

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİNOP İLİNDE NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ÖNCESİ KARASU VE
KABALI NEHİRLERİNİN SU VE SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE
RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ**

Didem KART

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Serdar DİZMAN

JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Recep KESER
Dr. Öğr. Üyesi Erkan KIRIŞ

RİZE-2022
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİNOP İLİNDE NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ÖNCESİ KARASU VE KABALI
NEHİRLERİNİN SU VE SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

Doç. Dr. Serdar DİZMAN danışmanlığında, Didem KART tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile oluşturulan jüri tarafından 16/02/2022 tarihinde Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı Soyadı	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Recep KESER	
Üye	: Doç. Dr. Serdar DİZMAN	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Erkan KIRIŞ	

Doç. Dr. Ahmet YANIK
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

“Sinop İlinde Nükleer Güç Santrali Öncesi Karasu ve Kabalı Nehirlerinin Su ve Sediment Örneklerinde Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Örneklerin hazırlanması ve ölçümleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın bu noktaya gelinceye kadarki geçen sürece emeği geçen, çalışmalarım boyunca her türlü bilgi, öneri ve yardımlarıyla beni destekleyen ve daima yanımda olan değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Serdar DİZMAN’a sonsuz teşekkür ederim. Yine bilgileriyle bana yardımcı olan ve destekleyen değerli hocamlarım Prof. Dr. Recep KESER’e ve Dr. Öğr. Üyesi Erkan KIRIŞ’a teşekkür ederim. Jeostatistik hesaplamalar ve haritalarla tezin gelişmesine katkı sunan Artvin Çoruh Üniversitesi’nden değerli hocam Doç. Dr. Cafer Mert YEŞİLKANAT’ a ayrıca teşekkür ederim. Burada ismini anmadığım ama her daim bilgilerini paylaşmaktan çekinmeyen ve desteklerini hiç esirgemeyen değerli hocalarıma da çok teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, eğitimim için ellerinden gelen desteği sağlayan ve her zaman yanımda hissettiğim babam Turkay KAYA’ya, annem Hanife KAYA’ya, kardeşim Sinem ÇANDIR’a, bitanecik yeğenim Poyraz ÇANDIR’a, beni cesaretlendiren ve yanımda olan diğer aile bireylerime ve her türlü desteğini benden esirgemeyen ve her koşulda benim için çabalayan, zorlu arazi şartlarında benimle hep omuz omuza olan sevgili eşim Muhammet KART’a en içten sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tezi TÜBİTAK tarafından 118Y510 nolu proje ile desteklenmiştir.

Didem KART

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Sinop İlinde Nükleer Güç Santrali Öncesi Karasu ve Kabalı Nehirlerinin Su ve Sediment Örneklerinde Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi” başlıklı bu tezi, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 16/02/2022

Didem KART

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

SİNOP İLİNDE NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ÖNCESİ KARASU VE KABALI NEHİRLERİNİN SU VE SEDİMENT ÖRNEKLERİNDE RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

Didem KART

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışmanı: Doç. Dr. Serdar DİZMAN

Bu çalışmadaki amacımız, Sinop ilinde kurulacak olan nükleer güç santrali faaliyete geçmeden önce Sinop ilinin iki önemli nehrinden alınan sediment ve nehir suyu örneklerinde ^3H , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyoizotoplarının background seviyelerini belirlemek ve bu seviyelerin ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen limit değerlerle kıyaslamasını yapmaktır. Karasu (80 km) ve Kabalı (51,3 km) nehirlerinden 2 km aralıklarla en az yağış alan temmuz ve en çok yağış alan aralık aylarında hem su hem de sediment örnekleri alındı. Her bir ayda 59 sediment ve 59 nehir suyu örneği olmak üzere toplamda 236 adet örnek alındı ve bu noktaların koordinatları Magellan Explorist 510 GPS cihazı ile belirlendi. Toplanan sediment ve nehir suyu örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs konsantrasyonları yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılarak ölçülürken, nehir suyu örneklerinde trityum konsantrasyonları ise Sıvı Sintilasyon Sayacı (LSC) kullanılarak ölçüldü. Karasu Nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla 3,08 – 29,40 Bq/kg, 2,95 – 19,10 Bq/kg, 0,35 – 61,13 Bq/kg ve 54,83 – 495,02 Bq/kg aralığında değiştiği belirlendi. Kabalı nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan sediment örneklerinde ise ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla 5,79 – 25,65 Bq/kg, 3,35 – 19,55 Bq/kg, 0,97 – 7,23 Bq/kg ve 141,66 – 446,77 Bq/kg aralığında değiştiği belirlendi. Aralık ve temmuz aylarında alınan nehir suyu örneklerinde ortalama trityum aktivite konsantrasyonları sırasıyla Karasu Nehri için $2,79 \pm 0,52$ Bq/L ($23,65 \pm 4,48$ TU) ve $1,75 \pm 0,51$ Bq/L ($14,86 \pm 4,36$ TU), Kabalı Nehri için ise $2,37 \pm 0,48$ Bq/L ($20,10 \pm 4,08$ TU) ve $1,97 \pm 0,46$ Bq/L ($16,67 \pm 3,91$ TU) olarak bulunmuştur. İncelenen sediment örneklerindeki doğal ve yapay radyonüklidlerden kaynaklanan radyolojik tehlikeleri değerlendirmek için radyum eşdeğer aktivitesi (R_{eq}), dış tehlike indeksi (H_{ex}), absorblanmış doz hızı (D), yıllık etkin doz eşdeğeri (AEDE) değerleri hesaplandı ve uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen ortalama değerlerle kıyaslandı.

2022, 98 sayfa

Anahtar kelimeler: Sediment, Nehir suyu, Radyoaktivite, Trityum, Nükleer Güç Santrali, Sinop

ABSTRACT

DETERMINATION OF RADIOACTIVITY LEVELS IN WATER AND SEDIMENT SAMPLES OF THE KARASU AND KABALI RIVERS BEFORE THE NUCLEAR POWER PLANT IN SİNOP

Didem KART

Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Master Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serdar DİZMAN

This study aims to determine the background levels of radioisotopes ^3H , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs in sediment and river water samples to be taken from two important rivers of Sinop before the nuclear power plant to be established in Sinop and to compare the determined levels with the limit values recommended by national and international organizations. In this context, both water and sediment samples were taken at 2 km intervals from the Karasu (80 km) and Kabalı (51.3 km) rivers in July, when there is the least rainfall and December, when there is the most precipitation. A total of 236 samples were taken each month, including 59 sediment samples and 59 river water samples. The coordinates of the sampled points were determined with the Magellan Explorist 510 GPS. Concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , and ^{137}Cs in the collected sediment and river water samples were measured using a High Purity Germanium Detector (HPGe) and tritium concentrations in river water samples were measured using a Liquid Scintillation Counter (LSC). In sediment samples taken from the Karasu River in December and July, the activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs , and ^{40}K were between 3.08 – 29.40 Bq/kg, 2.95 – 19.10 Bq/kg, 0.35 – 61.13 Bq/kg and 54.83 – 495.02 Bq/kg, respectively. In sediment samples taken from the Kabalı river in December and July, the activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs , and ^{40}K were between 5.79 – 25.65 Bq/kg, 3.35 – 19.55 Bq/kg, 0.97 – 7.23 Bq/kg and 141.66 – 446.77 Bq/kg, respectively. Average tritium activity concentrations in river water samples taken in December and July were 2.79 ± 0.52 Bq/L (23.65 ± 4.48 TU) and 1.75 ± 0.51 Bq/L (14.86 ± 4.36 TU) for the Karasu River and they were 2.37 ± 0.48 Bq/L (20.10 ± 4.08 TU) and 1.97 ± 0.46 Bq/L (16.67 ± 3.91 TU) for the Kabalı River. Radium equivalent activity (Ra_{eq}), external hazard index (H_{ex}), absorbed dose rate (D), annual effective dose equivalent (AEDE) values were calculated and compared with the average values recommended by international organizations.

2022, 98 pages

Keywords: Sediment, River water, Radioactivity, Tritium, Nuclear Power Plant, Sinop

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti	5
1.3. Radyasyon Tanımı ve Türleri.....	9
1.3.1. İyonlaştırıcı Radyasyon.....	10
1.3.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon.....	12
1.4. Radyasyon Kaynakları	13
1.4.1. Doğal Radyasyon Kaynakları.....	13
1.4.2. Yapay Radyasyon Kaynakları	15
1.5. Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri	16
1.6. Tritiyum.....	17
1.6.1. Çevresel Tritiyum ve Özellikleri.....	18
1.6.2. Nükleer Reaktörlerde Tritiyum Oluşum Mekanizmaları	20
1.6.3. Tritiyumun Kullanım Alanları.....	22
1.7. Sinop İlinde Kurulması Planlanan Nükleer Güç Santraline Ait Bilgiler	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Çalışma Bölgesi.....	24
2.2. Numunelerin Toplanması.....	24
2.3. Numunelerin Analize Hazırlanması	27
2.3.1. Sediment Numuneleri.....	27
2.3.2. Su Numuneleri.....	29
2.3.2.1. Gama Ölçümleri	29

2.3.2.2.	Tritiyum Ölçümleri	30
2.4.	Gama Spektrometrik Ölçümler	33
2.4.1.	Enerji Kalibrasyonu	34
2.4.2.	Verim Kalibrasyonu.....	35
2.4.3.	Aktivite Konsantrasyonu.....	36
2.5.	Radyolojik Tehlike Parametreleri	37
2.5.1.	Radyum Eşdeğer Aktivitesi (R_{aeq}).....	37
2.5.2.	Dış Tehlike İndeksi (H_{ex}).....	38
2.5.3.	Gama İndeksi (I_γ).....	38
2.5.4.	Soğurulan Gama Doz Hızı (D).....	38
2.5.5.	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (AEDE)	39
2.6.	Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi	39
2.6.1.	Sıvı Sintilasyon Sayacı (LSC).....	39
2.6.2.	Sayım Kapları (Vialler).....	41
2.6.3.	LSC' de Dedeksiyon Sistemi.....	42
2.6.4.	Laboratuvar Standardı (DWS)	43
2.6.5.	Spike (RWS).....	43
2.6.6.	Background Standardı (DW).....	43
2.7.	Örneklerin Sayılması	44
2.7.1.	Sayım Verimi.....	44
2.7.2.	Tritiyum Aktivite Konsantrasyonları.....	44
2.7.3.	Geri Kazanım Düzeltme Faktörü (F).....	45
2.7.4.	Belirsizlik (Örnek Hatası).....	45
2.7.5.	Minimum Dedekte Edilebilir Aktivite (MDA)	45
2.8.	Jeoistatistik.....	46
3.	BULGULAR	48
3.1.	Karasu ve Kabalı Nehirlerinden Alınan Örneklere ait noktaların GPS ve Rakım Bilgileri	48
3.2.	Sediment Örneklerinde Aktivite Konsantrasyonları	52
3.2.1.	Karasu Nehri Sediment Örnekleri.....	52
3.2.2.	Kabalı Nehri Sediment Örnekleri	55
3.3.	Nehir Suyu Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları.....	56

3.3.1.	Karasu Nehri Su Örnekleri	56
3.3.2.	Kabalı Nehri Su Örnekleri	59
3.4.	Radyolojik Tehlike Parametreleri	61
3.4.1.	Karasu Nehri Sediment Örnekleri.....	61
3.4.2.	Kabalı Nehri Sediment Örnekleri	63
3.5.	Trityum Hesaplamaları.....	64
3.5.1.	Karasu Nehri.....	65
3.5.2.	Kabalı Nehri.....	67
4.	TARTIŞMA ve SONUÇ	68
4.1.	Aktivite Konsantrasyonlarının İncelenmesi	70
4.1.1.	Sediment Örnekleri	70
4.1.2.	Su Örnekleri.....	79
4.2.	Radyolojik Tehlike Parametreleri	84
4.3.	Trityum Konsantrasyonlarının İncelenmesi	86
4.4.	Kalite Kontrol Ölçümleri	89
5.	ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR		92
ÖZGEÇMİŞ		99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Elektromanyetik spektrum	9
Şekil 2. Radyasyon türleri	10
Şekil 3. Pozitif yüklü iyon oluşumu	11
Şekil 4. Negatif yüklü iyon oluşumu	11
Şekil 5. Radyasyon kaynaklarından alınan doz oranları.....	13
Şekil 6. Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri	14
Şekil 7. Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri	16
Şekil 8. Döteryum-Döteryum reaksiyonu.....	17
Şekil 9. Tritiyumun beta bozunumu	18
Şekil 10. Tritiyumun doğal çevrimi.....	19
Şekil 11. Kuzey yarımkürede trityum konsantrasyonun yıllara göre değişimi	20
Şekil 12. Sinop NGS alanının uydu görüntüsü.....	23
Şekil 13. Proje alanından itibaren 30 km yarıçaplı alandaki yerleşimler	23
Şekil 14. Çalışma bölgesi olan Karasu ve Kabalı nehirlerinin Sinop ilindeki konumları.....	24
Şekil 15. Aralık ve Temmuz aylarına ait örnek alım fotoğrafları	26
Şekil 16. Alüminyum kaplara alınan bazı sediment numuneleri.....	27
Şekil 17. Sediment numunelerinin etüvde kurutulması.....	28
Şekil 18. Ağatta öğütülen ve elekten geçirilen numuneler	28
Şekil 19. Polietilen kaplara konulan numuneler	29
Şekil 20. Laboratuvara getirilen su numuneleri ve numunelerin filtre edilmesi	29
Şekil 21. Radyoaktivite ölçümleri için hazırlanan su numuneleri.....	30
Şekil 22. Destilasyon ünitesi ile bir örneğin destile edilmesi.....	31
Şekil 23. Destilatların aktarıldığı kahverengi cam şişeler	31
Şekil 24. Kahverengi cam şişe, ayarlı pipet, vial ve aktarma üniteli (dispenser) sintilatör.....	32
Şekil 25. KR-1 örnek vialinin LSC cihazında ölçümü sonucu alınan analiz sonuç raporu	33

Şekil 26. Gama spektrometre sisteminin genel bir görünüşü	34
Şekil 27. Enerjinin kanala göre değişim grafiği	35
Şekil 28. Verim değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	36
Şekil 29. Sıvı sintilasyon sayacı (LSC)	40
Şekil 30. Cam (a) ve plastik (b) vialler.....	42
Şekil 31. Karasu nehri örneklem noktaları	50
Şekil 32. Kabalı nehri için örneklem noktaları.....	52
Şekil 33. Sinop ilinin sıcaklık ve yağış grafiği (1936-2020).....	68
Şekil 34. Çalışma alanları ve örneklemelerin yapıldığı istasyonlar	69
Şekil 35. Kabalı nehrinin sediment örneklerine ait radyonüklidlerin dağılım diyagramları	71
Şekil 36. Karasu nehrinin sediment örneklerine ait radyonüklidlerin dağılım diyagramları	72
Şekil 37. Sediment örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyonlarına ait bazı istatistiksel değerler	73
Şekil 38. Karasu nehri sediment örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları	75
Şekil 39. Kabalı nehri sediment örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları	77
Şekil 40. Su örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyonlarına ait bazı istatistiksel değerler.....	80
Şekil 41. Karasu nehri su örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları	81
Şekil 42. Kabalı nehri su örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları	83
Şekil 43. Karasu nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su örneklerinde trityum konsantrasyonlarının dağılımı	86
Şekil 44. Kabalı nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su örneklerinde trityum konsantrasyonlarının dağılımı	87

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bazı bölgelerdeki doğal radyasyon doz düzeyleri	15
Tablo 2. Doğal radyasyon kaynaklarından alınan yıllık etkin doz değerleri	15
Tablo 3. Ölçülen radyoizotoplar için MDA değerleri	37
Tablo 4. Sinop ili Karasu nehrinden alınan örneklerin GPS koordinatları ve rakım değerleri	49
Tablo 5. Sinop ili Kabalı nehrinden alınan örneklerin GPS koordinatları ve rakım değerleri	51
Tablo 6. Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları	53
Tablo 7. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde aktivite	54
Tablo 8. Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları	55
Tablo 9. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları	56
Tablo 10. Karasu nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları	57
Tablo 11. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları	58
Tablo 12. Kabalı nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları	59
Tablo 13. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları	60
Tablo 14. Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri	61
Tablo 15. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri	62
Tablo 16. Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri	63
Tablo 17. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri	64

Tablo 18. Karasu nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan nehir suyu örneklerinde trityum konsantrasyonları	66
Tablo 19. Kabalı nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan nehir suyu örneklerinde trityum konsantrasyonları	67
Tablo 20. Karasu ve Kabalı nehirlerinden alınan sediment örneklerinde belirlenen radyoaktivite verilerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması.....	78
Tablo 21. Karasu ve Kabalı nehirlerinden alınan nehir suyu örneklerinde belirlenen radyoaktivite verilerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması.....	84
Tablo 22. Bu çalışma ve dünyanın farklı bölgelerine ait nehir sularında trityum aktivite konsantrasyonu seviyeleri	88
Tablo 23. IAEA-337 referans materyalinin ölçüm sonuçları	89
Tablo 24. Hazırlanan standardın hazırlanma aktivitesi ve hesaplanan aktivite değeri	89
Tablo 25. Trityum standardının ölçüm sonuçları	90

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AEDE	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri
Bq	Bekerel
Ci	Küri
cpm	Dakikadaki Sayım
DWS	Seyreltilmiş Laboratuvar Standardı
IAEA	Uluslararası Atom Enerji Ajansı
ICRP	Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi
keV	Kilo Elektronvolt
KMnO ₄	Potasyum Permanganat
LSC	Sıvı Sintilasyon Sayacı
MDA	Minimum Dedekte Edilebilir Aktivite
MeV	Milyon Elektronvolt
NaI	Sodyum İyodür
NaOH	Sodyum Hidroksit
NGS	Nükleer Güç Santali
PMT	Fotoçoğaltıcı Tüp
RWS	Spike
t _{1/2}	Yarılanma Süresi
TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
TSCB	Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı
TU	Trityum Birimi
UNSCEAR	Radyasyonun Etkileri Üzerine Birleşmiş Milletler Bilimsel Komitesi
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
β	Beta Parçacığı
λ	Dalga Boyu

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünya var olduğundan bu yana doğada bulunan uzun ömürlü radyoaktif çekirdekler her ortamda doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmaktadır. Doğal radyasyonlar, uzaydan gelen kozmik ışınlarla, yer kabuğunda bulunan radyoizotoplardan (taş, toprak, su ve gıdalar gibi) ileri gelmektedir. Radyasyon dozu değerlendirilmesi yapılırken doğal kaynaklar fazlasıyla önemli bir yer tutar. İnsanlar hayatta bulundukları süre içerisinde doğal kaynaklardan yayınlanan radyasyonlardan çok önemli oranlarda doz almaktadırlar. (Hacıosmanoğlu, 2017; Dizman, 2006)

Su yaşamın temelidir. Yeryüzünün ve insan vücudunun dörtte üçünü oluşturur ve tüm yaşamsal işlevlerle doğrudan ilgilidir. Bu nedenle suların temiz olması ve içerisindeki radyoaktif kirleticilerin belirli sınır değerlerinin altında olması gerekir. Güneş enerjisi sayesinde yeryüzündeki sular sürekli olarak bir döngü içinde bulunmaktadır. Canlılar gereksinim duydukları suyu bu döngü içerisinde alır ve sonra bu döngü içerisine geri verirler. Bu döngü boyunca suya karışan diğer maddeler su kirliliğine neden olmaktadır. Bunun sonucunda suların içerisinde çözünmüş olarak bulunabilecek maddeler olabileceği gibi, geçtikleri ortamlara ya da bulundukları yerlere göre çeşitli radyoaktif maddelerde bulunabilir. Özellikle yeraltı suları farklı jeolojik oluşumlarla temas halindedir. Bu farklı oluşumların içeriğinde bulunan kimyasal bileşikler sudaki erime derecelerine göre az ya da çok yeraltı sularına karışırlar. Ayrıca bu oluşumların içerisinde farklı oranlarda radyoaktif maddelerde bulunmaktadır. Bu süreçlerden geçen sular belirli oranlarda radyoaktivite içerirler. Yer altı sularında sıklıkla rastlanılan belli başlı radyoaktif izotoplar Potasyum-40 (^{40}K), Toryum-232 (^{232}Th) ve Uranyum-238 (^{238}U)'dir (Dilaver vd., 2002). Ayrıca, Uranyum-238 in bozunması sonucu ortaya çıkan Radon-222 (^{222}Rn) ve Radyum-226 (^{226}Ra) izotopları da yer altı sularında nadiren de olsa bulunabilirler (Dilaver vd., 2002). Nehir suyunun yanı sıra, bölgedeki kirleticilerin birikmesinde ve taşınmasında en önemli faktörlerden biri olan sedimentlerin incelenmesi de önem arzeden bir konudur. Nehir sedimentlerinin çoğu, nehrin geçtiği kaya ve toprağın aşınması sonucu oluşurlar ve bölgenin jeolojik formasyonunun özelliklerini taşırlar (Aytas vd., 2012). Dolayısıyla sedimentler, bölgedeki jeolojik formasyon kaynaklı

radasyonun en önemli göstergelerinden biridir (Aytas vd., 2012). Sucul ortamdaki sedimentlerin araştırılması, çevre kirliliği ve radyoaktivite ile ilgili yararlı bilgiler sağlar ve dolayısıyla insan sağlığı ile direkt olarak ilişkilidir. Ayrıca nehir sedimentlerinin bina inşaatı için malzeme yapımında yaygın olarak kullanılmakta olduğu göz önüne alındığında, insan popülasyonuna etki eden radyasyon maruziyetinin değerlendirilmesinde önemli bir unsur olduğu açıktır (Venunathan vd., 2016).

Sulardaki radyoaktivite miktarını etkileyen en önemli radyonüklitlerden birisi de trityumdur. Trityum, hidrojen elementinin radyoaktif bir izotopudur ve en yüksek enerjisi 18,6 keV ve ortalama enerjisi 5,7 keV olan saf bir beta yayınlıyıcıdır. Trityumun fiziksel yarı-ömrü 12,35 yıldır (UNSCEAR, 1982). Hem doğal olarak oluşur hem de yapay olarak insanlar tarafından üretilir. Atmosferin üst katmanlarındaki azot ve oksijen atomlarıyla kozmik nötronların etkileşmesinden doğal olarak oluşur (UNSCEAR, 1982) ve yağmurla birlikte hidrolojik çevrime katılır. Bu çevrim denklem 1 ve denklem 2’de ekteedir.



Trityumun atmosferdeki doğal oluşum hızı 2500 atom/m²s olup yıllık aktivitesi 72 PBq’dır (UNSCEAR, 2000). Doğal olarak oluşan trityumun neden olduğu yıllık etkin doz 0,01 µSv’dir (UNSCEAR, 2000).

Yapay trityum ise, nükleer santrallerin rutin çalışmalarında ve nükleer denemeler sonucu çevreye salınır. 1952–1962 yılları arasında yapılan termonükleer denemelerle atmosfere yüksek oranda trityum nüfuz edilmiştir. Atmosfer tabakasına nüfuz edilen bu yüksek orandaki trityumun kademeli olarak troposfer tabakasına geçmesiyle özellikle 1953 yılından sonraki yağışların trityum konsantrasyonunda belli bir artış gözlenmiştir (Mook, 2000). Trityum içeren bu yağışların küresel su çevrimine katılmasıyla birlikte dünya sularındaki trityum konsantrasyonu artış göstermiştir. Atmosferik nükleer denemeler sonucu yayınlanan trityumun neden olduğu en yüksek yıllık etkin doz 7,2 µSv olarak ölçülmüştür (UNSCEAR, 2000).

Nükleer santrallerde reaktörü soğutmak için güvenlik amaçlı ilave edilen bor ve lityumun, nötronlarla birlikte reaksiyona girmesi sonucu yüksek oranda trityum üretilir (Tanır vd., 2013).

Bor ve lityumun, nötronlarla reaksiyona girip trityumun üretilmesi denklem 3’de gösterilmiştir.



Uyarılmış lityum çekirdeği de aşağıdaki reaksiyonla bozunarak trityum üretilir. (Denklem 4)

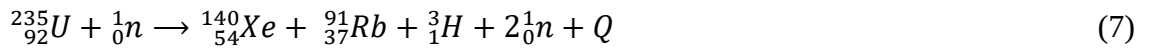


Reaktör soğutucusunun pH değerini kontrol etmek için genellikle lityum hidroksit kullanılırken, 7Li ve 6Li çekirdeklerinin nötronlarla reaksiyona girmesi sonucunda da trityum açığa çıkar (Tanır vd., 2013). Bu reaksiyonlar denklem 5 ve denklem 6’da gösterilmiştir.



Doğal lityum, %92,5 7Li ve %7,5 6Li içerir ancak 6Li yüksek termal nötron tesir kesitine sahip olduğu için reaktör soğutucusu içerisinde trityumun meydana gelmesine neden olan 6Li varlığıdır.

Üç ürünün de meydana geldiği ^{235}U ’in fisyonunda da trityum üretilir (Tanır vd., 2013). Bu fisyon reaksiyonu denklem 7’de gösterilmiştir.



Trityum üretimi için üçlü fisyon verimi $1,25 \times 10^{-4}$ ’tür. 1 milyon tane fisyon için 1,25 trityum atomu üretilmektedir (Tanır vd., 2013).

Sulardaki trityum konsantrasyon birimi olarak Bq/L veya trityum birimi (TU) kullanılır. Trityum konsantrasyonunun Bq-TU ilişkisi 1 TU=1 Trityum atomu 1×10^{18} hidrojen atomu=3,19 pCi/L=0,118 Bq/L olarak verilmektedir. Yani, 1×10^{18} hidrojen atomuna istinaden bir trityum atomunun bulunması “1 trityum birimi (TU)” olarak

tanımlanır. İçme sularında trityum radyoizotopu için müsaade edilen konsantrasyon değerleri, Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı (TCSB) ve Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından 100 Bq/L, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından ise 10000 Bq/L olarak belirlenmiştir (TCSB, 2005; TSE, 2005; WHO, 2004).

Trityumun çevredeki etkisi, farklı sistemler arasında geçişleri ve insana geçişi ile ilgili çokça araştırmalar yapılmış olup, trityum atmosfere salınır salınmaz hızlı bir şekilde oksitlenir ve trityumlanmış su (HTO veya T2O) elde edilir. Su ve süt başta olmak üzere bazı sıvı gıdalarla, havadan gaz halde solunumla ve deriden soğurularak tüm vücutta dolaşım sağlayabilir. Hidrojenin ve trityumun fiziksel ve kimyasal özellikleri neredeyse aynıdır. Vücut içinde trityum hücre içi ve hücre dışı doku sularıyla hızla karışır ve dokuların organik moleküllerindeki bağlı bulunan hidrojenin yerine geçebilir (Nikolov vd., 2013). Yapılan deneyler trityumun hayvan karaciğer hücrelerinde aberasyona, kemik iliği hücrelerinde sitolojik zararlı etkiye neden olduğunu ve DNA sentezini yavaşlattığını, bunun yanında çeşitli doku hücrelerinde ölümlere neden olduğunu ortaya koymuştur (Dobson ve Cooper, 1974; Dobson ve Kwan, 1976).

Basınçlı su tipi nükleer güç santrallerinin rutin çalışmalarında havaya trityum gazı (HT), suya ise trityumlu su (HTO) saldıgı birçok çalışmayla gösterilmiştir (Makhijani ve Makhijani, 2009; Fievet vd., 2013; Son vd., 2013; Gomes vd., 2014). Hatta, nükleer güç santrallerinin çevresinde bulunan sularda trityum konsantrasyonlarını arttırdığı da yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Kim vd., 1998; Kokubun vd., 2011; Chae vd., 2011; Javonics vd., 2014). Sinop ilinde kurulacak olan nükleer güç santralinin de basınçlı su tipinde olacağı T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından açıklanmıştır (ETKB, 2012).

Nükleer güç santrallerinde reaktör kabının sürekli olarak soğutulması gerektiği için nükleer güç santralleri deniz, göl veya nehir gibi su kaynaklarının yanına inşa edilmektedir. Nükleer güç santrallerinden çevreye salınan gaz ve sıvı formdaki trityumu filtreleyebilmek için ekonomik açıdan uygun herhangi bir teknoloji mevcut değildir. Nükleer santrallerden bu su kaynaklarına trityum salındığı göz önüne alındığında, trityumun belli başlı (içme, nehir ve deniz) sulara karışması kaçınılmazdır. Bu nedenle bu tür çevresel ve içme sularında trityumun izlenmesi, halk sağlığı ve güvenliği açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada nehir sularında hem trityum hem de bazı doğal radyoizotoplar (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) ile sediment örneklerinde bazı doğal ve yapay radyoizotoplar (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs) belirlendi ve belirlenen seviyelerin değerlendirilmesi yapıldı. Bu çalışma ile elde edilecek veriler, Sinop ilinde kurulacak olan

nükleer güç santralinin devreye girmesinden sonra yapılacak olan çalışmalara referans olanağı sağlayacaktır. Bu nedenle, bu tür çalışmaların uygulanması son derece önemlidir.

Bu çalışma ile Orta Karadeniz bölgesindeki Sinop il merkezinin batı yakasında denize dökülen 80 km uzunluğundaki Karasu nehri ve doğu yakasında denize dökülen 51,3 km uzunluğundaki Kabalı nehirlerinden 2 km aralıklarla örnekleme istasyonları belirlendi. Örneklemeler en fazla yağış alan Aralık ayında ve en az yağış alan Temmuz ayında yapıldı.

1.2. Literatür Özeti

Dünyanın muhtelif bölgelerinde, nehir sularında ^3H , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotopları ile sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyoizotoplarının radyoaktivite düzeyini belirlemek için yapılmış çalışmaları literatürde görmek mümkündür. Yapılan bu çalışmalardan birkaçı aşağıda verilmiştir.

Momoshima ve arkadaşları, 1990 yılında Japonya'nın kuzey ve güney adalarındaki nehir suyu trityum konsantrasyonlarını, sırasıyla kuzey adası nehir suyu için ortalama $2,42 \pm 0,81$ Bq/L ve güney adası nehir suyu için ise ortalama $1,00 \pm 0,36$ Bq/L olarak bulmuşlardır (Momoshima vd.,1990).

Kim vd. (1998), Kore'de bulunan Wolsong Nükleer Güç Santrali bölgesinde çevresel trityum konsantrasyonunu belirlemek üzere çalışma yapmışlar ve santral bölgesindeki yer altı sularında trityum konsantrasyonu en yüksek 74,6 Bq/L olarak belirlemişlerdir (Kim vd., 1998).

Makhijani ve Makhijani'nin (2009), Amerika'da bulunan bazı nükleer güç santrallerinin yakınlarında bulunan bazı sularda trityum konsantrasyonlarını belirlemek üzerine yaptıkları çalışmada, en yüksek trityum konsantrasyonları içme suları için 59,13 Bq/L, yüzey ve nehir suları için 617,9 Bq/L olarak verilmiştir (Makhijani and Makhijani, 2009).

Forkapic ve arkadaşlarının Sırbistan sınırları içerisinde geçen Tuna nehrinde 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada, Tuna nehrindeki ortalama trityum konsantrasyonunu $18,7 \pm 7,56$ TU (trityum birimi) olarak bulmuşlardır (Forkapic vd., 2011).

Ravikumar ve Somashekar'ın 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada ise, Varahi nehir havzasında toplanan örneklerdeki çevresel trityum değerleri $1,95 \pm 0,25$ TU' dan $11,35 \pm 0,44$ TU'ya değiştiğini ve $4,34 \pm 0,34$ TU ortalama değere sahip olduğunu,

Markandeya nehir havzasında ise değerler $1,49 \pm 0,75$ TU ile $9,17 \pm 1,13$ TU arasında değişim gösterdiğini ve ortalama $5,61 \pm 0,84$ TU olarak belirlemişlerdir (Ravikumar and Somashekar., 2011).

Stamoulis ve arkadaşları 2011 yılında Pinios nehrinin 15 farklı noktasından nehir suyu örnekleri almışlar ve bu sulara ortalama trityum konsantrasyonunu $1,04 \pm 0,08$ Bq/L olarak bulmuşlardır (Stamoulis vd., 2011).

Liu vd.'nin (2013), Japonya'daki Fukushima Nükleer Güç santrali kazasından sonra Tayvan çevresindeki su örneklerinde trityum konsantrasyonlarının belirlenmesi üzerine yapmış oldukları çalışma ile kazadan önce yağmur sularında trityum konsantrasyonu 1 Bq/L'den küçükken kaza sonrası 7,2 Bq/L'ye çıktığı gösterilmiştir (Liu vd., 2013).

Matsumoto vd.'nin (2013) çalışmalarında, 2011 yılının mart ayında meydana gelen deprem ve sonrasında gerçekleşen tsunami nedeniyle oluşan Fukushima nükleer güç santrali kazası sonrası santralden yaklaşık 170 km uzakta bulunan Tsukuba şehrinde yağmur sularında trityum konsantrasyonu ölçülmüş ve en yüksek konsantrasyon değeri $19,38 \pm 0,95$ Bq/L olarak verilmiştir (Matsumoto vd., 2013).

Janovics vd.'nin (2014) yapmış olduğu çalışmada, Macaristan'da bulunan Paks Nükleer Güç Santrali'nin soğutma suyunu aldığı Danube Nehrinin sularında ortalama trityum konsantrasyonu $1,36 \pm 0,05$ Bq/L iken reaktörün aldığı suları tekrar Danube Nehri'ne verdiği sıcak su kanalındaki sulara trityum konsantrasyonunun ortalama değerinin $15,34 \pm 2,06$ Bq/L olduğu gösterilmiştir. Yapılan çalışmada, bu artışın nükleer güç santralinden kaynaklandığı vurgulanmaktadır (Janovics vd., 2014).

Son vd.'nin (2014), Kore'de bulunan 20 nükleer güç santralinin 2001 ile 2010 yılları arasında çevreye ne kadar radyoaktif salınım yaptıklarını belirlemeye yönelik yaptıkları çalışma ile 2001 yılından 2010 yılına kadar basınçlı su tipindeki reaktörlerin her birinden 11,61 TBq, basınçlı ağır su tipi reaktörlerin her birinden ise 118,12 TBq'lik aktivite salınımı olduğu gösterilmiştir. Yine bu çalışma ile 2001 yılından 2010 yılına kadar bütün reaktörlerden sıvı olarak 163,40 TBq'lik trityum salınımı olduğu gösterilmiştir (Son vd., 2014).

Grahek vd.'nin (2016) Sırbistan'da bulunan Sava ve Danube nehir sularında trityum konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla belli yıl ve aylarda aldıkları nehir sularında trityum konsantrasyonlarının Sava nehri için 0,26 ile 16,10 Bq/L, Danube nehri için ise 0,59 – 9,09 Bq/L aralığında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bazı aylarda trityum konsantrasyonlarının yükseldiğini gözlemlemişler ve bu durumunda nehirlerin kenarında

bulunan nükleer güç santrallerinden ileri geldiğini belirtmişlerdir (Grahek vd., 2016).

Peron ve arkadaşları, 2016 yılında Fransa'daki nükleer güç santrali atık sularının karıştığı Loire nehri sularında trityum konsantrasyonunu ölçmüşler ve maksimum 26 ± 3 Bq/L olarak belirlemişlerdir (Peron vd., 2016).

Osman vd.'nin 2016 yılında çeşitli su örneklerinde bazı radyoizotopları belirlemek üzerine yaptığı çalışmada, ortalama trityum konsantrasyonlarını göl suyu örneklerinde $1,26 \pm 0,41$ Bq/L (Min-Max: 1,05-1,45 Bq/L), nehir suyu örneklerinde $1,31 \pm 0,39$ Bq/L (Min-Max: 0,92-1,90 Bq/L) olarak bulmuşlar ve yeraltı suyu örneklerinde konsantrasyonların $3,27 \pm 0,41$ ile $3,44 \pm 0,41$ Bq/L aralığında değiştiğini belirlemişlerdir (Osman vd., 2016).

Harms ve arkadaşları 2016 yılında Kaliforniya'da bulunan San Benito nehrinin sularında trityum konsantrasyonunu ölçmüşler ve maksimum konsantrasyonu 23 pCi/L (0,9 Bq/L) olarak bulmuşlardır (Harms vd., 2016).

Ducros ve arkadaşları, 2018 yılında yaptıkları çalışma ile Fransa'nın güney-doğusunda yer alan bazı nehir sularındaki trityum konsantrasyonlarını ölçmüşler ve trityum konsantrasyonlarını en düşük Argens nehir suyunda ($0,12 \pm 0,11$ Bq/L) en yüksek ise Ardeche nehir suyunda ($0,86 \pm 0,15$ Bq/L) bulmuşlardır (Ducros vd., 2018).

Hanslik ve arkadaşları, 2018 yılında Çek Cumhuriyeti'ndeki Temelin nükleer güç santralının bulunduğu Vltava nehrinden belirli aralıklarla alınan su örneklerinde trityum konsantrasyonlarını ölçmüşler ve araştırma sonucunda nehrin nükleer güç santraline kadar olan sularında trityum konsantrasyonunun 1 Bq/L'den az olduğu ancak nükleer güç santralinden sonraki sularda ise trityum konsantrasyonunun yaklaşık 15 Bq/L'e kadar çıktığını belirlemişlerdir (Hanslik vd., 2018).

Hamzah ve arkadaşlarının 2014 yılında Malezya'nın Selagor eyaleti sınırlarında yer alan Langan Nehri'nin sularında doğal radyoaktiviteyi belirlemek üzerine yaptıkları çalışmada, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotoplarının değişim aralığını sırasıyla 0,17 – 0,67 Bq/L, 0,16 – 0,97 Bq/L ve 1,22 – 5,57 Bq/L olarak bulmuşlardır (Hamzah vd., 2014).

Mohammed ve Mazunga, Tanzania'ya bulunan Mkuju ve Kilowelo nehirlerinin sularında doğal radyoaktiviteyi belirlemek üzerine 2013 yılında bir çalışma yapmış ve çalışma sonucunda ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla Mkuju nehri için $2,5 \pm 0,4$, $1,9 \pm 0,2$, $11,0 \pm 2,0$ Bq/L ve Kilowelo nehri için $2,2 \pm 0,3$, $1,8 \pm 0,1$, $9,2 \pm 1,2$ Bq/L olarak bildirmişlerdir (Mohammed and Mazunga, 2013).

Adebayo ve Akinnawo'nun 2017 yılında Nijeryada'ki Ipogun Nehri'nin sularında

doğal radyoaktiviteyi belirlemek üzerine yaptıkları çalışmada, nehir sularında doğal radyoizotoplardan olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in ortalama aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla 0,20, 0,92 ve 2,59 Bq/L olarak bulmuşlardır (Adebayo and Akinnawo, 2017).

Rahman ve arkadaşlarının 2004 yılında Malezya'daki 20 nehir suyunun doğal radyoaktivitesini belirledikleri çalışmada radyum, toryum ve potasyum için aktivite konsantrasyonlarını $7,93 \pm 0,13$, $3,12 \pm 0,04$ ve $10,38 \pm 3,54$ mBq/L olarak vermişlerdir (Rahman vd., 2004).

Sakip, 2015 yılında Bangladeş'teki bazı nehirlerin sularında doğal radyoaktivite düzeylerini belirlemiş ve ortalama konsantrasyonları ise ^{226}Ra için 5,7 Bq/L, ^{232}Th için 6,2 Bq/L ve ^{40}K için 24,7 Bq/L olarak rapor etmiştir (Sakip, 2015).

Ononugbo ve Tutumeni'nin 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada, Nijerya'da bulunan 6 farklı nehrin sularında doğal radyoaktivite belirlenmiş ve ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonları sırasıyla $2,12 \pm 0,21$ Bq/L, $8,44 \pm 1,02$ Bq/L ve $47,47 \pm 3,22$ Bq/L olarak verilmiştir (Ononugbo and Tutumeni, 2016).

Garibov ve arkadaşları, 2017 yılında Azerbaycan'daki on farklı nehir suyunun doğal radyoaktivitesini incelemişler ve ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotoplarının değişim aralıklarını sırasıyla 0,14-0,95 Bq/L, 0,18-0,58 Bq/L ve 5,6-34,6 Bq/L olarak belirlemişlerdir (Garibov vd., 2017)

Küçükömeroğlu ve arkadaşları, 2008 yılında Rize ili Fırtına Deresi'nden alınan sediment örneklerinde doğal ve yapay radyoaktiviteyi incelemişler ve ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs konsantrasyonlarını sırasıyla 39,93 Bq/kg, 38,55 Bq/kg, 573,34 Bq/kg ve 6,15 Bq/kg olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, denizden uzaklığa göre radyoizotop konsantrasyonlarının değişimini de incelemişlerdir (Küçükömeroğlu vd., 2008)

Aytaş ve arkadaşlarının 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada, Maritza ve Tundja nehrine ait sediment örneklerinde doğal radyoaktivite belirlenmiş ve ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonlarının değişim aralığı sırasıyla Maritza nehri için 152-285, 75-182 ve 168-428 Bq/kg, Tundja nehri için ise 93-280, 56-187 ve 43-402 Bq/kg olarak verilmiştir (Aytaş vd., 2012).

Keser ve arkadaşları, 2013 yılında Rize ili İkizdere nehrine ait sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyoizotoplarının konsantrasyonlarını araştırmışlar ve incelenen radyoizotoplar için ortalama konsantrasyonları sırasıyla $32,71 \pm 3,27$ Bq/kg, $134,12 \pm 7,34$ Bq/kg, $811,68 \pm 34,53$ Bq/kg ve $5,25 \pm 0,13$ Bq/kg olarak bulmuşlardır (Keser vd., 2013).

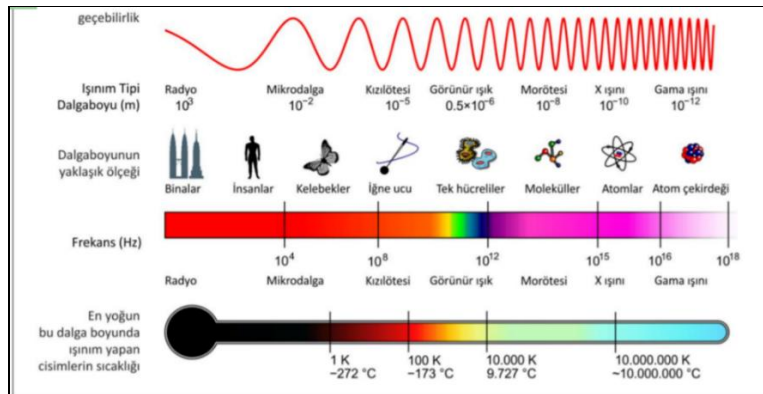
Caridi ve arkadaşları, 2015 yılında Akdeniz Merkez Havzası'na dökülen bazı nehirlerden alınan sediment örneklerinde doğal radyoaktiviteyi incelemişler ve Bonamico nehrinden alınan örnekler için ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonlarını sırasıyla $27,7 \pm 11,7$ Bq/kg, $31,9 \pm 2,3$ Bq/kg ve $645,4 \pm 62,0$ Bq/kg olarak bulmuşlardır (Caridi vd., 2013).

Venunathan ve arkadaşlarının 2016 yılında yapmış olduğu çalışmada, Kallada nehrinden alınan sediment örneklerinde doğal radyoaktivite belirlenmiş ve ortalama ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonları sırasıyla $48,6 \pm 1,0$ Bq/kg, $88,0 \pm 0,4$ Bq/kg ve $423,2 \pm 2,0$ Bq/kg olarak verilmiştir (Venunathan vd., 2016).

Badawy ve arkadaşları, 2018 yılında Mısır Nil Nehri'nden topladıkları 84 sediment örneğinde doğal ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotoplarının konsantrasyonlarını araştırmışlar ve çalışma sonucunda ortalama konsantrasyonları sırasıyla $15,4 \pm 11,7$ Bq/kg, $15,2 \pm 6,2$ Bq/kg ve $221,0 \pm 31,0$ Bq/kg olarak bulmuşlardır (Badawy vd., 2018).

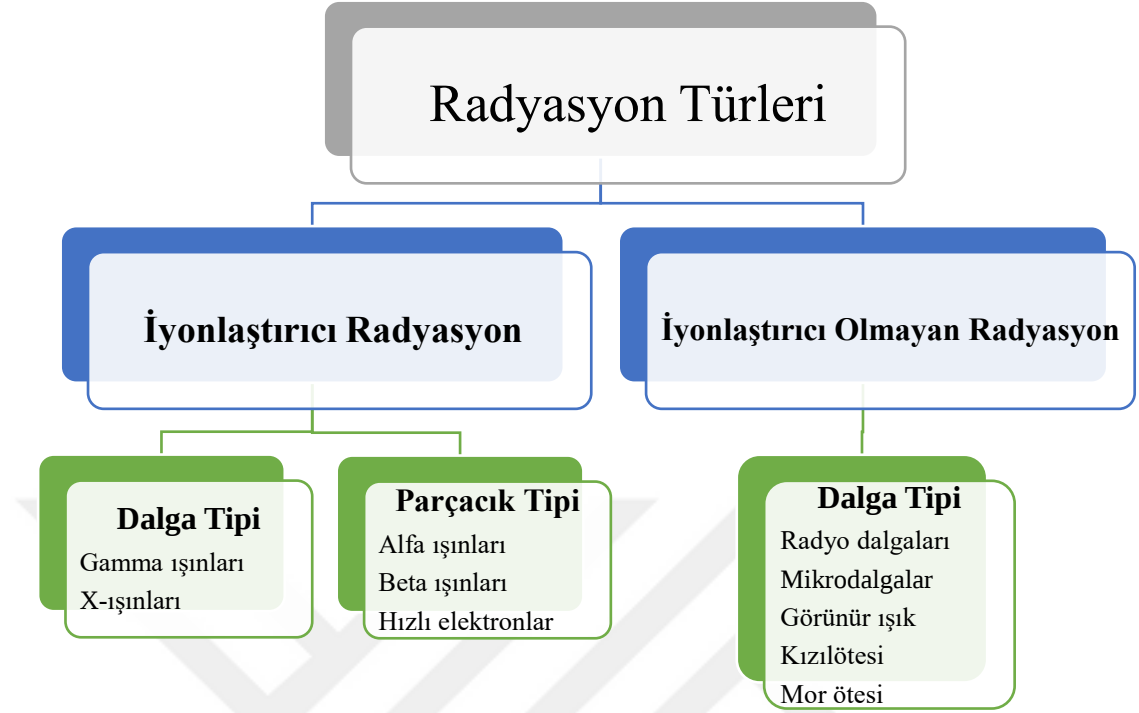
1.3. Radyasyon Tanımı ve Türleri

Bir atom çekirdeği, kararsız bir halden daha kararlı bir hale geçerken elektromanyetik dalga veya parçacık şeklinde enerji yayılması gerçekleştirir. Bu olay, radyasyon ya da ışınım olarak adlandırılır. Elektromanyetik dalgaların enerji düzeylerine, dalga boylarına ve frekanslarına göre sıralandığı tabloya ise elektromanyetik spektrum denir. Elektromanyetik spektruma ait gösterim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum

Radyasyonun türleri Şekil 2’de verilmektedir.

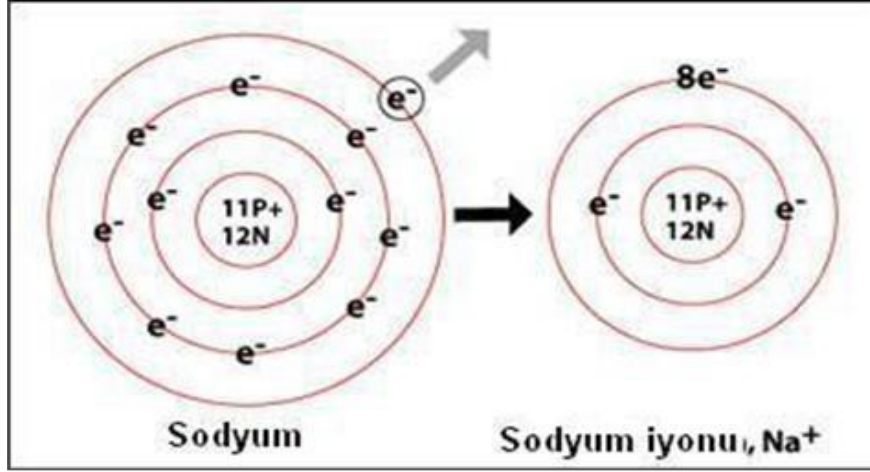


Şekil 2. Radyasyon türleri

Radyasyonu madde ile yaptığı etkileşme bakımından iki ana başlık altında gruplandırmak mümkündür. Bunlardan biri iyonlaştırıcı radyasyon diğeri ise iyonlaştırıcı olmayan (non-iyonize) radyasyondur.

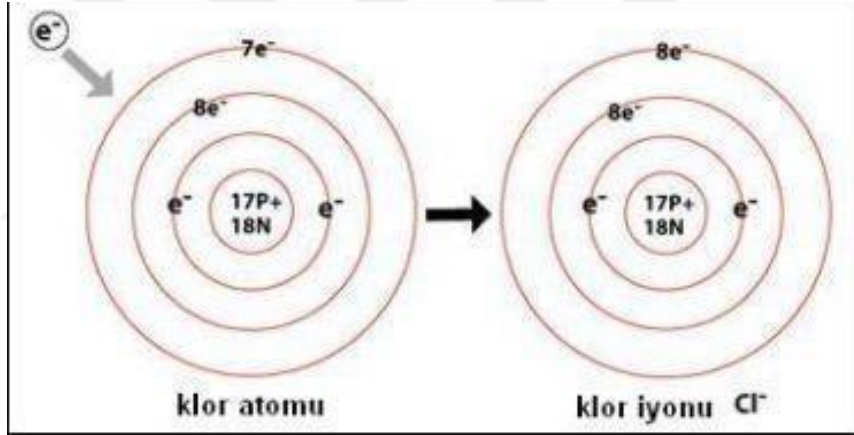
1.3.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Kararsız atom çekirdekleri alfa, beta, nötron gibi parçacıklar veya gama gibi ışınlar yayarak çevresine ışın saçarlar ve parçalanma gerçekleştirirler. Bu parçalanana maddelere ise radyoaktif madde adı verilir. Bir başka deyişle iyonlaştırıcı radyasyon, bir maddede yüklü parçacıklar oluşturabilen radyasyon olup, atomları iyonlaştıracak düzeyde enerjiye sahiptir. Bu durumda atom pozitif yüklü iyon şeklinde kalır ve bu durum Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Pozitif yüklü iyon oluşumu

Atom yörüngesine bir elektronun ilave edilmesiyle de negatif yüklü iyon oluşur. Şekil 4’de ektedir.



Şekil 4. Negatif yüklü iyon oluşumu

Alfa parçacıkları, beta parçacıkları, gama ışınları, X ışınları ve kozmik ışınlar atomları iyonlaştırabilecek düzeyde enerjiye sahip olduğundan iyonlaştırıcı radyasyon türleri içerisinde yer almaktadır. Serbest nötronlar ise iyonize radyasyon olarak tanımlanmaktadır.

X- ışınları: Bir atoma dışarıdan gelen veya gönderilen yüksek enerjili elektronlar atomun yörüngelerinden elektronlar koparılır ve bu elektronların yerine daha yüksek seviyelerden elektronlar atlar ve kopan elektronun yerindeki boşluğu doldururlar. Bu olay sırasında açığa çıkan enerji fazlalığı da X-ışını olarak salınır. Bunun haricinde yapay olarak da röntgen tüplerinde elde edilir.

Gama ışınları: Atom çekirdeğinde oluşur ve bir alfa veya beta parçacığı yayınladıktan sonra ortaya çıkan kararsızlığa neden olan çekirdek enerjisi,

elektromanyetik radyasyon halinde yayınlanır. Gama ışınları, beta ışınlarına göre daha yüksek enerjili ve daha fazla nüfuz edici ışınlardır.

Kozmik ışınlar: Gökyüzünden gelen kozmik radyasyon, yıldızların oluşumu ve ömrünü sonlandırması gibi olaylarla oluşmaktadır. Kozmik ışınların en büyük yayıcısı güneş olup, deniz seviyesinden yukarıda çıkıldıkça daha yoğundur.

Alfa parçacıkları: Radyoaktif çekirdeğin kararlı hale gelmesi için çıkardığı iki proton ve iki nötrondan oluşmuş helyum çekirdeğidir. Pozitif yüklüdür ve bir kâğıt tabakası gibi az kalınlıktaki maddelerle bile durdurulabilmektedir. Sadece ağız yolu ile vücuda alınırsa veya teneffüs edilirse tehlikeli olur.

Beta parçacıkları: Çekirdekteki enerji fazlalığından dolayı çekirdek civarında bir kütle oluşur ve bu kütle fazla yükü alır. Bu fazla yük dışarıya bir beta ışını olarak çıkar ve Alfa ışınlarına göre madde ile daha az etkileşime girerler hatta maddenin daha içlerine nüfuz edebilmektedirler. Metal veya plastik gibi ince nesnelerle durdurabilirler ve ağız yoluyla alındığı ve solunduğu zaman tehlikeli olmaktadır. Işınlanma ne kadar büyük olursa oluşan hasarda o kadar fazla olur.

Nötronlar: Yüksüz parçacıklardır ve bu özelliklerinden dolayı herhangi bir madde içerisine çok kolay girebilirler. Doğrudan iyonlaşmaya sebep olmazlar, ancak atomlarla etkileşimleri sonucunda iyonlaşmaya neden olan alfa, beta, gama veya x-ışınlarının ortaya çıkmasına neden olurlar. Yüksüzdürler ve madde ile zayıf etkileşime girerler. Bundan dolayı kolay durdurulamazlar.

1.3.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Radyo dalgaları ve mikrodalgalar: Cep telefonları, kablosuz telefonlar, tıbbi cihazlar, baz istasyonları, Wi-Fi, Bluetooth, radarlar, vericiler bu radyasyon kaynakları arasında sayılabilir. Doku ve hücreleri ısıtması ve buna karşı vücutta oluşan fizyolojik tepkiler, zararlı ve zararsız bazı değişimlere neden olabilirler.

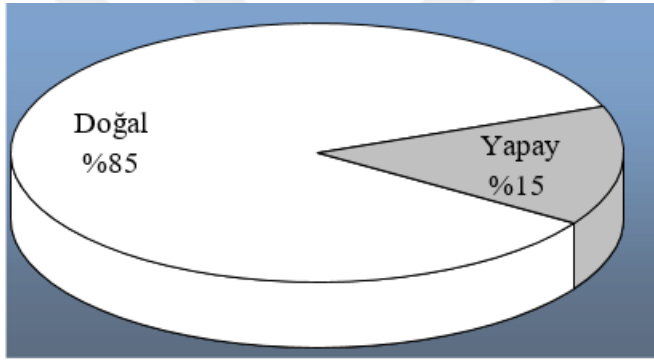
Kızılötesi ışınları: Elektromanyetik spektrumun mikrodalga ile görünür bölge spektrumu arasında kalan bölgedir. Kontrol edilemeyecek şekilde maruz kalınırsa çeşitli yanıklara, gözde katarakta, retina hasarına sebep olabilir.

Mor ötesi ışınlar: Ultraviyole ışınların en önemli temel kaynağı güneştir. Fazla maruz kalınması durumunda yanıklar, erken yaşlanma, lezyonlar, bitkinlik gibi bazı durumlara neden olmaktadır.

1.4. Radyasyon Kaynakları

Tüm canlılar ve insanoğlu varoluşlarından bugüne kadar sürekli radyasyona maruz kalmıştır ve her geçen gün kalmaya devam etmektedir. Çevremizde, dünyada ve evrende radyasyon bulunur. Her insanın vücudu hafif derecede radyoaktiftir. Keşfedilmesi ise yüz yıldan biraz uzun süredir gerçekleşmiş ve bunun neticesinde bazı uygulamalarda faydalı olduğu bulunmuştur.

Radyasyon, doğal ve yapay radyasyon kaynakları olmak üzere iki başlık altında incelenir. İnsanların ve canlıların bu kaynaklardan aldıkları yıllık etkin doz değerinin en fazla olduğu oran, doğal kaynaklardan oluşmaktadır (Şekil 5) (NCRP, 1987; Bennett, 1997; UNSCEAR, 2000).



Şekil 5. Radyasyon kaynaklarından alınan doz oranları

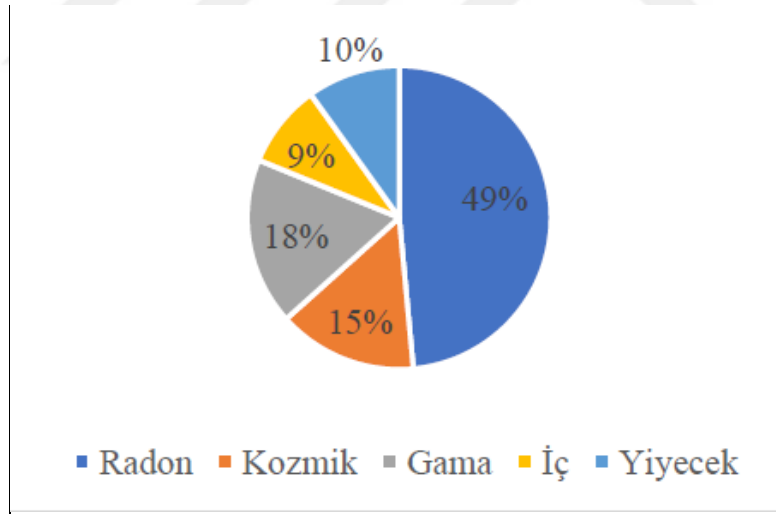
1.4.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Radyoaktif materyaller doğada birçok yerde (toprak, su, besinler) bulunmaktadır. Uranyum, toryum ve bozunum ürünleri ise her yerde karşımıza çıkmaktadır. Topraktan, sudan ve besinlerden maruz kaldığımız ve doğada mevcut bulunan ve kısa ömürlü radyoaktif elementlerin yaydığı gama ışınlarıyla alınan radyasyon dozunun dünya ortalaması 0,46 mSv/yıl'dır (URL-1). Dünyanın oluşumu sırasında birçok radyoaktif madde meydana gelmiş ve bu zaman boyunca kısa yarı ömürlü olanlar tükenirken, uzun yarı ömürlü (milyarlarca yıl) olanlar dünyada bulunmaya devam etmektedir.

Dünyanın yer kabuğunda yaygın olarak bulunan ve miktar olarak diğer radyoaktif elementlerden fazla miktarda bulunan radyoaktif elementlerden birisi radyum (^{226}Ra)'dur. ^{226}Ra elementinin bozunması sırasında ortaya çıkan "radon gazı" doğal radyasyon düzeyini artıran en önemli etkenlerden biridir. Radon gazı dünya atmosferinin doğal bir parçası olmakla birlikte, radon gazı birikiminin zararlı etkilerinin önlenmesi için

bina havalandırılmasının iyi yapılması gerekir. Ayrıca ısı yalıtımı için kullanılan bazı malzemeler binalardaki radon yoğunluğu artırmış olur ve bina dışına göre daha yüksek oranda olmaktadır. Radon gazının bozunum ürünleri nedeniyle maruz kalınan yıllık ortalama etkin doz yaklaşık olarak dünya genelinde 1,2 mSv olduğu tahmin edilmektedir (TAEK, 2009). Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu tarafından dünya genelinde radon gazı nedeniyle alınan doz düzeylerinin Bq/m³ biriminde kullanılması tavsiye edilmiştir. Evlerdeki radon değeri 200-600 Bq/m³ aralığında değişmektedir (TAEK, 2009).

İnsan vücudunda bulunan radyoaktif elementlerden biri de potasyum (⁴⁰K)'dur ve belli bir radyasyon dozuna maruz kalmamıza neden olur. Bu şekilde bir yıl boyunca maruz kaldığımız iç radyasyon dozunun dünya ortalaması yaklaşık 0,23 mSv'dir (URL-1). Yiyeceklerden, içeceklerden ve teneffüs ettiğimiz havadan aldığımız dozun dünya ortalaması ise yaklaşık 0,25 mSv/yıl'dır. Ayrıca diğer yiyeceklere kıyasla kabuklu yiyecekler içerisinde daha fazla radyoaktivite bulundurlar (URL-1). Doğal radyasyon kaynaklarının tümünden maruz kaldığımız ortalama yıllık etkin doz yaklaşık 2,4 mSv'dir (TAEK, 2009). Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri

Tablo 1'de bazı bölgelerdeki doğal radyasyon doz seviyeleri verilmektedir (UNSCEAR, 2000). Tablo 2'de ise doğal radyasyondan kaynaklanan yıllık etkin doz değerleri verilmektedir (UNSCEAR, 2000).

Tablo 1. Bazı bölgelerdeki doğal radyasyon doz düzeyleri

Bölge	Radyasyon doz düzeyi (mSv/yıl)
Mersin (Akkuyu)	0,53
Ankara	0,44
Iğdır	0,88
Çanakkale	1,23
Kars	1,58
Hindistan (Kerela)	15,8
İran (Ramsar)	148
Brezilya	788,4

Tablo 2. Doğal radyasyon kaynaklarından alınan yıllık etkin doz değerleri

Kaynak	Dünya ortalaması (mSv)	Doz aralığı (mSv)
Kozmik radyasyon	0,4	0,3-10
Gama radyasyonu	0,5	0,3-0,6
Radon solunumu	1,2	0,2-10
İç ışınlanma	0,3	0,2-0,8
Toplam	2,4	1,0-10

1.4.2.Yapay Radyasyon Kaynakları

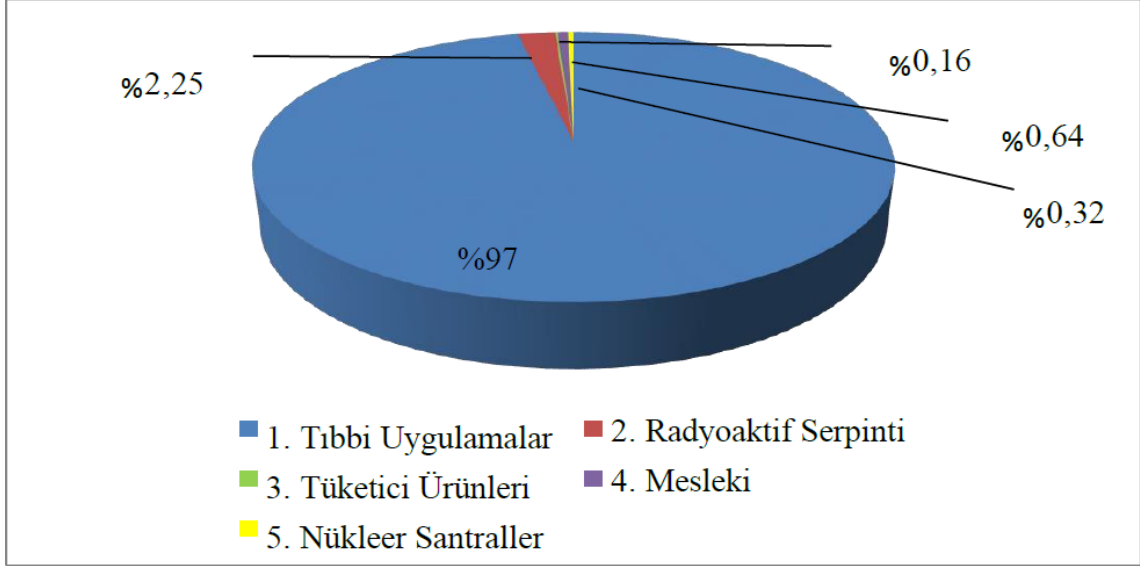
Gelişen teknoloji sonucunda bazı radyasyon kaynaklarını yapay olarak üretme ihtiyacı doğmuştur. Yapay radyasyon kaynakları, doğal radyasyon kaynaklarındaki gibi belli bir miktarda olsa radyasyon dozuna maruz kalınmasına neden olmaktadır. Fakat bu doz miktarları, doğal kaynaklardan alınan dozla karşılaştırdığımızda çok daha düşüktür. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrolü sağlanabilmektedir.

Yapay radyasyon kaynakları şu şekilde sıralanabilir;

- Tıbbi radyoaktif kaynaklar
- Nükleer bomba denemeleri sonucu ortaya çıkan nükleer serpintiler
- Nükleer güç üretiminden ortaya çıkan radyoaktif maddeler
- Tüketici ürünlerinde bulunan radyoaktif maddeler

Şekil 7’de yapay radyasyon kaynaklarından dolayı maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri gösterilmekte olup, insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon, radyoaktif izotopların kullanımından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu

radasyon kaynakları radyoterapide tedavi amaçlı röntgen, tomografi ve sintigrafi çekimlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanında endüstride kalite kontrol ve gıda sektöründe çeşitli alanlarda ve özellikle ürünlerin raf ömrünü uzatmak için sterilizasyonda kullanılmaktadır (Tüysüz vd., 2004).



Şekil 7. Yapay radasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radasyon dozlarının oransal değerleri

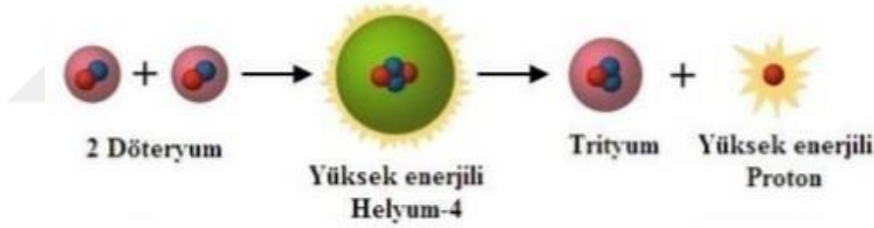
1.5. Radasyonun İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Tüm canlılar ve insanlar radasyona, dış ışınlamalarla maruz kalmasının yanında solunum ve sindirim yoluyla iç ışınlamalarla da maruz kalmaktadır. Radasyona dışarıdan maruz kalınan etki ile vücuda alınmışsa buna dış ışınlama, içeriden maruz kalınan etkilerden dolayı ise iç ışınlama denir. İyonlaştırıcı radasyonun canlı üzerinde birçok hasara neden olabilmektedir. Biyolojik bir hasar oluşturabilmesi için enerjisinin hücre tarafından soğurulması gerekir ve enerjinin hücre tarafından soğurulması sonucu moleküllerde iyonlaşma ve uyarılmalar meydana gelir. Bu iyonlaşmalar, DNA zincirlerinde kırılmalar ve hücre içerisinde kimyasal toksinlerin üremesine neden olur ve hücre kendini onarmaya başlar. DNA’da oluşan hasar çok büyük değilse meydana gelen kırılmalar onarılabilir, fakat bu onarım sırasında hatalar oluşabilir veya yanlış şifre bilgiler içeren kromozomlar meydana gelebilir. DNA düzgün onarılmadığı takdirde, hücre ya bozuk bir metabolizma ile sağ kalacak ya da ölecektir (IAEA, 1994). Hasarlı hücre sayısı çok büyük olduğunda organ veya dokularda, gözlenebilir hasarlar meydana

gelir (Çelebi, 1995). Radyasyonun verdiği hasar sonucunda hücre ölmüyor sadece değişikliğe uğruyorsa hücredeki hasar genellikle onarılır. Onarım iyi bir şekilde gerçekleşmediği takdirde değişim yavru hücrelere aktarılır ve er geç ışınlanan kişinin organ veya dokularında kanser oluşumuna yol açacaktır. Vücudun bazı bölgeleri diğerlerine göre daha hassas olsa bile, radyasyon hemen hemen her doku ve organda kansere yol açabilir (TAEK, 1998).

1.6. Trityum

Trityum; fizikçiler Ernest Rutherford, M. L. Oliphant ve Paul Harteck'in 1934 yılında yapmış oldukları bir çalışma ile döteryum-döteryum füzyon reaksiyonu sonucu nükleer trans mutasyon ürünü olarak keşfedilmiştir (Şekil 8). Trityum, düşük enerjili beta parçacıkları yayan radyoaktif bir izotoptur ve hidrojenin radyoaktif bir izotopu olduğundan fiziksel ve kimyasal özellikleri hidrojeninki ile hemen hemen aynıdır (Altay ve Çifter, 1996).



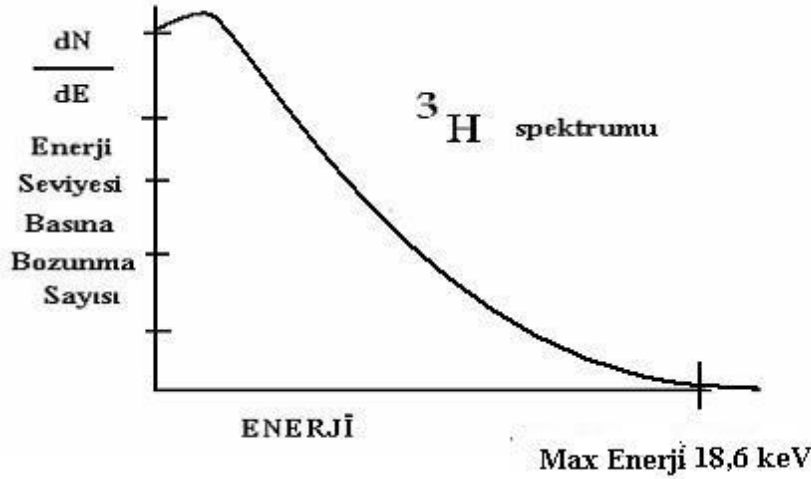
Şekil 8. Döteryum-Döteryum reaksiyonu

Bir elementin atom numarası birbiri ile aynı fakat kütle numarası farklı olan atomlara “izotop” denir. Hidrojen atomunun üçüncü izotopu olan trityum, çekirdeğindeki nötron fazlalığı nedeniyle radyoaktif özellik gösterir ve bir beta parçacığı ile bir antinötrino ($\bar{\nu}$) yayınlayarak kararlı ^3He atomuna dönüşür (Denklem 8).



Trityumun yarı ömrü 12,32 yıldır (UNSCEAR, 1982). Trityum çekirdeğinden yayınlanan enerjinin maksimum değeri 18,6 keV olup, beta parçacığı ile nötrino arasında rastgele dağılır. Bu nedenle beta parçacıklarının enerjisi 0 – 18,6 keV arasında herhangi

bir değere sahip olabilir (Şekil 9), ve dolayısıyla beta spektrumu süreklilik gösterir (Altay ve Çifter, 1996; Portakal vd., 1998).



Şekil 9. Trityumun beta bozunumu

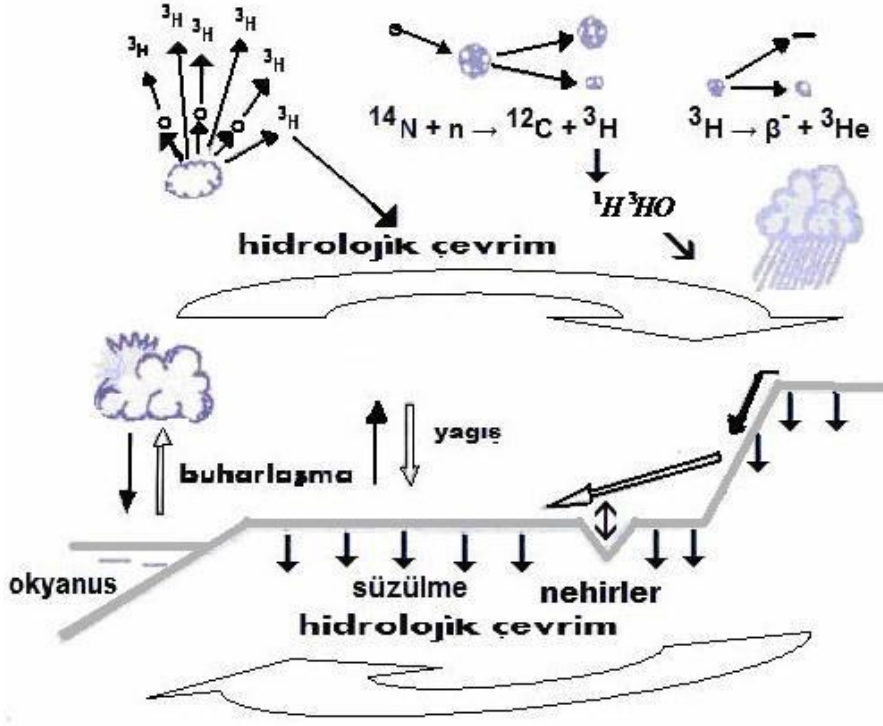
Trityumun en yaygın hali trityum gazı (HT) ve trityumlu su olarak adlandırılan trityum oksittir (HTO). Suyun kimyasal formu H₂O'dur ve trityum atomu suda bulunan hidrojen atomlarından biriyle yer değiştirir. Böylece suyun kimyasal formu H₂O'dan HTO'ya değişir ve trityum, nükleer reaktörlerde uranyum fisyonunun yan ürünü olarak üretilir

1.6.1. Çevresel Trityum ve Özellikleri

Trityum, yağışlara iki kaynaktan girerler, hidrolojik çevrimde yerini alır ve “çevresel trityum” olarak adlandırılır. Trityumun bu doğal döngüsü Şekil 12’de gösterilmekte olup, trityum atmosferin üst tabakalarındaki azot ve oksijen atomlarının kozmik nötronlarla etkileşime girmesinden doğal olarak oluşur. Bu oluşum reaksiyonları Denklem 9 ve 10’da verilmektedir.



Trityum, hidrolojik çevrime Şekil 10’da gösterildiği gibi $^1\text{H}^3\text{HO}$ şekline yükseltgendikten sonra girer (Mook, 2000).



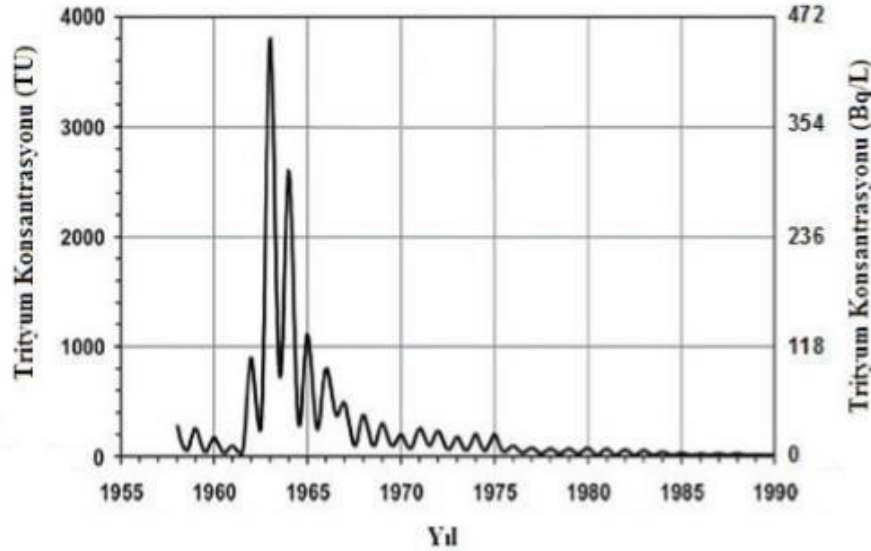
Şekil 10. Trityumun doğal çevrimi

Trityumun atmosferde kalma süresi kısa olduğundan oluşum hızı da çok düşüktür. Trityumun atmosferde doğal oluşum hızının $0,25 \text{ atom/cm}^2\text{s}$ olduğu tahmin edilmektedir (Altay ve Çifter, 1996) ve trityum konsantrasyonu, coğrafi konuma bağlı olarak 5–20 TU civarındadır. Yağışlara karışarak yeraltına geçen trityum uzun yıllar yeraltında bekler ve sonrasında yeni suyla karışmazsa konsantrasyonu zamanla azalır (Altay ve Çifter, 1996; DSİ TAKK, 2003). Trityum nükleer çalışmalar sonucunda yapay olarak da üretilir. 1952–1962 yılları arasında yapılan termonükleer denemeler sonucunda atmosfere yüksek miktarda trityum enjekte edilmiş ve yüksek miktarda salınan trityumun kademeli olarak troposfer tabakasına geçmesiyle, 1953 yılından sonraki yağışların trityum konsantrasyon değerlerinde artış gözlenmiştir (Mook, 2000).

Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) ve Dünya Meteoroloji Organizasyonu iş birliğiyle yağışlardaki izotop kompozisyonunu belirlemek amacıyla kurulan meteoroloji istasyonlarından en fazla kaydı bulunan Kanada’nın Ottawa Meteoroloji istasyonundan toplanan yağış numunelerinde ise yapılan trityum analiz sonuçlarında artışa rastlamak

mümkündür. Ottawa yağış istasyonundan alınan yağış numunelerinin ağırlıklı ortalama trityum konsantrasyonlarının yıllara göre değişimi Şekil 11’de görülmektedir.

1953 yılında trityum konsantrasyon düzeyi 26 TU iken, bu değer 1954 yılında 287 TU’ya kadar yükselmiş ve bu artış 1963 yılında 2900 TU’ya kadar çıkmıştır. Artış gösteren trityum konsantrasyon seviyelerini azaltmak amacıyla 1963 yılında bir antlaşma imzalanmış ve bu antlaşma sayesinde termonükleer denemeler durdurulmuştur. Bunun sonucunda trityum konsantrasyonunda üstel olarak bir azalma gözlemlenmiştir. Türkiye’de Ankara, Antalya ve Adana yağış istasyonları da IAEA’nın kurduğu şebekeye dâhildir. Kuzey yarım kürede 1963 yılındaki artış bu üç istasyonda da gözlemlenmiştir. Ankara, Antalya ve Adana yağış istasyonlarından 1963 yılında alınan numunelerin trityum konsantrasyonlarının ağırlıklı ortalamaları ise sırasıyla 2585 TU, 710 TU ve 1150 TU’dur. Trityum günümüzde uranyum fisyon reaksiyonunda yan ürün olarak nükleer reaktörlerde üretilir.



Şekil 11. Kuzey yarımkürede trityum konsantrasyonunun yıllara göre değişimi

1.6.2. Nükleer Reaktörlerde Trityum Oluşum Mekanizmaları

PWR tipi reaktörlerden çıkan ana radyonüklit trityumdur. Trityumun reaktörlerde oluşum mekanizması temel olarak üç çeşittir. Bunlar nötronların reaktörün soğutma suyundaki kimyasal maddelerle reaksiyona girmesi, nötronların döteryum (^2H) ile reaksiyona girmesi ve nükleer yakıtın üçlü fisyon mekanizmalarıdır (Simek ve Dubsek,

m1997). PWR reaktörlerde ^3H genellikle ^{10}B ile nötron yakalamasından oluşur. Boron (zenginleştirilmiş ^{10}B) PWR reaktörlerin yakıt demetinde nötron yutucu olarak kullanılmaktadır. ^{10}B ile nötron yakalaması aşağıdaki tepkimelerdeki gibi olur ve Denklem 11 ve 12’de gösterilmiştir.



Denklem 10, PWR reaktördeki Reaktör Soğutma sistemindeki pH kontrolünde kullanılan lityumun oluşumunu tanıtırken; Denklem 11 ise ^{10}B ile trityum oluşumunu göstermektedir. ^7Li ile nötron yakalaması trityumun yan kaynağıdır. PWR reaktörün soğutma suyundaki toplam trityumun %90’ı çözünebilir borik asit ara reaksiyonu ile oluşurken kalan %10’u ise üçlü fizyon, ^{10}B nötron yutucu, ^6Li nötron yakalaması ve döteryum aktivasyonu ile oluşur.

Nötronların reaktörün soğutulması için kullanılan soğutma suyunda bulunan döteryum (^2H) ile reaksiyona girmesi ($^2\text{H} (n, \gamma) ^3\text{H}$) sonucunda trityum oluşur. Benzer şekilde reaktörün soğutulması için kullanılan soğutma suyunda bulunan ^6Li ve ^7Li ile nötronların reaksiyona girmesi ($^7\text{Li} (n, n\alpha) ^3\text{H}$ ve $^6\text{Li} (n, \alpha) ^3\text{H}$) sonucunda trityum oluşur (Simek ve Dubsek, 1997).

Nükleer yakıtın üçlü fizyon mekanizmaları ile ^3H oluşturmaları Denklem 13 ve Denklem 14’te verilmiştir (Simek ve Dubsek, 1997).



BWR reaktörlerde ise soğutma suyunda borik asit bulunmaması sebebiyle PWR reaktörlere göre trityum miktarı daha azdır.

1.6.3. Trityumun Kullanım Alanları

Trityum, günlük hayatta birçok yerde kullanılmaktadır. Nükleer reaksiyonlarda, birçok saatlerin kadranlarında, havaalanı pist ışıkları ve çoğu ısıldayan cihazlarda, boyalarda, bina giriş çıkış kapılarının kontrolünü sağlayan cihazların yapısında ve çeşitli bilimsel araştırmalarda görülmektedir. Ayrıca, biyolojik ve çevresel çalışmalarda izleyici olarak da kullanılır (Portakal vd., 1988; Dizman, 2015). Çevresel numunelerde trityum tespiti için en sık kullanılan yöntem Sıvı Sintilasyon ölçüm yöntemidir (Xiaolin ve Per, 2008; Dizman, 2015).

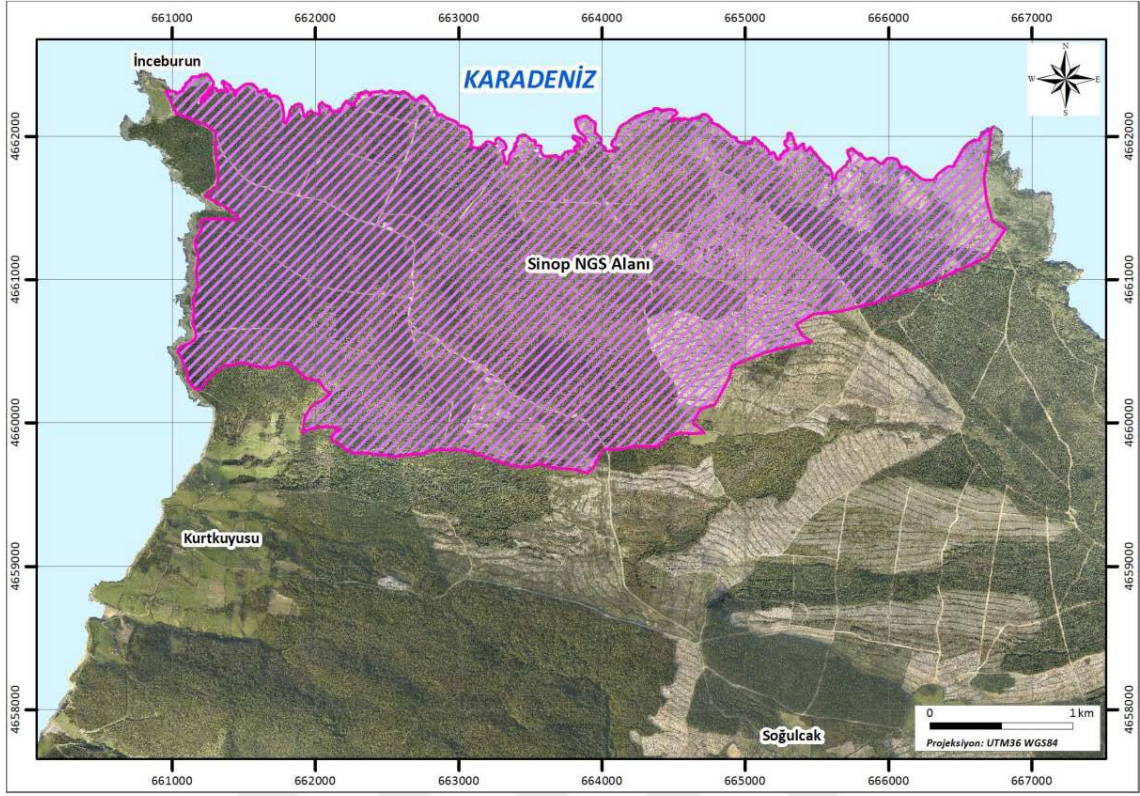
1.7. Sinop İlinde Kurulması Planlanan Nükleer Güç Santraline Ait Bilgiler

Sinop ilinin Abalı bölgesinde kurulması planlanan Nükleer Güç Santrali, Türkiye'nin Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nden sonra projelendirilen ikinci nükleer güç santralidir. Japonya ile Hükümetler Arası Anlaşma 2013 yılında imzalanmıştır. Santral Sinop'un İnceburun Yarımadası'nda kurulacaktır. İmzalanan anlaşma neticesinde her biri 1.120 MW olan 4 üniteden oluşan toplam 4.480 MW gücüne, sahip Fransız-Japon ortak tasarımı ATMEA-1 tipi nükleer reaktör kurulması planlamaktadır (URL-1).

Santral, Türkiye, Japonya ve Fransa tarafından işletilecek olup, Türkiye adına EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi) %49 hisseye, iki Japon şirketi toplam %30 hisseye ve bir Fransız şirketi ise %21 hisseye sahip olacaktır.

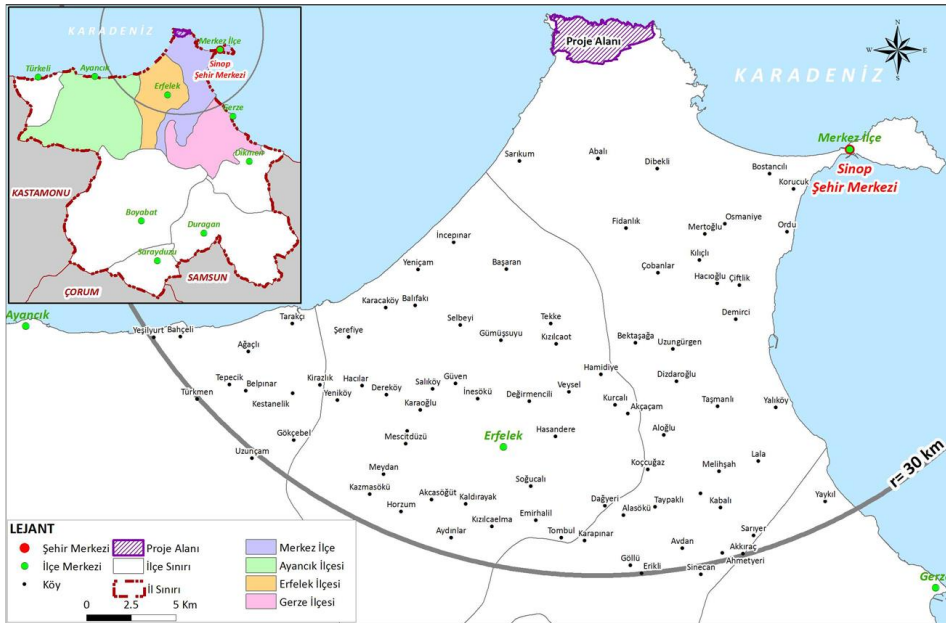
Sinop Nükleer Güç Santrali Projesinde, EÜAŞ'ın Projede hisse sahibi olması nükleer teknolojinin Ülkemize transfer edilmesi, sanayimizin geliştirilmesi ve insan kaynağımızın yetiştirilmesi gibi hususlar için büyük önem taşımaktadır.

Atmea 1 tipi reaktör Japon Mitsubishi Heavy Industry (APWR, Advanced Pressurized Water Reactor) ve Fransız AREVA (EPR, European Pressurized Reactor) firmalarının ortak yapımı 3+ Nesil Basınçlı Su Reaktörüdür (PWR). Sinop nükleer güç santrali (NGS) alanının uydu görüntüsü Şekil 12'de gösterilmektedir (URL-4).



Şekil 12. Sinop NGS alanının uydu görüntüsü

Sinop ilinde kurulacak nükleer santral projesinin çevresindeki yerleşim yerleri Şekil 13’de verilen haritada gösterilmektedir (URL-4).



Şekil 13. Proje alanından itibaren 30 km yarıçaplı alandaki yerleşimler

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Bölgesi

Bu araştırmanın çalışma bölgesi Sinop ilinin önemli nehirlerinden olan Karasu ve Kabalı'dır. Karasu nehri 80 km uzunluğa sahip olup Sinop il merkezinin yaklaşık 8 km batısından, Kabalı nehri ise 51,3 km uzunluğa sahip olup Sinop il merkezinin yaklaşık 24 km doğusundan denize dökülür (URL-2). Karasu ve Kabalı nehirlerinin Sinop ilindeki konumları Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 14. Çalışma bölgesi olan Karasu ve Kabalı nehirlerinin Sinop ilindeki konumları

2.2. Numunelerin Toplanması

Karasu ve Kabalı nehirlerinin denize döküldüğü noktadan başlanarak her iki kilometrede bir nehir suyu ve sediment örnekleri alındı. Aynı zamanda, örnek alınan her noktanın GPS cihazı (Magellan Explorist 510) ile koordinatları kaydedildi. Nehir boyunca bazı noktalara ulaşımı olmadığından nehrin kenarına inmek mümkün olmadı. Bu durumda örnekleme yapılacak olan noktaya en yakın noktalardan örnek

alımları gerçekleştirildi. rnek alınırken çekilen fotoğraflardan birkaçı şekil 15’te verilmektedir.





Şekil 15. Aralık ve Temmuz aylarına ait örnek alım fotoğrafları

Örnek alınan kaplar açık örnek kodu, örneklenme tarihi ve GPS koordinat kodunu içerecek şekilde etiketlendi. Alınan örnekler Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'na getirildi ve örnek hazırlama işlemleri gerçekleştirildi.

2.3. Numunelerin Analize Hazırlanması

2.3.1. Sediment Numuneleri

Numuneler ilk olarak alüminyum kaplara alındı (Şekil 16). Numuneler daha sonra 105 °C'ye ayarlı etüvde 24 saat boyunca kurutuldu (Şekil 17). Kurutulan numuneler, ardından agatta öğütüldü ve parçacık boyutu etkisini azaltmak için 300 (45 µm) meshlik elekten geçirildi (Şekil 18). Elekten geçirilen numuneler, hava kaçırmayan polietilen numune kaplarına konuldu (Şekil 19). Hazırlanan numuneler son olarak radyoaktif dengeye gelmeleri için 1 ay bekletilerek ölçüme hazır hale getirildi (Dizman vd., 2020).



Şekil 16. Alüminyum kaplara alınan bazı sediment numuneleri



Şekil 17. Sediment numunelerinin etüvde kurutulması



(a)



(b)

Şekil 18. Ağatta öğütülen ve elekten geçirilen numuneler



Şekil 19. Polietilen kaplara konulan numuneler

2.3.2. Su Numuneleri

2.3.2.1. Gama Ölçümleri

Laboratuvara getirilen su numuneleri (Şekil 20-a), içindeki fiziksel partikülleri elimine etmek için hava kaçırmayan polietilen numune kaplarına filtre edildi (Şekil 20-b). Daha sonra bu numuneler radyoaktif dengeye gelebilmeleri için 1 ay süreyle bekletildi ve böylelikle gama dedektöründe ölçüme hazır hale getirilmiş oldular (Şekil 21) (Alzaridi and Kurnaz, 2020).

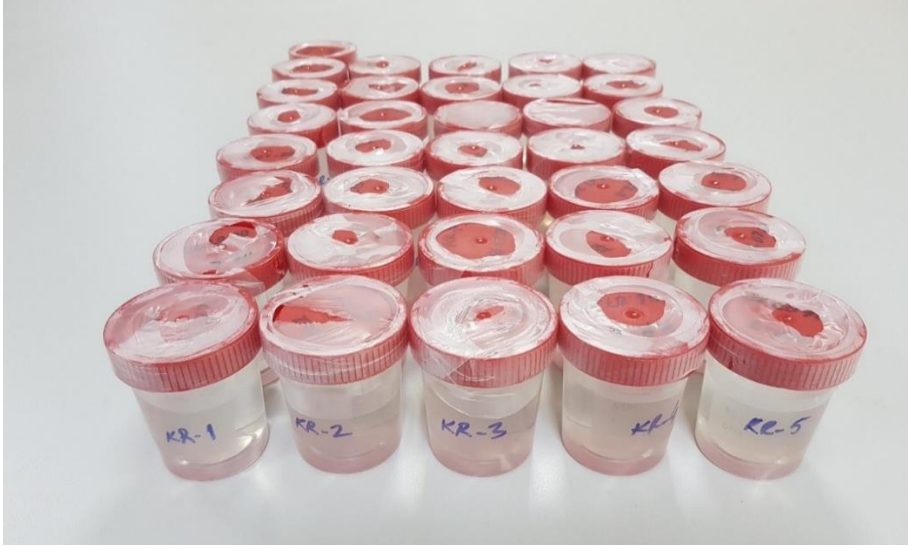


(a)



(b)

Şekil 20. Laboratuvara getirilen su numuneleri ve numunelerin filtre edilmesi



Şekil 21. Radyoaktivite ölçümleri için hazırlanan su numuneleri

2.4.2.2. Tritiyum Ölçümleri

Örnekler ilk olarak, damıtma-saflaştırma-ayırıştırma olarak bilinen “destilasyon” (damıtma) işlemine tabii tutuldu. Destilasyon, numunenin fiziksel ve kimyasal kirliliklerden arındırılarak numunenin kalitesini artırmak, örnekler arasında farklılığa neden olabilecek etkenleri ortadan kaldırmak için yapılır. Numuneler, ASTM metoduna göre aşağıdaki işlemlerden geçirildi (ASTM, D4107-08, 2006; Palomo vd., 2007).

- 100 mL’lik destilasyon balonuna, nehir suyu örneklerinden yaklaşık 20 mL koyulup çalkalandı ve döküldü.
- Balona 100 mL örnek koyuldu ve üzerine 0,05 N KMnO_4 (potasyum permanganat) ve 6 M NaOH (sodyum hidroksit) çözeltilerinden birkaç damla ilave edildi. Karışımın homojen olması için yaklaşık 20 saniye kadar çalkalandı.
- Balon destilasyon ünitesine yerleştirildi ve destilasyon ünitesi çalıştırılarak örnekler destile edildi (Şekil 22).



Şekil 22. Destilasyon ünitesi ile bir örneğin destile edilmesi

- Başlangıçta oluşan destilatın 10–15 mL’si ile toplama kapları çalkalandı ve bu su atıldı.
- Erlenlerde toplanan destilatlar, üzeri örnek kodu ve destilasyon tarihi yazılmış bir şekilde, etiketlenmiş kapaklı kahverengi şişelere boşaltıldı (Şekil 23).



Şekil 23. Destilatların aktarıldığı kahverengi cam şişeler

- Kahverengi şişelere boşaltılmış olan destile edilmiş örneklerden ayarlı pipetle 10 ml alındı ve 20 ml'lik polipropilen sayım vialine aktarıldı. Sayım viali üzerine 10 ml Ultima Gold LLT sintilasyon kokteyli eklendi (Şekil 24).



Şekil 24. Kahverengi cam şişe, ayarlı pipet, vial ve aktarma ünitesi (dispenser) sentilatör

- Polipropilen sayım vialinin kapağı sıkıca kapatıldı. Sonrasında üzerine örnek kodu ve tarih yazıldı. Vial, homojen bir karışım olması için yavaşça (yaklaşık 20 saniye) çalkalandı ve vialin kapak dışındaki tüm yüzeyi hafif etanolü bir bezle silindi.

Hazırlanan vialler, kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan kemilüminesans parıldamalarını elimine etmek için 2 gün karanlık bir ortamda bekletildi ve böylelikle LSC cihazında ölçüme hazır hale getirilmiş oldular ve hazırlanan standartlar ve örnekler sıvı sintilasyon sayacında (Perkin Elmer Tricarb 2910 TR) 1500 dakika (150 dk x 10 tur) süre ile ölçüldü. Örnek viallerinin LSC cihazında ölçümü sonucu alınan analiz sonuç raporlarından biri (KR-1 örneğinin) Şekil 25'te verilmektedir.

Assay Definition

Assay Description:

Assay Type: DPM (Single)

Report Name: Report1

Output Data Path: C:\Packard\Tricarb\Results\Default\Tubitakproje\20200714_1126

RTF File Name:

C:\Packard\Tricarb\Results\Default\Tubitakproje\20200714_1126\sinop-Karasu.rtf

Count Conditions

Nuclide: 3H

Quench Indicator: tSIE/AEC

External Std Terminator (sec): 0.5 2s

Pre-Count Delay (min): 0.00

Quench Set:

Low Energy: 3H

Count Time (min): 150.00

Count Mode: Normal

Assay Count Cycles: 1

Repeat Sample Count: 10

#Vials/Sample: 1

Calculate % Reference: Off

Cycle 1 Results

S#	Count	Time	CPMA	DPML	SIS	tSIE	MESSAGES
1	150	150	2.67	8.88	1135.20	279.03	
1	150	150	2.77	9.31	1205.48	276.30	
1	150	150	2.51	8.51	1165.24	274.11	
1	150	150	2.66	8.98	1199.81	274.88	
1	150	150	2.72	9.21	1197.60	273.64	
1	150	150	2.46	8.30	1240.54	274.68	
1	150	150	2.58	8.77	1232.90	272.78	
1	150	150	2.87	9.74	1173.87	272.94	
1	150	150	2.82	9.61	1203.51	272.59	
1	150	150	2.71	9.22	1199.06	272.61	
KR-1			2.68	9.05	1195.32	274.36	A

Şekil 25. KR-1 örnek vialinin LSC cihazında ölçümü sonucu alınan analiz sonuç raporu

2.4. Gama Spektrometrik Ölçümler

Radyoaktivite ölçümleri (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs) 1332,5 keV'de 1,9 keV ayırma gücüne ve %55'lik relatif verime sahip olan ORTEC marka (Model: GEM55P4-95) Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü (HPGe) kullanılarak gerçekleştirildi. Gama spektrometre sisteminin genel bir görünüşü Şekil 26'da gösterilmektedir.

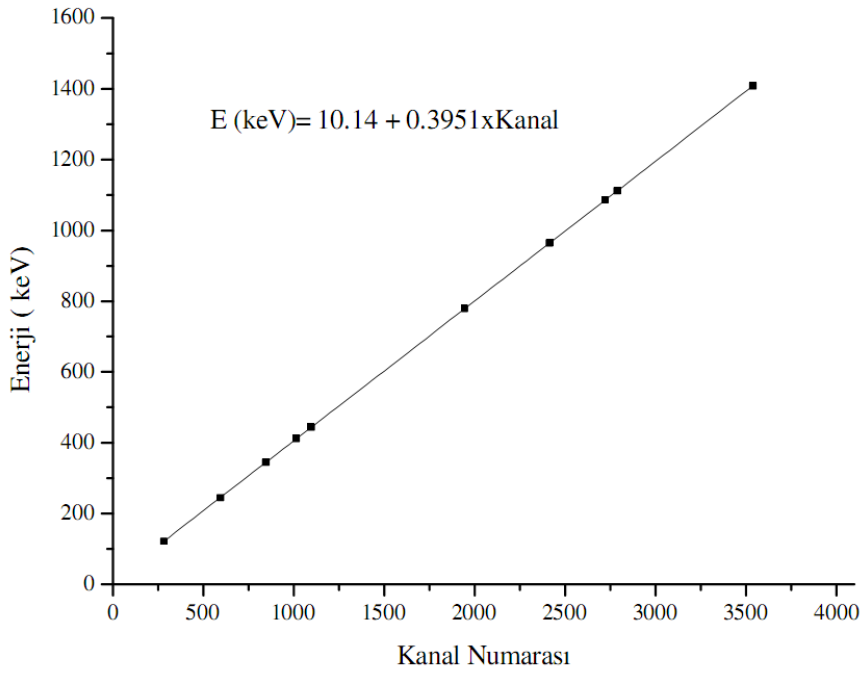


Şekil 26. Gama spektrometre sisteminin genel bir görünüşü

Gama spektrometre sistemi dedektör, ön yükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sayımları elektronik sinyallere dönüştüren ADC sistemi, çok kanallı analizörden (MCA) ibarettir. Dedektörün numune odası inşaat malzemelerinden ve kozmik ışıklardan gelen arka plan (background) radyasyona karşı 10 cm kurşun blokla zırhlanmıştır.

2.4.1. Enerji Kalibrasyonu

Dedektörün enerji ve verim kalibrasyonu, aktivitesi bilinen sıvı Eu-152 kaynak ile yapıldı. Eu-152 sıvı kaynaklar, %3-29 bolluklarda yayınlanma olasılıklarında çok geniş enerji aralığına (122, 244, 344, 411, 443, 779, 964, 1112 ve 1408 keV) sahip olmalarından dolayı enerji ve verim kalibrasyonunun belirlenmesi için çok yaygın olarak kullanılırlar (Grigorescu vd., 2002). Bu çalışmada enerji kalibrasyonu için IAEA (International Atomic Energy Agency) referanslı Eu-152 sıvı kaynak kullanıldı. Enerji değerlerinin kanal değerlerine karşılık değişim grafiği Şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27. Enerjinin kanala göre değişim grafiği

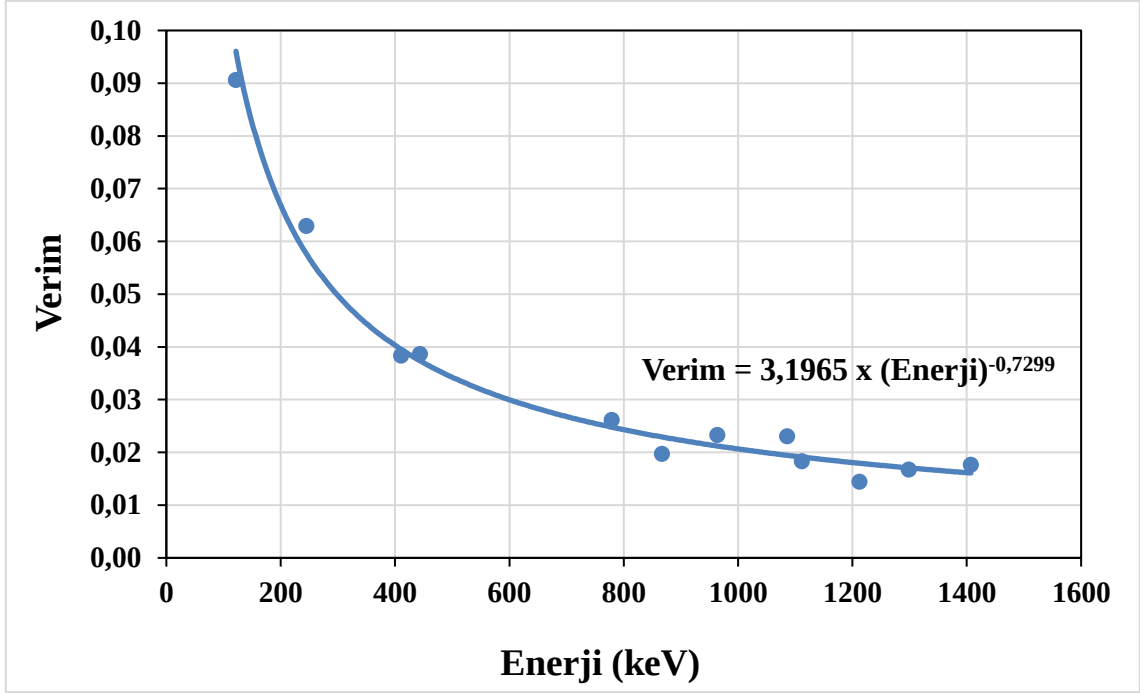
2.4.2. Verim Kalibrasyonu

Dedektörün saydığı gama sayımlarının gerçek değerinin bulunabilmesi için dedektöre ait verim düzeltmesi yapılır. Bunun için ilgilenilen enerjilerdeki dedektör verimleri Denklem 15 kullanılarak hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{N}{A.I\gamma\%} \quad (15)$$

Burada, N; ilgilenilen enerjideki toplam sayım hızı (sayım/zaman), A; verim kalibrasyonu için kullanılan standart kaynağın o anki aktivitesi (boz/saniye), I γ ; gama ışınının bolluğu (%)’dur. İlk olarak Eu-152 sıvı kaynağı dedektörde ölçüldü ve denklem 15 kullanılarak ilgilenilen enerjideki verim değerleri elde edildi.

Son olarak elde edilen verim değerlerinin pik enerjilerine göre dağılım grafiği çizildi. Çizilen dağılım grafiği üstel olarak fit edilerek verim ile enerji ilişkisini veren denklem elde edildi (Şekil 28).



Şekil 28. Verim değerlerinin enerjiye göre değişimi

2.4.3. Aktivite Konsantrasyonu

Alınan örneklerde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs radyonüklidlerinin aktivite konsantrasyonları belirlendi. ^{226}Ra serisi için ^{214}Pb 'ün 295,2 keV ve 352,0 keV ile ^{214}Bi 'ün 609,4 keV ve 1120 keV enerjilerindeki, ^{232}Th serisi için ^{212}Pb 'nin 238,6 keV, ^{208}Tl 'in 583,1 keV ve ^{228}Ac 'in 911,1 keV enerjilerindeki, ^{40}K için 1460,8 keV ve ^{137}Cs için 661,6 keV enerjisindeki piklerin alanları kullanıldı. Radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları Denklem 16 kullanılarak belirlendi (Baretka and Mathew, 1985).

$$A(\text{Bq/kg}) = \frac{N}{t \cdot \epsilon \cdot m \cdot \gamma} \quad (16)$$

Burada, N; net alan, t; sayım süresi (saniye), ϵ ; dedektör verimi, γ ; gama ışını dallanma oranı ve m; numune kütlesi (kilogram)'dır.

Sediment ve su örnekleri dedektörde sırasıyla 50000 ve 86400 s sayıldı. Elde edilen spektrumlar, Gamma Vision programı kullanılarak analiz edildi. Backgroundu belirlemek için örneklerle aynı ölçüm koşulunda boş bir plastik ölçüm kabı dedektörde ayrıca sayılmıştır. Örneklerin spektrumları değerlendirilirken backgrounddan gelen bu katkılar çıkarılmıştır.

Kullanılan dedektör için minumum dedekte edilebilir aktivite (MDA) Denklem 17 kullanılarak hesaplanır.

$$MDA (Bq/kg) = 4.66 \frac{\sqrt{Background}}{t.\epsilon.m.\gamma} \quad (17)$$

Burada t; sayım zamanı (saniye), ϵ ; foto pikteki verim, m; kütle (kilogram) ve γ ; dallanma oranıdır.

Ölçülen radyoizotoplar için hesaplanan minimum dedekte edilebilir aktivite değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ölçülen radyoizotoplar için MDA değerleri

Radyoizotop	MDA (Bq/kg)
²²⁶ Ra	0,24
²³² Th	0,21
⁴⁰ K	2,49
¹³⁷ Cs	0,02

2.5. Radyolojik Tehlike Parametre Hesapları

Örneklerdeki radyonüklit konsantrasyonlarının yanında radyolojik tehlike parametreleri de hesaplandı.

2.5.1. Radium Eşdeğer Aktivitesi (R_{eq})

²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K radyoizotoplarının çevrede dağılımı birbirlerinden farklıdır ve farklı miktarlardaki bu spesifik aktivitelerden radyasyona maruz kalmayı standartlaştırmak için radium eşdeğer aktivitesi (R_{eq}) tanımlanmıştır (Beretka and Marthew,1985) ve bu değer Denklem 18 ile hesaplanır.

$$R_{eq} (Bq/kg) = C_{Ra} + 1,43 C_{Th} + 0,07 C_K \quad (18)$$

Burada, C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'ın Bq/kg biriminde spesifik aktiviteleridir. Radium eşdeğer aktivitesinin 370 Bq/kg'dan düşük olması tavsiye edilir

(UNSCEAR, 2000).

2.5.2. Dış Tehlike İndeksi (H_{ex})

Dış tehlike indeksi, pencere ve kapılar olmaksızın kalın duvarlar varsayılarak Krieger tarafından önerilen model kullanılarak Ra , Th ve K konsantrasyonları bulunan örnekler için Denklem 19 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$H_{ex} = C_{Ra}/370 + C_{Th}/259 + C_K/4810 \leq 1 \quad (19)$$

Burada, C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde spesifik aktiviteleridir.

2.5.3. Gama İndeksi (I_γ)

Radyasyon güvenliğinin Avrupa Komisyonu (EC) tarafından tavsiye edilen gereksinimleri karşıladığına karar verebilmek için gama indeksinin hesaplanması (Denklem 20) gereklidir (EC, 1999).

$$I_\gamma = C_{Ra}/300 + C_{Th}/200 + C_K/3000 \leq 1 \quad (20)$$

Burada, C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg biriminde spesifik aktiviteleridir. $I_\gamma \leq 1$ olması soğurulan yıllık gama dozunun 1 mSv/y'a eşit veya küçük, $I_\gamma < 0,5$ olması ise yıllık soğurulan gama dozunun 0,3 mSv/y'a eşit veya küçük olduğunu gösterir (UNSCEAR, 2000).

2.5.4. Soğurulan Gama Doz Hızı (D)

Yüzeyden 1 m yükseklikteki havada soğurulan gama doz hızı, spesifik aktivite konsantrasyonlarının belli dönüşüm faktörleriyle çarpılması (Denklem 21) ile hesaplanır.

$$D \text{ (nGy/h)} = 0,462 C_{Ra} + 0,621 C_{Th} + 0,0417 C_K \quad (21)$$

Burada, C_{Ra} , C_{Th} ve C_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg birimindeki spesifik

aktiviteleridir. Soğurulan gama doz hızının dünya ortalaması 55 nGy/h'tir (UNSCEAR, 2000).

2.5.5. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (AEDE)

Soğurulan doz için dönüşüm (0,7 Sv/Gy) ve dış ortamda maruz kalma faktörü (0,2) dikkate alınarak yıllık etkin doz eşdeğeri Denklem 22 kullanılarak hesaplanır.

$$AEDE (\mu Sv/y) = D (nGy/h) \times 8760 h \times 0,2 \times 0,7 Sv/Gy \times 10^{-3} \quad (22)$$

Avrupa Komisyonu tarafından yıllık etkin doz eşdeğerinin en çok 1 mSv/y olması önerilmektedir (UNSCEAR, 2000).

2.6. Sıvı Sintilasyon Sayım Sistemi

2.6.1. Sıvı Sintilasyon Sayacı (LSC)

Sıvı Sintilasyon Sayım (LSC) tekniği, radyoaktivite ölçümlerinde kullanılan en yaygın tekniklerden biridir ve 1950'li yıllardan beri kullanılmaktadır. Özellikle çevresel ve biyolojik örneklerde alfa ve beta yayan radyonüklidlerin analizinde günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Perkin & Elmer Tricarb 2910 TR sıvı sintilasyon sayacı Şekil 29'da görülmektedir.



Şekil 29. Sıvı sintilasyon sayacı (LSC)

LSC birçok avantaj sağlar ve bu nedenle çevresel biyolojik örneklerdeki radyoaktivite ölçümlerinde, en çok tercih edilen tekniklerden biridir. Sıvı sintilasyon sayım tekniğinin sağladığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir (Horrocks, 1974; Passo ve Cook, 1994):

- Radyoizotoplar, uygun bir sintilatör içinde homojen dağılımda bulundukları için 4π sayım geometrisinde sayılırlar.
- Self-absorbsiyon (öz soğurma) riski yoktur.
- Beta parçacıklarının menzili kısadır, (1 MeV enerjili beta parçacığı için sudaki menzil 0,40 cm). LSC’de beta parçacıkları sıvı sintilatör içinde yakın mesafelere getirilebilir ve diğer metotlardan farklı olarak özsoğurma olmadan sintilasyon sağlanabilir.
- Son yıllarda özellikle beta sayımlarında çok fazla kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan beta yayıcı izotoplar ^3H , ^{14}C ve ^{32}P ’dir ve aynı örnek içinde aynı anda toplam alfa ve beta radyoaktivite değeri hesaplanabilmektedir. Sıvı sintilasyon sayacı ayrıca aşağıda verilen birçok radyoizotop belirlenmesinde de kullanılmaktadır (Horrocks, 1974);
- Doğal radyoizotop serilerinin ölçümünde (^{226}Ra , ^{235}U , ^{210}Pb , ^{222}Rn , ^{231}Pa ve ^{234}Th)

- Nükleer güç endüstrisi ile çevreye dağılan genellikle beta yayınlayıcısı olan radyoizotopların ölçümünde (^3H , ^{14}C , ^{35}S , ^{55}Fe , ^{85}Kr , ^{90}Sr),
- Radyo karbon ile tarihlemeye (^{14}C),
- Yeraltı ve çevresel sularda ^3H ölçümleri gibi analizlerde,
- İçme sularında toplam alfa ve beta ölçüm analizlerinde,
- Radyasyon serpinti çalışmalarında (^{90}Sr , ^{137}Cs),
- Radyoaktif atık izlemeye (^3H , ^{14}C , ^{244}Pu),
- Yiyeceklerde ^{14}C analizlerinde,
- Biyolojik çalışmalarda (^3H , ^{14}C),

Tritiyum düşük enerjili olduğundan, içme sularında tritiyum konsantrasyonunu belirlemek için sıvı sintilasyon sayımı ideal bir sayım yöntemi olup, beta parçacıklarının kinetik enerjilerinin ışık fotonlarına dönüşümü sürecinde işlev görmektedir.

2.6.2. Sayım Kapları (Vialler)

Sıvı sintilasyon sayım tekniği ile radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesinde borosilikat camdan (^{40}K , ^{226}Ra içermeyen) veya plastikten yapılmış vialler kullanılır. Şekil 30'da gösterilen bu plastik ve cam viallerin kendilerine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Plastik vialler, yüksek yoğunluklu polietilen ya da poliorotilenden üretildiği için analizlerde cama göre daha düşük background değerine sahip ve maliyetinin çok daha ucuz olması nedeniyle düşük aktiviteli sayım uygulamaları için en çok tercih edilen vial türlerinden biridir.

Cam vialler tercih edilmesinin nedenlerinden biri, kullanımı ile oluşan statik elektrik en aza indirgenebilir. Bu sayede sıvı sintilasyon sayım sistemindeki fotoçoğaltıcı tüpler arasına girerek numunelerin sayılmasını sağlar. İçinde sintilatör ile karışmış numune bulunan viallerin yüksek foton üretme verimliliğine sahip olmaları ve düşük radyasyon içeren maddelerden yapılmış olmaları gerekmektedir (Horrocks, 1974).



Şekil 30. Cam (a) ve plastik (b) vialler

2.6.3. LSC' de Dedeksiyon Sistemi

LSC sistemi; fotoçoğaltıcı tüp, puls amplifikatörü, sayıcı ve kaydedici sistemden oluşur. Bu sistemler çift fotoçoğaltıcı tüp, çok kanallı analizörler ve bilgisayarlı sistemlerden oluşmaktadır. Vialin içinde bulunan çözeltinin rastgele dağılmış olan radyoaktif atomlarının fototüplere olan uzaklıkları farklı olduğundan yayınlanan fotonlarda, tüplere farklı şiddetlerde ulaşırlar ve bu durum, sayma sisteminde performans düşüklüğüne neden olurken, zayıf enerjili beta aktif radyonüklitlerin dedeksiyonunda sorun yaratan bu duruma ilave edilen darbeler toplamını alan (summation circuit) devreyle yok edilir. Radyoaktif atomların konumu dolayısıyla fototüplere olan uzaklık farklarının önemi kalmaz (DSİ TAKK, 2003). Toplama devresi çıkışı ile çakışma devresi bir çakışma kapısı (coincidence gate) vasıtasıyla birleştirilir ve nükleer olayın meydana getirdiği gerçek darbeler bir sayıcı kaydedici ile sayılır ya da bu darbeler genliklerine göre değerlendirilmek üzere spektrum analizörüne gönderilir (DSİ TAKK, 2003).

Sıvı sintilasyon sayaçlarında kullanılan ilk sistem, çakışan darbe dedeksiyonu (coincidence pulse detection) adı verilen ve karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki adet foto çoğaltıcı tüple birlikte çalışan bir devre olmakla birlikte, her bir tüp içinde meydana gelen gürültü birbirinden bağımsız olduğu için, bu olaylara yönelik tam bir uyuma gözlenemeyecektir. Çakışma devresi fototüplerden çıkan sintilasyon sinyallerini birbirleriyle karşılaştırır ve iki sinyal aynı anda oluşmuş (devrenin çözümleme zamanı içinde, 20 ns) ise devre çıkışından darbe (pulse) alınır, böylece radyoizotoptan gelen pulsların yüksek bir verimle sayılması gerçekleşir (DSİ TAKK, 2003).

Devrenin temel çalışma prensibi şöyledir: Sintilasyonun toplam şiddetiyle orantılı olan ve aynı anda iki fototüpte oluşan darbeler elektronik toplama ünitesi aracılığıyla

toplanır ve bir çakışma kapısı aracılığıyla toplama devresi çıkışı ve çakışma devresi çıkışı birleştirilir. Nükleer olayın meydana getirdiği ve genliklerine göre değerlendirilmek üzere spektrum analizörüne gönderilen gerçek darbeler bir sayıcı kaydedici ile sayılır. Spektrum analizörü, 0 keV ile 2000 keV arasında herhangi bir bölgede farklı enerjilere sahip radyonüklitlerin ürettiği darbelerin enerji darbe yüksekliği dağılımını, sabit bir kazanç altında inceleme imkânı sağlayacak şekilde tasarlanmış mikro işlemci esaslı bir elektronik sistemdir. Çevresel trityum konsantrasyonunun doğal seviyesine ulaşması sonucu ölçümlerde kullanılan cihazların dedeksiyon limitlerinin en düşük aktiviteyi ölçebilecek düzeyde olması gereklidir (Altay ve Çifter, 1996).

2.6.4. Laboratuvar Standardı (DWS)

Radyoaktif referans standardı sağlayan, uluslararası izlenebilir organizasyonlardan ulaşılan stok standart çözeltiden, laboratuvarların kendi ihtiyaçlarını karşılayacak derişimde hazırladıkları H-3 içeriği bilinen standart çözeltidir.

Hazırlanışı: DWS'den ayarlı pipetle 8 ml alınır ve sayım vialine aktarılır. Sayım viali üzerine 12 ml Ultima Gold LLT sintilasyon kokteyli eklenir. İşlemi tamamlanan vialin kapağı kapatılır ve kapağın üzerine DWS ve tarih yazılır. Vial homojen bir karışım olması için yavaşça (yaklaşık 20 saniye) çalkalanır ve vialin kapak dışındaki tüm yüzeyi hafif etanolü bir bezle silinir.

2.6.5. Spike (RWS)

Trityum (H-3) analiz sürecinde destilasyon ve devamındaki diğer süreçlerde problemlerin gözlenmesini sağlamak amacı ile kullanılan, H-3 içeriği bilinen çözeltidir.

Hazırlanışı: RWS'den ayarlı pipetle 8 ml alınır ve sayım vialine aktarılır. Sayım viali üzerine 12 ml Ultima Gold LLT sintilasyon kokteyli eklenir. İşlemi tamamlanan vialin kapağı kapatılır ve üzerine RWS ve tarih yazılır. Vial homojen bir karışım olması için yavaşça çalkalanır (yaklaşık 20 saniye) ve vialin kapak dışındaki tüm yüzeyi hafif etanolü bir bezle silinir.

2.6.6. Background Standardı (DW)

H-3 içermediği kabul edilen çift destile su örneğidir.

Hazırlanışı: DW'den ayarlı pipetle 8 ml alınır ve sayım vialine aktarılır. Sayım viali

üzerine 12 ml Ultima Gold LLT sintilasyon kokteyli eklenir. İşlemi tamamlanan vialin kapağı kapatılır ve üzerine DW ve tarih yazılır. Vial homojen bir karışım olması için yavaşça çalkalanır ve vialin kapak dışındaki tüm yüzeyi hafif etanollu bir bezle silinir.

2.7. Örneklerin Sayılması

- Hazırlanan örnekler sıvı sintilasyon sayacının kasetlerine sırasıyla, DW, RWS, örnekler ve DWS şeklinde yerleştirildi.
- Sıvı sintilasyon sayacına yerleştirilen kasetler, LSC cihazında 10 kez 50 dk süreyle yani toplamda 500 dk süreyle ölçüldü ve ölçüm sonuçları kaydedildi.

2.7.1. Sayım Verimi

Sayım verimi (ϵ) Denklem 23 ile hesaplanır (Palomo vd., 2007).

$$\epsilon = \frac{DWS_M - B}{DWS_A} \quad (23)$$

DWS_M : Laboratuvar Standardının (DWS) ortalama sayım hızı (cpm)

B : DW'nin ortalama sayım hızı (cpm)

DWS_A : Laboratuvar Standardının (DWS) ölçüm tarihindeki aktivitesi (dpm)

2.7.2. Tritiyum Aktivite Konsantrasyonu

Tritiyum aktivite konsantrasyonu Bq/L biriminde Denklem 24 ile hesaplanır (Palomo vd., 2007).

$$A(Bq/L) = \frac{R - B}{60 \times \epsilon \times V \times F} \quad (24)$$

R : Örneğin ortalama sayım hızı (cpm)

B : DW'nin ortalama sayım hızı (cpm)

ϵ : Sayım verimi

V : Örnek hacmi (L)

F : Geri kazanım düzeltme faktörü

2.7.3. Geri Kazanım Düzeltme Faktörü (F)

Geri kazanım düzeltme faktörü (F) kullanılan sıvı sintilasyon sayma sisteminde 1 cpm'lik (count per minute=dakikadaki sayım) saymanın kaç trityum birimine karşılık geldiği, laboratuvar standardından hazırlanmış spike standardının ölçülmesiyle bulunur. Spike (RWS) ölçüm setine bu amaçla konulmaktadır. Geri kazanım düzeltme faktörü Denklem 25 ile hesaplanır (Palomo vd., 2007).

$$F = \frac{RWS_M - B}{60 \times \epsilon \times RWS_A} \quad (25)$$

RWS_M: Spike'ın (RWS) ortalama sayım hızı (cpm)

B: DW'nin ortalama sayım hızı (cpm)

ε: Sayım verimi

RWS_A: Spike'ın (RWS) ölçüm tarihindeki aktivitesi (Bq)

2.7.4. Belirsizlik (Örnek Hatası)

Belirsizlik (örnek hatası) %95 güven aralığında (k=2) Denklem 26 ile hesaplanır (Palomo vd., 2007).

$$\sigma(Bq/L) = \frac{2}{60 \times \epsilon \times V \times F} \times \sqrt{\frac{R}{t_s} + \frac{B}{t_B}} \quad (26)$$

R: Örneğin ortalama sayım hızı (cpm)

B: DW'nin ortalama sayım hızı (cpm)

ε: Sayım verimi

V: Örnek hacmi (L)

F: Geri kazanım düzeltme faktörü

t_s: Örneklerin sayım süresi (dk)

t_B: DW'nin sayım süresi (dk)

2.7.5. Minimum Dedekte Edilebilir Aktivite (MDA)

Minimum dedekte edilebilir aktivite (MDA) değeri Denklem 27 ile hesaplanır (Palomo vd., 2007).

$$MDA (Bq/L) = \frac{3,29 \times \sqrt{\frac{B}{t_B} + \frac{B}{t_s}}}{\varepsilon \times F \times V} \quad (27)$$

B: DW'nin ortalama sayım hızı (cpm)

t_s : Örneklerin sayım süresi (dk)

t_B : DW'nin sayım süresi (dk)

ε : Sayım verimi

F: Geri kazanım düzeltme faktörü

V: Örnek hacmi (L)

2.8. Jeostatistik

Jeostatistik örnekler arasındaki ilişkiyi, örneklerin alındıkları koordinatları da hesaba katarak işlem yapan bir mekânsal analiz yöntemidir (Yeşilkanat vd., 2015). Bu açıdan değerlendirildiğinde geleneksel istatistik yöntemlerinden farklıdır. Bu metodun temelleri durağan rastlantı teorisine dayanmaktadır (Matheron, 1963). Bu hesaplama yönteminde ortalama değer üzerinden bir dağılım tahmini hesaplanabilir (Clark, 1979). Jeostatistik hesaplamalarda mekânsal değişkenlerin birbirleri arasındaki uzaklıklarına bağlı olarak ilişkileri semi-variogram fonksiyonu ile belirlenir. Bu fonksiyon Denklem 28'de gösterildiği gibi birbirinden h kadar uzaktaki iki değişken arasındaki farkın varyansı olarak ifade edilir.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (28)$$

Burada, γ semivaryans değeri, h mekânsal değişkenler arasındaki mesafe, $N(h)$: çalışma alanındaki h vektörü sayısı, $Z(x_i)$ mekânsal değişkenin i noktasındaki ölçülen değeri, $Z(x_i + h)$ mekânsal değişkenin $(x_i + h)$ mesafesinde ölçülen değeridir. Semi-variogram mekânsal korelasyonun bir ölçütü olup iki nokta arasındaki mesafe artışına bağlı olarak benzerlik miktarının azalacağını göstermektedir (Diggle ve Riberio, 2007). Deneysel semi-variogram çalışma alanında ölçüm yapılan uzaklıklara göre hesaplanır. Teorik semi-variogram ise deneysel semi-variogramın uygun bir parametrik fonksiyon ile fit edilmesi ile tespit edilir. Bu çalışmada hem hesaplama olarak kolay hem de dağılımı uygun bir ortalama değerde tahmin edebilen bir jeostatistik yöntem olan Ordinary Kriging (OK) yöntemi kullanılmıştır (Krige, 1960). Bu yöntem, matematiksel olarak

bilinen en iyi lineer yansız hesaplayıcı (BLUE, best linear unbiased estimator) olarak tanımlanır (Baume vd., 2011). OK metodu ile değeri tahmin edilecek mekânsal nokta, teorik semi-variogramdan elde edilen parametrik fonksiyon yardımı ile kendisine mesafe olarak yakın noktalardan fazla, uzak olan noktadan daha az etkilenmesini sağlayacak bir ağırlık çarpanı ile tahmin edilir (Webster ve Oliver, 2001). OK yöntemi geleneksel istatistik yaklaşımındaki ağırlıklı ortalama yöntemine oldukça benzemektedir. Kriging yaklaşımının genel denklemi Denklem 29’de verilmiştir.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N w_i Z(x_i) \quad (29)$$

Burada; $Z(x_0)$, x_0 noktasında bilinmeyen ancak tahmin edilen Z değeri, w_i , $Z(x_0)$ ’nin tahmininde kullanılan ve her bir $Z(x_i)$ için farklı değerlere sahip ağırlık katsayısı, $Z(x_i)$ $Z(x_0)$ ’ın tahmin edilmesinde kullanılan deneysel ölçüm değerleri, N $Z(x_0)$ ’ın tahmininde kullanılan mekânsal veri sayısıdır. Jeostatistiksel metodlar doğal veya yapay radyoaktiviteyi haritalandırmak ve ölçüm değeri bilinmeyen ara noktaların aktivite değerlerini tahmin etmek için son yıllarda birçok çalışmada kullanılmıştır (Dowdall vd., 2003; Hiemstra vd., 2009; Baume vd., 2011; Caro vd., 2013; Sanusi vd., 2014; Yeşilkanat vd., 2015; Kucukomeroglu vd., 2016).

3. BULGULAR

3.1. Karasu ve Kabalı Nehirlerinden Alınan Örneklerle ait Noktaların GPS ve Rakım Bilgileri

Sediment ve su örneklerinin Sinop ili Karasu nehrinden alındığı noktaların GPS koordinatları ve rakım değerleri Tablo 4’te, örneklem noktalarını gösteren harita ise Şekil 31’de verilmiştir.



Tablo 4. Sinop ili Karasu nehrinden alınan örneklerin GPS koordinatları ve rakım değerleri

Örnek Kodu	GPS Koordinatları		Rakım(m)
	Enlem(K)	Boylam (D)	
KR-1	42.032967°	35.059162°	0
KR-2	42.018787°	35.065876°	8
KR-3	42.009318°	35.050958°	12
KR-4	42.009010°	35.039865°	17
KR-5	42.001668°	35.038100°	19
KR-6	41.996804°	35.034517°	21
KR-7	41.989739°	35.034316°	24
KR-8	41.979649°	35.031581°	28
KR-9	41.966983°	35.024175°	30
KR-10	41.959249°	35.022688°	34
KR-11	41.947710°	35.016161°	35
KR-12	41.935207°	35.007798°	52
KR-13	41.923245°	34.999927°	64
KR-14	41.913794°	34.986768°	85
KR-15	41.907021°	34.971428°	101
KR-16	41.904086°	34.954087°	117
KR-17	41.897145°	34.936352°	142
KR-18	41.889786°	34.918983°	169
KR-19	41.880901°	34.902941°	184
KR-20	41.877804°	34.883083°	204
KR-21	41.884402°	34.866099°	246
KR-22	41.877726°	34.848298°	258
KR-23	41.878576°	34.826012°	285
KR-24	41.883374°	34.806914°	308
KR-25	41.879946°	34.788189°	344
KR-26	41.867709°	34.778361°	386
KR-27	41.865251°	34.771006°	411
KR-28	41.853761°	34.778034°	427
KR-29	41.838700°	34.779160°	445
KR-30	41.824839°	34.772948°	484
KR-31	41.808101°	34.772033°	537
KR-32	41.791914°	34.774902°	574
KR-33	41.782503°	34.786678°	610
KR-34	41.771242°	34.800328°	681
KR-35	41.758868°	34.813022°	781
KR-36	41.741484°	34.815931°	834

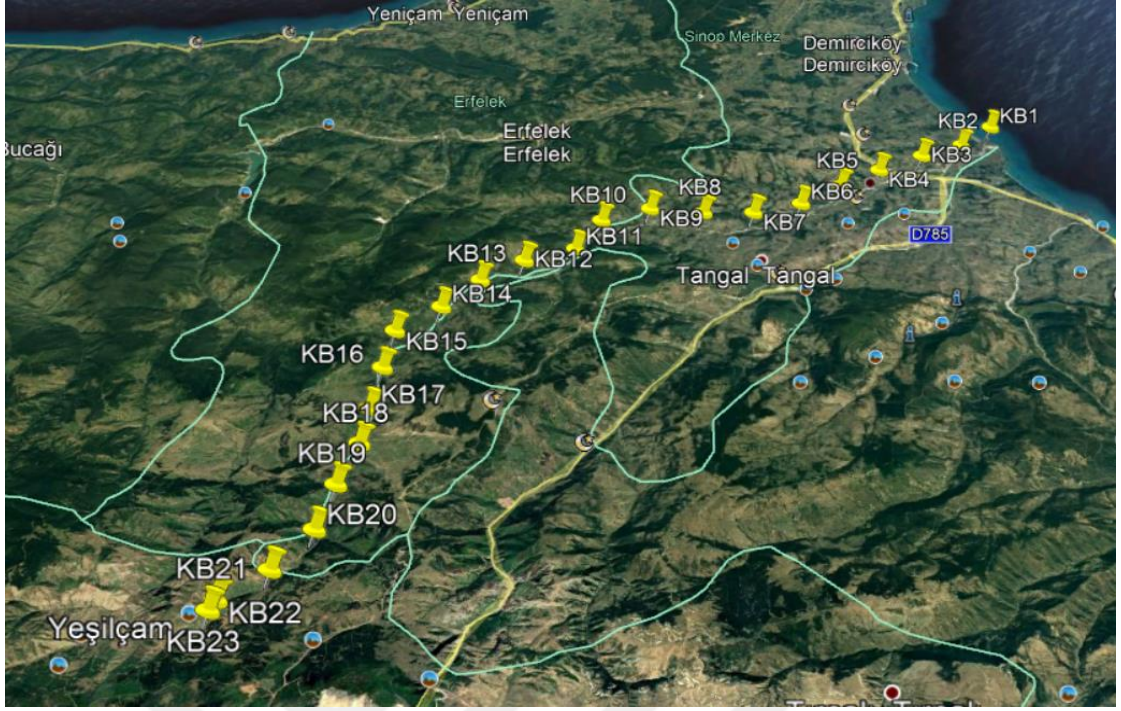


Şekil 31. Karasu nehri örneklem noktaları

Sediment ve su örneklerinin Sinop ili Kabalı nehrinden alındığı noktaların GPS koordinatları ve rakım değerleri Tablo 5’de, örneklem noktalarını gösteren harita ise Şekil 32’de verilmiştir.

Tablo 5. Sinop ili Kabalı nehrinden alınan örneklerin GPS koordinatları ve rakım değerleri

Örnek Kodu	GPS Koordinatları		Rakım (m)
	Enlem (K)	Boylam (D)	
KB-1	41.881494°	35.120319°	3
KB-2	41.869894°	35.104406°	29
KB-3	41.862972°	35.084869°	56
KB-4	41.854197°	35.064006°	85
KB-5	41.844800°	35.045336°	113
KB-6	41.834246°	35.026583°	140
KB-7	41.828914°	34.005203°	198
KB-8	41.828181°	34.982947°	233
KB-9	41.829961°	34.959403°	261
KB-10	41.822331°	34.938328°	312
KB-11	41.806694°	34.928061°	372
KB-12	41.800269°	34.906778°	466
KB-13	41.790308°	34.889383°	492
KB-14	41.776586°	34.875264°	565
KB-15	41.764786°	34.858569°	673
KB-16	41.747961°	34.856758°	725
KB-17	41.730361°	34.855100°	795
KB-18	41.716103°	34.854294°	861
KB-19	41.699958°	34.849100°	906
KB-20	41.683156°	34.845347°	974
KB-21	41.669258°	34.833331°	1124
KB-22	41.658869°	34.818011	1085
KB-23	41.655317°	34.816586°	1094



Şekil 32. Kabalı nehri için örneklem noktaları

3.2. Sediment Örneklerinde Aktivite Konsantrasyonları

3.2.1. Karasu Nehri Sediment Örnekleri

Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları Tablo 6’da temmuz ayında alınan sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları ise Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 6. Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/kg)			
	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
KR-1	3,50 ± 0,24	3,15 ± 0,34	2,50 ± 0,40	153,84 ± 6,03
KR-2	11,52 ± 0,70	8,01 ± 0,74	<MDA	217,39 ± 7,81
KR-3	13,14 ± 0,70	7,75 ± 0,88	<MDA	186,89 ± 6,68
KR-4	12,70 ± 0,71	6,70 ± 0,62	2,30 ± 0,52	237,49 ± 8,92
KR-5	11,74 ± 0,67	10,55 ± 0,99	13,94 ± 2,11	276,10, ± 9,65
KR-6	10,66 ± 0,80	10,51 ± 0,85	<MDA	226,42 ± 7,16
KR-7	8,65 ± 0,68	8,85 ± 0,81	<MDA	257,94 ± 8,73
KR-8	8,86 ± 0,60	11,55 ± 1,12	<MDA	298,29 ± 10,29
KR-9	8,68 ± 0,53	4,96 ± 0,36	<MDA	189,87 ± 7,16
KR-10	11,84 ± 0,77	8,40 ± 0,86	<MDA	278,87 ± 10,82
KR-11	14,46 ± 0,78	10,23 ± 1,09	1,95 ± 0,47	325,99 ± 10,73
KR-12	10,51 ± 0,60	8,85 ± 0,62	2,44 ± 0,45	273,88 ± 9,80
KR-13	11,25 ± 0,77	9,87 ± 0,81	<MDA	267,25 ± 10,85
KR-14	29,40 ± 1,21	19,10 ± 1,03	<MDA	495,02 ± 13,16
KR-15	12,58 ± 2,17	8,30 ± 2,00	<MDA	279,73 ± 12,65
KR-16	10,39 ± 0,70	7,41 ± 0,89	<MDA	207,75 ± 8,58
KR-17	15,32 ± 1,10	13,10 ± 0,99	<MDA	353,55 ± 13,67
KR-18	6,34 ± 0,34	7,48 ± 0,84	<MDA	204,63 ± 6,20
KR-19	13,18 ± 1,05	10,27 ± 1,31	15,17 ± 0,85	270,32 ± 6,20
KR-20	8,26 ± 0,52	7,08 ± 0,61	<MDA	168,13 ± 5,83
KR-21	22,01 ± 1,90	14,82 ± 1,60	3,38 ± 0,63	381,96 ± 17,14
KR-22	3,08 ± 0,22	3,61 ± 0,40	<MDA	131,96 ± 8,42
KR-23	16,95 ± 2,51	13,90 ± 1,79	2,88 ± 0,52	360,26 ± 15,01
KR-24	13,16 ± 1,06	12,56 ± 0,97	2,69 ± 0,53	334,054 ± 10,26
KR-25	12,01 ± 1,73	12,08 ± 1,43	<MDA	239,75 ± 18,99
KR-26	16,11 ± 1,14	13,59 ± 1,32	2,37 ± 0,51	282,39 ± 14,68
KR-27	10,89 ± 1,62	15,70 ± 1,19	<MDA	342,43 ± 13,24
KR-28	13,38 ± 1,08	12,06 ± 1,28	2,89 ± 0,59	367,85 ± 10,56
KR-29	15,31 ± 2,30	16,05 ± 2,17	6,42 ± 0,92	408,72 ± 18,01
KR-30	23,31 ± 1,44	15,28 ± 1,23	61,13 ± 1,27	394,50 ± 10,94
KR-31	9,35 ± 1,00	4,76 ± 1,17	<MDA	151,19 ± 8,22
KR-32	7,78 ± 0,77	5,09 ± 1,00	<MDA	204,61 ± 9,70
KR-33	6,71 ± 0,75	4,67 ± 0,96	<MDA	169,15 ± 8,87
KR-34	9,80 ± 0,93	3,81 ± 0,83	<MDA	177,66 ± 7,97
KR-35	19,49 ± 0,93	15,00 ± 1,54	<MDA	320,34 ± 13,72
KR-36	19,17 ± 1,17	14,38 ± 1,28	2,12 ± 0,33	358,74 ± 11,75

Tablo 7. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/kg)			
	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
KR-1	5,60 ± 0,84	4,13 ± 0,73	1,42 ± 0,37	103,77 ± 5,19
KR-2	7,66 ± 0,91	4,99 ± 0,80	<MDA	103,26 ± 6,68
KR-3	7,83 ± 0,82	5,05 ± 0,74	0,64 ± 0,29	113,45 ± 5,53
KR-4	5,49 ± 0,86	3,47 ± 0,79	<MDA	104,45 ± 4,95
KR-5	8,77 ± 0,79	5,22 ± 0,74	1,07 ± 0,31	79,25 ± 6,50
KR-6	3,32 ± 0,74	3,58 ± 0,78	<MDA	100,36 ± 9,35
KR-7	5,18 ± 0,87	4,07 ± 0,58	<MDA	109,43 ± 5,77
KR-8	6,79 ± 0,95	4,02 ± 1,04	<MDA	112,67 ± 5,74
KR-9	7,11 ± 0,77	4,51 ± 0,73	<MDA	102,92 ± 5,26
KR-10	6,89 ± 0,95	4,37 ± 0,90	<MDA	119,02 ± 6,09
KR-11	6,91 ± 0,75	3,78 ± 0,72	<MDA	109,26 ± 4,81
KR-12	6,12 ± 0,62	2,95 ± 0,63	<MDA	54,83 ± 5,02
KR-13	5,76 ± 0,90	3,36 ± 0,87	<MDA	103,69 ± 5,34
KR-14	5,45 ± 0,69	3,14 ± 0,68	<MDA	98,79 ± 4,94
KR-15	6,48 ± 0,79	4,65 ± 0,71	<MDA	86,01 ± 6,17
KR-16	6,67 ± 0,67	3,76 ± 0,65	<MDA	87,20 ± 4,41
KR-17	8,18 ± 0,95	5,91 ± 0,88	<MDA	151,86 ± 5,09
KR-18	6,99 ± 0,66	4,19 ± 0,62	0,77 ± 0,26	85,85 ± 4,47
KR-19	7,92 ± 0,93	3,91 ± 0,91	<MDA	106,95 ± 6,01
KR-20	6,64 ± 0,67	4,48 ± 0,61	<MDA	74,49 ± 3,17
KR-21	4,78 ± 0,93	3,11 ± 0,88	<MDA	90,01 ± 5,85
KR-22	5,94 ± 0,73	4,35 ± 0,64	<MDA	89,48 ± 3,74
KR-23	11,05 ± 0,98	7,38 ± 0,93	<MDA	160,68 ± 5,55
KR-24	8,04 ± 0,71	3,68 ± 0,68	8,24 ± 0,36	91,26 ± 4,37
KR-25	7,74 ± 1,03	6,74 ± 0,84	0,47 ± 0,31	106,42 ± 7,78
KR-26	9,52 ± 0,71	3,17 ± 0,81	1,25 ± 0,18	134,02 ± 4,67
KR-27	9,76 ± 0,99	5,87 ± 1,00	1,28 ± 0,26	148,23 ± 8,08
KR-28	7,18 ± 0,78	5,86 ± 0,72	0,45 ± 0,20	133,64 ± 4,16
KR-29	8,12 ± 0,94	4,16 ± 0,97	0,35 ± 0,26	124,21 ± 5,15
KR-30	10,39 ± 0,78	7,01 ± 0,72	2,25 ± 0,22	147,02 ± 4,70
KR-31	13,20 ± 1,01	4,02 ± 1,16	1,68 ± 0,36	196,61 ± 6,27
KR-32	9,18 ± 0,77	6,51 ± 0,70	0,74 ± 0,21	134,06 ± 5,20
KR-33	7,39 ± 1,02	4,99 ± 0,93	<MDA	112,35 ± 5,62
KR-34	8,23 ± 0,86	5,48 ± 0,83	<MDA	110,76 ± 4,94
KR-35	9,00 ± 1,06	6,15 ± 1,00	<MDA	143,96 ± 6,08
KR-36	8,63 ± 0,92	5,06 ± 0,88	0,89 ± 0,25	112,13 ± 5,21

3.2.2. Kabalı Nehri Sediment Örnekleri

Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları Tablo 8’de, temmuz ayında alınan sediment örneklerinin aktivite konsantrasyonları ise Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 8. Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/kg)			
	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
KB-1	7,94 ± 0,64	4,52 ± 0,55	5,75 ± 0,44	254,53 ± 11,74
KB-2	10,71 ± 0,56	11,54 ± 1,03	<MDA	286,52 ± 8,76
KB-3	13,25 ± 1,43	6,08 ± 0,72	<MDA	245,73 ± 12,44
KB-4	9,94 ± 0,69	10,76 ± 0,98	1,79 ± 0,30	308,72 ± 9,77
KB-5	17,39 ± 1,08	17,73 ± 1,34	1,31 ± 0,27	435,25 ± 15,25
KB-6	9,81 ± 0,68	8,20 ± 0,71	<MDA	217,09 ± 8,07
KB-7	7,08 ± 0,53	8,15 ± 0,80	<MDA	230,78 ± 10,58
KB-8	11,48 ± 0,75	16,51 ± 1,40	3,42 ± 0,57	438,18 ± 13,33
KB-9	8,52 ± 0,73	7,95 ± 1,04	<MDA	198,89 ± 9,62
KB-10	5,79 ± 0,63	6,11 ± 0,57	<MDA	141,66 ± 7,53
KB-11	11,58 ± 0,89	10,71 ± 0,98	<MDA	296,84 ± 11,18
KB-12	12,47 ± 0,67	10,78 ± 0,78	2,24 ± 0,47	287,84 ± 8,78
KB-13	16,26 ± 1,44	12,33 ± 1,06	<MDA	362,05 ± 12,83
KB-14	14,56 ± 0,81	11,63 ± 0,75	<MDA	307,79 ± 9,05
KB-15	16,77 ± 1,14	16,88 ± 1,79	2,11 ± 0,39	391,96 ± 12,19
KB-16	16,84 ± 0,78	14,21 ± 1,04	2,88 ± 0,47	446,77 ± 11,47
KB-17	19,96 ± 0,98	19,55 ± 1,54	7,23 ± 0,65	433,46 ± 10,95
KB-18	19,87 ± 0,87	16,06 ± 1,20	3,61 ± 0,54	406,07 ± 10,80
KB-19	15,24 ± 0,77	13,06 ± 0,82	1,92 ± 0,45	358,76 ± 9,28
KB-20	19,65 ± 0,98	18,94 ± 1,35	6,35 ± 0,55	387,56 ± 10,60
KB-21	18,41 ± 1,05	17,61 ± 1,41	3,4+ ± 0,48	379,20 ± 10,10
KB-22	10,35 ± 0,56	8,02 ± 0,56	<MDA	205,46 ± 5,92
KB-23	23,65 ± 1,73	15,88 ± 1,09	5,60 ± 0,62	442,34 ± 17,58

Tablo 9. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/kg)			
	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
KB-1	15,75 ± 1,41	12,82 ± 1,44	2,77 ± 0,48	239,82 ± 12,15
KB-2	11,91 ± 0,86	7,81 ± 0,81	<MDA	199,15 ± 10,04
KB-3	19,09 ± 1,15	10,67 ± 1,19	<MDA	196,11 ± 10,92
KB-4	13,04 ± 1,26	8,86 ± 1,22	1,61 ± 0,36	236,58 ± 12,02
KB-5	6,43 ± 0,63	3,35 ± 0,85	1,22 ± 0,44	184,75 ± 9,45
KB-6	14,56 ± 0,82	7,24 ± 0,80	<MDA	192,67 ± 7,67
KB-7	10,86 ± 0,76	8,07 ± 0,74	<MDA	190,38 ± 6,97
KB-8	12,44 ± 1,03	8,32 ± 1,03	0,97 ± 0,33	228,84 ± 8,94
KB-9	14,44 ± 1,02	5,95 ± 1,15	2,24 ± 0,33	190,82 ± 10,10
KB-10	15,70 ± 0,97	7,92 ± 0,90	1,02 ± 0,34	228,82 ± 8,15
KB-11	15,89 ± 1,09	8,91 ± 1,04	<MDA	262,01 ± 8,72
KB-12	14,43 ± 0,87	7,89 ± 0,87	<MDA	231,20 ± 9,58
KB-13	14,98 ± 1,22	6,20 ± 1,51	<MDA	251,98 ± 10,22
KB-14	17,98 ± 1,91	13,33 ± 1,68	<MDA	237,67 ± 10,28
KB-15	18,35 ± 1,24	11,42 ± 1,38	2,90 ± 0,43	335,57 ± 11,33
KB-16	12,61 ± 1,04	10,77 ± 0,88	1,82 ± 0,35	369,17 ± 10,06
KB-17	24,83 ± 1,48	11,27 ± 1,84	4,42 ± 0,60	339,46 ± 14,78
KB-18	19,61 ± 1,14	11,18 ± 0,98	2,87 ± 0,47	357,99 ± 9,98
KB-19	17,38 ± 1,28	11,63 ± 1,16	2,33 ± 0,42	270,53 ± 10,77
KB-20	15,86 ± 1,19	11,42 ± 0,98	2,51 ± 0,35	272,03 ± 10,19
KB-21	17,17 ± 1,38	12,38 ± 1,30	1,97 ± 0,46	278,16 ± 10,91
KB-22	15,60 ± 1,13	12,37 ± 1,18	2,25 ± 0,47	294,21 ± 9,84
KB-23	18,70 ± 1,39	12,12 ± 1,48	2,26 ± 0,43	290,52 ± 12,07

3.3. Nehir Suyu Örneklerinin Aktivite Konsantrasyonları

3.3.1. Karasu Nehri Su Örnekleri

Karasu nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları Tablo 10’da temmuz ayında alınan su örneklerindeki aktivite konsantrasyonları ise Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 10. Karasu nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/L)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
KR-1	1,68 ± 0,44	2,52 ± 0,84	17,42 ± 2,88
KR-2	1,90 ± 0,66	1,54 ± 0,34	14,30 ± 2,96
KR-3	2,61 ± 0,69	1,49 ± 0,36	14,82 ± 2,84
KR-4	1,85 ± 0,71	0,91 ± 0,32	14,82 ± 1,28
KR-5	0,87 ± 0,52	1,84 ± 0,66	9,80 ± 1,56
KR-6	0,41 ± 0,22	0,47 ± 0,25	12,56 ± 1,71
KR-7	1,91 ± 0,92	2,40 ± 0,42	13,92 ± 2,48
KR-8	3,21 ± 0,73	0,42 ± 0,31	16,09 ± 2,45
KR-9	2,13 ± 0,81	1,64 ± 0,42	12,03 ± 1,70
KR-10	1,84 ± 0,57	0,46 ± 0,28	19,89 ± 2,84
KR-11	2,19 ± 0,72	2,34 ± 0,61	23,68 ± 2,91
KR-12	1,41 ± 0,57	0,63 ± 0,36	17,86 ± 2,50
KR-13	1,60 ± 0,77	1,34 ± 0,52	21,73 ± 4,07
KR-14	1,62 ± 0,60	1,97 ± 0,47	20,58 ± 2,45
KR-15	1,06 ± 0,64	1,49 ± 0,60	15,13 ± 4,35
KR-16	4,37 ± 0,56	1,69 ± 0,49	15,11 ± 2,81
KR-17	0,92 ± 0,53	1,97 ± 0,63	10,19 ± 4,26
KR-18	1,82 ± 0,56	0,82 ± 0,54	16,10 ± 2,39
KR-19	1,42 ± 0,51	1,31 ± 0,57	11,79 ± 3,63
KR-20	1,57 ± 0,57	0,54 ± 0,32	15,09 ± 3,08
KR-21	0,98 ± 0,49	0,80 ± 0,48	15,02 ± 3,33
KR-22	1,18 ± 0,83	0,65 ± 0,31	24,05 ± 3,19
KR-23	1,49 ± 0,57	1,16 ± 0,54	15,54 ± 2,83
KR-24	1,16 ± 0,46	1,83 ± 0,66	15,56 ± 3,79
KR-25	1,92 ± 0,57	4,36 ± 1,21	16,69 ± 2,48
KR-26	0,97 ± 0,44	2,37 ± 0,58	24,37 ± 3,32
KR-27	1,78 ± 0,59	1,45 ± 0,55	17,77 ± 3,19
KR-28	1,92 ± 0,71	0,39 ± 0,23	12,03 ± 3,89
KR-29	1,81 ± 0,56	1,34 ± 0,55	10,33 ± 3,48
KR-30	1,91 ± 0,74	1,64 ± 0,69	14,17 ± 4,05
KR-31	1,88 ± 0,56	0,41 ± 0,22	19,29 ± 2,92
KR-32	1,65 ± 0,79	0,63 ± 0,34	14,97 ± 4,53
KR-33	1,30 ± 0,59	0,95 ± 0,54	19,49 ± 2,63
KR-34	1,39 ± 0,72	1,00 ± 0,59	17,58 ± 3,30
KR-35	0,77 ± 0,39	0,82 ± 0,55	19,75 ± 3,41
KR-36	1,57 ± 0,72	2,18 ± 0,66	13,34 ± 4,32

Tablo 11. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/L)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
KR-1	1,87 ± 0,65	1,00 ± 0,57	19,26 ± 3,00
KR-2	2,35 ± 0,58	1,02 ± 0,54	18,18 ± 2,38
KR-3	3,00 ± 0,69	1,37 ± 0,54	21,21 ± 2,87
KR-4	1,55 ± 0,51	1,46 ± 0,59	12,77 ± 2,40
KR-5	2,08 ± 0,57	0,98 ± 0,55	16,94 ± 3,04
KR-6	1,81 ± 0,51	1,57 ± 0,44	15,49 ± 2,50
KR-7	1,81 ± 0,57	1,63 ± 0,50	16,91 ± 2,86
KR-8	1,34 ± 0,64	2,01 ± 0,49	17,53 ± 2,66
KR-9	3,07 ± 0,59	1,32 ± 0,47	10,12 ± 3,45
KR-10	2,61 ± 0,60	1,14 ± 0,54	19,49 ± 2,99
KR-11	2,64 ± 0,62	0,51 ± 0,57	18,52 ± 2,69
KR-12	2,28 ± 0,55	1,60 ± 0,51	16,20 ± 2,52
KR-13	2,82 ± 0,61	1,68 ± 0,52	19,63 ± 2,76
KR-14	1,95 ± 0,61	0,80 ± 0,54	20,78 ± 2,91
KR-15	2,51 ± 0,55	1,10 ± 0,54	17,76 ± 2,46
KR-16	2,83 ± 0,46	1,28 ± 0,54	15,94 ± 2,69
KR-17	2,04 ± 0,59	1,63 ± 0,47	10,39 ± 3,16
KR-18	1,63 ± 0,59	1,71 ± 0,46	13,35 ± 2,71
KR-19	2,46 ± 0,59	0,63 ± 0,53	18,26 ± 2,73
KR-20	2,69 ± 0,56	1,35 ± 0,48	19,04 ± 2,54
KR-21	2,74 ± 0,64	1,53 ± 0,52	20,12 ± 2,55
KR-22	3,01 ± 0,55	1,19 ± 0,53	19,32 ± 2,45
KR-23	2,18 ± 0,57	1,64 ± 0,51	16,80 ± 3,02
KR-24	2,48 ± 0,59	0,75 ± 0,58	16,39 ± 2,87
KR-25	3,71 ± 0,59	1,40 ± 0,55	16,85 ± 2,96
KR-26	2,77 ± 0,61	0,89 ± 0,54	19,02 ± 2,61
KR-27	2,57 ± 0,64	1,97 ± 0,49	20,84 ± 2,67
KR-28	1,95 ± 0,59	1,85 ± 0,53	15,32 ± 2,95
KR-29	2,13 ± 0,60	1,05 ± 0,51	17,96 ± 2,87
KR-30	2,91 ± 0,58	0,72 ± 0,57	12,85 ± 3,16
KR-31	3,09 ± 0,56	1,46 ± 0,50	22,44 ± 2,15
KR-32	3,39 ± 0,64	1,29 ± 0,49	18,11 ± 2,47
KR-33	3,11 ± 0,60	2,13 ± 0,48	20,97 ± 2,47
KR-34	1,89 ± 0,56	0,81 ± 0,50	8,85 ± 2,95
KR-35	2,13 ± 0,68	1,16 ± 0,59	17,91 ± 3,30
KR-36	2,63 ± 0,55	1,06 ± 0,53	17,03 ± 2,80

3.3.2. Kabalı Nehri Su Örnekleri

Kabalı nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları Tablo 11’de, temmuz ayında alınan su örneklerindeki aktivite konsantrasyonları ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Kabalı nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/L)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
KB-1	0,95 ± 0,48	1,88 ± 0,47	14,14 ± 2,83
KB-2	1,03 ± 0,66	1,37 ± 0,68	8,59 ± 2,51
KB-3	1,62 ± 0,58	1,60 ± 0,49	11,18 ± 2,91
KB-4	4,41 ± 1,66	3,25 ± 1,46	59,86 ± 4,53
KB-5	2,26 ± 0,56	2,02 ± 0,48	16,96 ± 2,90
KB-6	1,21 ± 0,67	1,24 ± 0,68	19,10 ± 3,24
KB-7	1,02 ± 0,45	1,63 ± 0,49	20,33 ± 2,31
KB-8	1,03 ± 0,55	1,19 ± 0,67	9,46 ± 1,96
KB-9	1,42 ± 0,58	1,82 ± 0,50	19,61 ± 2,48
KB-10	0,73 ± 0,34	1,98 ± 0,51	12,12 ± 2,32
KB-11	1,38 ± 0,47	0,45 ± 0,28	17,51 ± 2,63
KB-12	1,52 ± 0,59	1,96 ± 0,65	12,68 ± 2,54
KB-13	2,53 ± 0,63	0,44 ± 0,29	18,72 ± 2,88
KB-14	1,65 ± 0,57	0,81 ± 0,38	18,71 ± 2,98
KB-15	1,55 ± 0,55	0,76 ± 0,32	17,65 ± 2,83
KB-16	4,83 ± 0,80	0,75 ± 0,37	14,60 ± 2,46
KB-17	1,54 ± 0,55	1,24 ± 0,53	22,40 ± 2,29
KB-18	1,67 ± 0,58	0,79 ± 0,36	12,52 ± 2,37
KB-19	1,94 ± 0,59	0,71 ± 0,30	12,87 ± 2,43
KB-20	1,95 ± 0,56	0,75 ± 0,35	18,94 ± 2,68
KB-21	1,66 ± 0,56	1,27 ± 0,61	17,60 ± 2,74
KB-22	1,84 ± 0,61	1,78 ± 0,42	20,36 ± 2,88
KB-23	1,32 ± 0,58	0,73 ± 0,35	16,96 ± 2,95

Tablo 13. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinde aktivite konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aktivite Konsantrasyonu (Bq/L)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
KB-1	2,22 ± 0,54	1,79 ± 0,46	14,12 ± 2,44
KB-2	2,76 ± 0,63	1,91 ± 0,51	17,66 ± 2,72
KB-3	2,67 ± 0,57	1,74 ± 0,50	18,54 ± 2,49
KB-4	3,31 ± 0,91	1,10 ± 0,47	16,23 ± 2,67
KB-5	1,92 ± 0,62	1,28 ± 0,54	22,82 ± 2,12
KB-6	2,20 ± 0,57	1,26 ± 0,52	19,02 ± 2,43
KB-7	2,64 ± 0,57	1,63 ± 0,45	18,33 ± 1,99
KB-8	2,81 ± 0,60	0,78 ± 0,54	12,76 ± 3,16
KB-9	2,77 ± 0,56	0,73 ± 0,52	18,35 ± 2,27
KB-10	1,93 ± 0,58	0,75 ± 0,54	14,42 ± 3,20
KB-11	1,48 ± 0,60	1,08 ± 0,55	17,99 ± 2,85
KB-12	2,24 ± 0,66	1,05 ± 0,57	13,73 ± 2,77
KB-13	3,07 ± 0,51	1,10 ± 0,48	16,21 ± 2,30
KB-14	2,27 ± 0,50	1,58 ± 0,46	11,51 ± 2,94
KB-15	1,89 ± 0,62	1,32 ± 0,55	16,03 ± 3,32
KB-16	2,09 ± 0,51	1,15 ± 0,54	19,89 ± 2,35
KB-17	2,45 ± 0,63	1,32 ± 0,57	11,89 ± 3,20
KB-18	2,61 ± 0,61	1,24 ± 0,53	15,47 ± 3,14
KB-19	2,50 ± 0,49	0,83 ± 0,41	17,14 ± 2,49
KB-20	2,26 ± 0,61	1,42 ± 0,54	15,13 ± 3,00
KB-21	2,48 ± 0,48	1,58 ± 0,43	16,95 ± 2,41
KB-22	2,36 ± 0,42	1,21 ± 0,38	13,81 ± 2,21
KB-23	1,48 ± 0,37	1,49 ± 0,50	10,67 ± 2,90

3.4. Radyolojik Tehlike Parametreleri

3.4.1. Karasu Nehri Sediment Örnekleri

Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri Tablo 14’de, temmuz ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri ise Tablo 15’de verilmektedir.

Tablo 14. Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri

Örnek Kodu	Ra _{eq} (Bq/kg)	I _g	H _{ex}	D (nGy/h)	AEDE (μSv/y)
KR-1	18,77	0,08	0,05	9,99	12,25
KR-2	38,19	0,30	0,11	19,57	24,00
KR-3	37,30	0,29	0,10	18,78	23,03
KR-4	38,91	0,31	0,11	20,07	24,61
KR-5	46,15	0,37	0,13	23,87	29,27
KR-6	41,54	0,33	0,12	21,25	26,06
KR-7	38,93	0,32	0,11	20,45	25,07
KR-8	46,26	0,37	0,13	24,26	29,75
KR-9	29,06	0,23	0,08	15,15	18,59
KR-10	43,37	0,35	0,12	22,61	27,73
KR-11	51,91	0,42	0,15	26,96	33,07
KR-12	42,34	0,34	0,12	22,12	27,13
KR-13	44,07	0,35	0,12	22,83	28,00
KR-14	91,36	0,72	0,26	46,48	57,01
KR-15	44,03	0,35	0,12	22,89	28,08
KR-16	35,53	0,28	0,10	18,28	22,41
KR-17	58,80	0,47	0,17	30,42	37,30
KR-18	31,36	0,25	0,09	16,46	20,18
KR-19	46,79	0,37	0,13	24,05	29,50
KR-20	30,15	0,24	0,08	15,44	18,94
KR-21	72,61	0,55	0,20	35,63	43,70
KR-22	18,40	0,14	0,05	9,38	11,50
KR-23	64,57	0,49	0,17	31,93	39,16
KR-24	56,88	0,44	0,15	28,32	34,73
KR-25	47,75	0,36	0,13	23,43	28,74
KR-26	57,29	0,43	0,15	28,02	34,36
KR-27	59,71	0,46	0,16	29,77	36,51
KR-28	58,95	0,46	0,16	29,51	36,20
KR-29	69,73	0,54	0,19	34,74	42,60
KR-30	75,54	0,57	0,20	37,03	45,42
KR-31	27,80	0,21	0,08	13,64	16,73
KR-32	30,81	0,24	0,08	15,49	19,00
KR-33	26,41	0,20	0,07	13,23	16,23
KR-34	28,93	0,22	0,08	14,35	17,59
KR-35	65,61	0,49	0,18	32,03	39,28
KR-36	67,36	0,51	0,18	33,13	40,63

Tablo 15. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri

Örnek Kodu	R _{aeq} (Bq/kg)	I _g	H _{ex}	D (nGy/h)	AEDE (μSv/y)
KR-1	18,77	0,07	0,05	9,48	11,63
KR-2	22,02	0,17	0,06	11,01	13,51
KR-3	22,99	0,18	0,06	11,56	14,18
KR-4	17,76	0,14	0,05	9,13	11,20
KR-5	21,78	0,16	0,06	10,61	13,01
KR-6	15,46	0,12	0,04	8,10	9,94
KR-7	18,66	0,15	0,05	9,61	11,79
KR-8	20,43	0,16	0,06	10,41	12,76
KR-9	20,76	0,16	0,06	10,45	12,81
KR-10	21,47	0,17	0,06	10,95	13,43
KR-11	19,96	0,16	0,06	10,15	12,45
KR-12	14,18	0,11	0,04	6,92	8,49
KR-13	17,82	0,14	0,05	9,14	11,21
KR-14	16,86	0,13	0,05	8,65	10,61
KR-15	19,15	0,15	0,05	9,54	11,70
KR-16	18,15	0,14	0,05	9,09	11,14
KR-17	27,26	0,21	0,08	13,94	17,09
KR-18	18,99	0,15	0,05	9,45	11,59
KR-19	21,00	0,16	0,06	10,57	12,96
KR-20	18,26	0,14	0,05	9,00	11,04
KR-21	16,16	0,12	0,04	7,97	9,77
KR-22	19,05	0,14	0,05	9,26	11,36
KR-23	33,98	0,25	0,09	16,51	20,25
KR-24	20,33	0,15	0,05	9,79	12,01
KR-25	25,57	0,19	0,07	12,34	15,14
KR-26	24,37	0,18	0,07	11,93	14,63
KR-27	29,57	0,22	0,08	14,43	17,69
KR-28	25,85	0,20	0,07	12,69	15,57
KR-29	23,63	0,18	0,06	11,56	14,18
KR-30	31,73	0,24	0,09	15,40	18,89
KR-31	34,09	0,26	0,09	16,75	20,54
KR-32	28,81	0,22	0,08	13,99	17,16
KR-33	23,18	0,17	0,06	11,29	13,85
KR-34	24,59	0,18	0,07	11,90	14,60
KR-35	28,88	0,22	0,08	14,10	17,30
KR-36	24,50	0,18	0,07	11,86	14,54

3.4.2. Kabalı Nehri Sediment Örnekleri

Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri Tablo 16’da temmuz ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri ise Tablo 17’de verilmektedir.

Tablo 16. Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri

Örnek Kodu	R _{aeq} (Bq/kg)	I _g	H _{ex}	D (nGy/h)	AEDE (μSv/y)
KB-1	32,22	0,13	0,09	17,09	20,96
KB-2	47,27	0,38	0,13	24,53	30,09
KB-3	39,15	0,31	0,11	20,25	24,83
KB-4	46,94	0,38	0,13	24,64	30,22
KB-5	73,21	0,58	0,21	37,88	46,45
KB-6	36,73	0,29	0,10	18,95	23,24
KB-7	34,89	0,28	0,10	18,34	22,49
KB-8	65,76	0,53	0,19	34,67	42,52
KB-9	33,81	0,27	0,10	17,45	21,40
KB-10	24,44	0,19	0,07	12,61	15,46
KB-11	47,67	0,38	0,13	24,80	30,41
KB-12	48,03	0,38	0,14	24,84	30,46
KB-13	59,24	0,47	0,17	30,67	37,62
KB-14	52,74	0,42	0,15	27,15	33,30
KB-15	68,35	0,54	0,19	35,19	43,16
KB-16	68,43	0,55	0,19	35,81	43,92
KB-17	78,26	0,62	0,22	40,10	49,18
KB-18	71,26	0,56	0,20	36,58	44,86
KB-19	59,03	0,47	0,17	30,58	37,50
KB-20	73,86	0,58	0,21	37,59	46,11
KB-21	72,79	0,55	0,20	35,82	43,94
KB-22	37,64	0,29	0,10	18,56	22,77
KB-23	82,42	0,62	0,22	40,49	49,65

Tablo 17. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örnekleri için hesaplanan radyolojik tehlike parametreleri

Örnek Kodu	Ra _{eq} (Bq/kg)	I _g	H _{ex}	D (nGy/h)	AEDE (µSv/y)
KB-1	50,87	0,20	0,14	25,24	30,95
KB-2	37,02	0,29	0,10	18,82	23,08
KB-3	48,08	0,36	0,13	23,65	29,00
KB-4	42,27	0,33	0,12	21,61	26,50
KB-5	24,15	0,20	0,07	12,91	15,83
KB-6	38,43	0,30	0,11	19,31	23,68
KB-7	35,73	0,28	0,10	18,17	22,28
KB-8	40,36	0,32	0,11	20,66	25,34
KB-9	36,31	0,28	0,10	18,31	22,46
KB-10	43,04	0,34	0,12	21,79	26,72
KB-11	46,97	0,37	0,13	23,95	29,37
KB-12	41,90	0,33	0,12	21,33	26,15
KB-13	41,48	0,33	0,12	21,34	26,17
KB-14	53,68	0,41	0,15	26,72	32,77
KB-15	58,17	0,46	0,16	29,83	36,58
KB-16	53,85	0,44	0,15	28,39	34,82
KB-17	64,71	0,50	0,18	32,66	40,05
KB-18	60,66	0,48	0,17	31,17	38,22
KB-19	52,95	0,41	0,15	26,75	32,81
KB-20	51,23	0,40	0,14	26,03	31,92
KB-21	56,29	0,42	0,15	27,49	33,71
KB-22	55,94	0,42	0,15	27,50	33,73
KB-23	58,40	0,44	0,16	28,50	34,95

3.5. Tritiyum Hesaplamaları

Tritiyum konsantrasyonlarının belirlenmesi için örnekler ve standartların LSC cihazında ölçümü sonrası alınan analiz sonuçlarına ilk olarak Chauvenet kriteri uygulandı. Chauvenet kriteri, ölçüm sonucunda elde edilen deneysel verilerden şüpheli olanların elimine edilmesi amacıyla kullanılır ve bu amaçla Chauvenet kriteri tablosundan yapılan ölçüm sayısı için kabul edilebilir maksimum sapmaların standart sapmalara oranlarına bakılır (10 tekrarlı ölçüm için bu değer 1,96'dır). Ölçülen değer Chauvenet kriterinden büyükse o ölçüm elimine edilerek yeniden ortalama ve standart sapma değeri hesaplanır. Daha sonra Chauvenet kriteri uygulanmış DWS, RWS ve background

standartlarının ortalama cpm (count per minute) değerleri (DWS için 2377,67 cpm, RWS için 28,40 cpm ve BKG için 2,44 cpm) kullanılarak verim değeri %26, geri kazanım düzeltme faktörü 1,09 ve MDA değeri ise 1,48 Bq/L olarak hesaplandı. Bu değerler kullanılarak her bir örnek için trityum aktivite konsantrasyonları hesaplandı.

3.5.1. Karasu Nehri

Karasu nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan nehir suyu örneklerinde belirlenen trityum konsantrasyonları Tablo 18’de verilmiştir.



Tablo 18. Karasu nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan nehir suyu örneklerinde trityum konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aralık Ayı Trityum Konsantrasyonu		Temmuz Ayı Trityum Konsantrasyonu	
	Bq/L	TU	Bq/L	TU
KR-1	3,16 ± 0,35	26,76 ± 2,98	<MDA	<MDA
KR-2	2,08 ± 0,36	17,64 ± 3,07	<MDA	<MDA
KR-3	3,01 ± 0,69	25,53 ± 5,87	<MDA	<MDA
KR-4	3,52 ± 0,44	29,81 ± 3,73	2,16 ± 0,66	18,31 ± 5,61
KR-5	3,50 ± 0,46	29,66 ± 3,91	<MDA	<MDA
KR-6	3,17 ± 0,48	26,87 ± 4,04	<MDA	<MDA
KR-7	2,83 ± 0,41	23,98 ± 3,50	<MDA	<MDA
KR-8	3,36 ± 0,46	28,44 ± 3,93	<MDA	<MDA
KR-9	3,65 ± 0,51	30,90 ± 4,36	<MDA	<MDA
KR-10	3,05 ± 0,63	25,88 ± 5,34	<MDA	<MDA
KR-11	2,72 ± 0,67	23,05 ± 5,68	<MDA	<MDA
KR-12	2,61 ± 0,52	22,13 ± 4,45	<MDA	<MDA
KR-13	3,59 ± 0,50	30,40 ± 4,26	<MDA	<MDA
KR-14	3,09 ± 0,36	26,15 ± 3,04	<MDA	<MDA
KR-15	3,72 ± 0,58	31,56 ± 4,94	<MDA	<MDA
KR-16	1,91 ± 0,54	16,20 ± 4,61	<MDA	<MDA
KR-17	3,30 ± 0,69	27,95 ± 5,88	<MDA	<MDA
KR-18	2,73 ± 0,54	23,11 ± 4,55	<MDA	<MDA
KR-19	2,92 ± 0,57	24,74 ± 4,80	1,63 ± 0,57	13,81 ± 4,83
KR-20	2,58 ± 0,50	21,86 ± 4,27	<MDA	<MDA
KR-21	2,82 ± 0,53	23,92 ± 4,48	<MDA	<MDA
KR-22	2,89 ± 0,48	24,47 ± 4,08	<MDA	<MDA
KR-23	2,35 ± 0,35	19,90 ± 2,98	<MDA	<MDA
KR-24	3,48 ± 0,66	29,53 ± 5,61	<MDA	<MDA
KR-25	2,30 ± 0,56	19,47 ± 4,76	1,76 ± 0,46	14,95 ± 3,90
KR-26	2,37 ± 0,41	20,12 ± 3,45	1,82 ± 0,50	15,39 ± 4,24
KR-27	3,45 ± 0,62	29,25 ± 5,22	1,84 ± 0,38	15,59 ± 3,19
KR-28	2,05 ± 0,43	17,40 ± 3,65	1,55 ± 0,43	13,10 ± 3,63
KR-29	2,28 ± 0,51	19,30 ± 4,35	<MDA	<MDA
KR-30	2,66 ± 0,62	22,57 ± 5,24	<MDA	<MDA
KR-31	2,75 ± 0,57	23,33 ± 4,86	<MDA	<MDA
KR-32	1,60 ± 0,51	13,54 ± 4,31	<MDA	<MDA
KR-33	1,98 ± 0,60	16,75 ± 5,06	<MDA	<MDA
KR-34	1,64 ± 0,47	13,92 ± 4,00	1,51 ± 0,60	12,83 ± 5,13
KR-35	2,54 ± 0,56	21,53 ± 4,74	<MDA	<MDA
KR-36	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA

3.5.2. Kabalı Nehri

Kabalı nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan nehir suyu örneklerinde belirlenen trityum konsantrasyonları Tablo 19’da verilmiştir.

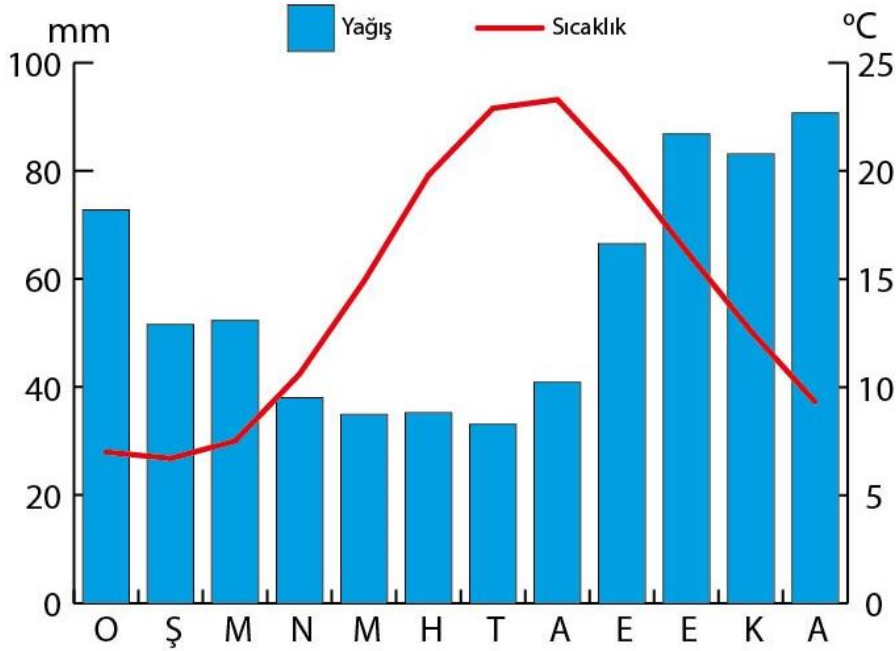
Tablo 19. Kabalı nehrinden aralık ve temmuz aylarında alınan nehir suyu örneklerinde trityum konsantrasyonları

Örnek Kodu	Aralık Ayı Trityum Konsantrasyonu		Temmuz Ayı Trityum Konsantrasyonu	
	(Bq/L)	(TU)	(Bq/L)	(TU)
KB-1	1,92 ± 0,44	16,27 ± 3,74	1,50 ± 0,35	12,69 ± 2,94
KB-2	1,97 ± 0,34	16,67 ± 2,90	<MDA	<MDA
KB-3	3,31 ± 0,37	28,05 ± 3,18	<MDA	<MDA
KB-4	2,20 ± 0,64	18,61 ± 5,39	<MDA	<MDA
KB-5	2,16 ± 0,53	18,31 ± 4,53	<MDA	<MDA
KB-6	2,00 ± 0,45	16,92 ± 3,81	<MDA	<MDA
KB-7	1,66 ± 0,48	14,03 ± 4,09	<MDA	<MDA
KB-8	2,85 ± 0,62	24,14 ± 5,25	1,74 ± 0,53	14,74 ± 4,51
KB-9	2,11 ± 0,33	17,91 ± 2,77	2,10 ± 0,46	17,81 ± 3,89
KB-10	2,57 ± 0,37	21,80 ± 3,10	<MDA	<MDA
KB-11	2,19 ± 0,58	18,60 ± 4,88	<MDA	<MDA
KB-12	2,42 ± 0,60	20,50 ± 5,06	2,34 ± 0,51	19,79 ± 4,29
KB-13	1,78 ± 0,57	15,12 ± 4,87	<MDA	<MDA
KB-14	2,19 ± 0,56	18,60 ± 4,77	<MDA	<MDA
KB-15	2,88 ± 0,42	24,41 ± 3,54	<MDA	<MDA
KB-16	3,44 ± 0,45	29,11 ± 3,78	<MDA	<MDA
KB-17	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA
KB-18	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA
KB-19	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA
KB-20	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA
KB-21	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA
KB-22	2,30 ± 0,40	19,52 ± 3,38	<MDA	<MDA
KB-23	2,74 ± 0,53	23,22 ± 4,47	<MDA	<MDA

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

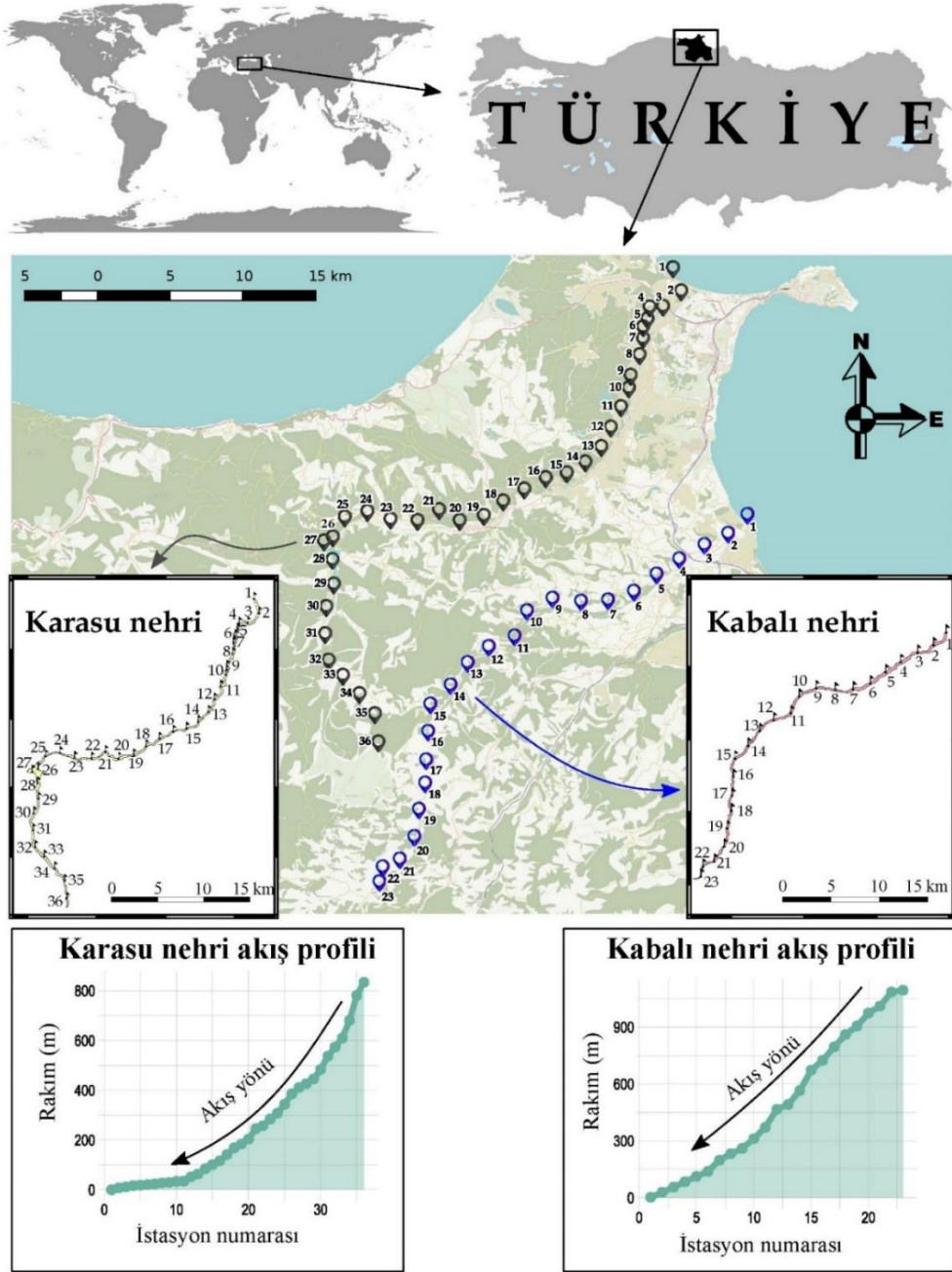
Bu çalışma ile belirlenen Sinop bölgesinin Karasu ve Kabalı nehirlerine ait başlangıç radyoaktivite referans değerleri, bölgede herhangi bir nükleer sızıntı veya nükleer kaza sonucu çevreye yayılacak doz değerlerinin “normale” kıyasla ne kadar fazla olduğunun tespiti açısından önemli verilerdir. Örneğin, Çernobil faciası öncesi bu tür bir çevresel örnekler için bazal değer olmuş olsa idi, Çernobil faciasının o bölgeyi ne kadar etkilediği niceliksel olarak ölçülebilirdi. Çalışma bu açıdan özgün bir değere sahip olmakla birlikte benzer çalışmalara referans olabilecek özelliktedir.

Sinop ilindeki Kabalı ve Karasu nehirlerinden alınan sediment örneklerinde doğal (Ra-226, Th-232, K-40) ve yapay (Cs-137) radyoaktivite, su örneklerinde ise doğal radyoaktivite (H-3, Ra-226, Th-232, K-40) seviyeleri belirlenmiştir. Radyoaktivite seviyelerinin tespiti için Kabalı nehri 23 istasyon, Karasu nehri ise 36 istasyon ile temsil edilmiştir. Her iki nehirde de örnek alımları, Sinop ilinin en çok yağış alan Aralık ayı (ortalama 90,6 mm) ile en az yağış alan Temmuz ayında (ortalama 33,4 mm) aynı istasyonlardan olmak üzere iki tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir (URL-3). Sinop iline ait yağış grafiği (1936-2020 yılları arasındaki aylık ortalama yağış) Şekil 33’de verilmiştir.



Şekil 33. Sinop ilinin sıcaklık ve yağış grafiği (1936-2020)

Çalışma alanları ve örnek alınan istasyonların dağılımları Şekil 34’de gösterilmektedir.



Şekil 34. Çalışma alanları ve örneklemelerin yapıldığı istasyonlar

Şekil 34 üzerinde incelenen nehirlerle ait akış profilleri de ayrıca gösterilmiştir. Bu profillere göre Kabalı nehrinin Karasu nehrine göre daha yüksek bir noktadan gelerek denize dökülmesinden dolayı daha hızlı bir akış debisine sahip olabileceği düşünülmektedir. Buna bağlı olarak da, Kabalı nehrinin taşıyacağı sediment miktarının

kısmen daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, aralık ve temmuz ayı olarak irdelenmiştir.

4.1. Aktivite Konsantrasyonlarının İncelenmesi

4.1.1. Sediment Örnekleri

Karasu nehrinden 36 adet ve Kabalı nehrinden 23 adet olmak üzere toplamda 59 adet sediment örneği alındı. Karasu nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 3,08 – 29,40 Bq/kg, 3,15 – 19,10 Bq/kg, 1,95 – 61,13 Bq/kg ve 131,96 – 495,02 Bq/kg aralığında değişmekte olup ortalama değerleri $12,54 \pm 1,02$ Bq/kg, $9,98 \pm 1,05$ Bq/kg, $8,73 \pm 0,72$ Bq/kg ve $272,09 \pm 10,71$ Bq/kg olarak bulunmuştur. Yine, Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 3,32 – 13,20 Bq/kg, 2,95 – 7,38 Bq/kg, 0,35 – 8,24 Bq/kg ve 54,83 – 196,61 Bq/kg aralığında değişmekte olup ortalama değerleri $7,50 \pm 0,84$ Bq/kg, $4,64 \pm 0,80$ Bq/kg, $1,54 \pm 0,27$ Bq/kg ve $112,29 \pm 5,50$ Bq/kg olarak bulunmuştur. Karasu nehrinden alınan sediment örneklerinde aralık ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonları temmuz ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonlarından daha yüksek bulunmuştur.

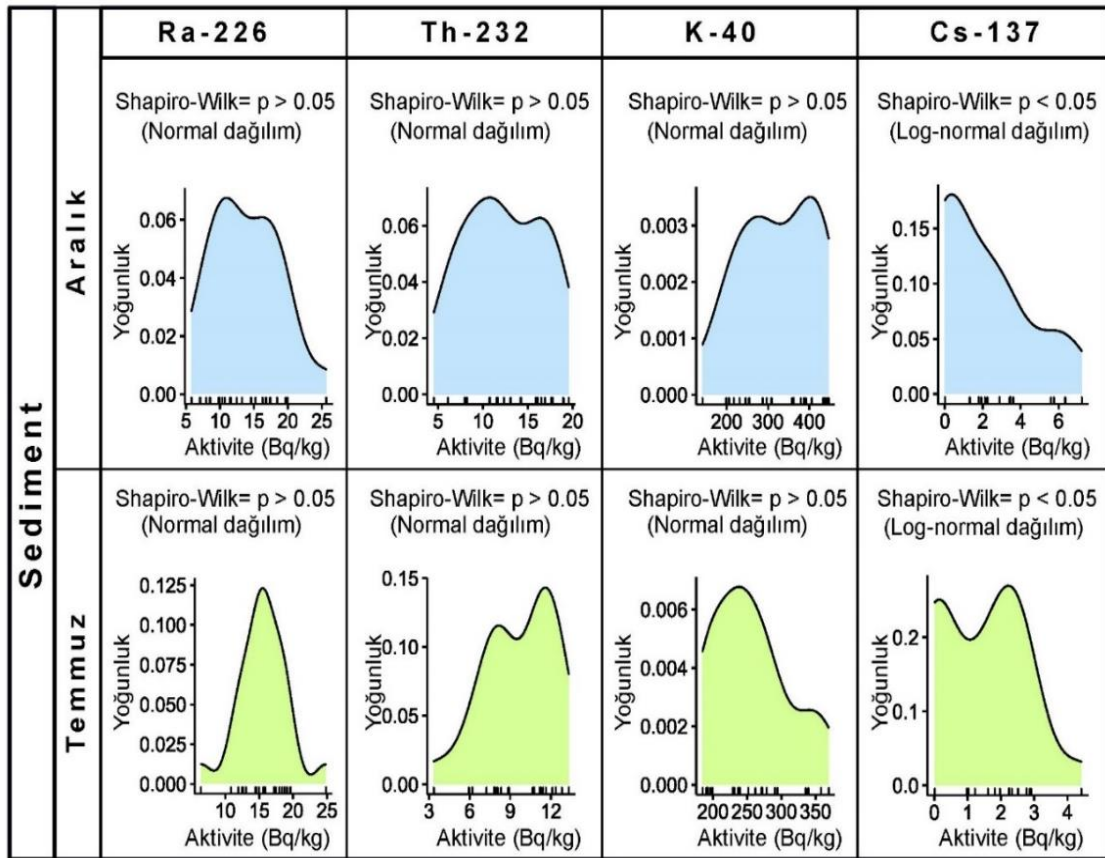
Kabalı nehrinden aralık ayında alınan sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 5,79 – 25,65 Bq/kg, 4,52 – 19,55 Bq/kg, 1,31 – 7,23 Bq/kg ve 141,66 – 446,77 Bq/kg aralığında değişmekte olup ortalama değerleri $13,89 \pm 0,89$ Bq/kg, $12,31 \pm 1,02$ Bq/kg, $3,67 \pm 0,48$ Bq/kg ve $324,50 \pm 10,77$ Bq/kg olarak bulunmuştur. Yine, Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 6,43 – 24,83 Bq/kg, 3,35 – 13,33 Bq/kg, 0,97 – 4,42 Bq/kg ve 184,75 – 369,17 Bq/kg aralığında değişmekte olup ortalama değerleri $15,55 \pm 1,14$ Bq/kg, $9,65 \pm 1,15$ Bq/kg, $2,21 \pm 0,42$ Bq/kg ve $255,58 \pm 10,22$ Bq/kg olarak bulunmuştur. Kabalı nehrinden alınan sediment örneklerinde aralık ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonları temmuz ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonlarından ^{226}Ra radyoizotopu hariç daha yüksek bulunmuştur.

Aralık ayı örneklemelerinde, Kabalı nehrinin sediment örneklerinde belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonları Karasu nehrinin sediment örneklerinde belirlenen

ortalama aktivite konsantrasyonlarından ^{137}Cs radyoizotopu hariç daha yüksek bulunmuştur.

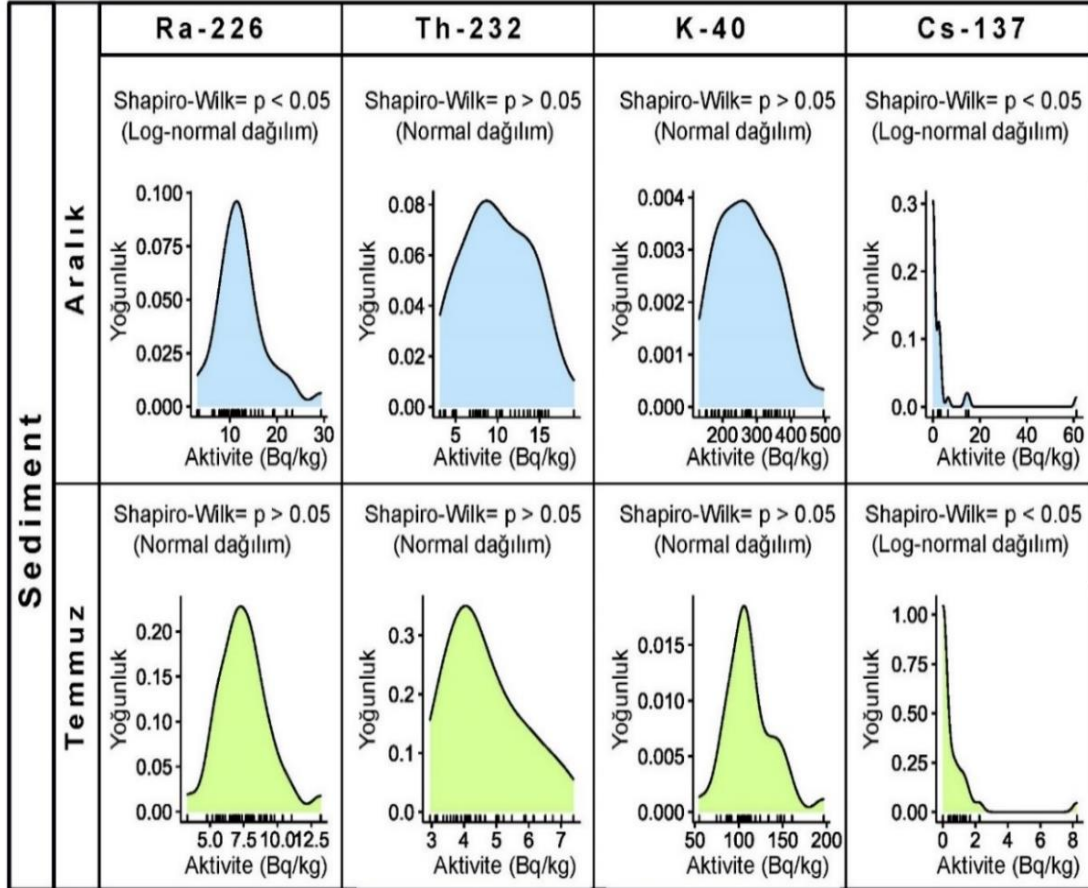
Temmuz ayı örneklemelerinde ise, Kabalı nehrinin sediment örneklerinde belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonları Karasu nehrinin sediment örneklerinde belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonlarından daha yüksek bulunmuştur.

Tüm sediment örnekleri içerisinde, en yüksek ^{226}Ra konsantrasyonu (29,40 Bq/kg) aralık ayında Karasu nehrinden alınan KR-14 kodlu örnekte, en yüksek ^{232}Th konsantrasyonu (19,55 Bq/kg) aralık ayında Kabalı nehrinden alınan KB-17 kodlu örnekte, en yüksek ^{137}Cs konsantrasyonu (92,37 Bq/kg) temmuz ayında Kabalı nehrinden alınan KB-6 kodlu örnekte ve en yüksek ^{40}K konsantrasyonu (560,34 Bq/kg) ise temmuz ayında Kabalı nehrinden alınan KB-16 kodlu örnekte belirlenmiştir. Kabalı nehrinin sediment örneklerine ait radyonüklidlerin dağılım diyagramları Şekil 35’de gösterilmektedir. Buna göre hem temmuz hem de aralık ayına ait sediment örnekleri için Shapiro-Wilk normallik testine göre Cs-137 radyonüklidlerinin konsantrasyon dağılımı hariç diğer radyonüklidlerin normal dağılıma uyduğu belirlenmiştir.



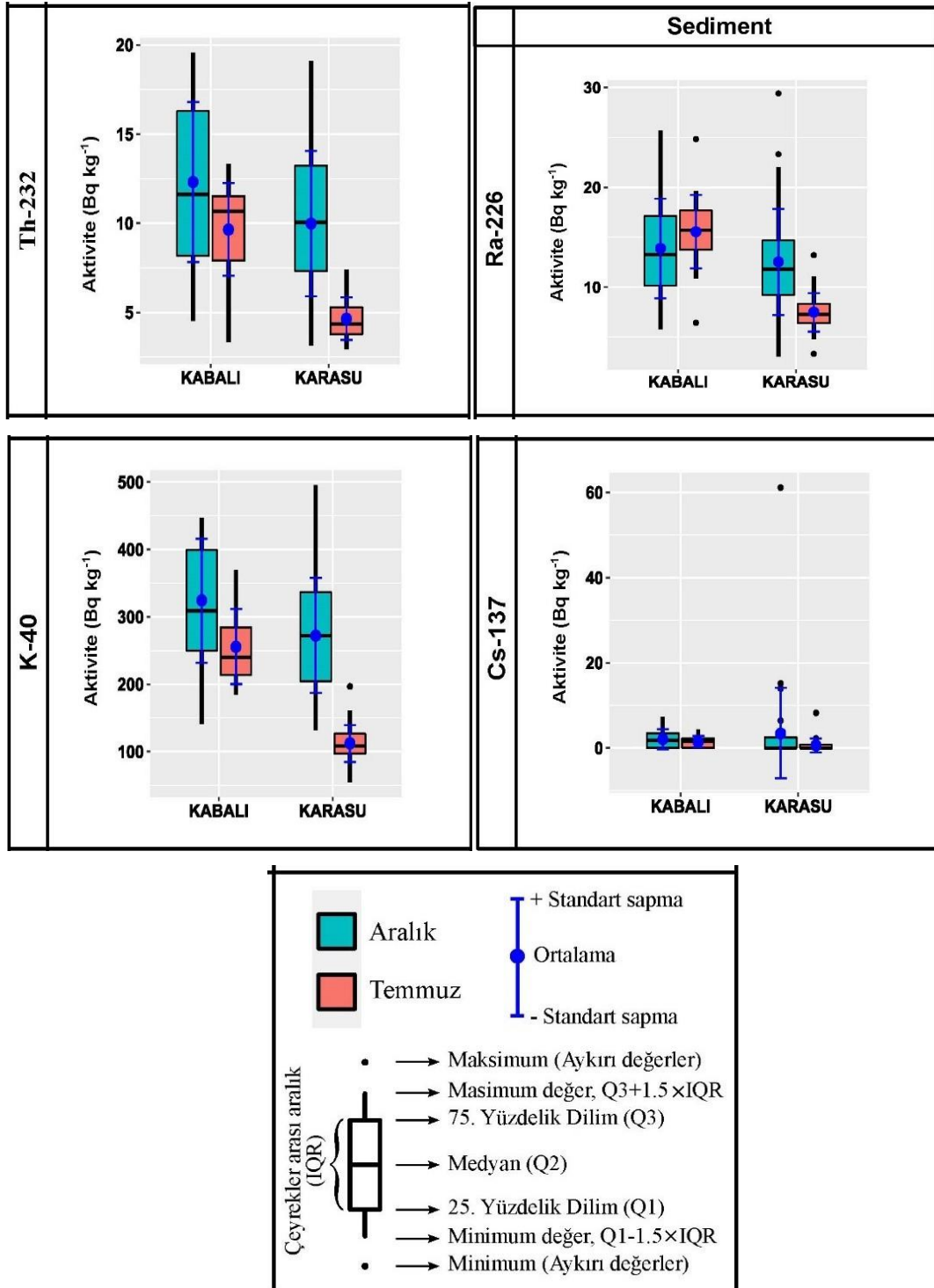
Şekil 35. Kabalı nehrinin sediment örneklerine ait radyonüklidlerin dağılım diyagramları

Karasu nehrinin sediment örneklerine ait radyonüklidlerin dağılım diyagramları Şekil 36’da gösterilmektedir. Buna göre, Karasu nehrine benzer olarak hem temmuz hem de aralık ayına ait sediment örnekleri için Shapiro-Wilk normallik testine göre Cs-137 radyonüklidlerinin konsantrasyon dağılımı hariç diğer radyonüklidlerin normal dağılıma uyduğu belirlenmiştir.



Şekil 36. Karasu nehrinin sediment örneklerine ait radyonüklidlerin dağılım diyagramları

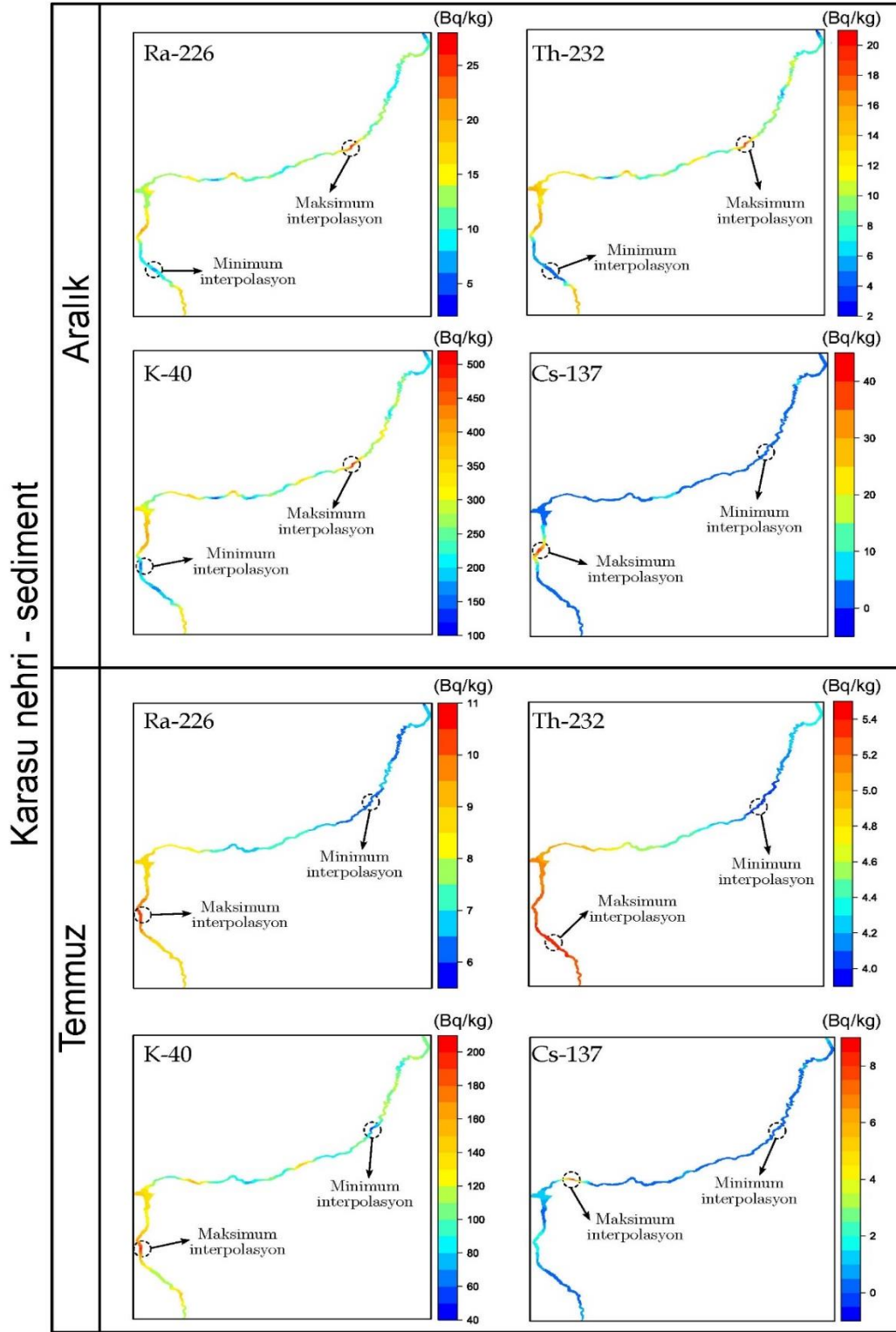
Çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçlarına ait tüm bulguların bir özeti kutu diyagramı ile Şekil 37’de sunulmuştur. Bu diyagramda doğal ve yapay radyoaktivite konsantrasyonları, sediment örnekleri için Kabalı ve Karasu nehri özelinde aralık ve temmuz ayı için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 37. Sediment örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyonlarına ait bazı istatistiksel değerler

Çalışılan nehirlerde sediment örneklerinin alındığı belirlenen noktaların dışındaki tüm diğer noktaların aktivite konsantrasyonları jeoistatistik hesaplamalar sonucu elde edildi ve elde edilen tüm verilerin ışığında sediment numuneleri için çizilen radyonüklid dağılım noktaları Karasu nehri için Şekil 38’de, Kabalı nehri için ise Şekil 39’da verilmiştir.





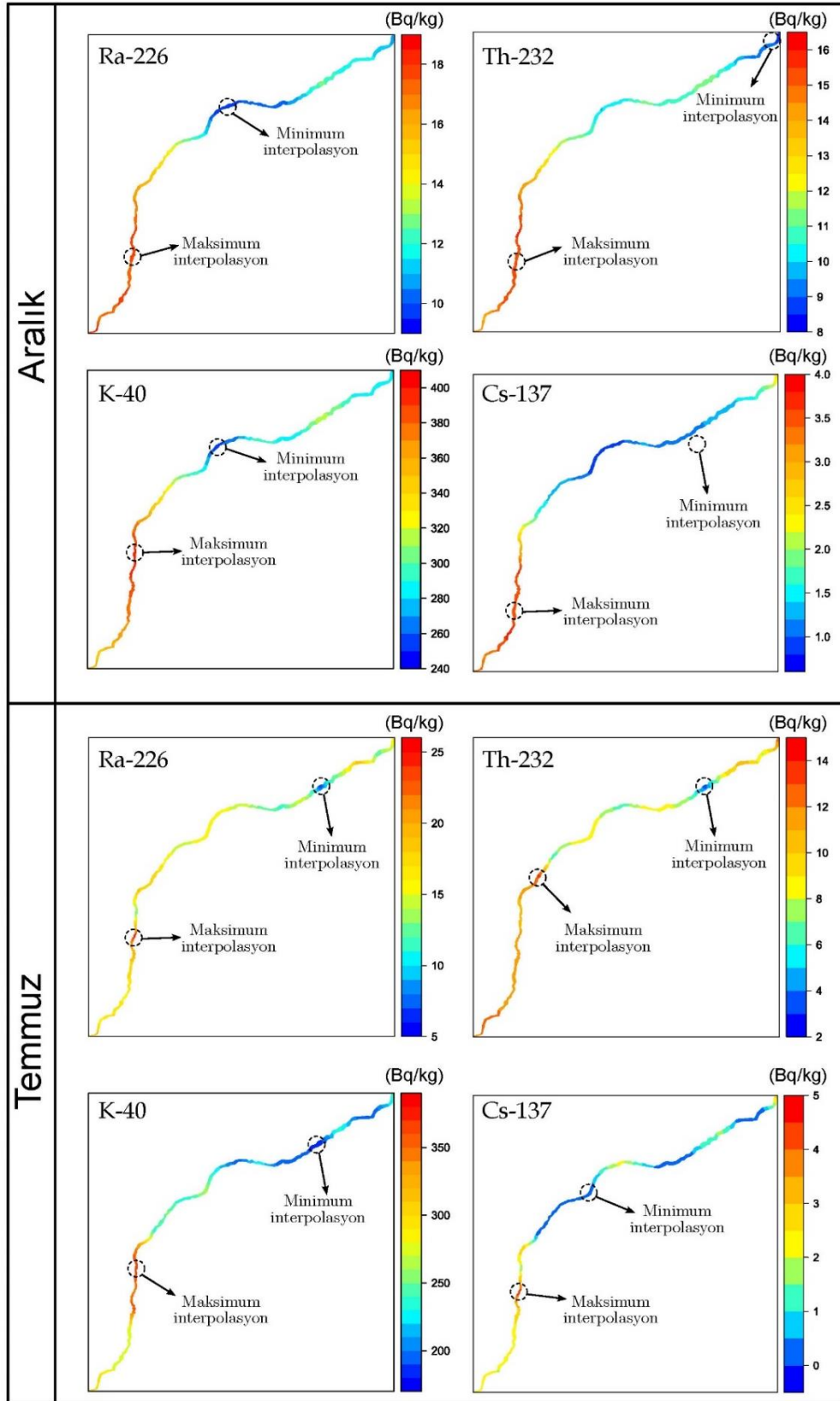
Şekil 38. Karasu nehri sediment örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları

Şekil 38' den görüldüğü üzere Karasu nehri sediment örneklerinde aralık ve temmuz aylarında belirlenen radyoizotop konsantrasyonları arasında farklılıklar görülmektedir. Aralık ayında Cs-137 hariç iç kesimlerde minimum konsantrasyon

seviyeleri kıyı kesimlere doğru ise maksimum konsantrasyon dağılımları dikkat çekmektedir. Yine temmuz ayında iç kesimlerde maksimum konsantrasyon seviyeleri kıyı kesimlere doğru minimum konsantrasyon dağılımları dikkat çekmektedir.



Kabalı nehri - sediment



Şekil 39. Kabalı nehri sediment örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları

Şekil 39'dan görüldüğü üzere, Kabalı nehri sediment örnekleri için hem temmuz hemde aralık ayları için tüm radyonüklidlerin özellikle iç kesimlerinde daha yüksek yoğunluklarda dağılım gösterdiği ve kıyı kesimlere doğru aktivite konsantrasyon seviyelerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Dünya üzerindeki nehirlerden alınan sedimentlerde radyoaktivitenin belirlenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların bazı literatür verileriyle karşılaştırılması Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Karasu ve Kabalı nehirlerinden alınan sediment örneklerinde belirlenen radyoaktivite verilerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması

Ülke, Nehir	²²⁶ Ra Bq/kg	²³² Th (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	Referans
Hindistan, Ponnaiyar	7,31	46,85	-	384,11	G. Surech vd., 2010
Bangladeş, Shango	27,8	57,5	2,1	255	Chowdhury vd., 1999
Mısır, Nil	15,4	15,2	-	221,0	Badawy vd., 2018
Hindistan, Kallada	48,6	88,0	-	423,2	Venunathan vd., 2016
Türkiye, Fırtına	39,93	38,55	6,15	573,34	Küçükömeroğlu vd., 2008
Türkiye, İkizdere	32,71	134,12	5,25	811,68	Keser vd., 2013
Türkiye, Kabalı	15,55	9,65	2,21	255,58	Bu çalışma
Türkiye, Karasu	7,50	4,64	1,54	112,29	Bu çalışma

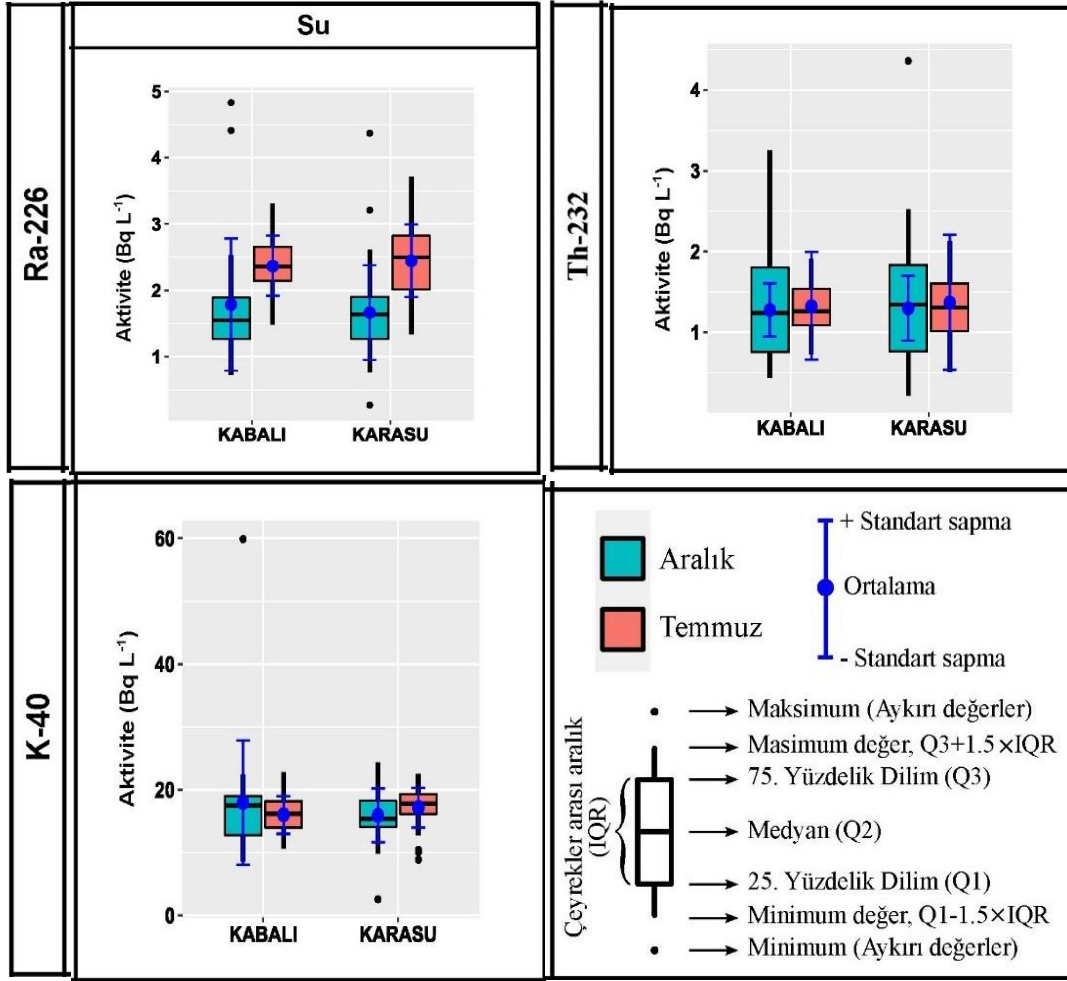
Tablo 20'de görüldüğü üzere ²²⁶Ra değerinin en yüksek olduğu değer Kallada nehrinde, en düşük olduğu değer Ponnaiyar nehrindedir. ²³²Th değerinin en yüksek olduğu değer İkizdere nehrinde, en düşük olduğu değer yine Ponnaiyar nehrindedir. ⁴⁰K değerinin en yüksek olduğu değer İkizdere nehrinde, en düşük olduğu değer ise Karasu nehrindedir. ¹³⁷Cs değeri en yüksek Fırtına nehrinde belirlenmiştir. ¹³⁷Cs yapay radyoizotop olduğu için normalde görülmesi beklenmez. Ancak Tablo 23'de verilen bazı nehir sedimentlerinde ve bu çalışmada alınan sedimentlerde az miktarda olsa tespit edilmiştir. Bunun nedeni Çernobil olayı sonucu kontamine olan toprakta ve sedimentlerde hala yapay radyoaktivite kaynaklarının varlığıdır. Bununla birlikte bir diğer neden ise çalışma bölgesinin Çernobil olayının gerçekleştiği bölgeye yakınlığı olabilir.

4.1.2. Su Örnekleri

Karasu nehrinden 36 adet ve Kabalı nehrinden 23 adet olmak üzere toplamda 59 adet su örneği alındı. Karasu nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 0,41 – 4,37 Bq/L, 0,39 – 2,52 Bq/L ve 9,80 – 24,05 Bq/L aralığında değişmekte olup ortalama değerleri sırasıyla $1,66 \pm 0,61$ Bq/L, $1,38 \pm 0,50$ Bq/L, $16,19 \pm 3,05$ Bq/L olarak bulunmuştur. Yine, Karasu nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 1,55 – 3,39 Bq/L, 0,51 – 2,13 Bq/L ve 8,85 – 21,21 Bq/L aralığında değişmekte olup ortalama değerleri sırasıyla $2,44 \pm 0,58$ Bq/L, $1,29 \pm 0,52$ Bq/L, $17,18 \pm 2,76$ Bq/L olarak bulunmuştur. Karasu nehrinden alınan su örneklerinde temmuz ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonları aralık ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonlarından daha yüksek bulunmuştur.

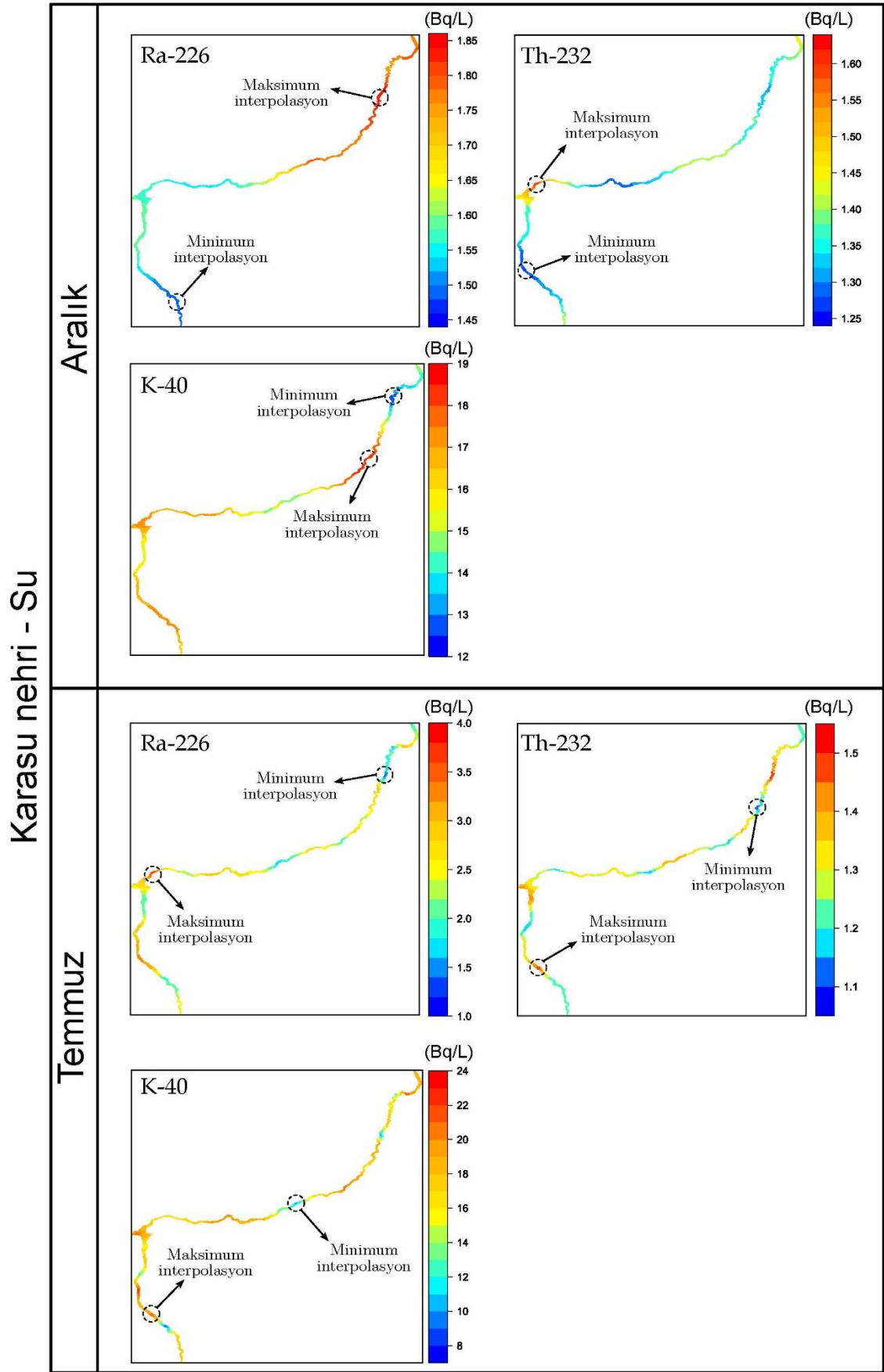
Kabalı nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 0,73 – 4,83 Bq/L, 0,44 – 3,25 Bq/L ve 8,59 – 59,86 Bq/L aralığında değişmekte olup ortalama değerleri sırasıyla $1,78 \pm 0,61$ Bq/L, $1,32 \pm 0,50$ Bq/L, $17,95 \pm 2,72$ Bq/L olarak bulunmuştur. Yine, Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite konsantrasyonları sırasıyla 1,48 – 3,07 Bq/L, 0,73 – 1,91 Bq/L ve 10,67 – 22,82 Bq/L aralığında değişmekte olup ortalama değerleri sırasıyla $2,36 \pm 0,57$ Bq/L, $1,27 \pm 0,50$ Bq/L, $16,02 \pm 2,66$ Bq/L olarak bulunmuştur. Kabalı nehrinden alınan su örneklerinde aralık ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonları temmuz ayı için belirlenen ortalama aktivite konsantrasyonlarından daha yüksek bulunmuştur.

Çalışmadan elde edilen su örneklerinin ölçüm sonuçlarına ait tüm bulguların bir özeti kutu diyagramı ile Şekil 40'da sunulmuştur. Bu diyagramda doğal radyoaktivite konsantrasyonları su örnekleri için Kabalı ve Karasu nehri özelinde aralık ve temmuz ayı için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 40. Su örneklerinde belirlenen radyoaktivite konsantrasyonlarına ait bazı istatistiksel değerler

Çalışılan nehirlerde su örneklerinin alındığı belirlenen noktaların dışındaki tüm diğer noktaların aktivite konsantrasyonları jeoistatistik hesaplamalar sonucu elde edildi ve elde edilen tüm verilerin ışığında su numuneleri için çizilen radyonüklid dağılım noktaları Karasu nehri için Şekil 41’de, Kabalı nehri için ise Şekil 42’de verilmiştir.

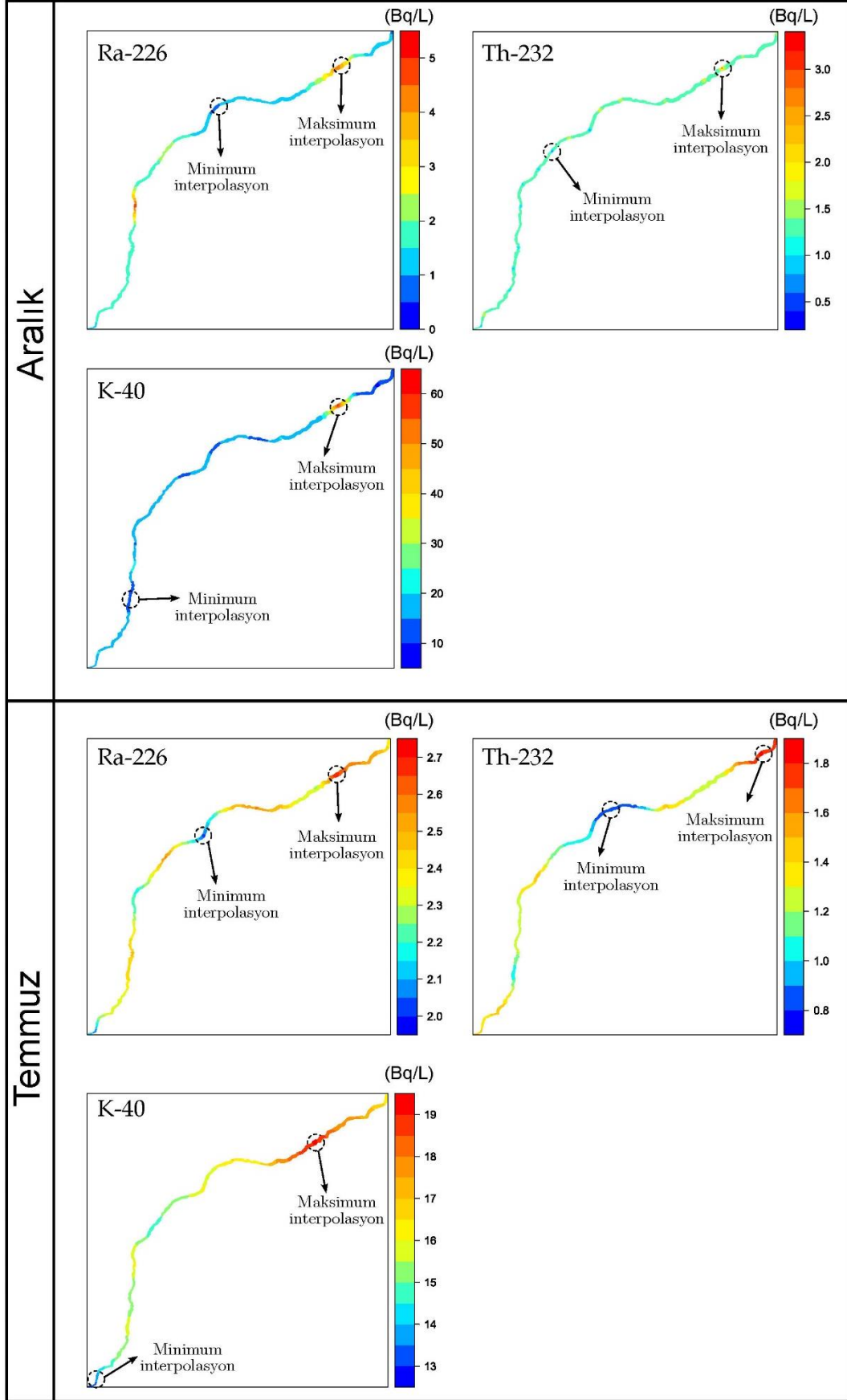


Şekil 41. Karasu nehri su örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları

Şekil 41'den görüldüğü üzere Karasu nehri su örneklerinde aralık ve temmuz aylarında belirlenen radyoizotop konsantrasyonları arasında farklılıklar görülmektedir. Aralık ayında iç kesimlerde minimum konsantrasyon seviyeleri kıyı kesimlere doğru ise maksimum konsantrasyon dağılımları dikkat çekmektedir. Yine temmuz ayında iç kesimlerde maksimum konsantrasyon seviyeleri kıyı kesimlere doğru minimum konsantrasyon dağılımları dikkat çekmektedir.



Kabalı nehri - Su



Şekil 42. Kabalı nehri su örneklerinin radyonüklid dağılım haritaları

Şekil 42’den görüldüğü üzere, Kabalı nehri su örnekleri için hem temmuz hemde aralık ayları için tüm radyonüklidlerin özellikle iç kesimlerinde daha yüksek yoğunluklarda dağılım gösterdiği ve kıyı kesimlere doğru aktivite konsantrasyon seviyelerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Dünya üzerindeki nehir suyu örneklerinde radyoaktivitenin belirlenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların bazı literatür verileriyle karşılaştırılması Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Karasu ve Kabalı nehirlerinden alınan nehir suyu örneklerinde belirlenen radyoaktivite verilerinin literatürdeki verilerle karşılaştırılması

Ülke, Nehir	²²⁶ Ra (Bq/L)	²³² Th (Bq/L)	⁴⁰ K (Bq/L)	Referans
Tanzanya, Mkuju	2,5	1,9	11,0	Mohammed ve Mazunga, 2013
Tanzanya, Kilowelo	2,2	1,8	9,2	Mohammed ve Mazunga, 2013
Nijerya, Ipogun	0,20	0,92	2,59	Adebayo ve Akinnowo, 2017
Türkiye, Kabalı	2,36	1,27	16,02	Bu çalışma
Türkiye, Karasu	2,44	1,29	17,08	Bu çalışma

Tablo 21’de görüldüğü üzere ²²⁶Ra değerinin en yüksek olduğu değer Mkuju nehrinde, en düşük olduğu değer Ipogun nehrindedir. ²³²Th değerinin en yüksek olduğu değer Mkuju nehrinde, en düşük olduğu değer yine Ponnaiyar nehrindedir. ⁴⁰K değerinin en yüksek olduğu değer Karasu nehrinde, en düşük olduğu değer ise Ipogun nehrindedir.

4.2. Radyolojik Tehlike Parametreleri

Bu çalışma ile gama spektrometresi kullanılarak Sinop il sınırları içerisindeki Kabalı ve Karasu nehrinden alınan sediment örneklerinde hem doğal (²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K) hem de yapay (¹³⁷Cs) radyoaktivite seviyeleri ve ilgili radyolojik tehlikeler (radyum eşdeğer aktivitesi, dış tehlike indeksi, gama indeksi, soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz eşdeğeri) belirlendi.

Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde hesaplanan radyum eşdeğer aktivitesi 14,18 – 33,98 Bq/kg aralığında değişmekte olup, radyum eşdeğer aktivitesinin ortalama değeri 20,04 Bq/kg’dır. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde hesaplanan radyum eşdeğer aktivitesi ise 24,15 – 64,71 Bq/kg aralığında değişmekte olup radyum eşdeğer aktivitesinin ortalama değeri 47,50 Bq/kg’dır. Radyum eşdeğer aktivitelerinin önerilen değeri olan 370 Bq/kg’dan düşük

olması beklenmekte olup (UNSCEAR, 2000), çalışılan her iki nehirden alınan sediment örnekleri için belirlenen radyum eşdeğer aktivitesi değerleri ve elde edilen değerler neticesinde sediment örneklerinin radyum eşdeğer aktivitesi yönünden herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde hesaplanan dış tehlike indeksi 0,04 – 0,09 aralığında değişmekte olup, dış tehlike indeksinin ortalama değeri 0,06'dır. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde hesaplanan dış tehlike indeksi ise 0,07 – 0,18 aralığında değişmekte olup, dış tehlike indeksinin ortalama değeri 0,18'dir. Dış tehlike indeksi için önerilen değerin <1 olması (UNSCEAR, 2000) beklenmekte olup, çalışılan her iki nehirden alınan sediment örnekleri için belirlenen dış tehlike indeksi değerlerinin altında bulunmuştur. Dolayısıyla dış tehlike indeksi yönünden herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde gama indeksi 0,07–0,25 aralığında değişmekte olup, gama indeksinin ortalama değeri 0,15'dir. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde hesaplanan gama indeksi ise 0,20 –0,50 aralığında değişmekte olup, gama indeksinin ortalama değeri 0,36'dır. Gama indeksi için önerilen değerin <1 olması beklenmekte (UNSCEAR, 2000) olup, çalışılan her iki nehirden alınan sediment örnekleri için belirlenen gama indeksi değerlerinin altında bulunmuştur. Dolayısıyla sediment örneklerinin gama indeksi yönünden herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde soğurulan gama doz hızı 6,92 –16,51 nGy/h aralığında değişmekte olup, soğurulan gama doz hızının ortalama değeri 10,07 nGy/h'dır. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde hesaplanan gama doz hızı ise 12,91 – 32,66 nGy/h aralığında değişmekte olup, soğurulan gama doz hızı ortalama değeri 24,00 nGy/h'dır. Soğurulan gama doz hızı için önerilen değerin 55 nGy/h olması beklenmekte olup (UNSCEAR, 2000), çalışılan her iki nehirden alınan sediment örnekleri için belirlenen soğurulan gama doz hızı değerlerinin altında bulunmuştur. Dolayısıyla sediment örneklerinin soğurulan gama doz hızı yönünden herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

Karasu nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinde yıllık etkin doz eşdeğeri 8,49 – 20,25 Sv/y aralığında değişmekte olup, yıllık etkin doz eşdeğeri ortalama değeri 12,35 Sv/y'dır. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan sediment örneklerinden hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğeri 15,83 – 40,05 Sv/y aralığında

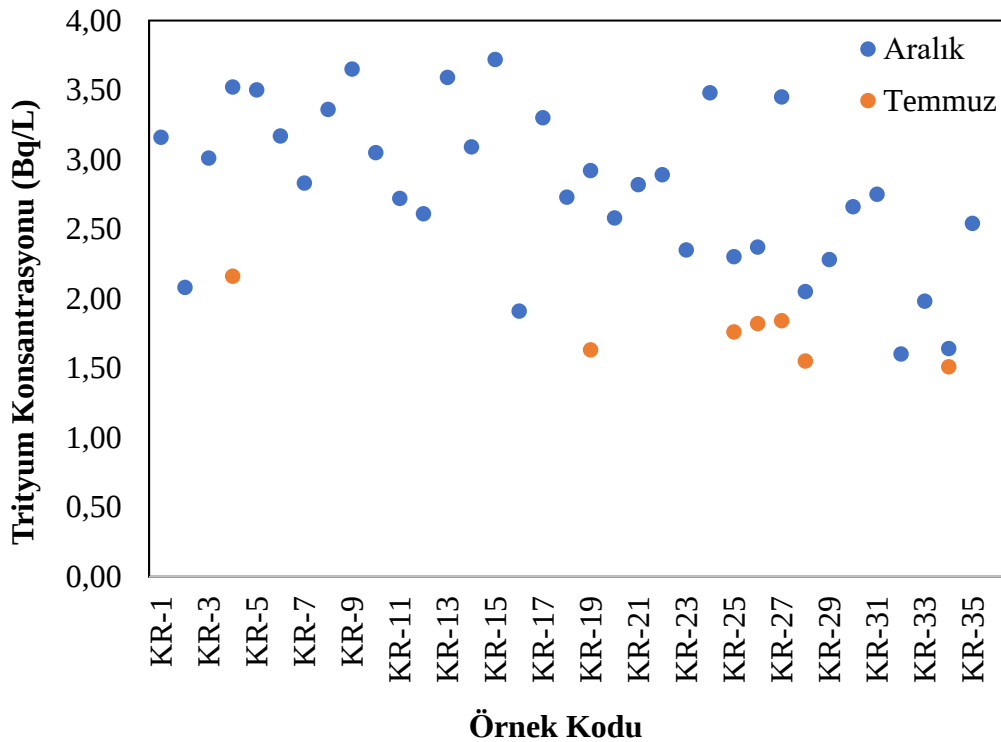
değişmekte olup, yıllık etkin doz eşdeğeri ortalama değeri 29,44 $\mu\text{Sv/y}$ 'dır. Yıllık etkin doz eşdeğerinin en çok 1000 $\mu\text{Sv/y}$ olması önerilmektedir (UNSCEAR, 2000). Her iki nehrinden alınan sediment örnekleri içinde bulunan yıllık etkin doz eşdeğeri altında bulunmuştur ve yıllık etkin doz eşdeğeri yönünden herhangi bir risk oluşturmadığı söylenebilir.

4.3. Tritiyum Konsantrasyonlarının İncelenmesi

Sinop ili Karasu ve Kabalı nehirlerinden sırasıyla 36 ve 23 örnek olmak üzere toplamda 59 adet nehir suyu örneği alındı.

Karasu nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinin ortalama trityum konsantrasyonu $2,79 \pm 0,52$ Bq/L ($23,65 \pm 4,48$ TU) olarak bulundu. Karasu nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinin ortalama trityum konsantrasyonu ise $1,75 \pm 0,51$ Bq/L ($14,86 \pm 4,36$ TU) olarak bulundu.

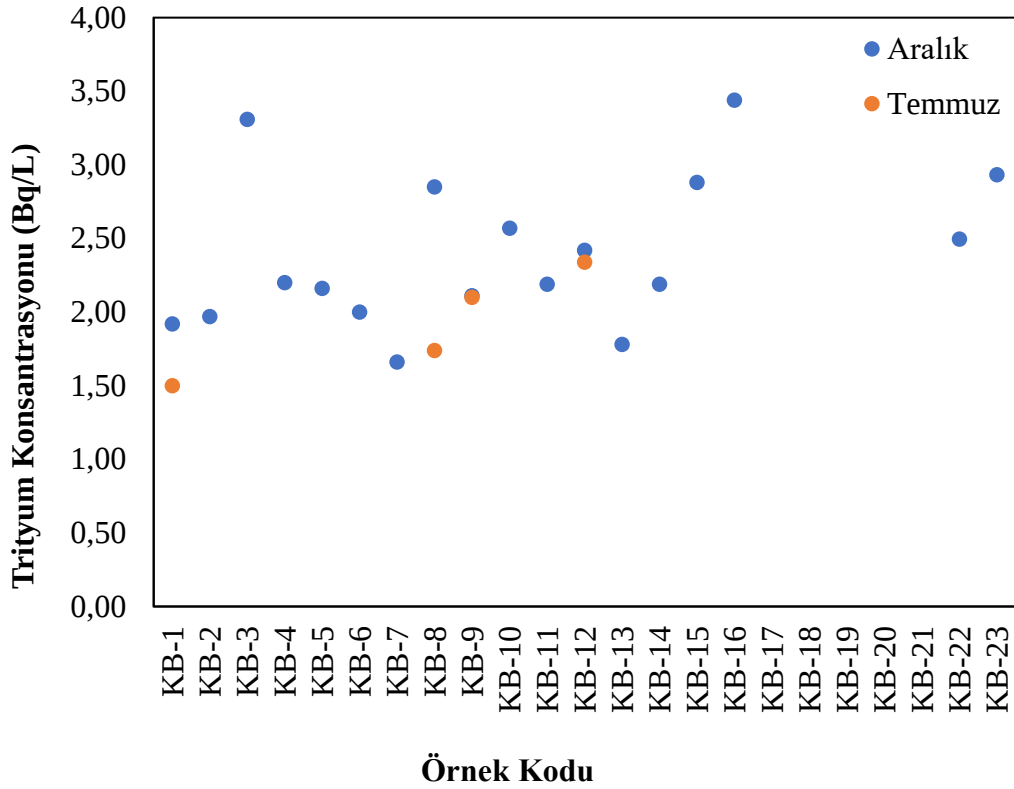
Karasu nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su örneklerinde belirlenen trityum konsantrasyonlarının dağılımı Şekil 43'de verilmiş olup trityum aktivite konsantrasyon değerlerinin homojen olduğu ekteedir.



Şekil 43. Karasu nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su örneklerinde trityum konsantrasyonlarının dağılımı

Kabalı nehrinden aralık ayında alınan su örneklerinin ortalama trityum konsantrasyonu $2,37 \pm 0,48$ Bq/L ($20,10 \pm 4,08$ TU) olarak bulundu. Kabalı nehrinden temmuz ayında alınan su örneklerinin ortalama trityum konsantrasyonu ise $1,97 \pm 0,46$ Bq/L ($16,67 \pm 3,91$ TU) olarak bulundu.

Kabalı nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su örneklerinde belirlenen trityum konsantrasyonlarının dağılımı Şekil 44’de verilmiştir.



Şekil 44. Kabalı nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su örneklerinde trityum konsantrasyonlarının dağılımı

Karasu nehri ve Kabalı nehrinden aralık ve temmuz ayında alınan su numunelerinin trityum konsantrasyonlarının dağılımlarına bakacak olursak, Karasu nehri aralık ayı değerlerinin tamamına yakını MDA değerlerinin üzerinde iken, temmuz ayında çoğu değer MDA değerinin altında olduğu görülmektedir. Yine Kabalı nehri aralık ayı değerlerinin çoğu MDA değerinin üzerinde olup, temmuz ayında ise tamamına yakını MDA değerinin altında bulunmuştur.

Dünyanın farklı bölgelerine ait nehir sularında trityum aktivite seviyelerine ilişkin birçok çalışma bulunmaktadır. Mevcut çalışmayla ilgili kıyaslamada bulunabilmek için

bu çalışmalardan bazılarının trityum konsantrasyonu ortalama değerleri Tablo 22’de verilmektedir.

Tablo 22. Bu çalışma ve dünyanın farklı bölgelerine ait nehir sularında trityum aktivite konsantrasyonu seviyeleri

Ülke	Tritiyum Konsantrasyonu (Bq/L)	Referans
Japonya, Kuzey ada suyu	$2,42 \pm 0,81$	Momoshima vd., 1990
Japonya, Güney ada suyu	$1,00 \pm 0,36$	Momoshima vd., 1990
Yunanistan, Pinios	$1,04 \pm 0,08$	Stamoulis, 2011
Macaristan, Danube	$1,36 \pm 0,05$	Janovics vd., 2014
İspanya	$3,6 \pm 0,6$	Palomo vd., 2007
Hindistan, Varahi	$0,51 \pm 0,04$	Ravikumar ve, Somashekar, 2011
Hindistan, Markendaya	$0,66 \pm 0,09$	Ravikumar ve, Somashekar, 2011
Türkiye, Büyükdere	$1,64 \pm 0,94$	İpek, 2015
Türkiye, İkizdere	$1,72 \pm 0,94$	İpek, 2015
Türkiye, Fırtına	$2,66 \pm 1,13$	Fındıklı Kağanoğlu, 2015
Türkiye, Hemşin	$2,29 \pm 1,11$	Fındıklı Kağanoğlu, 2015
Türkiye, Karasu	$1,75 \pm 0,51$	Bu çalışma
Türkiye, Kabalı	$1,97 \pm 0,46$	Bu çalışma

Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar ve literatürdeki bazı çalışmalar kıyaslandığı zaman trityum konsantrasyonunun ne büyük değeri Fırtına deresinde, en küçük değer ise Varahi nehrinde bulunmuştur.

Dünyada ve ülkemizde içme sularında trityum konsantrasyonlarının belirlenmesi üzerine yapılmış birçok çalışma literatürde mevcuttur. Ancak nehir suyu örneklerinde trityum konsantrasyonlarının karşılaştırılabilmesi için yapabilmek için dünya genelinde herhangi bir referans değer bulunmamaktadır. Bu nedenle nehir suyu örneklerinde bulunan trityum konsantrasyonları içme suyu için verilen referans değerler ile karşılaştırmış olup, nehir suyu örnekleri için belirlenen konsantrasyonlar T.C. Sağlık Bakanlığı (100 Bq/L) ve Dünya Sağlık Örgütü’nün (1000 Bq/L) önerdiği referans değerlerinin oldukça altında bulunmuştur. (TCSB, 2005; WHO, 2004). Bu değerler neticesinde nehir suyu örneklerinin trityum yönünden insanlar için herhangi bir risk oluşturmadığını söyleyebiliriz.

4.4. Kalite Kontrol Ölçümleri

Gama spektrometre sisteminde (HPGe) yaptığımız ölçüm ve hesaplamaların doğruluğunu test etmek için Uluslararası Atom Enerji Ajansı'ndan temin edilen IAEA-375 referans materyali örneklerle birlikte aynı şartlar altında ölçülmüştür. IAEA-375 referans materyalinin sertifika bilgileri ve ölçüm sonrası bulunan aktivite değerleri Tablo 23'te verilmektedir.

Tablo 23. IAEA-337 referans materyalinin ölçüm sonuçları

Radyoizotop	Aktivitesi (Bq/kg)		Bağıl Hata (%)	Geri Kazanım (%)
	Sertifika Değeri	Ölçüm Değeri		
²²⁶ Ra	20	18,41	7,95	92,05
²³² Th	20,5	19,71	3,85	96,15
⁴⁰ K	424	412,05	2,82	97,18
¹³⁷ Cs*	2703,87	2753,05	1,74	98,21

*Cs-137'nin sertifika aktivite değeri olarak referans tarihinden ölçüm tarihine kadar geçen süre içerisinde bozunmasından kalan aktivite değeri alınmıştır. Diğer izotopların yarılanma ömürleri çok uzun olduğundan değişmediği kabul edilmiştir.

Sıvı sintilasyon sayacında (LSC) yaptığımız ölçüm ve hesaplamaların doğruluğunu test etmek için trityum referans materyalinden hazırlanan standart, örneklerle birlikte aynı şartlar altında ölçülmüştür. Bu standardın hazırlanma aktivitesi ile hesaplanan aktivite değeri Tablo 24'te, trityum standardının ölçüm sonuçları ise Tablo 25'te verilmektedir.

Tablo 24. Hazırlanan standardın hazırlanma aktivitesi ve hesaplanan aktivite değeri

Trityum Standardı (TS)	
Referans Tarihi	14.02.2012
Aktivitesi (Bq/ml)	0,601 ± 0,019

Tablo 25. Tritiyum standardının ölçüm sonuçları

Standart	Tritiyum Aktivitesi (Bq/L)		Bağıl Hata (%)	Geri Kazanım (%)
	Hazırlanma	Hesaplanan		
TS	405,02	389,71	3,78	96,22

*TS'nin hazırlanma aktivitesi olarak, hazırlanma tarihinden ölçüm tarihine kadar geçen süre içerisinde bozunmasından kalan aktivite değeri alınmıştır.

Tablo 23, Tablo 24 ve Tablo 25'deki ölçüm sonuçları temelinde, sonuçlar arasında önemli farklılıklar olmadığı görülmektedir. Bu sonuçlar, çalışmada kullanılan HPGe ve LSC cihazımızın ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlara bakıldığında, aktivitesi düşük olan standartların bağıl hatasının aktivitesi yüksek olan standartların bağıl hatasından daha fazla olduğu görülmektedir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin Sinop ilinde bulunan Kabalı ve Karasu nehrinden alınan su ve sediment örneklerinde doğal (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyoaktif izotopların aktivite konsantrasyonları yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılarak ölçüldü. Daha önce farklı yerlerde benzer çalışmalar olmasına rağmen Sinop ili Kabalı ve Karasu nehirleri için şu ana kadar yapılmış herhangi bir çalışma bulunmadığı ve Sinop'ta kurulacak olan nükleer santral çalışmaya başlamadan önce yapıldığı için incelenen suların nükleer santral faaliyete geçtikten sonra da aynı şekilde analiz edilmesi önerilir. Bu sayede nükleer santralin çevresine incelenen radyoizotoplar yönünden etki edip etmeyeceği belirlenmiş olunacaktır. Ayrıca, Türkiye'deki radyoaktif kaynakların tam olarak bilinmemesi ve çeşitli nedenlerle gerçekleşen nükleer kazalar ve son zamanlarda yapılan termonükleer denemelere bağlı olarak dünyamızın radyoaktif kirlilik düzeyi gittikçe artmaktadır. Bundan dolayı radyoaktif kirlilik değişiminin izlenmesi ve gerekli değerlendirmenin yapılabilmesine yönelik bilimsel çalışmaların devam ettirilmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- Altay, T. ve Çifter, C. (1996). Tritiyum laboratuvarı el kitabı. DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, İZ-963, 55s.
- Adebayo O.C. and Akinlawo O.O. (2017). Assessment of Radiological Hazard of Natural Radioactivity in Drinking Water in Ondo, Nigeria. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(5): 1-11, 2017; Article no. JSRR.37835 ISSN: 2320-0227
- Alzaridi and Kurnaz, A. (2020). Determination of concentration levels of toxic elements and radon in drinking waters consumed in Kastamonu province, Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-12.
- ASTM D4107-08, (2006). Standard Test Method for Tritium in Drinking Water. ASTM International, West Conshohocken, <http://dx.doi.org/10.1520/D4107-08>.
- Aytas, S., Yusan, S., Aslani, M. A. A., Karali, T., Turkozu, D. A., Gok, C., Oguz, K. F., (2012). Natural radioactivity of riverbank sediments of the Maritza and Tundja Rivers in Turkey. *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47(13), 2163–2172.
- Badawy, W.M., Dulu, O.G., Frontasyeva, M.V., Samman, H., Faanhof, A., (2018). Environmental radioactivity of soils and sediments: Egyptian sector of the Nile valley. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 54(5), 535-547.
- Baretka, J. and Mathew, P.J. (1985). Natural Radioactivity. Activity of Australian Building Material, Industrial Wastes and By-products. *Health Physics*, 48(1), 87-95.
- Baume O, Skoien J.O., Heuvelink G.B.M., (2011). A geostatistical approach to data harmonization- Application to radioactivity exposure data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 409-419.
- Bennett, B. (1997). Exposure to natural radiation worldwide. In *Proceedings of the Fourth. International Conference on High Levels of Natural Radiation*, Tokyo, Elsevier, 15-23.
- Caro, A., Legarda, F., Romero, L., (2013). Map on predicted deposition of Cs-137 in Spanish soils from geostatistical analyses, *Journal of Environmental Radioactivity*, 115, 53-59.
- Caridi, F., Marguccio, S., Belvedere, A., Belmusto, G., (2015). Measurements of Gamma Radioactivity in River Sediment Samples of the Mediterranean Central Basin, 5(3), 61–68.
- Clark, I. (1979). *Practical Geostatistics*, Elsevier. Elsevier, London, U.K.
- Chae, JS., Lee, SK., Kim, Y., Lee, JM., Cho, HJ., Cho, YW., Yun, JY. (2011). Distribution of tritium in water vapour and precipitation around Wolsung Nuclear Power Plant, *Radiation Protection Dosimetry*, 146(1–3), 330–333.

- Çelebi, N. (1995). Çevresel örneklerde uranyum, radyum ve radon ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 21–22.
- Dilaver, A.T., Çifter, C., Altay, T., 2002. Türkiye'deki içme ve kullanma sularının radyoaktivite yönünden kalitesinin belirlenmesi. Hidrolojide izotop tekniklerinin kullanılması sempozyumu, TR0300072, 35-45.
- Diggle, P., Riberio, P.J., 2007. Model-Based Geostatistics, Springer. Springer, London, U.K.
- DSİ TAKK, (2003). Elektroliz zenginleştirilmesi ve sıvı sintilasyon sayma sistemi kullanılarak su numunelerinin trityum içeriği üzerindeki belirsizliklerin saptanması. TAKK Dairesi Başkanlığı Ankara, Türkiye, İZ–903.
- Dizman, S., Fındıklı Kağanoğlu, Ç., İpek, N. ve Keser, R. (2016). Assessments of tritium concentration in the some water samples around Rize. *Turkish Journal of Materials*, 3(1), 57-53.
- Dizman, S., Görür, F. K., Keser, R., and Görür, O. (2019). The assessment of radioactivity and radiological hazards in soils of Bolu province, Turkey. *Environmental Forensics*, 20(3), 211-218.
- Dizman, S., Görür, F. K., and Keser, R. (2016). Determination of radioactivity levels of soil samples and the excess of lifetime cancer risk in Rize province, Turkey. *International journal of radiation research*, 14(3), 237.
- Dizman, S. (2015). İdrar örneklerinde trityum seviyesinin belirlenmesi ve bazı biyokimyasal parametrelerle ilişkisi, Doktora tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 122.
- Dizman, S., Yılmaz, A., and Keser, R. (2015). Determination of tritium concentrations in humans before the development of a nuclear power plant in Turkey. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 51(3), 478-484.
- Dizman, S. (2006). Rize ili ve ilçelerindeki doğal gamma radyoaktivite düzeyinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye.
- Dobson, RL., Cooper, MF. (1974). Tritium Toxicity: Effect of Low-Level ³H Exposure on Developing Female Germ Cells in the Mouse. *Radiation Research*, 58, 91-100.
- Dobson, RL., Kwan, TC. (1976). The RBE of Tritium Radiation Measured in Mouse Oocytes: Increase at Low Exposure Levels. *Radiation Research*, 66, 615-625.
- Dowdall, M., Gerland, S., Lind, B., (2003). Gamma-emitting natural and anthropogenic radionuclides in the terrestrial environment of Kongsfjord, Svalbard, *Science of the Total Environment*, 305, 229–240.
- Ducros, L., Eyrolle, F., Vedova, C.D., Charmasson, S., Leblanc, M., Mayer, A., Babic, M., Antonelli, C., Mourier, D., Giner, F., (2018). Tritium in river waters from French

- Mediterranean catchments: Background levels and variability, *Science of The Total Environment*, 612, 672-682.
- ETKB, 2012. Nükleer Santraller ve Ülkemizde Kurulacak Nükleer Santrale İlişkin Bilgiler. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, yayın no: 1, 61 s.
- Fievet, B., Pommier, J., Voiseux, C., Bailly du Bois, P., Laguionie, P., Cossonnet, C., and Solier, L. (2013). Concentration polarization phenomenon during the nanofiltration of multi-ionic solutions: Influence of the filtrated solution and operating conditions. *Water research*, 47(7), 2260-2272.
- Forkapic, S., Nikolov, J., Todorovic, N., Mrdja, D. and Bikit, I., 2011. Tritium Determination in Danube River Water in Serbia by Liquid Scintillation Counter. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Physical, Natural Science and Engineering*, 5(4), 19-22.
- Garibov, A.A., Mikayilova, A.C., Humbatov, F.Y., Nagiyev, J.A., 2017. Radioecological assessment of river waters of central regions of Azerbaijan. *Chemistry Problems*, 4, 378-382.
- Grahek, Z., Breznik, B., Stojkovic, I., Coha, I., Nikolov, J., Todorovic, N. 2016. Measurement of tritium in the Sava and Danube Rivers. *Journal of Environmental Radioactivity*, 162, 56-67.
- Grigorescu, E.L., Sahagia, M., Razdolescu, A.C., Luca, A., Ivan, C., 2002. Standardization of Eu-152. *Applied Radiation and Isotopes*, 56, 435–439.
- Hacıosmanoğlu, T. (2017, Kasım). Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynakları ve Kişisel Doz Katkıları/Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynakları, Kisisel Doza Katkilari. *Nükleer Tıp Seminerleri* (Cilt 3, No. 3, pp. 166-172). Galenos Yayınevi Tic. Ltd.
- Hamzah, Z., Rosli, T., Saat, A., Khalik Wood, A., 2014. An assessment of natural radionuclides in water of Langat River estuary, Selangor. *AIP Conference Proceedings* 1584, 228-234.
- Hanslík, E., Marešová, D., Juranová, E., Sedlářová, B., (2018). Kinetics of ^3H , ^{90}Sr and ^{137}Cs content changes in hydrosphere in the Vltava River system (Czech Republic). *Journal of Environmental Radioactivity*, 188, 1-10.
- Harms, P.A., Visser, A., Moran, J.E., Esser, B.K., (2016). Distribution of tritium in precipitation and surface water in California, *Journal of Hydrology*, 534, 63-72.
- Hiemstra, P.H., Pebesma, E.J., Twenhöfel, C.J.W., Heuvelink, G.B.M., (2009). Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network, *Computational Geosciences*, 35, 1711–1721.
- Horrocks, D. (1974). Applications of Liquid Scintillation Counting. Academic Press, ISBN: 0-12-356240-6, 357 s.

- IAEA, (1994). International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. International Atomic Energy Agency, 115-I, Safety Series, Vienna115-I.
- Janovics, R., Bihari, A., Papp, L., Dezso, Z., Major, Z., Sarkany, T., Bujtas, T., Veres, M., Palcsu, L. (2014). Monitoring of tritium, Co-60 and Cs-137 in the vicinity of the warmwater outlet of The Paks Nuclear Power Plant, Hungary, *Journal of Environmental Radioactivity*, 128, 20-26.
- Keser, R., Korkmaz Görür, F., Alp, İ, Okumuşoğlu, N.T., (2013). Determination of radioactivity levels and hazards of sediment and rock samples in İkizdere and Kaptanpaşa Valley, Turkey. *International Journal of Radiation Research*, 11(3), 155-165.
- Kim, CK., Rho, BH., Leeb, KJ. (1998). Environmental Tritium in the Areas Adjacent to Wolsong Nuclear Power Plant, *Journal of Environmental Radioactivity*, 41(2), 217-231.
- Krige, D., (1960). On the departure of ore value distributions from the lognormal model in South African gold mines, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1, 231-244.
- Kokubun, Y., Fujita, H., Nakano, M., Sumiya, S. (2011). "Tritium Concentration and Diffusion in Seawater Discharged from Tokai Reprocessing Plant", *Nuclear Science and Technology*, 1, 384-387.
- Küçükömeroglu, B., Kurnaz, A., Keser, R., Korkmaz, F., Okumusoglu, N. T., Karahan, G., Cevik, U., 2008. Radioactivity in sediments and gross alpha-beta activities in surface water of Firtina River, Turkey. *Environmental Geology*, 55(7), 1483–1491.
- Kucukomeroglu, B., Karadeniz, A., Damla, N., Yeşilkanat, C.M., Çevik, U., (2016). Radiological maps in beach sands along some coastal regions of Turkey, *Marine Pollution Bulletin*, 112, 255–264.
- Liu, CC., Tsai, TY., Shaeh, JC., Horng, MC., Teng, JH. (2013). Tritium Concentration of Water Samples around Taiwan after Fukushima Incident, *International Conference on Earth Observations and Societal Impacts*.
- Makhijani, A., Makhijani, A. (2009). Radioactive Rivers and Rain: Routine Releases of Tritiated Water From Nuclear Power Plants, Institute for Energy and Environmental Research (an IEER publication), 16(1), 1-20.
- Matsumoto, T., Maruoka, T., Shimoda, G., Obata, H., Kagi, H., Suzuki, K., Yamamoto, K., Mitsuguchi, T., Hagino, K., Tomioka, N., Sambandam, C., Brummer, D., Klaus, P. M. and Aggarwal, P., 2013. Tritium in Japanese precipitation following the March (2011), Fukushima Daiichi Nuclear Plant accident. *Science of the Total Environment*, 445, 365-370.
- Matheron, G., (1963). Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58, 1246–1266.

- Mohammed, N.K. and Mazunga, M.S., (2013). Natural Radioactivity in Soil and Water from Likuyu Village in the Neighborhood of Mkuju Uranium Deposit. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2013. 1-4.
- Momoshima, N., Kaji, T., Poppy, I.T., Inoue, N., Takashima, Y., (1991). Tritium concentrations of river water on northern and southern islands of Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 150 (1), 163-169.
- Mook, W. G. (2000). Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications. Unesco, Publication number: 39, 164 s.
- NCRP, (1987). Exposure of the Population of the United States and Canada from Natural Background Radiation. Report no: 94, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland.
- Nikolov, J., Todorovic, N., Jankovic, M., Vostinar, M., Bikit, I., Veskovc, M. 2013. Different methods for tritium determination in surface water by LSC, *Applied Radiation and Isotopes*, 71, 51–56.
- Ononugbo, C.P. and Tutumeni, G., 2016. Natural Radioactivity and Radiation Dose Estimation in Various Water Samples in Abua/Odua Area, Rivers State, Nigeria. *Physical Science International Journal*, 11(4): 1-12.
- Osman, A.A., Bister, S., Riebe, B., Daraoui, A., Vockenhuber, C., Wacker, L., Walther, C. (2016). Radioecological investigation of ^3H , ^{14}C and ^{129}I in natural waters from Fuhrberger Feld catchment, Northern Germany. *Journal of Environmental Radioactivity*, 165, 243-252.
- Palomo, M., Penalver, A., Aguilar, C., Borrull, F. (2007). Tritium activity levels in environmental water samples from different origins, *Applied Radiation and Isotopes*, 65, 1048–1056.
- Passo, C. and Cook, G. (1994). Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry. Packard, Publication Number: PMC0387, 156 s.
- Portakal, S., Birol, E., Ünlü, Y., Topçuoğlu, S., Varinlioğlu, A. ve Bayülgen, N. (1988). Tritiumun elektrolizle zenginleştirilmesi ve sayım yöntemi. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, yayın no: AR-251.
- Péron, O., Gégout, C., Reeves, B., Rousseau, G., Montavon, G., Landesman, C., (2016). Anthropogenic tritium in the Loire River estuary, France. *Journal of Sea Research*, 118, 69–76.
- Rahman, A.T.A., Ramli, A.T., Wood, A.K., (2004). Analysis of the concentrations of natural radionuclides in rivers in Kota Tinggi District, Malaysia. *Journal of Nuclear and Related Technologies*, 1(1), 34-45.
- Ravikumar, P. And Somashekar, R.K., (2011). Environmental Tritium and hydrochemical investigations to evaluate groundwater in Varahi and Markandeya river basins, Karnataka, India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 153-162.

- Sakip, K.N., (2015). Determination of Natural and Artificial Radionuclides in Water Samples of Habigonj District, Bangladesh. *Advances in Physics Theories and Applications*, 40, 24-28.
- Sanusi, M.S.M., Ramli, A.T., Gabdo, H.T., Garba, N.N., Heryanshah, A., Wagiran, H., Said, M.N., (2014). Isodose mapping of terrestrial gamma radiation dose rate of Selangor state, Kuala Lumpur and Putrajaya, Malaysia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 135, 67–74.
- Simek, D. and Dubsek, F. (1997). Tritium in Liquid Releases of Nuclear Power Plants with VVER and PWR Reactors and Some Ways to Solution of it's Reduction, Technical University of Brno.
- Son, JK., Kim, HG., Kong, TY., Ko, JH., Lee, GJ. (2013). Radiological effluents released and public doses from nuclear power plants in Korea, *Radiation Protection Dosimetry*, 155(4), 517–521.
- Stamoulis, K.C., Karamanisb, D., Loannides, K.G., (2011). Assessment of tritium levels in rivers and precipitation in north-western Greece before the ITER operation. *Fusion Engineering and Design*, 86, 206–213.
- TAEK, (1998). Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri. Türkiye Atom Enerji Kurumu, Ankara.
- TAEK, (2009). Türkiye'deki Çevre Radyoaktivitesinin İncelenmesi Raporu 2007. Türkiye Atom Enerji Kurumu, Ankara.
- Tanır, G., Bölükdemir, M., Koç, K., (2013). Radyasyon ve Radyasyondan Korunma Fiziği. Palme Yayıncılık, yayın no: 788, 2. Baskı, ISBN: 978-605-355-163-8, 815 sayfa.
- TCSB, Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı, (2005). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, Resmî Gazete, Sayı: 25730.
- TSE, Türk Standardları Enstitüsü, (2005). İnsani Tüketim Amaçlı Sular, TS 266, ICS 1.060.20, Ankara.
- Tüysüz, M.Z., Yorulmaz, N. ve Bozkurt, A. (2004). Co-60 radyoterapi kaynağı için monte carlo yöntemiyle uygun zırh tasarımı. Türk Fizik Derneği, 22. Fizik Kongresi, Bildiriler Kitapçığı, Bodrum.
- UNSCEAR, (1982). Sources and effects of ionising radiation: sources and biological effects, Report to the General Assembly with annexes,. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, (2000). Sources and effects of ionising radiation: sources and biological effects, Report to the General Assembly with annexes,. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- URL-1, (2016). www.taek.gov.tr/ogrenci/r05.html (14 Mart 2016).

URL-2, (2019). <https://sinop.ktb.gov.tr/TR-168344/iklim.html> (12 Temmuz 2019).

URL-3, (2019). <http://www.sinop.gov.tr/cografya> (12 Temmuz 2019).

URL-4 (2017). https://www.ttb.org.tr/userfiles/files/sinop_nukleer.pdf

Webster, R., Oliver, M.A., (2001). Geostatistics for environmental scientists, Wiley and Sons.

WHO, World Health Organization, (2004). Guidelines for Drinking Water Quality, Recommendations, Vol. 1, 3rd Edition, Geneva, Switzerland.

Venunathan, N., Kaliprasad, C. S., Narayana, Y., (2016). Natural radioactivity in sediments and river bank soil of Kallada river of Kerala, South India and associated radiological risk. *Radiation Protection Dosimetry*, 171(2), 271–276.

Yeşilkanat, C.M., Kobyay, Y., Taşkin, H., Çevik, U., (2015). Dose rate estimates and spatial interpolation maps of outdoor gamma dose rate with geostatistical methods; A case study from Artvin, Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity*, 150, 132–144.