



Uzay Radyasyonu ve Mikrogravitenin Göz Dokuları Üzerine Etkileri

The Effects of Space Radiation and Microgravity on Ocular Structures

© Bahadır Özelbaykal*, © Gökhan Öğretmenoğlu**, © Şansal Gedik***

*Kadirli Devlet Hastanesi, Göz Hastalıkları Kliniği, Osmaniye, Türkiye

**Adana Şehir Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Göz Hastalıkları Kliniği, Adana, Türkiye

***Selçuk Üniversitesi Tıp Fakültesi, Göz Hastalıkları Anabilim Dalı, Konya, Türkiye

Öz

Mikrogravite ve uzay radyasyonuna uzun süreli maruziyet sonrasında insanların biyolojisinde fizyolojik ve patolojik değişiklikler görülebilir. Mikrograviteye bağlı gelişen beyin ve göz dokularındaki patolojik değişiklikler uzay uçuşu ile ilişkili nöro-oküler sendrom adı altında toplanmaktadır. Bu derlemede mikrogravite ve uzay radyasyonunun göz üzerine etkilerini tartışan çalışmalar ve sonuçları incelenmiştir. Ayrıca mikrogravite ve uzay radyasyonunun biyolojik yapılara etkilerini azaltmak için neler yapılabileceğiyle ilgili tedavi yöntemleri ve hipotezler tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uzay radyasyonu, mikrogravite, uzay uçuşu ile ilgili nöro-oküler sendrom, yapay yerçekimi

Abstract

Long-term exposure to microgravity and space radiation leads to physiological and pathological changes in human biology. Pathological neuro-ocular changes are collected under the name spaceflight-associated neuro-ocular syndrome. This review examines studies on the effects of microgravity and space radiation on the ocular structures and their results. In addition, we discuss treatment methods and hypotheses to reduce the effects of microgravity and space radiation on biological structures.

Keywords: Space radiation, microgravity, spaceflight-associated neuro-ocular syndrome, artificial gravity

Giriş

Uzay yarışı, 4 Ekim 1957 tarihinde Sovyetler Birliği'nin (SSCB) Sputnik 1 adlı yapay uyduyu fırlatmasıyla başlamış bunu hayvanlı ve insanlı uçuşlar takip etmiştir. Günümüzde uzay çalışmaları Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), Rusya Federal Uzay Ajansı (ROSCOSMOS), Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Kanada Uzay Ajansı'nın (CAS-ASC) ve Japonya Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) katılımıyla oluşturulan proje sonucunda, bir araya getirilen modüllerin birleştirilmesiyle inşa edilmiş Uluslararası Uzay İstasyonu (UUI) üzerinde devam etmektedir. UUI alçak Dünya

yörüngesinde seyreden ve içerisinde insanların yaşayabildiği yapay bir uydudur. UUI sayesinde alçak yörünge uçuşu ve Ay görevleri gibi uzun süreli uzay uçuşlarının sayısı günümüzde gittikçe artmaktadır. Bu durum uzay şartlarına maruz kalan insan sayısının artmasına sebep olmaktadır. Uzay çalışmaları sırasında, yer çekimi kuvvetinin az olması, atmosferin olmayışı, galaktik kozmik ışınlar (GKI) ve solar enerjik partiküller (SEP) gibi insan biyolojisini etkileyen bir dizi sorun tespit edilmiştir.¹ Bu sorunların büyük ve önemli kısmını mikrogravite (MG) ve uzay radyasyonu oluşturmaktadır. İnsanoğlunun güneş sistemini ve ötesini keşfedebilmesi için bu ve bunlar gibi birçok soruna çözüm bulması gerekmektedir.

Yazışma Adresi/Address for Correspondence: Bahadır Özelbaykal, Kadirli Devlet Hastanesi, Göz Hastalıkları Kliniği, Osmaniye, Türkiye

E-posta: bhdrozelsbaykal@hotmail.com **ORCID-ID:** orcid.org/0000-0001-5898-9016

Geliş Tarihi/Received: 20.10.2020 **Kabul Tarihi/Accepted:** 06.05.2021

Cite this article as: Özelbaykal B, Öğretmenoğlu G, Gedik Ş. The Effects of Space Radiation and Microgravity on Ocular Structures. Turk J Ophthalmol 2022;52:57-63

GKI ve SEP, insanlı uzay görevlerini etkileyen önemli bir sorundur. GKI'ı yüksek enerjili protonlar, yüksek enerjili iyonlar, nötronlar, gama ve X ışınları ile partiküllerin uzay aracı ve insan dokularına çarpması sonucu oluşan sekonder partiküller oluşturmaktadır. Bu ışınlar DNA'daki moleküler bağlarda kırıklara ve mutasyona sebep olarak hücre hasarı, tümör ve doku dejenerasyonu, katarakt, kalp hastalıkları, santral sinir sistemi hasarları ve akut radyasyon sendromuna sebep olmaktadır.² Radyasyonun insan dokularına etkilerini inceleyebilmemiz için Dünya'da radyasyona maruz kalan mesleklerde çalışanlar, uzay görevlerine katılan insanların dosimetrik sonuçları, araştırma amaçlı gezegenlere gönderilen robotik keşif araçlarından elde edilen radyasyon dozu bilgilerini inceleyebiliriz. Ancak bu ölçümlerin hepsi dolaylı ölçümlerdir. Ölçüm dedektörlerinin silikon yapıda olduğu unutulmamalıdır. Dünya'da radyasyon ortamında çalışanların yıllık radyasyon maruziyet limiti 50 millisievert (mSv) olarak belirlenmiştir.³ UUI, Dünya'nın manyetik alanı ile az da olsa koruma altında olmasına rağmen istasyondaki bir insanın maruz kaldığı radyasyon düzeyi yaklaşık olarak yılda 200 mSv olarak ölçülmüştür.⁴ Mars'a gönderilen Curiosity uzay sondasının üzerinde bulunan radyasyon değerlendirme dedektörünün elde ettiği verilere göre, Mars'a gidiş dönüş (2x180 gün) ve Mars yüzeyindeki 500 gün sonucunda yaklaşık maruz kalan doz 1,01 Sv olarak hesaplanmıştır.⁵ Mars yüzeyindeki radyasyon maruziyeti Dünya'dakinden daha fazladır. Bunun sebepleri Mars atmosferinin ince olması ve enerji yüklü parçacıkları saptıracak global manyetik alanının olmamasıdır. Ay'ın Von Kármán kraterine düzenlenen Çin Chang'e 4 robotik görevinden elde edilen sonuçlara göre Ay yüzeyinde günlük maruz kalan GKI dozu UUI'de günlük maruz kalan dozdan 2,6 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur.⁶ Epidemiyolojik verilere göre 1 Sv radyasyona maruz kalınması sonucunda kanser gelişme ihtimali %5,5 oranında artmaktadır.⁴ Bu durumda uzun süreli derin uzay görevleri mevcut fizyolojik limitlerin kat ve kat üstündedir. Bu nedenle uzay radyasyonunun mürettebatı korumak için çözümler üretmek gerekmektedir.

Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu tarafından belirlenen doku ve organların uzay radyasyonuna maruziyetinin üst limitleri Tablo 1'de gösterilmiştir.⁷

Uzay Radyasyonunun Göz Üzerine Etkileri

Fosfenler

1961-1975 yılları arasında gerçekleştirilen insanlı Ay yolculuğu projesi olan Apollo projesine katılan astronotlar derin uzay görevi sırasında gözlerinde ışık parlamaları (fosfenler) olduğunu fark ettiler. Işık parlamaları UUI'de görev yapan astronotlar tarafından da bildirilmiştir. Yapılan araştırmalar sonrasında bu fosfenlerin, GKI ve SEP'lerin retina, optik sinir ve oksipital korteksi uyarmasıyla oluştuğu anlaşılmıştır.^{8,9,10} Benzer fosfenleri oküler onkolojide, baş-boyun bölgesine uygulanan radyoterapi uygulamalarında da görmektediriz.¹¹ İlâveten uygun açıda gelen kozmik ışınlar vitreus ile etkileşime girerek Cherenkov etkisi ile parlak mavi fosfenlere sebep olabilir.¹² Bu tür fosfenleri gören astronotların sayısı az olmakla birlikte daha sık görülen

Tablo 1. NASA, ESA doz limitleri

Organ	30 gün	1 yıl
Santral sinir sistemi	500 mGy	1000 mGy
Göz	0,5 Sv	1 Sv
Dolaşım sistemi	250 mGy-Eq	500 mGy-Eq
Kan yapan organlar	0,25 Sv	0,5 Sv
Deri	1,5 Sv	3 Sv
NASA: National Aeronautics and Space Administration, ESA: European Space Agency, mGy: miligray, Sv: sievert		

fosfen türü hareketli veya statik beyaz renkli noktalar veya çizgiler şeklinde olanlardır.^{13,14} Ayrıca, fotoreseptörler etrafında radyasyona bağlı gelişen lipid peroksidasyonu nedeniyle oluşan kimyasal illuminansın, biyoluminesant fotonları oluşturabileceği gösterilmiştir¹⁵.

Katarakt Gelişimi

Göz içi lensin saydamlığını kontrol eden genlerde meydana gelen mutasyonlar¹⁶, kristallin lensin saydamlığını sağlayan germinal bölge hücrelerinde apoptozis katarakt gelişimine sebep olmaktadır.¹⁷ Derin uzay yolculuklarında maruz kalan radyasyon dozlarının yüksek olması nedeniyle düşük ve yüksek doz radyasyona maruziyetin kristallin lens üzerine etkileri üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Astronotlarda katarakt gelişiminin 5 yıl süre ile incelendiği NASA tarafından yapılan iki fazlı çalışmanın (NASCA faz 1-2) faz 2 sonuçlarına göre kortikal katarakt progresyon hızı ile uzay radyasyonu dozu arasında ilişki olduğu bulunmuştur. Ancak nükleer ve posterior subkapsüler katarakt ile uzay radyasyonu arasında bir ilişki bulunamamıştır.¹⁸

Düşük doz radyasyona (<100 mGy) maruz kalan radyasyon teknikleri üzerinde yapılan izlem yılının ortalama 12,4-13,1 yıl olduğu kohort çalışmasında ise katarakt gelişme riskinin arttığı ancak katarakt cerrahisi riskinde ise artış olmadığı görülmüştür.¹⁹ Kortikal katarakt gözde kamaşmaya ve görme keskinliğinin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle uzay radyasyonunun katarakt gelişimi üzerine etkilerini anlayabilmek için daha uzun izlem süreli ileri çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Mikrogravitenin Göz Dokuları Üzerine Etkileri

Kütleçekimi bir objenin diğer objeye doğru hareket etmesini sağlayan doğal bir fenomendir. Uzayda kütleçekimi olmadığı genel kanısına rağmen; uzayın her yerinde bir miktar kütleçekimi bulunmaktadır. Ay'ı Dünya'nın yörüngesinde, Dünya'yı Güneş'in yörüngesinde, Güneş'i de Samanyolu galaksisindeki yerinde tutan kütleçekimdir. UUI Dünya'dan 400 km uzaklıkta yörüngede yaklaşık 27.743 km/saat hızla seyretmektedir. Bu yükseklikte kütleçekimi Dünya yeryüzündekinin %90'dır. Dünya yerçekiminin %90'ına maruz kalınmasına rağmen UUI'nin yeryüzüne çarpıpmarasının nedeni ise yörüngede hızlı bir şekilde yol almasıdır. Dünya yörüngesindeki tüm cisimler sürekli serbest düşüş durumunda oldukları için kütleçekiminin etkisi hissedilmemektedir. Ancak tidal kuvvete bağlı internal stres sıfır değildir, sadece kütleçekiminin olmadığı durumda tamamen sıfırlanır. MG dediğimizde kütleçekimine bağlı tidal etkinin çok az görüldüğü serbest düşüş durumdan bahsetmekteyiz.

Biyoloji alanındaki tüm çalışmaları MG ortamında yapmak pahalı olduğu için Dünya'da bu ortamın benzerini yaratmak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kuru immersiyon, yaş immersiyon, tek taraflı alt ekstremite uzuv süspansiyonu, baş aşağı-eğik masa testi (BAMT), supine yatak istirahati, Einstein asansörü kullanılan yöntemlerden olmakla birlikte MG'ye bağlı gelişen sefalik sıvı kaymasını en iyi taklit eden yöntemin BAMT olduğu düşünülmektedir.²⁰

MG'nin insan fizyolojisi üzerine ciddi yan etkileri olmaktadır. Özellikle kardiyovasküler ve kas iskelet sistemi etkilenmektedir. Dünya'da yerçekimi nedeniyle kan basıncı bacak ve ayaklarda daha yüksektir. Ancak MG ortamında hidrostatik basınç kaybolmaktadır. Buna bağlı arteriyel basınç vücudun her tarafında eşitlenmektedir. Ayrıca MG maruziyetinin ilk dakikalarından itibaren yaklaşık 2 litre kanın vücudun alt kısmından sefalik bölgeye doğru yer değiştirdiğini görmekteyiz.²¹ 1g yerçekimi maruziyetinde sefalik arteriyel basınç daha azken (yaklaşık 70 mmHg) ayakta kan basıncı daha yüksektir (yaklaşık 200 mmHg). MG ortamına adaptasyonun erken evresinde tekrar dağılıma bağlı santral kan hacminde artış olmaktadır. Bu durum vücudun üst kısımlarında kan basıncında artışa sebep olmakta ve boyun baro reseptörlerinin uyarılmasına bağlı kalp hızı azalmakta, vazodilatasyon görülmekte, ortalama arteriyel basınç azalmaktadır.²² İlave MG, lenfatik sıvı drenajındaki bozulmalara bağlı gelişen yüz ödemi, diürezis, plazma volümünde azalma, osteoporoz, sarkopeni ve böbrek taşlarına sebep olmaktadır.^{21,23,24}

MG'nin yarattığı önemli sorunlardan bir diğeri uzay uçuşlarına katılan astronotlarda tespit edilen görme problemleridir. Bu durum, uzayda kalınan zaman uzadıkça artmaktadır. Astronotların görme fonksiyonundaki değişiklikler ilk olarak Mercury, Gemini 5 ve 7 görevlerinde bildirmiştir ve bu durumun astronotların sağlığını ve görevlerini etkileyeceği düşünülmüş sorunun sebebi üzerine çalışmaya başlamışlardır.⁹

Uzun süreli uzay uçuşlarına katılan astronotların bazılarının uçuş sonrası muayenelerinde görme performansında azalmalar, hipermetropik refraktif hatada artış (+0,5 D ile +1,75 D arasında), papil ödem, atılmış pamuk manzarası, orbital manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve ultrasonografide (USG) gözün arka kısmında düzleşme, koroidal katlantılar ve optik koherens tomografide (OKT) retina sinir lifi tabakasında kalınlaşma gibi nöro-oküler yapısal, fonksiyonel değişiklikler tespit edildi.²⁵ Tanımlanan bulguları içeren duruma daha sonraları uzay uçuşu ile ilgili nöro-oküler sendrom [*paceflights-associated neuro-ocular syndrome*, (SANS)] adı verilmiştir. Burada tekrar belirtmek isteriz ki SANS diye bahsedilen olgular uzay uçuşundan sonra Dünya'ya dönen ve muayenesi 1g yerçekimi kuvveti etkisindeyken yapılan olgulardır. Bulguların mevcut haliyle karasal idiyopatik intrakraniyal basınç artışı (İİH) bulgularına benzemesi nedeniyle yapılan lomber ponksiyonda (LP) beyin omurilik sıvısı (BOS) basıncının sınırda arttığı tespit edilmiştir.²⁵ Ancak, açıklanan kafa içi basınç değerleri astronotlar Dünya'ya döndükten belli bir süre sonra yapılan LP sonuçlarından oluşmaktadır. Bu durum aslında daha yüksek bir kafa içi basıncının daha düşük gibi görünmesine sebep olabilir.

Bundan dolayı uzayda uygulanabilecek ve BOS basınç ölçümü sağlayacak yöntemler üzerine araştırmalar yapılmaktadır.

İdiyopatik intrakraniyal hipertansiyon ile SANS arasında bazı benzerlikler bulunmasına rağmen iki durum arasında farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin; astronotların hiçbirinde pulsatil senkronize tinnitus, diplopi, kronik baş ağrısı şikayetleri raporlanmamıştır. Her ne kadar bazı astronotlar uzay adaptasyon sendromuna bağlı olduğu düşünülen hafif bir baş ağrısı tarif etselerde, bu baş ağrıları İİH'de görülene benzememektedir. Ayrıca hiçbir astronotun obezite ya da intrakraniyal basıncı yükseltecek ilaç kullanımı öyküsü bulunmamaktadır. Atılmış pamuk manzarası, İİH'de optik sinir etrafında görülebilmemesine rağmen SANS'de retinada da yaygın olarak görülebilmektedir. İİH'ye bağlı papil ödem bilateral olmasına rağmen SANS'da unilateral/bilateral ve belirgin olarak asimettiktir.²⁶ Orbital USG, OKT, MRG ve bilgisayarlı tomografi taramalarında globun arka kısmının düzleşmesi ve subaraknoidal boşluktaki BOS genişlemesi SANS'da İİH'ye göre daha belirgindir.^{26,27,28} Globun arka kısmının düzleşmesine koroidal katlantılar eşlik etmektedir. İİH'de görülen katlantı tiplerinin incelendiği çalışmada en az sıklıkta görülen katlantı tipinin koroidal katlantılar olduğu gösterilmiştir.²⁹ Halbuki SANS'de koroidal katlantılar sıklıkla görülmektedir. SANS'de görülen koroidal katlantılar, optik disk ödemeine bağlı peripapiller retinal pigment epitel/Bowman membranı tabakasının öne deformasyonuna (vitreusa doğru) ve Newell'in hipotez ettiği gibi koryokapillaris kalınlığının artması ve koryokapillaris ile Bruch membran arasındaki adezyonlara bağlı olabilir.³⁰ Optik disk ödemi gerilemesine rağmen koroidal katlantıların gerilememesinin bu nedenle olduğunu düşünmekteyiz.

Simüle ve gerçek MG ortamına maruziyetin akut safhasında göz tansiyonunda yükselme olduğu çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir.^{31,32} Uçuşun ilerleyen döneminde ise göz tansiyonunun normale, uçuş öncesi seviyelere yaklaştığı gözlemlenmiştir. Akut maruziyet sonrası göz tansiyonundaki yükselmenin sebepleri sefalik bölgeye sıvı kaymasına bağlı koroid kalınlığının artması^{33,34}, episkleral ven basıncının artması³⁵, ve ön kamara açısının daralması olabilir.³⁶ Kronik maruziyet sonrası göz tansiyonundaki azalmanın sebepleri ise kompensatuar aköz humor drenajındaki artış³⁴ ve dehidrasyona bağlı gelişen aköz humor sentezlenmesindeki azalma olabilir.³⁷

SANS Patogenezi için Önerilen Teoriler

Önerilen teorilerden ilki uzun süreli uzay uçuşları sırasında kanın bacaklardan sefalik bölgeye yer değiştirmesine bağlı intrakraniyal basıncın yükselmesidir. Dünya'dayken BOS koroid pleksusdan salgılanmakta ve düşük basınçlı servikal venöz damarlara drene olmaktadır. Her ne kadar vasküler otoregülasyon serebral ve optik sinir başı arter çaplarını stabilize etsede BAMT ve MG ortamında serebral ve jugüler venöz distansiyon olduğu gösterilmiştir.³⁸ MG ortamında yapılan Doppler çalışmasında ise retrograd internal juguler venöz akış gösterilmiş olup bu durumun trombüse yatkınlık oluşturduğu belirtilmiştir.³⁹ Uzay uçuşuna bağlı BOS'nin venöz sisteme drenajında azalma ve serebral venöz genişleme ve BOS'nin intrakraniyal kompartmana

yer değiştirmesi intrakraniyal basıncın artmasına sebep olabilir ve bu basınç artışı da optik sinir kılıfına transfer edilerek optik sinir kılıf genişlemesine sebep olabilir. Bunun sonucunda karasal İİH'de geliştiği gibi aksoplazmik akımda staz ve glob düzleşmesi gelişebilir. Bazı astronotlarda gözlemlenen BOS basıncındaki ılımlı artış bu hipotezi desteleyebilir (28-28,5 cm su). BOS basıncının yükselmesine sebep olabilecek diğer risk faktörleri ise direnç egzersizleri, ortamın karbondioksit (CO₂) seviyesinin artması, yüksek tuz tüketimi ve vitamin B-12 bağlımlı 1-karbon transfer yolağındaki kusurlara bağlı nitrik oksit (NO) salınımını düzenleyen folat düzeyinin azalması nedeniyle vasküler permeabilitenin artmasıdır.^{40,41}

MG'ye bağlı BOS basıncı artışı hipotezine karşı görüş oluşturabilecek bulgular ise şunlardır:

Hiçbir astronotta kronik ciddi baş ağrısı, gelip geçici görme kararması ya da diplopi şikayetleri gözlemlenmemiştir. Karasal İİH için tipik olan baş ağrısı semptomunun görülme oranı yüksek olmasına rağmen UUI'deki astronotlarda baş ağrısı şikayeti daha az görülmekle birlikte ağrının şekli İİH'de görülene benzememektedir. Gelip geçici görme kararması karasal İİH'de %68 oranında görülmekteyken ve SANS'de şimdiye kadar böyle bir şikayet rapor edilmemiştir. Diplopi karasal İİH hastalarının %30'unda görülebilmektedir. Ancak SANS'de henüz böyle bir bulgu saptanmamıştır.⁴²

Karasal İİH'nin görüldüğü çoğu hastada papil ödem bilateral olmaktadır ve tek taraflı papil ödem sadece %3-10 oranında görülür.^{42,43} Uzun süreli uzay uçuşuna katılmış 5 astronotun incelendiği bir çalışmada ise optik disk ödeminin yüksek oranda asimetrik olduğu saptanmıştır (1 astronotta asimetrik disk ödemi, 2 astronotta tek taraflı disk ödemi, 2 astronotta simetrik disk ödemi görülmüştür). Ayrıca bir başka çalışmada daha önceki uzay uçuşu sebebiyle tek taraflı disk ödemi gelişmiş bir astronotta sonraki uzay uçuşunda da aynı tarafta optik disk ödemi geliştiği gösterilmiştir.⁴⁴ Eğer disk ödeminin sebebi MG'deki sefalik sıvı kaymasına bağlı gelişen venöz staz olsaydı Dünya (1g) yerçekimine maruziyetin başlaması ile ödemin hızlı bir şekilde çözülmesi beklenirdi. Ancak bu ödemin bazı olgularda Dünya'ya döndükten sonra 6 ay kadar devam ettiği, OKT'de görülen değişikliklerin ise 630 gün sürdüğü gösterilmiştir.²⁷ SANS'de karasal İİH'de görüldüğü gibi BOS basıncında belirgin artış olmamaktadır. Ayrıca İİH'de uzun süreli papil ödem sonucunda optik atrofi gelişirken SANS'de gelişen papil ödem sonrası optik atrofi henüz bildirilmemiştir. Önerilen teorilerden bir diğeri ise kompartimentalizasyon teorsidir.^{25,45} Bu teoriye göre BOS basıncı artsın artmasın, optik sinirin intraorbital kısmında meydana gelen değişikliklere bağlı optik disk ödemi, optik sinir kılıf genişlemesi ve SANS'nin diğer bulguları gelişmektedir. İntrakraniyal subaraknoidal aralık ile orbital subaraknoidal aralık arasındaki kul-de-sak tarzındaki anatomik birleşim uzay uçuşları sırasında MG ortamında BOS akımında bozulmalara neden olabilir. MG'deki kronik sefalik sıvı kayması intraorbital BOS akımında bozulmaya neden olabilir. Orbital BOS derenjı bozulması nedeniyle orbitadaki optik sinir kılıfında BOS birikmesine bağlı optik sinir kompartman sendromu gelişimine yol açabilir.^{25,27} Optik sinir meningoseli/dural ektazi olgularında

da optik sinirin orbital kısmında, subaraknoidal aralıktaki BOS dolaşımında konjenital bozukluk olduğu düşünülmektedir.^{46,47} Bulguların SANS ile benzerliği dikkat çekicidir.

Bir başka hipotez ise MG'ye bağlı optik sinir başındaki lenfatik sistem akış imbalansıdır.^{48,49} MG'ye bağlı optik sinir başındaki lenfatik drenajda gelişen yetmezlik ile ilgili hipotez Thornton ve Bonato⁵⁰ tarafından öne sürülmüştür. Bu hipoteze göre astronotlarda, optik sinirde ödem ve optik sinir kılıfındaki genişlemenin optik sinir lenfatik akımındaki blokaja bağlı olduğu düşünülmektedir. MG'ye bağlı lenfatik tıkanıklık subaraknoid aralıktaki BOS'nin drenajını engelleyip optik sinirde lokalize basınç artışına sebep olabilir. Subaraknoidal aralıktaki basınç artışı translamina kribroza basınç farklılığında değişikliğe sebep olup Bruch membran açısının vitreye doğru yönelmesine ve bunun sonucunda da prelaminar bölgedeki lenfatik yollar üzerine bası oluşmasına ve lenfatik drenajın bloke olmasına sebep olabilir. Sonuçta intrakraniyal basınç artışı olmadan çeşitli derecede papil ödem görülebilir.⁵⁰ Oküler lenfatik sistemin SANS'deki etkisini inceleyebilmek için MG ortamında ileri araştırmalar yapılmalıdır.

Bu Etkileri Azaltmak için Alınabilecek Önlemler

Görme bozukluğu gelişen biri uzayda ne yapabilir? Özellikle Mars gibi uzak mesafeli uçuşlarda bu durum görevi tehlikeye atar mı? Bu olasılık uzay ajanslarını bu konu üzerine çalışmaya teşvik etmektedir. Mars ve ötesine yapılacak yolculuklarda gezegene iniş yapılarına kadar uzayın oluşturduğu sorunları azaltmak için birtakım çözüm önerileri bulunmaktadır. Bu sorunlardan en önemlisi olan MG'ye yönelik sunulan çözüm önerilerinin bazıları şunlardır:

Yapay yerçekimi oluşturmanın en basit yolu merkezkaç kuvvetini kullanan santrifüj yapay yerçekimi sistemidir. Merkezkaç kuvveti ile oluşan yerçekimi (g), $g = \omega^2 \times r$ formülü ile hesaplanabilir. Bu formülde ω açılma hızı ve r üzerinde hareket edilen çemberin yarıçapını temsil etmektedir. Sefalik bölgeden ayağa doğru uygulanan yerçekimi kuvveti (G_z) merkezkaç kuvvetine maruz kalan insanda Dünya'nın uyguladığı yerçekimi kuvveti gibi uniform değildir. Vücut parçalarının merkeze uzaklığına göre G_z kuvvetinin gücü değişir. Uzay aracının kendisini döndürmekte aynı etki yaratabilir ancak bu uygulama astronotlarda Coriolis kuvveti ile ilişkili hareket hastalığına sebep olacağından kullanmak mantıklı olmaz.⁵¹ Merkezkaç kuvvetini oluşturacak kolun uzunluğu tur sayısını etkileyeceğinden kısa kolda daha çok rotasyon anlamına gelir ki bu durum da hareket hastalığına sebep olur. Bu sebeplerden dolayı kuvvet kolunu uzatıp rotasyon sayısını azaltmak mantıklı olacaktır.⁵² Santrifüj yapay yerçekimi sistemlerinin bu yan etkilerinden kaçınmak için doğrusal yapay yerçekimi sistemleri de (Turbolift) tasarlanmaktadır.⁵³ Yapay yerçekiminin insan fizyolojisi üzerine etkisini anladıktan sonra yapay yerçekimi terapilerine hangi dozda hangi süre maruz kalınması gerektiği hesaplanmalıdır.

Alternatif olabilecek diğer bir yöntem ise alt bacaklara negatif basınç (LBNP) uygulamasıdır. Uzayda belirli aralıklarla alt abdomeni ve bacakları kapatacak şekilde dizayn edilmiş bu elbisenin kullanılmasındaki amaç vücudun alt kısmına

negatif basınç uygulanmasıyla kanın aşağı doğru yönelmesini sağlamaktır. Macias ve ark.⁵⁴ tarafından yapılan çalışmada alt ekstremiteye 25 mmHg negatif basınç uygulamasının, simüle MG'ye (BAMT) bağlı gelişen göz tansiyonu ve intrakranial basınç artışını geri çevirdiği, her iki basıncı azalttığı görülmüştür. MG'ye bağlı sefalik sıvı kaymasının etkilerini azaltmak için kullanılan bir diğer yöntem ise venokonstriktif sıkı manşon yöntemidir. Buradaki amaç LBNP yönteminde olduğu gibi bacaklardan kalbe venöz dönüşü azaltmaktır.²² Bizim düşüncemiz venöz dönüşü engellemek için uygulanacak basıncın tüm damar boyunca yayılmasını sağlamanın daha fizyolojik olacağı yönündedir.

Uzaydan Dünya'ya dönüş sırasında maruz kalınan 1,2g'ye bağlı gelişen ortostatik hipotansiyona toleransı artırmak amacıyla savaş pilotlarında kullanılan alt ekstremit ve alt abdomene pozitif basınç uygulayan anti-G elbiseleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.⁵⁵

Uzay uçuşu sırasında optik disk ödemi gelişen semptomatik olgulara asetozolamid kullanılmasını öneren araştırmacılar bulunmaktadır. Ancak dehidratasyon ve böbrek taşı gelişimine yatkınlık oluşturmaması, göz tansiyonunu düşürücü etkisi olması dikkate alınmalıdır.⁵⁶

Uzay görevlerinde SEP'lerden korunmak için makul kalınlıktaki konvansiyonel kalkanlar etkili iken GCR'ler yüksek enerjili olduğu için daha kalın pasif kalkanlar veya aktif elektromanyetik alan üreten kalkanlar kullanılmalıdır. Ancak bu yöntemler pratik değildir. Yeterli kalınlıkta olmayan kalkanlar kullanılırsa, GCR'nin kalkandaki atomlarla etkileşime girmesine bağlı oluşan sekonder partiküller mürettebatın sağlığını ilave riske atar. Bu nedenle uzun süreli uzay görevleri için GCR'lerin etkilerini azaltabilecek yöntemler üzerine yapılan çalışmalar önemlidir.

Galaktik kozmik ışınlardan mürettebatı korumak için pasif koruma yöntemlerinden olan alüminyuma ek olarak yüksek hidrojen, karbon (grafit), borik asit (boron) içeren kalkanlar, Ay regolitinin uzay aracının gövdesine yerleştirilmesi veya uzay aracı yakıtının gövde etrafında depolanması gibi yöntemler kullanılabilir.^{2,57,58} Ayrıca su ve likid atıkların esnek metaller arasında depolanması yönteminin, mürettebatı radyasyondan korumak için kullanılabilirliğiyle ilgili çalışmalar yapılmaktadır.^{58,59} Lunar Reconnaissance Orbiter tarafından Ay yüzeyinde düşük oranda manyetik alan içeren bölgelerin tespit edilmesi sonucunda kolonilerin, tesislerin buraya kurulabilmesi olasılığı da değerlendirilmektedir.

Galaktik kozmik ışınlarla bağlı gelişen reaktif oksijen türlerinin zararlı etkilerinden korumak için diyetle ilgili önlemler vitamin A, vitamin C, omega-3, ferik ve hekzasiyanoferrat içeren radiogardase (Prusya mavis) gibi antioksidanlar ve ilaçların kullanılmasıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır.^{60,61,62}

Sonuç

İnsanların uzay şartlarına dayanıklılığını artırmak için ileri araştırmalar gerekmektedir. SANS fizyopatolojisini, radyasyonun dokulara etkisini anlamaya çalışmak sadece uzay

uçuşu yapan insanlara değil Dünya'da gördüğümüz hastalıkların fizyopatolojisini de aydınlatmamıza yardımcı olacaktır. Günümüzde optik sinir beslenmesi, optik sinir etrafındaki BOS dolaşımının mekanizmaları tam olarak bilinmemektedir. MG ortamı bize sıvı dinamiği değiştiğinde neler olabileceğini göstermiştir. Bu araştırmalar optik sinir sıvı ve doku dinamiklerini daha iyi anlamamızı sağlayacağı gibi optik sinir hastalıklarına daha farklı yaklaşmamızı sağlayacaktır.

Hakem Değerlendirmesi: Editörler kurulu dışında olan kişiler tarafından değerlendirilmiştir.

Yazarlık Katkıları

Konsept: B.Ö., G.Ö., Ş.G., Dizayn: B.Ö., G.Ö., Ş.G., Veri Toplama veya İşleme: B.Ö., G.Ö., Ş.G., Analiz veya Yorumlama: B.Ö., G.Ö., Ş.G., Literatür Arama: B.Ö., G.Ö., Ş.G., Yazan: B.Ö., G.Ö., Ş.G.

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Finansal Destek: Yazarlar tarafından finansal destek almadıkları bildirilmiştir.

Kaynaklar

- Alexander DJ, Gibson RC, Hamilton DR, Lee SMC, Mader TH, Otto C, Oubre CM, Pass AE, Platts SH, Scott JM, Smith SM, Stenger MB, Westby CM, Zanello SB. Human Research Program Human Health Countermeasures Element Evidence Report Risk of Spaceflight-Induced Intracranial Hypertension and Vision Alterations. 2012.
- Cucinotta FA, Kim M-HY, Ren L. Evaluating shielding effectiveness for reducing space radiation cancer risks. Radiation Measurements. 2006;41:1173-1185.
- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- Zeitlin C, Hassler DM, Cucinotta FA, Ehresmann B, Wimmer-Schweingruber RF, Brinza DE, Kang S, Weigle G, Böttcher S, Böhm E, Burmeister S, Guo J, Köhler J, Martin C, Posner A, Rafkin S, Reitz G. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. Science. 2013;340:1080-1084.
- Hassler DM, Zeitlin C, Wimmer-Schweingruber RF, Ehresmann B, Rafkin S, Eigenbrode JL, Brinza DE, Weigle G, Böttcher S, Böhm E, Burmeister S, Guo J, Köhler J, Martin C, Reitz G, Cucinotta FA, Kim MH, Grinspoon D, Bullock MA, Posner A, Gómez-Elvira J, Vasavada A, Grotzinger JP. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover. Science. 2014;343:1244797.
- Zhang S, Wimmer-Schweingruber RF, Yu J, Wang C, Fu Q, Zou Y, Sun Y, Wang C, Hou D, S. B. I., Burmeister S, Seimetz L, Schuster B, Knierim V, Shen G, Yuan B, Lohf H., Guo J, X. Z., Freiherr von Forstner JL, Kulkarni SR, Xu H, Xue C, Li J, Zhang Z, Zhang H, & Berger T, M. D., Hellweg CE, Hou X, Cao J, Chang Z, Zhang B, Chen Y, Geng H, Quan Z. First measurements of the radiation dose on the lunar surface. Sci. Adv. 2020;6:eaa1334.
- Cucinotta FA. NASA's Permissible Exposure Limits, NASA Space Flight Human-System Standard Radiation risk acceptability and limitations. Washington DC2010: 5-6.
- Charman WN, Dennis JA, Fazio GG, Jelley JV. Visual sensations produced by single fast particles. Nature. 1971;230:522-524.
- Duntley SQ, Austin RW, Taylor JH, Harris JH. Experiment S-8/D-13, Visual Acuity and Astronaut Visibility. 1966;121:329.
- Narici L, Bidoli V, Casolino M, De Pascale MP, Furano G, Morselli A, Picozza P, Reali E, Sparvoli R, Licoccia S, Romagnoli P, Traversa E, Sannita WG, Loizzo A, Galper A, Khodarovich A, Korotkov MG, Popov A, Vavilov N, Avdeev S, Salnitskii VP, Shevchenko OI, Petrov VP, Trukhanov KA, Boezio

- M, Bonvicini W, Vacchi A, Zampa N, Battiston R, Mazzenga G, Ricci M, Spillantini P, Castellini G, Carlson P, Fuglesang C. ALTEA: anomalous long term effects in astronauts. A probe on the influence of cosmic radiation and microgravity on the central nervous system during long flights. *Adv Space Res.* 2003;31:141-146.
11. Mathis T, Vignot S, Leal C, Caujolle JP, Maschi C, Mauget-Fajssse M, Kodjikian L, Baillif S, Herault J, Thariat J. Mechanisms of phosphores in irradiated patients. *Oncotarget.* 2017;8:64579-64590.
12. Newman F, Asadi-Zeydabadi M, Durairaj VD, Ding M, Stuhr K, Kavanagh B. Visual sensations during megavoltage radiotherapy to the orbit attributable to Cherenkov radiation. *Med Phys.* 2008;35:77-80.
13. Fuglesang C, Narici L, Picozza P, Sannita WG. Phosphores in low earth orbit: survey responses from 59 astronauts. *Aviat Space Environ Med.* 2006;77:449-452.
14. Avdeev S, Bidoli V, Casolino M, De Grandis E, Furano G, Morselli A, Narici L, De Pascale MP, Picozza P, Reali E, Sparvoli R, Boezio M, Carlson P, Bonvicini W, Vacchi A, Zampa N, Castellini G, Fuglesang C, Galper A, Khodarovich A, Ozerov Y, Popov A, Vavilov N, Mazzenga G, Ricci M, Sannita WG, Spillantini P. Eye light flashes on the Mir space station. *Acta Astronaut.* 2002; 50:511-525.
15. Narici L, De Martino A, Brunetti V, Rinaldi A, Sannita W, Paci MJRM. Radicals excess in the retina: a model for light flashes in space. 2009;44:203-205.
16. Lipman RM, Tripathi BJ, Tripathi RC. Cataracts induced by microwave and ionizing radiation 1988;33:200-210.
17. Belkacémi Y, Touboul E, Méric JB, Rat P, Warnet JM. Cataracte radio-induite: aspects physiopathologiques, radiobiologiques et cliniques. *Cancer/ Radiother* 2001;5:397-412.
18. Chylack LT, Feiveson AH, Peterson LE, Tung WH, Wear ML, Marak LJ, Hardy DS, Chappell LJ, Cucinotta FA. NASCA report 2: Longitudinal study of relationship of exposure to space radiation and risk of lens opacity. *Radiat Res.* 2012;178:25-32.
19. Little MP, Cahoon EK, Kitahara CM, Simon SL, Hamada N, Linet MS. Occupational radiation exposure and excess additive risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists. *Occup Environ Med.* 2020;77:1-8.
20. Pandiarajan M, Hargens AR. Ground-Based Analogs for Human Spaceflight. *Front Physiol.* 2020;11:716.
21. Gharib C, Hughson RL. Fluid and electrolyte regulation in space. *Adv Space Biol Med.* 1992;2:113-130.
22. Huang AS, Stenger MB, Macias BR. Gravitational Influence on Intraocular Pressure: Implications for Spaceflight and Disease. *J Glaucoma.* 2019;28:756-764.
23. Aleci C. From international ophthalmology to space ophthalmology: the threats to vision on the way to Moon and Mars colonization. *Int Ophthalmol.* 2020;40:775-786.
24. Pietrzyk RA, Jones JA, Sams CF, Whitson PA. Renal stone formation among astronauts. *Aviat Space Environ Med.* 2007;78:A9-13.
25. Mader TH, Gibson CR, Pass AF, Kramer LA, Lee AG, Fogarty J, Tarver WJ, Dervay JP, Hamilton DR, Sargsyan A, Phillips JL, Tran D, Lipsky W, Choi J, Stern C, Kuyumjian R, Polk JD. Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology.* 2011;118:2058-2069.
26. Mader TH, Gibson CR, Hart SE, Lee AG. Asymmetric Papilledema in Idiopathic Intracranial Hypertension: Comment. *J Neuroophthalmol.* 2016;36:111-112.
27. Mader TH, Gibson CR, Otto CA, Sargsyan AE, Miller NR, Subramanian PS, Hart SE, Lipsky W, Patel NB, Lee AG. Persistent Asymmetric Optic Disc Swelling After Long-Duration Space Flight: Implications for Pathogenesis. *J Neuroophthalmol.* 2017;37:133-139.
28. Dailey RA, Mills RP, Stimpac GK, Shults WT, Kalina RE. The natural history and CT appearance of acquired hyperopia with choroidal folds. *Ophthalmology.* 1986;93:1336-1342.
29. Sibony PA, Kupersmith MJ, Feldon SE, Wang JK, Garvin M. Retinal and Choroidal Folds in Papilledema. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2015;56:5670-5680.
30. Newell FW. Choroidal folds. The seventh Harry Searls Gradle Memorial lecture. *Am J Ophthalmol.* 1973;75:930-942.
31. Chiquet C, Custaud MA, Le Traon AP, Millet C, Gharib C, Denis P. Changes in intraocular pressure during prolonged (7-day) head-down tilt bedrest. *J Glaucoma.* 2003;12:204-208.
32. Draeger J, Schwartz R, Groenhoff S, Stern C. Self-tonometry under microgravity conditions. *Clin Investig.* 1993;71:700-703.
33. Mader TH, Gibson CR, Caputo M, Hunter N, Taylor G, Charles J, Meehan RT. Intraocular pressure and retinal vascular changes during transient exposure to microgravity. *Am J Ophthalmol.* 1993;115:347-350.
34. Mader TH, Taylor GR, Hunter N, Caputo M, Meehan RT. Intraocular pressure, retinal vascular, and visual acuity changes during 48 hours of 10 degrees head-down tilt. *Aviat Space Environ Med.* 1990;61:810-813.
35. Friberg TR, Sanborn G, Weinreb RN. Intraocular and episcleral venous pressure increase during inverted posture. *Am J Ophthalmol.* 1987;103:523-526.
36. Shinojima A, Iwasaki K, Aoki K, Ogawa Y, Yanagida R, Yuzawa M. Subfoveal choroidal thickness and foveal retinal thickness during head-down tilt. *Aviat Space Environ Med.* 2012; 83:388-393.
37. Manko OM, Smoleevsky AE, Tomilovskaya ES, Kozlovskaya IB. Effect of 5-day dry immersion on eye hydrodynamics. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia).* 2019;V53,π5,22-28.
38. Marshall-Goebel K, Stevens B, Rao CV, Suarez JI, Calvillo E, Arbeille P, Sangi-Haghepeykar H, Donoviel DB, Mulder E, Bershad EM. Internal Jugular Vein Volume During Head-Down Tilt and Carbon Dioxide Exposure in the SPACECOT Study. *Aerospace Med Hum Perform.* 2018;89:351-356.
39. Karina Marshall-Goebel K, Laurie SS, Alferova IV. Assessment of Jugular Venous Blood Flow Stasis and Thrombosis During Spaceflight. *JAMA Netw Open.* 2019;2:e1915011.
40. Förstermann U. Nitric oxide and oxidative stress in vascular disease. *Pflugers Arch.* 2010;459:923-939.
41. Zwart SR, Gibson CR, Mader TH, Ericson K, Ploutz-Snyder R, Heer M, Smith SM. Vision changes after spaceflight are related to alterations in folate- and vitamin B-12-dependent one-carbon metabolism. *J Nutr.* 2012;142:427-431.
42. Giuseppe V, Wall M, Siegel PZ, Rojas PB. Symptoms and disease associations in idiopathic intracranial hypertension (pseudotumor cerebri): a case-control study. *Neurology.* 1991;41:239-244.
43. Bidot S, Bruce BB, Saindane AM, Newman NJ, Biousse V. Asymmetric papilledema in idiopathic intracranial hypertension. *J Neuroophthalmol.* 2015;35:31-36.
44. Mader TH, Gibson CR, Pass AF, Lee AG, Killer HE, Hansen HC, Dervay JP, Barratt MR, Tarver WJ, Sargsyan AE, Kramer LA, Riascos R, Bedi DG, Pettit DR. Optic disc edema in an astronaut after repeat long-duration space flight. *J Neuroophthalmol.* 2013;33:249-255.
45. Killer HE, Jaggi GP, 2 Flammer J, Miller NR, Huber AR, Mironov A. Cerebrospinal fluid dynamics between the intracranial and the subarachnoid space of the optic nerve. Is it always bidirectional? *Brain.* 2007;130:514-520.
46. Mesa-Gutiérrez JC, Quiñones SM, Ginebreda JA. Optic nerve sheath meningocele. *Clin Ophthalmol.* 2008;2:661-668.
47. Bakbak B, Dönmez H, Kansu T, Kiratli H. Dural ectasia of the optic nerve sheath: is it always benign? *Eye Brain.* 2009;1:5-7.
48. Mathieu E, Gupta N, Ahari A, Zhou X, Hanna J, Yücel YH. Evidence for Cerebrospinal Fluid Entry Into the Optic Nerve via a Glymphatic Pathway. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2017;58:4784-4791.
49. Wostyn P, Killer HE, De Deyn PP. Glymphatic stasis at the site of the lamina cribrosa as a potential mechanism underlying open-angle glaucoma. *Clin Exp Ophthalmol.* 2017;45:539-547.
50. Thornton W, Bonato F. Cephalic Fluid Dynamics and Ocular Changes in Weightlessness. *The Human Body and Weightlessness*; Springer. 2017:99-120.
51. Hargens AR, Bhattacharya R, Schneider SM. Space physiology VI: exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight. *Eur J Appl Physiol.* 2013;113:2183-2192.

52. Clément G. International roadmap for artificial gravity research. NPJ Microgravity. 2017;3:29.
53. Gruber K, Seyedmadani K, Torin C. The Turbolift: Linear Sled Hybrid Artificial Gravity Concept 2018 NASA Innovative Advance Concepts (NIAC) Phase I Final Report NNX17AJ77G.
54. Macias BR, Liu JH, Grande-Gutierrez N, Hargens AR. Intraocular and intracranial pressures during head-down tilt with lower body negative pressure. *Aerosp Med Hum Perform.* 2015;86:3-7.
55. Lee SMC, Ribeiro LC, Laurie SS, Feiveson AH, Kitov VV, Kofman IS, Macias BR, Rosenberg M, Rukavishnikov IV, Tomilovskaya ES, Bloomberg JJ, Kozlovskaya IB, Reschke MF, Stenger MB Efficacy of Gradient Compression Garments in the Hours After Long-Duration Spaceflight. *Front. Physiol.* 2020;11:784.
56. Taibbi G, Cromwell RL, Kapoor KG, Godley BF, Vizzeri G. The effect of microgravity on ocular structures and visual function: a review. *Surv Ophthalmol.* 2013;58:155-163.
57. Özdemir T, Akbay I, Uzun H, Reyhancan IA. Neutron shielding of EPDM rubber with boric acid: mechanical, thermal properties and neutron absorption tests. *Progress in Nuclear Energy.* 2016;89:102-109.
58. Ruhlmann S. The FLARE Suit: A protection against solar radiation in space. Degree project in mechanical engineering, second cycle, 30 credits, Stockholm, Sweden 2019.
59. Baiocco G, Giraudo M, Bocchini L, Barbieri S, Locantore I, Brussolo E, Giacosa D, Meucci L, Steffenino S, Ballario A, Barresi B, Barresi R, Benassai M, Ravagnolo L, Narici L, Rizzo A, Carrubba E, Carubia F, Neri G, Crisconio M, Piccirillo S, Valentini G, Barbero S, Giacci M, Lobascio C, Ottolenghi A. A water-filled garment to protect astronauts during interplanetary missions tested on board the ISS. *Life Sci Space Res (Amst).* 2018;18:1-11.
60. Kennedy AR, Weissman D, Sanzari JK, Krigsfeld GS, Wan XS, Romero-Weaver AL, Diffenderfer ES, Lin L, Cengel K. Acute effects of solar particle event radiation. *J Radiat Res.* 2014;55:i66-i67.
61. Langell J, Jennings R, Clark J, Ward JB. Pharmacological agents for the prevention and treatment of toxic radiation exposure in spaceflight. *Aviat Space Environ Med.* 2008;79:651-660.
62. Wambi C, Sanzari J, Wan XS, Nuth M, Davis J, Ko YH, Sayers CM, Baran M, Ware JH, Kennedy AR. Dietary antioxidants protect hematopoietic cells and improve animal survival after total-body irradiation. *Radiat Res.* 2008;169:384-396.