



T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**3,5 GHz RF RADYASYON MARUZİYETİNİN ÜREME SİSTEMİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ: KOENZİM Q10' UN KORUYUCU
POTANSİYELİ**

Fizyoterapist Seval YILDIRIM
TIP FAKÜLTESİ BİYOFİZİK ANABİLİM DALI
(BİYOFİZİK PROGRAMI)
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Hava BEKTAŞ

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3,5 GHz RF RADYASYON MARUZİYETİNİN ÜREME SİSTEMİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ: KOENZİM Q10' UN KORUYUCU
POTANSİYELİ**

Fizyoterapist Seval YILDIRIM
TIP FAKÜLTESİ BİYOFİZİK ANABİLİM DALI
(BİYOFİZİK PROGRAMI)
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Hava BEKTAŞ

VAN-2025

Bu araştırma Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından TYL-2024-11068 numaralı proje olarak desteklenmiştir.

KABUL VE ONAY



ETİK BEYAN

T.C.

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Yüksek Lisans tezi olarak hazırlayıp sunduğum “3.5 GHz RF Radyasyon Maruziyetinin Üreme Sistemi Üzerindeki Etkileri: Koenzim Q10’ un Koruyucu Potansiyeli” başlıklı tezim; bilimsel ahlak ve değerlere uygun olarak tarafımdan yazılmıştır. Tezimin fikir/hipotezi tümüyle tez danışmanım ve bana aittir. Tezde yer alan deneysel çalışma/araştırma tarafımdan yapılmış olup, tüm cümleler, yorumlar bana aittir. Bu tezdeki bütün bilgiler akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak hazırlanıp, bu kural ve ilkeler gereği, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce ve sonuçlara atıf yapılmış ve kaynak gösterilmiştir.

Yukarıda belirtilen hususların doğruluğunu beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Seval YILDIRIM

Tarih: 05.05.2025

İmza:

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca en büyük şansım olan, her daim desteğini hissettiğim, yeri geldiğinde bir abla gibi davranıp arkamda duran hem akademisyenliğini hem insanlığını örnek aldığım çok değerli danışanım Doç. Dr. Hava BEKTAŞ hocama çok teşekkür ederim. Öğrettiği her şey için minnettarım.

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi öğretim üyeleri Doç. Dr. Tahir Çakır, Doç. Dr. Kenan Yıldızhan, Doç. Dr. Fikret Altındağ, Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Şeker ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Çakır hocalarıma, akademik gelişimime sağladıkları katkılar ve destekleri için; laboratuvar ortamındaki yardımları için ise Orhan Aslan'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi, bu zorlu süreçte de yanımda olan, sabrıyla, sevgisiyle ve desteğiyle bana güç veren canım eşim Ömer YILDIRIM' a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Her zaman inancını hissettirdiğin, kararlılıkla yanımda durduğun, beni anlayışla karşıladığın için sana minnettarım.

Her daim yanımda olduklarını hissettiren, moral ve destekleriyle bu süreci kolaylaştıran değerli DEMİR ve YILDIRIM ailelerime de şükranlarımı sunuyorum.

Güzel kızlarım İpek YILDIRIM ve İdil YILDIRIM. Annenizin yokluğuna sessizce katlandığınız, küçük kalplerinizle büyük sabır gösterdiğiniz için sizlere teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmama (TYL-2024-11068 numaralı proje ile) maddi olarak destek sağlayan Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

ÖZET

Seval YILDIRIM. 3.5 GHz RF Radyasyon Maruziyetinin Üreme Sistemi Üzerindeki Etkileri: Koenzim Q10' Un Koruyucu Potansiyeli, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyofizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Van, 2025. Bu tez çalışmasında, 5G kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 3.5 GHz frekansındaki radyo frekansı (RF) radyasyonunun erkek sıçanlarda üreme sistemi üzerindeki biyolojik etkileri değerlendirilmiş ve Koenzim Q10 (CoQ10) takviyesinin bu etkiler üzerindeki olası koruyucu rolü araştırılmıştır. Çalışmada, sıçanlar dört gruba ayrılmış (kontrol, RF, koenzim Q10, RF+ koenzim Q10) ve RF maruziyeti 30 gün süreyle günde 2 saat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Maruz kalan tüm vücut SAR değeri 0.006879 W/kg, testis dokusuna özgü SAR değeri ise 0.000598 W/kg olarak hesaplanmıştır. Hormon analizleri (LH, FSH, testosteron), testiküler dokuya ait oksidatif stres belirteçleri (MDA, TOS, TAS, GSH) ve histopatolojik bulgular detaylı biçimde değerlendirilmiştir. RF grubunda testosteron, LH ve FSH düzeylerinde anlamlı düşüş; MDA ve TOS düzeylerinde ise belirgin artış gözlenmiştir. Histopatolojik olarak seminifer tübül yapısında bozulma ve Johnsen skorunda düşüş saptanmıştır. Koenzim Q10 uygulaması, özellikle testosteron düzeyinin korunması, antioksidan parametrelerin iyileştirilmesi ve histolojik bütünlüğün desteklenmesi açısından anlamlı katkılar sunmuştur. Bu bulgular, düşük SAR değerlerinde dahi RF maruziyetinin erkek üreme sistemi üzerinde biyolojik etkiler oluşturabileceğini ve koenzim Q10' un bu etkileri hafifletme potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, elektromanyetik alan maruziyetine karşı bireysel koruma stratejilerinin önemine ve antioksidan temelli yaklaşımların gelecekteki terapötik uygulamalarda değerlendirilmesi gerekliliğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: 3,5 GHz, Koenzim Q10, Oksidatif stres, Radyo frekans radyasyon, Testis.

ABSTRACT

Seval YILDIRIM. The Effects of 3.5 GHz Radiofrequency Radiation Exposure on the Male Reproductive System: The Protective Potential of Coenzyme Q10, Van Yüzüncü Yıl University, Institute of Health Sciences, Department of Biophysics, Master's Thesis, Van, 2025. In this thesis, the biological effects of 3.5 GHz radiofrequency (RF) radiation commonly used in 5G wireless communication systems on the male reproductive system of rats were evaluated, and the potential protective role of Coenzyme Q10 (CoQ10) supplementation against these effects was investigated. Rats were divided into four groups (Control, RF, CoQ10, RF+CoQ10), and RF exposure was applied for 2 hours daily over 30 days. The calculated whole-body SAR value was 0.006879 W/kg, and the testis-specific SAR value was 0.000598 W/kg. Hormonal analyses (LH, FSH, testosterone), oxidative stress markers (MDA, TOS, TAS, GSH) in testicular tissue, and histopathological findings were comprehensively evaluated. The RF group exhibited significant reductions in serum testosterone, LH, and FSH levels, along with marked increases in MDA and TOS levels. Histopathologically, degeneration of the seminiferous tubules and a decline in the Johnsen score were observed. CoQ10 supplementation contributed meaningfully to the preservation of testosterone levels, improvement in antioxidant parameters, and maintenance of testicular structural integrity. These findings demonstrate that RF exposure, even at low SAR levels, may exert biologically significant effects on the male reproductive system, and that CoQ10 possesses potential protective properties against such damage. The results underscore the importance of individual protection strategies against electromagnetic field exposure and suggest that antioxidant-based approaches should be considered for future therapeutic applications.

Keywords: 3.5 GHz, Coenzyme Q10, Radiofrequency radiation, Oxidative stress, Testis,

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	II
ETİK BEYAN.....	III
TEŞEKKÜR.....	IV
ÖZET	V
ABSTRACT.....	VI
İÇİNDEKİLER	VII
KISALTMALAR.....	IX
TABLolar LİSTESİ.....	XI
ŞEKİLLER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Elektromanyetik Alanlar	3
2.1.1. Elektromanyetik spektrum	4
2.2. Radyofrekans Radyasyon.....	7
2.2.1. RF radyasyonunun biyolojik etkileri.....	8
2.2.2. Elektromanyetik kirlilik	9
2.3. RF Radyasyonun Erkek Üreme Sağlığı Üzerindeki Etkileri.....	11
2.4. Erkek Üreme Sistemi	15
2.5. Oksidatif Stres.....	18
2.5.1. Oksidatif stresin testis üzerinde etkileri	19
2.6. Koenzim Q10	20
2.6.1. Koenzim Q10' un erkek üreme sağlığı üzerindeki etkileri	21
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	25
3.1. Deney Hayvanları.....	25
3.1.1. Gruplandırma ve uygulama programı	25
3.1.2. Deneyin sonlandırılması ve örneklerin alınması.....	26
3.2. Homojenizasyon ve ELİZA Testleri	27
3.3. SAR Simülasyonu	28
3.4. Histopatolojik Yöntem	28
3.4.1. İstatistiksel Analiz.....	269
4. BULGULAR.....	30
4.1. RF ve Koenzim Q10'un Biyokimyasal Parametreler Üzerindeki Etkileri	30

4.1.1. GSH Seviyeleri.....	30
4.1.2. LH Seviyeleri	30
4.1.3. FSH Seviyeleri	31
4.1.4. MDA Seviyeleri	32
4.1.5. TOS Seviyeleri.....	32
4.1.6. TAS Seviyeleri.....	33
4.1.7. Testesteron Seviyeleri	33
4.1.8. Testisin Histopatolojik Bulguları	34
4.1.9. SAR Sonuçları.....	347
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	39
5.1. Tartışma.....	39
5.2. Sonuç.....	55
KAYNAKÇA.....	57
ÖZGEÇMİŞ	70
EKLER.....	71
EK 1. Kesin Sonuç Raporu	71
EK 2. Tez Orjinallik Raporu	72

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
ATP	: Yağ Asitlerinin Adenozin Trifosfat
BCA	: Bicinchoninic Acid
CAT	: Katalaz
CoQ10	: Koenzim Q10
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
DNA	: Deoksiribo Nükleik Asit
ELF	: Çok Düşük Frekanslı Dalgalar
ER-a	: Östrojen Reseptörü Alfa
FIT	: Sonlu İntegrasyon Tekniği
FSH	: Follikül Uyarıcı Hormon
GHz	: Gigahertz
GPx	: Glutasyon Peroksidaz
GSH	: Glutasyon
H₂ O₂	: Hidrojen Peroksite
Hz	: Hertz
IoT	: Nesnelerin İnterneti
IR	: Kızılötesi
KHz	: Kilohertz
LC	: Leyding Hücreleri
LH	: Luteinize Edici Hormon

MDA	: Malondialdehit
MHz	: Megahertz
mtDNA	: Mitokondriyal DNA
O₂	: Süperoksit Anyonu
OH	: Hidroksil Radikali
RF	: Radyo Frekansı
ROS	: Reaktif Oksijen Türlerinin
SAR	: Specific Absorption Rate
SAR	: Spesifik Absorpsiyon Oranı
SC	: Sertoli Hücreleri
SOD	: Süperoksit Dismutaz
TAS	: Toplam Antioksidan Seviyesi
TBS	: Testis Biyopsi Skoru
TOS	: Toplam Oksidan Seviyesi
UV	: Morötesi
W/kg	: Watt/Kilogram
W/m²	: Watt/metrekare
8-OHdG	: 8- Hidroksi-2-Deoksiganin

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.	Testis biyopsi skoru (TBS) değeriendirilmesi	29
-----------------	--	----



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Elektromanyetik dalga.....	3
Şekil 2.	Elektromanyetik spektrum	5
Şekil 3.	Elektromanyetik spektrum	6
Şekil 4.	Elektromanyetik alan maruziyeti ve erkek üreme sağlığı	13
Şekil 5.	Erkek üreme sisteminin temel anatomik.	16
Şekil 6.	Erkek üreme sisteminin genel görünümü (A) ve testis ile epididimis yapılarını detaylı gösteren kesit (B)	16
Şekil 7.	Koenzim Q10' un kimyasal yapısı	20
Şekil 8.	Testislerin Çıkarılması	26
Şekil 9.	Testis dokusundaki GSH düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması	30
Şekil 10.	Gruplara göre serum LH düzeylerinin karşılaştırılması	31
Şekil 11.	Gruplara göre serum FSH düzeylerinin karşılaştırılması.....	31
Şekil 12.	Testis dokusundaki MDA düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması	32
Şekil 13.	Testis dokusundaki TOS düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması	32
Şekil 14.	Testis dokusundaki TAS düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması	33
Şekil 15.	Gruplara göre serum Testesteron düzeylerinin karşılaştırılması.....	33
Şekil 16.	Johnsenin testis biyopsi skoru	34
Şekil 17.	Kontrol grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x	35
Şekil 18.	RF grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x	35
Şekil 19.	RF+Koenzim Q10 grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x	36
Şekil 20.	Koenzim Q10 grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x	36
Şekil 21.	3,5 GHz' de tüm vücut SAR simülasyon sonuçları ve testis bölgesindeki dağılım a) Noktasal SAR dağılımı b) 1g'lık ortalama frontal düzlem SAR dağılımı, c) 10g'lık ortalama frontal düzlem SAR dağılımı.....	37
Şekil 22.	Testis dokusuna özgü SAR simülasyon sonuçları (3.5 GHz) a) Testis dokusundaki en yüksek noktasal SAR dağılımı perspektif görüntüsü b) Testis dokusundaki 1 g'lık ortalama SAR dağılımı perspektif görüntüsü c)	

Testis dokusundaki 10 g'lık ortalama SAR dağılımı perspektif görüntüsü.....	38
---	----



1. GİRİŞ

Tez çalışmasının bilime katkı ve/veya yöntem açısından ne gibi yenilikler getirebileceği belirtilmelidir.

Kablosuz teknolojilerin hızla gelişmesi, modern dünyada iletişim ve veri aktarımında büyük bir değişim yaratmıştır. Özellikle cep telefonlarının ve 5G teknolojisinin yaygın kullanımıyla, bireylerin radyo frekansı (RF) radyasyonuna maruziyet süreleri önemli ölçüde artmıştır. RF radyasyonunun insan sağlığı üzerindeki etkilerine dair yapılan çalışmalar, bu maruziyetin potansiyel sağlık risklerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Günümüzde RF radyasyonunun, özellikle üreme sağlığı üzerindeki olası etkileri bilim dünyasında önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Erkek üreme sistemi, elektromanyetik radyasyona karşı hassas bir yapıya sahip olup, RF maruziyetinin testis dokusunda oksidatif strese ve hormonal dengede bozulmalara yol açabileceği ve bunun da sperm kalitesi ile genel üreme fonksiyonlarını olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir (Yadav ve ark., 2021).

Üreme sağlığı üzerindeki etkileri inceleyen birçok çalışma, elektromanyetik maruziyetin oksidatif stres aracılığıyla biyolojik yapılara zarar verebileceği hipotezini temel almaktadır (Lavranos ve ark., 2012). Oksidatif stres, reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı üretimi sonucu meydana gelir ve hücrel yapıların, özellikle DNA, protein ve lipidlerin hasar görmesine neden olabilir. Bu bağlamda, testis dokusunda oksidatif stresin artışı sperm parametrelerinde bozulmalara, hormonal dengesizliklere ve uzun vadede erkek infertilitesine yol açabilecek bir risk faktörü olarak öne çıkmaktadır. Oksidatif stresin neden olduğu bu biyolojik bozulmaların önlenmesi amacıyla antioksidanların koruyucu potansiyeli son dönemde yoğun ilgi görmüştür.

Koenzim Q10, vücutta doğal olarak bulunan ve enerji üretimi süreçlerinde rol oynayan güçlü bir antioksidandır. Bu molekülün, oksidatif stresin zararlarını hafifleterek hücrelerdeki reaktif oksijen türlerini nötralize ettiği ve dokularda koruyucu bir etki sağladığı bilinmektedir. Özellikle testis dokusunda oksidatif stresin azaltılması ve üreme sağlığının korunması noktasında koenzim Q10'un olumlu etkilerine dair bilimsel kanıtlar artmaktadır (Said ve ark., 2019). Ancak, bu konuda daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 5G teknolojisinin en sık kullanılan frekans bandı olan 3,5 GHz RF radyasyonunun ratların testis dokusu üzerindeki potansiyel etkileri incelenecektir. Ayrıca, koenzim Q10 uygulamasının bu etkileri azaltmadaki potansiyel rolü de değerlendirilecektir. Çalışmanın temel hedefi, RF radyasyonuna karşı biyolojik bir koruma sağlamak amacıyla antioksidan kullanımının faydalarını incelemektir.

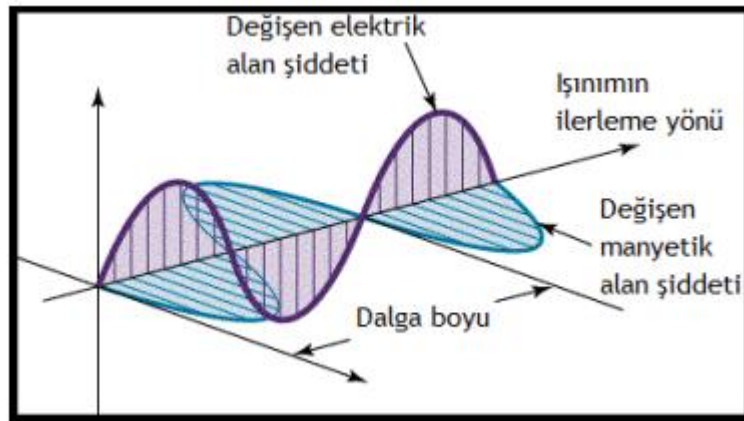
Çalışmanın önemi, RF radyasyonunun erkek üreme sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ve koenzim Q10'un bu zararları önleme konusundaki potansiyel rolünü bilimsel olarak ortaya koyacak olmasıdır. Elektromanyetik radyasyona maruziyetin artışı ile RF'nin biyolojik sistemler üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak ve bu maruziyete karşı koruyucu stratejiler geliştirmek önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Bu tez çalışması, RF radyasyonuna karşı koruyucu önlemlerin geliştirilmesine katkı sunmayı hedeflemekte, ayrıca üreme sağlığını tehdit eden çevresel faktörlere karşı alınabilecek tedbirler konusunda önemli bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

Tezde amaçlanan, 3,5 GHz RF radyasyonunun testis dokusundaki oksidatif stres seviyelerini ve sperm parametrelerindeki değişiklikleri incelemek, ayrıca koenzim Q10 uygulamasının olası olumsuz etkileri azaltmadaki potansiyel rolünü ortaya koymaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Elektromanyetik Alanlar

Elektromanyetik alanlar, elektrik yüklerinin ivmeli hareketiyle oluşan elektrik ve manyetik alanların bir kombinasyonudur. Elektromanyetik alanlar, elektrik ve manyetik alanların birleşimiyle dalga formunda yayılır ve bu dalgalar, enerjiyi boşlukta veya maddesel ortamda taşır. Bu yayılım sürecine elektromanyetik dalga adı verilir. Elektromanyetik dalgalar, elektriksel ve manyetik bileşenlerden oluşur ve bu bileşenler birbirine dik doğrultuda ilerler. Bir elektromanyetik dalgada, elektrik alan bileşeni bir düzlemde salınırken, manyetik alan bileşeni ona dik bir düzlemde salınır. Bu iki alan birbirini sürekli olarak yaratır ve yeniler, böylece enerji taşıyan dalga formunda hareket ederler. Elektromanyetik dalgalar, kaynağından yayıldıkça dalga formunda bir enerji transferi gerçekleştirir ve bu transfer, dalganın frekansına ve dalga boyuna bağlı olarak çeşitli hızlarda ve farklı etkilerle gerçekleşir.



Şekil 1. Elektromanyetik dalga (Doğan Bor, 2017)

Elektromanyetik dalgaların frekansı (f), dalganın saniyede yaptığı titreşim sayısını ifade eder ve hertz (Hz) cinsinden ölçülür. Dalga boyu (λ) ise dalganın iki ardışık tepe noktası arasındaki mesafedir (Şekil 1). Frekans ile dalga boyu ters orantılıdır; frekans arttıkça dalga boyu kısalır. Frekans ve dalga boyu, elektromanyetik dalganın enerjisini ve etkilerini belirlemede kritik rol oynar ve frekans arttıkça dalganın enerjisi artar. Elektromanyetik dalgalar, ışık hızı ile yayılır. Birim alana düşen enerji miktarı elektromanyetik alanın enerji yoğunluğu ile ifade edilir ve watt/metrekare (W/m^2)

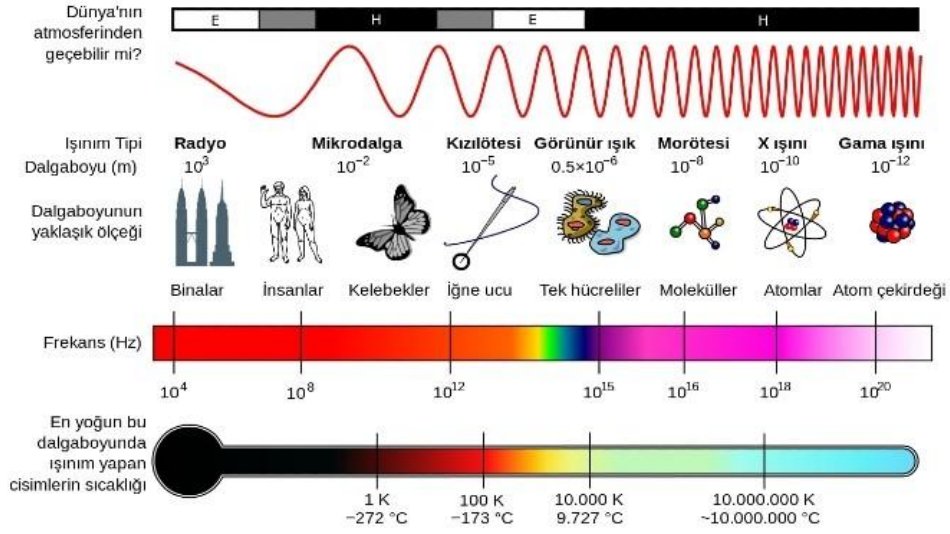
cinsinden ölçülür. Yoğunluk, elektromanyetik alanın gücünü ve biyolojik sistemler üzerindeki potansiyel termal etkilerini değerlendirirken önemli bir parametredir.

Elektromanyetik dalgalar hem doğal hem de insan yapımı kaynaklardan üretilir:

- Doğal kaynaklar: Güneş, yıldızlar, dünya atmosferi ve kozmik olaylar gibi birçok doğal kaynak elektromanyetik dalga üretir. Örneğin, güneşten gelen görünür ışık, ultraviyole ve kızılötesi ışınlar doğal elektromanyetik dalga örnekleridir. Ayrıca, dünyada yıldırım gibi olaylar da elektromanyetik dalgaların oluşmasına neden olabilir.
- İnsan yapımı kaynaklar: Günümüzde kullandığımız birçok teknolojik cihaz elektromanyetik dalgalar üretir. Radyo ve televizyon sinyalleri, cep telefonları, mikrodalga fırınlar, Wi-Fi ağları ve güç hatları insan yapımı elektromanyetik dalgaların yaygın kaynaklarıdır. Bu cihazlar, çeşitli frekans aralıklarında elektromanyetik dalgalar yayarak iletişim, veri aktarımı veya enerji iletimi gibi işlevler sağlar.

2.1.1. Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik spektrum, tüm elektromanyetik radyasyon türlerinin frekans veya dalga boylarına göre sıralandığı bir tayf olup, çok düşük frekanslı dalgalardan (ELF) yüksek enerjili gama ışınlarına kadar geniş bir aralığı kapsar. Spektrum boyunca, elektromanyetik dalgaların frekansları yükseldikçe dalga boyları küçülür, enerjileri ise artar. Elektromanyetik spektrum süreklidir, yani dalga boyları arasında keskin sınırlar yoktur (Şekil 2).



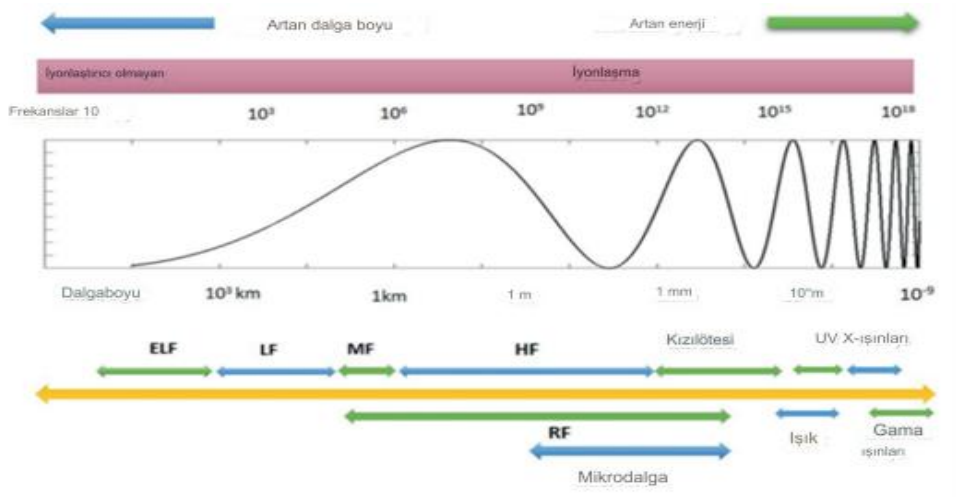
Şekil 2. Elektromanyetik spektrum (Türkiye Uzay Ajansı).

Spektrumun en alt kısmında yer alan ELF, 3 Hz. ile 30 kHz arasında değişen frekansları ile genellikle güç hatları ve elektrikli cihazlar tarafından üretilir. Bir üst seviyede, radyo dalgaları 30 kHz'den 300 GHz'e kadar geniş bir frekans aralığında, iletişim ve radyo yayıncılığı gibi alanlarda kullanılır. Frekansı biraz daha yüksek olan mikrodalgalar, genellikle kısa mesafeli veri iletimi ve yiyeceklerin ısıtılmasında kullanılır ve 1 mm ile 1 m arasında dalga boylarına sahiptir. Kızılötesi (IR) ışınlar, 700 nm ile 1 mm arasında olup, ısı yayılımı ve termal görüntülemeye kullanılır. Spektrumun daha küçük bir bölümünü kaplayan görünür ışık, 400-700 nm dalga boyu aralığında bulunur ve insan gözü tarafından algılanabilir. Morötesi (UV) ışınlar, 10 nm ile 400 nm arasında olup, özellikle güneş ışınlarından gelen radyasyonun bir parçasıdır ve biyolojik dokulara zarar verebilir. Daha yüksek frekansta bulunan X-ışınları, 0.01 nm ile 10 nm arasında değişen dalga boylarıyla tıbbi görüntülemeye kullanılırken, spektrumun en yüksek enerjili dalgaları olan gama ışınları, 0.01 nm'den daha kısa dalga boylarına sahip olup, genellikle nükleer reaksiyonlar ve radyasyon tedavisinde kullanılmaktadır. Spektrumun bu geniş aralığı, her bölümün farklı enerji seviyeleri ve dalga boylarına göre çeşitli uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlar (Allison, 2013).

Elektromanyetik spektrum, dalgaların enerjilerine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana kategoriye ayrılır (Şekil 3). Bu

sınıflandırma, dalgaların biyolojik dokular üzerindeki etkilerine ve sahip oldukları enerji düzeylerine dayanmaktadır:

- İyonlaştırıcı olmayan radyasyon: Düşük enerjiye sahip olup, atomlardan elektron koparabilecek düzeyde bir enerjiye sahip değildir ve bu gruba ELF, radyofrekans dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışınlar ve görünür ışık dahildir. Bu radyasyon türü, moleküler yapıları doğrudan değiştirmede için genellikle daha düşük biyolojik risk taşır. Ancak, uzun süreli ve yoğun maruziyet durumunda termal etkiler ve hücresel işlev bozukluklarına neden olabileceği düşünülmektedir (Kaplan ve ark., 2016).
- İyonlaştırıcı radyasyon: Yüksek enerjiye sahip olup, atomlardan elektron kopararak onları iyonize edebilir. Bu iyonlaştırma işlemi, biyolojik dokularda DNA hasarı, mutasyonlar ve kansere yol açabilecek ciddi biyolojik etkiler yaratabilir. Morötesi ışınlar, X-ışınları ve gama ışınları bu gruba girer ve doğrudan DNA'ya zarar verebilme potansiyeli taşırlar. İyonlaştırıcı radyasyon, özellikle sağlık ve güvenlik açısından daha yüksek riskler barındırdığından kontrollü kullanım gerektirir (Yadav ve ark., 2021).



Şekil 3. Elektromanyetik spektrum (Batool ve ark., 2019).

2.2. Radyofrekans Radyasyon

Radyofrekans (RF) radyasyonu, elektromanyetik spektrumun 30 KHz ile 300 GHz aralığında yer alan bir dalga formudur ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon sınıfına girer. Bu dalgalar, özellikle düşük frekanslı olmaları nedeniyle atomları iyonize etmezler, yani atomlardan elektron koparma kapasitesine sahip değildirler. RF radyasyonunda frekans aralığı geniştir; bu frekans aralığında dalgalar genellikle uzun mesafeli iletişimde, veri iletiminde ve haberleşme sistemlerinde kullanılır. Uzun dalga boyuna sahip RF dalgaları (örneğin radyo dalgaları), düşük frekans nedeniyle geniş alanlarda yayılabilirken, mikrodalga gibi kısa dalga boylarına sahip yüksek frekanslı dalgalar daha kısa mesafelerde etkilidir ve bu yüzden genellikle kısa mesafeli iletişimde veya mikrodalga fırınlarda kullanılır. RF radyasyonun enerji yoğunluğu, kaynak gücüne ve alıcı ile kaynak arasındaki mesafeye bağlı olarak değişir. Yüksek yoğunluklu RF radyasyonu, termal etkiler yaratabilecek enerji seviyesine ulaşabilir; bu da enerji yoğunluğunun biyolojik dokular veya çevre üzerindeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesinde kritik bir parametre olduğunu göstermektedir (Rubtsova ve ark., 2015).

RF radyasyonu, çeşitli teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. En temel kullanımı haberleşme sistemlerindedir; radyo, televizyon yayınları, mobil iletişim (cep telefonları) ve kablosuz internet bağlantıları RF radyasyonu sayesinde sağlanmaktadır. Radyo ve televizyon sinyalleri, geniş alanlara yayılan uzun dalga boylarına sahip RF dalgaları kullanılarak iletilir. Mobil iletişimde kullanılan frekanslar ise daha kısa dalga boylarına sahip olup, veri iletimi ve sesli iletişimde büyük bir rol oynar. Mikrodalga fırınlar, RF radyasyonunun bir başka önemli kullanım alanıdır. Mikrodalga fırınlar, su moleküllerini titreştirerek yiyecekleri ısıtan yüksek frekanslı RF dalgalarını kullanır. Ayrıca, radar sistemleri, RF dalgalarının yansıma özelliklerinden faydalanarak nesnelerin tespiti ve mesafe ölçümü için kullanılır. Bunun yanı sıra, tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda da RF radyasyonu kullanılmaktadır; örneğin, diatermi adı verilen yöntemle dokuların derinlerine ısı iletmek amacıyla fizyoterapi ve cerrahi tedavilerde kullanılır (Batoool ve ark., 2019).

2.2.1. RF radyasyonunun biyolojik etkileri

RF radyasyonu iyonlaştırıcı olmayan bir radyasyon türü olması nedeniyle doğrudan atomları iyonize etme kapasitesine sahip değildir, ancak özellikle uzun süreli ve yüksek yoğunluklu maruziyetlerde önemli biyolojik etkiler yaratabilmektedir. RF radyasyonunun biyolojik dokular üzerindeki etkileri, maruziyetin süresi, frekansı, yoğunluğu ve bireyin fiziksel özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Biyolojik etkiler genellikle iki ana kategoriye ayrılır: termal etkiler ve termal olmayan etkiler.

-Termal Etkiler: RF radyasyonunun en yaygın bilinen biyolojik etkisi termal etkidir. RF dalgaları vücut dokularına nüfuz ettiğinde, bu dalgalar dokular tarafından absorbe edilir ve enerji ısıya dönüştürülür. Bu ısınma, özellikle uzun süreli veya yoğun maruziyetlerde dokularda sıcaklık artışına neden olabilir. Termal etkiler, genellikle RF enerjisinin dokularda nasıl absorbe edildiğini ve ne kadar ısı üretildiğini ölçen Spesifik Absorpsiyon Oranı (SAR) ile değerlendirilir. SAR, birim kütlede ne kadar enerjinin absorbe edildiğini gösterir ve watt/kilogram (W/kg) cinsinden ifade edilir. Yüksek SAR değerleri, dokularda daha fazla ısı birikmesine ve bunun sonucunda hücresel yapının ve fonksiyonların bozulmasına yol açabilir. Vücutta özellikle beyin, karaciğer, kas ve sinir dokuları gibi yüksek iletkenliğe sahip yapılar RF enerjisini daha fazla absorbe edebilir, bu da bu bölgelerde daha belirgin termal etkilere neden olabilir. Aşırı sıcaklık artışı, protein denatürasyonu, hücre ölümüne ve dokularda kalıcı hasarlara yol açabilir (Hernández-Morales ve ark., 2017). Termal Olmayan Etkiler: Termal etkilerin dışında, RF radyasyonunun termal olmayan biyolojik etkileri de araştırılmaktadır. Bu etkiler, RF radyasyonunun ısı üretmeksizin biyolojik sistemlerde neden olduğu değişiklikleri ifade eder. Termal olmayan etkiler, özellikle düşük yoğunluklu ve uzun süreli maruziyetlerde meydana gelebilir ve hücresel metabolizmayı, membran geçirgenliğini, iyon kanallarını ve sinyal iletim yollarını etkileyebilir. Bu tür etkilerin mekanizması henüz tam olarak anlaşılamamış olsa da hücre içi iyon konsantrasyonlarında değişikliklere, oksidatif stresin artmasına ve hücre zarında bozulmalara yol açabileceği öne sürülmektedir (Trosic ve ark., 2012).

2.2.2. Elektromanyetik kirlilik

Elektromanyetik kirlilik, insan yapımı elektromanyetik dalgaların doğal çevreye yayılması sonucu oluşan ve günümüzde giderek artan bir çevre sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektromanyetik dalgalar, doğada da mevcut olmakla birlikte, modern teknolojiler tarafından üretilen yapay elektromanyetik radyasyon seviyeleri, özellikle kentsel alanlarda oldukça yüksektir. Elektrik hatları, radyo ve televizyon vericileri, Wi-Fi modemleri ve cep telefonları gibi cihazlar, sürekli olarak elektromanyetik radyasyon yayarak çevreyi bu dalgalarla doldurur. Bu kirlilik, bireylerin günlük yaşamda sürekli maruz kaldıkları bir unsur haline gelmiştir. Elektromanyetik kirliliğin insan sağlığı üzerindeki etkileri, yayılım gücüne, frekansına ve maruziyet süresine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Özellikle düşük frekanslı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türlerinin uzun süreli maruziyetlerinin potansiyel sağlık riskleri üzerine araştırmalar devam etmektedir (Havas ve ark., 2006).

Yazılı veya sözlü veri iletimini RF dalgaları sağlayan cep telefonları, elektromanyetik kirliliğin en yaygın ve yoğun kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Cep telefonları sadece konuşma sırasında değil, internet kullanımında, mesajlaşmada ve uygulama güncellemeleri sırasında da sürekli olarak baz istasyonlarıyla veri alışverişi yapmakta ve bu esnada RF dalgaları yaymaktadır. Bu durum, cep telefonunu kapatmadığınız sürece bu radyasyona sürekli maruz kalma anlamına gelir. Diğer taraftan, yeni geliştirilen ve tüm dünyada yaygınlaşan 5G teknolojisi, daha yüksek frekans aralıklarında çalışan ve önceki nesillere göre çok daha hızlı veri iletimi sağlayan bir kablosuz iletişim teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır. 5G'nin sunduğu yüksek hız ve düşük gecikme süreleri, daha geniş bant genişliklerinin kullanılmasını ve bunun sonucunda elektromanyetik kirliliğin artmasını beraberinde getirmektedir. 5G, 30 GHz'e kadar çıkan milimetre dalga frekanslarını kullanır, bu da kısa dalga boyları nedeniyle baz istasyonlarının daha sık yerleştirilmesini gerektirir. Dolayısıyla, 5G teknolojisi ile çevremizde çok daha fazla baz istasyonu bulunacak ve bu da bireylerin RF radyasyonuna maruziyetini artıracaktır. Ayrıca, 5G'nin sürekli olarak veri transferi yapması ve IoT (Nesnelerin İnterneti) gibi yeni teknolojilerle birlikte kullanılması, çevremizdeki RF radyasyonu seviyelerinin sürekli yüksek olmasına yol açabilir. Bu durum, elektromanyetik kirliliğin yayılımını daha da artırarak, hem bireylerin maruz kaldığı RF

radasyonu miktarını yükseltecek hem de kirliliğin genel seviyesini önemli ölçüde artıracaktır (Bektaş, 2021).

Cep telefonlarının yaydığı RF radyasyonu, elektromanyetik kirlilik açısından büyük bir endişe kaynağıdır çünkü cihazlar başa, kulağa ve vücuda çok yakın tutulur. Bu durum, RF radyasyonunun doğrudan beyin ve sinir dokuları gibi hassas bölgelerde etkili olmasına neden olabilir. RF radyasyonu, iyonlaştırıcı radyasyon gibi doğrudan DNA hasarına yol açmasa da dokularda termal ve termal olmayan etkiler yaratabilir. Özellikle cep telefonları ile yapılan uzun süreli görüşmeler, baş bölgesindeki dokularda ısınmaya neden olabilir. Termal etkiler, dokuların bu radyasyonu absorbe etmesi sonucu ortaya çıkan sıcaklık artışı ile ilişkilidir. Özellikle beynin ve kulak bölgesinin bu ısıyı absorbe etmesi sonucu termal etkilerin dokularda fonksiyonel bozulmalara yol açabileceği düşünülmektedir (Demsia ve ark., 2004).

Cep telefonlarından yayılan RF radyasyonu aynı zamanda baz istasyonları ile sürekli veri alışverişi sağlamak için düzenli olarak yayılır. Bu, cep telefonunun cebinizdeyken bile sürekli olarak elektromanyetik dalga yayması anlamına gelir. Özellikle cep telefonlarının yoğun kullanıldığı alanlarda (örneğin kentsel bölgeler, kapalı alanlar, toplu taşıma) baz istasyonlarının daha sık yerleştirilmesi, elektromanyetik kirliliğin yoğunluğunu artırmaktadır. Bu cihazların düşük sinyal gücüne sahip alanlarda daha fazla radyasyon yaydığı da bilinmektedir. Çünkü cihaz, sinyali almak için daha fazla enerji kullanır ve bu da yaydığı RF radyasyon miktarını artırır (H  roux ve ark., 2023).

Ayrıca cep telefonlarının sürekli internet bağlantısı ile veri alışverişi yapması, kısacası "her zaman açık" durumda olması, RF maruziyetini artıran bir diğ  r faktördür. Mobil veri ya da Wi-Fi bağlantısının aktif olduğ u durumlarda cep telefonları, sürekli olarak baz istasyonları ve modemler ile iletişim halindedir. Bu süreçte, özellikle akıllı telefonlar, çoklu uygulamaları çalıştırmak ve arka planda veri transferini sürdürmek için sürekli radyo sinyalleri yayar (Lai ve ark., 2022).

RF radyasyonunun biyolojik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu radyasyonun potansiyel olarak oksidatif stres seviyelerini artırmabileceğ ini ve hücresel düzeyde metabolik değ işikliklere neden olabileceğ ini göstermektedir. Cep telefonlarının, özellikle beyin dokusu gibi yüksek iletkenliğ e sahip bölgelerde RF radyasyonunu absorbe etmesi

sonucu, sinir hücrelerinde iyon dengesinde bozulmalar ve hücre sel sinyalleşmenin değişmesi gibi durumlar araştırılmaktadır. Uzun süreli cep telefonu kullanımının, baş ağrısı, uyku bozuklukları ve konsantrasyon eksikliği gibi kısa vadeli semptomlarla ilişkilendirildiği çalışmalar da mevcuttur. Cep telefonları ayrıca gece boyunca başucunda tutulduğunda, uyku kalitesini olumsuz etkileyebilecek düzeyde elektromanyetik kirliliğe yol açabilir. Uyku sırasında cep telefonlarının yaydığı RF radyasyonuna uzun süre maruz kalmak, vücut üzerindeki stres seviyelerini artırabilir ve uyku döngüsünü bozabilir (Hardell ve ark., 2015).

Akıllı telefon teknolojilerindeki ilerleme ile birlikte bu cihazlar günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş olsa da yaydıkları RF radyasyonu elektromanyetik kirliliğin önemli bir kaynağını oluşturmaktadır. Cep telefonlarının sürekli olarak kullanılmasının yarattığı sürekli RF radyasyonu maruziyeti, özellikle uzun vadeli sağlık etkileri konusunda bilimsel araştırmaların odağında yer almaktadır. Bu nedenle, elektromanyetik kirliliğin bireylerin sağlık üzerindeki potansiyel etkilerini en aza indirmek amacıyla, cep telefonlarının kullanım sürelerinin azaltılması, kulaklık veya hoparlör ile kullanım gibi önlemlerin alınması önerilmektedir.

2.3. RF Radyasyonun Erkek Üreme Sağlığı Üzerindeki Etkileri

RF radyasyonun erkek üreme sağlığı üzerindeki etkileri, son yıllarda artan elektromanyetik maruziyetin olası biyolojik sonuçları bağlamında yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (La Vignera ve ark., 2012; Kesari ve ark., 2013; Kesari ve R, 2018; Zha ve ark., 2019; Yadav ve ark., 2021). Ayrıca, her geçen gün üreme sorunları yaşayan çiftlerin sayısında dikkate değer bir artış gözlemlenmektedir. Konu hakkında yapılan araştırma sonuçları, zengin ülkelerde yaşayan çiftlerin yüzde on beşinden fazlası, gebe kalmaya çalışırken zorluklarla karşılaştığını göstermektedir (Wilkes ve ark., 2009). Bu durum, çiftlerin önemli bir kısmının zamanla artan bir şekilde karmaşık ve maliyetli olan destekli üreme tedavilerine ihtiyaç duyacağı anlamına gelmektedir. (Thoma ve ark., 2013).

RF radyasyonu, iyonlaştırıcı olmayan bir formda olmasına rağmen, sperm kalitesi, testis dokusundaki oksidatif stres ve üreme hormonları üzerinde çeşitli etkiler yaratabileceği yönünde bilimsel kanıtlar artmaktadır (Desai ve ark., 2009). Araştırmalar,

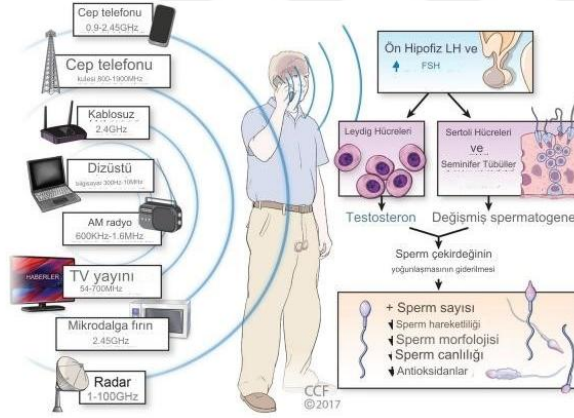
RF radyasyonuna maruziyetin sperm motilitesi ve morfolojisini olumsuz yönde etkileyebileceğini, DNA bütünlüğünde bozulmalara neden olabileceğini ve testis dokusunun oksidatif hasara maruz kalabileceğini öne sürmektedir (Karaman ve ark., 2014). Ayrıca, uzun süreli RF maruziyetinin hormonal dengenin bozulmasına, özellikle testosteron seviyelerinin azalmasına yol açabileceği bildirilmiştir (Shokri ve ark., 2014). Bu çerçevede, RF radyasyonunun erkek üreme sağlığı üzerindeki olası etkilerini daha ayrıntılı incelemek, elektromanyetik kirliliğin insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerini daha iyi anlamak açısından önem arz etmektedir.

Canlı organizmalar tarafından emilen RF enerjisi, maruz kalan bedenin büyüklüğü, maruz kalma süresi ve cihazın konumu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Bu nedenle, baş, gövde ve uzuvlar için maruz kalma standartları farklılık gösterir. İnsanın uzunlamasına eksenine RF alan vektörüne paralel olarak hizalandığında, SAR değeri zirveye ulaşır. Büyük yetişkin bireylerde rezonans emilim frekansı genellikle daha düşük olma eğilimindedir, ancak kısa boylu yetişkinlerde, çocuklarda, bebeklerde ve oturmuş pozisyonundaki bireylerde genellikle daha yüksektir. Telefonun konuşma sırasında başa yakın tutulması veya pantolon cebinde veya testislerle yakın temas halinde saklanması, başta veya testislerde daha yüksek enerji emilim oranlarına yol açar (Agarwal ve ark., 2011). Ayrıca, insan vücudundaki farklı dokuların elektriksel iletkenliği farklı olduğundan, RF enerjisinin emilme hızları da farklılık gösterir (ICNRP, 2010).

İnsan denekler ve hayvan modelleri üzerinde yapılan deneysel araştırmalar, testislerin RF radyasyonuna karşı duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle cep telefonunun konuşma sırasında üreme organlarına yakın tutulması, sperm motilitesi, sperm sayısı, sperm morfolojisi ve apoptoz gibi kritik üreme parametreleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, RF maruziyetinin üreme sağlığı üzerindeki potansiyel risklerini vurgulamakta ve üreme fonksiyonlarının korunması için bu tür maruziyetin azaltılması gerektiğini önermektedir (Agarwal ve ark., 2009; Jonwal ve ark., 2018). Yetişkin erkeklerde mobil telefonlardan kaynaklanan radyasyonun sperm kalitesi üzerindeki etkilerini inceleyen yayınlanmış epidemiyolojik çalışmaların meta-analizleri ve sistemik incelemeler, sperm hareketinde, dayanıklılığında ve/veya miktarında önemli azalmaların, mobil telefon kullanımının derecesiyle yakından

ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Dama ve Bhat, 2013; Adams ve ark., 2014; Kim ve ark., 2021; Yu ve ark., 2021).

Testisler, RF radyasyonuna oldukça duyarlıdır (Xu ve ark., 2008). Yaklaşık 60 yıl önce, mikrodalga radyasyonunun testisler üzerindeki etkileri üzerine ilk çalışma yapılmıştır (Prausnitz ve Sutsskind, 1962). Bundan sonra, birçok çalışma RF radyasyonunun testisler ve spermatogonlar üzerindeki zararlı etkilerini rapor etmiştir. (Agarwal ve ark., 2009; Agarwal ve ark., 2011; Avendano ve ark., 2012; Shokri ve ark., 2015; Jonwal ve ark., 2018). Cep telefonu kullanımının sperm kalitesinde azalmayla ilişkilendirildiği bildirilmiştir. Ayrıca, günlük cep telefonu kullanım süresi ile sperm parametrelerindeki azalma arasında bir ilişki tespit edilmiştir (Agarwal ve ark., 2008).



Şekil 4. Elektromanyetik Alan Maruziyeti ve Erkek Üreme Sağlığı (Kesari KK ve R, 2018).

RF radyasyonunun sperm hareketi, dayanıklılığı ve morfolojisi üzerinde olumsuz etkiler yaratarak erkek infertilitesine yol açabileceği pek çok çalışmada gösterilmiştir. İnsan spermatozoitleri, mobil telefonlar tarafından yayılan 850 MHz radyasyona bir saat boyunca 1.46 W/kg SAR'da maruz bırakıldığında, sperm dayanıklılığında önemli bir azalma gözlenmiş ve bu durum ROS artışı ile ilişkilendirilmiştir (Yadav ve ark., 2021). Benzer şekilde, her gün toplamda 35 gün boyunca (SAR = 0.9 W/kg) mobil telefon frekanslarına maruz kalan sıçanlarda sperm sayısında azalma ve ROS seviyelerinde artış görülmüştür (Kesari ve ark., 2010). Ayrıca, günde toplam altı saat boyunca on dakikalık periyotlar halinde 150 gün boyunca 2575-2635 MHz 4G mobil telefon radyasyonuna maruz kalan sıçanlarda sperm kalitesinde azalma tespit edilmiştir (Yu ve ark., 2020). Farelere haftada 5 gün, günde 12 saat olacak şekilde 905 MHz RF'ye (SAR = 2.2 W/kg)

bir hafta boyunca maruz kalmanın ardından sperm hareketinde azalma, ROS üretiminde artış ve farelerde DNA hasarı rapor edilmiştir (Houston ve ark., 2019). Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, RF' in (900 MHz, günde 4-8 saat, 35 gün) İsviçre albino farelerde erkek germ hücreleri ve sperm morfolojisi üzerinde önemli bir olumsuz etkisi olduğu tespit edilmiştir. Artan germ hücresi hasarı, anormal sperm başları, spermatogenez aşamalarının bozulması, post-meiotik germ hücrelerinin eliminasyonu ve azalan sperm sayısı yan etkiler arasında tespit edilmiştir. Ancak, bu etkilerin bir kısmının sonrasında eski haline geri dönmesi, RF' in farelerdeki germ hücreleri üzerindeki etkilerinin geri alınabilir olduğunu göstermiştir. Bu olumsuz etkiler, RF tarafından indüklenen oksidatif stresle ilişkilendirilmiş ve farelerde DNA hasarına, hücre döngüsü bozukluklarına ve sperm sayısında azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir (Pandey ve ark., 2017).

RF radyasyonunun erkek hormon dengesi ve testis morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemek için de birçok çalışma yürütülmüştür. Örneğin, Andrašková ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen yeni bir çalışmada, gebelik boyunca RF radyasyona maruz bırakılan sıçanlardan elde edilen erkek yavrularda, yaşamlarının 35. gününde incelendiğinde bozulmuş testis gelişimi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Daşdağ ve ark. (2015), erkek sıçanların testisleri üzerinde Wi-Fi kaynaklı RF' ye uzun süre maruz kalmanın etkilerini araştırdıkları çalışmada, baş deformitelerinde artış, testis ve sperm veziküllerinin ağırlığında azalma, seminifer tübüler uzunluk ve tunika albuginea genişliğinde değişiklikler gibi üreme özelliklerinde değişiklikler tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, kablosuz ağ kullanıcılarının RF radyasyonuna uzun süre maruz kalmaktan kaçınmalarını önermektedir. Başka bir araştırmada, Özgüner ve ark. (2005), RF radyasyona maruz kalan ratlarda, seminifer tübüler boyut, germinal epitelyal boyut ve kan testosteron seviyelerinde azalma rapor etmişlerdir. Bu değişiklikler hormonal farklılıklarla ilişkilendirilmiş ancak RF maruziyetinin sperm üretimi veya germinal epitel üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını ifade etmiştir.

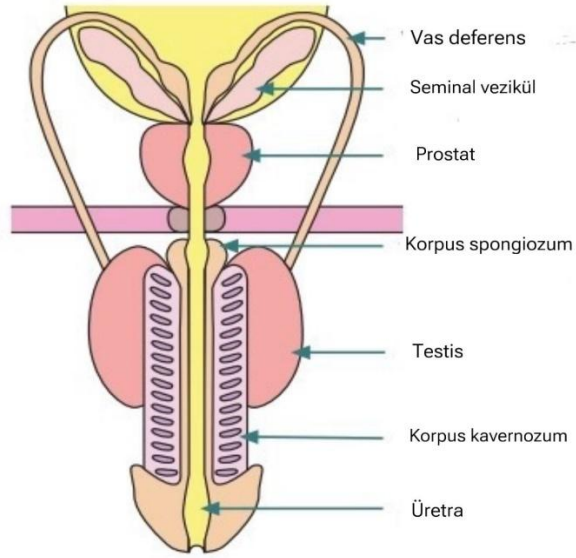
Djeridane ve ark. (2008), cep telefonu kaynaklı RF radyasyonun, 20 sağlıklı erkek gönüllüde hormon seviyelerini nasıl etkilediğini incelediği çalışmada; prolaktin, tiroid uyarıcı hormon, adrenokortikotropin ve testosteronun sirkadiyen desenlerinde değişiklik olmadığı, ancak büyüme hormonu ve kortizolün maruziyet süreleri boyunca önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir. Bununla birlikte, post-maruziyet döneminde herhangi bir

farklılık gözlenmemiş ve 900 MHz RF radyasyonun erkeklerde hormon seviyelerini etkilemediği ifade edilmiştir. Başka bir araştırmada, Jonwal ve ark. (2018), sağlıklı İsviçre albino farelerini, günde iki saat olmak üzere toplam otuz gün boyunca 2,45 GHz RF' ye maruz bırakmıştır. Maruziyet, farelerde katalaz, malondialdehit ve ROS seviyelerini artırırken, glutatyon peroksidazı, testosteron ve süperoksit dismutaz seviyelerini düşürmüştür. Maruz kalan farelerde, ayrıca seminifer tübüllerde histolojik değişiklikler ve kanlarında mikronükleuslar tespit edilmiş, bu da RF maruziyetinin testislerde oksidatif stres oluşturabileceğini ve üreme potansiyelini azaltabileceğini göstermiştir.

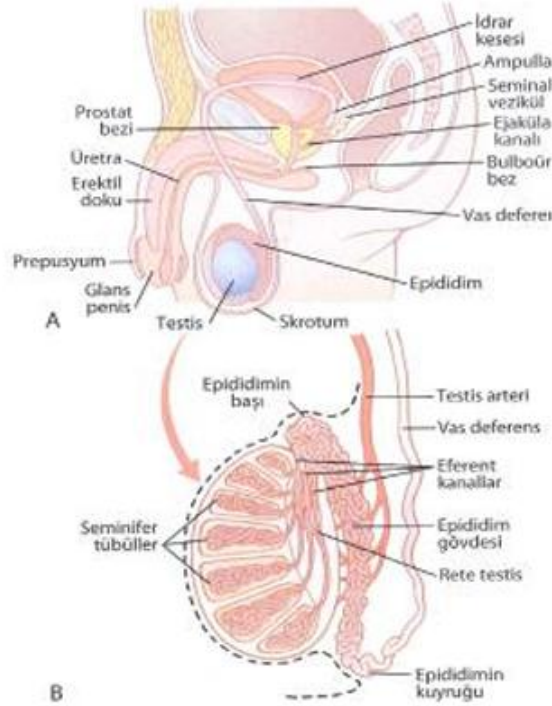
Ancak, bu araştırmalardan elde edilen sonuçlar sıklıkla tutarsızlık ve çeşitlilik göstermektedir. Bu çelişkilerin başlıca nedenleri arasında, kullanılan deneysel düzeneklerin farklılığı, maruziyet sürelerinin değişken olması, RF radyasyonunun gücü ve frekansı gibi faktörlerdeki farklılıklar yer almaktadır. Aynı zamanda, hayvan modelleri ve insan denekler arasındaki biyolojik farklılıklar da bu tutarsız sonuçlara neden olabilir. Araştırmalarda kullanılan materyallerin (örneğin, cep telefonu modelleri, radyasyon kaynakları) çeşitliliği ve maruz kalınan radyasyon dozlarının tam olarak standartlaştırılmaması da elde edilen bulguların karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, deney koşulları (çevresel sıcaklık, stres faktörleri gibi) ve kullanılan ölçüm yöntemlerinin farklılık göstermesi, sonuçların değişken olmasına neden olabilir. Bu nedenle, RF radyasyonunun erkek üreme sağlığı üzerindeki etkilerini daha net ortaya koymak için daha standardize edilmiş ve uzun vadeli çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.4. Erkek Üreme Sistemi

Erkek üreme sistemi, sperm üretimi ve bu spermin kadın üreme sistemine aktarımını sağlayan bir dizi iç ve dış yapıyı içerir (Şekil 5-6). Bu sistem, başlıca testisler, epididimis, vas deferens (meni kanalı), seminal veziküller, prostat bezi ve penis gibi organlardan oluşur (Mawhinney ve Mariotti, 2013). Bu organlar hem hormon üretimi hem de spermin üretimi ve taşınması gibi temel işlevleri yerine getirir. Erkek üreme sistemi hem üreme hem de hormonal fonksiyon taşır ve bu süreçler başlıca testosteron, LH (Luteinize edici hormon) ve FSH (Folikül uyarıcı hormon) gibi hormonların etkisiyle düzenlenir (Basari, 2014).



Şekil 5. Erkek üreme sisteminin temel anatomik yapıları (Mawhinney ve Mariotti, 2013).



Şekil 6. Erkek üreme sisteminin genel görünümü (A) ve testis ile epididimis yapılarını detaylı gösteren kesit (B) (Yalçın ve Saygın, 2016).

Testisler (erbezleri), erkek üreme sisteminin en önemli organları olup, sperm üretiminden ve testosteron salgılanmasından sorumludurlar. Testisler, skrotum adı

verilen bir kesenin içinde yer alır ve vücut sıcaklığından biraz daha düşük bir sıcaklıkta bulunurlar, bu da sperm üretimi için ideal koşulları sağlar. LH' nin testislerdeki Leydig hücrelerini uyarması sonucu testosteron üretimi gerçekleşir. FSH ise testislerdeki Sertoli hücrelerini etkileyerek spermatogenez adı verilen süreçle sperm hücrelerinin olgunlaşmasını sağlar. Üretilen sperm, epididimiste depolanır (O'Donnell ve ark., 2001; Sharma ve ark., 2021). Erkek üreme sistemi hormonların, özellikle LH ve FSH' nin, etkisi altında gelişir ve işler. LH, testosteron üretimini düzenlerken, FSH spermatogenezini destekler. Bu hormonal süreçler, üreme sağlığı için kritik öneme sahiptir ve çevresel faktörler (radyasyon, kimyasallar, sıcaklık gibi) bu süreçleri olumsuz etkileyebilir. Özellikle bu faktörler, sperm üretimi ve kalitesi üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle erkek üreme sağlığını korumak için sistemin hassas yapısının dikkate alınması büyük önem taşır (Wang ve ark., 2020).

Testosteron, erkek üreme sağlığı ve genel vücut fonksiyonları açısından hayati bir hormondur. Leydig hücreleri tarafından üretilen bu hormon, spermatogenez sürecinin düzenlenmesinde kilit rol oynar ve erkek cinsiyet özelliklerinin gelişimini sağlar. Testosteron, sperm üretimini desteklerken, aynı zamanda cinsel dürtüyü, kas ve kemik kütlesinin gelişimini ve vücut kılınmasını da etkiler. Erkeklerin ergenlik döneminde sekonder cinsiyet özelliklerinin (ses kalınlaşması, kas gelişimi) ortaya çıkmasından sorumludur. Ayrıca, testosteron vücut metabolizmasını düzenleyerek enerji seviyelerinin korunmasına ve genel sağlık durumunun iyileştirilmesine katkıda bulunur. Testosteron seviyelerindeki dengesizlikler, düşük sperm üretimi, cinsel istekte azalma, kas kütlesi kaybı ve genel sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, testosteronun dengeli bir şekilde üretilmesi, erkek üreme sistemi ve genel sağlık için büyük önem taşır (Finkelstein ve ark., 2013).

Epididimis, testislerin arkasında yer alır ve spermin olgunlaşma sürecinin devam ettiği kıvrımlı bir kanaldır. Olgun sperm, burada depolanarak vas deferens yoluyla ejakülasyon sırasında dışarı taşınmak üzere hazırlanır. Vas deferens (meni kanalı), sperm hücrelerini seminal veziküllerle birleştirir ve prostat bezine iletir (Jannini ve ark., 2002). Seminal veziküller ve prostat bezi, spermle karışan seminal sıvıları üretir. Bu sıvılar, sperm hücrelerini korur ve taşınmalarını sağlar. Prostat bezinin salgıladığı sıvılar ayrıca spermin kadın üreme sisteminde hayatta kalma süresini uzatarak döllenme olasılığını

artırır (Verze ve ark., 2016). Erkek üreme sisteminin dış organlarından biri olan penis, spermin üreme kanalı yoluyla dışarı atılmasını sağlar. Ejakülasyon sırasında sperm hücreleri, seminal sıvılarla birlikte üretra üzerinden dışarı atılır (Giuliano, 2011).

2.5. Oksidatif Stres

Oksidatif stres, biyolojik sistemlerde ROS ve serbest radikallerin üretimi ile hücrel antioksidan savunma mekanizmaları arasındaki dengenin bozulması sonucu meydana gelen bir durumdur (Betteridge, 2000). ROS, oksijen içeren ve kimyasal olarak oldukça reaktif olan moleküller olup, serbest radikaller de dahil olmak üzere hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$), süperoksit anyonu ($\text{O}_2^{\bullet-}$) gibi çeşitli reaktif bileşenleri kapsar. Serbest radikaller ise, genellikle eşleşmemiş bir elektrona sahip olan ve bu nedenle yüksek reaktivite gösteren kimyasal türlerdir. Bu moleküller, metabolik süreçler sırasında tesadüfi olarak üretilmekte veya bağışıklık sistemi yanıtlarının bir parçası olarak oluşmaktadır. Oksidatif stres, hücrelerdeki lipitler, proteinler ve DNA üzerinde hasara yol açarak hücrel işlevlerin bozulmasına ve çeşitli hastalıkların patogeneze katkıda bulunabilir (Özcan ve ark., 2015). Bu bağlamda, antioksidan savunma mekanizmalarının etkinliği, oksidatif stresin yönetilmesi ve hücrel hasarın önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Antioksidan savunma sistemi, hücrelerin ROS ve serbest radikallerin neden olduğu oksidatif hasarı önlemek ve dengelemek için geliştirdiği bir dizi enzimatik ve enzimatik olmayan mekanizmadan oluşur. Bu sistemin temel bileşenleri, ROS' un toksik etkilerini nötralize eden enzimler ve moleküllerdir. Enzimatik antioksidanlar arasında süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve glutatyon peroksidaz (GPx) yer alır. Süperoksit dismutaz, süperoksit anyonunu ($\text{O}_2^{\bullet-}$) hidrojen peroksite (H_2O_2) ve oksijene (O_2) dönüştürürken, katalaz ve glutatyon peroksidaz, bu hidrojen peroksiti suya indirger ve böylece ROS'un hücrelerdeki zararlı etkilerini bertaraf eder. Enzimatik olmayan antioksidanlar ise C vitamini (askorbik asit), E vitamini (tokoferol), glutatyon, flavonoidler ve karotenoidler gibi serbest radikalleri doğrudan nötralize edebilen moleküllerden oluşur (Haida ve Hakiman, 2019).

Antioksidan savunma sisteminin işlevi, hücrel redoks dengesini sağlamak ve oksidatif stresin neden olduğu hücrel hasarı önlemek üzerine kuruludur. Bu sistemin

yetersiz çalışması durumunda, ROS ve serbest radikallerin birikmesi lipid peroksidasyonu, protein oksidasyonu ve DNA hasarı gibi geri dönüşü olmayan hücresel tahribatlara yol açabilir (Udensi ve Tchounwou, 2014; Kurutaş, 2016). Bu nedenle, vücudun antioksidan kapasitesinin korunması, oksidatif stresle ilişkili hastalıkların önlenmesinde ve hücresel sağlığın sürdürülmesinde büyük önem taşır.

2.5.1. Oksidatif stresin testis üzerinde etkileri

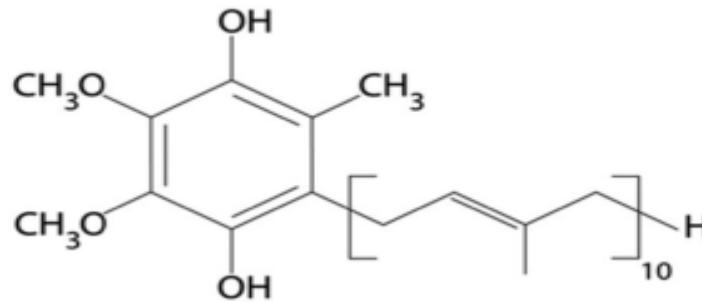
Oksidatif stres, erkek üreme sağlığı üzerinde önemli olumsuz etkilere sahip bir biyokimyasal süreçtir. Erkek üreme sistemi, özellikle spermatogenez ve testosteron üretimi gibi temel işlevlerde, oksidatif stresin neden olduğu zararlı etkilerden ciddi şekilde etkilenir. Sperm hücreleri, doğal olarak düşük düzeyde ROS üretir ve bu türler, spermin olgunlaşması, kapasitasyon ve akrozom reaksiyonu gibi süreçlerde önemli rol oynar. Ancak, aşırı ROS üretimi, sperm hücrelerinde oksidatif hasara yol açarak hücresel yapıların bozulmasına neden olur. Oksidatif stresin spermde lipid peroksidasyonu, DNA hasarı ve protein oksidasyonu gibi biyokimyasal süreçleri tetiklediği bilinmektedir. Bu durum, spermin motilitesi ve morfolojisi gibi fonksiyonel özelliklerini olumsuz etkileyerek erkek doğurganlığını azaltabilir (Walke ve ark., 2023).

Spermin plazma membranı, yüksek doymamış yağ asitleri içermesi nedeniyle lipid peroksidasyonuna oldukça duyarlıdır. Bu peroksidasyon, sperm hücre zarının yapısal bütünlüğünü bozarak spermin hareketliliğini ve yumurtayı dölleme kapasitesini azaltır (Tremellen, 2008). Ayrıca, spermde DNA hasarı, oksidatif stresin bir sonucu olarak ortaya çıkabilir ve bu durum, embriyo gelişimi üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Oksidatif stres sonucu oluşan DNA kırılmaları ve oksidatif DNA modifikasyonları, spermde genetik materyalin stabilitesini bozarak düşük veya infertiliteye neden olabilir (Fraga ve ark., 1996; Aitken ve Krausz, 2001).

Spermatozoada oksidatif strese bağlı hasar, sperm fonksiyonunu önemli ölçüde azaltarak erkek infertilitesinin başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalar, oksidatif stresin infertil erkeklerin semeninde, DNA oksidasyon ürünü olan 8-hidroksi-2-deoksiguanozin (8-OHdG) gibi biyobelirteçlerin düzeylerini artırdığını göstermiştir. Bu biyomolekül, spermde oksidatif DNA hasarının varlığını doğrulayan önemli bir göstergedir (Agarwal ve Tamer, 2003).

2.6. Koenzim Q10

Ubiquinone olarak da bilinen koenzim Q10 (CoQ10), insan vücudunda tirozinden endojen olarak sentezlenen, yağda çözünen, vitamin benzeri bir benzokinon bileşigidir. Şekil 7' de gösterildiğı gibi, bir kinon grubu ve 10 izoprenoid birimden oluşan bir yan zincir içerir. Koenzim Q10' un tamamen indirgenmiş formu olan ubiquinol, serbest radikal nötralizasyonu ve indirgenmiş E vitamini formunun rejenerasyonu yeteneğine sahip iyi bir lipofilik antioksidandır (Ouchi, ve ark., 2010). Ayrıca biyolojik zarlarda lipid peroksidasyonunu inhibe edebilir ve mitokondriyal proteinleri ve DNA' yı oksidatif hasardan koruyabilir.



Koenzim Q10, mitokondriyal enerji metabolizmasının temel bir bileşenidir ve karbonhidratlar ile yağ asitlerinin adenosin trifosfat (ATP) formuna dönüşümünden sorumludur (Turunen ve ark., 2004). Ancak, koenzim Q10' un işlevi yalnızca enerji iletimi ile sınırlı değildir. Koenzim Q10, tüm hücre zarlarında fonksiyon gören önemli bir bileşen olarak da görev yapar (Crane, 2001). Organizmada birçok fizyolojik süreçte, özellikle kas kasılması gibi enerji gerektiren işlevlerde önemli bir rol üstlenir (Pravst ve

ark., 2010). Bu fonksiyonların bir kısmı, koenzim Q10' un antioksidan etkisine dayanmaktadır; bu etkisi, redoks kapasitesinin yenilenmesi ve hücre zarlarının derinliklerindeki benzersiz konumuyla ilgilidir. Koenzim Q10' un ayrıca hücre büyümesi ve fonksiyonlarının kontrolünde de rol oynadığına dair kanıtlar giderek artmaktadır. Bu, gen aktivasyonu veya baskılanmasıyla ilişkili olup, peroksit üretimi ya da tiyol redoks durumunun düzenlenmesiyle ilgilidir (Gutierrez-Mariscal ve ark., 2020).

Koenzim Q10, henüz FDA tarafından onaylanmış bir ilaç olmasa da gıda takviyesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Koenzim Q10 eksiklikleri, mitokondriyal hastalıklar, fibromiyalji, kardiyovasküler hastalıklar, nörodejeneratif hastalıklar, kanser, diyabet, erkek kısırlığı ve periodontal hastalık gibi birçok patolojik durumda gözlemlenmiştir ve bu hastalık süreçlerinin koenzim Q10 takviyesinden fayda görebileceği düşünülmektedir (Garrido-Maraver ve ark., 2014).

2.6.1. Koenzim Q10' un erkek üreme sağlığı üzerindeki etkileri

Koenzim Q10, hücre enerjisi üretimi ve antioksidan savunma mekanizmalarında kilit rol oynayan bir moleküldür ve erkek üreme sağlığı üzerinde önemli etkileri olabileceği bilimsel çalışmalarla gösterilmiştir (Balercia ve ark., 2009). Esas olarak mitokondri üzerinde etkili olan koenzim Q10, bir elektron taşıyıcısı olarak mitokondriyal solunum zincirinde görev yaparak ATP üretimini artırır (Yang ve ark., 2015). Bu süreç, özellikle yüksek enerji gereksinimi olan sperm hücrelerinin işlevlerini destekler. Sperm hareketliliğinin dölleme yeteneği için kritik bir faktör olduğu göz önünde bulundurulduğunda, koenzim Q10' un bu sürece katkısı önemli bir etki olarak karşımıza çıkar.

Mitokondri, sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda steroid hormonlarının sentezi, hücre apoptozu ve kalsiyum sinyalizasyonunun düzenlenmesinde de kritik rol oynar. Mitokondriyal fonksiyonun bozulması, sperm kalitesini doğrudan etkileyebilir. Mitokondriyal DNA (mtDNA) kopya sayısının ölçümü, genel mitokondriyal sağlığı değerlendirmek için önemli bir yöntemdir ve araştırmalar, bu ölçümlerin sperm sağlığıyla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Mitokondriyal fonksiyondaki bozulmalar, sperm yapısında ve DNA'sında hasara yol açarak infertiliteye neden olabilir (Nakada ve ark., 2006).

Koenzim Q10' un erkek üreme sağılığı üzerindeki en önemli etkilerinden biri antioksidan kapasitesidir. Oksidatif stres, sperm hücrelerini ROS'a maruz bırakarak sperm DNA'sında fragmantasyona ve hücresel hasara neden olabilir. Koenzim Q10, serbest radikalleri nötralize ederek sperm hücrelerini bu hasardan korur. Çeşitli klinik çalışmalar, koenzim Q10' un sperm konsantrasyonunu artırdığını, sperm motilitesini iyileştirdiğini ve DNA bütünlüğünü koruyarak sperm kalitesini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir (Safarinejad ve ark., 2012; Lafuente ve ark., 2013).

Erkek infertilitesi üzerine yapılan araştırmalarda, koenzim Q10 takviyesinin özellikle sperm motilitesi ve konsantrasyonu üzerindeki olumlu etkileri dikkat çekicidir. Bazı randomize kontrollü çalışmalarda, düşük sperm motilitesi olan erkeklerde koenzim Q10 takviyesi sonrası sperm hareketliliğinde önemli iyileşmeler gözlenmiştir. Ayrıca, sperm DNA fragmantasyonunda da iyileşme sağlayarak üreme sağılığını desteklediği rapor edilmiştir (Lucignani ve ark., 2022).

Koenzim Q10, genellikle idiyopatik erkek infertilite sorunlarının tedavisinde tercih edilmektedir. Bu madde dokularda ve organlarda yaygın dağılım gösterir ve uzun süreli etki sağladığı tespit edilmiştir (Iftikhar ve ark., 2022). Spermatozoonlarda enerji mobilizasyonunu destekler ve lipid peroksidasyona karşı koruma sağlamaktadır. Mitokondri üzerinde etki ederek, bir elektron taşıyıcısı olarak görev yapar ve oksidatif stresi azaltır (Lin ve ark., 2021). Spermatozoonun orta kısmında bulunan mitokondriler, steroid sentezi, enerji üretimi, kalsiyum metabolizması ve hücre apoptozu gibi çeşitli metabolik aktivitelerden sorumludur (Lin ve ark., 2021). Bu mitokondrilerde dağılmış olan koenzim Q10, enerji arttırıcı ve antioksidan olarak görev yapar (Wu ve ark., 2022). Aynı zamanda gen ekspresyonu, membran stabilitesi ve hücre sinyalleşmesine katılır, hücreleri hasardan ve anormal büyümeden korur (Bentinger ve ark., 2007). Koenzim Q10, hücrelere apoptosise karşı koruma sağlar, enerji seviyelerini artırır ve anti-inflamatuar özelliklere sahiptir. Ayrıca, nanopartikül yapısı sayesinde kan-testis bariyerini geçebilme özelliğine sahiptir (Littarru ve ark., 2011; Masoumi ve ark., 2021). Güleş ve ark. (2019), bisfenol-A tarafından indüklenen testis toksisitesi olan sıçanlarda koenzim Q10 (günlük 10 mg/kg) ile yapılan tedavinin TUNEL-pozitif hücre sayısını ve testiküler MDA seviyelerini azalttığını gösterdi. Delkhosh ve ark. (2021), koenzim Q10' un uygulanmasının, skrotal hipertermi tarafından indüklenen antioksidan, anti-

inflamatuvar ve anti-apoptotik özellikleri aracılığıyla testis disfonksiyonunu önleyebildiğini rapor etmiştir.

Koenzim Q10, çeşitli zararlı etkenlerin neden olduğu testis hasarını hafifletme potansiyeline sahip bir molekül olarak geniş bir şekilde incelenmiştir. Kadmiyum (Irani ve ark., 2023), kurşun (El-Khadragy ve ark., 2020), iyonize radyasyon (Najafi ve ark., 2019) ve sigara içme (Lin ve ark., 2021) gibi faktörlerin testis dokusunda neden olduğu hasarların önlenmesinde koenzim Q10' un rolüne yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ancak, literatürde RF radyasyonunun yol açtığı hasara karşı koenzim Q10' un koruyucu etkisine dair sınırlı bilgi bulunmaktadır.

Yine de koenzim Q10' un RF radyasyonunun erkek üreme sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. RF radyasyonu, sperm hücrelerinde oksidatif stresi artırarak DNA hasarına yol açabilir ve bu durum, erkek fertilitasını olumsuz etkileyebilir (Kaur ve ark., 2023). Koenzim Q10, antioksidan özellikleri ve hücrel enerji üretimini destekleyen rolü sayesinde bu olumsuz etkileri hafifletebilir.

RF radyasyonu ayrıca mitokondri fonksiyonlarını bozarak ATP üretimini etkileyebilir ve bu durum sperm hücrelerinin enerji ihtiyacını karşılamada sorunlara yol açabilir (Wdowiak ve ark., 2017; Nie ve ark., 2023). Koenzim Q10, mitokondriyal solunum zincirinde önemli bir rol oynayarak ATP üretimini artırabilir ve sperm hücrelerinin enerji ihtiyacını karşılayarak RF radyasyonunun neden olduğu enerji metabolizması bozukluklarını dengeleyebilir. Bu sayede sperm motilitesinin korunmasına katkıda bulunabilir. Uzun süreli RF maruziyeti, sperm DNA'sında kırılmalara ve fragmentasyona yol açabilir (Alahmar ve ark., 2021). Bu tür DNA hasarları, fertilizasyon yeteneğini zayıflatarak infertiliteye neden olabilir. Koenzim Q10' un DNA'yı koruma ve fragmentasyonu önleme etkileri, sperm hücrelerinin genetik materyalini koruyarak üreme sağlığı açısından faydalı olabilir.

RF radyasyonuna maruz kalan erkeklerde koenzim Q10 takviyesi ile ilgili çalışmalar sınırlı olmasına rağmen, mevcut araştırmalar koenzim Q10' un sperm fonksiyonları üzerindeki olumlu etkilerini desteklemektedir. Bu araştırmalar, koenzim

Q10' un sperm motilitesini artırdığı, oksidatif stres kaynaklı zararları azalttığı ve sperm DNA'sını koruduğunu göstermektedir (Dimitriadis ve ark., 2023; Kaltsas, 2023).

Sonuç olarak, koenzim Q10' un RF radyasyonunun erkek üreme sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini hafifletme potansiyeline sahip olabileceği yargısı, antioksidan özellikleri sayesinde oksidatif stresi azaltmasından ve mitokondriyal fonksiyonları desteklemesinden kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma, kablosuz teknolojinin yaygın kullanımının beraberinde getirdiği 3,5 GHz'in erkek infertilitesi üzerine etkilerini inceleyen ilk çalışmadır. Bu bilgiler ışığında, RF radyasyonuna maruz kalan ratların testis dokusundaki oksidatif stres parametreleri, hormon düzeyleri, histopatolojik özellikleri ve sperm canlılığı gibi çeşitli önemli parametreler değerlendirilerek koenzim Q10 uygulaması ile RF radyasyonunun üreme sistemi üzerindeki etkilerini anlama ve koruyucu önlemleri geliştirme alanlarına katkı sağlamak önemli olmaktadır. Bununla beraber benzer çalışmalara dayanarak koruyucu önlemlerin geliştirilmesinde rehberlik edebilir ve üreme sağlığı alanında yeni tedavi stratejilerinin oluşturulmasına katkıda bulunabilir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Deney Hayvanları

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu'nun 30/11/2023 tarih ve 2023/13-30 sayılı onay kararı ile yapılmıştır. Çalışmanın tüm deneysel içerikli uygulamaları ve işlem basamakları Yüzüncü Yıl Üniversitesi Deneysel Araştırma ve Uygulama Merkezi ile Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik Anabilim Dalı laboratuvarlarında gerçekleştirildi.

Araştırmada, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Deney Hayvanları Araştırma Merkezi'nden temin edilen, yaklaşık 2-3 aylık, ağırlıkları 200-250 gr arasında değişen 28 adet adet yetişkin, Wistar albino cinsi erkek rat kullanıldı. Uygulamalar süresince etik kurul şartlarının sağlanmasına özen gösterildi. Deney süresince stabil laboratuvar koşulları altında ($22\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, 12 saat aydınlık/karanlık siklusunda) tutulan günlük içme suyu ile birlikte ham %21 protein içeren pelet yemlerle (Purina, Bursa Türkiye) (ad libitum) beslenen deneklerimizden rastgele 4 grup oluşturuldu.

3.1.1. Gruplandırma ve uygulama programı

Toplam 28 adet rat her grupta 7'şer adet rat olacak şekilde rastgele dört gruba ayrıldı. Çalışmaya 4 hafta süreyle devam edildi. Gelişebilecek komplikasyonlar açısından tüm gruplardaki ratlar günlük takip edildi. Kontrol ve RF grubuna diğer gruplara verilen miktara eşit miktarda intraperitoneal serum fizyolojik verilirken, koenzim Q10 ile tedavi edilen gruplardaki ratlara günde birer kez intraperitoneal 10 mg/kg koenzim Q10 ratların vücut ağırlıklarına göre verildi. Koenzim Q10 uygulaması aşağıdaki gibi gerçekleştirildi.

1. Kontrol grubu: Ratlar pleksiglas karusel içinde RF jeneratör kapalı olarak günde 2 saat bekletildi ve günde 1 kez diğer gruplardaki hayvanlara verilen miktara eşdeğer serum fizyolojik i.p. olarak uygulandı.

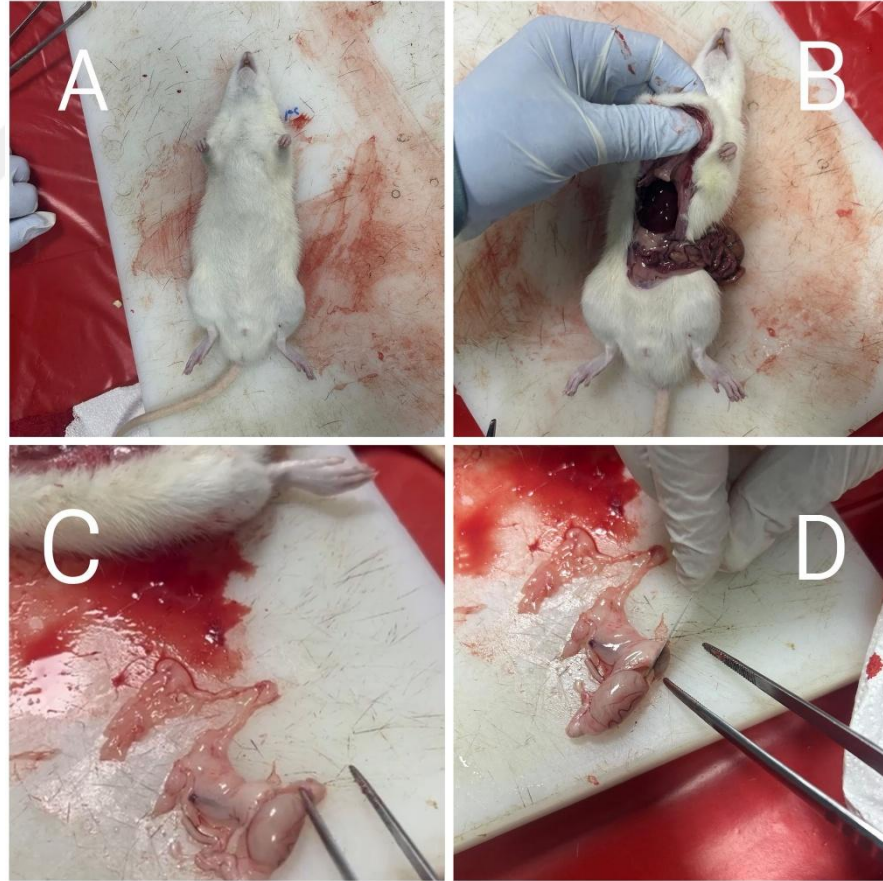
2. RF maruziyet grubu: Ratlar pleksiglas karusel içinde RF jeneratör açık olarak günde 2 saat bekletildi ve günde 1 kez diğer gruplardaki hayvanlara verilen miktara eşdeğer serum fizyolojik i.p. olarak uygulandı.

3. Koenzim Q10 grubu: Ratlar pleksiglas karusel içinde RF jeneratör kapalı olarak günde 2 saat bekletildi ve günde 1 kez 10 mg/kg ile çözülmüş koenzim Q10 i.p. olarak uygulandı (Rowland ve ark.,1998; Arda ve ark.,2021)

4. RF+ Koenzim Q10 grubu: RF jeneratör açık olarak günde 2 saat bekletildi ve günde 1 kez 10 mg/kg koenzim Q10 i.p. olarak uygulandı.

3.1.2. Deneyin sonlandırılması ve örneklerin alınması

Deney sonunda tüm hayvanlar ketamin (60 mg/kg vücut ağırlığı) ve ksilazin (5 mg/kg vücut ağırlığı), enjeksiyonuyla intraperitoneal olarak anestezi altına alındı. Yirmi dakika sonra anestezi etki altındaki ratlar sakrifiye edildi. Hayvanlar disseksiyon tahtasına sabitlenip batınları açıldı ve kalplerinden kanları alındı. Testisleri histopatolojik ve biyokimyasal inceleme için çıkarıldı.



Şekil 8. Testislerin Çıkarılması (A, B, C, D)

3.2. Homojenizasyon ve ELİZA Testleri

Çalışmada yer alan tüm ratlar uygun etik kurallar çerçevesinde sakrifiye edildikten sonra, gerekli biyolojik örnekler elde edilmiştir. Her bir ratın kan örnekleri alınarak 4000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiş ve serum fazı dikkatlice ayrılmıştır. Aynı zamanda, testis dokuları bistüri yardımıyla eşit parçalara ayrılmış ve her bir örnek, 200 µL RIPA (Radioimmunoprecipitation Assay) tamponu içeren mikro tüplere yerleştirilmiştir. Homojenize edilen doku süspansiyonları buz üzerinde bekletilmiş, ardından 10.000g'de 10 dakika süreyle, +4°C'de santrifüj edilmiştir. Elde edilen süpernatant fraksiyonlar analizlerde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Toplam protein miktarlarının kantifikasyonu için Bicinchoninic Acid (BCA) protein tayin yöntemi kullanılmıştır. ELISA analizlerinde, her bir kitin üretici protokolüne uygun olarak farklı biyobelirteçlerin (sitokin, kemokin ve hormonlar) nicel analizleri gerçekleştirilmiştir.

Genel ELISA protokolü şu adımları içermektedir: Her bir kuyucuğa 50 µL örnek veya standart çözelti eklendikten sonra oda sıcaklığında inkübasyona bırakılmıştır. Bu aşamayı takiben, kuyucuklar üç kez yıkama tamponu ile yıkanmıştır. Bloklama adımı için kuyucuklara bloklama tamponu eklenmiş ve 1 saat süreyle oda sıcaklığında inkübe edilmiştir. Bloklama sonrası tekrar üç kez yıkama yapılmıştır. Ardından, sekonder antikor ilave edilerek 1 saat süreyle oda sıcaklığında inkübasyon uygulanmıştır. Sekonder antikorun bağlanmamış fazı yine üç kez yıkama ile uzaklaştırılmıştır. Hedef biyomolekülün (sitokin/kemokin/hormon) tespiti için biotin ile işaretli antikorun bağlanabileceği HRP (horseradish peroxidase) konjugat çözeltisi eklenmiş ve 30 dakika inkübasyona bırakılmıştır. Sonrasında tekrar yıkama yapılmış, ardından HRP ile reaksiyona girecek substrat eklenerek karanlık ortamda yaklaşık 15 dakika inkübe edilmiştir. Renk değişimi gözlemlendikten sonra reaksiyon stop solüsyonu ile sonlandırılmış ve absorbans değerleri 570 nm dalga boyunda ELISA okuyucu ile ölçülmüştür. Elde edilen absorbans değerleri, standart eğriler ve kontrol örnekleri ile karşılaştırılarak TAS, TOS, Glutasyon ve MDA, LH, FSH ve Testesteron düzeyleri belirlendi. Her bir kitin protokolünde üretici firmanın önerilerine göre ufak farklılıklar bulunmakla birlikte, yukarıda sunulan prosedür çalışmada uygulanan genel yöntemi temsil etmektedir.

3.3. SAR Simülasyonu

Bu çalışmada, 3,5 GHz RF radyasyonunun testis dokusu üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Specific Absorption Rate (SAR) analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamı, deneysel düzeneğe en yakın şekilde oluşturulmuş olup, CST Studio Suite (CST AG, Darmstadt, Germany) yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

Simülasyon modelinde, RF maruziyetinde kullanılan anten yapısı, reflektör, pleksiglas döner platform ve rat biyolojik modeli detaylı şekilde oluşturulmuştur. CST yazılımında mevcut olan voksel tabanlı biyolojik rat modeli, bilgisayarlı tomografi (CT) taramalarına dayanarak geliştirilmiş olup, ratın tüm doku ve organlarını kapsamaktadır.

SAR hesaplamaları, IEEE/IEC 62704-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, elektromanyetik simülasyonlarda Sonlu İntegrasyon Tekniği (FIT) kullanılmıştır. FIT, integral ve diferansiyel çözümleri bir arada kullanarak hem zamansal hem de uzamsal çözümler üretir. Elektromanyetik alan ve termal analizlerin doğrulaması, elde edilen elektrik alan değerlerinin deneysel olarak EMR 300 (NARDA, Pfullingen, Germany) alan probu ile ölçülen verilerle karşılaştırılması yoluyla yapılmıştır. Deneysel ölçümler ile simülasyon sonuçları arasında anlamlı bir korelasyon bulunmuştur, bu da modelin güvenilirliğini artırmaktadır.

3.4. Histopatolojik Yöntem

Sakrifiye edilen sıçanlardan alınan testis dokuları, %10 tamponlanmış nötral formalin içinde fikse edildi. Fikse edilen dokular, otomatik doku takip cihazı (LEICA ASP300S, Leica Biosystems, Almanya) ile rutin histolojik doku takip işlemlerinden geçirilerek parafine gömüldü. Parafin bloklardan mikrotom (Leica RM2125 RTS) yardımıyla 5 mikrometre kalınlığında kesitler alındı. Elde edilen kesitler Hematoksilen-Eozin (H&E) boyama yöntemi ile boyandı. Boyanan doku kesitleri ışık mikroskobu (Olympus BX53, Japonya) altında incelendi. Histopatolojik değerlendirme, Johnsen'in Testis Biyopsi Skorlaması (TBS) sistemine göre gerçekleştirildi. Bu sistem, seminifer tübüllerdeki spermatogenezin kalitesini 1'den 10'a kadar puanlayarak değerlendirmeye olanak sağlar.

Tablo 1. Testis biyopsi skoru (TBS) değeriendirilmesi (Johnsenn, 1970)

Skor Açıklaması
1. Tübüler kesitte hücre yok
2. Germ hücresi yok, ancak Sertoli hücreleri mevcut
3. Spermatogoniumlar sadece germ hücreleri mevcut
4. Sadece birkaç spermatosit (<5), ancak spermatid veya spermatozoa mevcut değil
5. Spermatozoa veya spermatid yok, ancak birçok spermatosit mevcut
6. Spermatozoa yok ve yalnızca birkaç spermatid mevcut (<5-10)
7. Spermatozoa yok, ancak birçok spermatid mevcut
8. Sadece birkaç spermatozoa mevcut (<5-10)
9. Çok fazla spermatogenez, ancak belirgin dökülme veya lümenin obliterasyonu ile germinal epitel düzensiz
10. Çok sayıda spermatozoa ile tam spermatogenez

3.4.1. İstatistiksel Analiz

Tüm veriler ortalama $\pm$ standart hata (SEM) olarak sunulmuştur. Gruplar arası karşılaştırmalar tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile gerçekleştirilmiş; anlamlı farklılıkların belirlenmesi için Tukey çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. $p < 0.05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir. Tüm istatistiksel analizler ve grafiksel gösterimler GraphPad Prism sürüm 9.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, ABD) kullanılarak yapılmıştır.

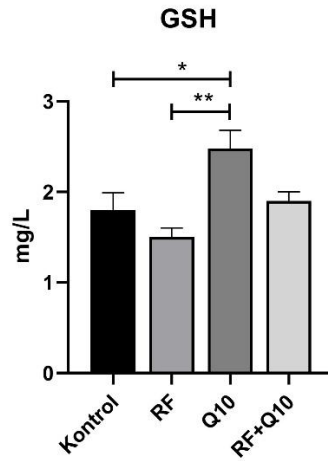
4. BULGULAR

4.1. RF ve Koenzim Q10'un Biyokimyasal Parametreler Üzerindeki Etkileri

Bu çalışmada, RF maruziyetinin hormonal (LH, FSH, testosteron) ve oksidatif stres (MDA, TAS, TOS, GSH) parametreleri üzerindeki etkileri ile KoenzimQ10 (CoQ10) uygulamasının olası koruyucu etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Tukey post-hoc testi ile değerlendirilmiştir.

4.1.1. GSH Seviyeleri

Kontrol ile RF grubu arasında GSH düzeylerinde anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p = 0,5324$). Ancak koenzim Q10 grubu, hem kontrol ($p = 0,0265$) hem de RF grubuna ($p = 0,0012$) göre anlamlı düzeyde daha yüksek GSH seviyelerine sahiptir. Bu bulgu, koenzim Q10' un endojen antioksidan sistemi desteklediğini göstermektedir.

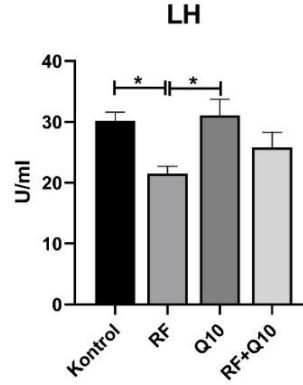


Şekil 9. Testis dokusundaki GSH düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması

4.1.2. LH Seviyeleri

RF grubunda LH düzeyleri kontrol grubuna kıyasla anlamlı düzeyde azalmıştır ($p = 0,0157$). RF ile koenzim Q10 grubu arasında da anlamlı fark bulunmuştur ($p = 0,0100$), bu durum koenzim Q10' un LH düzeylerini koruyabildiğini göstermektedir. RF +

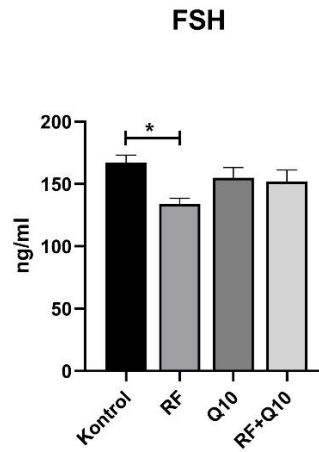
koenzim Q10 grubunda ise LH düzeylerinde RF grubuna göre artış gözlenirse de bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p = 0,4153$).



Şekil 10. Gruplara göre serum LH düzeylerinin karşılaştırılması

4.1.3. FSH Seviyeleri

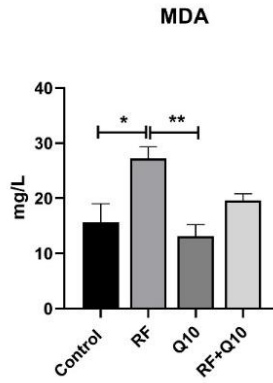
FSH düzeyleri RF grubunda kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde azalmıştır ($p = 0,0223$). RF + koenzim Q10 grubunda FSH düzeylerinde kısmi bir artış gözlenirse de RF grubuna kıyasla anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p = 0,3321$). Kontrol ile koenzim Q10 grubu arasında da anlamlı fark tespit edilmemiştir ($p = 0,6595$).



Şekil 11. Gruplara göre serum FSH düzeylerinin karşılaştırılması

4.1.4. MDA Seviyeleri

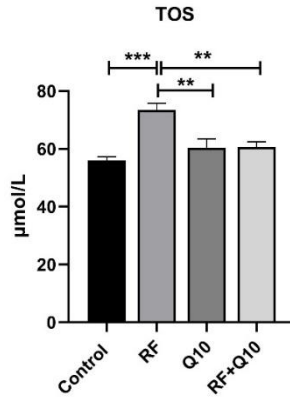
Lipit peroksidasyonunun bir göstergesi olan MDA düzeyleri, RF grubunda kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde artmıştır ($p = 0,0101$). Koenzim Q10' un uygulaması MDA düzeylerini RF grubuna göre anlamlı şekilde azaltmıştır ($p = 0,0026$). RF + koenzim Q10 grubunda da azalma gözlenmiş olsa da istatistiksel anlamlılık düzeyine ulaşmamıştır ($p = 0,1537$).



Şekil 12. Testis dokusundaki MDA düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması

4.1.5. TOS Seviyeleri

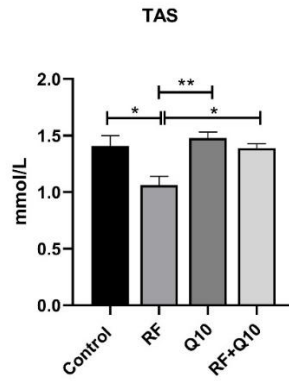
TOS düzeyleri RF grubunda kontrol grubuna göre anlamlı şekilde artmıştır ($p = 0,0001$). Hem koenzim Q10 hem de RF + koenzim Q10 gruplarında TOS düzeyleri RF grubuna göre anlamlı şekilde düşmüştür ($p = 0,0028$ ve $p = 0,0033$). Bu bulgular, koenzim Q10'un oksidatif stres üzerinde belirgin azaltıcı etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. Testis dokusundaki TOS düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması

4.1.6. TAS Seviyeleri

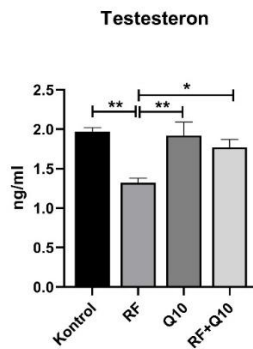
RF grubunda TAS düzeyleri kontrol grubuna göre anlamlı şekilde düşmüştür ($p = 0,0072$). Koenzim Q10 grubunda TAS düzeyleri RF grubuna kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksektir ($p = 0,0013$). RF + koenzim Q10 grubunda da RF grubuna göre anlamlı bir artış gözlenmiştir ($p = 0,0084$). Bu bulgular, koenzim Q10'un antioksidan kapasiteyi desteklediğini göstermektedir.



Şekil 14. Testis dokusundaki TAS düzeylerinin gruplar arası karşılaştırılması

4.1.7. Testesteron Seviyeleri

RF maruziyeti testosteron düzeylerinde anlamlı bir azalmaya neden olmuştur ($p = 0,0017$). Koenzim Q10 uygulaması testosteron düzeylerini belirgin şekilde artırmıştır ($p = 0,0036$), ayrıca RF + koenzim Q10 grubunda da RF grubuna göre anlamlı bir artış gözlenmiştir ($p = 0,0329$). Bu sonuçlar, koenzim Q10' un testosteron üzerinde koruyucu etkisi olduğunu göstermektedir.



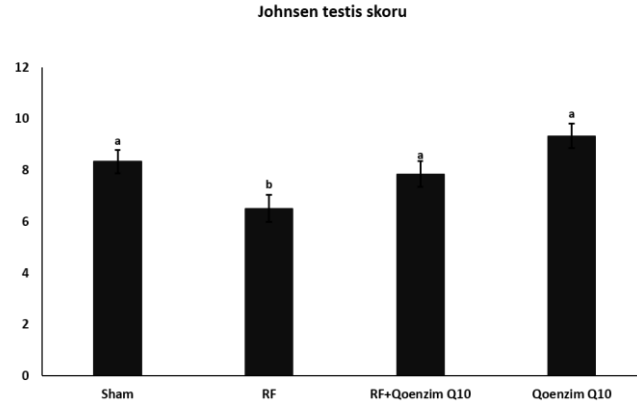
Şekil 15. Gruplara göre serum Testesteron düzeylerinin karşılaştırılması

Elde edilen bulgular, RF maruziyetinin GSH, FSH, MDA, TAS, testosteron ve TOS seviyeleri gibi biyokimyasal parametreler üzerinde zararlı etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Özellikle testosteron ve FSH seviyelerinde azalmalar, RF'nin endokrin fonksiyonlar üzerindeki olumsuz etkilerini düşündürmektedir. Aynı zamanda oksidatif stres belirteçlerinden TOS ve MDA seviyelerinde RF' nin zararlı etkileri belirgin hale gelmiştir.

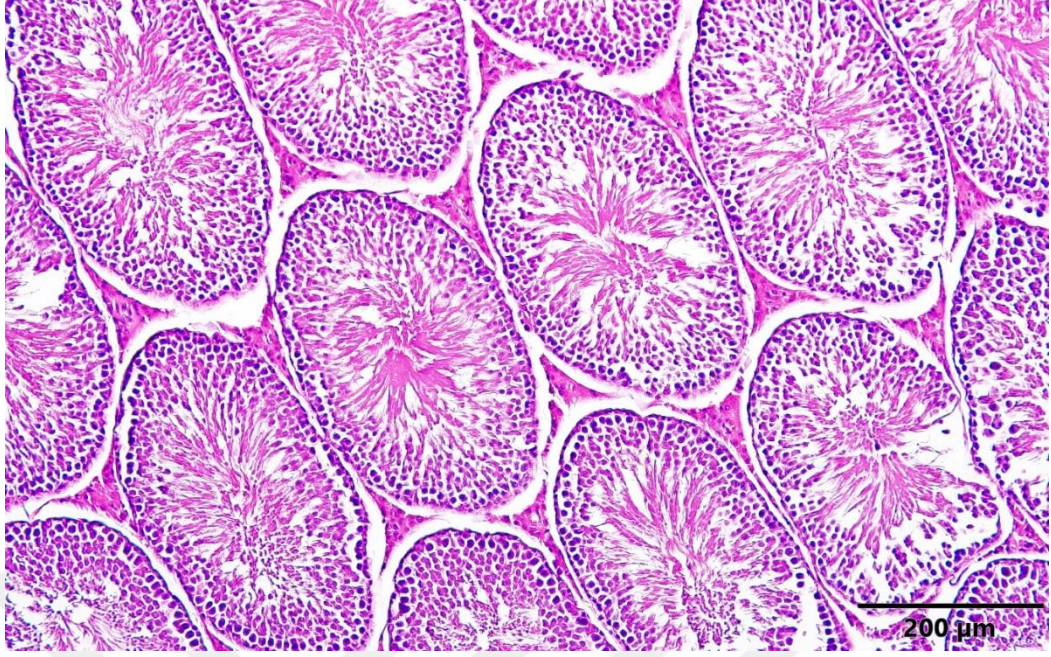
Koenzim Q10 'un koruyucu etkileri ise özellikle RF+Q10 grubunda GSH ve TAS seviyelerinde artışlar ve TOS ile MDA seviyelerinde azalmalar şeklinde kendini göstermiştir. Bu durum, koenzim Q10'un RF' nin olumsuz etkilerini hafifletme ve oksidatif dengeyi sağlama potansiyeline işaret etmektedir. Sonuç olarak, RF' nin biyokimyasal parametrelerdeki olumsuz etkilerinin koenzim Q10'un takviyesi ile azaltılabileceği ve koenzim Q10'un koruyucu bir ajan olarak kullanılabileceği öne sürülmektedir.

4.1.8. Testisin Histopatolojik Bulguları

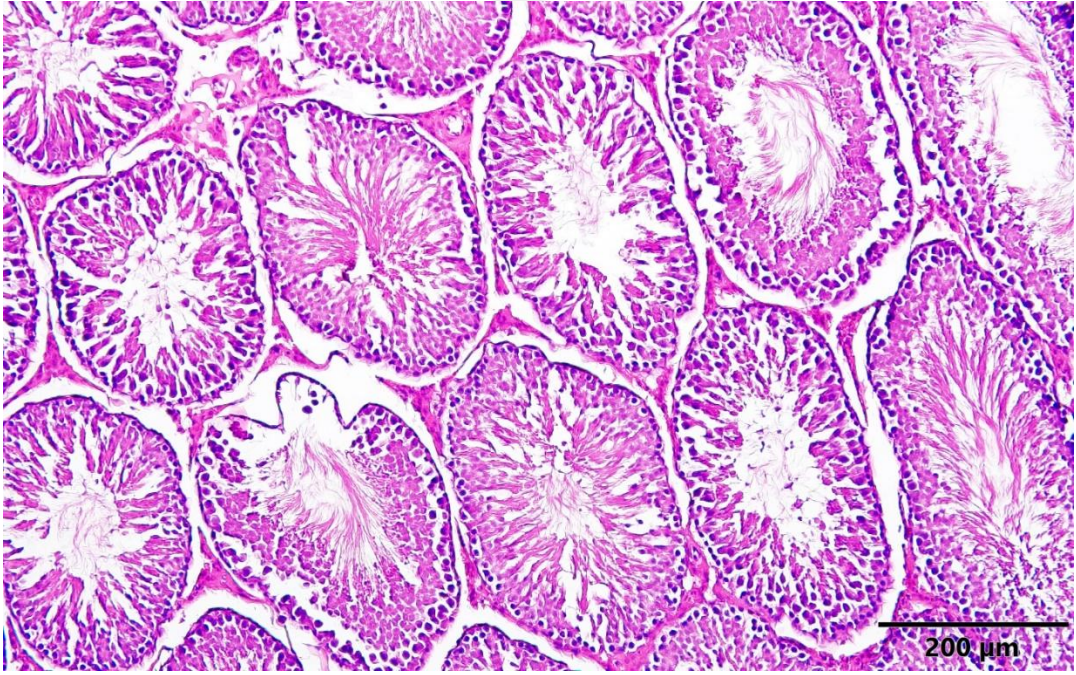
Testis doku kesitlerinin Johnsen testis biyopsi skoru şekil 16' da verilmiştir.



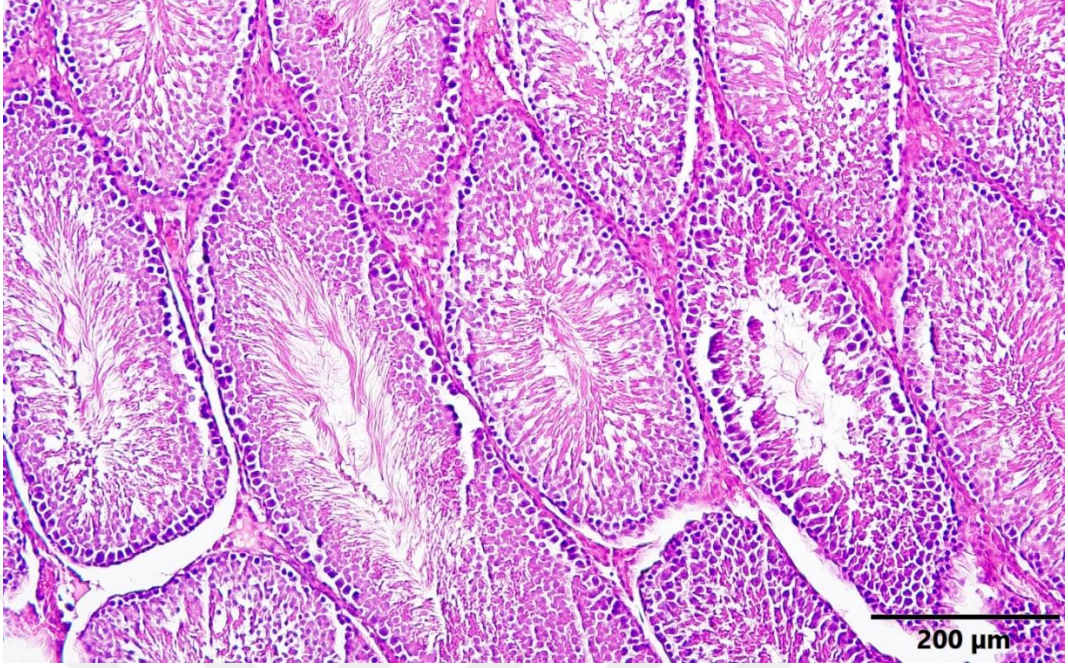
Şekil 16. Johnsenin testis biyopsi skoru



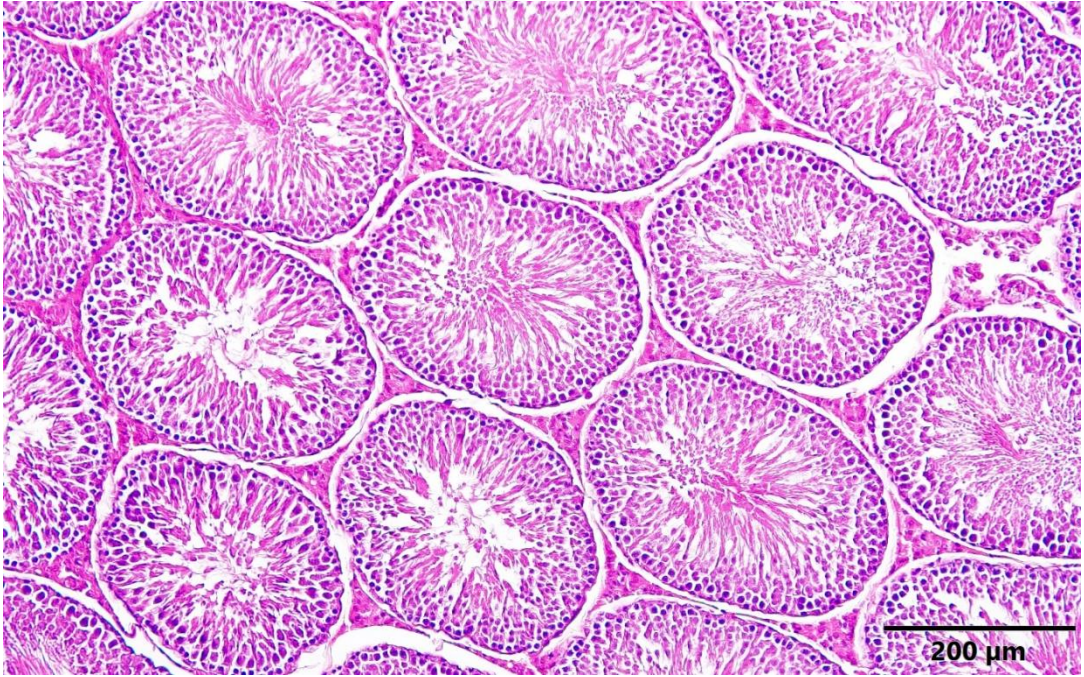
Şekil 17. Kontrol grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x



Şekil 18. RF grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x



Şekil 19. RF+ Koenzim Q10 grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x



Şekil 20. Koenzim Q10 grubundaki sıçanların Testis ışık mikroskopik görüntüleri. H-E400x

4.1.9. SAR Sonuçları

SAR hesaplamaları sonucunda bütün vücut SAR değeri 0.006879 W/kg ve testis dokusu için SAR değeri 0.000598 W/kg olarak hesaplanmıştır. Bu SAR dağılımları, Şekil 20'de frontal düzlemde 1g ortalamaya göre, 10 g ortalamaya göre ve nokta hesaplama için gösterilmiştir. Testis dokusunda gözlemlenen SAR değerleri, RF maruziyetinin bu bölgedeki enerjiyi nasıl absorbe ettiğini anlamak açısından önemlidir. Sonuçlar, testis dokusunun 3,5 GHz frekansta RF enerjisini absorbe etme kapasitesini göstermektedir.



(a)

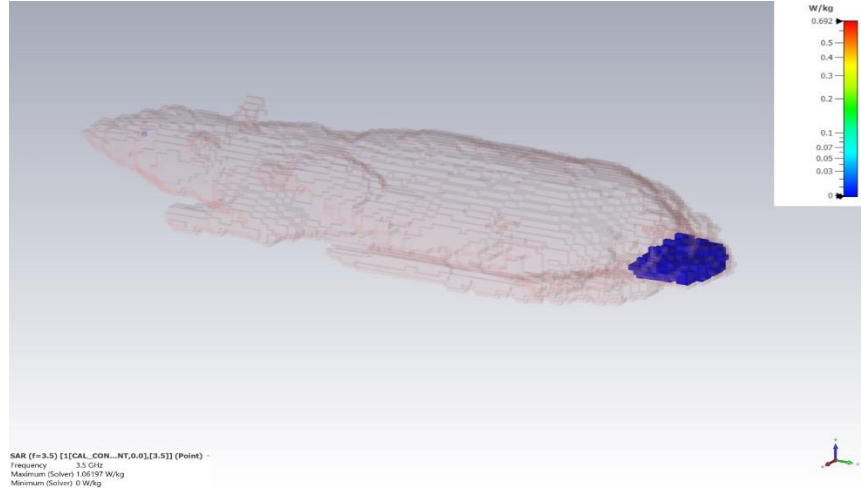


(b)

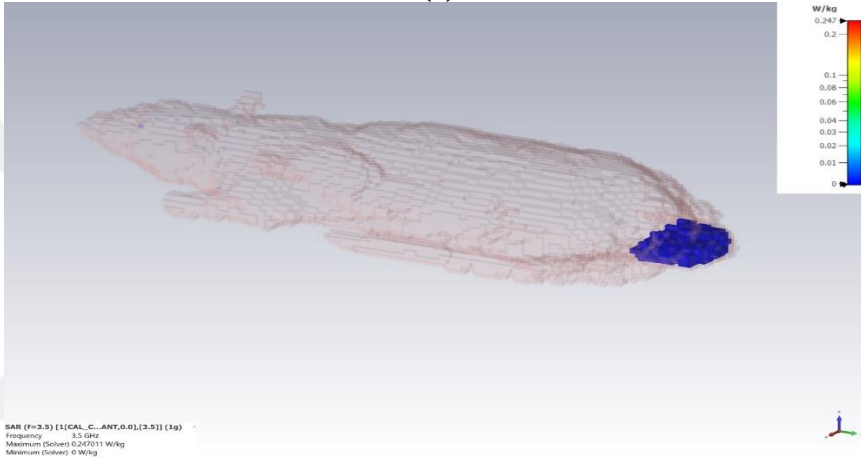


(c)

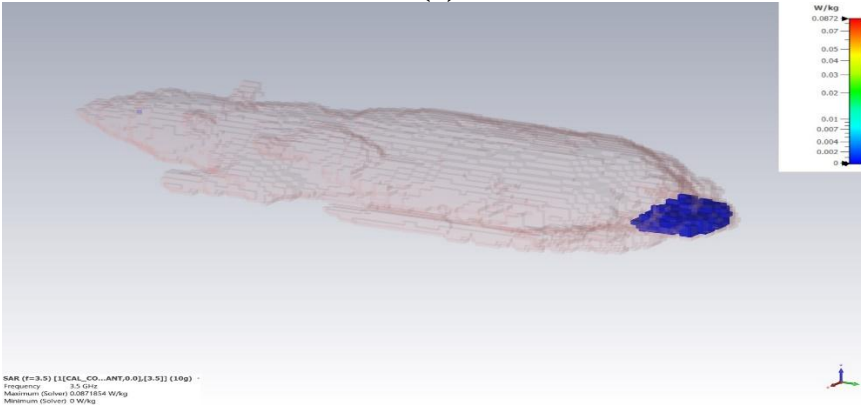
Şekil 21. 3,5 GHz' de tüm vücut SAR simülasyon sonuçları ve testis bölgesindeki dağılım
a) Noktasal SAR dağılımı b) 1g'lık ortalama frontal düzlem SAR dağılımı, c) 10g'lık ortalama frontal düzlem SAR dağılımı.



(a)



(b)



(c)

Şekil 22. Testis dokusuna özgü SAR simülasyon sonuçları (3.5 GHz) a) Testis dokusundaki en yüksek noktasal SAR dağılımı perspektif görüntüsü b) Testis dokusundaki 1 g'lık ortalama SAR dağılımı perspektif görüntüsü c) Testis dokusundaki 10 g'lık ortalama SAR dağılımı perspektif görüntüsü.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Tartışma

Elektromanyetik alanların canlı organizmalar üzerindeki biyolojik etkileri, son yıllarda üreme sistemi özelinde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu bağlamda, erkek üreme sistemine yönelik olası olumsuz etkilerin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu tez kapsamında, 3.5 GHz frekansındaki RF radyasyonunun testiküler yapı ve işlev üzerindeki etkileri çok yönlü olarak değerlendirilmiştir. Serum hormon düzeyleri, testis dokusuna ait oksidatif stres belirteçleri ve histopatolojik değişiklikler detaylı biçimde incelenmiş; aynı zamanda, koenzim Q10'un bu etkiler üzerindeki olası koruyucu rolü araştırılmıştır. Elde edilen veriler, RF maruziyetinin hipotalamo-hipofizer-gonadal aksı baskılayabileceğini, oksidatif dengeyi bozarak testiküler dokuda yapısal bozulmalara yol açabileceğini ve koenzim Q10'un bu zararlı etkileri hafifletme potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir. Bulgular, literatürde benzer frekans ve maruziyet süreleriyle yürütülmüş deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Yürütülen deneysel uygulama neticesinde, 3.5 GHz frekansındaki RF maruziyeti sonrasında serum hormon düzeylerinde belirgin değişiklikler saptanmıştır. RF grubunda LH ($p = 0,0157$) ve FSH ($p = 0,0223$) düzeyleri kontrol grubuna göre anlamlı şekilde azalırken, testosteron düzeyinde de istatistiksel olarak anlamlı bir düşüş ($p = 0,0017$) gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, elektromanyetik alanların hipotalamo-hipofizer-gonadal aks üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturabileceğini düşündürmektedir. Antioksidan özellikleriyle bilinen koenzim Q10 uygulaması, özellikle testosteron düzeylerinde anlamlı bir artış sağlamış ($p = 0,0036$) ve RF' ye bağlı hormonal baskılanmayı kısmen dengelemiştir. LH düzeylerinde ise RF + Koenzim Q10 grubunda artış eğilimi olmakla birlikte bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Sonuçlar, elektromanyetik radyasyonun hormonal dengeyi bozabileceğini ve bu etkinin antioksidan müdahalelerle belirli ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Benzer hormonal etkiler, Shahin ve ark. (2018) tarafından Swiss albino farelerde yürütülen bir çalışmada da bildirilmiştir. 1800 MHz frekansında, 0.05 W/kg SAR ile 3

saat/gün ve 120 gün boyunca RF maruziyeti uygulanan hayvanlarda, seminifer tübül çapında daralma, sperm sayısı ve canlılığında azalma ile birlikte serum testosteron düzeylerinde anlamlı düşüş tespit edilmiştir. Maruziyet süresinin uzunluğu etkilerin belirginleşmesinde rol oynamış olabilir. Raporda, testosteron üretimindeki azalmanın RF' ye bağlı hücresel stres ve apoptozla ilişkili olduğu vurgulanmış olup, elde edilen bulgularla büyük ölçüde örtüşmektedir.

RF maruziyetinin gonadotropin hormonları üzerindeki etkileri literatürde farklı bulgularla rapor edilmiştir. Örneğin, Shahin ve ark. (2019) tarafından 900 MHz frekansında ve 1.075 W/kg SAR değeriyle 2 saat/gün, 8 hafta süreyle RF' ye maruz bırakılan Wistar sıçanlarında, FSH ve LH düzeylerinde artış, testosteron düzeyinde ise azalma bildirilmiştir. Bu bulgular, mevcut çalışmadaki sonuçlarla kısmen farklılık göstermektedir; çünkü bu çalışmada hem FSH hem de LH düzeylerinde anlamlı azalma saptanmıştır. İki çalışma arasındaki bu fark, kullanılan hayvan türü, RF frekansı ve SAR değeri gibi deneysel parametrelerdeki değişikliklerden kaynaklanabilir. Ayrıca, Shahin ve arkadaşlarının çalışmasında inflamatuvar yolların (örneğin NF- κ B p65 ve iNOS) aktive olduğu gösterilmiş olup, bu durumun hipofiz bezinin FSH ve LH salınımını uyarıcı yönde etkilemiş olabileceği düşünülmektedir. Buna karşın, mevcut bulgular elektromanyetik radyasyonun hipotalamo-hipofizer-gonadal aksı baskılayarak gonadotropin salınımını azaltabileceğini desteklemektedir.

Yardım ve ark. (2024) ise 2600 MHz frekansında, 30 dk/gün, 4 hafta süreyle RF uygulanan Wistar sıçanlarda oksidatif stres belirteçlerinin (MDA, NOx) arttığını, antioksidan düzeylerin (GSH, GSH-Px) azaldığını, testiküler ödem ve bağ dokusunda kayıp geliştiğini göstermiştir. Bu oksidatif dengesizlik, gonadal hormon sentezinde görevli hücrelerin (özellikle Leydig hücreleri) fonksiyonunu bozarak testosteron düzeylerinde azalmaya neden olabilir. Mevcut çalışmada da RF' ye bağlı olarak testosteron düzeylerinin anlamlı şekilde düştüğü saptanmıştır. Lin ve ark. (2017) tarafından 1950 MHz frekansında, 3 W/kg şiddetinde RF' ye 24 saat süreyle maruz bırakılan fare kaynaklı Leydig (TM3) hücrelerinde yapılan in vitro çalışmada, hücre proliferasyonunda azalma, hücre döngüsünde bozulma, testosteron üretiminde düşüş ve P450scc mRNA düzeylerinde anlamlı azalma saptanmıştır. Buna karşılık, hücre apoptozunda ve ROS düzeylerinde anlamlı bir değişiklik bildirilmemiştir. Bu sonuçlar,

testosteron biyosentezinin yalnızca hücre ölümüne bağlı olmaksızın, steroidogeneizde görevli enzimlerin (örneğin P450_{scc}) ekspresyonunun baskılanması yoluyla da etkilenebileceğini ortaya koymaktadır. Mevcut çalışmada RF maruziyeti sonrası testosteron düzeylerinde gözlenen düşüş, benzer bir mekanizma ile açıklanabilir; özellikle Leydig hücrelerinin fonksiyonel kapasitesinde meydana gelen bozulmaların, hormonal dengenin sürdürülebilirliğini sekteye uğrattığı düşünülmektedir. Kumar ve arkadaşları (2011b) tarafından yürütülen çalışmada, 2.45 GHz frekansında mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılan erkek Wistar sıçanlarda testiküler fonksiyon üzerine olumsuz etkiler gözlenmiştir. Hayvanlar günde 2 saat olmak üzere toplam 60 gün boyunca elektromanyetik alanlara maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda, maruziyet grubunda kaspaz ve kreatin kinaz düzeylerinde anlamlı artış, testosteron ve melatonin düzeylerinde ise anlamlı azalma saptanmıştır. Araştırmacılar bu değişiklikleri, elektromanyetik alanların oluşturduğu ROS' un neden olduğu DNA hasarına ve hücrel apoptoza bağlamıştır. Özellikle testosteron düzeylerindeki azalma, androjenlerin olgunlaşmakta olan spermatozoalara biyoyararlanımını azaltabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, düşük frekanslı (100 Hz) darbeli elektromanyetik alan uygulaması, Faraday akımlarını indükleyerek mikrodalga maruziyetinin zararlı etkilerini hafifletmiş ve bu etkinin oksidatif stresle mücadelede kullanılabileceği vurgulanmıştır. Bu çalışma, elektromanyetik radyasyonun testiküler fonksiyonlar üzerindeki yıkıcı etkilerini ve antioksidan destek tedavilerinin bu etkileri azaltma potansiyelini göstermesi bakımından literatüre önemli katkılar sağlamaktadır (Kumar, Kesari, & Behari, 2011).

Buna karşılık, Mahmoudi ve ark. (2024) tarafından 2.45 GHz frekansında 2 saat/gün, 52 gün boyunca RF uygulanan sıçanlarda, RF' nin ısı kaynaklı sperm hasarını azalttığı, testiküler yapı ve sperm parametrelerini iyileştirdiği, hatta Leydig hücre sayısını artırdığı bildirilmiştir. Bu bulgular literatürdeki çelişkili sonuçlara işaret etmektedir. Farklılıklar muhtemelen çalışma tasarımı, RF şiddeti, modülasyon tipi, maruziyet süresi ve deney hayvanlarının özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Mevcut çalışmada RF maruziyeti testosteron ve gonadotropin düzeylerinde anlamlı düşüşe yol açarken, Mahmoudi ve arkadaşlarının çalışmasında koruyucu ya da nötr etkiler gözlenmiştir. Gutschi ve ark. (2011), 2.110 erkek birey üzerinde yürüttükleri çalışmada, cep telefonu kullanıcılarında testosteron düzeylerinin arttığını, buna karşılık LH düzeylerinin azaldığını ve sperm morfolojisinde bozulmalar meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Bu

bulgular, RF maruziyetinin hipotalamo-hipofizer-gonadal aks üzerinde geri bildirim mekanizmalarını bozabileceğini göstermektedir. Ancak, bu çalışmada testosteron düzeylerinde artış bildirilmişken, mevcut tez çalışmasında RF maruziyeti sonrası testosteron düzeylerinde anlamlı bir azalma gözlenmiştir. Bu farklılık, maruziyet frekansı, süresi, SAR değeri, türler arası biyolojik farklılıklar ve çalışma tasarımlarındaki farklılıklardan kaynaklanabilir. Nitekim, Fatahi ve ark. (2021), cep telefonlarından yayılan RF radyasyonun erkek üreme sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada, Wistar sıçanlarını farklı maruziyet protokollerine tabi tutmuşlardır. Deneysel gruplar 1 saat/gün konuşma, 2 saat/gün konuşma ve 50 cevapsız çağrı şeklinde 30 gün boyunca RF radyasyona maruz bırakılmış; sperm parametreleri ve serum testosteron düzeyleri değerlendirilmiştir. Bulgular, sperm canlılığı ve motilitesinde anlamlı azalmalar olduğunu ortaya koyarken, testosteron düzeylerinde gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu sonuçlar, RF maruziyetinin sperm kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini ancak hormonal parametreler üzerinde her zaman belirgin bir değişikliğe neden olmayabileceğini göstermektedir.

Farklı RF frekanslarının testiküler yapı ve hormonal denge üzerindeki etkilerinin değişkenlik gösterebileceği, literatürdeki bazı bulgularla desteklenmektedir. Bu kapsamda yürütülen bir çalışmada, erişkin erkek sıçanlar günde 1 saat süreyle, 30 gün boyunca 5.8 GHz mikrodalga radyasyona maruz bırakılmış; ardından sperm kalitesi, testiküler histoloji, hormonal parametreler (testosteron, FSH, LH) ve apoptoz ile ilişkili proteinler (caspase-3) değerlendirilmiştir. Sperm sayısı ve morfolojisi, testosteron, FSH ve LH düzeyleri, ayrıca GDNF, SCF ve transferin gibi germ hücre yenilenmesiyle ilişkili proteinlerin seviyeleri açısından RF uygulanan grup ile kontrol grubu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır. Ayrıca testis dokusunda belirgin bir histopatolojik bozulma ya da apoptoz artışı da gözlenmemiştir (Xue ve ark., 2022). Bu bulgular, yüksek frekansa (5.8 GHz) rağmen, günde 1 saatlik maruziyetin testiküler yapı ve fonksiyonlar üzerinde anlamlı bir olumsuz etki oluşturmayabileceğini göstermektedir. Oysa mevcut çalışmamızda, 3.5 GHz frekansında ve günde 2 saatlik maruziyetle, testis dokusunda hem yapısal hem de hormonal düzeyde anlamlı değişiklikler gözlenmiştir. Bu farklılık, frekans, maruziyet süresi, güç yoğunluğu, modülasyon tipi ve biyolojik model farklılıkları ile ilişkili olabilir. Dolayısıyla RF maruziyetine bağlı biyolojik etkilerin değerlendirilmesinde, maruziyet parametrelerinin dikkatle ele alınması gerekmektedir.

Mevcut çalışmada saptanan LH, FSH ve testosteron düzeylerindeki anlamlı azalmalar, literatürde bildirilen baskın eğilimle örtüşmektedir. Ayrıca koenzim Q10'un uygulamasının özellikle testosteron düzeylerindeki iyileştirici etkisi, RF' nin neden olduğu hormonal bozulmanın antioksidan mekanizmalarla kısmen dengelenebileceğini desteklemektedir.

Bu çalışmada 3.5 GHz frekansındaki RF maruziyetinin testis dokusundaki oksidatif denge üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve TOS ve MDA düzeylerinde anlamlı artış, buna karşılık TAS ve GSH düzeylerinde azalma saptanmıştır. Bu bulgular, RF maruziyetinin testiküler dokuda oksidatif stres oluşturduğunu ve bu durumun hücrel hasar mekanizmalarını aktive edebileceğini göstermektedir. RF + Koenzim Q10 grubunda ise MDA ve TOS düzeylerinde düşüş, TAS ve GSH seviyelerinde kısmi iyileşme gözlenmiş, bu da koenzim Q10' un antioksidan sistem üzerinde koruyucu bir etkisi olabileceğini düşündürmektedir. Elektromanyetik radyasyonun hücrel düzeyde oksidatif stres oluşturduğu, ROS üretimini artırdığı ve antioksidan savunma sistemini zayıflattığına dair literatürde çok sayıda bulgu mevcuttur. Bu bağlamda, çalışmamızda elde edilen sonuçlar da RF' nin testiküler dokuda oksidatif hasar oluşturabileceği yönündeki mevcut bilimsel görüşle örtüşmektedir.

Moradpour ve ark. (2020) tarafından yürütülen çalışmada, mobil telefonlardan kaynaklanan 900 MHz frekansındaki RF' nin erkek üreme sistemi üzerindeki etkileri araştırılmış ve özellikle testis dokusu üzerine oluşturduğu zararlar incelenmiştir. RF'e 4 saat/gün süreyle maruz bırakılan BALB/c türü farelerde, oksidatif stres belirteçlerinde bozulma (MDA artışı, GSH azalması), testiküler yapıda histopatolojik hasar ve testosteron düzeylerinde anlamlı azalma tespit edilmiştir. Deney grubuna eş zamanlı olarak uygulanan melatonin (2 mg/kg, 30 gün boyunca) sayesinde, germinal epitel kalınlığı ve seminifer tübül çapında artış, testis hasar skorunda azalma ve oksidatif stres parametrelerinde iyileşme (MDA düzeyinde düşüş, GSH düzeyinde artış) sağlanmıştır. Bu çalışma, melatoninin güçlü antioksidan özellikleri sayesinde RF kaynaklı testiküler hasarı önemli ölçüde azaltabildiğini ortaya koymuştur. Mevcut tez çalışmasında ise benzer şekilde, RF maruziyetine karşı koenzim Q10'un uygulanmış ve TOS ile MDA düzeylerinde düşüş, TAS ve GSH düzeylerinde artış gözlenmiştir. Ayrıca RF' ye bağlı hormonal baskılanma (özellikle testosteron düzeylerinde) koenzim Q10 uygulamasıyla

anlamli düzeyde azaltılmıştır. Her iki çalışmanın sonuçları birlikte değerlendirildiğinde hem melatonin hem de koenzim Q10'un oksidatif stresi baskılayan, hücre zararını koruyan ve hormonal dengenin yeniden sağlanmasına katkıda bulunan benzer antioksidan mekanizmalarla işlev gösterdiği söylenebilir.

RF radyasyonun testiküler dokuda oksidatif stres oluşturabileceğini destekleyen bulgular yalnızca hayvan modelleriyle sınırlı kalmayıp, insan örneklerinde de gözlenmiştir. Ahmad ve Baig (2011) tarafından yrtlen çalışmada, 900 MHz frekansında GSM kaynaklı elektromanyetik alana 1 saat maruz bırakılan insan semen örneklerinde spermatozoal MDA düzeylerinde anlamlı artış ve hareketsiz sperm oranında yükselme rapor edilmiştir. Bu bulgular, kısa süreli maruziyetin dahi lipid peroksidasyonunu artırarak hücresel membran bütünlüğünü bozabileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmada da RF maruziyeti sonrası MDA düzeylerinde anlamlı artış gözlenmiş olup, bu durum testiküler hücre zararında oksidatif yıkımın arttığını ve RF' nin doğrudan oksidatif stres mekanizmalarını tetiklediğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda TOS düzeylerinin artması ve GSH ile TAS seviyelerindeki düşüş, hücresel antioksidan savunma sisteminin baskılandığını desteklemektedir. Bu bağlamda, insan bazlı örneklerde elde edilen veriler, deneysel hayvan modellerinde gözlenen biyokimyasal değişimlerle örtüşmekte ve elektromanyetik alanların hücresel oksidatif dengeyi bozduğu yönündeki görüşü desteklenmektedir.

RF maruziyetine bağlı olarak testis dokusunda gözlenen oksidatif stres, yalnızca lipid peroksidasyon düzeylerindeki artışla sınırlı kalmayıp, antioksidan savunma mekanizmalarının zayıflamasıyla da karakterize edilmektedir. Yardım ve ark. (2024) tarafından 2600 MHz frekansında, 30 dakika/gün, 4 hafta süreyle RF uygulanan Wistar sıçanlarında yapılan çalışmada, MDA ve NOx düzeylerinde anlamlı artış, buna karşılık GSH ve GSH-Px düzeylerinde azalma rapor edilmiştir. Aynı zamanda testiküler dem ve bağ dokusunda kayıplar gözlenmiş, bu yapısal değişikliklerin oksidatif hasarın doğrudan bir sonucu olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmadaki biyokimyasal bulgular, mevcut çalışmada RF grubunda gözlenen TOS ve MDA artışları ile GSH ve TAS düzeylerindeki düşüşlerle örtüşmektedir. Özellikle antioksidan kapasiteyi temsil eden TAS düzeyindeki azalma, oksidatif yk karşısında hücresel savunmanın yetersiz kaldığını düşündürmektedir. Mevcut çalışmada koenzim Q10 uygulaması, oksidatif dengenin

yeniden sağlanmasına yönelik olumlu bir etki göstermiştir. Bu durum, RF kaynaklı oksidatif stresin farmakolojik olarak modüle edilebileceğine işaret etmektedir.

RF maruziyetinin oluşturduğu oksidatif stresin yalnızca genel testiküler dokuda değil, spesifik hücre tiplerinde de etkili olabileceğine dair bulgular son yıllarda önem kazanmıştır. Yu ve ark. (2023) tarafından 2605 MHz frekansında ve 1.05 W/kg SAR değerinde RF' ye maruz bırakılan Sprague-Dawley sıçanlarda, sperm kalitesi ve spermatogenezde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiş olmasına rağmen, Sertoli hücrelerinde MDA düzeylerinde artış, apoptoz oranında yükselme ve çinko taşıyıcısı ZIP9 ekspresyonunda artış bildirilmiştir. Bu bulgular, RF' nin testis içi hücresel yanıtların heterojenliğini etkileyebileceğini ve bazı hücre türlerinin oksidatif hasara karşı daha duyarlı olabileceğini düşündürmektedir. Mevcut çalışmada gözlenen MDA artışı testiküler dokunun genelinde değerlendirilmiş olmakla birlikte, Yu ve arkadaşlarının çalışması, özellikle destek hücreleri olan Sertoli hücrelerinde oksidatif stres belirteçlerinin yükseldiğini göstermesi açısından dikkat çekicidir. Bu durum, RF maruziyetinin germ hücrelerinin gelişimini dolaylı olarak etkileyebilecek hücresel mikro çevrede bozulmalara neden olabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca testosteron düzeyindeki artışa karşın MDA birikiminin gözlenmesi, oksidatif stresin hormonal düzeyden bağımsız olarak da gelişebileceğini göstermektedir. 1950 MHz frekansında, 3 W/kg SAR değerinde RF elektromanyetik radyasyona 24 saat süreyle maruz bırakılan fare kaynaklı Leydig (TM3) hücrelerinde yapılan in vitro bir çalışmada, maruziyet sonrasında hücre proliferasyonunda belirgin bir azalma, testosteron salgılama kapasitesinde düşüş ve steroidogenezle ilişkili P450scc mRNA ekspresyon düzeylerinde baskılanma tespit edilmiştir. Buna karşılık, apoptoz oranı, hücre içi ROS düzeyi ve StAR mRNA ekspresyonu anlamlı bir değişiklik göstermemiştir. Araştırmacılar, RF maruziyetinin hücresel yapıyı doğrudan bozmasa da hormon sentezinden sorumlu moleküler mekanizmalar üzerinde baskılayıcı etkiler gösterebileceğini vurgulamaktadır (Lin ve ark., 2017). Bu bulgular, kısa süreli (24 saat) ve yüksek SAR değerine sahip RF maruziyetinin bile testosteron üretimini olumsuz etkileyebileceğini göstermekte; ayrıca, mevcut çalışmamızda 3.5 GHz frekansında 2 saat/gün, 30 gün boyunca RF maruziyetine uğrayan ratlarda testosteron düzeylerinde saptanan anlamlı azalmayı desteklemektedir. Bu bağlamda, maruziyet süresi ile biyolojik etkinin şiddeti arasında doğrusal olmayan

ancak belirgin bir ilişki olabileceği, RF' nin hücre fonksiyonları üzerinde hem süreye hem de frekansa bağlı olarak değişen etkiler gösterebileceği anlaşılmaktadır.

RF maruziyetine bağlı olarak gelişen oksidatif stresin yalnızca serbest radikal üretimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda inflamatuvar yanıtları da tetikleyebileceğine dair bulgular dikkat çekmektedir. Gupta ve Srivastava (2022) tarafından immatür erkek tavuklar üzerinde yürütülen bir çalışmada, 2.45 GHz frekansında ve 2 saat/gün, 30 gün süreyle uygulanan RF maruziyeti sonrası testiküler ağırlık, hacim ve gonadosomatik indekste anlamlı azalma, seminifer tübüllerde şekil bozuklukları, uzama ve çap daralması, ayrıca H₂O₂ ve MDA düzeylerinde artış rapor edilmiştir. Dikkat çekici şekilde, SOD, katalaz ve GSH düzeylerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiş, buna karşın proinflamatuvar sitokin IL-1 β 'nin arttığı, antiinflamatuvar IL-10'un ise azaldığı bildirilmiştir. Aynı zamanda östrojen reseptörü alfa (ER- α) ekspresyonunun da baskılandığı saptanmıştır. Bu bulgular, oksidatif stresin bazı modellerde antioksidan sistemin tükenmesiyle değil, bağışıklık yanıtı üzerinden şekillenebileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmada RF maruziyeti sonrası GSH ve TAS düzeylerinde düşüş gözlenmiş olmakla birlikte, Gupta ve Srivastava'nın bulguları, RF'nin etkilerinin türler arası ve gelişimsel döneme göre değişebileceğini ve inflamatuvar yanıtlarla da şekillenebileceğini göstermesi açısından önemli katkı sunmaktadır. Bu kapsamda, yakın tarihte Ok ve ark. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, 900 MHz frekansında, 26 V/m şiddetinde ve 0.14 W/kg SAR değerinde RF' ye günde 4 saat, 8 hafta boyunca maruz bırakılan Wistar albino sıçanların testis dokularında çok yönlü analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma grubunda, testis ağırlığı ve hacminde anlamlı azalma, seminifer tübül hasarı ve interstisyel ödemde artış, tunica albuginea kalınlığında incelmeye gibi belirgin histopatolojik bozulmalar saptanmıştır. Ayrıca, IL-4 ve IFN- γ sitokin gen ekspresyonlarında anlamlı artış gözlenmiş; bu durum, RF maruziyetine bağlı olarak gelişen inflamatuvar yanıtın, testiküler doku hasarında ve olası tümöral süreçlerin başlatılmasında etkili olabileceğini düşündürmüştür. Mevcut tez çalışmasında her ne kadar doğrudan sitokin düzeyleri analiz edilmemiş olsa da RF maruziyeti sonrası gözlenen TOS ve MDA artışı, GSH ve TAS azalması, histolojik bütünlük kaybı ve hormonal baskılanma, bu inflamatuvar süreçlerin oksidatif stresle birlikte testiküler toksisiteyi artırabileceğini desteklemektedir. Ayrıca bu çalışma, elektromanyetik

alanların testiküler mikro çevrede hem yapısal hem immünolojik düzeyde bozulmalar oluşturabileceğini göstermesi bakımından dikkat çekicidir.

RF maruziyetinin testiküler dokuda oluşturduğu oksidatif stresin spermatogenezin işlevsel çıktıları üzerinde de etkili olabileceği, bazı çalışmalarla net şekilde ortaya konmuştur. Mailankot ve ark. (2009) tarafından Wistar sıçanlarında, 0.9/1.8 GHz frekanslarında (GSM) 1 saat/gün, 28 gün boyunca uygulanan RF maruziyeti sonrasında sperm sayısında anlamlı bir değişiklik gözlenmemiş, ancak sperm hareketliliğinde azalma, testis ve epididimide GSH düzeylerinde düşüş ve lipid peroksidasyonunda artış rapor edilmiştir. Bu bulgular, elektromanyetik alanların sperm üretim miktarını etkilemeden kaliteyi bozabileceğini ve oksidatif hasarın özellikle sperm hareketliliği gibi fonksiyonel özellikleri zayıflatabileceğini düşündürmektedir. Mevcut çalışmada RF maruziyeti sonrası testiküler dokuda GSH düzeylerinde azalma ve MDA ile TOS düzeylerinde artış saptanmış olup, bu biyokimyasal bozulmalar, Mailankot ve arkadaşlarının bulgularıyla örtüşmektedir. Ayrıca, spermatozoanın olgunlaşma sürecinde önemli rol oynayan epididimal ortamın oksidatif stresle bozulması, dolaylı olarak sperm fonksiyonlarını sekteye uğratabilir. Koenzim Q10 uygulamasının bu süreçlerdeki dengeleyici etkisi ise, antioksidan müdahalenin potansiyel koruyuculuğunu bir kez daha desteklemektedir.

Yüksek frekanslı elektromanyetik alanların testiküler dokuda oluşturabileceği hücrel hasar ve stres yanıtları, günümüzde daha spesifik biyobelirteçler aracılığıyla detaylı şekilde ortaya konmaktadır. Yılmaz ve ark. (2025), 5.9 GHz frekansında 30 gün süreyle RF maruziyetine bırakılan sıçanlarda ciddi histopatolojik hasar, sperm kaybı, vasküler konjesyon, artmış TBARS ve azalmış total tiol düzeyleri saptamış; ayrıca GRP-78 ve CHOP gibi ER stres belirteçlerinde artış rapor etmiştir. Ancak koenzim Q10 uygulaması ile bu etkilerin belirgin biçimde gerilediği hem histolojik hem de biyokimyasal iyileşme sağlandığı belirtilmiştir. Mevcut tez çalışmasında da RF maruziyetine bağlı olarak gözlenen hormonal, oksidatif ve histolojik bozulmaların koenzim Q10 uygulamasıyla hafifletilmiş olması, söz konusu bulguları desteklemektedir.

Koenzim Q10' un yalnızca oksidatif stresle mücadelede değil, aynı zamanda mitokondriyal enerji üretimi, gen ekspresyonu ve inflamatuvar yanıtların düzenlenmesinde de aktif rol oynadığı bilinmektedir. Nie ve ark. (2023), koenzim Q10' un erkeklerde

sperm kalitesini artırdığını ve kadınlarda oosit maturasyonu ile embriyo gelişimini desteklediğini belirtmiştir. Aynı şekilde Alahmar ve ark. (2021), insan semeninde koenzim Q10 seviyelerinin sperm sayısı, hareketliliği ve DNA bütünlüğü ile doğrudan ilişkili olduğunu, özellikle varikozel ve asthenozoospermi gibi durumlarda destek tedavi sonrası semen parametrelerinde belirgin iyileşmeler sağlandığını ileri sürmektedir. Bu bulgular, koenzim Q10' un RF kaynaklı üreme sistemi bozukluklarında etkili bir biyokimyasal savunma ajanı olabileceğini düşündürmektedir.

RF maruziyetinin testiküler dokuda oksidatif stres oluşturmalarının yanı sıra, hücre ölüm mekanizmaları ve hücre döngüsünde bozulmalara yol açabileceği de bazı çalışmalarla ortaya konmuştur. Kesari ve Behari (2010a) tarafından Wistar sıçanlarında 2.45 GHz frekansında ve 0.11 W/kg SAR ile 2 saat/gün, 35 gün süresince uygulanan RF maruziyeti sonrası testis dokusunda artmış apoptoz, azalmış sperm sayısı, GPx ve SOD düzeylerinde düşüş, buna karşılık katalaz (CAT) aktivitesinde artış bildirilmiştir. Benzer şekilde, aynı araştırma grubunun farklı bir çalışmasında, bu kez 50 GHz frekansında ve çok daha düşük SAR düzeyinde (8.0×10^{-4} W/kg) RF'ye maruz bırakılan sıçanlarda GPx ve SOD düzeylerinde azalma, CAT düzeyinde artış, histone kinaz aktivitesinde azalma, G(2)/M geçiş fazında anlamlı azalma ve apoptozda artış rapor edilmiştir (Kesari & Behari, 2010b). Her iki çalışma da RF maruziyetinin antioksidan sistem üzerinde baskılayıcı etkiler yarattığını ve bu baskının apoptozla ilişkili hücre hasara neden olabileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmada da RF grubunda GSH ve TAS düzeylerinde anlamlı azalma, TOS ve MDA düzeylerinde ise belirgin artış gözlenmiş olup, bu sonuçlar RF' nin antioksidan savunma sistemini zayıflatarak hücre stres ve apoptozla zemin hazırlayabileceğini desteklemektedir. Ayrıca, sperm parametreleri ve doku bütünlüğü üzerindeki etkiler, oksidatif stresin testiküler fizyoloji üzerindeki çok yönlü etkilerini ortaya koymaktadır.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, elektromanyetik radyasyonun testiküler dokuda oksidatif stres yarattığı, bu stresin hem hücre antioksidan savunma sistemini zayıflattığı hem de inflamatuvar mekanizmaları tetikleyerek doku bütünlüğünü ve sperm hücrelerinin gelişimini olumsuz etkilediği görülmektedir. Farklı frekanslarda ve sürelerde yürütülen deneysel çalışmalar, RF maruziyetinin MDA ve H_2O_2 gibi oksidatif stres belirteçlerini artırırken, GSH, SOD ve TAS gibi antioksidanların düzeylerini

azalttığını tutarlı biçimde göstermektedir. Ayrıca, bazı çalışmalar bu etkilerin hücresel spesifiklik taşıyabileceğini ve özellikle Sertoli gibi destek hücrelerinin RF' ye daha duyarlı olabileceğini vurgulamaktadır. Mevcut çalışmada elde edilen biyokimyasal bulgular, daha önce hormonal dengenin bozulduğuna işaret eden sonuçlarla birlikte ele alındığında, RF maruziyetinin yalnızca oksidatif stres üzerinden değil, aynı zamanda hipotalamo-hipofizer-gonadal aksı etkileyerek testosteron, LH ve FSH düzeylerini baskıladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, oksidatif stresin hormonal regülasyon ile doğrudan ilişkili olduğunu ve RF' nin çok katmanlı fizyolojik sistemleri etkileyebilecek bir çevresel stresör olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, 3.5 GHz frekansında RF radyasyonuna maruz bırakılan sıçanların testis dokularında belirgin histopatolojik tespit edilmiştir. RF grubundaki hayvanlarda Johnsen skoru anlamlı şekilde düşmüş, seminifer tübüllerde spermatogenez basamaklarında aksama, spermatozoa sayısında azalma, bazal membranda düzensizlik ve germinal epitelde belirgin bozulmalar gözlenmiştir. Bu histopatolojik değişiklikler, RF' nin testiküler dokuda doğrudan toksik etkiler oluşturabileceğini ve germ hücrelerinin olgunlaşma sürecini bozabileceğini göstermektedir. Bu histolojik bulgular, çeşitli frekans ve maruziyet protokolleriyle yürütülmüş diğer hayvan çalışmalarının sonuçlarıyla uyumludur.

Bu bağlamda, Almášiová ve ark. (2014) tarafından 2.45 GHz frekansında, 1 saat/gün, 5 gün boyunca RF' ye maruz bırakılan Wistar sıçanlarında yapılan çalışmada, testis dokusunda Sertoli hücrelerinde vakuolizasyon, germ hücre çekirdeklerinde yoğunlaşma ve apoptotik yapıların artışı gözlenmiştir. Mikroskobik düzeyde, RF' nin kısa süreli etkilerle dahi germinal epitel bütünlüğünü bozabildiği belirtilmiştir. Bu çalışmadaki gözlemler, mevcut çalışmada da gözlenen germ hücre disorganizasyonu ve olgun spermatozoa azalması ile paralellik göstermektedir. Almášiová ve ark. (2018), 2.45 GHz frekansında, 1 saat/gün, 5 gün süreyle RF uygulanan sıçanların testis dokularında, spermatogonyal hücrelerde organel hasarları, kromatin kondensasyonu, mitokondriyal bozulmalar ve bazal lamina yapısında düzensizlikler raporlamıştır. Bu bulgular RF' nin testis hücrelerinde subselüler düzeyde dejeneratif süreçleri tetikleyebildiğini ve spermatogenezin erken evrelerinden itibaren etkilenebildiğini göstermektedir. Mevcut

çalışmada da benzer şekilde spermatid ve spermatozoa düzeyinde azalmalar ve tübüler bütünlük kaybı saptanmıştır.

Bilgici ve ark. (2018), 2.45 GHz frekansında 60 dakika/gün, 28 gün süreyle RF maruziyeti gerçekleştirdikleri rat modelinde, testis dokusunda artmış MDA, azalmış GSH ve testosteron düzeyleri ile birlikte spermatozoa sayısında düşüş ve spermatid yoğunluğunda azalma rapor etmiştir. Histolojik olarak, seminifer tübül dejenerasyonu ve spermatogenetik basamaklarda düzensizlik saptanmıştır. Bu bulgular, mevcut çalışmadaki histolojik bozulmalarla örtüşmektedir.

Literatürdeki bir başka dikkate değer örnek olarak, Gautam ve ark. (2019) tarafından Swiss albino farelerde, 2.45 GHz frekansında 2 saat/gün, 60 gün boyunca RF uygulanan modelde, testis dokularında seminifer tübül yapısında bozulma, sperm sayısında azalma ve germ hücrelerinin organizasyonunda bozukluk saptanmıştır. Ayrıca histopatolojik olarak Sertoli ve Leydig hücrelerinde vakuolizasyon bildirilmiştir. Mevcut çalışmada da özellikle spermatogenezin ileri evrelerinde hücre yoğunluğunda azalma, bazal membran düzensizliği ve Sertoli hücre yapısında bozulma gözlenmiştir. Benzer olarak, Andrašková ve ark. (2022), 2.45 GHz frekansında 60 dakika/gün, 5 gün süreyle RF'ye maruz kalan Wistar sıçanlarında testis dokularında nükleer hasar, germ hücrelerinde mitokondriyal düzensizlik, spermatid hücrelerinde kromatin bozulması ve Sertoli hücrelerinde vakuolizasyon bildirmiştir. Bu bulgular RF' nin kısa süreli maruziyetle bile hücresel düzeyde önemli yapısal bozukluklara yol açabileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmadaki dejeneratif hücre bulguları ve Johnsen skorundaki düşüş bu sonuçlarla tutarlıdır.

Uzun süreli RF maruziyeti ile ilgili olarak, Dasdag ve ark. (2015), 2.1 GHz frekansında 2 saat/gün, 10 hafta süreyle RF uygulanan sıçanlarda, testis dokularında seminifer tübül çaplarında azalma, sperm sayısı ve testosteron düzeylerinde düşüş, sperm hareketliliğinde bozulma gözlemlenmiştir. Histopatolojik olarak ise germinal epitelde incelleme ve spermatogenetik hücre tabakalarında azalma rapor edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan frekans ve maruziyet süresi, mevcut çalışmadakine benzer olmakla birlikte, testiküler dokudaki olumsuz etkiler daha uzun süreli maruziyetin bir sonucu olarak daha da belirginleşmiştir. RF maruziyetinin testiküler dokuya verdiği zarar yalnızca oksidatif stres belirteçleriyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda yapısal bütünlüğün korunmasında

kritik rol oynayan hücresel bağlantı proteinlerini de etkileyebilmektedir. Cheng ve ark. (2021) tarafından Sprague-Dawley sıçanlarında 6 saat/gün ve 150 gün süresince uygulanan uzun dönem RF maruziyeti sonrasında, kan-testis bariyerinde bozulma, sperm yoğunluğu, canlılık ve hareketliliğinde azalma, MDA düzeylerinde artış ve SOD, GSH ve CAT gibi temel antioksidanların azalması gözlenmiştir. Ayrıca, hücresel bariyerin yapısal bütünlüğünü sağlayan occludin, ZO-1, CAR ve N-cadherin proteinlerinin ekspresyon seviyelerinde anlamlı bir düşüş rapor edilmiştir. Bu bulgular, RF' nin yalnızca serbest radikal üretimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda hücreler arası bağlantı sistemlerini hedef alarak dokusal bütünlüğü doğrudan zedeleyebileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmada da GSH düzeylerinin düşmesi ve MDA ile TOS' un artması, benzer biçimde testiküler antioksidan sistemin baskılandığını ve hücresel yapının oksidatif hasara açık hale geldiğini ortaya koymaktadır. Cheng ve arkadaşlarının bulguları ayrıca, oksidatif stresin uzun süreli RF maruziyetine bağlı olarak sperm kalitesi ve bariyer bütünlüğü üzerinde birikimli etkiler gösterebileceğine işaret etmektedir.

Houston ve ark. (2019) tarafından C57BL/6 farelerinde, 905 MHz frekansında ve 2 W/kg SAR düzeyinde 12 saat/gün süresince farklı zaman periyotlarında (1, 3 veya 5 hafta) uygulanan RF maruziyeti sonrasında, testis dokusunda histolojik olarak belirgin bir yapısal değişiklik saptanmamış, ancak epididimal spermatozoaların canlılık ve hareketliliğinde bozulma, ayrıca ROS' ta artış, DNA oksidasyonu ve fragmentasyonu bildirilmiştir. Bu bulgular, elektromanyetik alanların oksidatif stres oluşturucu etkisinin yalnızca yapısal doku hasarıyla sınırlı olmadığını, aynı zamanda hücresel DNA düzeyinde geri dönüşü olmayan moleküler zararlara yol açabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, mevcut çalışmada da RF maruziyeti sonrası MDA ve TOS düzeylerinde artış, TAS ve GSH düzeylerinde azalma gözlenmiş olup, bu durum RF' nin hücresel oksidatif dengeyi bozarak sperm kalitesini ve hücre bütünlüğünü dolaylı olarak etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Shahin ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, 2.45 GHz frekansında, 2 saat/gün, 30 gün süresince uygulanan RF maruziyeti sonrası fare testislerinde seminifer tübül çapında daralma, spermatosit ve spermatid sayılarında azalma, DNA hasarı ve apoptozda artış rapor edilmiştir. Bu çalışmada da

spermatogenezin ileri evrelerinin özellikle etkilendiği ve RF'nin testiküler hücre proliferasyonu üzerinde yıkıcı etkilere sahip olabileceği vurgulanmıştır.

Hancı ve ark. (2018) tarafından 900 MHz frekansında, 1 saat/gün, 21 gün süreyle yapılan RF maruziyetinde testis dokusunda seminifer tübül dejenerasyonu, bazal lamina bütünlüğünde kayıp, endoplazmik retikulum dilatasyonu ve mitokondriyal vakuolizasyon gibi yapısal bozukluklar gözlenmiştir. GSH seviyelerinde değişiklik gözlenmemiş olmakla birlikte, MDA, SOD ve CAT düzeylerinde artış saptanmıştır. Bu bulgular, hücresel düzeyde RF kaynaklı hasarın oksidatif stresle ilişkilendirilebileceğini desteklemektedir.

Jonwal ve ark. (2018), 2.45 GHz frekansında, 2 saat/gün, 30 gün süreyle RF uyguladıkları Swiss albino farelerde katalaz ve MDA düzeylerinde artış, GSH-Px ve SOD düzeylerinde azalma, testosteron düşüşü, seminifer tübüllerde histopatolojik bozukluklar ve kan hücrelerinde mikronükleus oluşumu gözlemlemiştir. Bu çalışma, RF' nin hem üreme dokularında hem de sistemik genotoksik etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Šimaiová ve ark. (2018) ise 2.45 GHz frekansında, 2 saat/gün, 3 hafta süren RF uygulamasının seminifer tübüllerin şekil yapısında bozulma, Sertoli hücreleri ve spermatositlerde ultrastrüktürel değişiklikler, apoptotik çekirdek sayısında artış ve Cu-Zn SOD ve Mn-SOD pozitif hücrelerde artış ile sonuçlandığını bildirmiştir. Bu bulgular da bu çalışmada elde edilen sonuçlar ise benzer nitelikte, RF maruziyetinin testis mikroyapısında yapısal ve antioksidan savunma sisteminde belirgin değişiklikler oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Li ve ark. (2025) ise çalışmalarında, 1.5 GHz ve 4.3 GHz yüksek güçlü RF maruziyetinin erkek üreme sistemi üzerindeki etkilerini araştırmış ve testis dokusunda oksidatif stresin yanı sıra enerji metabolizmasında bozulmalar saptamıştır. Araştırmada hem tekil hem de kombine frekans maruziyetinin sperm kalitesi, hormon seviyeleri (testosteron, LH, FSH, inhibin B) ve testiküler dokuda histopatolojik değişikliklere yol açtığı gösterilmiştir. SOD aktivitesindeki düşüş ve MDA düzeylerindeki artış, RF maruziyeti sonrası testiküler dokuda belirgin bir oksidatif stres oluştuğuna işaret etmektedir. Ayrıca ATP, LDH ve SDH düzeylerindeki azalma, mitokondriyal enerji metabolizmasının baskılandığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın bulguları, tez

kapsamında 3.5 GHz RF maruziyeti sonrası testis dokusunda gözlenen oksidatif stres, hormon düzeylerinde azalma ve histopatolojik değişimlerle doğrudan örtüşmektedir.

Sonuçları ve metodolojik yaklaşım olarak mevcut çalışmaya paralel bir başka çalışmada, Saygın ve ark. (2016) ise, 2.45 GHz frekansında ve 3 saat/gün uygulanan RF' ye maruz kalan sıçanlarda MDA, TOS ve PGE2 seviyelerinde artış; sperm sayısı, testosteron ve VEGF düzeylerinde düşüş olduğunu bildirmiştir. Histolojik düzeyde Johnsen skoruna yer verilmemiştir; ancak artmış mitotik aktivite, RF' nin germ hücre siklusuna müdahale ettiğini göstermektedir. Yakın tarihli bir diğer çalışmada, RF maruziyeti sonrasında sperm kalitesinde anlamlı bir düşüş meydana geldiği, bu durumun Sertoli hücreleri (SC) ve Leydig hücreleri (LC) tarafından yapılan salgı düzeylerinde değişiklikler ile birlikte testis morfolojisinde bozulmalar eşliğinde ortaya çıktığı gösterilmiştir. Ayrıca, testis hücrelerinde apoptoz oranında artış gözlenmiş olup, bu durum RF maruziyetinin sperm kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini düşündürmektedir. Bu etkilerin, Leydig hücrelerinin sekresyon fonksiyonunun bozulması ve testis hücrelerinde apoptozun tetiklenmesi ile ilişkili olabileceği belirtilmiştir (Guo ve ark., 2019).

Saygın ve ark. (2011), 2.45 GHz frekansındaki RF radyasyonunun sıçan testis dokusu üzerindeki etkilerini inceledikleri ayrı bir çalışmada, RF' ye maruz kalan grupta Johnsen biyopsi skorlarının ve Leydig hücre sayısının azaldığını, ayrıca apoptoz ile ilişkili genlerde değişiklikler meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Bu bulgular, RF maruziyetinin spermatogenezde aksamalara ve testis dokusunda apoptoza yol açabileceğini düşündürmektedir. Benzer şekilde, Shokri ve ark. (2015) tarafından 2.45 GHz frekansındaki RF radyasyonuna farklı sürelerde maruz bırakılan Wistar sıçanlarının testislerinde, sperm parametrelerinde azalma, ölü hücre sayısında artış ve kaspaz-3 aktivitesinde yükselme gözlenmiştir. Ayrıca, seminal vezikül ağırlığında anlamlı bir azalma da bildirilmiş, bu da uzun süreli Wi-Fi maruziyetinin üreme sağlığı açısından risk oluşturabileceğine işaret etmiştir. Šimaiová ve ark. (2018) ise juvenil Wistar albino sıçanlarını 2.45 GHz frekansındaki RF' ye maruz bırakmış ve sonucunda seminer tübüllerde morfolojik değişiklikler ile birlikte apoptozda artış saptamışlardır. Öte yandan, Forgacs ve ark. (2006) tarafından yürütülen bir çalışmada, 1800 MHz GSM RF

radasyonuna maruz bırakılan farelerde üreme organlarında belirgin bir değişiklik gözlenmemiş, ancak serum testosteron düzeylerinde artış rapor edilmiştir.

Tüm bu çalışma sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, RF maruziyetinin testis dokusu üzerindeki etkilerine dair ortak bir histopatolojik tablo oluşmaktadır.

Farklı frekanslarda, maruziyet sürelerinde ve deneysel protokollerde yürütölen çok sayıda çalışmada, RF maruziyetinin testis dokusu üzerinde benzer şekilde yapısal bozulmalara yol açtığı bildirilmiştir. Literatürde sıkça rapor edilen seminifer tüböl dejenerasyonu, germinal epitel düzensizliği, spermatozoa kaybı, Sertoli ve Leydig hücrelerinde vakuolizasyon gibi bulgular, bu çalışmada da RF grubunda anlamlı şekilde gözlemlenmiştir. Özellikle spermatogenezin ileri evrelerinde belirginleşen hücre kaybı ve Johnsen skorundaki düşüş, RF' nin testiküler mikroyapıyı hedef aldığına dair yaygın bilimsel görüşle örtüşmektedir. Ayrıca bazı çalışmalarda bildirilen mitokondriyal hasar, kromatin kondensasyonu ve bazal membran bozulması gibi subselöler düzeydeki yapısal değişiklikler de bu çalışmadaki mikroskopik incelemelerde destekleyici şekilde tespit edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen histopatolojik bulgular, elektromanyetik radyasyonun germ hücre dizilimi ve testiküler bütönlük üzerindeki olumsuz etkilerine dair mevcut bilimsel verileri doğrulamakta ve RF maruziyetinin potansiyel üreme toksisitesi açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

RF radyasyonunun, sperm hareketliliği, canlılığı ve morfolojisi üzerinde olumsuz etkiler yaratarak erkek infertilitesine neden olabileceği gösterilmiştir. Örneğin, Kesari, Kumar ve Behari (2010) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, mobil telefon frekanslarına günde 2 saat, 35 gün süreyle maruz bırakılan sıçanlarda ($SAR = 0.9 \text{ W/kg}$) sperm sayısında anlamlı azalma ve ROS artış bildirilmiştir. Benzer şekilde, Yu ve ark. (2020), 2575–2635 MHz frekans aralığında 4G mobil telefon radyasyonuna günde 6 saat, 150 gün boyunca maruz bırakılan sıçanlarda sperm kalitesinde düşüş ve testiküler doku morfolojisinde hasar tespit etmişlerdir. Bu çalışmalar, uzun süreli ve yüksek frekanslı RF maruziyetinin hem sperm parametrelerini hem de testiküler yapısal bütönlüğü bozabileceğini ortaya koymaktadır. Rahban ve ark. (2023) tarafından 18–22 yaş arası genç erkekler üzerinde yürütölen kesitsel bir çalışmada, cep telefonu kullanım süresindeki artışın, sperm konsantrasyonu ve toplam sperm sayısında azalma ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, telefonun pantolon cebinde taşınmasının bu sonuçlar

üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, elektromanyetik alanların doğrudan temas dışında da üreme parametreleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini ortaya koymakta; ancak maruziyetin türü, süresi ve bireysel alışkanlıkların da etkili olduğunu düşündürmektedir.

Çalışmanın deneysel bulgularına ek olarak, maruz kalınan elektromanyetik enerjinin dokuya ne ölçüde absorbe edildiğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen SAR (Specific Absorption Rate) simülasyon analizleri de değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, tüm vücut ortalama SAR değeri 0.006879 W/kg, testis dokusuna özgü lokal SAR değeri ise 0.000598 W/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, uluslararası kabul gören sınırların oldukça altında olmasına rağmen, testis dokusunda anlamlı hormonal, oksidatif ve histopatolojik değişimlerin gözlenmiş olması, elektromanyetik alanların biyolojik etkilerinin yalnızca maruziyetin şiddetine değil; frekans, süre ve hedef dokunun duyarlılığına da bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, simülasyon ortamının deneysel düzeneğe yüksek düzeyde benzerlik göstermesi, elde edilen SAR değerlerinin biyolojik bulgularla olan uyumunu desteklemektedir. Bu bulgular, literatürde yüksek SAR değerleri ile yürütülen çalışmalarla benzer yönde sonuçlar ortaya koyması açısından dikkat çekicidir ve düşük seviyeli RF maruziyetlerinin dahi canlı dokularda anlamlı biyolojik etkiler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır.

5.2. Sonuç

Bu tez çalışmasında, 3.5 GHz frekansında RF radyasyonuna 30 gün boyunca günde 2 saat maruz bırakılan erkek sıçanlarda, testis dokusuna yönelik yapısal ve işlevsel bozulmalar çok yönlü olarak ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, RF maruziyetinin hipotalamo-hipofizer-gonadal aks üzerinde baskılayıcı etkiler oluşturarak LH, FSH ve testosteron düzeylerinde anlamlı düşümlere neden olduğunu, buna eşlik eden şekilde testiküler dokuda oksidatif stresin arttığını (TOS ve MDA düzeylerinde artış, TAS ve GSH düzeylerinde azalma) ve histopatolojik düzeyde spermatogenezde bozulmalar, germinal epitelde dejenerasyon, Johnsen skorunda düşüş gibi önemli doku hasarlarının geliştiğini göstermektedir. Literatürde bildirilen diğer RF çalışmalarıyla tutarlılık gösteren bu sonuçlar, elektromanyetik alanların erkek üreme sağlığı üzerinde hücresel düzeyde zararlı etkiler oluşturabileceğini desteklemektedir. Ayrıca, güçlü antioksidan

özelliklere sahip olan koenzim Q10 uygulamasının hormonal düzeyleri kısmen dengelediği, oksidatif stres belirteçlerinde iyileşme sağladığı ve doku hasarını azalttığı gösterilmiştir. Bu durum, RF kaynaklı biyolojik etkilerin farmakolojik yaklaşımlarla azaltılabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma RF maruziyetinin erkek üreme sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini sistematik bir yaklaşımla ortaya koymakta ve koenzim Q10'un bu etkileri hafifletmedeki potansiyel koruyucu rolüne dikkat çekmektedir.



KAYNAKÇA

- Adams JA, Galloway TS, Mondal D, Esteves SC, Mathews F. Effect of mobile telephones on sperm quality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int.* 2014; 70:106-12.
- Agarwal A, Deepinder F, Sharma RK, Ranga G, Li J. Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: An observational study. *Fertil Steril.* 2008;89(1):124-28.
- Agarwal A, Desai NR, Kesari KK. Pathophysiology of cell phone radiation: Oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Reprod Biol Endocrinol.* 2009; 7:114.
- Agarwal A, Desai NR, Makker K, Varghese A, Mouradi R, Sabanegh E, ve ark. Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: An in vitro pilot study. *Fertil Steril.* 2009;92(4):1318-25.
- Agarwal A, Said TM. Role of sperm chromatin abnormalities and DNA damage in male infertility. *Hum Reprod Update.* 2003;9(4):331-45.
- Agarwal A, Singh A, Hamada A, Kesari K. Cell phones and male infertility: A review of recent innovations in technology and consequences. *Int Braz J Urol.* 2011;37(4):432-54.
- Ahmad L, Baig NM. Mobile phone RF-EMW exposure to human spermatozoa: An in vitro study. *Pak J Zool.* 2011;43(6).
- Aitken RJ, Krausz C. Oxidative stress, DNA damage and the Y chromosome. *Reproduction.* 2001;122(4):497-506.
- Alahmar AT, Calogero AE, Singh R, Cannarella R, Sengupta P, Dutta S. Coenzyme Q10, oxidative stress, and male infertility: A review. *Clin Exp Reprod Med.* 2021;48(2):97-104.
- Alamášiová V, Holovská K, Cigánková V, Račková E, Fabianová K, Martončíková M. Structural and ultrastructural study of rat testes influenced by electromagnetic radiation. *J Toxicol Environ Health A.* 2014;77(13):747-50.

Al-Damegh MA. Rat testicular impairment induced by electromagnetic radiation from a conventional cellular telephone and the protective effects of the antioxidants vitamins C and E. *Clinics (Sao Paulo)*. 2012;67(7):785-792. doi:10.6061/clinics/2012(07)14

Allison RR. The electromagnetic spectrum: Current and future applications in oncology. *Future Oncol*. 2013;9(5):657-67.

Almášiová V, Holovská K, Šimaiová V, Beňová K, Raček A, Račková E, ve ark. The thermal effect of 2.45 GHz microwave radiation on rat testes. *Acta Vet Brno*. 2018;86(4):413-19.

Andrašková S, Holovská K, Ševčíková Z, Andrejčáková Z, Tóth Š, Martončíková M, ve ark. The potential adverse effect of 2.45 GHz microwave radiation on the testes of prenatally exposed peripubertal male rats. *Histol Histopathol*. 2022;37(3):287-99.

Arda E, Yuksel I, Akdere H, Akdeniz E, Yalta TD, Aktoz T, Altun GD. Contrary effects of coenzyme Q10 and vitamin E after testicular ischemia/reperfusion in a rat model validated with glucose metabolism imaging. *Urol J*. 2021;88(1):56-63.

Arenas-Jal M, Suñé-Negre JM, García-Montoya E. Coenzyme Q10 supplementation: Efficacy, safety, and formulation challenges. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2020;19(2):574-94.

Avendaño C, Mata A, Sanchez Sarmiento CA, Doncel GF. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril*. 2012;97(1):39-45.e2.

Balawender K, Orkisz S. The impact of selected modifiable lifestyle factors on male fertility in the modern world. *Cent European J Urol*. 2020;73(4):563-68.

Balercia G, Mancini A, Paggi F, Tiano L, Pontecorvi A, Boscaro M, ve ark. Coenzyme Q10 and male infertility. *J Endocrinol Invest*. 2009;32(7):626-32.

Basaria S. Male hypogonadism. *Lancet*. 2014;383(9924):1250-63.

Batool S, Bibi A, Frezza F, Mangini F. Benefits and hazards of electromagnetic waves, telecommunication, physical and biomedical: A review. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2019;23(7):3121-28.

- Bektaş H. 5G and health concerns. In: Cem E, ed. Research & Reviews in Health Sciences. Ankara: Gece Publishing; 2021.
- Bentinger M, Brismar K, Dallner G. The antioxidant role of coenzyme Q. Mitochondrion. 2007;7(Suppl):41-50.
- Betteridge DJ. What is oxidative stress? Metabolism. 2000;49(2 Suppl 1):3-8.
- Bilgici B, Gun S, Avci B, Akar A, Engiz BK. What is the adverse effect of wireless local area network, using 2.45 GHz, on the reproductive system? Int J Radiat Biol. 2018;94(11):1054-61.
- Cheeseman KH, Slater TF. An introduction to free radical biochemistry. Br Med Bull. 1993;49(3):481-93.
- Cheng Q, Yu G, Wang G, Bai ZM. Exposure of the scrotum to 4G cellphone radiofrequency electromagnetic radiation affects the spermatogenesis and blood-testis barrier of adult male rats. Zhonghua Nan Ke Xue. 2021;27(8):680-84.
- Crane FL. Biochemical functions of coenzyme Q10. J Am Coll Nutr. 2001;20(6):591-98.
- Dama MS, Bhat MN. Mobile phones affect multiple sperm quality traits: A meta-analysis. F1000Res. 2013; 2:40.
- Dasdag S, Taş M, Akdag MZ, Yegin K. Effect of long-term exposure of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on testes functions. Electromagn Biol Med. 2015;34(1):37-42.
- Delkhosh A, Shoorei H, Niazi V, Delashoub M, Neshat Gharamaleki M, Ahani- Nahayati M, ve ark. Coenzyme Q10 ameliorates inflammation, oxidative stress, and testicular histopathology in rats exposed to heat stress. Hum Exp Toxicol. 2021;40(1):3-15.
- Demsia G, Vlastos D, Matthopoulos DP. Effect of 910-MHz electromagnetic field on rat bone marrow. Sci World J. 2004;4(Suppl 2):48-54.
- Desai NR, Kesari KK, Agarwal A. Pathophysiology of cell phone radiation: Oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. Reprod Biol Endocrinol. 2009; 7:114.
- Dimitriadis F, Borgmann H, Struck JP, Salem J, Kuru TH. Antioxidant supplementation on male fertility: A systematic review. Antioxidants (Basel). 2023;12(4):836.

Djeridane Y, Touitou Y, de Seze R. Influence of electromagnetic fields emitted by GSM-900 cellular telephones on the circadian patterns of gonadal, adrenal and pituitary hormones in men. *Radiat Res.* 2008;169(3):337-43.

Doğan B. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon. 2024. Erişim: 12 Nisan 2025, <https://www.doganbor.com/wp-content/uploads/Makale-3-ver.pdf>

El-Khadragy M, Al-Megrin WA, AlSadhan NA, Metwally DM, El- Hannamy RE, H Selam FE, ve ark. Impact of coenzyme Q10 administration on lead acetate-induced testicular damage in rats. *Oxid Med Cell Longev.* 2020; 2020:4981386.

Fatahi Asl J, Shirbandi K, Rezaie A, Rastegarpour S, Pahlavani S, Ahangarpour A, Dastoorpur M, Mansouri E. Short-Term Effects of Cell Phone Radiation on Fertility and Testosterone Hormone in Male Rats. *Duzce Med J.* August 2021;23(2):151-56.

Finkelstein JS, Lee H, Burnett-Bowie SA, Pallais JC, Yu EW, Borges LF, ve ark. Gonadal steroids and body composition, strength, and sexual function in men. *N Engl J Med.* 2013;369(11):1011-22.

Forgacs Z, Somosy Z, Kubinyi G, Bakos J, Hudak A, Surjan A, ve ark. Effect of whole-body 1800 MHz GSM-like microwave exposure on testicular steroidogenesis and histology in mice. *Reprod Toxicol.* 2006;22(1):111-17.

Fraga CG, Motchnik PA, Wyrobek AJ, Rempel DM, Ames BN. Smoking and low antioxidant levels increase oxidative damage to sperm DNA. *Mutat Res.* 1996;351(2):199-03.

Garrido-Maraver J, Cordero MD, Oropesa-Ávila M, Vega AF, Mata M, Pavon AD, ve ark. Coenzyme Q10 therapy. *Mol Syndromol.* 2014;5(3-4):187-97.

Gautam R, Singh KV, Nirala J, Murmu NN, Meena R, Rajamani P. Oxidative stress-mediated alterations on sperm parameters in male Wistar rats exposed to 3G mobile phone radiation. *Andrologia.* 2019;51(3):e13201.

Giuliano F. Neurophysiology of erection and ejaculation. *J Sex Med.* 2011;8(Suppl 4):310-15.

- Guo L, Lin JJ, Xue YZ, An GZ, Zhang JP, Zhang KY, ve ark. Effects of 220 MHz pulsed modulated radiofrequency field on the sperm quality in rats. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(7):1286.
- Gupta V, Srivastava R. 2.45 GHz microwave radiation induced oxidative stress: Role of inflammatory cytokines in regulating male fertility through estrogen receptor alpha in *Gallus gallus domesticus*. *Biochem Biophys Res Commun*. 2022;629:61-70.
- Gutierrez-Mariscal FM, Arenas-de Larriva AP, Limia-Perez L, Romero-Cabrera JL, Yubero-Serrano EM, López-Miranda J. Coenzyme Q10 supplementation for the reduction of oxidative stress: Clinical implications in the treatment of chronic diseases. *Int J Mol Sci*. 2020;21(21):7870.
- Gutschi T, Mohamad Al-Ali B, Shamloul R, Pummer K, Trummer H. Impact of cell phone use on men's semen parameters. *Andrologia*. 2011;43(5):312-16.
- Güleş Ö, Kum Ş, Yıldız M, Boyacıoğlu M, Ahmad E, Naseer Z, ve ark. Protective effect of coenzyme Q10 against bisphenol-A-induced toxicity in the rat testes. *Toxicol Ind Health*. 2019;35(7):466-81.
- Haida Z, Hakiman M. A comprehensive review on the determination of enzymatic assay and nonenzymatic antioxidant activities. *Food Sci Nutr*. 2019;7(5):1555-63.
- Hanci H, Kerimoglu G, Mercantepe T, Odaci E. Changes in testicular morphology and oxidative stress biomarkers in 60-day-old Sprague Dawley rats following exposure to continuous 900-MHz electromagnetic field. *Reprod Toxicol*. 2018; 81:71-8.
- Hardell L, Carlberg M, Hedendahl LK. Radiofrequency radiation from nearby base stations gives high levels in an apartment in Stockholm, Sweden: A case report. *Oncol Lett*. 2018;15(5):7871-83.
- Havas M. Electromagnetic hypersensitivity: Biological effects of dirty electricity with emphasis on diabetes and multiple sclerosis. *Electromagn Biol Med*. 2006;25(4):259-68.
- Héroux P, Belyaev I, Chamberlin K, Dasdag S, Salles AAD, Rodriguez CEF, ve ark. Cell phone radiation exposure limits and engineering solutions. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(7):5398.

- Houston BJ, Nixon B, McEwan KE, Martin JH, King BV, Aitken RJ, ve ark. Whole-body exposures to radiofrequency-electromagnetic energy can cause DNA damage in mouse spermatozoa via an oxidative mechanism. *Sci Rep*. 2019; 9:17478.
- Iftikhar A, Akhtar MF, Saleem A, Riaz A, Zehravi M, Rahman MH, ve ark. Comparative potential of zinc sulfate, L-carnitine, lycopene, and coenzyme Q10 on cadmium-induced male infertility. *Int J Endocrinol*. 2022; 2022:6266613.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys*. 2010;99(6):818-36.
- Irani S, Zhandi M, Sadeghi M, Yousefi AR, Marzban H, Rafieian-Naeini HR. The effect of dietary supplementation of coenzyme Q10 on reproductive variables of cadmium-challenged male Japanese quails (*Coturnix Japonica*). *Vet Med Sci*. 2023;9(2):837-50.
- Jannini EA, Simonelli C, Lenzi A. Disorders of ejaculation. *J Endocrinol Invest*. 2002;25(11):1006-19.
- Johnsen SG. Testicular biopsy score count – a method for registration of spermatogenesis in human testes: Normal values and results in 335 hypogonadal males. *Hormones*. 1970; 1:2-25.
- Jonwal C, Sisodia R, Saxena VK, Kesari KK. Effect of 2.45 GHz microwave radiation on the fertility pattern in male mice. *Gen Physiol Biophys*. 2018;37(4):453-60.
- Kaltsas A. Oxidative stress and male infertility: The protective role of antioxidants. *Medicina (Kaunas)*. 2023;59(10):1769.
- Kaplan S, Deniz OG, Önger ME, Türkmen AP, Yurt KK, Aydın I, ve ark. Electromagnetic field and brain development. *J Chem Neuroanat*. 2016;75(Pt B):52-61.
- Karaman MI, Gökçe AM, Koca O, Karaman B, Öztürk Mİ, Yurdakul N, ve ark. The effects of electromagnetic waves emitted by the cell phones on the testicular tissue. *Arch Ital Urol Androl*. 2014;86(4):274-77.
- Kaur P, Rai U, Singh R. Genotoxic risks to male reproductive health from radiofrequency radiation. *Cells*. 2023;12(4):594.

- Kesari KK, Agarwal A, Henkel R. Radiations and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol*. 2018;16(1):118.
- Kesari KK, Behari J. Effects of microwave at 2.45 GHz radiations on reproductive system of male rats. *Toxicol Environ Chem*. 2010;92(6):1135-47.
- Kesari KK, Behari J. Microwave exposure affecting reproductive system in male rats. *Appl Biochem Biotechnol*. 2010; 162:416-28.
- Kesari KK, Kumar S, Behari J. Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Indian J Exp Biol*. 2010;48(10):987-92.
- Kesari KK, Kumar S, Nirala J, Siddiqui MH, Behari J. Biophysical evaluation of radiofrequency electromagnetic field effects on male reproductive pattern. *Cell Biochem Biophys*. 2013;65(2):85-96.
- Kim S, Han D, Ryu J, Kim K, Kim YH. Effects of mobile phone usage on sperm quality – No time-dependent relationship on usage: A systematic review and updated meta-analysis. *Environ Res*. 2021; 202:111784.
- Koyu A, Cesur G, Özgüner F, Elmas O. Cep telefonlarından yayılan 900 MHz elektromanyetik alanın serum kortizol ve testosteron hormonu üzerine etkisi. *Med J SDU*. 2009;12(1):52-6.
- Kumar S, Kesari KK, Behari J. The therapeutic effect of a pulsed electromagnetic field on the reproductive patterns of male Wistar rats exposed to a 2.45-GHz microwave field. *Clinics (Sao Paulo)*. 2011;66(7):1237-45.
- Kurutas EB. The importance of antioxidants which play the role in cellular response against oxidative/nitrosative stress: Current state. *Nutr J*. 2016;15(1):71.
- La Vignera S, Condorelli RA, Vicari E, D'Agata R, Calogero AE. Effects of the exposure to mobile phones on male reproduction: A review of the literature. *J Androl*. 2012;33(3):350-56.
- Lafuente R, González-Comadrán M, Solà I, Lopez G, Brassesco M, Carreras R, ve ark. Coenzyme Q10 and male infertility: A meta-analysis. *J Assist Reprod Genet*. 2013;30(9):1147-56.

- Lai H, Levitt BB. The roles of intensity, exposure duration, and modulation on the biological effects of radiofrequency radiation and exposure guidelines. *Electromagn Biol Med*. 2022;41(2):230-55.
- Lavranos G, Balla M, Tzortzopoulou A, Syriou V, Angelopoulou R. Investigating ROS sources in male infertility: A common end for numerous pathways. *Reprod Toxicol*. 2012;34(3):298-07.
- Li Y, Yao B, Men J, Pang Y, Gao J, Bai Y, ve ark. Oxidative stress and energy metabolism in male reproductive damage from single and combined high-power microwave exposure at 1.5 and 4.3 GHz. *Reprod Toxicol*. 2025; 132:108759.
- Lin YS, Liu CY, Chen PW, Wang CY, Chen HC, Tsao CW Coenzyme Q10 amends testicular function and spermatogenesis in male mice exposed to cigarette smoke by modulating oxidative stress and inflammation. *Am J Transl Res*. 2021;13(9):10142-54.
- Lin YY, Wu T, Liu JY, Gao P, Li KC, Gua QY, ve ark. 1950 MHz radio frequency electromagnetic radiation inhibits testosterone secretion of mouse Leydig cells. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;15(1):17. doi:10.3390/ijerph15010017
- Littarru GP, Tiano L, Belardinelli R, Watts GF. Coenzyme Q10, endothelial function, and cardiovascular disease. *Biofactors*. 2011;37(5):366-73.
- Lucignani G, Jannello LMI, Fulgheri I, Silvani C, Turetti M, Gadda F, ve ark. Coenzyme Q10 and melatonin for the treatment of male infertility: A narrative review. *Nutrients*. 2022;14(21):4585.
- Mahmoudi R, Karbalay-Doust S, Masoudi E, Jafari-Barmak M, Ghanbri A, Nikseresht M, ve ark. Mitigating heat-induced sperm damage and testicular tissue abnormalities: The protective role of radiofrequency radiation from Wi-Fi routers in rodent models. *J Biomed Phys Eng*. Published online 2024.
- Mailankot M, Kunnath AP, Jayalekshmi H, Koduru B, Valsalan R. Radio frequency electromagnetic radiation (RF-EMR) from GSM (0.9/1.8 GHz) mobile phones induces oxidative stress and reduces sperm motility in rats. *Clinics (Sao Paulo)*. 2009; 64:561-65.
- Masoumi M, Salehi M, Angaji SA, Hashemi M. Effects of coenzyme Q10 and diamond nanoparticles on ischemia-reperfusion-induced testicular damages in rats. *Galen Med J*. 2022;10: e2029.

- Mawhinney M, Mariotti A. Physiology, pathology and pharmacology of the male reproductive system. *Periodontol* 2000. 2013;61(1):232-51.
- Moradpour R, Shokri M, Abedian S, Amiri FT. The protective effect of melatonin on liver damage induced by mobile phone radiation in mice model. *Int J Radiat Res*. 2020;18(1):133-41.
- Najafi M, Cheki M, Amini P, Javadi A, Shabeeb D, Musa AE, Evaluating the protective effect of resveratrol, Q10, and alpha-lipoic acid on radiation-induced mice spermatogenesis injury: A histopathological study. *Int J Reprod Biomed*. 2019;17(12):907-14.
- Nakada K, Sato A, Yoshida K, Morita T, Tanaka H, Inoue SI, ve ark. Mitochondria-related male infertility. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2006;103(41):15148-53.
- Nie X, Dong X, Hu Y, Xu F, Hu C, Shu C, Coenzyme Q10 stimulate reproductive vitality. *Drug Des Devel Ther*. 2023; 17:2623-37.
- O'Donnell L, Robertson KM, Jones ME, Simpson ER. Estrogen and spermatogenesis. *Endocr Rev*. 2001;22(3):289-318.
- Ok F, Emre M, Bisgin A, Jafarguliyev S, Effect of 900 MHz radiofrequency electromagnetic radiation emitted from mobile phone on testicular immunity and the associated risk of testicular germ cell tumor. *Tumor Discovery*. 2024;3(1),1703.
- Ouchi A, Nagaoka S, Mukai K. Tunneling effect in regeneration reaction of vitamin E by ubiquinol. *J Phys Chem B*. 2010;114(19):6601-07.
- Özcan O, Erdal H, Çakırca G, Yönden Z. Oksidatif stres ve hücre içi lipit, protein ve DNA yapıları üzerine etkileri. *J Clin Exp Invest*. 2015;6(3):331-36.
- Özguner M, Koyu A, Cesur G, Ural M, Ozguner F, Gokcimen A, ve ark. Biological and morphological effects on the reproductive organ of rats after exposure to electromagnetic field. *Saudi Med J*. 2005;26(3):405-10.
- Pandey N, Giri S, Das S, Upadhaya P. Radiofrequency radiation (900 MHz)-induced DNA damage and cell cycle arrest in testicular germ cells in Swiss albino mice. *Toxicol Ind Health*. 2017;33(4):373-84.

- Prausnitz S, Sutsskind C. Effects of chronic microwave irradiation on mice. *IRE Trans Biomed Electron.* 1962;9(2):104-8.
- Pravst I, Zmitek K, Zmitek J. Coenzyme Q10 contents in foods and fortification strategies. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2010;50(4):269-80.
- Rahban R, Senn A, Nef S, Rösli M. Association between self-reported mobile phone use and the semen quality of young men. *Fertil Steril.* 2023;120(6):1181-92.
- Reddy MM, Mahipal SV, Subhashini J, Reddy MC, Roy KR, Reddy GV, ve ark. Bacterial lipopolysaccharide-induced oxidative stress in the impairment of steroidogenesis and spermatogenesis in rats. *Reprod Toxicol.* 2006;22(3):493-500.
- Rowland MA, Nagley P, Linnane AW, Rosenfeldt FL. Coenzyme Q10 treatment improves the tolerance of the senescent myocardium to pacing stress in the rat. *Cardiovasc Res.* 1998;40(1):165-73.
- Rubtsova N, Perov S, Belaya O, Kuster N, Balzano Q. Near-field radiofrequency electromagnetic exposure assessment. *Electromagn Biol Med.* 2015;34(3):180-2.
- Safarinejad MR, Safarinejad S, Shafiei N, Safarinejad S. Effects of the reduced form of coenzyme Q10 (ubiquinol) on semen parameters in men with idiopathic infertility: A double-blind, placebo-controlled, randomized study. *J Urol.* 2012;188(2):526-31.
- Said RS, Mohamed HA, Kamal MM. Coenzyme Q10 mitigates ionizing radiation-induced testicular damage in rats through inhibition of oxidative stress and mitochondria-mediated apoptotic cell death. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2019; 383:114780.
- Saygin M, Çalışkan S, Gümrall N, Soydan M, Vural H. 2450 MHz elektromanyetik radyasyonun sıçanların FSH, LH ve total testosteron seviyelerinde meydana getirdiği değişiklikler. *Med J SDU.* 2009;16(4):10-4.
- Saygin M, Asci H, Ozmen O, Cankara FN, Dincoglu D, Ilhan I. Impact of 2.45 GHz microwave radiation on the testicular inflammatory pathway biomarkers in young rats: The role of gallic acid. *Environ Toxicol.* 2016;31(12):1771-84.
- Saygin M, Caliskan S, Karahan N, Koyu A, Gumral N, Uguz A. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field. *Toxicol Ind Health.* 2011;27(5):455-63.

Sciorio R, Tramontano L, Esteves SC. Effects of mobile phone radiofrequency radiation on sperm quality. *Zygote*. 2022;30(2):159-68.

Shahin NN, El-Nabarawy NA, Gouda AS, Mégarbane B. The protective role of spermine against male reproductive aberrations induced by exposure to electromagnetic field – An experimental investigation in the rat. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2019; 370:117-130.

Shahin S, Singh S, Chaturvedi C. 1800 MHz mobile phone irradiation induced oxidative and nitrosative stress leads to p53 dependent Bax mediated testicular apoptosis in mice, *Mus musculus*. *J Cell Physiol*. 2018;233(9):7253-67.

Shahin S, Singh S, Chaturvedi C. 2.45 GHz microwave radiation induced oxidative and nitrosative stress mediated testicular apoptosis: Involvement of a p53 dependent Bax-caspase-3 mediated pathway. *Environ Toxicol*. 2018;33(9):931-45.

Sharma A, Minhas S, Dhillo WS, Jayasena CN. Male infertility due to testicular disorders. *J Clin Endocrinol Metab*. 2021;106(2):442-59.

Shokri S, Soltani A, Kazemi M, Sardari D, Mofrad FB. Effects of Wi-Fi (2.45 GHz) exposure on apoptosis, sperm parameters and testicular histomorphometry in rats: A time course study. *Cell J*. 2015;17(2):322-31.

Šimaiová V, Almášiová V, Holovská K, Kiskova T, Horvathova F, Sevcikova Z, ve ark. The effect of 2.45 GHz non-ionizing radiation on the structure and ultrastructure of the testis in juvenile rats. *Histol Histopathol*. 2018;34(4):391-403.

Spiess AN, Feig C, Schulze W, Chalmel F, Cappallo-Obermann H, Primig M, ve ark. Cross-platform gene expression signature of human spermatogenic failure reveals inflammatory-like response. *Hum Reprod*. 2007;22(11):2936-46.

Thoma ME, McLain AC, Louis JF, King RB, Trumble AC, Sundaram R, ve ark. Prevalence of infertility in the United States as estimated by the current duration approach and a traditional constructed approach. *Fertil Steril*. 2013;99(5):1324-31.e1.

Tremellen K. Oxidative stress and male infertility: A clinical perspective. *Hum Reprod Update*. 2008;14(3):243-58.

Trošić I, Pavičić I, Marjanović AM, Bušljeta I. Non-thermal biomarkers of exposure to radiofrequency/microwave radiation. *Arh Hig Rada Toksikol*. 2012;63(Suppl 1):67-73.

- Turunen M, Olsson J, Dallner G. Metabolism and function of coenzyme Q. *Biochim Biophys Acta*. 2004;1660(1-2):171-99.
- Türkiye Uzay Ajansı. Dalgalar ve elektromanyetik tayf (spektrum). 2024. Erişim: 12 Nisan 2025, <https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum>
- Udensi UK, Tchounwou PB. Dual effect of oxidative stress on leukemia cancer induction and treatment. *J Exp Clin Cancer Res*. 2014; 33:106.
- Verze P, Cai T, Lorenzetti S. The role of the prostate in male fertility, health and disease. *Nat Rev Urol*. 2016;13(7):379-86.
- Walke G, Gaurkar SS, Prasad R, Lohakare T, Wanjari M. The impact of oxidative stress on male reproductive function: Exploring the role of antioxidant supplementation. *Cureus*. 2023;15(7): e42583.
- Wang X, Tian X, Ye B, Zhang Y, Zhang X, Huang S, ve ark. The association between ambient temperature and sperm quality in Wuhan, China. *Environ Health*. 2020;19(1):44.
- Wdowiak A, Mazurek PA, Wdowiak A, Bojar I. Effect of electromagnetic waves on human reproduction. *Ann Agric Environ Med*. 2017;24(1):13-8.
- Wilkes S, Chinn DJ, Murdoch A, Rubin G. Epidemiology and management of infertility: A population-based study in UK primary care. *Fam Pract*. 2009;26(4):269-74.
- Wu Y, Li H, Zhao X, Baki G, Ma C, Yao Y, ve ark. Differential expression of circRNAs of testes with high and low sperm motility in Yili geese. *Front Genet*. 2022; 13:970097.
- Xue Y, Guo L, Lin J, Lai P, Rui G, Liu L, ve ark. Effects of 5.8 GHz microwaves on testicular structure and function in rats. *Biomed Res Int*. 2022; 2022:1234567.
- Yadav H, Rai U, Singh R. Radiofrequency radiation: A possible threat to male fertility. *Reprod Toxicol*. 2021; 100:90-100.
- Yakıncı ZD. Effects of electromagnetic field on human health. *T.C. Inonu Univ Sag Hizmetleri MYO Derg*. 2016;4(2):44-54.
- Yalçın A, Saygın M. Elektromanyetik alanların üreme sistemi üzerine etkileri. *Müh Bilim ve Tasarım Derg*. 2016;4(2):105-24.

- Yang YK, Wang LP, Chen L, Yao XP, Yang KQ, Gao LG, ve ark. Coenzyme Q10 treatment of cardiovascular disorders of ageing including heart failure, hypertension and endothelial dysfunction. *Clin Chim Acta*. 2015; 450:83-9.
- Yardımcı A, Sirav Aral B, Tomruk A, Oruc S, Delen K, Kuzay D, ve ark. The histological and biochemical analysis of the effects of radiofrequency radiation on testis tissue of rats and the protective effect of melatonin. *Turk J Med Sci*. 2024;54(4):858-65.
- Yılmaz H, Tümkaya L, Mercantepe T, Yılmaz A, Gül F, Suzan ZT. Effects of 5G mobile phone network electromagnetic field exposure on testicular endoplasmic reticulum stress and the protective role of coenzyme Q10. *Arch Med Res*. 2025;56(4):103157.
- Yu G, Bai Z, Song C, Cheng Q, Wang G, Tang Z, ve ark. Current progress on the effect of mobile phone radiation on sperm quality: An updated systematic review and meta-analysis of human and animal studies. *Environ Pollut*. 2021; 282:116952.
- Yu G, Tang Z, Chen H, Chen Z, Wang L, Cao H, ve ark. Long-term exposure to 4G smartphone radiofrequency electromagnetic radiation diminished male reproductive potential by directly disrupting Spock3–MMP2–BTB axis in the testes of adult rats. *Sci Total Environ*. 2020; 698:133860.
- Yu G, Zhu Y, Song C, Chen L, Tang Z, Wu T. The ZIP9-centered androgen pathway compensates for the 2605 MHz radiofrequency electromagnetic radiation-mediated reduction in resistance to H₂O₂ damage in Sertoli cells of adult rats. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2023; 254:114733.
- Zha XD, Wang WW, Xu S, Shang XJ. [Assumed subject in reproductive biology]. *Zhonghua Nan Ke Xue*. 2019;25(5):451-55.

ÖZGEÇMİŞ



EK 1. KESİN SONUÇ RAPORU



EK 2. TEZ ORJİNALLİK RAPORU

