

Radyasyonlu Ortamlarda Çalışan İnsanlarda İyonize ve Non-İyonize Radyasyonun Oksidatif Stres ve Antioksidan Seviye Üzerindeki Etkileri

Effects of Ionizing and Non-Ionizing Radiation on Oxidative Stress and the Total Antioxidant Status in Humans Working in Radiation Environments

Hakim ÇELİK¹, İsmail KOYUNCU², Ali Ziya KARAKILÇIK¹, Ataman GÖNEL³, Davud MUSA⁴

¹Department of Physiology, Harran University School of Medicine, Şanlıurfa, Turkey

²Department of Medical Biochemistry, Harran University School of Medicine, Şanlıurfa, Turkey

³Clinic of Medical Biochemistry, Akçakale State Hospital, Şanlıurfa, Turkey

⁴Division of Biology, School of Social Sciences and Humanities, Şanlıurfa, Turkey

ÖZ

Amaç: Bu araştırma radyasyonlu ortamlarda çalışan erkeklerde iyonize (İR) ve non-iyonize (NİR) radyasyonun total antioksidan seviye ve oksidatif stres üzerindeki etkilerini araştırmak amacı ile yapıldı.

Yöntemler: Kontrol ve Radyasyona maruz kalan erkeklerin serumlarında total oksidan seviye (TOS), malondialdehit (MDA) ve protein karbonil (PC) değerleri ölçüldü. Ayrıca total antioksidan seviye (TAS) ve oksidatif stres değerleri belirlendi; oksidatif stresi belirlemek için oksidatif stres indeksi (OSİ) hesaplandı. Veriler istatistiksel SPSS 20,0 (Chicago, ABD) programı ile analiz edildi.

Bulgular: İyonize grubunda serum PC, MDA, TOS ve OSİ düzeyleri kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde yüksek bulunurken TAS düzeyleri düşük bulundu (sırasıyla; $p<0,001$, $p=0,003$, $p<0,001$, $p<0,001$ ve $p=0,002$). NİR grubunda ise serum PC, TOS ve OSİ düzeyleri kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde yüksek bulunurken TAS ve MDA düzeyleri arasında anlamlı bir fark bulunamadı (sırasıyla; $p<0,001$, $p=0,021$, $p=0,010$, $p>0,05$ ve $p>0,05$).

Sonuç: Bu verilere göre, İR'de daha fazla olmak üzere İR ve NİR gruplarında oksidan/antioksidan dengenin oksidanlar lehine bozulduğu görüldü. Bu oksidatif stres etkisi ile DNA, lipitler ve proteinler gibi birçok hücrel makromolekülde hasar oluşabilir.

Anahtar Kelimeler: İyonize radyasyon, non-iyonize radyasyon, total oksidan seviye, malondialdehit, protein karbonil, total antioksidan seviye, oksidatif stres indeksi

ABSTRACT

Objective: This study was conducted to investigate the effects of ionizing radiation (IR) and non-ionizing radiation (NIR) on oxidative stress and the total antioxidant status (TAS) in men working in radiation environments.

Methods: The serum values of total oxidant status (TOS), malondialdehyde (MDA), and protein carbonyl (PC) in men exposed to radiation and a control group were determined. In addition, the values of the total antioxidant status (TAS) were measured in serum, and the oxidative stress index (OSI) was calculated to determine the oxidative stress. Data were analyzed by SPSS 20.0 (Chicago, IL, USA).

Results: While the serum values of PC, MDA, TOS, and OSI were significantly higher in the IR group than in the control group, those of TAS were significantly lower ($p<0.001$, $p=0.003$, $p<0.001$, $p<0.001$, and $p=0.002$, respectively). The serum values of PC, TOS, and OSI were significantly higher in the NIR group than in the control group ($p<0.001$, $p=0.021$, and $p=0.010$, respectively). In contrast, there were no significant differences in the values of TAS and MDA ($p>0.05$ and $p>0.05$, respectively) in the same groups.

Conclusion: Based on these results, we determined that it had been damaged the balance between oxidants and antioxidant status in the IR and NIR groups. This effect of oxidative stress may cause a lot of damage to cellular macromolecules including lipids, proteins, and DNA.

Keywords: Ionizing radiation, non-ionizing radiation, total oxidant status, malondialdehyde, protein carbonyl, total antioxidant status, oxidative stress index

Giriş

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektromanyetik dalga yayan cihazların sayısında gün geçtikçe artış olmaktadır. Bu cihazlar havaalanlarında, evlerde, okullarda ve hastanelerde görülebilmektedir (1).

Elektromanyetik radyasyonun biyolojik etkileri fiziksel ve özellikle iyonize olup olmamasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. İyonize radyasyon (İR) ölümcül olabilen bir yüksek enerjili foton veya alfa partikül, proton ve nötron akımı oluşturmaktadır (2). İR'ye göre daha düşük enerjiye sahip olan NİR ise atom ve moleküllerde ölümcül olan iyonizasyona neden olmaz (2, 3). X-ray cihazları, bilgisayarlı tomografi cihazı, radyo cerrahi aletleri (Gamma Knife, Cyber Knife), bazı

Yazışma Adresi / Address for Correspondence: Hakim ÇELİK; Harran Üniversitesi Tıp Fakültesi, Fizyoloji Anabilim Dalı, Şanlıurfa, Türkiye E-mail: hakimcell@gmail.com

Geliş Tarihi / Received : 06.02.2016

Kabul Tarihi / Accepted: 14.03.2016

©Telif Hakkı 2016 Bezmalem Vakıf Üniversitesi - Makale metnine www.bezmalemscience.org web sayfasından ulaşılabilir.

©Copyright 2016 by Bezmalem Vakıf University - Available online at www.bezmalemscience.org

sterilizatörler ve ultraviyole lambaları IR yaymaktadır. Televizyon ve radyo vericileri, fotokopi makineleri, cep telefonu baz istasyonları, mikrodalga fırınlar, bilgisayar monitörleri ve kablosuz bağlantı cihazları (WiFi) gibi cihazlar ise NİR yaymaktadır (2).

İR ve NİR'in bazı türleri canlı organizmalarda serbest radikal oluşumunu tetiklemektedir. Bu serbest radikaller kritik biyomoleküllerde doğrudan oluşabildiği gibi indirekt olarak da suda ve biyomoleküllerde oluşabilmektedir. İyonize radyasyondan kaynaklanan biyolojik etkinin büyük çoğunluğu sudaki serbest radikaller vasıtasıyla olduğu düşünülmektedir (4). İR suyun radyolizi ile serbest radikal oluşumunu artırarak dolaylı yoldan nükleik asitlerde, proteinlerde ve lipitlerde hasara neden olmaktadır (5). İR'den kaynaklanan hücre hasarların büyük çoğunluğu doğrudan radyasyona maruz kaldığında ya da hemen sonrasında ortaya çıkmaktadır. Fakat radyasyon maruziyetinden itibaren reaktif oksijen türleri (ROS) sürekli olarak arttığından oksidatif hasar günlerce ve hatta aylarca devam edebilmektedir (6).

ROS, hidroksil ($\text{OH}\cdot$), hidroperoksit ($\text{HO}_2\cdot$) ve süperoksit ($\text{O}_2^{\cdot-}$) radikalleri ile hidrojen peroksit (H_2O_2) ve singlet oksijeni ($^1\text{O}_2$) kapsamaktadır. Fenton reaksiyonları sonucunda oluşan $\text{OH}\cdot$ Radikali, ROS'ların en reaktif olanıdır. $\text{HO}_2\cdot$ ve $\text{O}_2^{\cdot-}$ Haber-Weiss reaksiyonları ile reaktif $\text{OH}\cdot$ radikale dönüşebilmektedir. H_2O_2 kolay bir şekilde nükleer membrandan geçerek nükleusta Fenton reaksiyonu vasıtasıyla $\text{OH}\cdot$ radikale dönüşmektedir. $\text{OH}\cdot$ radikali DNA'da deoksiriboz ve fosfodiester bağlarında hasara neden olmaktadır. Ayrıca $\text{OH}\cdot$ radikali DNA'da tek ve çift zincir kırıklarına da neden olmaktadır (2). $\text{OH}\cdot$ radikali enzimlerdeki amino asit rezidüleri ve prostetik gruplara etki ederek proteinlerin fragmentasyonu ve agregasyonuna neden olmaktadır. Ayrıca ROS'lar lipid peroksidasyonuna neden olarak hücre zarının fizikokimyasal özelliklerini bozmaktadır (7, 8).

Oksidatif stres, serbest radikal oluşumu ile bu serbest radikalleri nötralize eden spesifik antioksidanlar arasındaki dengenin bozulmasıdır. Radyasyondan sonra bir kaç dakika ile bir kaç saat içinde ROS'lar hücre içerisinde artmaktadır. ROS artışı sonrası vücutta indüklenen antioksidan üretimi ROS'ların zararlı etkilerini azaltmaya ve oksidatif dengeyi yeniden oluşturmaya çalışmaktadır (4).

Yukarıda verilen bilgilerden de anlaşıldığı gibi İR ve NİR hem doğrudan ve hem de ROS'ları artırarak dolaylı yoldan protein, lipid ve DNA hasarlarına neden olmaktadır. Bu çalışmamızdaki amacımız ise İR ve NİR'in sebep olduğu oksidatif hasarı ve bu hasarı önlemeye yönelik olan antioksidanların bir denge halinde olup olmadığını yeni ve güvenilir yöntemlerle araştırmaktır.

Yöntemler

Çalışmamız her grupta 8 kişi olacak şekilde 3 grupta gerçekleştirildi. Çalışma gruplarımız: Kontrol grubu; İR ve NİR ortamlarında çalışmayan radyasyona en az maruz kaldığı

düşündüğümüz grup, İR grubu; İyonize radyasyona maruz kalan ortamda çalışan röntgen teknisyenleri, NİR grubu ise; Noniyonize radyasyonlu ortamda günde en az sekiz saat çalışan fotokopi çalışanları olacak şekilde düzenlendi. 8-12 saatlik gece açlığından sonra 5 mL venöz kan alınarak 3000 rpm'de santrifüj edildi. Serumlar daha sonra eppendorf tüplerine konularak çalışma zamanına kadar -80°C 'de saklandı. Çalışmaya katılan her bir bireyden yazılı hasta onamı alındı. Çalışma için Harran Üniversitesi Tıp Fakültesi Etik Kurul Başkanlığından etik komite onayı alındı.

Total Oksidan Seviye (TOS)

Serum TOS seviyeleri piyasadaki mevcut tanı kitleri vasıtasıyla çalışıldı (Rel Assay, Gaziantep, Türkiye). Bu metoda göre serumda bulunan oksidanlar, ferröz iyonu ferrik iyonla dönüştürürler. Ferrik iyonlar, asidik ortamda xlenol orange ile renkli bir kompleks oluştururlar. Ortamda bulunan gliserol bu reaksiyonu hızlandırmaktadır. Serumda bulunan oksidanların miktarıyla ilişkili olan rengin şiddeti, spektrofotometrik olarak ölçüldü. Standart olarak H_2O_2 kullanıldı ve sonuçlar $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ equivalent/L olarak hesaplandı (9).

Total Antioksidan Seviye (TAS)

Serum TAS seviyeleri piyasadaki mevcut tanı kitleri vasıtasıyla çalışıldı (Rel Assay, Gaziantep, Türkiye). Bu metoda göre; Fe^{2+} -o-dianisidine kompleksi, hidrojen peroksit ile Fenton tipi reaksiyon oluşturarak, $\text{OH}\cdot$ radikali oluşturur. Bu güçlü reaktif oksijen türü düşük pH'da renksiz o-dianisidine molekülü ile reaksiyona girerek sarı-kahverengi dianisidyl radikallerini oluştururlar. O-dianisidyl radikalleri ileri oksidasyon reaksiyonlarına katılarak renk oluşumunu artmaktadır. Ancak örneklerdeki antioksidanlar bu oksidasyon reaksiyonlarını bastırarak renk oluşumunu durdurmaktadırlar. Örnekler spektrofotometrik olarak okutulduktan sonra sonuçlar mmol trolox eqv./L olarak hesaplandı (10).

Oksidatif Stres İndeksi (OSİ)

Oksidatif stresin bir indikatörü olan OSİ'nin hesaplanması için öncelikle TOS ve TAS'ın birimleri μmol şeklinde hesaplandı. Daha sonra, $\text{OSİ(AU)} = ((\text{TOS } \mu\text{mol/L}) / (\text{TAS } \mu\text{mol/L})) \times 100$ formülüne göre OSİ hesaplandı (11). Kısaca, TOS'un TAS'a bölünmesi ile elde edilmektedir.

Malondialdehid (MDA)

Serum lipid peroksidasyonunu belirlemek için Hedge ve ark. (12) tarafından geliştirilen ve Tiyoobarbitürik asit reaktif ürünleri (TBARS) kullanılarak spektrofotometrik olarak serum MDA düzeyleri ölçüldü (12). Standart olarak 1,1,3,3-tetraetoksipropan kullanıldı ve sonuçlar nmol/mL olarak hesaplandı.

Protein Karbonil (PC)

Serumdaki protein oksidasyonu Cayman's Protein Carbonyl ölçüm kiti ile çalışıldı. Ölçüm metodu, serum protein karbonil gruplarının 2,4-dinitrofenil hidrazin ile tepkimeye girerek 2,4-dinitrofenilhidrazon oluşturması prensibine dayanmaktadır. Serum protein-hidrazon düzeyi spektrofotometrik olarak ölçülerek sonuçlar nmol/mg protein olarak hesaplandı (13).

İstatistiksel analiz

İstatistiksel analizler için Windows uyumlu IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 20.0 (Chicago, IL, USA) paket programı kullanıldı. Datalar Kruskal Wallis H ile değerlendirildi. Grup içindeki karşılaştırmalar için Mann Whitney U testi kullanıldı. Bütün veriler ortalama $\pm$ standart sapma (SD) olarak hesaplandı. $P < 0,05$ anlamlı olarak kabul edildi.

Bulgular

Kontrol, İR ve NİR gruplarının demografik verileri Tablo 1’de gösterilmiştir. Yaş, cinsiyet ve VKİ açısından gruplar arasında anlamlı bir fark görülmedi ($p > 0,05$). Oksidatif stres parametreleri ve antioksidan sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Serum PC, MDA, TOS ve OSİ düzeyleri İR grubunda kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde yüksek bulundu (sırasıyla; $p < 0,001$, $p = 0,003$, $p < 0,001$ ve $p < 0,001$). Serum TAS düzeyleri ise İR grubunda kontrol grubuna göre anlamlı ölçüde düşük bulundu ($p = 0,002$). Yine Tablo 2’de görüldüğü gibi serum PC, TOS ve OSİ seviyeleri NİR grubunda kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde artmış olduğu (sırasıyla; $p < 0,001$, $p = 0,021$ ve $p = 0,010$), fakat MDA düzeyindeki artışın anlamlı ölçüde olmadığı görüldü ($p > 0,05$). Serum TAS düzeyleri İR grubunda olduğu gibi NİR grubunda da kontrol grubuna göre düşük olduğu fakat bu düşüklüğün anlamlı ölçüde olmadığı görüldü ($p = 0,083$). İR ve NİR grupları arasında ise serum PC, MDA, TOS, OSİ ve TAS düzeylerinde anlamlı artış veya azalma görülmedi.

Tartışma

Radyasyona maruz kalan dokularda oksidan/antioksidan denge bozulur ve hücrenin temel yapı taşları olan protein, DNA

ve lipid gibi makromoleküller oksidasyona uğrayabilirler (14). Günümüzde radyasyon bazı teknolojilerin nispeten güvenli ve verimli olması ve radyasyon kaynaklarının daha sıkı denetimine rağmen, modern yaşamın birçok rutin faaliyetleri sırasında iyonize radyasyona maruz kalınmaktadır (15). İyonize radyasyon ya hedef molekülleri etkileyerek doğrudan ya da hücre disfonksiyonu ve ölümüne neden olan $\text{OH}^\bullet$, $\text{HO}_2^\bullet$ ve $\text{O}_2^{\bullet-}$ radikallerinin oluşumunu artırıp bu radikaller ile dolaylı yoldan doku hasarına neden olmaktadır (16).

İyonize ve non-iyonize radyasyonun reaktif oksijen türlerini artırarak protein oksidasyonu ve lipid peroksidasyonuna neden olup olmadığını belirlemek amacıyla kan plazmasında protein karbonil, malondialdehit, total oksidan ve antioksidan seviyeleri belirlenerek oksidatif stres indeksi değerleri hesaplandı. Serum TAS değerleri İR grubunda kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde düşük bulunurken ($p = 0,002$); PC, MDA, TOS ve OSİ seviyeleri kontrol grubuna kıyasla anlamlı ölçüde artış görüldü (sırasıyla; $p < 0,001$, $p = 0,003$, $p < 0,001$ ve $p < 0,001$, Tablo 2). Bu bulgular, İR grubunda serbest oksijen radikallerinin arttığını, antioksidan düzeyin ise azaldığını göstermekte ve oksidatif dengenin bozulduğunu ifade etmektedir. Bu gözlemlerimiz daha önce yapılan çalışmalar ile uyum göstermektedir.

Kablosuz internet, cep telefonları, bilgisayarlar, bazı tıbbi aletler ve diğer birçok elektronik aletlerin hayatımıza girmesi ile birlikte devamlı olarak elektromanyetik NİR’e maruz kalabilmekteyiz. NİR’in İR’den farkı, atom ve moleküllerden elektron koparacak ve kimyasal bağları kırarak kadar foton enerjisine sahip olmamasıdır. Elektromanyetik radyasyon (EMR)’un çeşitli dokulardaki biyolojik etkilerini açıklayan birkaç mekanizma bulunmaktadır. Fakat moleküler mekanizmalar henüz tam olarak açıklanamamaktadır (17). En uygun hipotezlerden bir tanesi antioksidan savunma kapasitesi ve oksidatif stres arasındaki normal dengenin bozulmasıdır. Oksidatif stres, hücre içindeki serbest radikallerin üretimini ve hücre savunma mekanizmaları arasındaki dengesizliği ifade etmektedir. ROS’lar lipidler, proteinler ve nükleik asitler gibi moleküller ile diğer hücresel yapılarda oksidatif hasara neden olan radikallerdir (18). Tablo 2’de görüldüğü gibi serum TAS

Tablo 1. Kontrol, İR ve NİR gruplarının demografik verileri

	Kontrol (n=8)	İR (n=8)	NİR (n=8)	p değerleri
Yaş (Yıl)	25,1 $\pm$ 3,9	30,1 $\pm$ 5,0	26,2 $\pm$ 5,3	ns
VKİ (Kilo/Boy ²)	24,0 $\pm$ 2,9	24,5 $\pm$ 3,6	24,9 $\pm$ 3,5	ns
VKİ: vücut kitle indeksi; ns: anlamsız; İR: iyonize radyasyon; NİR: non-iyonize radyasyon				

Tablo 2. Kontrol, İR ve NİR gruplarının TAS ve oksidatif stres değerleri

	Kontrol (n=8)	İR (n=8)	NİR (n=8)	p değerleri
PC (nmol/mg protein)	1,00 $\pm$ 0,45	4,79 $\pm$ 1,68¥	3,29 $\pm$ 1,07 [£]	<0,001
MDA (nmol/mL)	13,51 $\pm$ 3,27	20,37 $\pm$ 3,44¥	16,24 $\pm$ 3,52	=0,011
TOS ($\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ eqv./L)	7,37 $\pm$ 1,71	11,65 $\pm$ 1,22¥	9,84 $\pm$ 3,31 [£]	=0,004
TAS (mmol trolox eqv./L)	1,28 $\pm$ 0,14	0,87 $\pm$ 0,27¥	1,01 $\pm$ 0,38	=0,026
OSİ (Arbitrary Unite)	0,58 $\pm$ 0,16	1,49 $\pm$ 0,58¥	1,14 $\pm$ 0,58 [£]	=0,002

İR: İyonize Radyasyon; NİR: non-iyonize radyasyon; PC: protein karbonil; MDA: malondialdehit; TOS: total oksidan seviye; TAS: total antioksidan seviye; OSİ: oksidatif stres indeksi;

¥: İR ile kontrol arasında anlamlı fark bulunmaktadır.

£: NİR ile Kontrol arasında anlamlı fark bulunmaktadır.

düzeyleri bakımından NİR grubu ile kontrol grubu arasında anlamlı bir fark görülmezken ($p=0,083$); PC, TOS ve OSİ seviyelerinin NİR grubunda anlamlı düzeyde artmış olduğu görülmektedir (sırasıyla; $p<0,001$, $p=0,021$ ve $p=0,010$).

Sonuç

Sonuç olarak, özellikle İR grubunda olmak üzere İR ve NİR gruplarında antioksidan durum değerlerinin azaldığı ve ROS değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu nedenle radyasyona maruz kalan bireylerde artan oksidatif stresin, oksidan/antioksidan dengeyi bozarak hücrel proteinler, lipidler ve DNA hasarına sebep olabileceği düşünülmüştür. Vaka sayımız her ne kadar azda olsa vardığımız sonuçlar iyonize ve non-iyonize radyasyona maruz kalındığında artan oksidatif hasar ve serbest radikallerin zararlı etkilerini azaltmak amacı ile antioksidan bakımından zengin besinlerin tüketilmesi veya bu alanda uzman hekimlerin önereceği ilaçlar tavsiye edilebilir. Ayrıca radyasyona maruz kalan bölgelerde çalışan insanlara düzenli aralıklarla radyasyon güvenliği eğitiminin verilmesi ve çalıştıkları alanlarda düzenli aralıklarla radyasyon ölçümleri yapılarak gerekli önlemlerin alınmasının önemi ilgili kuruluşlara hatırlatılabilir.

Etik Komite Onayı: Bu çalışma için etik komite onayı alınmıştır.

Hasta Onamı: Hasta onamı bu çalışmaya katılan hastalardan alınmıştır.

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.

Yazar Katkıları: Fikir - İ.K., D.M., A.G.; Tasarım - İ.K., A.G., D.M.; Denetleme - İ.K., A.G., D.M.; Kaynaklar - İ.K., A.G., D.M.; Malzemeler - H.Ç., İ.K.; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi - H.Ç., İ.K., A.Z.K.; Analiz ve/veya Yorum - H.Ç., İ.K.; Literatür Taraması - H.Ç., A.Z.K.; Yazıyı Yazan - H.Ç., A.Z.K., İ.K.; Eleştirel İnceleme - H.Ç., İ.K., A.Z.K.

Çıkar Çatışması: Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Finansal Destek: Yazarlar bu çalışma için finansal destek almadığını belirtmiştir.

Ethics Committee Approval: Ethics committee approval was received for this study.

Informed Consent: Informed consent was obtained from patients who participated in this study.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Author Contributions: Concept - İ.K., D.M., A.G.; Design - İ.K., A.G., D.M.; Supervision - İ.K., A.G., D.M.; Funding - İ.K., A.G., D.M.; Materials - H.Ç., İ.K.; Data Collection and/or Processing - H.Ç., İ.K., A.Z.K.; Analysis and/or Interpretation - H.Ç., İ.K.; Literature Review - H.Ç., A.Z.K.; Writing - H.Ç., A.Z.K., İ.K.; Critical Review - H.Ç., İ.K., A.Z.K.

Conflict of Interest: No conflict of interest was declared by the authors.

Financial Disclosure: The authors declared that this study has received no financial support.

Kaynaklar

1. Furtado-Filho OV, Borba JB, Dallegrave A, Pizzolato TM, Henriques JAP, Moreira JCF ve ark. Effect of 950 MHz UHF electromagnetic radiation on biomarkers of oxidative damage, metabolism of UFA and antioxidants in the livers of young rats of different ages. *Int. J. Radiat. Biol* 2014; 90: 159-68. [CrossRef]
2. Sowa P, Rutkowska-Talipska J, Sulkowska U, Rutkowski K, Rutkowski R. Ionizing and non-ionizing electromagnetic radiation in modern medicine. *Polish Ann Med* 2012; 19: 134-8. [CrossRef]
3. Schmid E, Schrader T. Different biological effectiveness of ionising and non-ionising radiations in mammalian cells. *Adv Radio Sci* 2007; 5: 1-4. [CrossRef]
4. Freitinger Skalická Z, Zölzer F, Beránek L, Racek J. Indicators of oxidative stress after ionizing and/or non-ionizing radiation: superoxid dismutase and malondialdehyde. *J Photochem Photobiol B* 2012; 117: 111-4. [CrossRef]
5. Azzam EI, Jay-Gerin JP, Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Lett* 2012; 327: 48-60. [CrossRef]
6. Petkau A. Role of superoxide dismutase in modification of radiation injury. *Br J Cancer Suppl* 1987; 8: 87-95.
7. Karihtala P, Soini Y. Reactive oxygen species and antioxidant mechanisms in human tissues and their relation to malignancies. *Apmis* 2007; 115: 81-103. [CrossRef]
8. Dizdaroglu M. Oxidatively induced DNA damage: Mechanisms, repair and disease. *Cancer Lett* 2012; 327: 26-47. [CrossRef]
9. Erel O. A new automated colorimetric method for measuring total oxidant status. *Clin Biochem* 2005; 38: 1103-11. [CrossRef]
10. Erel O. A novel automated method to measure total antioxidant response against potent free radical reactions. *Clin Biochem* 2004; 37: 112-9. [CrossRef]
11. Selek S, Aslan M, Horoz M, Gur M, Erel O. Oxidative status and serum PON1 activity in beta-thalassemia minor. *Clin Biochem* 2007; 40: 287-91. [CrossRef]
12. Hegde KR, Henein MG, Varma SD. Establishment of mouse as an animal model for study of diabetic cataracts: Biochemical studies. *Diabetes Obes Metab* 2003; 5: 113-9. [CrossRef]
13. Levine RL, Garland D, Oliver CN, Amici A, Climent I, Lenz AG ve ark. Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. *Methods Enzymol* 1990; 186: 464-78. [CrossRef]
14. Cooke MS, Evans MD, Dizdaroglu M, Lunec J. Oxidative DNA damage: mechanisms, mutation, and disease. *FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol* 2003; 17: 1195-214. [CrossRef]
15. Liu Y, Liu F, Yang Y, Li D, Lv J, Ou Y ve ark. Astragalus polysaccharide ameliorates ionizing radiation-induced oxidative stress in mice. *Int J Biol Macromol* 2014; 68: 209-14. [CrossRef]
16. Spitz DR, Azzam EI, Li JJ, Gius D. Metabolic oxidation/reduction reactions and cellular responses to ionizing radiation: A unifying concept in stress response biology. *Cancer Metastasis Rev* 2004; 23: 311-22. [CrossRef]
17. Kovacic P, Somanathan R. Electromagnetic fields: mechanism, cell signaling, other bioprocesses, toxicity, radicals, antioxidants and beneficial effects. *J. Recept. Signal Transduct. Res* 2010; 30: 214-26. [CrossRef]
18. Ceyhan AM, Akkaya VB, Güleçol ŞC, Ceyhan BM, Özgüner F, Chen W. Protective effects of β -glucan against oxidative injury induced by 2.45-GHz electromagnetic radiation in the skin tissue of rats. *Arch Dermatol Res* 2012; 1-7. [CrossRef]