hernández-Ruiz, J., 2006. The Physiological Function of Melatonin in Plants, Plant Signaling & Behavior, 1, 3, 89-95.
- Arnao, M., B., ve Hernández-Ruiz, J., 2019. Melatonin: a New Plant Hormone and/or a Plant Master Regulator?, Trends in Plant Science, 24, 1, 38-48.
- Arnon, D., I., 1949. Copper Enzymes in Isolated Chloroplasts. Polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*, Plant Physiology, 24, 1, 1.
- Arora, A., Byrem, T., M., Nair, M., G. ve Strasburg, G., M., 2000. Modulation of Liposomal Membrane Fluidity by Flavonoids and Isoflavonoids, Archives of Biochemistry and Biophysics, 373, 1, 102-109.
- Aydoğan, S., Şahin, M., Akçacık, A., G., Demir, B., Hamzaoğlu, S. ve Yakışır, E., 2019. Bazı Makarnalık ve Ekmeklik Buğday Çeşitlerinin Kalite Özelliklerinin Araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 22, 264-271.
- Back, K., Tan, D., X. ve Reiter, R., J., 2016. Melatonin Biosynthesis in Plants: Multiple Pathways Catalyze Tryptophan to Melatonin in the Cytoplasm or Chloroplasts, Journal of Pineal Research, 61, 4, 426-437.
- Bai, X., Dai, L., Sun, H., Chen, M. ve Sun, Y., 2019. Effects of Moderate Soil Salinity on Osmotic Adjustment and Energy Strategy in Soybean Under Drought Stress, Plant Physiology and Biochemistry, 139, 307-313.
- Balabusta, M., Szafrńska, K. ve Posmyk, M., M., 2016. Exogenous Melatonin Improves Antioxidant Defense in Cucumber Seeds (*Cucumis sativus* L.) Germinated Under Chilling Stress, Frontiers in Plant Science, 7, 575.
- Balasundram, N., Sundram, K. ve Samman, S., 2006. Phenolic Compounds in Plants and Agri-Industrial By-Products: Antioxidant Activity, Occurrence, and Potential Uses, Food Chemistry, 99, 1, 191-203.
- Bates, L., S., Waldren, R., P. ve Teare, I., D., 1973. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies, Plant and Soil, 39, 1, 205-7.
- Beir, V., 1980. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, DC: National Academy Press, Washington.
- Begović, L., Pospihalj, T., Lončarić, P., Čamagajevac, I., Š., Cesar, V. ve Leljak-Levanić, D., 2020. Distinct Accumulation and Remobilization of Fructans in Barley Cultivars Contrasting for Photosynthetic Performance and Yield, Theoretical and Experimental Plant Physiology, 32, 2, 109-120.
- Benzie, I., F., F. ve Strain, J., J., 1996. Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of Antioxidant Power: The FRAP Assay, Analytical Biochemistry, 239, 1, 70-76.



- Beyaz, R., Kahramanogullari, C., T., Yildiz, C., Darcin, E., S. ve Yildiz, M., 2016. The Effect of Gamma Radiation on Seed Germination and Seedling Growth of *Lathyrus chrysanthus* Boiss. Under in Vitro Conditions, Journal of Environmental Radioactivity, 162, 129-133.
- Blois, M., S., 1958. Antioxidant Determinations by the Use of Stable Free Radical, Nature, 181, 1199–1200.
- Bolouri-Moghaddam, M., R., Le Roy, K., Xiang, L., Rolland, F. ve Van den Ende, W., 2010. Sugar Signalling and Antioxidant Network Connections in Plant Cells, FEBS Journal, 277, 2022–2037.
- Borzouei, A., Kafi, M., Khazaei, H., Naseriyan, B. ve Majdabadi, A., 2010. Effects of Gamma Radiation on Germination and Physiological Aspects of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings, Pakistan Journal of Botany, 42, 4, 2281-2290.
- Bradford, M., M., 1976. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding, Analytical Biochemistry, 72, 248–254.
- Bravo, L., 1998. Polyphenols: Chemistry, Dietary Sources, Metabolism, and Nutritional Significance. Nutrition reviews, 56, 11, 317-333.
- Bray, C., M., 1995. Biochemical Processes During the Osmopriming of Seeds: From Seed Development and Germination, Kigel, J. ve Galili, G., (Eds), Marcel Dekker, New York, 767-789 s.
- Buechter, D., D., 1988. Free Radicals and Oxygen Toxicity, Pharmaceutical Research, 5, 5, 253-260.
- Büyük, İ., Soydam-Aydın, S. ve Aras, S., 2012. Bitkilerin Stres Koşullarına Verdiği Moleküler Cevaplar, Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji, 69, 2, 97-110.
- Byeon, Y., Lee, H., Y., Lee, K. ve Back, K., 2014. Caffeic Acid *O*- Methyltransferase is Involved in the Synthesis of Melatonin by Methylating *N*- Acetylserotonin in *Arabidopsis*, Journal of Pineal Research, 57, 2, 219-227.
- Cakmak, I., 2000. Tansley Review No. 111: Possible Roles of Zinc in Protecting Plant Cells From Damage by Reactive Oxygen Species, New Phytologist, 146, 2, 185-205.
- Colak, N., Zengin, A.,Y. ve Ayaz, F.,A., 2015. The Effect of Anthocyanin-Rich Bilberry Extract on the Antioxidant System in Roots of Barley (*Hordeum vulgare* L.) Cultivars Under Ionizing Radiation, Acta Physiologiae Plantarum, 37, 9, 187.
- Colak, N., Torun, H., Gruz, J., Strnad, M. ve Ayaz, F., A., 2019. Exogenous *N*-Acetylcysteine Alleviates Heavy Metal Stress by Promoting Phenolic Acids to Support Antioxidant Defence Systems in Wheat Roots, Ecotoxicology and Environmental Safety, 181, 49-59.

- Corbineau, F. ve Come, D., 1990. Effects of Priming on the Germination of *Valerianella olitoria* Seeds in Relation with Temperature and Oxygen, Acta Horticulturae, 267, 191-197.
- Caplin, N., M., Halliday, A. ve Willey, N., J., 2020. Developmental, Morphological and Physiological Traits in Plants Exposed for Five Generations to Chronic Low-Level Ionising Radiation, Frontiers in Plant Science, 11, 389.
- Couée, I., Sulmon, C., Gouesbet, G. ve El Amrani, A., 2006. Involvement of Soluble Sugars in Reactive Oxygen Species Balance and Responses to Oxidative Stress in Plants, Journal of Experimental Botany, 57, 449–459.
- Das, K. ve Roychoudhury, A., 2014. Reactive Oxygen Species (ROS) and Response of Antioxidants as ROS-Scavengers During Environmental Stress in Plants, Frontiers in Environmental Science, 2, 53.
- De Micco, V., Arena, C., Pignalosa, D. ve Durante, M., 2011. Effects of Sparsely and Densely Ionizing Radiation on Plants, Radiation and Environmental Biophysics, 50, 1, 1-19.
- De Moura, F., F., Lewis, K., D. ve Falk, M., C., 2009. Applying the FDA Definition of Whole Grains to the Evidence for Cardiovascular Disease Health Claims, The Journal of Nutrition, 139, 11, 2220S-2226S.
- del Pozo, A., Méndez-Espinoza, A., M. ve Yáñez, A., 2019. Fructan Metabolism in Plant Growth and Development and Stress Tolerance: From Osmoprotectant-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants, 319-334, Springer, Cham.
- Dhindsa, R., S. ve Mattowe, W., 1981. Drought Tolerance in Two Mosses: Correlated with Enzymatic Defence Against Lipid Peroxidation, Journal of Experimental Botany, 32, 79–91.
- Diaz, J., Bernal, A., Pomar, F. ve Merino, F., 2001. Induction of Shikimate Dehydrogenase and Peroxidase in Pepper (*Capsicum annuum* L.) Seedlings in Response to Copper Stress and its Relation to Lignification, Plant Science, 161,1, 179-188.
- Ding, F., Liu, B. ve Zhang, S., 2017. Exogenous Melatonin Ameliorates Cold-Induced Damage in Tomato Plants, Scientia Horticulturae, 219, 264-271.
- Ding, F., Wang, G., Wang, M. ve Zhang, S., 2018. Exogenous Melatonin Improves Tolerance to Water Deficit by Promoting Cuticle Formation in Tomato Plants, Molecules, 23, 7, 1605.
- Dubbels, R., Reiter, R., J., Klenke, E., Goebel, A., Schnakenberg, E., Ehlers, C. ve Schloot, W., 1995. Melatonin in Edible Plants Identified by Radioimmunoassay and by High Performance Liquid Chromatography- Mass Spectrometry, Journal of Pineal Research, 18, 1, 28-31.

- El-Beltagi, H., S., Ahmed, O., K. ve El-Desouky, W., 2011. Effect of Low Doses  $\gamma$ -Irradiation on Oxidative Stress and Secondary Metabolites Production of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Callus Culture, Radiation Physics and Chemistry, 80, 9, 968-976.
- El-Beltagi, H., S. ve Mohamed, H., I., 2013. Reactive Oxygen Species, Lipid Peroxidation and Antioxidative Defense Mechanism, Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 41, 1, 44-57.
- Esnault, M. A., Legue, F. ve Chenal, C., 2010. Ionizing Radiation: Advances in Plant Response, Environmental and Experimental Botany, 68, 3, 231-237.
- FAO, 2017. Plant health and food security, Rome, Italy.
- FAO, 2019. The State of Food Security and Nutrition in the World. Safeguarding Against Economic Slowdowns and DownTurns, Rome, Italy.
- FAO, 2021. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/> 8 Nisan 2021
- Fardet, A., 2010. New Hypotheses for the Health-Protective Mechanisms of Whole-Grain Cereals: What is Beyond Fibre?, Nutrition Research Reviews, 23, 1, 65-134.
- Foyer, C., H. ve Halliwell, B., 1976. The Presence of Glutathione and Glutathione Reductase in Chloroplasts: a Proposed Role in Ascorbic Acid Metabolism, Planta, 133, 21-25.
- Gechev, T., S., Van Breusegem, F., Stone, J., M., Denev, I. ve Laloi, C., 2006. Reactive Oxygen Species as Signals That Modulate Plant Stress Responses and Programmed Cell Death, Bioessays, 28, 11, 1091-1101.
- Geraskin, S., A., Dikarev, V., G., Zyablitskaya, Y., Y., Oudalova, A., A., Spirin, Y., V. ve Alexakhin, R., M., 2003. Genetic Consequences of Radioactive Contamination by the Chernobyl Fallout to Agricultural Crops, Journal of Environmental Radioactivity, 66, 1-2, 155-169.
- Geras' kin, S., Churyukin, R. ve Volkova, P., 2017. Radiation Exposure of Barley Seeds can Modify the Early Stages of Plants' Development, Journal of Environmental Radioactivity, 177, 71-83.
- Godfray, H., C., J., Beddington, J., R., Crute, I., R., Haddad, L., Lawrance, D., Muir, J., F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S., M. ve Toulmin, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People, Science, 327, 5967, 812-818.
- Goleniowski, M., Bonfill, M., Cusido, R. ve Palazón, J., 2013. Phenolic Acids, Natural Products, 1951-1973.
- Goodwin, P., N., Quimby, E., H. ve Morgan, R., H., 1970. Physical Foundations of Radiology, New York, Harper & Row.

- Gordon, S., A. ve Weber, R., P., 1955. Studies on the Mechanism of Phytohormone Damage by Ionizing Radiation. I. The Radiosensitivity of Indoleacetic Acid, Plant Physiology, 30, 200–210.
- Griffith, O., W., 1980. Determination of Glutathione and Glutathione Disulfide Using Glutathione Reductase and 2-Vinylpyridine, Analytical Biochemistry, 106, 1, 207-12.
- Gudkov, S., V., Grinberg, M., A., Sukhov, V. ve Vodeneev, V., 2019. Effect of Ionizing Radiation on Physiological and Molecular Processes in Plants, Journal of Environmental Radioactivity, 202, 8-24.
- Güney, D., Bak, Z., D., Aydinoglu, F., Turna, I. ve Ayaz, F., A., 2013. Effect of Geographical Variation on the Sugar Composition of the Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky). Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 37, 221-230.
- Haciosmanoğlu, T., 2017. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynakları, Kişisel Doza Katkıları, Türkiye Nükleer Tıp Derneği/Nükleer tıp Seminerleri, 3, 166-171.
- Halliwell, B., 2006. Reactive Species and Antioxidants. Redox Biology is a Fundamental Theme of Aerobic Life, Plant physiology, 141, 2, 312-322.
- Hanafy, R., S. ve Akladious, S., A., 2018. Physiological and Molecular Studies on the Effect of Gamma Radiation in Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) Plants, Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 16, 2, 683-692.
- Hardeland, R., 2016. Melatonin–Another Phytohormone, Journal of Botanical Sciences, 5, 20-23.
- Harrison, K. ve Were, L., M., 2007. Effect of Gamma Irradiation on Total Phenolic Content Yield and Antioxidant Capacity of Almond Skin Extracts, Food Chemistry, 102, 3, 932-937.
- He, M., van Dam, R. M., Rimm, E., Hu, F., B. ve Qi, L., 2010. Whole Grain, Cereal Fiber, Bran, and Germ Intake and the Risks of All-Cause and CVD-Specific Mortality Among Women with Type 2 Diabetes, Circulation, 121, 20, 2162.
- Heldt, H., W. ve Piechulla, B., 2015. Bitki Biyokimyası, Ayaz, F., A. ve Sökmen, A. (Eds), Dörüncü Baskıdan Çeviri, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 289 s.
- Hermosín- Gutiérrez, I., Gómez- Alonso, S., Pérez- Navarro, J., Kurt, A., Colak, N., Akpınar, E., Hayirlioglu-Ayaz, S. ve Ayaz, F., A., 2020. *Vitis vinifera* Turkish Grape Cultivar Karaerik. Part I: Anthocyanin Composition, and Identification of a Newly Found Anthocyanin, Journal of the Science of Food and Agriculture, 100, 3, 1301-1310.
- Hernández-Ruiz, J. ve Arnao, M., B., 2018. Relationship of Melatonin and Salicylic Acid in Biotic/Abiotic Plant Stress Responses, Agronomy, 8, 4, 33.

- Hirayama, T. ve Shinozaki, K., 2010. Research on Plant Abiotic Stress Responses in the Post- Genome Era: Past, Present and Future, The Plant Journal, 61, 6, 1041-1052.
- Hoagland, D., R. ve Arnon, D., I., 1950. The Water-Culture Method for Growing Plants Without Soil. Circular (2nd edit), California Agricultural Experiment Station, 347.
- Hodžić, E., Balaban, M., Šuškalović, N., Galijašević, S., Hasanagić, D. Ve Kukavica, B., 2019. Antioxidative Response of *Melissa officinalis* L. and *Valeriana officinalis* L. Leaves Exposed to Exogenous Melatonin and Excessive Zinc and Cadmium Levels, Journal of the Serbian Chemical Society, 84, 1, 11-25.
- Hong, M., J., Yoon, Y., H., Kim, D., S., Kim, S., H., Kang, S., Y., Kim, D., Y. ve Kim, J., B., 2018. Phenotypic and Molecular Responses of Wheat (*Triticum aestivum* L.) to Chronic Gamma Irradiation, Journal of Agricultural Science and Technology, 20, 1, 167-178.
- Hossain, M., A. ve Asada, K., 1984. Purification of Dehydroascorbate Reductase from Spinach and its Characterization as a Thiol Enzyme, Plant Cell Physiology, 25, 85-92.
- Hossain, M., A., Nakano, Y. ve Asada, K., 1984. Monodehydroascorbate Reductase in Spinach Chloroplasts and its Participation in Regeneration of Ascorbate for Scavenging Hydrogen Peroxide, Plant Cell Physiology, 25, 385-95.
- Hsieh, C., L., Yen, G., C. ve Chen, H., Y., 2005. Antioxidant Activities of Phenolic Acids on Ultraviolet Radiation-Induced Erythrocyte and Low Density Lipoprotein Oxidation, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53, 15, 6151-6155.
- Huang, D., J., Lin, C., D., Chen, H., J. ve Lin, Y., H., 2004. Antioxidant and Antiproliferative Activities of Sweet Potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam 'Tainong 57'] Constituents, Botanical Bulletin of Academia Sinica, 45, 179-86.
- Huang, B., Chen, Y. E., Zhao, Y., Q., Ding, C., B., Liao, J., Q., Hu, C., Zhou, L., J., Zhang, Z., W., Yuan, S. ve Yuan, M., 2019. Exogenous Melatonin Alleviates Oxidative Damages and Protects Photosystem II in Maize Seedlings Under Drought Stress, Frontiers in Plant Science, 10, 677.
- Ibrahim, E., A., 2016. Seed Priming to Alleviate Salinity Stress in Germinating Seeds, Journal of Plant Physiology, 192, 38-46.
- Ilyas, S. ve Naz, S., 2014. Effect of Gamma Irradiation on Morphological Characteristics and Isolation of Curcuminoids and Oleoresins of *Curcuma longa* L., Journal Animal Plant Science, 24, 5, 1396-1404.
- Jacobs J., D., R., Marquart, L., Slavin, J. ve Kushi, L., H., 1998. Whole- Grain Intake and Cancer: An Expanded Review and Meta- Analysis, Nutrition and Cancer, 30, 2, 85-96.

- Jaspars, E., M., J., 1965. Pigmentation of Tobacco crown gall tissues cultured *in vitro* Dependence of the Composition of the Medium, Physiologia Plantarum, 18, 4, 933-940.
- Jiang, X., Li, H. ve Song, X., 2016. Seed Priming with Melatonin Effects on Seed Germination and Seedling Growth in Maize Under Salinity Stress. Pakistan Journal of Botany, 48, 4, 1345-1352.
- Jisha, K., C., Vijayakumari, K. ve Puthur, J., T., 2013. Seed Priming for Abiotic Stress Tolerance: an Overview, Acta Physiologiae Plantarum, 35, 5, 1381-1396.
- Kaur, H., Mukherjee, S., Baluska, F. Ve Bhatla, S., C., 2015. Regulatory Roles of Serotonin and Melatonin in Abiotic Stress Tolerance in Plants, Plant Signaling & Behavior, 10, 11, e1049788.
- Kaur, G. ve Asthir, B., J., B., P., 2015. Proline: a Key Player in Plant Abiotic Stress Tolerance, Biologia Plantarum, 59, 4, 609-619.
- Kausar, A., Ashraf, M., Y., Ali, I., Niaz, M. ve Abbass, Q., 2012. Evaluation of Sorghum Varieties/Lines for Salt Tolerance Using Physiological Indices as Screening Tool, Pakistan Journal of Botany, 44, 1, 47-52.
- Ke, Q., Ye, J., Wang, B., Ren, J., Yin, L., Deng, X. ve Wang, S., 2018. Melatonin Mitigates Salt Stress in Wheat Seedlings by Modulating Polyamine Metabolism, Frontiers in Plant Science, 9, 914.
- Keunen, E., Peshev, D., Vangronsveld, J., Van Den Ende, W. ve Cuypers, A., 2013. Plant Sugars are Crucial Players in the Oxidative Challenge During Abiotic Stress: Extending the Traditional Concept, Plant, Cell and Environment, 36, 1242- 1255.
- Khan, M., I., R., Fatma, M., Per, T., S., Anjum, N., A. ve Khan, N., A., 2015. Salicylic Acid-Induced Abiotic Stress Tolerance and Underlying Mechanisms in Plants, Frontiers in Plant Science, 6, 462.
- Khan, M., N., Zhang, J., Luo, T., Liu, J., Rizwan, M., Fahad, S., Xu, Z. ve Hu, L. 2019. Seed Priming with Melatonin Coping Drought Stress in Rapeseed by Regulating Reactive Oxygen Species Detoxification: Antioxidant Defense System, Osmotic Adjustment, Stomatal Traits and Chloroplast Ultrastructure Perseveration, Industrial Crops and Products, 140, 111597.
- Khan, A., Numan, M., Khan, A., L., Lee, I., J., Imran, M., Asaf, S. ve Al-Harrasi, A., 2020. Melatonin: Awakening the Defense Mechanisms during Plant Oxidative Stress, Plants, 9, 4, 407.
- Khattak, K., F. ve Simpson, T., J., 2008. Effect of Gamma Irradiation on the Extraction Yield, Total Phenolic Content and Free Radical-Scavenging Activity of *Nigella staiva* Seed, Food Chemistry, 110, 4, 967-972.

- Kim, J., H., Baek, M., H., Chung, B., Y., Wi, S., G. ve Kim, J., S., 2004. Alterations in the Photosynthetic Pigments and Antioxidant Machineries of Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) Seedlings from Gamma-Irradiated Seeds, Journal of Plant Biology, 47, 4, 314-321.
- Kobylińska, A., Borek, S. ve Posmyk, M., M., 2018. Melatonin Redirects Carbohydrates Metabolism During Sugar Starvation in Plant Cells, Journal of Pineal Research, 64, 4, e12466.
- Korkmaz, A., Karaca, A., Kocacinar, F. ve Cuci, Y., 2017. The Effects of Seed Treatment with Melatonin on Germination and Emergence Performance of Pepper Seeds under Chilling Stress, Journal of Agricultural Sciences, 23, 2, 167-176.
- Kovacs, E. ve Keresztes, A., 2002. Effect of Gamma and UV-B/C Radiation on Plant Cells, Micron, 33, 2, 199-210.
- Kumar, M., 2016. Impact of Climate Change on Crop Yield and Role of Model for Achieving Food Security, Environmental Monitoring and Assessment, 188, 8, 1-14.
- Landry, L., G., Chapple, C., C. ve Last, R., L., 1995. *Arabidopsis* Mutants Lacking Phenolic Sunscreens Exhibit Enhanced Ultraviolet-B Injury and Oxidative Damage, Plant Physiology, 109, 4, 1159-1166.
- Lee, J., W., Kim, J., K., Srinivasan, P., Choi, J., I., Kim, J., H., Han, S. B., Kim, D., J. ve Byun, M., W., 2009. Effect of Gamma Irradiation on Microbial Analysis, Antioxidant Activity, Sugar Content and Color of Ready to Use Tamarind Juice During Storage, LWT-Food Science and Technology, 42, 1, 101-105.
- Li, C., Wang, P., Wei, Z., Liang, D., Liu, C., Yin, L., Jia D., Fu, M. ve Ma, F., 2012. The Mitigation Effects of Exogenous Melatonin on Salinity-Induced Stress in *Malus hupehensis*, Journal of Pineal Research, 53, 3, 298-306.
- Li, H., Chang, J., Chen, H., Wang, Z., Gu, X., Wei, C., Zhang, Y., Ma, J., Yang, J. ve Zhang, X., 2017. Exogenous Melatonin Confers Salt Stress Tolerance to Watermelon by Improving Photosynthesis and Redox Homeostasis, Frontiers in Plant Science, 8, 295.
- Li, J., Liu, J., Zhu, T., Zhao, C., Li, L. ve Chen, M., 2019. The Role of Melatonin in Salt Stress Responses, International Journal of Molecular Sciences, 20, 7, 1735.
- Linić, I., Šamec, D., Grúz, J., Vujčić Bok, V., Strnad, M. ve Salopek-Sondi, B., 2019. Involvement of Phenolic Acids in Short-Term Adaptation to Salinity Stress is Species-Specific Among Brassicaceae, Plants, 8, 6, 155.
- Livingston, D., P., Hinch, D., K. ve Heyer, A., G., 2009. Fructan and its Relationship to Abiotic Stress Tolerance in Plants, Cellular and Molecular Life Sciences, 66, 13, 2007-2023.

- Liu, J., Lu, B. ve Xun, A., L., 2000. An Improved Method for the Determination of Hydrogen Peroxide in Leaves, Progress in Biochemistry and Biophysics, 27, 548-51.
- Lobell, D., B., Burke, M., B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M., D., Falcon, W., P. ve Naylor, R., L., 2008. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030, Science, 319, 5863, 607-610.
- Loskutov, I., G. ve Khlestkina, E., K., 2021. Wheat, Barley, and Oat Breeding for Health Benefit Components in Grain, Plants, 10, 1, 86.
- Madhava-Rao K., V. ve Sresty, T., V., S., 2000. Antioxidative Parameters in the Seedlings of Pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) in Response to Zn and Ni Stresses, Plant Science, 157, 113-128.
- Mahmood, T., Abdullah, M., Ahmar, S., Yasir, M., Iqbal, M., S., Yasir, M., Rehman, S., U., Ahmed, S., Rana, R., M., Ghafoor, A., Slah, M., K., N., Du, X. ve Mora-Poblete, F., 2020. Incredible Role of Osmotic Adjustment in Grain Yield Sustainability under Water Scarcity Conditions in Wheat (*Triticum aestivum* L.), Plants, 9, 9, 1208.
- Mahdavian, K., Kalantari, K., M., Ghorbanli, M. ve Torkzade, M., 2008. The Effects of Salicylic Acid on Pigment Contents in Ultraviolet Radiation Stressed Pepper Plants, Biologia Plantarum, 52, 1, 170-172.
- Marjeed, A., Muhammad, Z., Ullah, R. ve Ali, H., 2018. Gamma Irradiation i: Effect on Germination and General Growth Characteristics of Plants—a Review, Pakistan Journal of Botany, 50, 6, 2449-2453.
- Maity, J., P., Mishra, D., Chakraborty, A., Saha, A., Santra, S., C. ve Chanda, S., 2005. Modulation of Some Quantitative and Qualitative Characteristics in Rice (*Oryza sativa* L.) and Mung (*Phaseolus mungo* L.) by Ionizing Radiation, Radiation Physics and Chemistry, 74, 5, 391-394.
- Manda, K., Ueno, M. ve Anzai, K., 2007. AFMK, a Melatonin Metabolite, Attenuates X-Ray- Induced Oxidative Damage to DNA, Proteins and Lipids in Mice, Journal of Pineal Research, 42, 4, 386-393.
- Mandal, S., M., Chakraborty, D. ve Dey, S., 2010. Phenolic Acids Act as Signaling Molecules in Plant-Microbe Symbioses, Plant Signaling & Behavior, 5, 4, 359-368.
- Marček, T., Hamow, K., Á., Véghe, B., Janda, T. ve Darko, E., 2019. Metabolic Response to Drought in Six Winter Wheat Genotypes, PloS One, 14, 2, e0212411.
- Marcu, D., Damian, G., Cosma, C. ve Cristea, V., 2013. Gamma Radiation Effects on Seed Germination, Growth and Pigment Content, and ESR Study of Induced Free Radicals in Maize (*Zea mays*), Journal of Biological Physics, 39, 4, 625-634.



- Martinez, V., Mestre, T., C., Rubio, F., Girones-Vilaplana, A., Moreno, D., A., Mittler, R. ve Rivero, R., M., 2016. Accumulation of Flavonols Over Hydroxycinnamic Acids Favors Oxidative Damage Protection Under Abiotic Stress, Frontiers in Plant Science, 7, 838.
- Martinez, V., Nieves-Cordones, M., Lopez-Delacalle, M., Rodenas, R., Mestre, T., C., Garcia-Sanchez, F., Rubio, F., Nortes, P., A., Mittler, R. ve Rivero, R., M., 2018. Tolerance to Stress Combination in Tomato Plants: New Insights in the Protective Role of Melatonin, Molecules, 23, 3, 535.
- Maswada, H., F., Djanaguiraman, M. ve Prasad, P., V., V., 2018. Response of Photosynthetic Performance, Water Relations and Osmotic Adjustment to Salinity Acclimation in Two Wheat Cultivars, Acta Physiologiae Plantarum, 40, 6, 105.
- Mauseth, 2012. Botaniğe giriş, Özen, H., Ç. ve Biricik, M. (Eds), Dördüncü Baskıdan Çeviri, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 535 s.
- McKevith, B., 2004. Nutritional Aspects of Cereals, British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin, 29, 111–142.
- McKeown, N., M., Jacques, P., F., Seal, C., J., de Vries, J., Jonnalagadda, S., S., Clemens, R., Webb, D., Murphy, L., A., Klinken, J., W., Topping, D., Murray, R., Degeneffe, D. ve Marquart, L., F., 2013. Whole Grains and Health: From theory to Practice—Highlights of the Grains for Health Foundation's Whole Grains Summit 2012, The Journal of Nutrition, 143, 5, 744S-758S.
- Melki, M. ve Marouani, A., 2010. Effects of Gamma Rays Irradiation on Seed Germination and Growth of Hard Wheat, Environmental Chemistry Letters, 8, 4, 307-310.
- Michalak, A., 2006. Phenolic Compounds and Their Antioxidant Activity in Plants Growing Under Heavy Metal Stress, Polish Journal of Environmental Studies, 15, 4, 523-530.
- Mika, A. ve Lüthje, S., 2003. Properties of Guaiacol Peroxidase Activities Isolated From Corn Root Plasma Membranes, Plant Physiology, 132, 3, 1489-1498.
- Mittler, R., 2002. Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance, Trends in Plant Science, 7, 9, 405-410.
- Mousseau, T. A. ve Møller, A. P., 2020. Plants in the Light of Ionizing Radiation: What Have We Learned From Chernobyl, Fukushima, and Other “Hot” Places?, Frontiers in Plant Science, 11, 552.
- Nakano, Y. ve Asada, K., 1981. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate Specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts, Plant Cell Physiology, 22, 867–880.
- Nawaz, M., A., Huang, Y., Bie, Z., Ahmed, W., Reiter, R. J., Niu, M. ve Hameed, S. 2016. Melatonin: Current Status and Future Perspectives in Plant Science, Frontiers in plant science, 6, 1230.

- Ni, J., Wang, Q., Shah, F., A., Liu, W., Wang, D., Huang, S., Fu, L. ve Wu, L., 2018. Exogenous Melatonin Confers Cadmium Tolerance by Counterbalancing the Hydrogen Peroxide Homeostasis in Wheat Seedlings, Molecules, 23, 4, 799.
- Nowicka, B., Ciura, J., Szymańska, R. ve Kruk, J., 2018. Improving Photosynthesis, Plant Productivity and Abiotic Stress Tolerance—Current Trends and Future Perspectives, Journal of Plant Physiology, 231, 415-433.
- Okazaki, M., Higuchi, K., Hanawa, Y., Shiraiwa, Y. ve Ezura, H., 2009. Cloning and Characterization of a *Chlamydomonas reinhardtii* cDNA Arylalkylamine N-Acetyltransferase and its Use in the Genetic Engineering of Melatonin Content in the Micro- Tomato, Journal of Pineal Research, 46, 4, 373-382.
- Özdemir, F., Bor, M., Demiral, T. ve Türkan, İ., 2004. Effects of 24-Epibrassinolide on Seed Germination, Seedling Growth, Lipid Peroxidation, Proline Content and Antioxidative System of Rice (*Oryza sativa* L.) Under Salinity Stress, Plant Growth Regulation, 42, 3, 203-211.
- Pérez, M., B., Calderon, N., L. ve Croci, C., A., 2007. Radiation-Induced Enhancement of Antioxidant Activity in Extracts of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.), Food Chemistry, 104, 2, 585-592.
- Posmyk, M., M., Kuran, H., Marciniak, K. ve Janas, K., M., 2008. Presowing Seed Treatment with Melatonin Protects Red Cabbage Seedlings Against Toxic Copper Ion Concentrations, Journal of Pineal Research, 45, 1, 24-31.
- Ramabulana, T., Mavunda, R., D., Steenkamp, P., A., Piater, L., A., Dubery, I., A. ve Madala, N., E., 2015. Secondary Metabolite Perturbations in *Phaseolus vulgaris* Leaves due to Gamma Radiation, Plant Physiology and Biochemistry, 97, 287-295.
- Raj, A., B. ve Raj, S., K., 2019. Seed Priming: An Approach Towards Agricultural Sustainability, Journal of Applied and Natural Science, 11, 1, 227-234.
- Real, A., Bergman, S., S., Knowles, J., S., Woodhead, D., S. ve Zinger, I., 2004. Effects of Ionising Radiation Exposure on Plants, Fish, and Mammals: Relevant Data for Environmental Radiation Protection, Journal of Radiological Protection, 24, A123-A137.
- Rebello, C., J., Greenway, F., L. ve Finley, J., W., 2014. Whole Grains and Pulses: a Comparison of the Nutritional and Health Benefits, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 62, 29, 7029-7049.
- Rezk, A., A., Al-Khayri, J., M., Al-Bahrany, A., M., El-Beltagi, H., S. ve Mohamed, H., I., 2019. X-Ray Irradiation Changes Germination and Biochemical Analysis of Two Genotypes of Okra (*Hibiscus esculentus* L.), Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 12, 1, 393-402.

- Rice-Evans, C., A., Miller, N., J. ve Paganga, G., 1996. Structure-Antioxidant Activity Relationships of Flavonoids and Phenolic Acids, Free Radical Biology and Medicine, 20, 7, 933-956.
- Robbins, R., J., 2003. Phenolic Acids in Foods: an Overview of Analytical Methodology, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51, 10, 2866-2887.
- Rodriguez-Saona, L., E. ve Wrolstad, R., E., 2001. Extraction, Isolation and Purification of Anthocyanins: From Current Protocols in Food Analytical Chemistry, Wrolstad R., E., (Ed), Wiley, New York, 1–11 s.
- Roitsch, T., 1999. Source-Sink Regulation by Sugar and Stress, Current Opinion in Plant Biology, 2, 3, 198-206.
- Rosa, M., Prado, C., Podazza, G., Interdonato, R., González, J., A., Hilal, M. ve Prado, F., E., 2009. Soluble Sugars: Metabolism, Sensing and Abiotic Stress: A Complex Network in the Life of Plants, Plant Signaling & Behavior, 4, 5, 388-393.
- Šamec, D., Karalija, E., Šola, I., Vujčić Bok, V. ve Salopek-Sondi, B., 2021. The Role of Polyphenols in Abiotic Stress Response: The Influence of Molecular Structure, Plants, 10, 1, 118.
- Salehi, B., Sharopov, F., Fokou, P., V., T., Kobylinska, A., Jonge, L., D., Tadio, K., Sharifi-Rad, J., Posmyk, M., M., Martorell, M., Martins, N. ve Iriti, M., 2019. Melatonin in Medicinal and Food Plants: Occurrence, Bioavailability, and Health Potential for Humans, Cells, 8, 7, 681.
- Salerno, G., L. ve Curatti, L., 2003. Origin of Sucrose Metabolism in Higher Plants: When, How and Why?, Trends in Plant Science, 8, 2, 63-69.
- Schmidhuber, J. ve Tubiello, F., N., 2007. Global Food Security Under Climate Change, Proceedings of the National Academy of Sciences, 104, 50, 19703–19708.
- Sengupta, M., Chakraborty, A. ve Raychaudhuri, S., S., 2013. Ionizing Radiation Induced Changes in Phenotype, Photosynthetic Pigments and Free Polyamine Levels in *Vigna radiata* (L.) Wilczek, Applied Radiation and Isotopes, 75, 44-49.
- Sharma, P., Jha, A., B., Dubey, R., S. ve Pessarakli, M., 2012. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants Under Stressful Conditions. Journal of Botany, 2012, 1-26.
- Sharma, A. ve Zheng, B., 2019. Melatonin Mediated Regulation of Drought Stress: Physiological and Molecular Aspects. Plants, 8, 7, 190.
- Shewry, P., R., 2009. Wheat, Journal of Experimental Botany, 60, 6, 1537-1553.
- Shi, H., Chen, K., Wei, Y. ve He, C., 2016. Fundamental Issues of Melatonin-Mediated Stress Signaling in Plants, Frontiers in Plant Science, 7, 1124.

- Siddiqui, M., H., Alamri, S., Al-Khaishany, M., Y., Khan, M., N., Al-Amri, A., Ali, H., M., Alaraidh, I., A. ve Alsahli, A., A., 2019. Exogenous Melatonin Counteracts NaCl-Induced Damage by Regulating the Antioxidant System, Proline and Carbohydrates Metabolism in Tomato Seedlings, International Journal of Molecular Sciences, 20, 2, 353.
- Singh, B., Ahuja, S., Singhal, R., K. ve Babu, P., V., 2013. Effect of Gamma Radiation on Wheat Plant Growth due to Impact on Gas Exchange Characteristics and Mineral Nutrient Uptake and Utilization, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 298, 1, 249-257.
- Slavin, J., 2004. Whole grains and human health, Nutrition Research Reviews, 17, 1, 99-110.
- Slinkard, K. ve Singleton, V., L., 1977. Total Phenol Analyses: Automation and Comparison with Manual Methods, American Journal of Enology and Viticulture, 28, 49-55.
- Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M. ve Vitti, A., 2015. Ascorbate Peroxidase and Catalase Activities and Their Genetic Regulation in Plants Subjected to Drought and Salinity Stresses, International Journal of Molecular Sciences, 16, 6, 13561-13578.
- Štajner, D., Milošević, M. ve Popović, B., M., 2007. Irradiation Effects on Phenolic Content, Lipid and Protein Oxidation and Scavenger Ability of Soybean Seeds, International Journal of Molecular Sciences, 8, 7, 618-627.
- Sun, L., Li, X., Wang, Z., Sun, Z., Zhu, X., Liu, S., Song, F., Liu, F. ve Wang, Y., 2018. Cold Priming Induced Tolerance to Subsequent Low Temperature Stress is Enhanced by Melatonin Application During Recovery in Wheat, Molecules, 23, 5, 1091.
- Szafrańska, K., Reiter, R., J. ve Posmyk, M., M., 2016. Melatonin Application to *Pisum sativum* L. Seeds Positively Influences the Function of the Photosynthetic Apparatus in Growing Seedlings During Paraquat-Induced Oxidative Stress, Frontiers in Plant Science, 7, 1663, 1-12.
- TAEK, <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html> 21 Aralık 2020
- Tan, D., X., Manchester, L., C., Reiter, R., J., Qi, W., B., Karbownik, M. ve Calvo, J., R., 2000. Significance of Melatonin in Antioxidative Defense System: Reactions and Products, Neurosignals, 9, 3-4, 137-159.
- Tan, D., X., Manchester, L., C., Di Mascio, P., Martinez, G., R., Prado, F., M. ve Reiter, R., J., 2007. Novel Rhythms of N1-acetyl-N2-formyl-5-methoxykynuramine and its Precursor Melatonin in Water Hyacinth: Importance for Phytoremediation, The FASEB Journal, 21, 8, 1724-1729.

- Tan, D., X., Manchester, L., C., Esteban-Zubero, E., Zhou, Z. ve Reiter, R., J., 2015. Melatonin as a Potent and Inducible Endogenous Antioxidant: Synthesis and Metabolism, Molecules, 20, 10, 18886-18906.
- Tarım ve Orman Bakanlığı 2019, Ürün Masaları Buğday Bülteni, Aralık 2019. <https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/Belgeler/M%C4%B0LL%C4%B0%20TARIM/BU%C4%9EDAY%20ARALIK%20B%C3%9CLTEN%C4%B0.pdf>
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O., A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Zhang, L., Wu, X., Chen, W., Song, D., Huang, D., Xue, T. ve Zhang, A., 2018. Phosphorous Fertilization Alleviates Drought Effects on *Alnus cremastogyne* by Regulating its Antioxidant and Osmotic Potential, Scientific Reports, 8, 1, 1-11.
- Taiz, L. ve Zeiger, E., 2008. Bitki Fizyolojisi, Türkan, İ. (Ed), Üçüncü Baskıdan Çeviri, Palme Yayıncılık, Ankara, 591 s.
- Tomaz, I., Huzanić, N., Preiner, D., Stupić, D., Andabaka, Ž., Maletić, E., Kontić, J., K. ve Ašperger, D., 2019. Extraction Methods of Polyphenol from Grapes: Extractions of Grape Polyphenols. Polyphenols in Plants, Academic Press, 151-167 s.
- Türk, H., Erdal, S., Genisel, M., Atici, O., Demir, Y. ve Yanmis, D., 2014. The Regulatory Effect of Melatonin on Physiological, Biochemical and Molecular Parameters in Cold-Stressed Wheat Seedlings, Plant Growth Regulation, 74, 2, 139-152.
- TÜİK, 2019. Tarım İstatistikleri Özeti.
- Underhill, P., T., 1995. Naturally-Occurring Radioactive Materials: Principles and Practices, St. Lucie Press, Florida, 55-57 s.
- URL-1, <https://muhendistan.com/elektromanyetik-radyasyon-nedir/> 15 Ocak 2021
- Valluru, R., Lammens, W., Claupein, W. ve Van den Ende, W., 2008. Freezing Tolerance by Vesicle-Mediated Fructan Transport, Trends in Plant Science, 13, 8, 409-414.
- Van Breusegem, F. ve Dat, J., F., 2006. Reactive Oxygen Species in Plant Cell Death, Plant physiology, 14, 2, 384-390.
- Vanhoudt, N., Vandenhove, H., Horemans, N., Wannijn, J., Van Hees, M., Vangronsveld, J. ve Cuypers, A., 2010. The Combined Effect of Uranium and Gamma Radiation on Biological Responses and Oxidative Stress Induced in *Arabidopsis thaliana*, Journal of Environmental Radioactivity, 101, 11, 923-930.
- Variyar, P., S., 1998. Effect of Gamma- Irradiation on the Phenolic Acids of Some Indian Spices, International Journal of Food Science & Technology, 33, 6, 533-537.
- Vermeulen, S., J., Aggarwal, P., K., Ainslie, A., Angelone, C., Campbell, B., M., Challinor, A. J., Hansen, J., W., Ingram, J., S., I., Kristjanson, P., Lau, C., Nelson, G., C., Thornton, P., K. ve Wollenberg, E., 2012. Options for Support to

- Agriculture and Food Security under Climate Change. Environmental Science & Policy, 15, 1, 136-144.
- Wada, H., Koshiba, T., Matsui, T. ve Satô, M., 1998. Involvement of Peroxidase in Differential Sensitivity to  $\gamma$ -Radiation in Seedlings of Two *Nicotiana* Species, Plant Science, 132, 2, 109-119.
- Wang, J., Zheng, L., Wu, J. ve Tan, R., 2006. Involvement of Nitric Oxide in Oxidative Burst, Phenylalanine Ammonia-Lyase Activation and Taxol Production Induced by Low-Energy Ultrasound in *Taxus yunnanensis* Cell Suspension Cultures, Nitric Oxide-Biology and Chemistry, 15, 351-8.
- Wang, P., Sun, X., Chang, C., Feng, F., Liang, D., Cheng, L. ve Ma, F., 2013a. Delay in Leaf Senescence of *Malus hupehensis* by Long- Term Melatonin Application is Associated with its Regulation of Metabolic Status and Protein Degradation, Journal of Pineal Research, 55, 4, 424-434.
- Wang, P., Sun, X., Li, C., Wei, Z., Liang, D. ve Ma, F., 2013b. Long- Term Exogenous Application of Melatonin Delays Drought- Induced Leaf Senescence in Apple, Journal of Pineal Research, 54, 3, 292-302.
- Wang, L., Y., Liu, J., L., Wang, W., X. ve Sun, Y., 2016. Exogenous Melatonin Improves Growth and Photosynthetic Capacity of Cucumber under Salinity-Induced Stress, Photosynthetica, 54, 1, 19-27.
- Wang, M., Duan, S., Zhou, Z., Chen, S. ve Wang, D., 2019a. Foliar Spraying of Melatonin Confers Cadmium Tolerance in *Nicotiana tabacum* L., Ecotoxicology and Environmental Safety, 170, 68-76.
- Wang, L., Shan, T., Xie, B., Ling, C., Shao, S., Jin, P. ve Zheng, Y., 2019b. Glycine Betaine Reduces Chilling Injury in Peach Fruit by Enhancing Phenolic and Sugar Metabolisms, Food Chemistry, 272, 530-538.
- Ward, J., F., 1988. DNA Damage Produced by Ionizing Radiation in Mammalian Cells: Identities, Mechanisms of Formation, and Reparability. Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology, 35, 95-125, Academic Press.
- Wei, W., Li, Q., T., Chu, Y., N., Reiter, R., J., Yu, X., M., Zhu, D., H., Zhang, W., K., Ma, B., Lin, Q., Zhang, J., S. ve Chen, S., Y., 2015. Melatonin Enhances Plant Growth and Abiotic Stress Tolerance in Soybean Plants, Journal of Experimental Botany, 66, 3, 695-707.
- Wi, S., G., Chung, B., Y., Kim, J., S., Kim, J., H., Baek, M., H., Lee, J., W. ve Kim, Y., S., 2007. Effects of Gamma Irradiation on Morphological Changes and Biological Responses in Plants, Micron, 38, 6, 553-564.
- Xia, H., Ni, Z., Hu, R., Lin, L., Deng, H., Wang, J., Tang, Y., Sun, G., Wang, X., Li, H., Liao, M., Liv, X. ve Liang, D., 2020. Melatonin Alleviates Drought Stress by a

- Non-Enzymatic and Enzymatic Antioxidative System in Kiwifruit Seedlings, International Journal of Molecular Sciences, 21, 3, 852.
- Ye, J., Wang, S., Deng, X., Yin, L., Xiong, B. ve Wang, X., 2016. Melatonin Increased Maize (*Zea mays* L.) Seedling Drought Tolerance by Alleviating Drought-Induced Photosynthetic Inhibition and Oxidative Damage, Acta Physiologiae Plantarum, 38, 2, 48.
- Yordanov, I., Velikova, V. ve Tsonev, T., 2000. Plant Responses to Drought, Acclimation, and Stress Tolerance, Photosynthetica, 38, 2, 171-186.
- Yuanyuan, M., Yali, Z., Jiang, L. ve Hongbo, S., 2009. Roles of Plant Soluble Sugars and Their Responses to Plant Cold Stress, African Journal of Biotechnology, 8, 10, 2004-2010.
- Yuksel, F., Koyuncu, M. ve Abdulhavit, S., 2011. Makarnalık Buğday (*Triticum durum*) Kalitesi, Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 4, 2, 25-31.
- Zaka, R., Vandecasteele, C., M. ve Misset, M., T., 2002. Effects of Low Chronic Doses of Ionizing Radiation on Antioxidant Enzymes and G6PDH Activities in *Stipa capillata* (Poaceae), Journal of Experimental Botany, 53, 376, 1979-1987.
- Zechmann, B., 2014. Compartment-Specific Importance of Glutathione During Abiotic and Biotic Stress, Frontiers in Plant Science, 5, 566.
- Zhang, N., Zhao, B., Zhang, H., J., Weeda, S., Yang, C., Yang, Z., C., Ren S. ve Guo, Y., D., 2013. Melatonin Promotes Water-Stress Tolerance, Lateral Root Formation, and Seed Germination in Cucumber (*Cucumis sativus* L.), Journal of Pineal Research, 54, 1, 15-23.
- Zhang, N., Sun, Q., Zhang, H., Cao, Y., Weeda, S., Ren, S. ve Guo, Y., D., 2015. Roles of Melatonin in Abiotic Stress Resistance in Plants, Journal of Experimental Botany, 66, 3, 647-656.
- Zhang, N., Sun, Q., Li, H., Li, X., Cao, Y., Zhang, H., Li, S., Zhang, L., Qi, Y., Ren, S., Zhao, B. ve Guo, Y., D., 2016. Melatonin Improved Anthocyanin Accumulation by Regulating Gene Expressions and Resulted in High Reactive Oxygen Species Scavenging Capacity in Cabbage, Frontiers in Plant Science, 7, 197.
- Zhang, S., Zheng, X., Reiter, R., J., Feng, S., Wang, Y., Liu, S., Jin, L., Li, Z., Dalta, R. ve Ren, M., 2017a. Melatonin Attenuates Potato Late Blight by Disrupting Cell Growth, Stress Tolerance, Fungicide Susceptibility and Homeostasis of Gene Expression in *Phytophthora infestans*, Frontiers in Plant Science, 8, 1993.
- Zhang, Y., P., Yang, S., J. ve Chen, Y., Y., 2017b. Effects of Melatonin on Photosynthetic Performance and Antioxidants in Melon During Cold and Recovery, Biologia Plantarum, 61, 3, 571-578.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Taşkiran Mustafa Özer İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Çaykara Çok Programlı Lisesi'nde tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ), Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü'nden birincilikle mezun oldu. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı Bitki Fizyolojisi ve Biyokimyası alanında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimini tamamlayarak aynı alanda doktora eğitimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

