

**KARASU KARST KAYNAĞI (BİLECİK)
HİDROJEOLJİK İNCELENMESİ**

**HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATION OF
KARASU KARSTIC SPRING (BILECIK)**

HİLAL TANRISEVEN

DR. ÖĞR. ÜYESİ ŞÜKRAN AÇIKEL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır

2024

Canım ailem için..

ÖZET

KARASU KARST KAYNAĞI (BİLECİK) HİDROJEOLOJİK İNCELENMESİ

Hilal TANRISEVEN

Yüksek Lisans, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Şükran AÇIKEL

Ekim 2024, 153 sayfa

Ülkemizde içme-kullanma suyu amaçlı kullanılan çok sayıda kaynak mevcut olup, bunlardan biri de Karasu Karst Kaynağıdır. Karasu Karst Kaynağı Orta Sakarya Havzası'nın batı bölümünde, Bilecik ilinin Bozüyük ilçesinin Bozalan köyünde yer almaktadır. Karasu Karst Kaynağı, Jura-Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonu olarak adlandırılan mermerlerden $1.842 \text{ m}^3/\text{s}$ ortalama debi ile boşalan karstik bir kaynaktır. Devlet Su İşleri Jeoteknik Hizmetler ve YAS Daire Başkanlığı tarafından yayınlanan Bilecik-Bozüyük İlçesi Karasu Kaynağı Koruma İlanı'na göre Karasu Karst Kaynağı, Bilecik ili başta olmak üzere Osmaneli, Pazaryeri, Söğüt ve Bozüyük ilçeleri ile diğer bazı yerleşim birimleri için içme-kullanma ve endüstri suyu olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, kaynağın korunması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, Karasu Karst Kaynağı, "Yeraltısularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik" ile "İçmesuyu Temin Edilen Akifer ve Kaynakların Koruma Alanlarının Belirlenmesi Hakkında Tebliğ" hükümleri doğrultusunda 2012 yılında koruma altına alınmıştır.

Karstik kaynakların, beslenme havzasında gerçekleşen doğal (yağış, sıcaklık vb.) ve beşeri (insan kaynaklı kirlilik vb.) faaliyetlerden etkilenmeleri ve bu etkiye karşı tepkileri diğer yeraltısuyu kaynaklarına göre doğrudan ve hızlı gerçekleşir. Bu doğrultuda, Karasu Karst Kaynağının gerek miktar gerekse kalite açısından sürdürülebilirliğinin sağlanması kaynağın doğru kurgulanmış hidrojeolojik kavramsal model temelinde yönetilmesi ile

mümkündür. Bu tez kapsamında; kaynağın “temsil edici kavramsal modelini” ortaya koyabilmek için, kaynak ve bağlı olduğu hidrojeolojik sistemin jeolojik ve hidrojeolojik kesitleri çizilmiş, jeomorfolojik çalışmalar yapılmış, kaynağın beslenme, depolama, dolaşım ve boşalım süreçlerinin belirlenmesi amacıyla mevcut olan kaynak debileri ile gerçekleştirilmiş kaynak çekilme analizleri, majör iyon ve izotop analizleri yapılmıştır. Karasu Karst Kaynağının, beslenme alanı olan Geyiktepe Formasyonu ve kaynağın boşalmasına geçtiği noktanın akış yukarısında kalan drenaj alanından kaynak debisine katkı olduğu sonucuna varılarak, kaynağın boşalımının %96.88’inin beslenme alanından, %3.11’nin ise kaynağın akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından süzülme ile geldiği hesaplanmıştır. Hidrojeokimyasal ve izotop analizlerine göre, tüm örneklerde baskın iyonların kalsiyum (Ca) ve bikarbonat (HCO_3) olduğu ve akifer içerisinde genel olarak yaygın dolaşımın gerçekleştiği, ana kaynak çıkışında boşalan suyun, kurak dönemde yaklaşık 13.2–18.3 yıl, yağışlı dönemde ise yaklaşık 6.3-11.4 yıl akiferde kalış süresine sahip olduğu hesaplanmıştır. Aynı zamanda EPIK yöntemi ile kaynağın bağlı bulunduğu akifere ait kirlenmeye karşı duyarlılık haritası oluşturulmuş olup, çalışma alanının %3.3’ü S1 (çok yüksek), % 39.7’si S2 (yüksek) ve %57’si ise S3 (orta) duyarlılık sınıfına girmektedir. Ayrıca iklim değişikliğinin kaynak miktarı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, RCP8.5 senaryosuna göre, 2041-2070 yılları için Karasu Karst Kaynağının boşalım debisinin %17.79 ($0.312 \text{ m}^3/\text{s}$) oranında azalacağını öngörülmektedir.

Tez çalışması, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları doğrultusunda, “Temiz Su ve Sanitasyon” ile “Herkes için Erişilebilir Su ve Atık Su Hizmetlerini ve Sürdürülebilir Su Yönetimini Güvence Altına Almak” olarak belirlenen 6. Hedef ve “İklim Eylemi” ile iklim değişikliği ve etkileri ile mücadele için acilen eyleme geçmek olarak belirlenen 13. hedefe ulaşmaya yönelik katkı sağlayacaktır. Ayrıca, tez kapsamında DSİ ve ilgili belediyeler için kaynağın sürdürülebilir yönetim planlamasına temel oluşturacak bilgiler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karasu Karst Kaynağı, hidrojeolojik kavramsal model, hidrojeokimya, izotop, iklim değişikliği.

ABSTRACT

HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATION OF KARASU KARSTIC SPRING (BILECIK)

Hilal TANRISEVEN

Master of Science, Department of Geological (Hydrogeological) Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükran AÇIKEL

October 2024, 153 pages

In Turkey, there are many springs used for drinking and domestic water one of them is Karasu Karst Spring. The Karasu Karstic Spring is located in Bozalan village of Bozüyük district, Bilecik province in the western part of the Central Sakarya Basin. The Karasu Karst Spring is a karstic spring discharging from Jurassic-Cretaceous aged marbles with an average flow rate of 1.842 m³/s. According to the Protection Announcement of the Karasu Spring in Bilecik-Bozüyük District published by the General Directorate of State Hydraulic Works (DSI) Geotechnical Services and Groundwater Department, the Karasu Karst Spring is used for drinking, domestic, and industrial water primarily for Bilecik province and Osmaneli, Pazaryeri, Söğüt, and Bozüyük districts and some other settlements. Therefore, the protection of this spring is of great importance. In this context, the Karasu Karst Spring was placed under protection in 2012 in accordance with the "Regulation on the Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration" and the "Communiqué on the Determination of Protection Zones of Aquifers and Springs Supplying Drinking Water."

Karst springs are affected more quickly by natural (e.g., precipitation, temperature) and anthropogenic (e.g., human-induced pollution) activities occurring in their recharge area are connected to other groundwater sources, and their response to this impact is also more rapid. In this respect, ensuring the sustainability of the Karasu Karst Spring in terms of

both quantity and quality is only possible by managing the spring on the basis of a properly designed hydrogeological conceptual model. Within the scope of this thesis, the geological and hydrogeological structure of the spring and its associated hydrogeological system have been identified through maps and cross-sections, geomorphological studies have been conducted, the recharge, storage, and discharge processes of the spring have been determined through existing spring flow data and drawdown analyses, and the origin and recharge mechanism of the spring have been identified through major ion and isotope analyses. It has been concluded that 96.88% of the discharge of Karasu Karst Spring is derived from infiltration within the recharge area of the Geyiktepe Formation, while 3.11% comes from the surface drainage area located upstream of the spring's discharge point. Hydrogeochemical and isotope analyses indicate that calcium (Ca) and bicarbonate (HCO_3) are the dominant ions in all samples, and that diffuse flow occurs within the aquifer. The residence time of water discharging at the main spring outlet was calculated to be approximately 13.2 to 18.3 years during dry periods and 6.3 to 11.4 years during wet periods. Additionally, a vulnerability map to pollution of the aquifer associated with the spring was created using the EPIK method, showing that 3.3% of the study area falls into the S1 (very high) vulnerability class, 39.7% into the S2 (high) class, and 57% into the S3 (moderate) class. Furthermore, in assessments of the impact of climate change on the spring's discharge, under the RCP8.5 scenario, it is projected that the discharge rate of Karasu Karst Spring will decrease by 17.79% ($0.312 \text{ m}^3/\text{s}$) between 2041 and 2070.

This thesis aims to contribute to the achievement of the 6th Goal, "Clean Water and Sanitation," and the 13th Goal, "Climate Action," as outlined by the United Nations Sustainable Development Goals, which seek to ensure the availability and sustainable management of water and sanitation for all and to take urgent action to combat climate change and its impacts. Furthermore, within the scope of the thesis, information that will form the basis for the sustainable management planning of the spring for the General Directorate of State Hydraulic Works and related municipalities.

Keywords: Karasu Karstic Spring, hydrogeological conceptual model, hydrogeochemistry, isotop, climate change.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını hazırlama sürecinde destek ve katkılarından dolayı başta tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şükran Açıknel'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Bilgisi ve deneyimi ile bana her aşamada rehberlik etmiştir.

Ayrıca, jürimde yer alan Prof. Dr. Mehmet Ekmekçi, Doç. Dr. Harun Aydın, Dr. Öğr. Üyesi Türker Kurttaş ve Doç. Dr. Bedri Kurtuluş'a, değerli zamanlarını ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve katkı sundukları için teşekkür ederim.

Özellikle, arazi çalışmalarım sırasında değerli katkıları ve rehberlikleriyle yanımda olan Prof. Dr. Mehmet Ekmekçi'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Şükran Açıknel'e en derin minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Devlet Su İşleri'nde görev yapan Yüksek Hidrojeoloji Mühendisi Nami Erdoğan'a, bu tez kapsamında değerli yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışma alanından temin ettiğim su örneklerinin analizini gerçekleştiren Öğr. Gör. Füsun Muslu'ya, özverili çalışmaları için teşekkür ederim.

Bünyesinde yer aldığım Yüksel Proje A.Ş.'nin Jeolojik Hizmetler Departmanı müdürü Dr. Kürşat Tokgözoğlu ve müdür yardımcısı Yüksek Jeoloji Mühendisi Erkil Onur Tarı'ya, destekleri için teşekkür ederim.

Tez sürecini birlikte atlattığım ve aynı zamanda çalışma arkadaşım Nuryıldız Şahiner'e, ayrıca desteği için teşekkür ederim.

Maddi ve manevi açıdan her daim yanımda olan canım aileme, yakın arkadaşlarıma ve en çok da bu süreçte kendime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Çalışma ve Değerlendirme Yöntemi	2
1.3. Tez Alanına ait Genel Bilgiler.....	4
1.3.1. Konum, Ulaşım ve Yerleşim.....	4
1.3.2. Çalışma Alanı Sınırları	5
1.3.3. Morfoloji	5
1.3.4. İklim ve Bitki Örtüsü	10
1.3.5. Nüfus ve Sosyo-ekonomik Durum.....	12
1.3.6. Arazi Kullanımı	13
1.4. Önceki Çalışmalar	15
2. JEOLojİ.....	23
2.1. Stratigrafik Yapı	23
2.1.1. Alınca Formasyonu (Pzsa).....	26
2.1.2. Ortaburun Üyesi (Pzsao).....	26
2.1.3. Taşarası Formasyonu (Pzst).....	26
2.1.4. Sakarya Graniti (Cs)	26
2.1.5. Köyiçi Formasyonu (JKk).....	26
2.1.6. Geyiktepe Formasyonu (TRKg).....	27
2.1.7. Devlez Formasyonu (Kd).....	27
2.1.8. Arifler Melanjı (Ka).....	27

2.1.9. Tavşanlı Ofiyoliti (Kt).....	29
2.1.10. Alaçam Graniti (Tea).....	29
2.1.11. Tunçbilek Formasyonu (Tmt).....	29
2.1.12. Demirbilek Üyesi (Tmtd)	29
2.1.13. Karaköy Volkanitleri (Tmk).....	29
2.1.14. Emet Formasyonu (Tmple).....	30
2.1.15. Yamaç Molozu (Qym).....	30
2.1.16. Alüvyon (Qal).....	30
2.2. Jeolojik Kesitler	30
2.3. Jeolojik Evrim	35
2.4. Tektonizma.....	35
3. HİDROJEOLJİ.....	38
3.1. Hidrostratigrafik Birimler	38
3.2. Hidrojeolojik Kesitler	40
4. HİDROLOJİ.....	45
4.1. Su Noktaları	45
4.1.1. Akarsular	45
4.1.2. Kaynaklar.....	47
4.2. Hidrometeorolojik Analiz	50
4.2.1. Yağış.....	51
4.2.2. Kar Yağışı.....	55
4.2.3. Sıcaklık	57
4.2.4. Buharlaşma-Terleme	58
4.2.5. Yüzeysel Akış ve Süzülme	64
4.2.6. Su Bütçesi Hesaplamaları.....	70
5. HİDROJEOKİMYA VE İZOTOP HİDROLOJİSİ.....	73
5.1. Örnekleme Yapılan Lokasyonlar	73
5.2. Hidrojeokimyasal Analizler	78
5.2.1. Yerinde Ölçülmüş Fizikokimyasal Parametrelerin Değerlendirilmesi.....	78
5.2.2. Laboratuvar Sonuçlarının Değerlendirilmesi	83
5.3. Su Kalitesi	93

5.4. İzotop Analizleri.....	98
5.4.1. Tritiyum	98
6. KARASU KARST KAYNAĞI AKİFERİNİN HİDRODİNAMİĞİ	103
6.1. Kaynak Sınıflandırması	103
6.2. Hidrograf ve Kaynak Çekilme Analizi.....	106
6.3. Karasu Karst Kaynağının Kavramsal Modeli.....	115
7. KARASU KARST KAYNAĞI BESLENME ALANI DUYARLILIK ANALİZİ 119	
7.1. Epikarst Durumu (E)	120
7.2. Koruyucu Örtü (P).....	122
7.3. Süzülme Durumu (I).....	124
7.4. Karstik Kanal Gelişimi (K)	126
7.5. Nihai Sınıflandırma (EPIK).....	127
8. KARASU KARST KAYNAĞININ İKLİM SENARYOLARI İLE MİKTAR DEĞERLENDİRMESİ	131
9. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	137
9.1. Sonuçlar.....	137
9.2. Tartışma ve Öneriler.....	143
10. KAYNAKLAR.....	146
ÖZGEÇMİŞ	153

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Çalışma alanı sınırları.	5
Şekil 1.2.	Çalışma alanına ait yerbulduru haritası.	6
Şekil 1.3.	Çalışma alanı doruk ağı haritası.	7
Şekil 1.4.	Çalışma alanı ait kot dağılım haritası.	8
Şekil 1.5.	Çalışma alanına ait alan – kot grafiği.	8
Şekil 1.6.	Kaynak akış yukarısında kalan drenaj alanı alan-kot grafiği.	9
Şekil 1.7.	Çalışma alanına ait eğim haritası.	9
Şekil 1.8.	Bozüyük MGİ'de ölçülmüş yıllık toplam yağış ve ortalama sıcaklık grafiği.	11
Şekil 1.9.	Bozüyük MGİ mevsimlere göre ortalama yağış miktarı dağılımı (mm).	11
Şekil 1.10.	Çalışma alanı arazi kullanım dağılımı.	13
Şekil 1.11.	CORINE 2018 verilerine göre çalışma alanına ait arazi kullanım haritası.	14
Şekil 2.1.	Çalışma alanına ait sadeleştirilmiş jeoloji haritası MTA (2011)'den değiştirilmiştir. (Jeolojik Etütler Dairesi Başkanlığı İ23-a2-a3 ve İ23-b1-b2-b3-b4 1/25000 ölçekli jeoloji haritaları ve İ23 1/100000 ölçekli jeoloji haritalarından derlenmiştir).	24
Şekil 2.2.	Çalışma alanına ait sadeleştirilmiş stratigrafik kolon kesit (MTA, 2011)'den değiştirilmiştir. (Kütahya İ-23 paftasına ait jeoloji raporundan derlenmiş ve değiştirilerek alınmıştır).	25
Şekil 2.3.	a) Geyiktepe Formasyonu (Trkg) genel görünüm, b ve c1-c2) Geyiktepe Formasyonu mermerlerine ait terkedilmiş ocak görüntüsü.	28
Şekil 2.4.	Çalışma alanına ait B – D doğrultulu A-A' kesiti.	32
Şekil 2.5.	Çalışma alanına ait GD – KB doğrultulu B-B' kesiti.	33
Şekil 2.6.	Çalışma alanına ait GB – KD doğrultulu C-C' kesiti.	34
Şekil 2.7.	Türkiye depremsellik ve diri fay gösterimi (AFAD, 2024).	36
Şekil 2.8.	Çalışma alanında gözlenen fay düzlemi.	37
Şekil 2.9.	Çalışma alanına ait çizgisellik haritası.	37
Şekil 3.1.	Çalışma alanına ait hidrojeoloji haritası.	40
Şekil 3.2.	Çalışma alanına ait B - D doğrultulu hidrojeoloji kesiti.	42
Şekil 3.3.	Çalışma alanına ait GD - KB doğrultulu hidrojeoloji kesiti.	43

Şekil 3.4.	Çalışma alanına ait GD - KB doğrultulu hidrojeoloji kesiti.	44
Şekil 4.1.	Çalışma alanı drenaj ağı haritası.	46
Şekil 4.2.	Kaynak boşalımı mansabından Karasu Deresi görüntüsü.	46
Şekil 4.3.	a) Karasu Karst Kaynağı ana çıkış yeri, b) Karasu Deresi, c) Karasu Karst Kaynağı kaptajı ve d) Karasu Karst Kaynağı tahsisi sonrası doğal akışa geçtiği kanal kesiti.	47
Şekil 4.4.	a1-a2)- Karasu Karst Kaynağı ilk çıkış, b- Karasu Karst Kaynağı ana çıkış noktası (Eylül, 2023).	48
Şekil 4.5.	Karasu Karst Kaynağı beslenme alanındaki diğer kaynakların yaklaşık konumları.	49
Şekil 4.6.	Çalışma alanı genel özeti.	49
Şekil 4.7.	Çalışma alanına ait MGİ noktaları lokasyonları.	50
Şekil 4.8.	Çalışma alanı ve çevresindeki MGİ yağış ölçümlerinin veri aralığı.	51
Şekil 4.9.	Çalışma alanı kot-yağış ilişkisi (a: tüm kayıtlara göre, b: ortak periyoda göre).	52
Şekil 4.10.	Çalışma alanı kot-yağış ilişkisi (a: tüm kayıtlara göre, b: ortak periyoda göre).	53
Şekil 4.11.	Bozüyük MGİ uzun yıllar aylık ortalama yağış grafiği.	54
Şekil 4.12.	Bozüyük MGİ yağışları uzun yıllar eklenik sapma grafiği.	55
Şekil 4.13.	Dodurga beldesine ait aylara göre ortalama yağış grafiği (Weather Spark, 2024).	55
Şekil 4.14.	Bozüyük MGİ'ye ait kar yüksekliği ve kar su eşdeğeri.	56
Şekil 4.15.	Dodurga ilçesine ait kar yüksekliği ve kar su eşdeğeri (Weather Spark, 2024).	56
Şekil 4.16.	Bozüyük MGİ 1960-2022 yılları arası aylık ortalama sıcaklık değerleri.	57
Şekil 4.17.	Dodurga ilçesi aylık ortalama sıcaklık değerleri (Weather Spark, 2024).	58
Şekil 4.18.	Bozüyük MGİ verileri ile hesaplanmış ETp ve yağış ilişkisi.	62
Şekil 4.19.	Weather Spark verileri ile hesaplanmış ETp ve yağış ilişkisi.	62
Şekil 4.20.	Weather Spark (Dodurga beldesi) yağış verisi ile elde edilen yağış-akım grafiği (CN:72 için).	66
Şekil 4.21.	Çalışma alanı toprak haritası.	68

Şekil 4.22.	Bozüyük MGİ yağış verisi ile elde edilen yağış-akım grafiği (CN:67 için).	69
Şekil 4.23.	Weather Spark (Dodurga beldesi) yağış verisi ile elde edilen yağış-akım grafiği (CN:67 için).....	69
Şekil 5.1.	Çalışma alanındaki yerinde ölçüm ve örnekleme yapılan su noktaları lokasyon haritası.....	75
Şekil 5.2.	Çalışma alanı ve çevresinde yerinde ölçüm ve örnekleme yapılan su noktalarına ait fotoğraflar.....	76
Şekil 5.3.	Örnekleme dönemlerindeki sıcaklık değişimleri.	80
Şekil 5.4.	Örnekleme dönemlerindeki pH değişimleri.	80
Şekil 5.5.	Örnekleme dönemlerindeki ÖEİ değişimleri.	81
Şekil 5.6.	Örnekleme dönemlerindeki TÇM değişimleri.	82
Şekil 5.7.	Örnekleme dönemlerindeki çözünmüş oksijen (%) değişimleri.	82
Şekil 5.8.	K101-K102-K103 ve K104 kodlu örneklerin kurak ve yağışlı dönem majör iyon konsantrasyonlarının karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.9.	Çalışma alanı ve çevresindeki kurak (a) ve yağışlı (b) dönemde alınan su örneklerine ait dairesel diyagramlar.....	87
Şekil 5.10.	Çalışma alanı ve yakın dolayında kurak (a) ve yağışlı (b) dönemlerde örneklenen su noktalarına ait Piper Diyagramı.....	88
Şekil 5.11.	Çalışma alanı ve çevresindeki kurak (a) ve yağışlı (b) dönemlerde alınan su örneklerine ait Schoeller Diyagramı.....	89
Şekil 5.12.	Kurak (a1-a2) ve yağışlı (b1-b2) dönemlere ait Gibbs Diyagramları.	90
Şekil 5.13.	Kurak döneme ait doygunluk indis grafiği.....	92
Şekil 5.14.	Yağışlı döneme ait doygunluk indis grafiği.	93
Şekil 5.15.	Kurak dönem örneklerine ait ABD Tuzluluk Diyagramı.....	95
Şekil 5.16.	Yağışlı dönem örneklerine ait ABD Tuzluluk Diyagramı.	96
Şekil 5.17.	K101, K102, K103 ve K104 kodlu örneklerin kurak ve yağışlı dönemdeki trityum içerikleri.....	99
Şekil 5.18.	Yağışların trityum içeriklerine göre küresel dağılımı (Wassmuth ve ark., 2022).	100
Şekil 5.19.	6 TU için kurak dönem ve yağışlı dönem için örnek yaşları.	102
Şekil 5.20.	8 TU için kurak dönem ve yağışlı dönem için örnek yaşları.	102
Şekil 5.21.	Kurak dönem yağış içeriği 6 TU ve 8 TU için örnek yaşları.	102

Şekil 5.22.	Yağışlı dönem yağış içeriği 6 TU ve 8 TU için örnek yaşları.	102
Şekil 6.1.	Karasu Karst Kaynağına ait debilerin aylık değişkenlik katsayıları.	104
Şekil 6.2.	Yıllara göre debi-zaman grafikleri.	108
Şekil 6.3.	1978-1980 yılları arası Karasu Karst Kaynağı akım hidrografı.	109
Şekil 6.4.	2001-2006 yılları arası Karasu Karst Kaynağı akım hidrografı.	109
Şekil 6.5.	1978 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	109
Şekil 6.6.	1979 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	110
Şekil 6.7.	1980 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	110
Şekil 6.8.	2001 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	111
Şekil 6.9.	2002 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	111
Şekil 6.10.	2003 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	111
Şekil 6.11.	2004 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	112
Şekil 6.12.	2005 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	112
Şekil 6.13.	2006 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.	113
Şekil 6.14.	Karasu Karst Kaynağı kavramsal modeli şematik gösterimi.	117
Şekil 6.15.	Karasu Karst Kaynağı kavramsal modeli blok diyagramı.	118
Şekil 7.1.	Çalışma alanı için epikarst sınıflandırma gösterimi.	121
Şekil 7.2.	Çalışma alanına ait epikarst (E) parametresi sınıflandırması.	121
Şekil 7.3.	Çalışma alanı için koruyucu örtü sınıflandırma gösterimi.	123
Şekil 7.4.	Çalışma alanına ait koruyucu örtü (P) parametresi sınıflandırması.	123
Şekil 7.5.	Çalışma alanı için süzülme durumu (I) sınıflandırma gösterimi.	125
Şekil 7.6.	Çalışma alanına ait süzülme durumu (I) parametresi sınıflandırması. ..	125
Şekil 7.7.	Çalışma alanına ait karstik kanal gelişimi (K) parametresi sınıflandırması.	127
Şekil 7.8.	Çalışma alanına ait duyarlılık haritası.	129
Şekil 7.9.	Çalışma alanına ait F indeksi dağılımı.	130
Şekil 8.1.	RCP4.5 senaryosuna göre havzalara ait sıcaklık ve yağış tahminleri (MGM, 2015).	132
Şekil 8.2.	RCP8.5 senaryosuna göre havzalara ait sıcaklık ve yağış tahminleri (MGM, 2015).	133
Şekil 8.3.	RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yağış, potansiyel buharlaşma- terleme, gerçek buharlaşma-terleme ve fazla su miktarları.	136

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Bozüyük MGİ (1960-2022) uzun yıllar aylık ortalama, en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.....	11
Çizelge 1.2.	Nüfus istatistikleri ve yıllık nüfus artış hızı (TUIK, 2024).....	12
Çizelge 1.3.	Çalışma alanına ait arazi kullanım istatistikleri.	14
Çizelge 4.1.	Çalışma alanı ve çevresinde bulunan MGİ'lere ait genel bilgiler.....	51
Çizelge 4.2.	Bölgedeki MGİ'lerin ölçüm aldığı tüm yıllar ve 2018-2022 yılları arası ortalama yıllık yağış (mm) ve istasyon kot bilgisi.	52
Çizelge 4.3.	Determinasyon katsayısı ve korelasyon katsayısı değerleri.....	52
Çizelge 4.4.	Determinasyon katsayısı ve korelasyon katsayısı değerleri.....	53
Çizelge 4.5.	Karın yapısı ve su eşdeğeri (Ankara Üniversitesi, 2013).....	56
Çizelge 4.6.	MGİ ve iklim-uydu modellemesine göre sıcaklık değerleri çizelgesi.....	57
Çizelge 4.7.	Bozüyük MGİ verileri ile hesaplanmış Thornthwaite-Mather su bütçesi.	60
Çizelge 4.8.	Weather Spark web sitesi Dodurga ilçesi verileri ile hesaplanmış Thornthwaite-Mather su bütçesi.	61
Çizelge 4.9.	Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin genel özeti.	63
Çizelge 4.10.	Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı (269.81 km ²) için istasyon özelinde Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin genel özeti.	63
Çizelge 4.11.	Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanı (10.6 km ²) için istasyon özelinde Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin genel özeti.....	64
Çizelge 4.12.	Arazi kullanımını ve hidrolojik toprak gruplarına göre eğri numarası değerleri (Chow ve ark., 1988; Özdemir, 2007).	68
Çizelge 4.13.	Hesaplanan yüzeysel akış miktarları (beslenme alanı).	69
Çizelge 4.14.	Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı hidrolojik su bütçesi (10.6 km ² yüzeysel drenaj alanı için).	70
Çizelge 4.15.	Karasu Karst Kaynağı su bütçesi (269.81 km ² beslenme alanı için).	72
Çizelge 5.1.	Çalışma alanındaki örnekleme noktalarına ait genel bilgiler.....	74
Çizelge 5.2.	Su örneklerine ait yerinde ölçülen fizikokimyasal parametreler.....	79

Çizelge 5.3.	İnceleme alanı ve yakın dolayında kurak ve yağışlı dönemde örnekleme yapılan su noktalarına ait majör iyon analiz sonuçları	84
Çizelge 5.4.	Kurak döneme ait örneklerin anyon-katyon sıralaması ve su fasiyesi sınıflandırması.	85
Çizelge 5.5.	Yağışlı döneme ait örneklerin anyon-katyon sıralaması ve su fasiyesi sınıflandırması.	86
Çizelge 5.6.	Kurak döneme ait doygunluk indisi analiz sonuçları.	91
Çizelge 5.7.	Yağışlı döneme ait doygunluk indisi analiz sonuçları.	92
Çizelge 5.8.	Çalışma alanı ve çevresinden alınan su örneklerinin sertlik sınıflaması.	93
Çizelge 5.9.	İçme suyu standartları ve su örneklerinin ölçülen değerleri.	97
Çizelge 5.10.	Örneklerin trityum analiz sonuçları.	99
Çizelge 5.11.	Örneklerin görelî yaşları.	101
Çizelge 6.1	Boşalım miktarına göre kaynak sınıflaması (Meinzer, 1923).	104
Çizelge 6.2.	Karasu Karst Kaynağı aylık ortalama debi değerleri.	105
Çizelge 6.3.	Karasu Karst Kaynağına ait yıllara göre çekilme dönemleri.	107
Çizelge 6.4.	Karasu Karst Kaynağı 1978-1980 ve 2001-2006 yılları arası debi değişkenlik yüzdeleri ve çekilme katsayı değerleri.	113
Çizelge 6.5.	Maillet (1905) yöntemine göre kaynak çekilme analiz sonuçları.	114
Çizelge 6.6.	Boşalım katsayılarına göre akifer tipleri sınıflandırması (Korkmaz, 1989).	114
Çizelge 6.7.	Kaynak çekilme katsayısı ve eşitliğine göre karstlaşma derecesi sınıflandırması (Malik ve Vojtkova, 2012) (Değiştirilmiş ve sadeleştirilmiştir.)	115
Çizelge 7.1.	EPIK parametrelerine ait standart ağırlık katsayıları (Doerfliger ve ark., 1999).	120
Çizelge 7.2.	Epikarst parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).	120
Çizelge 7.3.	Koruyucu örtü parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).	122
Çizelge 7.4.	Süzülme koşulları parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).	124
Çizelge 7.5.	Karstik kanal gelişimi parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).	126

Çizelge 7.6.	EPIK duyarlılık indisi ve duyarlılık sınıfları (Doerfliger ve ark., 1999).	127
Çizelge 8.1.	RCP8.5'e göre 2041-2070 yılları için Thornthwaite - Mather su bütçe hesabı (Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı).....	135
Çizelge 8.2.	RCP8.5'e göre 2041-2070 yılları için Thornthwaite - Mather su bütçe hesabı (Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı için).....	135

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Br ⁻	Bromür
Ca ²⁺	Kalsiyum
CO ₃ ²⁻	Karbonat
Cl ⁻	Klorür
CN	Eğri Numarası
CV	Değişkenlik Katsayısı
°C	Santigrat
ÇO	Çözünmüş Oksijen
Eİ	Elektriksel İletkenlik
EN	Elektro-nötralite
ETg	Gerçek Buharlaşma-Terleme
ETp	Potansiyel Buharlaşma-Terleme
F ⁻	Florür
H ³	Tritiyum
ha	Hektar
HCO ₃ ⁻	Bikarbonat
K ⁺	Potasyum
l	litre
km	Kilometre
km ²	Kilometrekare
Li ⁺	Lityum
m	metre
meq	Miliekivelan

m^2	metrekare
m^3	metreküp
mg	Miligram
ml	mililitre
mm	milimetre
Mg^{2+}	Magnezyum
Na^+	Sodyum
NH_4^+	Amonyum
NO_2^-	Nitrit
NO_3^-	Nitrat
ÖEİ	Özgöl Elektriksel İletkenlik
P	Yağış
pH	Hidrojen İyonu Aktivitesi Negatif Logaritması
PO_4^{3-}	Fosfat
ppm	Milyonda Bir
s	saniye
SO_4^{2-}	Sülfat
T	Sıcaklık (°C)
TU	Trityum Birimi
SI	Doygunluk İndisi
Q_d	Debi Değişkenliği
Q_{min}	Minumum Debi
α	Kaynak Çekilme Katsayısı
μS	MikroSiemens
%	Yüzde
‰	Binde

Kısaltmalar

AFAD	Afet ve Acil Durum Müdürlüğü
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CMYK	Cyan, Magenta, Yellow, Key (Black)
DSİ	Devlet Su İşleri
GNUP	Jeolojik Ulusal Yeraltı Programı
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
HKEP	Hidrojeolojik Karakterizasyon ve Etüd Projesi
IAP	İyon Aktivite Çarpımı
IRAP	İl Afet Risk Azaltma Planı
MGİ	Meteoroloji Gözlem İstasyonu
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NRCS	Doğal Kaynakları Koruma Servisi
SCS-CN	Toprak Koruma Servisi - Sentetik Birim Hidrografi
TAGEM	Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
USGS	Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu
WRI	Dünya Kaynakları Enstitüsü

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Su, günümüzde giderek azalan en önemli yaşam kaynağıdır. Nüfusun artışı ile, hızlı sanayileşme ve kentleşme, dünya genelinde su tüketiminin önemli ölçüde de artmasına yol açmaktadır. Dünya Su Konseyi'nin, 2021 yılında yaptığı açıklamaya göre, 1960'lardan bu yana dünya nüfusunun üç katına çıkması, su kullanımının da altı kat artmasına neden olmuştur (Dışişleri Bakanlığı, 2024). Nüfus artışı ve iklim değişikliği, su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmakta ve her geçen yıl suya olan talebin karşılanmasını daha da zorlaştırmaktadır. Ülkemizde 2022 yılı itibariyle kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı yaklaşık 1322 m³ olarak belirlenmiştir (DSİ, 2023). 2030 yılına gelindiğinde ise Türkiye nüfusunun 100 milyona ulaşacağı tahmin edilmekte olup, bu durumda kişi başına düşen su miktarının yaklaşık 1000 m³ olacağı öngörülmektedir (TAGEM, 2021). Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI, 2023) verilerine göre, Hindistan, Birleşik Arap Emirlikleri, İsrail, Pakistan ve Lübnan gibi ülkeler su sıkıntısı çeken ülkeler arasında ön planda yer alırken, Türkiye 32. sırada bulunmaktadır. Bu sıralamaya göre Türkiye, yüksek su sıkıntısı çeken ülkeler arasındadır.

Hızla artan nüfus ve iklim değişikliğinin getirdiği olumsuz etkiler, tatlı su kaynaklarının miktarlarında azalmaya, kalitelerinde ise ciddi bozulmalara neden olmaktadır. İklim değişikliği ve aşırı su tüketiminin yarattığı baskılar, sürdürülebilir su kaynakları yönetiminin önemini her zamankinden daha fazla gündeme getirmektedir. Tatlı su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve yönetimi kaynağın ve kaynağın bağlı olduğu akifer sisteminin hidrojeolojik kavramsal modelinin ortaya konmasını gerektirmektedir.

Karasu Karst Kaynağı, boşaldığı bölgeye içme suyu sağlayan Türkiye'de önemli kaynaklardan biridir. Bozüyük ilçesinin tamamı ile birlikte Bilecik ilinin büyük bölümüne, Karasu Karst Kaynağından içme suyu temin edilmekte olup, ortalama debisi 1.842 m³/s'dir. Aynı zamanda, Karasu Karst Kaynağı ile bu kaynağın oluşturduğu dere ve vadi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 13.09.2021 tarihinde "Doğal Sit-Nitelikli Doğal Koruma Alanı" ve "Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı" olarak ilan edilmiştir (Bilecik Valiliği, 2021). Gerçekleştirilen

bu tez çalışmasında ortaya konan hidrojeolojik kavramsal modelin, Karasu Karst Kaynağının günümüzde ve gelecekte gerek miktarında meydana gelebilecek azalmalara karşın gerekse kalitesinin korunması için alınacak önlemlere temel oluşturulması amaçlanmaktadır. Ayrıca, tezin karar vericilere Karasu Karst Kaynağı ve bu kaynağa bağlı ekosistemlerin sürdürülebilir yönetiminin doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yol gösterici olması hedeflenmektedir. Bu hedefe ulaşmak için Karasu Karst Kaynağının bağlı olduğu hidrojeolojik sistemi beslenme-dolaşım-boşalım ilişkileri ile yansıtan hidrojeolojik kavramsal modelin ortaya konulması tezin ana amacıdır.

1.2. Çalışma ve Değerlendirme Yöntemi

Tez çalışması kapsamında bir hidrojeolojik sistemin sınırları ile dinamiğini tanımlayan beslenme-dolaşım-boşalım ilişkileri ortaya konarak, bir kavramsal modelde sentezlenmesi yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımın gerektiği verilerle ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Çalışma alanı ve çevresi ile ilgili, mevcut jeolojik, hidrolojik (meteorolojik veriler ve akım verileri) ve hidrojeolojik veriler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ve çevrimiçi kaynaklardan elde edilmiştir.

Çalışma alanının bulunduğu bölgede MTA tarafından hazırlanan 1/100000 ve 1/25000 ölçekli jeoloji haritaları, hidrojeolojik kavramsal modeli ortaya çıkarmak amacıyla, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı programlara aktarılmıştır. Tez çalışmaları kapsamında mevcut jeolojik çalışmalar, arazi çalışmaları ve uydu görüntülerinin analizi ile kontrol edilmiş ve çalışma alanı özelinde jeoloji haritası ve çeşitli tematik haritalar oluşturulmuştur.

Çalışma alanı ve yakın dolayındaki su noktaları (kaynak, akarsu, çeşme, vb.), Eylül 2023 ve Mayıs 2024 tarihlerinde gerçekleştirilen arazi çalışmaları ile ofis çalışmaları sonucunda tespit edilmiş, doğru konumlandırma işlemi GPS (Küresel Konumlama Sistemi) ile gerçekleştirilmiş ve CBS tabanlı veri tabanına aktarılmıştır.

Çalışma alanı ve yakın dolayında Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'ne bağlı Meteoroloji Gözlem İstasyonları (MGİ) tespit edilmiş, bu istasyonlarda gözlenen aylık toplam yağış, sıcaklık, buharlaşma, vb. veriler temin edilmiştir. Karasu Karst Kaynağının beslenme verilerini temsil eden en uygun istasyon belirlenmiş olup; kaynağın yıllık yenilenebilir potansiyelini ortaya koymak amacıyla elde edilen veriler üzerinden su bütçesi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Karasu Karst Kaynağının beslenme-dolaşım-depolama ve boşalım ilişkilerinin incelenerek bir hidrojeolojik kavramsal modelde sentezlenmesi amacıyla ofis ve ön arazi çalışmaları sırasında belirlenen su noktalarından yerinde/arazide ölçümler ile kimyasal (majör iyon) ve döteryum, oksijen-18, trityum analizleri için de örnekleme çalışmaları yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında belirlenen her bir su noktasında (kaynak, dere, kanal, çeşme, vb.); analiz edilecek kimyasal parametreler ile izotop analiz sonuçlarından elde edilen veriler, çalışma alanına ait hidrojeoloji haritasının oluşturulmasına, çalışma alanında beslenme-boşalım ilişkilerinin belirlenmesine, su-kayaç etkileşim süreçlerinin aydınlatılmasına, suların kökeninin belirlenmesine ve hidrojeolojik kavramsal modelin oluşturulmasına temel oluşturmuştur. Su kimyası ve trityum analizlerinin doğru yapılabilmesi için çalışma alanından toplanan su örnekleri için, örnekleme ve koruma prosedürü APHA ve ark. (1989)'e göre gerçekleştirilmiş ve alınan örnekler 24 saat içinde analiz yapılmak üzere Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası ve Çevresel Trityum Laboratuvarı'na ulaştırılmıştır. Örneklerle ait trityum analizleri gerçekleştirilmiş, ancak döteryum, oksijen-18 izotop analizleri makine arızası nedeniyle okunamamış ve değerlendirme yapılamamıştır.

Çalışma alanındaki su noktalarında majör iyon ve trityum analizleri için örnekleme, farklı hacimlerdeki (125 ml ve 500 ml) HP (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) plastik şişelere alınmıştır. HP şişelere alınmış örnekleme sürecinde her bir şişe örnekleme yapılacak lokasyondaki su ile birkaç defa yıkanmış, hava kabarcığı kalmayacak şekilde örnek alınmış ve atmosferle temas etmeden örnek şişesinin tıpası ve kapağı su içinde kapatılmıştır. Etiketlenen örnekler, analiz edilene kadar buz kapları ve buzdolabında 4°C koşullarında muhafaza edilmiştir.

Arazi çalışmaları, mevcut veriler ve tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların (jeolojik çalışmalar, hidrojeolojik ve hidrolojik değerlendirmeler, hidrojeokimyasal ve izotopik analizler ile) birlikte değerlendirilmesi sonucunda, Karasu Karst Kaynağını temsil eden bir hidrojeolojik kavramsal model ortaya konmuştur.

Tez kapsamında, Karasu Karst Kaynağının bağlı olduğu akifer sisteminin, karstik alanlar için Avrupa Birliği mevzuatında önerilen bir metodoloji olan EPIK metodu (Doerfliger, 1999) kullanılarak yeraltı suyu duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanı içerisinde bulunan karstik yapılar uydu görüntülerinden ve HGM topoğrafik haritalarından sayısallaştırılmıştır.

1.3. Tez Alanına ait Genel Bilgiler

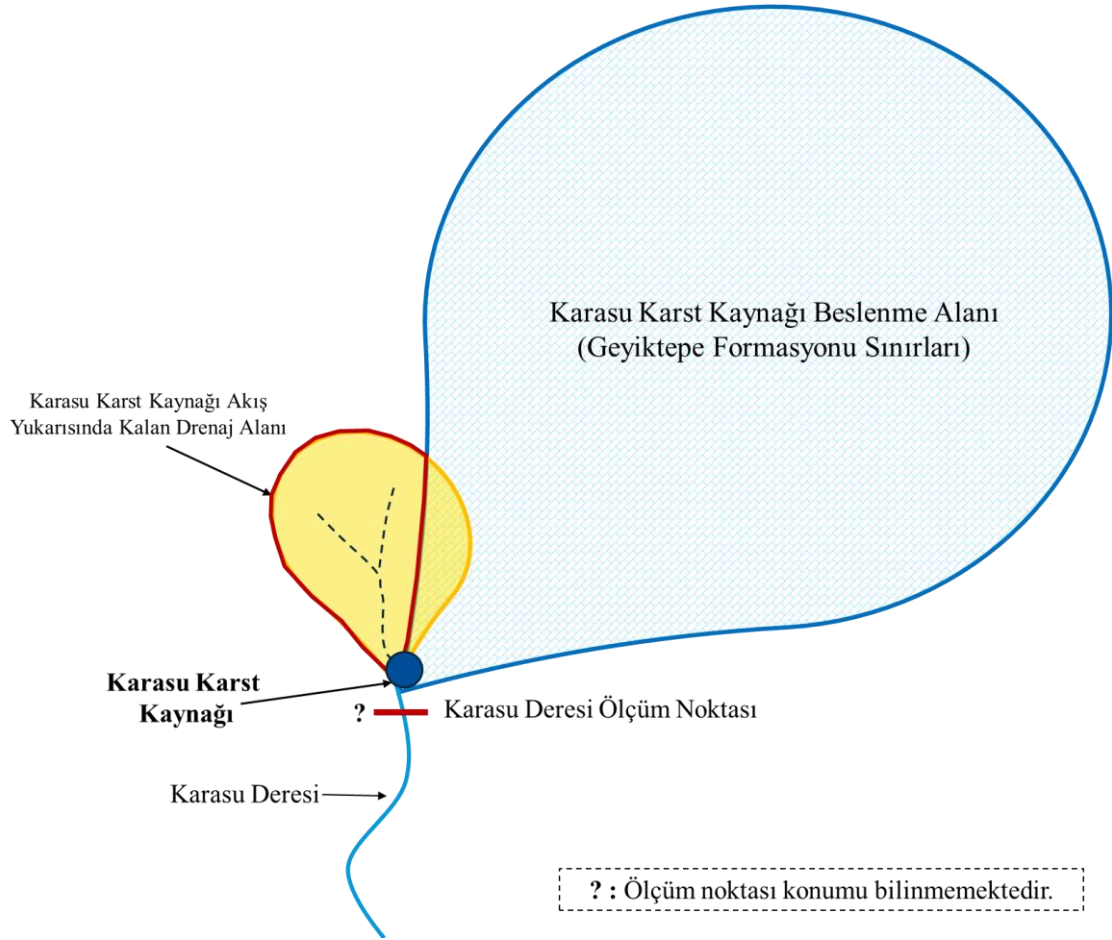
Çalışma alanı genel hatlarıyla, konum, ulaşım, yerleşim, morfoloji, iklim ve bitki örtüsü, nüfus, sosyo-ekonomik durum ve arazi kullanımını açısından değerlendirilmiştir.

1.3.1. Konum, Ulaşım ve Yerleşim

Çalışma alanı, Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer almakta olup, Sakarya Havzası'nın Orta Sakarya Alt Havzası sınırları içerisinde bulunmaktadır. Karasu Karst Kaynağı, Bilecik ili Bozüyük ilçesinin yaklaşık 10 km güneybatısında, 1/25000 ölçekli Kütahya İ23-b3 paftasında Bozalan mevkinde boşalır. Bozüyük ilçesi, kuzeyde Bilecik, kuzeydoğuda Söğüt, güneydoğuda İnönü (Eskişehir), güneyde Kütahya ve kuzeybatıda ise Pazaryeri ilçesi ile çevrilidir. Bilecik, Kütahya ve Bursa illerinin kesişme noktasında yer alan çalışma alanının büyük kısmı, Bilecik il sınırları içerisinde kalmaktadır. Karasu Karst Kaynağı, Bozalan köyünün yaklaşık 1.5 km kuzeybatısında olup, kaynağa Bozüyük'ten, Bozüyük-Kütahya karayolu takip edilerek güneybatıya doğru ilerlenip, Bozalan yolu yönünde sağa ayrılan asfalt yol ile ulaşım sağlanabilmektedir (Şekil 1.2). Karasu Karst Kaynağının boşaldığı Bozalan Mahallesi'nin çevresindeki yerleşim yerlerinin başlıcaları Kuyupınar, Kapanalan, Erikli ve Camiliyayla'dır.

1.3.2. Çalışma Alanı Sınırları

Çalışma alanı, Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı ve kaynak akış yukarısında kalan drenaj alanı şeklinde birbiriyle ilişkili iki alan şeklinde sınırlandırılmıştır (Şekil 1.1). Bu alanlar jeolojik, hidrojeolojik haritalar ve kesitler doğrultusunda belirlenip, ayrıntılı çalışmalar ileriki bölümlerde ele alınmıştır.

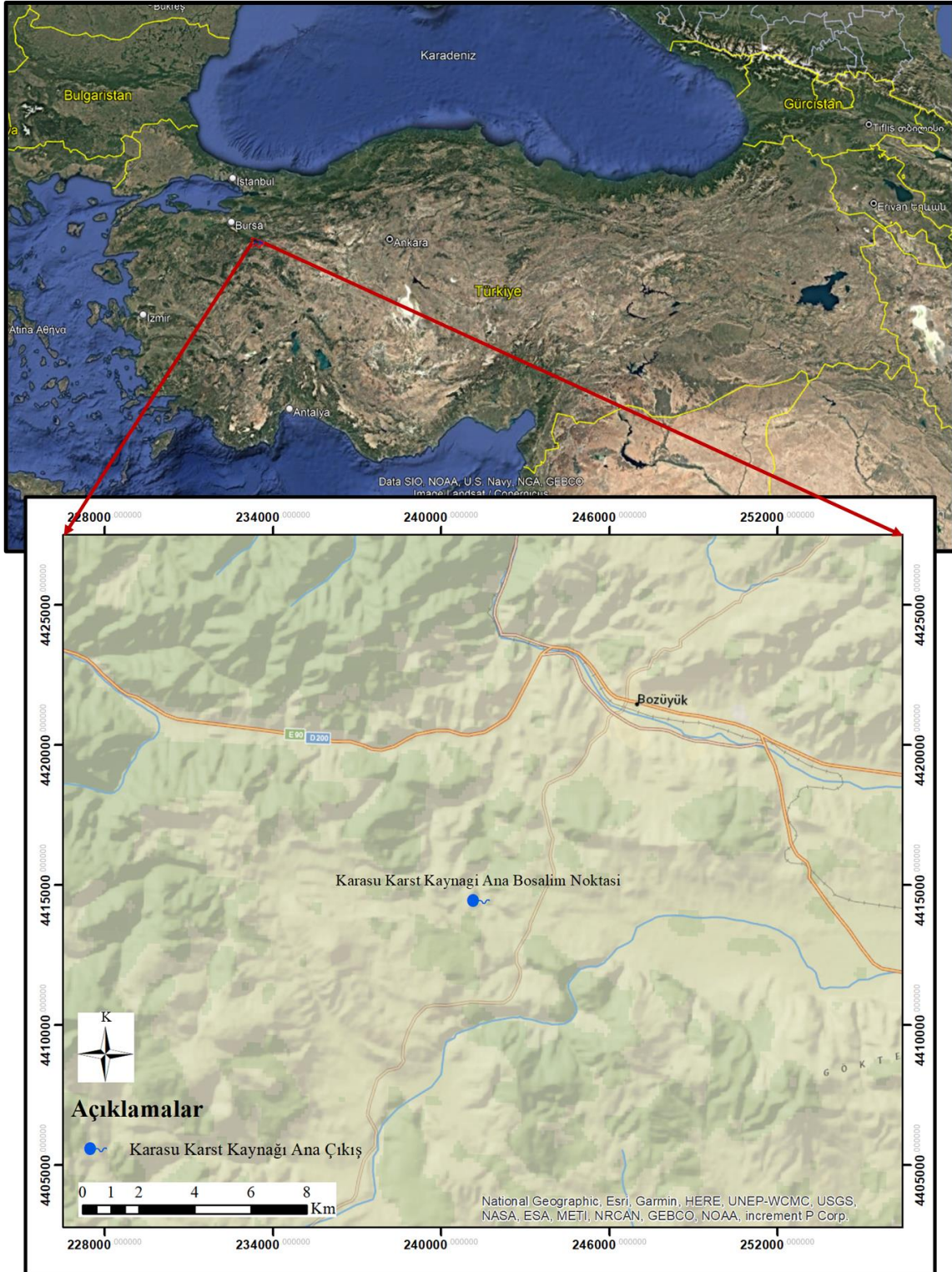


Şekil 1.1. Çalışma alanı sınırları.

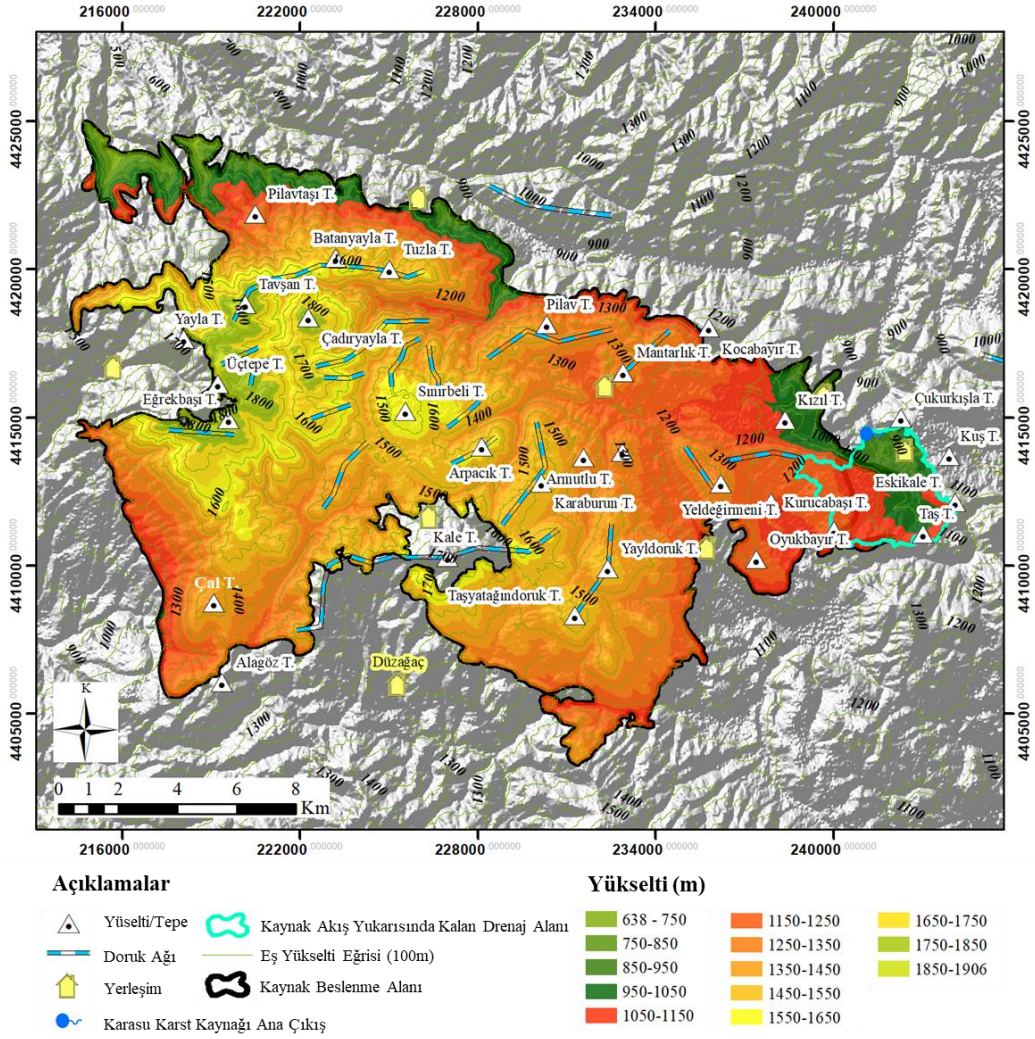
1.3.3. Morfoloji

Çalışma alanı ve yakın dolayındaki önemli yükseltilerden bazılarını, çalışma alanının batısında Yayla Tepe (1848 m), güneyinde Kale Tepe (1779 m), kuzeyinde Pilavtası Tepe (1118 m), güneydoğusunda Eskikale Tepe (1140 m) oluşturmaktadır. Genel olarak yükselti kuzeydoğu- güneybatı yönelimi göstermektedir (Şekil 1.3). Karasu Karst

Kaynağının boşalımıyla birlikte Karasu Deresi sürekli akmakta ve havza dışına boşalmaktadır.

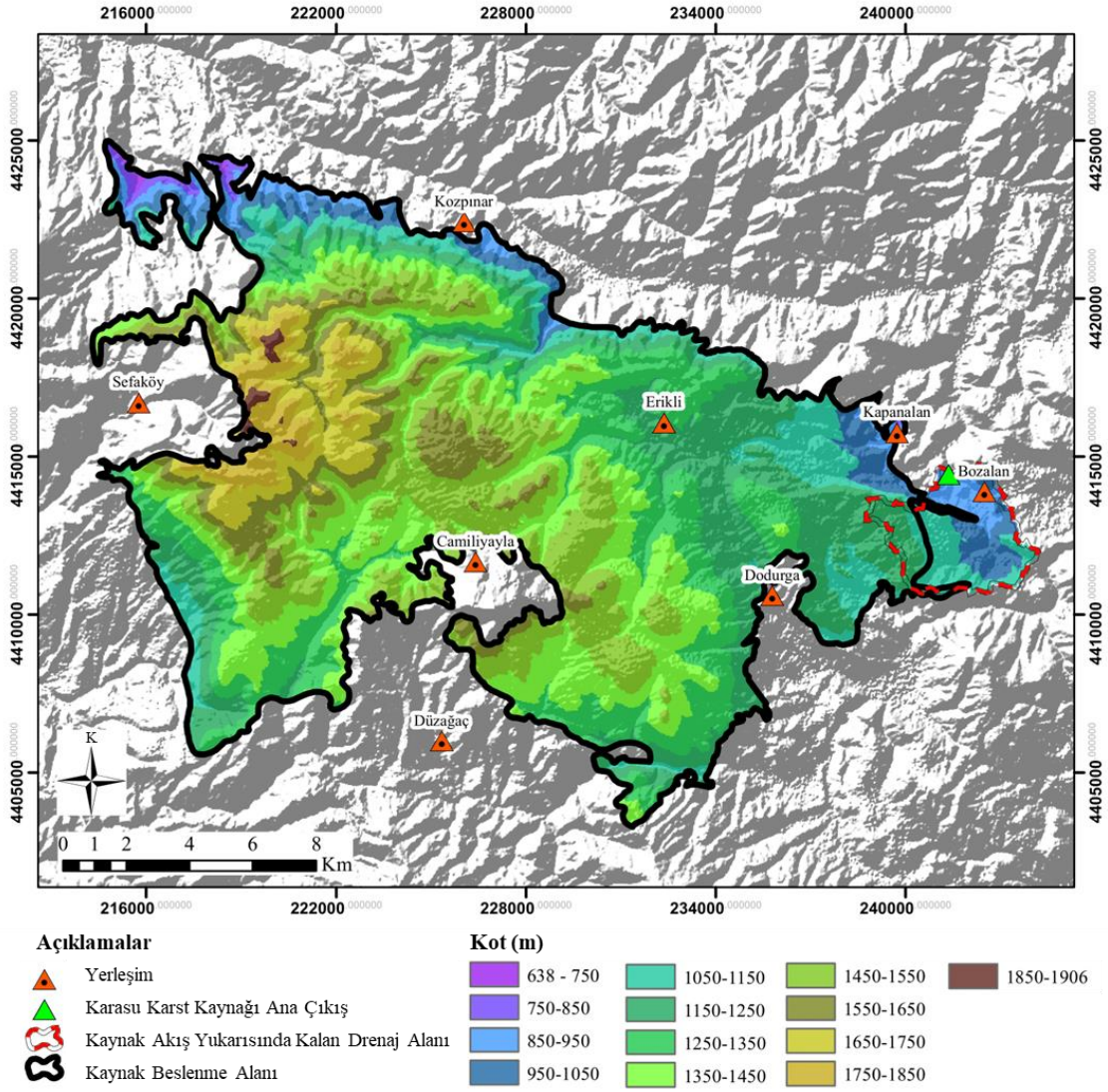


Şekil 1.2. Çalışma alanına ait yerbulduru haritası.

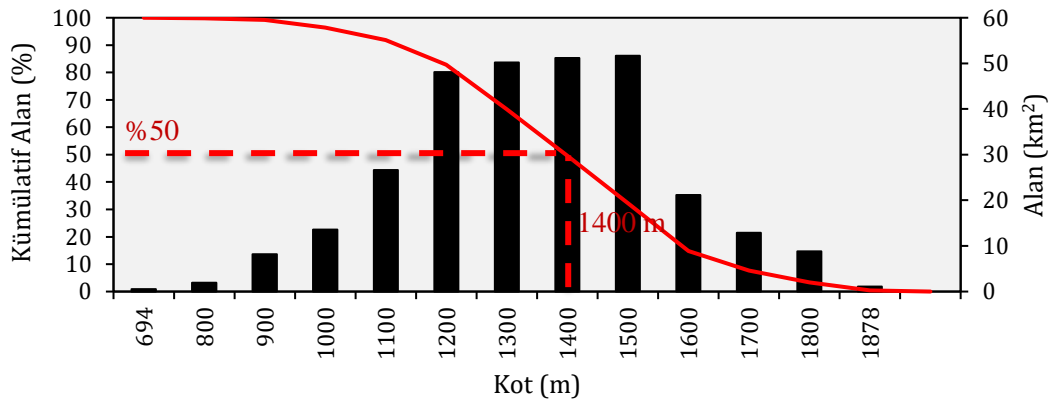


Şekil 1.3. Çalışma alanı doruk ağı haritası.

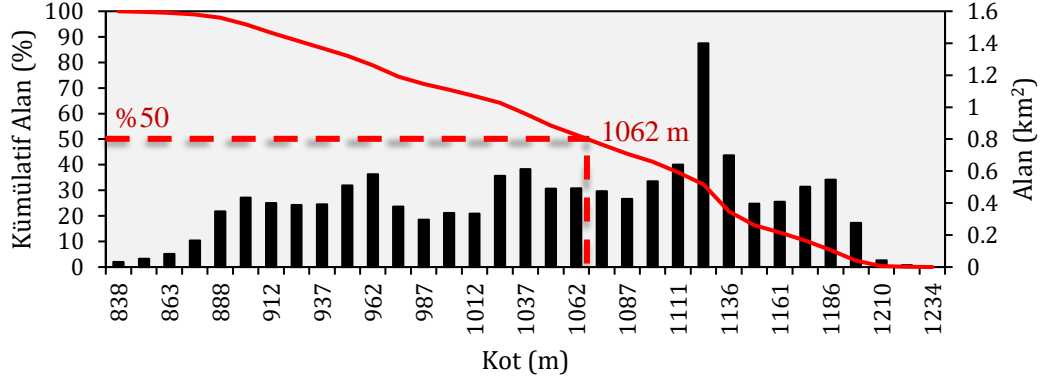
Çalışma alanına ait alan-kot ilişkisini ortaya koymak amacıyla oluşturulan kot dağılım haritası Şekil 1.4'te ve alan-kot grafikleri ise sırasıyla Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da sunulmuştur. Bu bilgilere göre; çalışma alanının %0.17'si 638 – 750 m, %1.95'i 750–850 m, %2.76'sı 850–950 m, %4.60'ı 950–1050 m, %8.99'u 1050–1150 m, %16.26'sı 1150–1250 m, %16.96'sı 1250–1350 m, %17.30'u 1350–1450 m, %17.46'sı 1450–1550 m, %7.14'ü 1550–1650 m, %4.34'ü 1650–1750 m, %2.97'si 1750–1850 m ve %0.37'si 1850–1906 m aralığında bulunmaktadır. Çalışma alanının ortalama yüksekliği 1400 m'dir (Şekil 1.5). Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanının ise, %14.51'i 838–938 m, %26.26'sı 938–1038 m, %39.20'si 1038–1238 m, %20.03'si 1138–1238 m aralığında olup, ortalama kotu 1062 m'dir (Şekil 1.6).



Şekil 1.4. Çalışma alanı ait kot dağılım haritası.

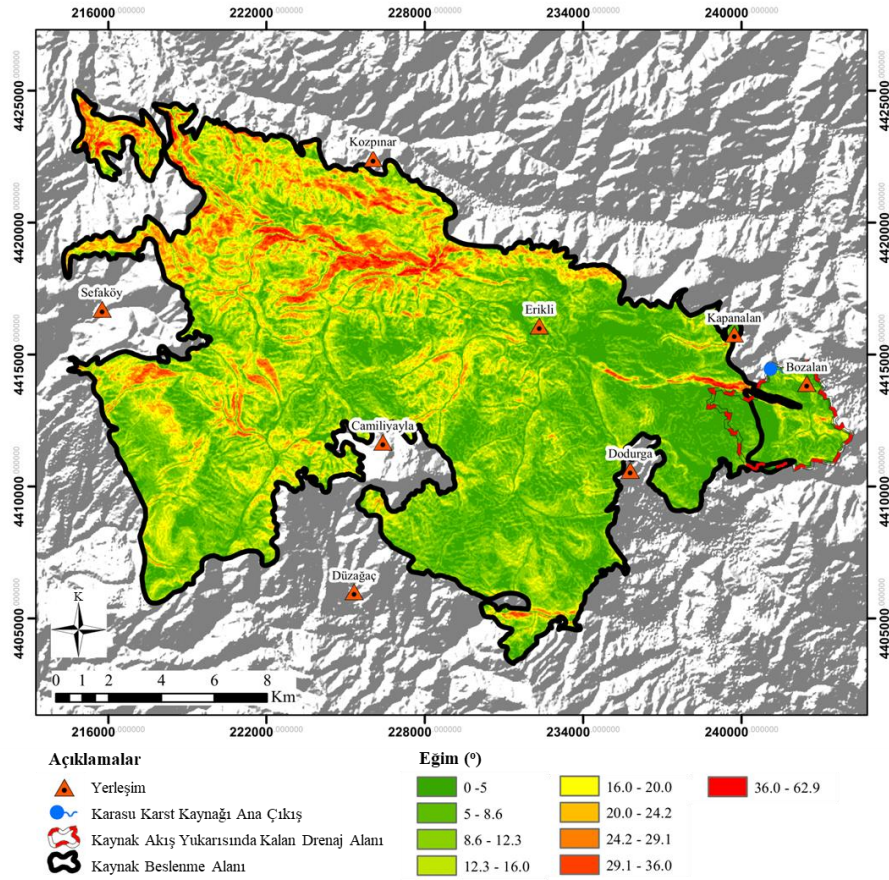


Şekil 1.5. Çalışma alanına ait alan – kot grafiği.



Şekil 1.6. Kaynak akış yukarısında kalan drenaj alanı alan-kot grafiği.

Çalışma alanına ait Şekil 1.7’de sunulan eğim haritası incelendiğinde, Bozalan köyünün kuzeybatısında yaklaşık 20° – 63° arasında eğim gözlemlenirken, kaynağa yaklaştıkça eğim azalarak, 0° – 20° civarına düşmektedir. Genel olarak çalışma alanının batı tarafı çok daha yüksek eğime sahipken, doğu tarafında eğim daha düşük dereceldedir.



Şekil 1.7. Çalışma alanına ait eğim haritası.

1.3.4. İklim ve Bitki Örtüsü

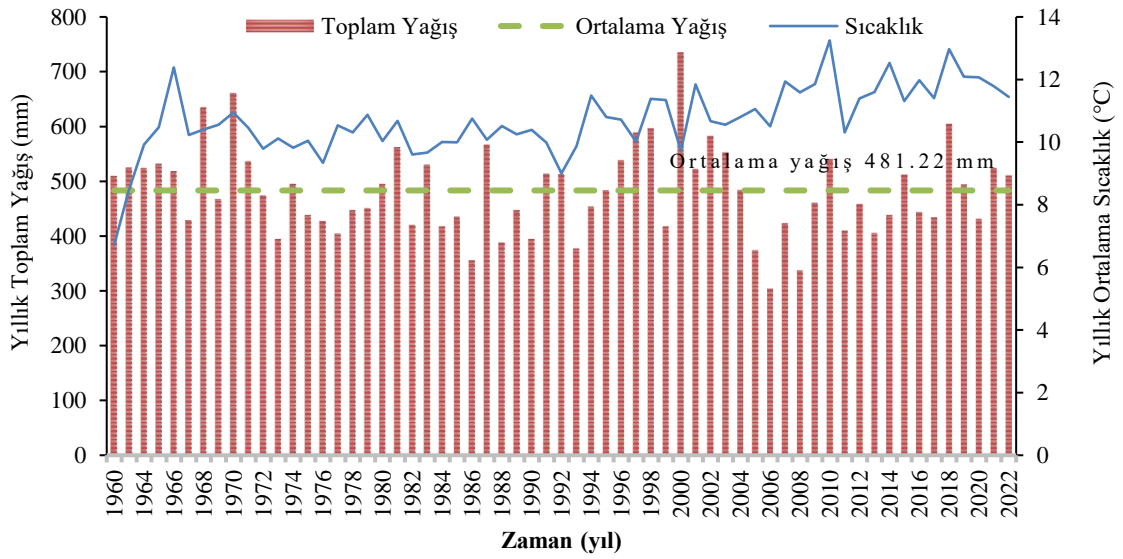
Bozüyük ilçesinde kış mevsimi soğuk ve yağışlı geçerken, yaz mevsimi sıcak ve kuraktır. Bozüyük İlçe Raporu'na göre dağlar genellikle ormanlarla kaplıdır ve 100 metreyi aşan yüksekliklerde kayın ve karaçam ağaçları hâkimdir. Daha düşük rakımlarda kızılçam ve meşe türleri yaygınken, düz arazilerde otsu bitkiler ve çalılıklar baskındır (BEBKA, 2023). Bozüyük ilçesi, Güney Marmara'nın nemli iklimi ile İç Anadolu'nun karasal iklimi arasında bir geçiş bölgesinde yer aldığı için bölgedeki bitki örtüsü çeşitlilik sunmaktadır (Poşluk, 2013).

Bozüyük ilçesi, Aydeniz İklim Sınıflandırmasına göre 'yarı kurak' olarak nitelendirilmiştir. Erinç İklim Sınıflandırmasına göre ise 'yarı nemli' kategorisinde yer almaktadır. DeMartonne İklim Sınıflandırmasına göre 'yarı kurak-nemli' arası bir iklim özelliği göstermektedir (MGM, 2024). Çalışma alanına yakın konumda bulunan 10 meteoroloji istasyonundan uzun yıllar aylık yağış ve sıcaklık kayıtları alınmıştır. Bu istasyonlar; Bilecik, Bozüyük, Pazaryeri, Söğüt, İnhisar, Pazaryeri/Bozcaarmut, Söğüt/Küre Köyü, Bozüyük/Dodurga, İnönü/THK Tesisleri ve Domaniç meteoroloji gözlem istasyonlarıdır. 63 yıllık gözlem süresine sahip Bozüyük MGİ, diğer istasyonlara göre çalışma alanı için daha uygun olması sebebiyle, bu istasyondan elde edilen yağış ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. İstasyonlar ile ilgili ayrıntılı hidrometeorolojik analizler 'Hidroloji' bölümünde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

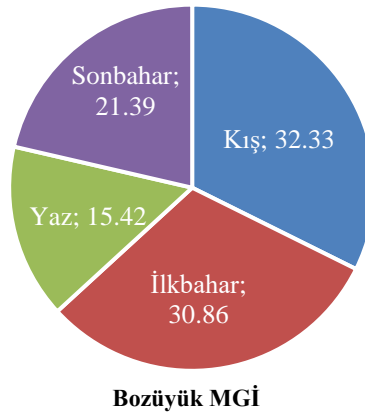
Bozüyük MGİ'de, 1960-2022 yılları arasında kaydedilen en düşük ve en yüksek aylık ortalama toplam yağış miktarları sırası ile 15.82 mm (Ağustos) ve 59.63 mm (Aralık) olarak belirlenmiştir. Uzun yıllar boyunca gözlenen aylık ortalama en yüksek sıcaklık değeri, 25.10 °C (Ağustos) olarak kaydedilmiştir. En düşük sıcaklık değeri ise -6.20 °C (Şubat) olarak gözlenmiştir. Uzun yıllar yıllık ortalama sıcaklık değeri 10.70 °C olarak hesaplanmıştır (Çizelge 1.1). Bozüyük MGİ'nin uzun yıllar boyunca kaydedilen yıllık ortalama toplam yağış miktarı ise 481.22 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 1.8). Ayrıca mevsimlere göre ortalama yağış miktarları dağılımı belirlenmiş olup, Şekil 1.9'de sunulmuştur.

Çizelge 1.1. Bozüyük MGİ (1960-2022) uzun yıllar aylık ortalama, en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.

Değerler		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Bozüyük MGİ	Ortalama	50.83	44.52	50.59	46.49	52.10	42.62	16.75	15.82	19.91	42.10	41.14	59.63
	En Düşük	8.00	4.80	8.10	5.60	8.70	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.40	4.10
	En Yüksek	119.20	115.60	105.10	163.70	185.00	135.70	78.70	112.80	82.60	124.00	111.60	186.70
Sıcaklık (°C)	Ortalama	0.30	1.81	5.14	10.04	14.44	17.95	20.42	20.35	16.55	11.89	6.83	2.67
	En Düşük	-5.70	-6.20	-0.40	4.60	8.70	10.60	16.10	16.70	11.40	8.10	2.50	-1.70
	En Yüksek	5.10	7.70	10.90	14.60	17.70	20.50	24.20	25.10	20.50	15.70	11.80	7.10



Şekil 1.8. Bozüyük MGİ'de ölçülmüş yıllık toplam yağış ve ortalama sıcaklık grafiği.



Şekil 1.9. Bozüyük MGİ mevsimlere göre ortalama yağış miktarı dağılımı (mm).

1.3.5. Nüfus ve Sosyo-ekonomik Durum

Bilecik ilinin büyük bölümünün ve Bozüyük ilçesinin ise tamamının içme-kullanma suyu, Karasu Kaynağından sağlanmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) yapmış olduğu, 2023 yılı adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçlarına göre Bozüyük ilçe nüfusu 79853 olup yıllık nüfus artış hızı %4 olarak belirlenmiştir (Çizelge 1.2) (TÜİK, 2024). Giderek artan nüfus oranı ile insanlar ve kaynağa bağımlı tüm canlılar için Karasu Karst Kaynağının sürdürülebilir bir şekilde iyi yönetilmesi büyük önem taşımaktadır.

Çizelge 1.2. Nüfus istatistikleri ve yıllık nüfus artış hızı (TÜİK, 2024).

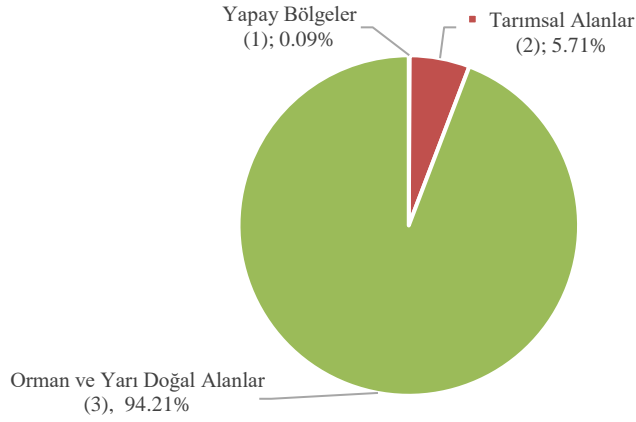
İl ve ilçe	Toplam	İl ve ilçe merkezleri	Belde ve köyler	Yıllık nüfus artış hızı (%)
Bilecik	82 416	70 562	11 854	-21.9
Bozüyük	79 853	72 900	6 953	4.0
Gölpazarı	9 831	6 225	3 606	40.2
İnhisar	2 377	1 049	1 328	124.4
Osmaneli	21 875	16 482	5 393	0.0
Pazaryeri	9 967	6 020	3 947	-1.5
Söğüt	18 844	14 228	4 616	8.0
Yenişehir	2 895	1 062	1 833	33.4

AFAD'ın 2021 yılında yayımladığı IRAP (2021) raporuna göre, son yıllarda gelişen ulaşım altyapısı sayesinde Bilecik İli, Marmara Bölgesi'nde ekonomik bir cazibe merkezi haline gelmiştir. Bu durum, yatırım fırsatlarının artmasıyla birlikte bölgeye olan iş gücü göçünü artırarak nüfus artış hızı da etkileyecektir. İlin ekonomik yapısında tarım ve hayvancılık öne çıkarken, madencilik, ormancılık, dericilik, bıçakçılık, mermercilik, tuğlacılık, seramikçilik ve ahşap işlemeciliği gibi sektörler de büyük bir öneme sahiptir. Özellikle zengin mermer yatakları, Bilecik'in ekonomisine önemli katkılarda bulunmaktadır. Bakır (Cu), Altın (Au), manganez (Mn), molibden (Mo), volfram (W) ve antimuan (Sb) gibi metalik madenler ile kil, kaolen, manyezit, feldispat ve mermer gibi endüstriyel hammaddeler genellikle Bozüyük ve Söğüt ilçelerinde yoğunlaşmıştır (MTA, 2024). Ayrıca, Bozüyük ilçesindeki sanayi tesisleri de ilin ekonomik kalkınmasına önemli katkılar sunmaktadır (BEBKA, 2020).

1.3.6. Arazi Kullanımı

CORINE, Avrupa Çevre Ajansı tarafından geliştirilen ve Avrupa Birliği ülkelerinde ortak olarak kullanılan bir arazi kullanımı sınıflandırma sistemidir. Bu sistemde, uydu görüntüleri ve coğrafi veriler kullanılarak bilgisayar destekli görsel yorumlama yöntemi ile Avrupa'nın arazi kullanımı çeşitli kategorilere ayrılarak arazi örtüsü ve kullanımı verisi üretilmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024).

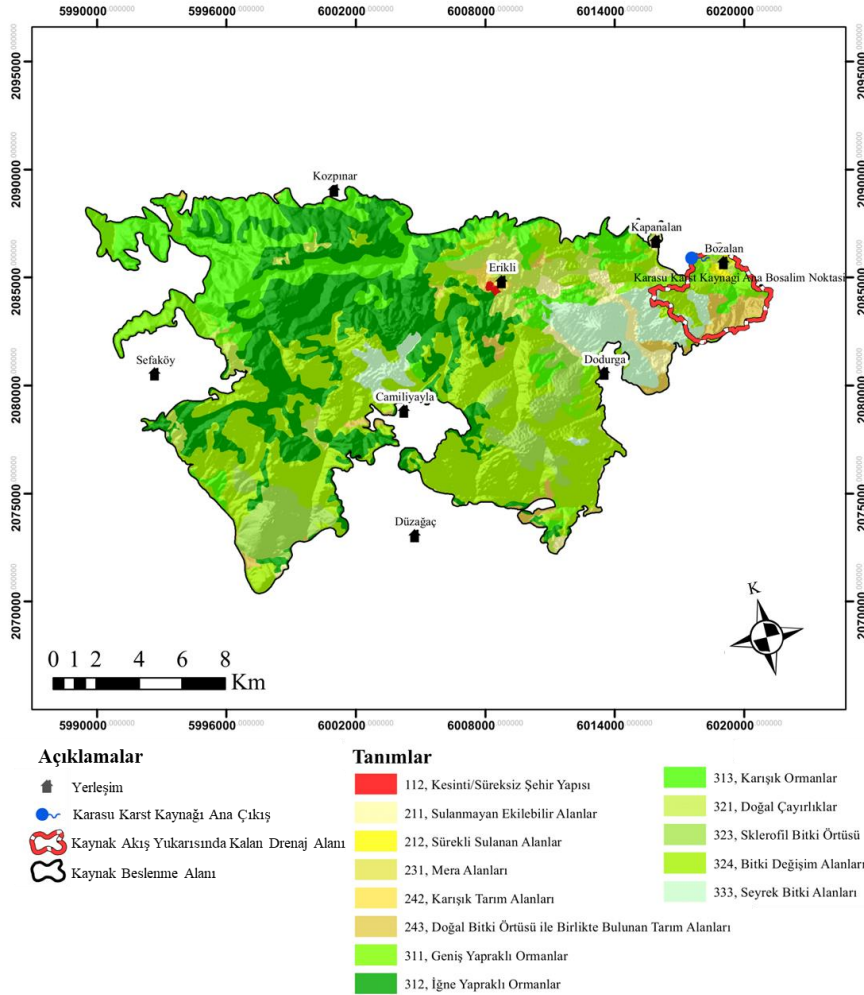
Çalışma kapsamında yapılan mekânsal veri analize sonucunda, Tarım ve Orman Bakanlığı CORINE 2018 bölgesel raporu verilerine göre; çalışma alanının %94.21'i (27890.41 ha) orman ve yarı doğal alanlar, %5.71'i (1689.17 ha) tarımsal alanlar ve %0.09'u (25.59 ha) yapay bölgelerden oluşmaktadır. Çalışma alanına ait arazi kullanım dağılım grafiği Şekil 1.10 ve arazi kullanım istatistikleri ise Çizelge 1.3'te verilmiştir. Tez çalışması kapsamında; CORINE 2018 verisine göre hazırlanan Karasu Karst Kaynağı çalışma alanına ait arazi kullanım haritası Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.10. Çalışma alanı arazi kullanım dağılımı.

Çizelge 1.3. Çalışma alanına ait arazi kullanım istatistikleri.

	Arazi Kullanım Sınıfı	Alan (ha)	Yüzde (%)
Orman ve Yarı Doğal Alanlar	Bitki Değişim Alanları (324)	9146.13	30.89
	İğne Yapraklı Ormanlar (312)	7463.04	25.21
	Karışık Ormanlar (313)	4696.65	15.86
	Seyrek Bitki Alanları (333)	2004.95	6.77
	Sklerofil Bitki Örtüsü (323)	1985.75	6.71
	Doğal Çayırliklar (321)	1384.95	4.68
	Geniş Yapraklı Ormanlar (311)	1208.94	4.08
Tarımsal Alanlar	Doğal Bitki Örtüsü ile Karışık Tarım Alanları (243)	770.5	2.6
	Sulanmayan Ekilebilir Alanlar (211)	651.36	2.2
	Sulanmayan Karışık Tarım Alanları (242)	156.76	0.53
	Sürekli Sulanan Alanlar (212)	70.58	0.24
	Mera Alanları (231)	39.97	0.14
Yapay Bölgeler	Sürekliği Olmayan Yerleşim Alanları (112)	25.59	0.09



Şekil 1.11. CORINE 2018 verilerine göre çalışma alanına ait arazi kullanım haritası.

1.4. Önceki Çalışmalar

Karasu Karst Kaynağı ve yakın çevresinde tez konusu ile bağlantılı gerçekleştirilmiş çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

Jeolojik Çalışmalar

Küçükayman ve ark. (1987) tarafından Bozüyük-Tavşanlı-Kütahya arasının jeoloji haritaları çıkarılmış ve yapısal özellikleri açıklığa kavuşturulmuştur.

Yılmaz (2005) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, Bilecik-Bozüyük'teki Muratdere bölgesindeki porfiri Cu-Mo ve epitermal Au cevherleşmeleri çeşitli yönleriyle incelenmiştir. Çalışma alanında porfiri Cu-Mo cevherleşmesi ve epitermal Au cevherleşmesi olmak üzere iki tip cevherleşme tanımlanmıştır. Porfiri Cu-Mo cevherleşmesinin magmatik kayalarla ilişkili olduğu, epitermal Au cevherleşmesinin ise listvenitler içinde yer aldığı belirtilmiştir. Cevherleşmenin bağlı olduğu magmatik kayalarda yapılan jeokimyasal analizler sonucunda, granitoyitlerle ilişkilendirilen özellikler sergilediği ve bununda jeotektonik olarak çarpışma sonrası bir ortamı temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Poşluk (2013) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezinde, Güney Marmara'daki Bozüyük (Bilecik) havzası ve çevresindeki Tersiyer yaşlı kayaların stratigrafik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada, önceki araştırmalarda yeterince ayırtılmamış olan Tersiyer yaşlı birimlerin yeniden değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bölgenin temel kayaları, Mesozoyik öncesi şistler, mermerler ve granodiyoritler ile Mesozoyik yaşlı şistler, mermerler, kireçtaşları ve ofiyolitik birimler olarak tanımlanırken, örtü birimleri olarak adlandırılan Tersiyer yaşlı birimlerin bu temel kayaların üzerinde bulunduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, Paleojen yaşlı birimlerin yerine Neojen yaşlı birimlerin gözlemlendiği belirlenmiştir. Ayrıca, bölgede Eskişehir Fay Zonu'nda batıdan doğuya doğru çeşitli faylar tespit edilmiş olup, bu fayların Neojen stratigrafisinin oluşumunda etkili ve sismik aktivite potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir.

Hidrojeolojik Çalışmalar

DSİ (1982) tarafından inceleme alanının yakın civarını içine alan Bozüyük Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu hazırlanmıştır. Bu raporda, genel olarak bölgeyi oluşturan birimlerin hidrojeolojisi ve yeraltısuyu bilançosu hesaplamaları yapılmıştır. Tez kapsamında, söz konusu rapora ulaşılamamıştır.

Özkan (2006) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında, Bozüyük Ovası'nın hidrojeolojik yapısı incelenmiş ve yeraltısuyu bilançosu hesaplanmıştır. Bu çalışma, havzadaki akifer birimlerini oluşturan formasyonların taşıdığı yeraltısuyu miktarını ve kalitesini değerlendirmeyi, ayrıca önceki bilanço hesaplarıyla belirlenen işletme rezervini güncellemeyi amaçlamaktadır. Akarsu ve yeraltısularından alınan örneklerin analizi sonucunda, bu suların artan tuzluluk tehlikesi ile karşı karşıya olduğu tespit edilmiştir. Yeraltısuyu bilançosuna göre; yağış ve yüzeysel akıştan gelen beslenme miktarı yıllık 47.87×10^6 m³, baz akım ve boşalım miktarı ise yıllık 54.58×10^6 m³ olarak hesaplanmıştır.

DSİ (2017) tarafından, Bilecik-Bozüyük Karasu Karst Kaynağının hidrojeolojik özelliklerini ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, bölgeyi temsil eden yağış istasyonlarından elde edilen veriler ve kaynağa ait debi ölçümleri kullanılarak yağış-kaynak akım analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Karst hidrojeolojisi kapsamında, karstik sistemin hidrolik özellikleri ve parametreleri belirlenmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır: Yağıştan süzülme miktarı yıllık 59.51×10^6 m³, Karasu kaynağı ile boşalım 59.1×10^6 m³, Kömürsu kaynakları ile boşalım 0.3×10^6 m³ ve diğer kuyu ve kaynaklar ile boşalım miktarı ise 0.11×10^6 m³'tür.

Tez alanından bağımsız olarak, tez konusu ile ilgili literatürde bulunan bazı hidrojeolojik çalışmalar da aşağıda listelenmiştir.

Dörfliger ve ark. (1999) tarafından yayınlanan çalışma, İsviçre'de su temininde önemli rol oynayan karst akiferlerinden boşalan yeraltısuyu kaynakları ile ilgilidir. Çalışmada, karstik ortamlarda belirlenen mevcut koruma bölgelerinin genellikle yetersiz olduğu ve

hidrojeolojik temellere dayanmadığı belirtilmektedir. Bu sorunu çözmek için İsviçre'deki çeşitli kurumlar ve Neuchâtel Üniversitesi ile iş birliği yapılarak karstik ortamlarda yeni bir yeraltısuyu koruma metodolojisi geliştirilmiştir. Bu metodoloji, EPIK yöntemi ile su kaynaklarının hassasiyet haritalamasını içermektedir. EPIK yöntemi ile, karst akiferlerinin dört özelliğini (epikarst, koruyucu örtü, süzülme durumu, karstik kanal gelişimi) dikkate alarak hassasiyet haritaları oluşturulmaktadır. Sonuç olarak, EPIK yöntemi, İsviçre'deki çeşitli karstik bölgelerde uygulanmış ve yeni koruma sınırları önerilmiştir.

Ekmekçi ve ark. (2003) tarafından, Kayseri'nin Bünyan ilçesindeki Tacin Karst Kaynağının hidrodinamik özellikleri incelenmiştir. 1965-1998 yılları için kaynak çekilme analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre, kaynak çekilme katsayılarının $1.3 \times 10^{-3} \text{ gün}^{-1}$ ile $2 \times 10^{-2} \text{ gün}^{-1}$ arasında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Tacin karst akiferinin yüksek derecede heterojen ve anizotropik bir yapı sergilediği anlaşılmıştır.

Aydın (2005), Bilecik ve Eskişehir sınırları içerisinde bulunan Harmanköy-Beyyayla Karst Sistemini (HBKS) incelemiştir. Yaklaşık 49.5 km^2 alana yayılan ve Jura yaşlı Bilecik kireçtaşlarından oluşan bu sistemin morfoloji-hidrojeoloji ilişkileri araştırılmıştır. HBKS, Beyyayla, Döşkaya ve Nardın olmak üzere üç alt sisteme ayrılmıştır. Beyyayla ve Döşkaya alt sistemleri benzer özellikler gösterirken, Nardın alt sistemi farklılık göstermektedir. HBKS'de beslenmenin allojenik yerel (yüzey suları) ve otojenik yaygın (yağış suları) olarak gerçekleştiği vurgulanmıştır. Beyyayla ve Döşkaya'da hızlı yeraltısuyu akımı ve türbülanslı akım koşulları gözlemlenirken, tektonizma ve enerji gradyanının karstlaşmada etkili faktörler olduğu ifade edilmiştir. Nardın alt sistemi ise otojenik yaygın beslenme ile farklı morfolojik ve hidrolojik özellikler sergilendiğini belirtmiştir. Kaynak çekilme analizi yapılmış, çekilme katsayıları Döşkaya sisteminin hızlı ve taban akım bileşenlerinden oluşan iki çekilme katsayısı olup, $\alpha_{\text{hızlı}} = 0.040 \text{ gün}^{-1}$ ve $\alpha_{\text{taban}} = 0.013 \text{ gün}^{-1}$, Beyyayla için 0.025 gün^{-1} ve Nardın alt istemi için 0.038 gün^{-1} olarak hesaplanmıştır.

Al-Charideh (2011) tarafından yayımlanan çalışmada, Batı Suriye'deki Figeş ve Al-sin karst kaynaklarından boşalan yeraltısuları çevresel izotoplarla incelenmiştir. Bu iki

kaynağın, yüksek boşalım debileri nedeniyle Orta Doğu'daki en önemli su kaynakları arasında olduğu belirtilmiştir. Figeş ve Al-sin kaynaklarının $\delta^{18}\text{O}$ değerleri sırasıyla -8.91‰ ve -6.49‰ olarak bulunmuştur. Yağış ve yeraltısu için regresyon eşitliği $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+19.7$ olarak tanımlanmıştır. Trityum konsantrasyonları düşük olup, yeraltısının ana kalış süresi 50-60 yıl olarak belirlenmiştir. Figeş ve Al-sin kaynaklarının maksimum yeraltısu rezervuar büyüklüğü sırasıyla 3.9 ve 4.2 milyar m^3 olarak hesaplanmıştır.

Al-Charideh (2012), Suriye'deki Figeş Kaynağının boşalım miktarının tahminine odaklanmıştır. Figeş Kaynağı, Damascus ve çevresi için hayati bir öneme sahip olan içme suyu kaynağıdır. 2001-2009 yılları arasında toplanan yeraltısu ve yağış numunelerinin $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ izotopik bileşimleri ile klorür içerikleri analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre, yeraltısının meteorik kökenli olduğu saptanmıştır. Klorür kütle dengesi (CMB) yöntemi kullanılarak yeraltısu beslenme oranları hesaplanmıştır. Yeraltısu beslenme oranlarının yıllık 192 ile 826 mm arasında olduğu ve bu değerlerin yağışın %43 ile %67'sinden karşılandığı saptanmıştır.

Açıkel (2012), Gökova-Azmaç (Akyaka, Muğla) Karst Kaynakları sisteminde, yeraltısu akım ve tuzlu su karışımı dinamiği ile ilgili kavramsal model oluşturmuştur. Kurgulanan bu kavramsal modelde, kaynakların hidrolojik, hidrojeokimyasal, izotopik ve hidrodinamik davranışları bir arada değerlendirilmiştir. Çalışmada, Azmaç kaynaklarına ait fizikokimyasal özelliklerin konumsal ve zamansal değişimleri, hidroloji, hidrokimyasal ve izotop analizleri ile birlikte değerlendirilerek tuzlu su karışımının dinamiği incelenmiştir. Bunun yanı sıra, Azmaç kaynaklarına deniz suyu katkısının %1 ile %23 arasında değiştiği bulunmuştur. Azmaç kaynaklarının boşalımıyla oluşan Azmaç nehrinin akımları ile çekilme analizi gerçekleştirilmiş, 2007-2011 yılları arasında boşalımın iki aşamada gerçekleştiği ve 2008 yılı dışında, yıllık ortalama yağış miktarının altında kalan yıllarda çekilme katsayısı değerlerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. 2008 yılında ise çekilme katsayısının 0.0022 ile 0.03 gün^{-1} arasında değiştiği belirtilmiştir.

Terzic ve ark. (2014), Hırvatistan'ın Dalmaçya bölgesindeki Miljacka Kaynağı'nı incelemiştir. Önceki çalışmalar, Miljacka'nın suyunu tamamen Zrmanja Nehri'nden aldığını öne sürerken, bu çalışma Miljacka'nın suyunun bir kısmını Krka Nehri'nden aldığı hipotezini değerlendirmiştir. Jeolojik ve tektonik analizlerle bu hipotez doğrulanamamış, bu sebepten dolayı hidrokimyasal modelleme yapılmıştır. NETPATH-WIN ve PHREEQC yazılımları kullanılarak oluşturulan modeller, Miljacka'nın suyunun hem Zrmanja hem de Krka nehirlerinden geldiğini doğrulamıştır. Çalışma, karst hidrojeolojisinin karmaşıklığını ve hidrokimyasal araştırmaların önemini vurgulamaktadır.

Bonacci ve ark. (2015) yaptığı çalışmada, karstik kaynak havzası ve sınırlarının tanımlanmasının karst hidrolojisi ve hidrojeolojisinin en büyük sorunlarından biri olduğunu vurgulamıştır. Žrnovnica havzasını ele alan bu çalışma, hidrolojik, hidrojeolojik ve topoğrafik havza boyutları arasındaki büyük farklılıkların karstik alanlarda yaygın olduğunu göstermiştir. Bu durum, karstik sistemlerin karmaşıklığı nedeniyle havza sınırlarının belirlenmesindeki zorluklara işaret etmekte ve daha detaylı çalışmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sanz ve ark. (2016), İspanya'da bulunan Fuentetoba Kaynağı ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kaynağın ortalama debisinin 210 l/s olduğu, ancak debinin 8 l/s ile 3400 l/s arasında bir değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir. İlkbahar dönemi hidrograflarının incelenmesi sonucunda, kaynağın uzun tepki süresine ve bölgesel faktörler tarafından kontrol edildiğine dair bulgular elde edilmiştir. Ayrıca, kaynağın iyi gelişmiş karstik kanallar aracılığıyla boşaldığı belirlenmiştir.

Petelas ve ark. (2017) tarafından yayımlanan çalışmada, Kuzeydoğu Yunanistan'daki Paradisos Karst Akifer Sistemi'nin (PAS) hidrojeolojik ve hidrokimyasal özellikleri incelenmiştir. Fay kontrolündeki bu karst sistemini, KS15, KS20 ve KS21 adlı üç ana kaynak drene etmektedir. Hidrokimyasal analizler, bu sistemden boşalan yeraltısularının genellikle Ca-HCO₃ tipinde olduğunu ve kimyasal özelliklerinin alkali metaller ile zayıf asitlerden etkilendiğini göstermiştir. KS20 ve KS21 kaynaklarında zaman zaman yüksek NH₄⁺ içeriği ile artmış nitrat, amonyum ve fosfat değerleri, antropojenik etkileri, özellikle

fosseptik tankları ve tarım faaliyetleri işaret etmektedir. Bu bulgular, yeraltısuyu kalitesinin insan faaliyetlerinden nasıl etkilendiğini ve karst sistemlerinin hassasiyetini vurgulamaktadır.

Jones ve ark. (2017) tarafından yayımlanan çalışmada, Arizona'nın kuzeyindeki Kaibab Platosu'nda yer alan Büyük Kanyon'un kuzeyindeki karst akiferleri incelenmiştir. Çalışmada, karstik ve karstik olmayan alanlar arasındaki bağlantıyı ve derin akiferdeki boşalımı anlamak için boya deneyleri ve hidrograf analizleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, karst hidrojeolojisinin, gözenekli veya kırıklı/çatlaklı akiferlerden çok daha karmaşık olduğu vurgulanmıştır.

Iván ve Mádl-Szónyi (2017) yaptığı çalışmada, Macaristan ve Slovakya sınırındaki Gömür-Torna Karst'ını incelemiştir. Bu karst sistemi, koruma altındaki Aggtelek ve Slovak Karst milli parkları içinde yer almaktadır. Çalışma, özellikle Kis-Tohonta Kaynağına odaklanarak uzun dönem kaynak çekilme analizlerinin karst sisteminin hidrolojik süreçlerini ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını anlamada faydalı olduğunu vurgulamıştır.

Sánchez ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, İspanya'daki Sierra Grazalema karst akiferini hidrokimyasal ve izotopik yöntemlerle incelemiş, bölgedeki su kıtlığı ve sel olaylarının yaşanması nedeniyle, karst sisteminin stratejik yeraltısuyu rezervine sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada, akiferden boşalan suyun kimyasal içeriğinin kayaçlar ile yeraltısuyunun temas süresinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Elde edilen bulgular, akiferin hidrojeolojik özelliklerini ve yeraltısuyunun kimyasal bileşimini anlamaya katkıda bulunmuştur.

Ghobadi ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İran'ın Rudbar şehrinin kuzeydoğusundaki karstik kaynakların hidrojeolojik özelliklerini değerlendirilmiştir. PHREEQC modeli ile akiferdeki yeraltısuyu doygunluk indisleri hesaplanmış, AqQA-RockWare yazılımı ile su içerisindeki iyonların kaynağı belirlenmiştir. Ayrıca, kararlı

izotoplar ve kaynak hidrograf analizleri, karst sisteminin mekanizmasının anlaşılmasında kullanılmıştır.

Vogelbacher ve ark. (2019) yayınladıkları çalışmada, Yunanistan'ın kuzeybatısındaki Perivleptos karst akiferinin yeraltısuyu hassasiyetini ve kirlilik riskini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Yapılan bu çalışmada, EPIK yöntemi kullanılmış ve bu yöntemlerin dünya çapındaki uygulamalarını içeren bir literatür taraması yapılmıştır. Risk değerlendirmesi için bir tehlike haritası geliştirilmiştir. Çalışma alanının bir kısmının ormanlarla kaplı olduğu belirtilmiş olup, kentsel, endüstriyel ve tarım alanlarının yüksek kirlilik riski taşıdığı vurgulanmıştır. Risk haritasına göre, çalışma alanının %13'ünün çok yüksek, %48'inin yüksek, %36'sının orta ve %4'ünün düşük kirlilik riski taşıdığı tespit edilmiştir.

Megherfi ve ark. (2020) yayınladıkları çalışmada, Kuzey Cezayir'deki Bejaia kıyı bölgesinin karstik kaynaklarının hidrokimyasal özelliklerini incelemiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar istatistiksel yöntemlerle incelenmiş ve kaynakların beslenme mekanizması da araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmanın, bölgedeki karstik su kaynaklarının kimyasal bileşimini anlamaya ve su kalitesini belirlemeye yardımcı olması hedeflenmiştir. Ayrıca, kaynakların beslenme mekanizmasının anlaşılmasının, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önemli olduğu vurgusu yapılmıştır.

Zeydalinejad ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, İran'da iklim değişkenleri ve iklim değişikliği altında karstik kaynak akımlarının tahmini üzerinde yoğunlaşmışlardır. İklim değişikliğinin karstik kaynak boşalimleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için İran'ın güneybatısındaki Lali bölgesinde RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılmıştır. Bu senaryolar altında Bibitarkhoun karstik kaynağının boşalımına iklim değişikliğinin etkisi Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılarak incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ile, iklim değişikliğinin karstik su kaynakları üzerindeki etkisini anlamak ve bu kaynakların gelecekteki durumunu tahmin etmek için önemli bir kaynak olabileceği ve Yapay Sinir Ağlarının, iklim değişikliğinin su kaynaklarına olan etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmek için kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Kiyani ve ark. (2021) yayımladığı çalışmada, Batı İran'ın Zagros bölgesinde bulunan Keder ve Zolal adlı iki karstik kaynağın davranışlarını incelemiştir. Yapılan bu çalışmada, Zolal karstik kaynağının daima berrak olduğu, ancak Keder karstik kaynağının çok yüksek bulanıklığa sahip olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, Keder kaynağının yılda bir ay boyunca 10.000 nüfuslu Kiyani şehrine içme suyu sağladığı ifade edilmektedir. Yapılan çalışmalar, alanın yüksek derecede aşınmış bir tektonik bölge olduğunu ve büyük karst kanalları ile iyi gelişmiş bir karst ortamına sahip olduğunu göstermiştir. İki kaynak arasındaki farklılıkların, drenaj alanındaki farklı su yollarından gelen suyun hareketlerinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Zolal kaynağının suyunun dar bir fay kanalından geldiği, Keder kaynağının ise çamurlu yağmur sularının çökeldiği bir rezervuardan geldiği belirlenmiştir.

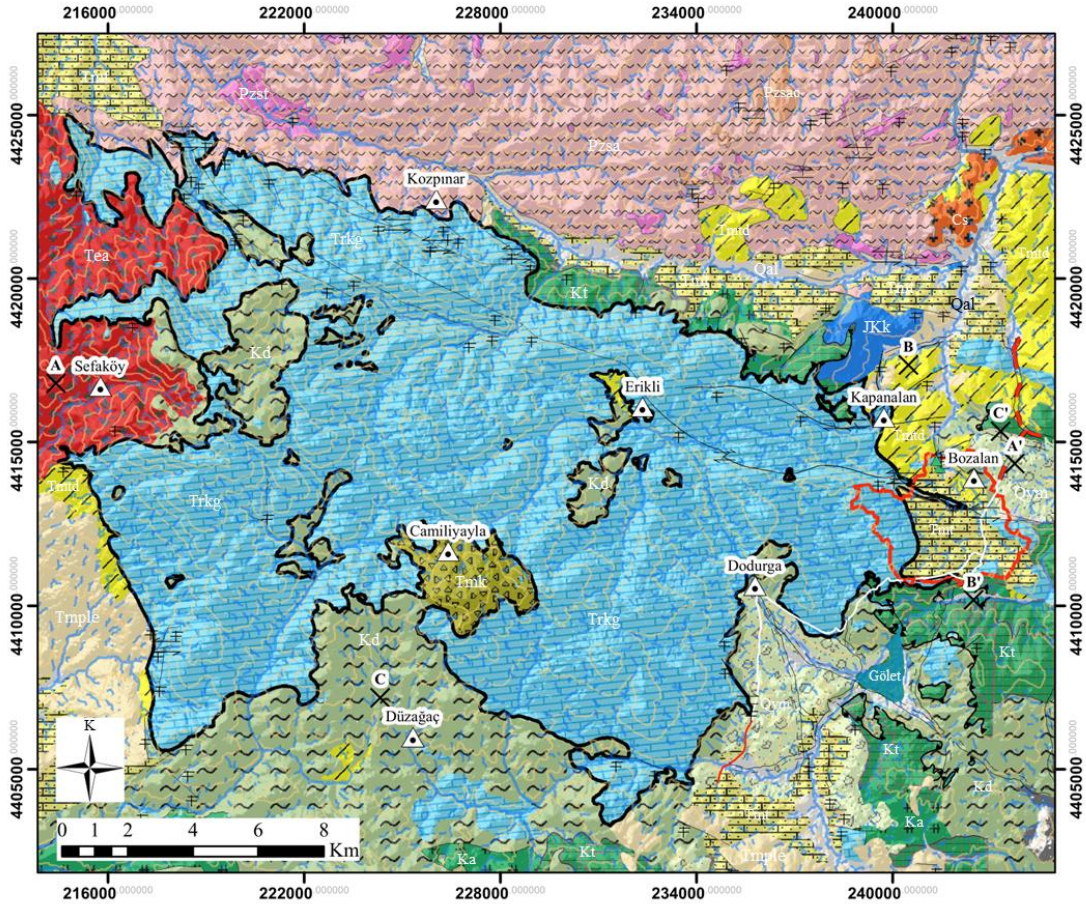
Gaillard ve ark. (2022) çalışmalarında, Fransa'nın Seine-Maritime şehrinde bulunan Yport kaynaklarının araştırılması ve kullanılması üzerine odaklanmıştır. Küçük Yport kasabası, Normandiya'nın kuzey kesiminde, İngiliz Kanalı kıyısında bulunmaktadır. Bu bölgede, kıyıda çıkan Fontaines d'Yport adı verilen bir kaynak kümesi bulunduğu ifade edilmiştir. Yport kaynaklarının, 1 ile 2.5 m³/s arasında boşalım yaptığı gözlenmiştir.

2. JEOLJİ

Jeolojik çalışmalar, hidrojeolojik değerlendirilmeler için temel oluşturmaktadır. Çalışma alanına ait jeolojik çalışmaların gerçekleştirilmesi amacıyla, 1/100000 ölçekli Kütahya-İz3 paftası ve 1/25000 ölçekli İ23 a2-a3-b1-b2-b3-b4 jeoloji haritaları, paftalara jeoloji raporları ve MTA yerbilimleri harita görüntüleyici (Yerbilimleri Portali, 2024) online web sitesinden yararlanılmış ve çalışmaya uygun jeoloji altlığı derlenmiştir. Bu çalışmada MTA (2011) tarafından hazırlanmış 1/25000 ölçekli jeoloji haritasındaki sınırlar, 1/100000 ölçekli jeoloji haritası ile korele edilerek, çalışma alanının ve yakın civarının jeoloji haritası ve hidrojeoloji haritası oluşturulmuştur. Jeoloji haritası, stratigrafik kolon ve jeolojik kesitler Dünya Jeoloji Haritaları Hazırlama Komisyonu tarafından yayımlanan CMYK Renk Standartları'na göre renklendirilmiştir (CCGM, 2024).

2.1. Stratigrafik Yapı

Çalışma alanı ve yakın çevresinde Paleozoyik-Kuvaterner yaş aralığında jeolojik birimler bulunmaktadır. Çalışma alanındaki en yaşlı birimler Paleozoyik yaşlı Alınca Formasyonu (Pzsa), Ortaburun Üyesi (Pzsao) ve Taşarası Formasyonu (Pzst)'dur. Karbonifer yaşlı Sakarya Graniti (Cs) uyumsuzlukla bu metamorfik birimleri kesmektedir. Jura-Kretase yaşlı Köyiçi Formasyonu (JKk), Arifler Melanjını tektonik olarak üzerlemektedir. Kretase yaşlı Arifler Melanjı (Ka) ve Tavşanlı Ofiyoliti (Kt), Üst Triyas - Alt Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonu (Trkg) üzerine uyumlu gelmektedir. Geyiktepe Formasyonuna ait mermerler üzerine uyumlu olarak gelen Devlez Formasyonu (Kd) Üst Kretase yaşlı olup, Arifler Melanjı (Ka) tarafından tektonik olarak üzerlenmektedir. Alt - Orta Eosen yaşlı Alaçam Granitleri, daha eski birimleri uyumsuz olarak kesmektedir. Miyosen yaşlı Karaköy Volkanitleri (Tmk), Geyiktepe Formasyonunu kesmektedir. Miyosen yaşlı, Demirbilek Üyesi (Tmtd) ve Tunçbilek Formasyonu (Tmt) kendi içerisinde geçişli bir yapıya sahiptir. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Emet Formasyonu (Tmple) kendinden yaşlı birimler üzerine uyumlu olarak gelmektedir. Çalışma alanında bulunan Kuvaterner yaşlı birimler ise alüvyonlar ve yamaç molozlarıdır (MTA, 2011). Çalışma alanının jeoloji haritası ve stratigrafik kolon kesiti sırasıyla Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmektedir.



Açıklamalar

- × Kesit Noktaları
- △ Yerleşim
- ▲ Karasu Karst Kaynağı Ana Çıkışı
- Eş Yükselti Eğrisi (100m)
- ⬭ Kaynak Akış Yukarısında Kalan Drenaj Alanı
- ⬭ Kaynak Beslenme Alanı
- Fay
- ▲ Bindirme Fayı
- ⋯ Tali Yol
- Ana Yol
- Otoyol
- Mevsimsel Akarsu
- Devamlı Akarsu

Harita Birimlerinin Açıklaması

- Qal Alüvyon
- Qm Yamaç Molozu
- Imple Emet Formasyonu
- Trmk Karaköy Volkanitleri
- Trmb Tunçbilek Formasyonu
- Trmt Demirbilek Üyesi
- Tea Alaçam Graniti
- Kt Tavşanlı Ofiyoliti
- Ka Arifler Melanjı
- Kd Devlez Formasyonu
- Trkg Geyiktepe Formasyonu
- JKk Köyiçi Formasyonu
- Cs Sakarya Graniti
- Prst Taşarası Formasyonu
- Pzsa Alınca Formasyonu
- Pzsaö Ortaburun Üyesi

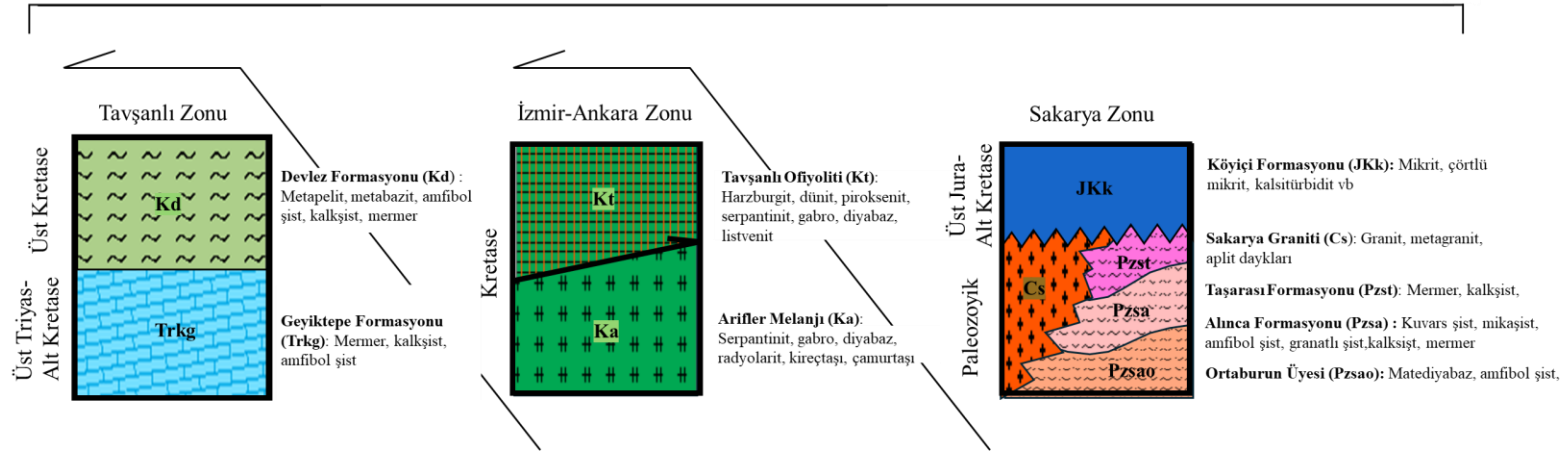
Harita Birimlerinin Korelasyonu

- Kuvaterner Qal Qm
- ~Uyumsuzluk~
- Üst Miyosen? - Pliyosen Imple
- ~Uyumsuzluk~
- Miyosen Trmk Trmb
- ~Uyumsuzluk~
- Alt-Orta Eosen Tea
- ~Uyumsuzluk~
- Üst Kretase Kd Ka Kt
- Uyumlu-
- Üst Triyas - Alt Kretase Trkg JKk Jura-Kretase
- ?
- Karbonifer Cs
- ~Uyumsuzluk~
- Paleozoyik Prst Pzsa Pzsaö

Şekil 2.1. Çalışma alanına ait sadeleştirilmiş jeoloji haritası MTA (2011)'den değiştirilmiştir. (Jeolojik Etütler Dairesi Başkanlığı İ23 a2-a3 ve İ23 b1-b2-b3-b4 1/25000 ölçekli jeoloji haritaları ve İ23 1/100000 ölçekli jeoloji haritalarından derlenmiştir).



Uyumsuz



Şekil 2.2. Çalışma alanına ait sadeleştirilmiş stratigrafik kolon kesit (MTA, 2011)'den değiştirilmiştir. (Kütahya İ-23 paftasına ait jeoloji raporundan derlenmiş ve değiştirilerek alınmıştır).

2.1.1. Alınca Formasyonu (Pzsa)

Alınca Formasyonu, Küçükayman ve ark. (1987) tarafından Alınca metabazikleri olarak adlandırılmış olup, çalışma alanının kuzeyinde geniş bir yayılım göstermektedir. Kuvars şist, mikaşist, granatlı şist, kalkşist ve mermer gibi metamorfik birimlerden oluşmaktadır. Paleozoyik yaşlı Alınca Formasyonunun, Kütahya İ-23 paftasına ait jeoloji raporuna göre orta sıcaklık ve basınçta metamorfizmaya uğradığı belirtilmiştir.

2.1.2. Ortaburun Üyesi (Pzsao)

Alınca Formasyonunun bir üyesi olan Paleozoyik yaşlı Ortaburun Üyesi, metadiyabaz, amfibol şist ve kalsit bantlarından oluşmaktadır.

2.1.3. Taşarası Formasyonu (Pzst)

Taşarası Formasyonu, çalışma alanının kuzeyinde yer alıp, mermer ve kalkşist gibi metamorfik birimlerden oluşmaktadır. Alınca formasyonu üzerinde uyumlu gelen Taşarası Formasyonu, Paleozoyik yaşlıdır. Neritik karbonatlı kayaçların orta basınç-sıcaklık koşullarında metamorfizmaya uğramıştır.

2.1.4. Sakarya Graniti (Cs)

Sakarya Graniti, çalışma alanının doğusunda yerel olarak bulunmaktadır. Granit, metagranit ve aplit dayklarından oluşmaktadır. Kendisinden yaşlı metamorfikleri uyumsuzlukla kesmekte olup, Karbonifer yaşlıdır.

2.1.5. Köyiçi Formasyonu (JKk)

Köyiçi Formasyonu, çalışma alanının kuzeydoğusunda yer almaktadır. Bu formasyonun içeriğinde mikrit, çörtlü mikrit ve kalsitürbidit gibi kayaçlar bulunmaktadır. Ofiyolitik melanj ve Geyiktepe Formasyonu ile tektonik ilişkisi vardır. Jura-Alt Kretase yaşlı bir birim olup, karbonat platformu ortamlarında oluşmuş çeşitli litolojiler içermektedir.

2.1.6. Geyiktepe Formasyonu (TRKg)

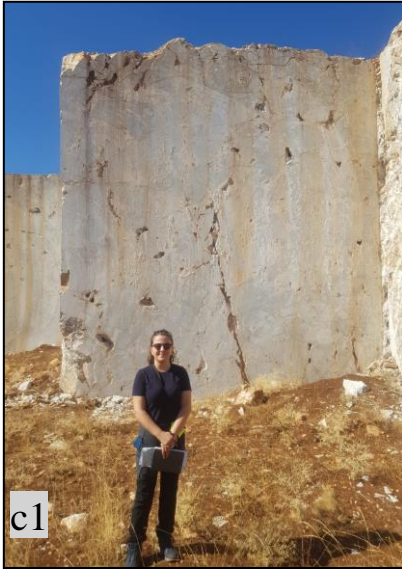
Geyiktepe Formasyonu, Küçükayman ve ark. (1987) tarafından Geyiktepe mermerleri olarak adlandırılmış olup, çalışma alanının merkezinde geniş bir yayılıma sahiptir. Formasyon, karstlaşmış mermer, kalkışist ve amfibol şist birimlerini içermekte olup, mavi-açık gri renklerde belirgin foliasyon ve lineasyon özellikleri göstermektedir (Şekil 2.3). Bu mermerler, Arifler Melanjı tarafından tektonik olarak üzerlenmiştir. Geyiktepe Formasyonuna ait mermerlerin, metamorfizma koşullarından önce neritik ortamda sığ denizel karbonatlar şeklinde oluştuğu ve gömülme metamorfizması ile mermerlere dönüştüğü ve yer yer aragonitleşmelerin görüldüğü belirtilmiştir (Küçükayman ve ark., 1987). Üst Triyas – Alt Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonu, batı taraftan Alaçam Granitleri tarafından kesilmektedir.

2.1.7. Devlez Formasyonu (Kd)

Devlez Formasyonu, çalışma alanında yer yer farklı bölgelerde yüzlek vermektedir. Çoğunlukla çalışma alanının güney taraflarında bulunmaktadır. Metapelit, metabazit, amfibol şist, kalkışist ve mermer gibi birimleri içermektedir. Geyiktepe Formasyonu üzerine uyumlu gelmektedir. Gömülme metamorfizması geçiren bu birim Üst Kretase yaşlıdır.

2.1.8. Arifler Melanjı (Ka)

Arifler Melanjı, çalışma alanının doğu ve güneyinde mostra vermektedir. Ofiyolitik melanj olan bu birim, serpantin, gabro, diyabaz, radyolarit, kireçtaşı, çamurtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Söz konusu birim, üzerinde bulunan Tavşanlı ofiyolitine ait mafik-ultramafik kayalarla tektonik dokanaktır. Arifler Melanjı ve Tavşanlı ofiyoliti, birlikte yer yer de Geyiktepe Formasyonu üzerine bindirme ile yerleşmiştir.



Şekil 2.3. a) Geyiktepe Formasyonu (Trkg) genel görünüm, b ve c1-c2) Geyiktepe Formasyonu mermerlerine ait terkedilmiş ocak görüntüsü.

2.1.9. Tavşanlı Ofiyoliti (Kt)

Tavşanlı Ofiyoliti, çalışma alanının güney-batısında mostra vermektedir. Harzburjit, dünit, piroksenit, serpantinit, gabro, diyabaz ve lisvenit birimlerinden oluşmaktadır. Geç Kretase yaşlı Tavşanlı Ofiyoliti, Geyiktepe Formasyonu üzerine tektonik olarak bindirme ile yerleşmiştir.

2.1.10. Alaçam Graniti (Tea)

Alaçam Graniti, çalışma alanının batısında oldukça geniş bir yayılıma sahip olup, granit, granit porfir, aplit-pegmatit birimlerinden oluşmaktadır. Tavşanlı Ofiyoliti ve Arifler Melanji'nı kesmektedir.

2.1.11. Tunçbilek Formasyonu (Tmt)

Tunçbilek Formasyonu, çalışma alanının doğusunda yer almaktadır. Kil, marn, kömür, siltaşı, kumtaşı, tuf, konglomera ve kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Kırıntılı, karbonatlı ve volkanik kayalara sahiptir. Miyosen yaşlı Geyiktepe Formasyonu ile tektonik dokanaklıdır.

2.1.12. Demirbilek Üyesi (Tmtd)

Tunçbilek Formasyonunun bir üyesi olan Demirbilek Üyesi Miyosen yaşlı olup, kumtaşı, siltaşı, kil, marn, kireçtaşı, tuf ve kömür seviyelerinden oluşmaktadır. Birimin ana litolojisini kil-marn ardalanması oluşturmaktadır. Pliyosen yaşlı çökeller tarafından uyumsuzlukla üzerlenmektedir.

2.1.13. Karaköy Volkanitleri (Tmk)

Karaköy Volkanitleri, çalışma alanının merkezinde lokal bir şekilde yüzlek vermiştir. Bazaltik andezit ve bazalt birimlerinden oluşmaktadır. Miyosen yaşlı birimleri uyumsuzlukla kesmektedir.

2.1.14. Emet Formasyonu (Tmple)

Emet Formasyonu, çalışma alanının batısında geniş bir alan kaplarken, doğuda lokal olarak yer almaktadır. Kireçtaşı, marn, çakıltası ve kumtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Üst Miyosen?-Pliyosen yaşlı olan Emet Formasyonu, kendinden daha yaşlı birimler üzerine uyumsuz olarak da gelmekte olup içerdiği sedimanter kayaçlar, düzenli bir akarsu ağı ile uzunca bir süre beslenmiş bir göl ortamını göstermektedir (MTA, 2011).

2.1.15. Yamaç Molozu (Qym)

Kuvaterner yaşlı olan bu birim iyi tutturulmamış köşeli çakıl ve bloklardan oluşmaktadır. Birim, yüksek geçirimli özellik taşımaktadır.

2.1.16. Alüvyon (Qal)

Alüvyon birimi, menderesli ve örgülü akarsu sistemleri ile taşkın ovası çökellerinden oluşmakta olup, çakıl, kum, silt ve çamur birikintileri içermektedir. Akarsu yatakları boyunca geniş bir yayılım göstermektedir.

2.2. Jeolojik Kesitler

Jeolojik kesitler, hidrojeolojik ve jeolojik çalışmaların daha detaylı ve anlamlı bir şekilde yapılabilmesi için önemlidir. Çalışma alanındaki farklı birimlerin dağılımı, yerleşimi ve birbiriyle olan ilişkilerini göstermek, Karasu Kaynağının beslenme ve boşalım alanı arasındaki bağlantıyı kurarak çıkış mekanizmasını anlamak için Karasu Karst Kaynağından geçmek suretiyle 3 adet kesit çizilmiştir. Söz konusu kesitler A-A', B-B' ve C-C' olarak adlandırılmıştır.

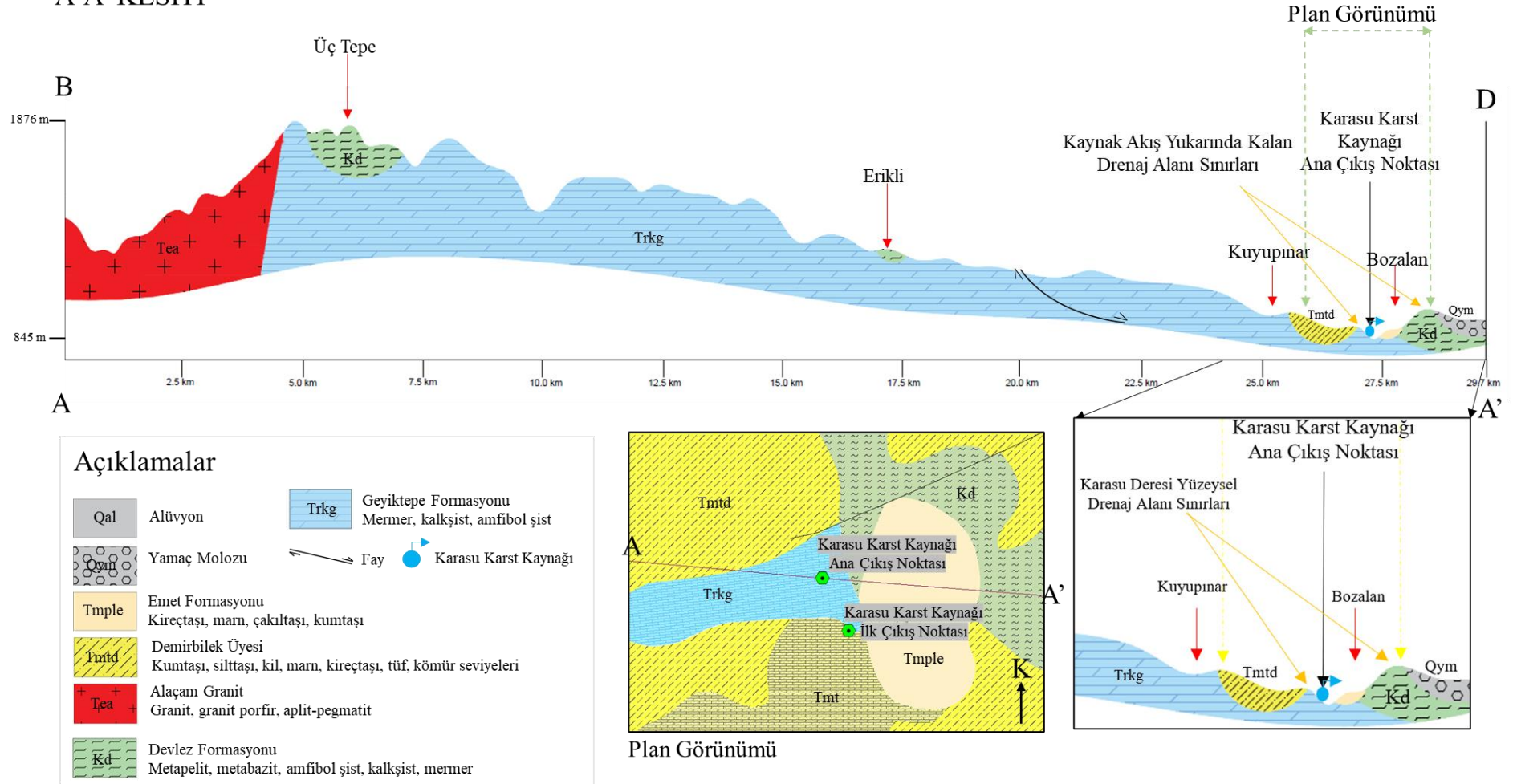
A-A' kesiti, Karasu Karst Kaynağının ana boşalım noktasını kesecek şekilde, B-D doğrultusunda olup, temelinde Üst Triyas-Alt Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonu (Trkg) yer almaktadır. Bu formasyon, uyumsuz bir şekilde gelen Alt-Orta Eosen yaşlı Alaçam Graniti tarafından yaklaşık olarak batı yönünde sınırlandırılmaktadır. Geyiktepe Formasyonu üzerine uyumlu gelen Devlez Formasyonu (Kd) ve yamaç molozu ile yer

yer örtülmektedir. Bununla birlikte, toplam kesit uzunluğu 29.7 km olarak belirlenmiştir (Şekil 2.4).

B-B' kesiti, Karasu Karst Kaynağının ilk çıkış ve ana boşalım noktasını kesecek şekilde GD-KB doğrultusunda uzanmakta olup, temelinde Üst Triyas-Alt Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonu (Trkg) yer almaktadır. Geyiktepe Formasyonu yaklaşık güney doğrultusunda Üst Kretase yaşlı Tavşanlı Ofiyoliti (Kt) ve Arifler Melanjı (Kd) ile sınırlanmış olup, yaklaşık kuzey yönünde ise Miyosen yaşlı Demirbilek Üyesi (Tmtd) ile kesit sonlandırılmıştır. Kesitin toplam uzunluğu 10 km'dir. B-B' kesitinde, Karasu Deresi'nin yüzeysel drenaj alanının genel profili daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. Karasu Karst Kaynağının ilk boşalım noktasının, Miyosen yaşlı Tunçbilek Formasyonu (Tmt) ile Geyiktepe Formasyonunun (Trkg) dokanak noktası olduğu ve bu dokanak ilişkisinin kaynağın akışa geçişini sağladığı düşünülmektedir. Öte yandan, Karasu Karst Kaynağı ana çıkış noktasından fay ile boşalıma geçtiği görülmektedir (Şekil 2.5).

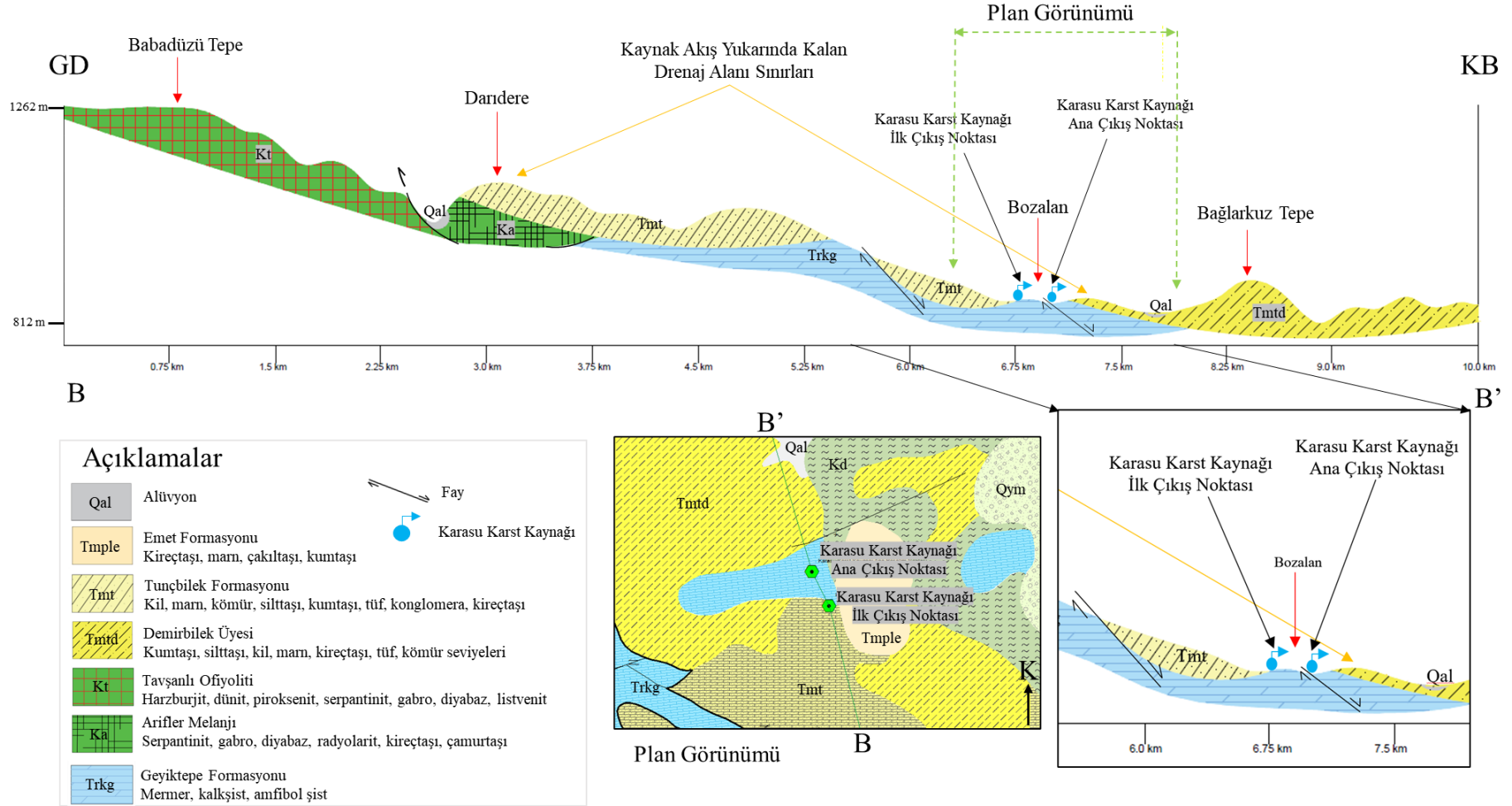
C-C' kesiti, Karasu Karst Kaynağının ana boşalım noktasını kesecek şekilde GB-KD doğrultusunda olup, temelinde Üst Triyas-Alt Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonu (Trkg) üzerinde uyumlu olarak gelen Alt Kretase yaşlı Devlez Formasyonu (Kd) ile güney-batı doğrultusundan, aynı şekilde Devlez Formasyonu ve yamaç molozu ile kesit sınırlandırılmıştır. Kesitin toplam uzunluğu 20.7 km olarak belirlenmiştir (Şekil 2.6).

A-A' KESİTİ



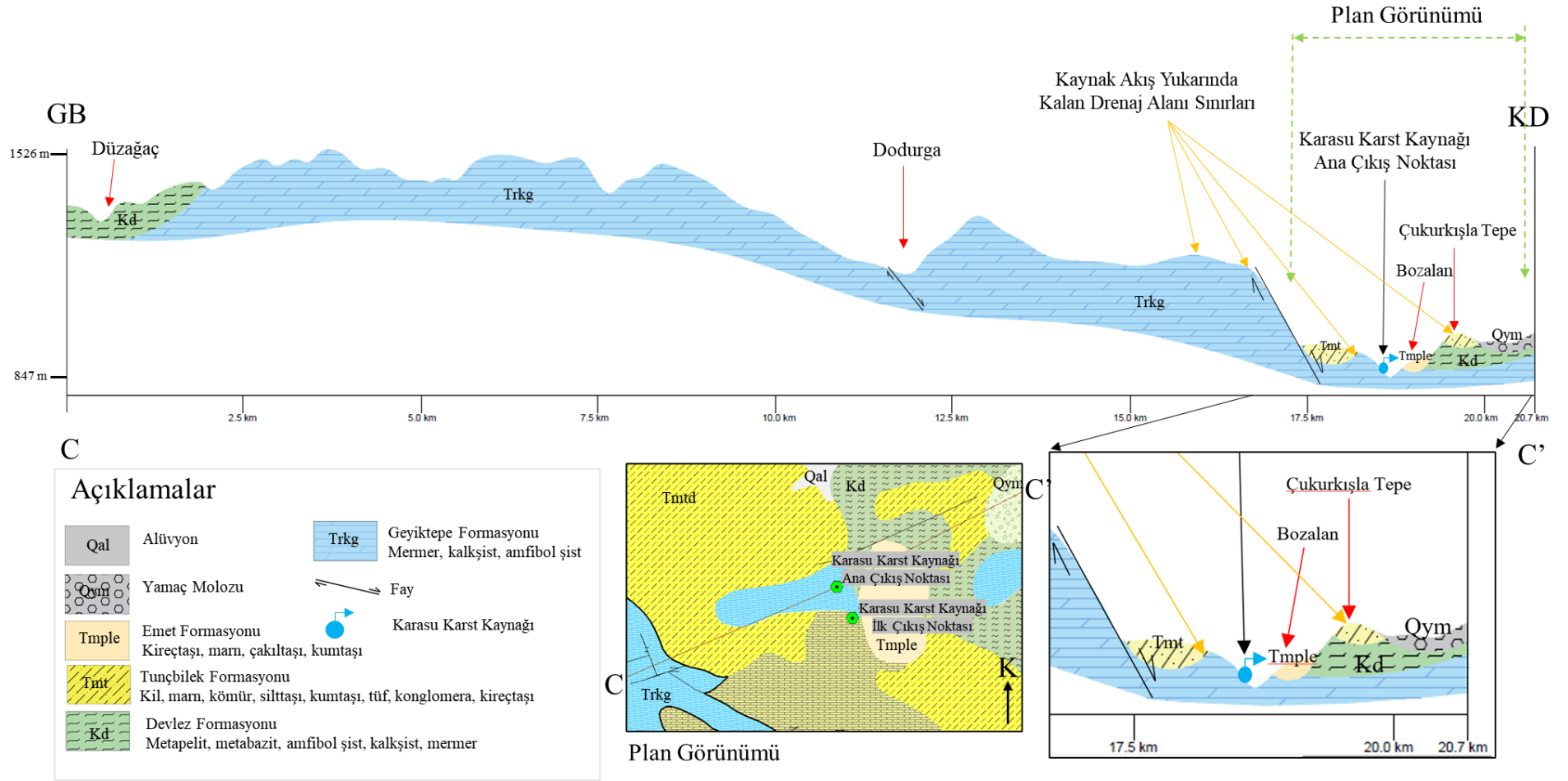
Şekil 2.4. Çalışma alanına ait B–D doğrultulu A-A' kesiti.

B-B' KESİTİ



Şekil 2.5. Çalışma alanına ait GD–KB doğrultulu B-B' kesiti.

C-C' KESİTİ



Şekil 2.6. Çalışma alanına ait GB–KD doğrultulu C-C' kesiti.

2.3. Jeolojik Evrim

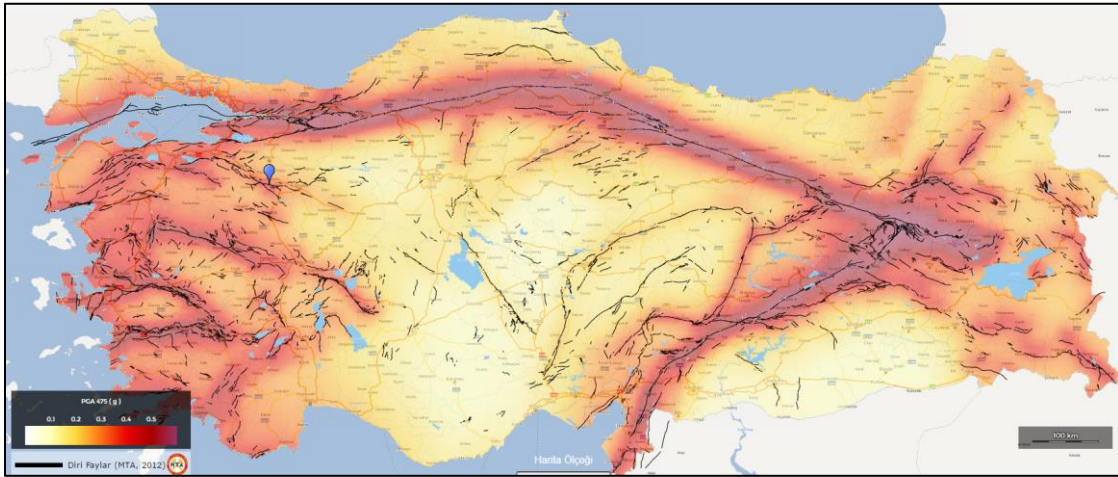
Çalışma alanı, Tetis kuşağının bir parçası olup, Tetis'in kuzey kolunun kapanmasıyla meydana gelen bir dizi tektonik olaya tanıklık etmiştir. Çalışma alanı ve çevresi Pontidler ile Anatolid-Torid Platformunun çarpışması ile oluşmuş İzmir-Ankara-Erzincan Kenet Zonu'nun batısında yer alan İzmir-Ankara bölümünün üzerinde bulunmaktadır. Bu bölgede her iki platforma ait birimler gözlenmektedir. İzmir-Ankara kenedinin güneyinde Tavşanlı Zonu, kuzeyinde ise Sakarya Zonu yer almaktadır. MTA (2011)'e göre; inceleme alanında en yaşlı birim olan Alınca Formasyonu üzerine uyumlu gelen Taşarası Formasyonu bulunmaktadır. Bu birimler, Sakarya Granitleri tarafından kesilmektedir. Sakarya Zonu'nda bulunan Köyiçi Formasyonu, Arifler Melanjı'nı tektonik olarak üzerlemektedir. Anatolid-Torid platformuna ait Tavşanlı Zonu'nda, bölgesel metamorfizma geçirmiş Geç Triyas-Erken Kretase yaşlı mermerlerden oluşan Geyiktepe Formasyonu ile Kretase yaşlı metamorfitlelerden oluşan Devlez formasyonu yer almaktadır. İzmir-Ankara Zonu tarafında, Pontidler ile Anatolid-Torid Platformu'nun çarpışması sonucu oluşmuş olan Geç Kretase yaşlı Tavşanlı Ofiyoliti ve Arifler Melanjı yer almaktadır. Karasal bir dönemin ardından oluşan gölsel havzalarda, Miyosen yaşlı Tunçbilek Formasyonu oluşmuştur. Göl çökellerinin karasal bataklık kesimleri Demirbilek üyesi olarak tanımlanmıştır. Bu dönemdeki çökelim sırasında bazaltik, andezitik ve trakitik volkanizma da aktif olmuştur. Diğer bir gölsel çökelim ise Geç Miyosen?-Pliyosen döneminde gerçekleşmiştir. Karbonatlı Emet Formasyonu, Miyosen çökelleri üzerinde uyumsuzlukla yer almaktadır (MTA, 2011).

2.4. Tektonizma

Çalışma alanında tektonizma; çatlaklar, kırıklar ve faylar şeklinde gözlenebilmektedir. Bu yapılar suyun akış yönünü belirleyebilmekte ve su, bu unsurlar boyunca kolay hareket edebilmektedir. Erozyon ve karstlaşma süreçlerinde, suyun belirli hatlar boyunca yoğunlaşması sonucu bu noktalarda karstlaşma süreci hızlanmaktadır. Mağara, dolin, vb. çöküntü yapılar karstik özelliklerin gelişimine katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu unsurlar, suyun yeraltında depolanabileceği alanlar oluşturabilmekte ve suyun yeraltında daha derinlere ulaşmasıyla akifer beslenimine yardımcı olabilmektedir. Çizgisel unsurlar, kirleticilerin yayılımını da etkileyebilmekte ve bu yapılar boyunca hızla hareket

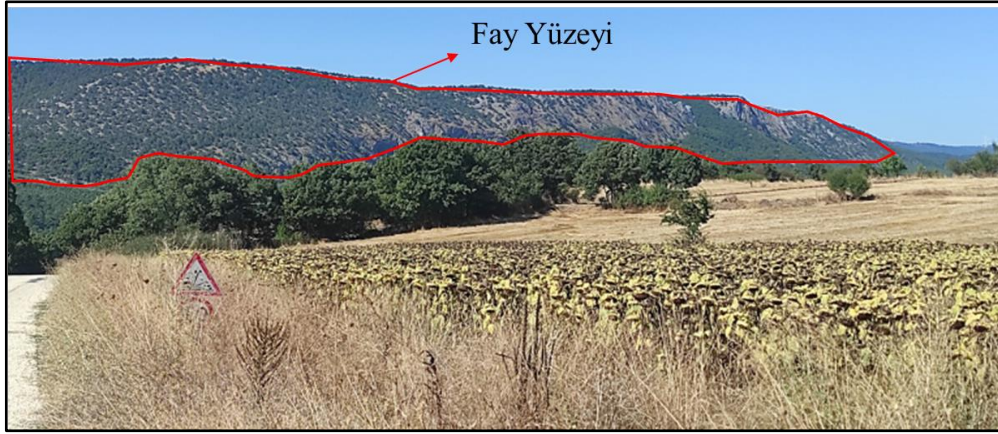
etmelerine neden olabilmektedir. Dolayısıyla kirleticilerin geniş alanlara yayılmasına sebep olabilmektedir.

Çalışma alanı çizgisel unsurlar bakımından incelendiğinde, çizilen Karasu Deresi yüzeysel drenaj alanından yaklaşık KB-GD uzantılı bir diri fay geçtiği görülmektedir (Şekil 2.7). AFAD tarafından yayımlanan ve 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye deprem tehlike haritası ve MTA diri fay gösterimine göre en büyük yer ivmesi tehlike tanımlamaları yapılmıştır. “0.0 g” değeri düşük tehlike, “> 5.0 g” yüksek tehlike olarak tanımlanmıştır. “Türkiye Deprem Tehlike Haritaları interaktif web uygulamasından, çalışma alanına ait en büyük yer ivmesi yaklaşık 0.394 g olarak hesaplanmıştır (AFAD, 2024).

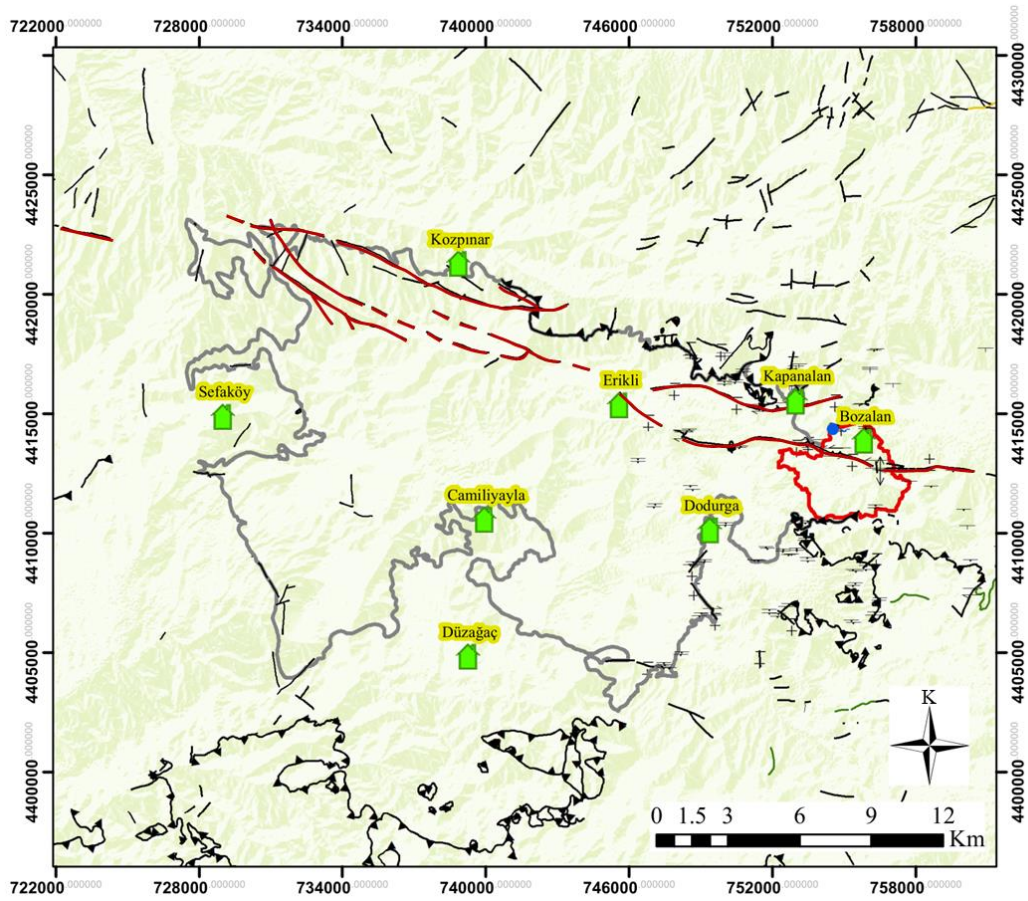


Şekil 2.7. Türkiye depremsellik ve diri fay gösterimi (AFAD, 2024).

Çalışma alanında, KB-GD yönünde uzanan ve birbirine paralel olan birkaç eğim atımlı normal fay bulunmaktadır. Bu fayların kuzey tarafları, güney taraflarına göre düşmüş durumdadır. Bu durum, Paleozoyik'ten Miyosen'e kadar uzanan tüm birimleri etkilemiştir. Ayrıca, çalışma alanında Geç Kretase yaşlı Arifler Melanjı ile ultramafiklerin metamorfik birimlere bindirdiği tektonik yapılar da yer almaktadır (MTA, 2011). Çalışma alanından geçen diri fayın fay yüzeyi yapılan arazi çalışmaları esnasında gözlemlenmiştir (Şekil 2.8). Çalışma alanı ve çevresine ait çizgisel unsurların yer aldığı harita Şekil 2.9'da sunulmuştur.



Şekil 2.8. Çalışma alanında gözlenen fay düzlemi.



Açıklamalar

- | | | |
|--|---------------|-------------------------------|
| Yerleşim | Diri Fay | Sağ Yönlü Doğrultu Atımlı Fay |
| Karasu Karst Kaynağı Ana Çıkış | Diğer Faylar | Sol Yönlü Doğrultu Atımlı Fay |
| Kaynak Akış Yukarısında Kalan Drenaj Alanı | Bindirme Fayı | Eğim Atımlı Fay |
| Kaynak Beslenme Alanı | Doğrultu-Eğim | |

Şekil 2.9. Çalışma alanına ait çizgisellik haritası.

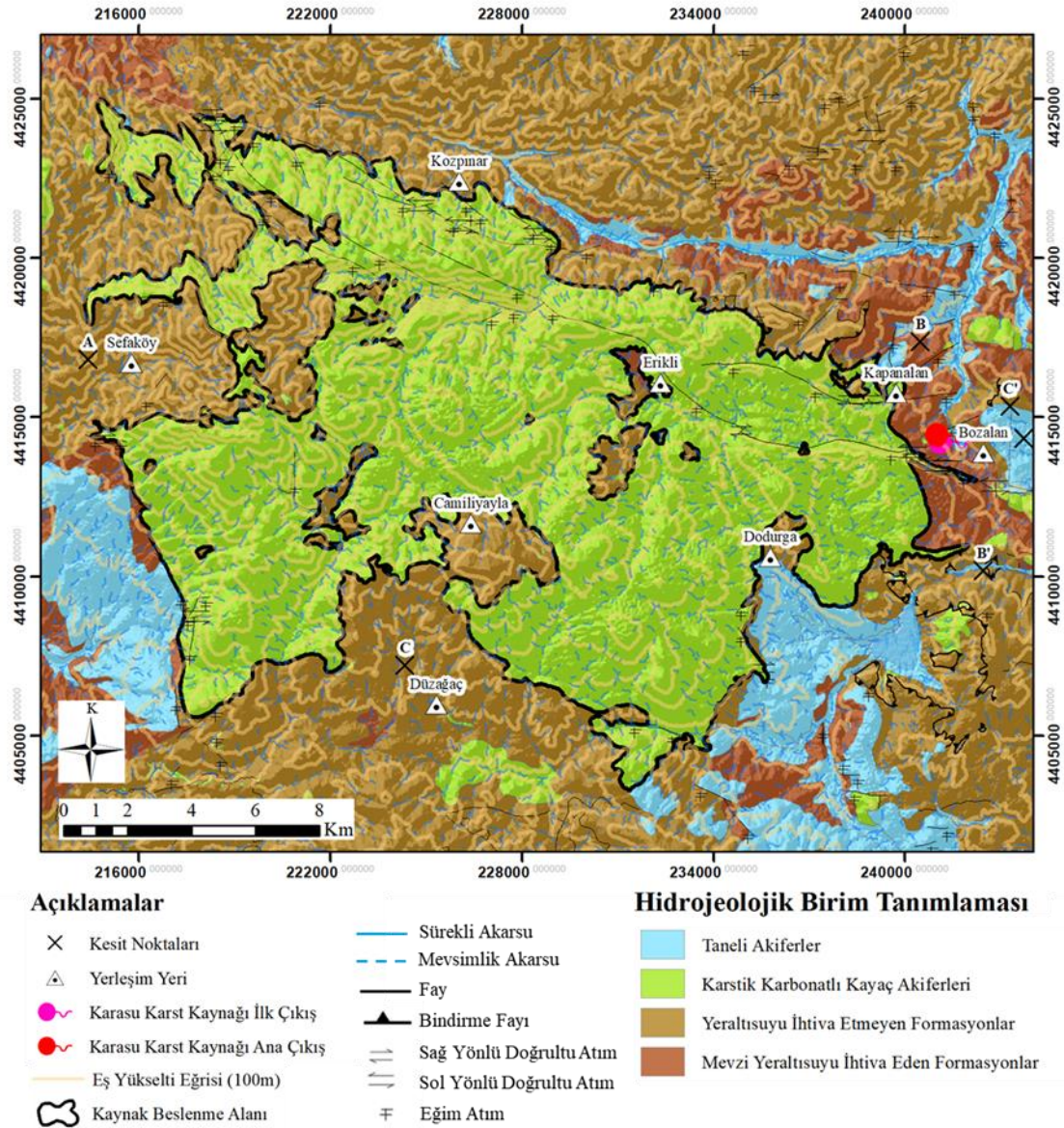
3. HİDROJEOLOJİ

Sunulan bölüm kapsamında, çalışma alanının hidrojeolojik yapısını anlamak ve Karasu Karst Kaynağının beslenme ve boşalma mekanizmasını kurgulamak amacıyla yapılan jeolojik çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucundan çalışma alanına ait hidrojeoloji haritası (Şekil 3.1) ve hidrojeoloji kesitleri (Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) oluşturulmuştur.

3.1. Hidrostratigrafik Birimler

Alınca Formasyonu (Pzsa), Ortaburun Üyesi (Pzsao) ve Taşarası Formasyonu (Pzst), çalışma alanının kuzeyinde yer alan Paleozoyik yaşlı metamorfik birimler olup, kuvars şist, mikaşist, granatlı şist, kalkşist, mermer, metadiyabaz, amfibol şist ve kalsit bantlarından oluşmaktadır. Bu birimler, litolojik bileşimleri ve geçirdikleri metamorfizma etkisiyle hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmiştir. Sakarya Graniti (Cs), çalışma alanının doğusunda dar bir alanda yayılmış olup, granit, metagranit ve aplit dayklarından oluşmaktadır. Bu bileşimi nedeniyle hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmiştir. Köyiçi Formasyonu (JKk), mikrit, çörtlü mikrit ve kalsitürbidit gibi kayalardan oluşmakta olup, ince taneli ve sıkı yapıya sahip olması nedeniyle yeraltısuyu hareketi kısıtlıdır. Birim, litolojik özellikleri nedeniyle hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmektedir. Geyiktepe Formasyonu (Trkg), karstlaşmış mermer, kalkşist ve amfibol şist birimlerinden oluşmakta olup, ana akifer konumundadır ve bölgede doğu-batı yönünde geniş bir yayılım sergilemektedir. Bu formasyon, özellikle doğu-batı doğrultusunda yoğun tektonik aktivite sonucu oluşan çatlaklı, kırıklı ve faylı yapılar barındırmaktadır. Bu yapılar içerisindeki sular, karstlaşma süreçlerinin gelişimini hızlandırarak mermerler içerisinde dolaşmakta ve genellikle batıdan doğuya doğru hareket ederek Karasu Karst Kaynağından boşalmaktadır. Devlez Formasyonu (Kd), metapelit, metabazit, amfibol şist, kalkşist ve mermer gibi birimleri içermekte olup, Üst Kretase yaşlıdır ve gömülme metamorfizması geçirmiştir. Bu birimler, litolojik özellikleri ve metamorfizma koşulları nedeniyle hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmiştir. Arifler Melanjı (Ka) ve Tavşanlı Ofiyoliti (Kt), çalışma alanının doğu ve güneyinde yüzlek vermekte olup serpantin, gabro, diyabaz ve diğer ultramafik ve mafik birimlerden oluşmaktadır. Bu tür kayalar genellikle düşük gözeneklilik ve geçirgenlik

özelliklerine sahiptir. Heterojen yapılarıyla birlikte değerlendirildiğinde, suyun hareketini kısıtlamaktadır. Her iki birim de hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmiştir. Alaçam Graniti (Tea), granit, granit porfir ve aplit-pegmatit birimlerinden oluşmakta olup, bu birimler hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmektedir. Granit ve granit porfir gibi derinlik tipi magmatik kayalar genellikle düşük gözeneklilik ve geçirgenlik özellikleri göstermektedirler. Alaçam Graniti, Geyiktepe Formasyonunu batıdan sınırlamaktadır. Tunçbilek Formasyonu (Tmt), kil, marn, kömür, silttaşı, kumtaşı, tuf, konglomera ve kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. İçeriğindeki kumtaşı, konglomera ve kireçtaşı gibi birimler geçirgenliği arttırmaktadır. Fakat içeriğindeki diğer birimlerin etkisiyle geçirgenlik azalmaktadır. Bu nedenle bu söz konusu formasyon az geçirimli olarak kabul edilmiştir. Karaköy Volkanitleri (Tmk), bazaltik andezit ve bazalt birimlerinden oluşmakta olup, bu volkanitler, genellikle düşük gözeneklilik ve geçirgenlik özellikleri göstermektedir. Bu nedenle hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilmektedir. Emet Formasyonu (Tmpe), yamaç molozu (Qym) ve alüvyon (Qal) içerdikleri yüksek geçirimliliğe sahip sedimanter ve pekişmemiş birimler sebebiyle geçirimli olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışma alanına ait hidrojeoloji haritası.

3.2. Hidrojeolojik Kesitler

Önceki bölümlerde yapılan hidrojeolojik değerlendirmeler üzerine, çizilmiş jeolojik kesitler hidrojeolojik kesitlere dönüştürülmüştür. Bu bölümde, jeolojik kesitlerin hidrojeolojik kesitlere dönüştürülmesiyle, Karasu Karst Kaynağının muhtemel yeraltısuyu akış yönü ve beslenme alanı, bölgedeki jeolojik birimlerin hidrojeolojik özellikleriyle birlikte daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.

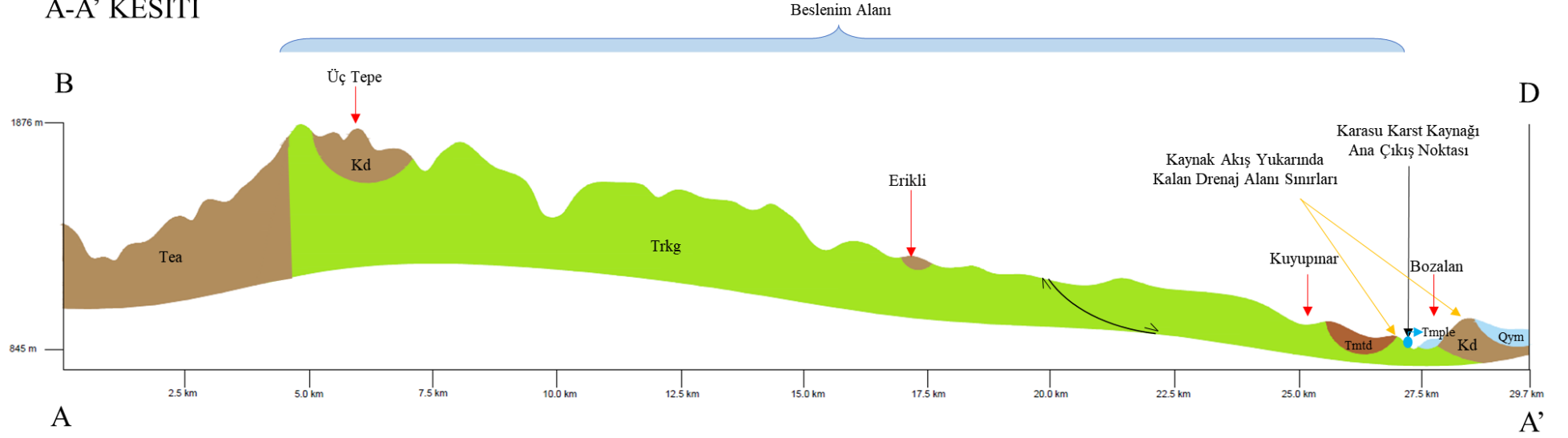
A-A' kesiti (Şekil 3.2) incelendiğinde, yeraltısuyu akış yönü batıdan doğuya doğru olduğu görülmektedir. Geyiktepe Formasyonunu (Trkg), batıda Alaçam Graniti (Tea) ile sınırlı olup, geçirimsiz birim olarak değerlendirilen Alaçam Granitlerinden Geyiktepe Formasyonuna yeraltısuyu beslenimi olmayacağı anlaşılmıştır.

B-B' kesiti (Şekil 3.3), Karasu Karst Kaynağı ilk çıkış ve ana çıkış noktasını kesmektedir. İnceleme alanında en doğusundan, GD-KB doğrultusundan alınan bu kesitte, Geyiktepe Formasyonunun (Trkg) daha az yüzlek verdiği görülmektedir. Kesite göre, yeraltısuyu, karstik olmayan birimler arasındaki en düşük dokanakta boşalırma geçmektedir.

C-C' kesiti (Şekil 3.4), Karasu Karst Kaynağı ana çıkış noktasını kesmektedir. GB-KD doğrultusundan alınan bu kesit, kaynağın Geyiktepe Formasyonu (Trkg) ile beslendiğini göstermektedir.

Çalışma alanında çizilen kesitlerden de anlaşıldığı üzere, yeraltısuyu dolaşımı Geyiktepe Formasyonuna ait mermerler içinde gerçekleşmektedir. Oluşturulan jeolojik haritalar ve kesitler doğrultusunda, Karasu Karst Kaynağının beslenme alanının, en fazla Geyiktepe Formasyonu birimiyle sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, bu beslenme alanı 269.81 km² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Karasu Karst Kaynağının akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı 13.2 km² olarak hesaplanmış olup, söz konusu drenaj alanından gelebilecek süzülme ve yüzeysel akış miktarlarının Karasu Karst Kaynağına olabilecek etkilerini anlayabilmek için yüzeysel drenaj alanı özelinde de hesaplamalar yapılmıştır. Ancak, bahsi geçen yüzey drenaj alanının (13.2 km²), 2.6 km²'lik kısmını, Geyiktepe Formasyonu oluşturduğundan, kaynak akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı 10.6 km² olarak alınmıştır. Bu veriler, tezin ilerleyen bölümlerinde yapılan değerlendirmelerde kullanılmıştır.

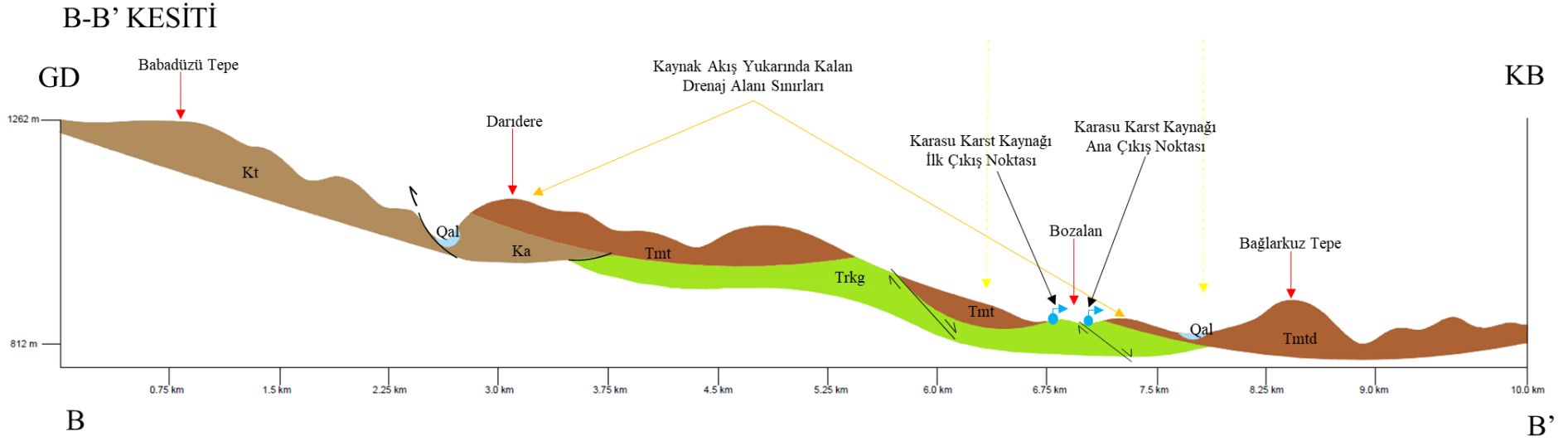
A-A' KESİTİ









Açıklamalar

Qym: Yamaç Molozu		Taneli Akiferler
Tmple: Emet Formasyonu Kireçtaşı, mam, çakıltaşı, kumtaşı		Karstik Karbonatlı Kayaç Akiferleri
Tmtd: Demirbilek Üyesi Kumtaşı, silttaşı, kil, mam, kireçtaşı, tuf, kömür seviyeleri		Mevzi Yeraltısuyu İhtiva Eden Formasyonlar
Tea: Alaçam Granit Granit, granit porfir, aplit-pegmatit		Yeraltısuyu İhtiva Etmeyen Formasyonlar
Kd: Devlez Formasyonu Metapelit, metabazit, amfibol şist, kalkışist, mermer		Karasu Karst Kaynağı
Trkg: Geyiktepe Formasyonu Mermer, kalkışist, amfibol şist		Fay

Şekil 3.2. Çalışma alanına ait B-D doğrultulu hidrojeoloji kesiti.

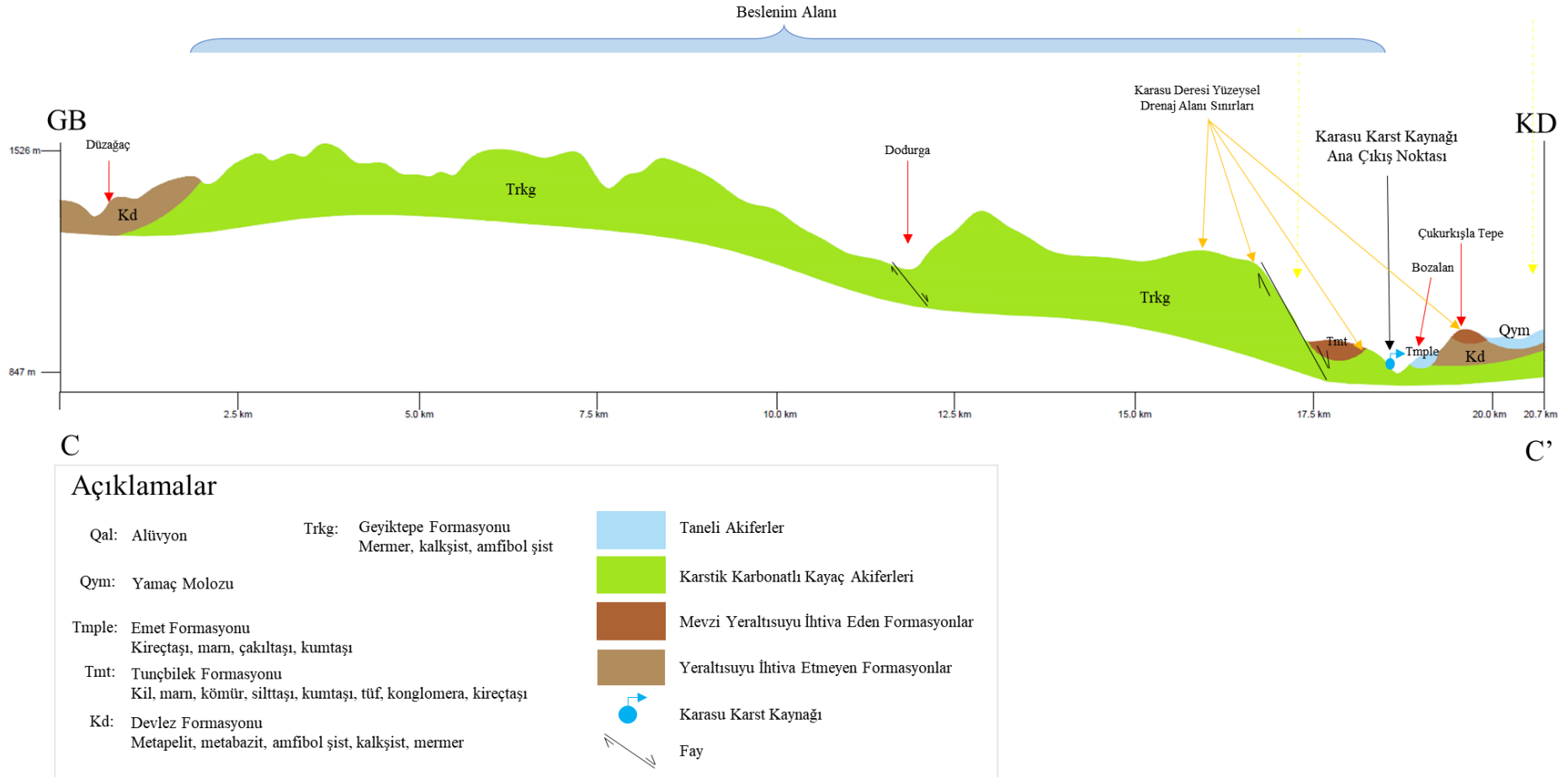


Açıklamalar

Qal: Alüvyon	 Taneli Akiferler
Tmple: Emet Formasyonu Kireçtaşı, marn, çakıltaşı, kumtaşı	 Karstik Karbonatlı Kayaç Akiferleri
Tmt: Tunçbilek Formasyonu Kil, marn, kömür, silttaşı, kumtaşı, tüf, konglomera, kireçtaşı	 Mevzi Yeraltısuyu İhtiva Eden Formasyonlar
Tmtd: Demirbilek Üyesi Kumtaşı, silttaşı, kil, marn, kireçtaşı, tüf, kömür seviyeleri	 Yeraltısuyu İhtiva Etmeyen Formasyonlar
Kt: Tavşanlı Ofiyoliti Harzburjit, dünit, piroksenit, serpantinit, gabro, diyabaz, listvenit	 Karasu Karst Kaynağı
Ka: Arifler Melanji Serpantinit, gabro, diyabaz, radyolarit, kireçtaşı, çamurtaşı	 Fay
Trkg: Geyiktepe Formasyonu Mermer, kalkşist, amfibol şist	

Şekil 3.3. Çalışma alanına ait GD-KB doğrultulu hidrojeoloji kesiti.

C-C' KESİTİ



Şekil 3.4. Çalışma alanına ait GD-KB doğrultulu hidrojeoloji kesiti.

4. HİDROLOJİ

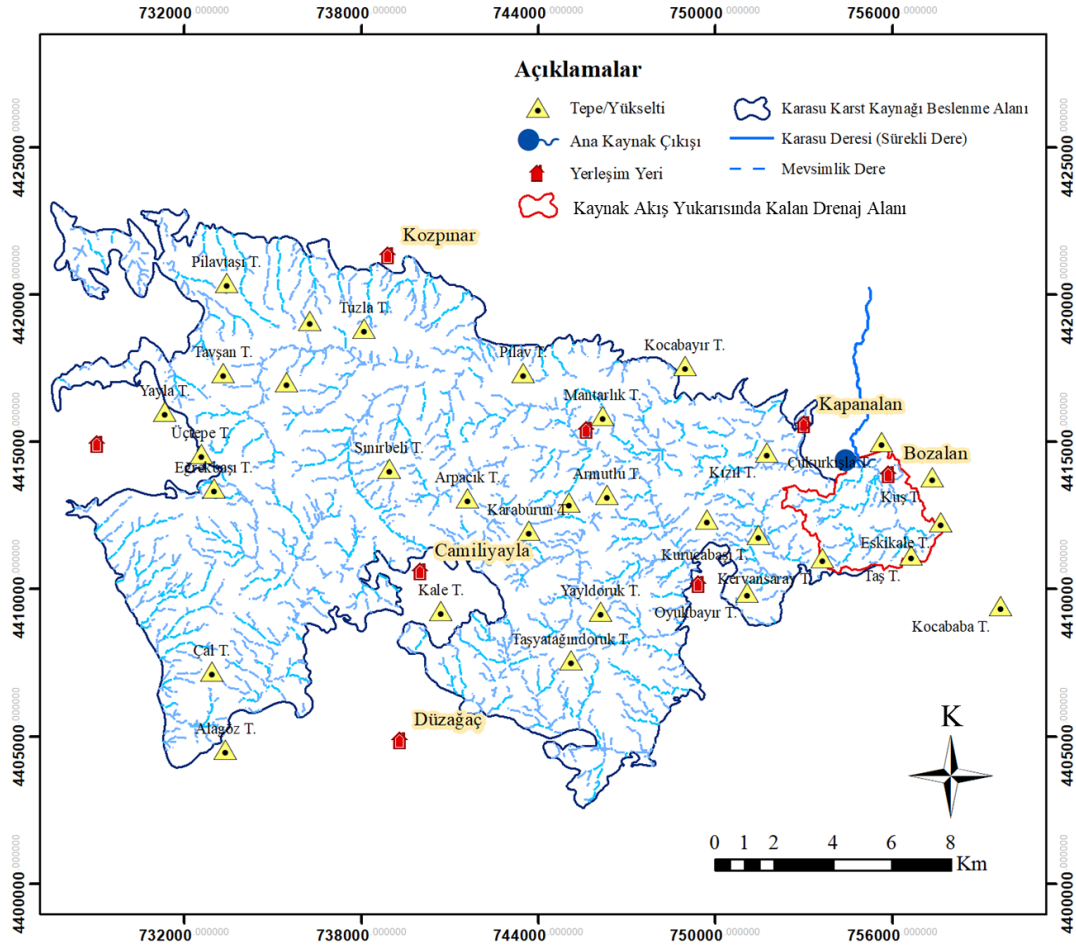
Karasu Karst Kaynağının hidrolojik özelliklerini incelemek, kaynağın beslenme alanının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde Karasu Karst Kaynağının meteorolojik etkiler ile hidrolojik su bütçesi arasındaki ilişki ele alınmıştır.

Bu bölümde, Harita Genel Komutanlığı'nın oluşturduğu 1/25000 ölçekli İ2 3a2-a3 ve İ23 b1-b2-b3-b4 topoğrafik haritalar ve HGM Küre programına ait topoğrafik haritalar katmanı kullanılarak çalışma alanına dair akarsu dağılımı, kaynak ve çeşmeler gibi su noktalarına ait bilgiler elde edilmiştir. GIS tabanlı programlar ile Karasu Deresi kaynak kesitinde drenaj alanı çizilmiş, topoğrafik haritalar ve Google Earth Pro ile kontrol edilmiştir. Çalışmalar sonrasında Karasu Karst kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanı 10.6 km² olarak hesaplanmıştır. İnceleme alanı ve yakın dolayında, Karasu Karst Kaynağının akiferini oluşturan mermerlerden Karasu Karst Kaynağı ve Kömürsü-Gürgenlidere Kaynakları dışında önemli bir boşalım olmadığından, Geyiktepe Formasyonunun yüzeysel yayılım alanı (269.81 km²), Karasu Karst Kaynaklarının beslenme alanı olarak kabul edilmiştir.

4.1. Su Noktaları

4.1.1. Akarsular

Çalışma alanındaki tek sürekli akarsu olan Karasu Deresi, Karasu Karst Kaynağının boşalımı ile doğmaktadır. Alandaki mevsimsel dereler, Çaral Dere, Akdere, Göllüçukur Dere ve Bozalan Dere olup, bu dereler Karasu Deresi'ni beslemektedir. Karasu Deresi debisi düzensiz olup 0.9 m³/s - 72.6 m³/s arasında değişmektedir ve 3.6 m³/s yıllık ortalama debiye sahiptir (IRAP, 2021) ve 65 km uzunluktadır (HKEP, 2013). Çalışma alanına ait drenaj ağı haritası Şekil 4.1'de verilmiştir. Sakarya Nehri'nin kollarından biri olan Karasu Deresi (Şekil 4.2) üzerinde önemli balıkçılık ve turizm faaliyetleri de gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.1. Çalışma alanı drenaj ağı haritası.



Şekil 4.2. Kaynak boşalımı mansabından Karasu Deresi görüntüsü.

4.1.2. Kaynaklar

İnceleme alanının doğusunda boşalım sağlayan Karasu Karst Kaynağı, Üst Triyas – Alt Kretase yaşlı Geyiktepe Formasyonuna ait mermerler ile Tunçbilek Formasyonunun dokanağından boşalmaktadır. Günümüzde kaynağın sürekli debisi ölçülmemekle birlikte 1978-1980 ile 2001-2006 yılları arasına ait ölçülmüş verilere göre ortalama debi $1.842 \text{ m}^3/\text{s}$ olup ($58.84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$), en düşük debi $0.779 \text{ m}^3/\text{s}$ ve en yüksek debi ise $3.669 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. 2017 yılında hazırlanan Sakarya Havzası Master Plan Nihai Raporu'na göre; Karasu Karst Kaynağından Bozüyük, Bilecik, Pazaryeri, Bayırköy, Söğüt, Küre, Çaltı ve Osmaneli Belediyelerine içme suyu tahsisi bulunmaktadır (DSİ, 2017). Çalışma alanında yapılan arazi çalışmasında kaynağın ilk çıkış yaptığı yerden sonra dere olarak aktığı ve suyun kaptaja alındığı, yukarıda adı geçen belediyelere tahsisten sonra da doğal akışa geçtiği yerinde de görülmüştür (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).



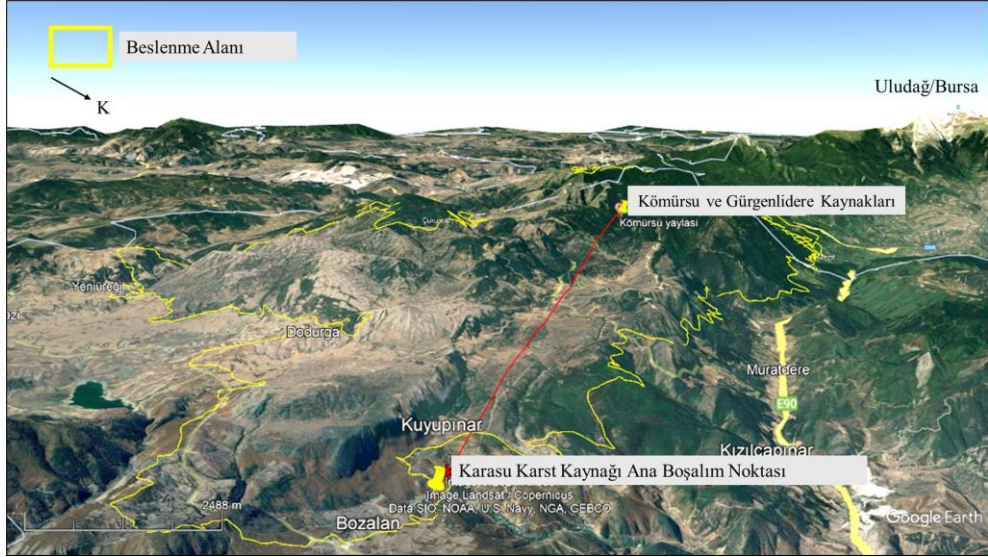
Şekil 4.3. a) Karasu Karst Kaynağı ana çıkış yeri, b) Karasu Deresi, c) Karasu Karst Kaynağı kaptajı ve d) Karasu Karst Kaynağı tahsisi sonrası doğal akışa geçtiği kanal kesiti.



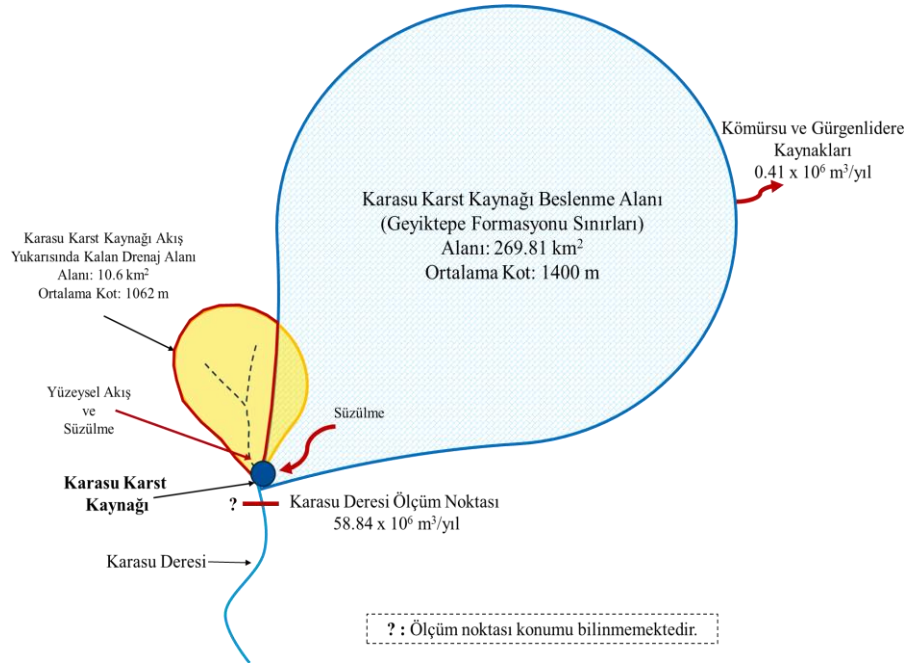
Şekil 4.4. a1-a2)- Karasu Karst Kaynağı ilk çıkış, b- Karasu Karst Kaynağı ana çıkış noktası (Eylül, 2023).

Ayrıca, DSİ (2017)'de, Karasu Karst Kaynağı beslenme alanının üst kotlarında bir grup kaynak çıkışı olduğu belirtilmiştir. Bu kaynaklar, Kömürsu ve Gürgenlidere kaynakları olarak adlandırılmıştır. Tam olarak kaynak konumları literatür araştırmalarında tespit edilemese de Kömürsu Yaylası civarlarında boşaldığı düşünülmektedir. Bu durumda Kömürsu Yaylası, Karasu Karst Kaynağının yaklaşık 17 km batısında yer almaktadır (Şekil 4.5). Adı geçen çalışmada söz konusu kaynakların toplam debisinin, $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$

($\sim 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca söz konusu raporda, diğer boşalmalar olarak adlandırılmış kuyu ile çekim ile yılda $0.11 \times 10^6 \text{ m}^3$ boşalım gerçekleşmektedir (DSİ, 2017). Bu bölüme kadar çalışma alanına ait verilen bilgilerin genel özeti Şekil 4.6'da görselleştirilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda sonraki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



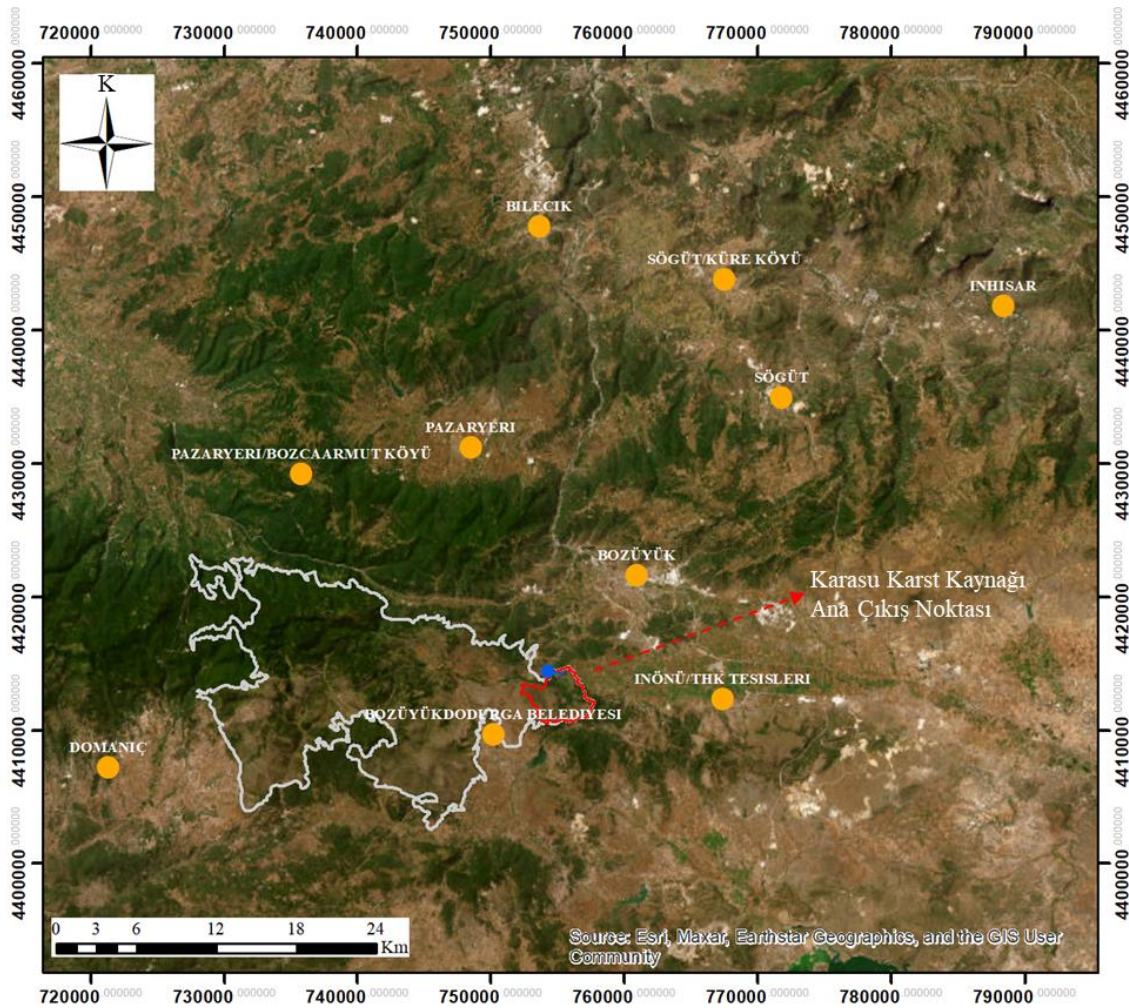
Şekil 4.5. Karasu Karst Kaynağı beslenme alanındaki diğer kaynakların yaklaşık konumları.



Şekil 4.6. Çalışma alanı genel özeti.

4.2. Hidrometeorolojik Analiz

Çalışma alanına ait hidrolojik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden bölgedeki 10 meteoroloji gözlem istasyonuna ait aylık yağış ve sıcaklık verileri alınmıştır. Yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak su bütçesi bileşenleri hesaplanmış, kaynağa ait beslenme ve boşalım ilişkisi kurulmuştur. Verileri değerlendirilen meteoroloji gözlem istasyonlarının lokasyonları Şekil 4.7'de sunulmuştur. Çalışma alanının çevresinde bulunan MGİ'lere ait gözlem süresi, koordinat, kot, vb. bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Açıklamalar

- MGM Meteoroloji Gözlem İstasyonu
- Karasu Karst Kaynağı Akış Yukarısında Kalan Drenaj Alanı
- Karasu Karst Kaynağı Ana Çıkış Noktası
- Karasu Karst Kaynağı Beslenme Alanı

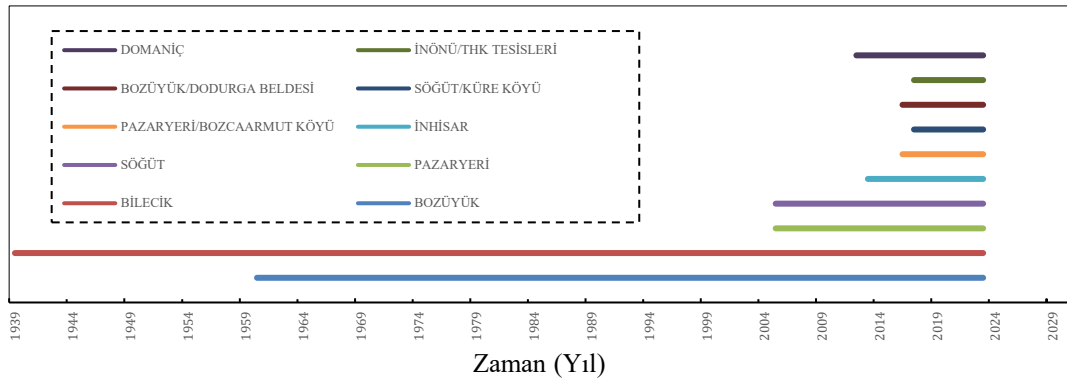
Şekil 4.7. Çalışma alanına ait MGİ noktaları lokasyonları.

Çizelge 4.1. Çalışma alanı ve çevresinde bulunan MGI'lere ait genel bilgiler.

MGI İstasyon No	MGI İstasyon Adı	Bulunduğu İl	Gözlem Süresi	Toplam Ölçüm Yılı	UTM Koordinatları		Kot (m)
					Doğu (m)	Kuzey (m)	
17702	Bozüyük	Bilecik	1960-2022	62	760920.991	4421688.395	754
17120	Bilecik	Bilecik	1939-2022	83	753614.611	4447807.610	539
17701	Pazaryeri	Bilecik	2005-2022	17	748409.423	4431326.117	825
17703	Söğüt	Bilecik	2005-2022	17	771814.935	4435032.383	695
18380	İnhisar	Bilecik	2014-2022	8	788440.231	4441813.754	202
18925	Pazaryeri/Bozcaarmut	Bilecik	2017-2022	5	735853.447	4429322.069	1096
19141	Söğüt/Küre Köyü	Bilecik	2018-2022	4	767439.857	4443826.290	308
18828	Bozüyük/Dodurga Beldesi	Bilecik	2017-2022	5	750114.539	4409744.433	1129
19143	İnönü/THK Tesisleri	Eskişehir	2018-2022	4	767386.107	4412369.479	833
18094	Domaniç	Kütahya	2013-2022	9	721828.785	4407250.638	886

4.2.1. Yağış

Çalışma alanını temsil eden alansal yağışın belirlenmesi için Karasu Karst Kaynağına yakın 10 adet MGI'ye ait istasyonun yağış verileri derlenmiştir. Çalışma alanı ve çevresindeki MGI yağış ölçümlerinin veri aralığı Şekil 4.8'de verilmiştir.



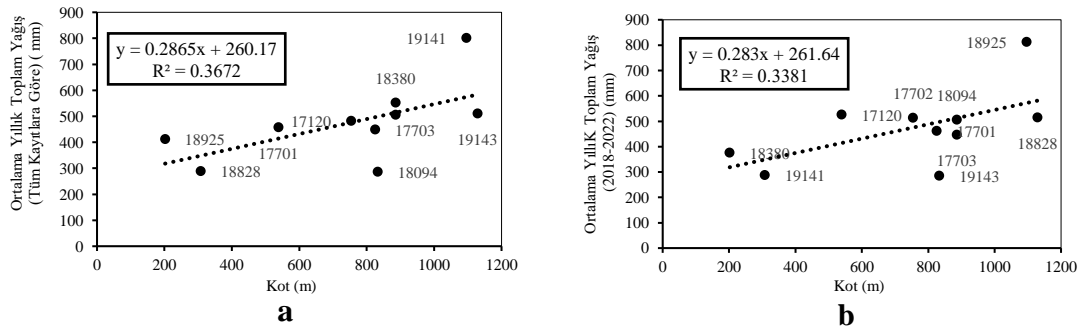
Şekil 4.8. Çalışma alanı ve çevresindeki MGI yağış ölçümlerinin veri aralığı.

Çizelgede verilen MGI ölçüm periyotlarının incelenmesi sonucunda, Bilecik MGI'de 83 yıl ve Bozüyük MGI'de 62 yıl boyunca sürekli ölçüm yapıldığı anlaşılmıştır. İstasyonların ortak ölçüm periyotlarının ise 2018 ile 2022 yılları arasında 5 yıllık süre olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Bölgedeki MGİ’lerin ölçüm aldığı tüm yıllar ve 2018-2022 yılları arası ortalama yıllık yağış (mm) ve istasyon kot bilgisi.

MGİ İstasyon No	MGİ İstasyon Adı	Kot (m)	Ortalama Yıllık Yağış (Bütün Yıllar) (mm)	Ortalama Yıllık Yağış (2018-2022) (mm)
17702	Bozüyük	754	481.22	513.00
17120	Bilecik	539	456.69	525.78
17701	Pazaryeri	825	448.72	461.32
17703	Söğüt	886	552.25	446.50
18380	İnhisar	202	411.21	376.22
18925	Pazaryeri/Bozcaarmut	1096	800.85	812.12
19141	Söğüt/Küre Köyü	308	287.54	287.54
18828	Bozüyük/Dodurga	1129	509.47	514.52
19143	İnönü/THK	833	285.04	285.04
18094	Domaniç	886	505.11	505.28

Analizlerde, ilk olarak yağış-kot ilişkisi irdelenmiştir. Bu adıma başlarken, her MGİ’nin ölçüm aldığı yılın ortalama yıllık toplam yağış değerleri ile kot ilişkisi ve tüm istasyonların ortak periyodu olan 2018-2022 yılları arasındaki ortalama toplam yıllık yağış değerleri ile kot ilişkisine bakılmış (Şekil 4.9), sırasıyla 0.581 ve 0.606 korelasyon katsayısı değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

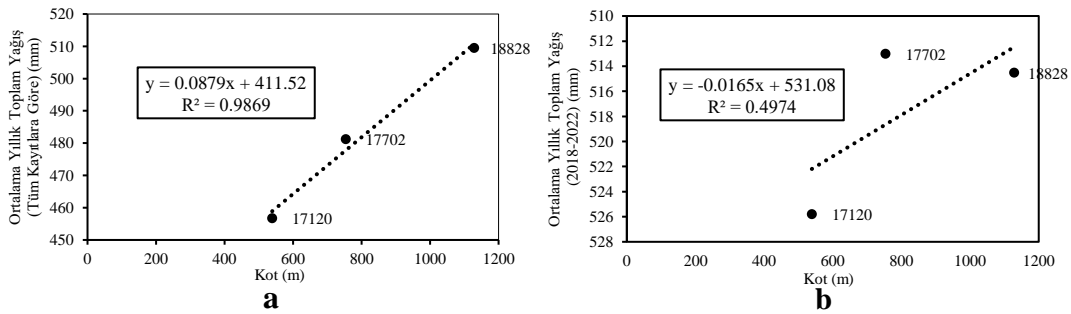


Şekil 4.9. Çalışma alanı kot-yağış ilişkisi (a: tüm kayıtlara göre, b: ortak periyoda göre).

Çizelge 4.3. Determinasyon katsayısı ve korelasyon katsayısı değerleri.

	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Korelasyon Katsayısı (R)
Bütün Yıllar	$0.286 \times \text{Kot} + 260.17$	0.3672	0.606
Ortak Periyot (2018-2022)	$0.283 \times \text{Kot} + 261.64$	0.3381	0.581

Değerlendirmede yağış-kot ilişki düzeyini düşüren istasyonlar saptanmıştır. Bilecik, Bozüyük ve Bozüyük/Dodurga MGİ'ler arasındaki yağış – kot ilişkisi korelasyon katsayısı 0.993 ve 2018-2022 yılları arasında ise 0.705 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.10, Çizelge 4.4). Elde edilen yüksek korelasyon katsayısı sonucuna göre MGİ'lerin ortak periyotta ölçüm yılları yerine uzun yıllar ölçüm aralığı kullanılması uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Çalışma alanı kot-yağış ilişkisi (a: tüm kayıtlara göre, b: ortak periyoda göre).

Çizelge 4.4. Determinasyon katsayısı ve korelasyon katsayısı değerleri

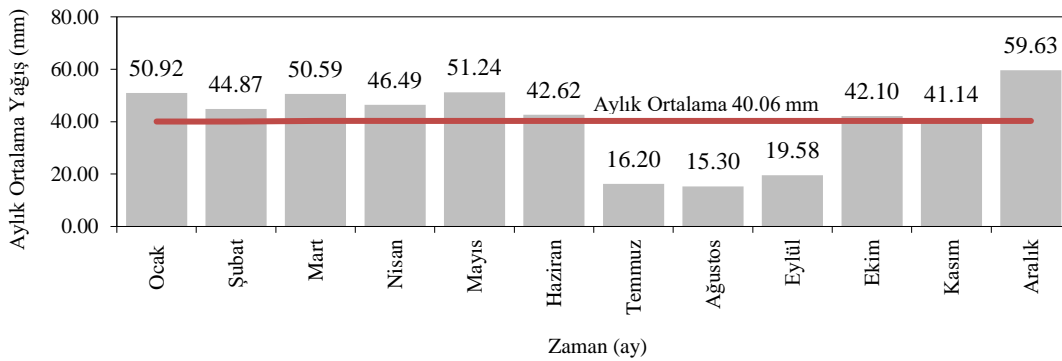
	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Korelasyon Katsayısı (R)
Bütün Yıllar	$0.0879 \times \text{Kot} + 411.52$	0.9869	0.993
Ortak Periyot (2018-2022)	$-0.0165 \times \text{Kot} + 531.08$	0.4974	0.705

Bozüyük/Dodurga MGİ, çalışma alanına yakınlığı ve istasyon kotunun çalışma alanının ortalama kotuna yakın olması nedeniyle çalışma alanı temsil ediciliği bakımından önemli bir istasyondur. Fakat söz konusu istasyonda ölçülen yağış ve sıcaklık verileri kayıt süresi çok kısadır. Bu durumda söz konusu meteoroloji istasyonunda yapılan kısa dönem ölçümlerin uzun yıllar ortalamasını temsil edemeyeceği anlaşılmıştır. Ayrıca, Bilecik MGİ, uzun yıllar ortalamalarının Bozüyük MGİ ile çok yakın olması ve istasyon kotunun (539 m) çalışma alanının ortalama kotundan (1400 m) oldukça düşük olması nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır.

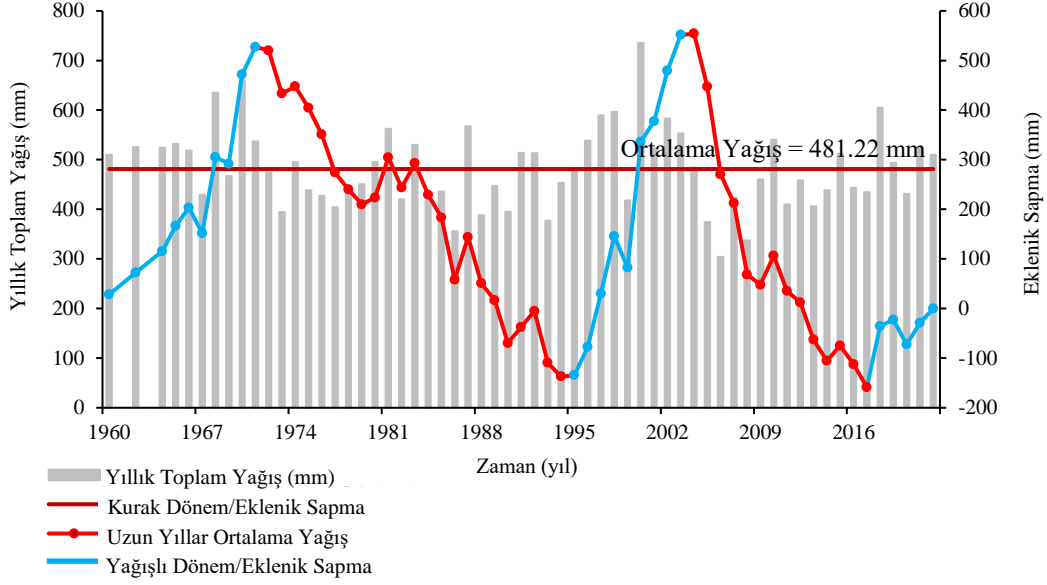
Genel olarak mevcut ve uzun dönem kayıt yapan MGİ'lerin çalışma alanının ortalama kotunu temsil etmemesi nedeniyle, Karasu Karst Kaynağının beslenme kotunu temsil

eden ve kaynağın debisini sağlayacak yağış verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda, WeatherSpark adlı web sitesinden Dodurga beldesine ait iklim-uydu modellemesi verilerine ulaşılmıştır. Söz konusu web sitesinde, ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)'nın MERRA-2 (Modern Dönem Geriye Dönük Analizi) ve gerçek zamanlı hava durumu gözlemlerini raporlayan küresel ağlardan biri olan METAR (Meteorolojik Havaalanı Raporu) dünya genelindeki havaalanlarında ve hava üslerinde kullanılan meteorolojik gözlem raporları verileri ile çalışma alanına ait 1980-2016 (36 yıl) yılları arası aylık ortalama yağış, kar yağışı ve sıcaklık verilerine ulaşılmış, değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca Dodurga beldesi ortalama kotu 1123 m'dir. Weather Spark websitesi, Dodurga beldesi için, doğuda 51 km uzaklıktaki Eskişehir Anadolu Havaalanı, kuzeybatıda 84 km uzaklıktaki Bursa, kuzeyde 105 km uzaklıktaki Cengiz Topel Naval Hava İstasyonu ve güneyde 132 km uzaklıktaki Uşak Havaalanında bulunan istasyonlardan gelen verileri kullanmaktadır (Weather Spark, 2024).

Özetle, bu bölümde Bozüyük MGİ ve Weather Spark web sitesi verileri kullanmış olup, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bozüyük MGİ, yağış verileri değerlendirildiğinde, yıllık ortalama yağış değeri 481.22 mm, standart sapma (σ) değeri 106.30 mm, değişkenlik katsayısı (CV) değeri 0.17 (%17)'dir. En fazla yağış Ocak-Aralık aylarında ve en az yağış ise Temmuz-Ağustos aylarında düşmüştür (Şekil 4.11). Söz konusu istasyona ait eklenik sapma grafiği oluşturulmuş (Şekil 4.12), buna göre 1971-1994 (23 yıl) ve 2004-2017 (13 yıl) yılları arasının kurak dönem, 1960-1971 (11 yıl), 1994-2004 (10 yıl) ve 2017-2022 (5 yıl) yılları arasının yağışlı dönem olduğu anlaşılmıştır.

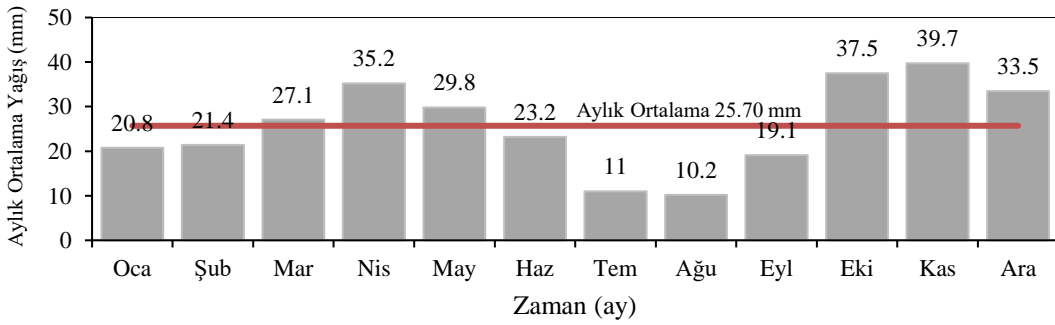


Şekil 4.11. Bozüyük MGİ uzun yıllar aylık ortalama yağış grafiği.



Şekil 4.12. Bozüyük MGİ yağışları uzun yıllar eklenik sapma grafiği.

Weather Spark Dodurga beldesi verilerine göre yıllık toplam ortalama yağış 308.5 mm olarak hesaplanmıştır. Söz konusu sitede geçmiş yıllara ait yağış ve sıcaklık verilerinin elde edilememesi nedeniyle, eklenik sapma grafiği çizilememiştir. En fazla yağış Kasım ayında, en az yağış ise Ağustos ayında düşmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Dodurga beldesine ait aylara göre ortalama yağış grafiği (Weather Spark, 2024).

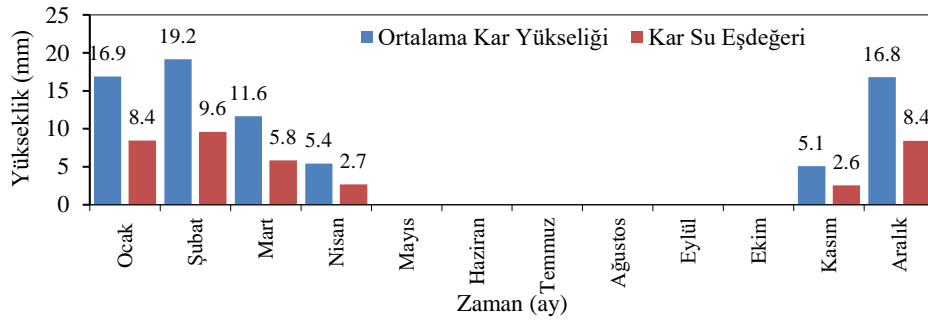
4.2.2. Kar Yağışı

Çalışma alanındaki kar yağışının miktarı, Karasu Karst Kaynağının boşalım debisini etkileyen en önemli girdi parametrelerinden biridir. MGM kayıtlarına göre sadece

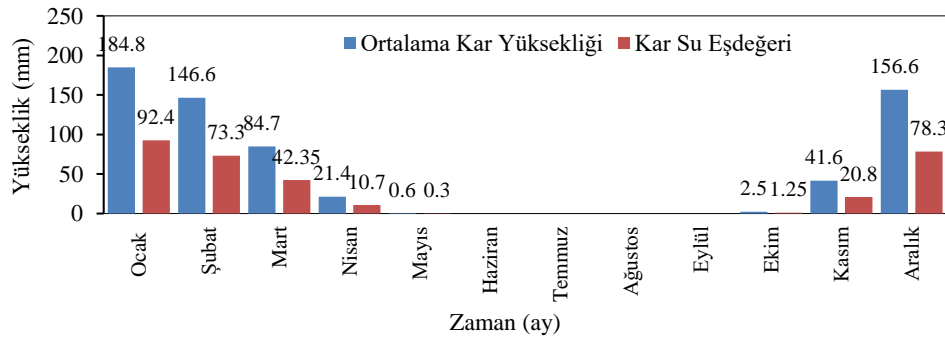
Bozüyük MGİ'ye ait 1963-2011 yıllarına ve Weather Spark web sitesinden Dodurga beldesi 1980-2016 yıllarına ait ortalama kar yüksekliği verileri mevcuttur (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15). Tez kapsamında, Çizelge 4.5'e göre çalışma alanına düşen kar yağışı büyük kristalli kar olarak kabul edilmiş ve kar su eşdeğeri 0.50 olarak alınmıştır.

Çizelge 4.5. Karın yapısı ve su eşdeğeri (Ankara Üniversitesi, 2013).

Karın Yapısı	Su Eşdeğeri
Toz şeklinde yeni kar	0.05
Yeni kar	0.10
Temiz kar	0.15
Sıkışmış kar	0.20
Belirgin kristalli kar	0.25
Büyük kristalli kar	0.50
Kaba kristalli kar	0.85
Buz	0.90



Şekil 4.14. Bozüyük MGİ'ye ait kar yüksekliği ve kar su eşdeğeri.



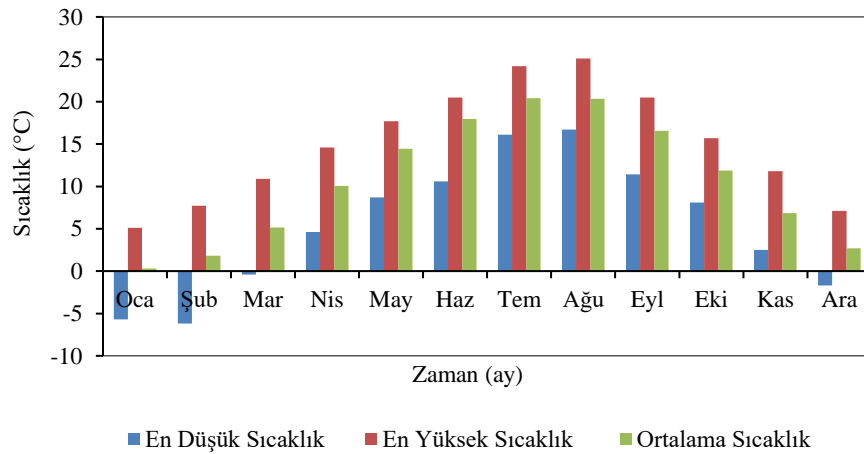
Şekil 4.15. Dodurga ilçesine ait kar yüksekliği ve kar su eşdeğeri (Weather Spark, 2024).

4.2.3. Sıcaklık

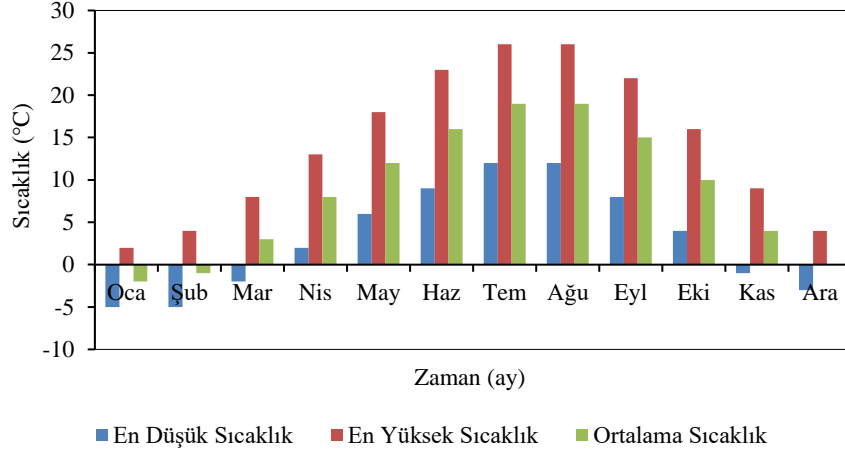
Bozüyük MGİ (1960-2022) ve Weather Spark (1980-2016)'tan alınmış olan uzun yıllar ortalama sıcaklık grafikleri sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de yer almaktadır. Bozüyük MGİ'ye göre 1980-2016 yılları arasındaki uzun yıllar ortalama sıcaklık 10.7 °C ve Weather Spark verilerine göre uzun yıllar ortalama sıcaklık 8.6 °C olarak hesaplanmıştır. Tüm istasyonlara göre en sıcak ay Ağustos ve en soğuk ay ise Ocak ayıdır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. MGİ ve iklim-uydu modellemesine göre sıcaklık değerleri çizelgesi.

Aylar		Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara	Ort
En Yüksek Sıcaklık (°C)	WeatherSpark (Dodurga)	2.0	4.0	8.0	13.0	18.0	23.0	26.0	26.0	22.0	16.0	9.0	4.0	14.3
	Bozüyük MGİ	5.1	7.7	10.9	14.6	17.7	20.5	24.2	25.1	20.5	15.7	11.8	7.1	15.1
Ortalama Sıcaklık (°C)	WeatherSpark (Dodurga)	-2.0	-1.0	3.0	8.0	12.0	16.0	19.0	19.0	15.0	10.0	4.0	0.0	8.6
	Bozüyük MGİ	0.3	1.8	5.1	10.0	14.4	18.0	20.4	20.3	16.6	11.9	6.8	2.7	10.7
En Düşük Sıcaklık (°C)	WeatherSpark (Dodurga)	-5.0	-5.0	-2.0	2.0	6.0	9.0	12.0	12.0	8.0	4.0	-1.0	-3.0	3.1
	Bozüyük MGİ	-5.7	-6.2	-0.4	4.6	8.7	10.6	16.1	16.7	11.4	8.1	2.5	-1.7	5.4



Şekil 4.16. Bozüyük MGİ 1960-2022 yılları arası aylık ortalama sıcaklık değerleri.



Şekil 4.17. Dodurga ilçesi aylık ortalama sıcaklık değerleri (Weather Spark, 2024).

4.2.4. Buharlaşma-Terleme

Buharlaşma-terleme su bütçesi hesaplamasında çıktı parametrelerinden olup, hidrolojik döngünün önemli bileşenlerinden biridir. Atmosfer ile yeryüzü arasındaki su ve enerji akışını belirlemektedir. Bu çalışma kapsamında Thornthwaite (1948) yöntemi kullanılarak potansiyel buharlaşma-terleme ve Thornthwaite-Mather (1955) yöntemi kullanılarak çalışma alanına ait gerçek buharlaşma-terleme değerleri hesaplanmıştır. Thornthwaite yöntemi, 1948 yılında Charles Warren Thornthwaite tarafından geliştirilmiş olup, potansiyel buharlaşma-terlemeyi (ETp) tahmin etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, Etp'yi hesaplamak için aylık ortalama sıcaklık, aylık enlem düzeltme katsayısı ve iklim indeksi (I) verileri kullanılmaktadır. Thornthwaite-Mather yöntemi, su bütçesi çalışmaları ve iklim sınıflandırması gibi çeşitli hidrolojik ve klimatolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Gerçek buharlaşma-terleme hesabı ise, Charles Warren Thornthwaite ve John R. Mather tarafından 1955 yılında geliştirilmiş bir toprak su dengesi modelidir. Söz konusu yöntemin uygulanması basit olup, yaygın olarak kullanılmaktadır.

Thornthwaite-Mather yöntemi, toprak su dengesi hesaplamalarında kullanılan yaygın bir yöntem olmasına rağmen, bazı dezavantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Yöntem, yağış, sıcaklık ve toprak özellikleri gibi parametrelerin doğru bir şekilde ölçülmesini gerektirmektedir.

Gerçek buharlaşma-terleme (ET_g), bir bölgedeki mevcut iklim koşulları altında bitkilerin ve toprağın üzerinden gerçekleşen toplam su kaybını ifade etmektedir. Bu süreç, toprak nemi, bitki örtüsü, hava sıcaklığı, nem ve rüzgar gibi faktörlere bağlıdır. Potansiyel buharlaşma-terleme (ET_p) ise, suyun sınırsız olduğu ideal koşullarda, belirli bir bölgeden gerçekleşebilecek maksimum buharlaşma ve terleme miktarını temsil etmektedir. Fazla su, yüzey akışına ve yeraltısuyu beslemesine geçen miktarın toplamıdır. Toprak tamamen doygun hale geldiğinde ve suyun buharlaşarak veya terleme yoluyla kaybolmasından daha fazla yağış alındığında, fazla su oluşmakta ve fazla su hidrolojik döngüde önemli bir rol oynamaktadır (Freeze ve Cherry, 1979; Brutsaert, 1982).

Söz konusu yöntemler ile, Bozüyük MGİ ve Weather Spark Dodurga beldesi için uydu-iklim modellemesi aylık ortalama yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak potansiyel buharlaşma-terleme (ET_p), gerçek buharlaşma-terleme (ET_g) ve fazla su miktarları hesaplanmıştır. Yağışa, kar su eşdeğerleri de dahil edilmiştir. Ayrıca, çalışma alanı için hazırlanan Thornthwaite-Mather (1955) su bütçesi, Bozüyük MGİ ve Weather Spark Dodurga ilçesi için gerçek buharlaşma-terleme miktarları sırasıyla; 387.6 ve 302.6 mm olarak hesaplanmış, su bütçesi tabloları Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.

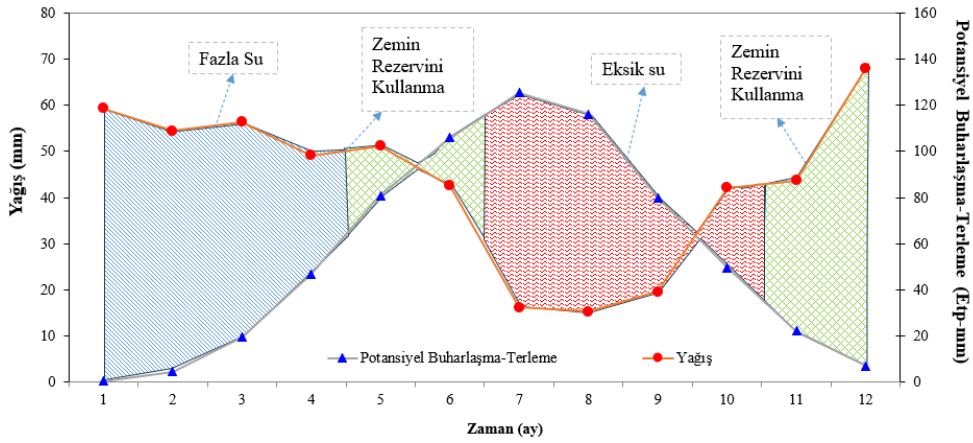
Çizelge 4.7. Bozüyük MGİ verileri ile hesaplanmış Thornthwaite-Mather su bütçesi.

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık Toplam (mm)
Enlem Düzeltmesi katsayısı (40. enlem için)	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81	
T: Aylık Ortalama Hava Sıcaklığı (°C)	0.30	1.81	5.14	10.04	14.44	17.95	20.42	20.35	16.55	11.89	6.83	2.67	
$i = (T / 5)^{1.514}$ Aylık Sıcaklık İndeksi	0.01	0.21	1.04	2.87	4.98	6.93	8.42	8.37	6.12	3.71	1.61	0.39	44.67
Kar Su Eşdeğeri (mm)	8.44	9.59	5.82	2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.55	8.40	37.49
Yağış (mm)	50.92	44.87	50.59	46.49	51.24	42.62	16.20	15.30	19.58	42.10	41.14	59.63	481.22
Toplam Yağış (mm)	59.36	54.46	56.41	49.19	51.24	42.62	16.20	15.30	19.58	42.10	43.69	68.03	518.18
Potansiyel Evapotranspirasyon (ETp) (mm)	0.63	5.42	18.93	42.24	65.27	84.72	98.89	98.45	76.86	51.69	26.63	8.64	578.37
Düzeltilmiş Pot. Evapotranspirasyon (mm) (ETpdüzeltilmiş)	0.53	4.50	19.49	46.88	80.94	105.90	125.59	116.17	79.94	49.62	22.10	7.00	658.67
P-ETp	58.83	49.96	36.91	2.30	-29.70	-63.28	-109.39	-100.86	-60.36	-7.52	21.59	61.03	
Rezervdeki Su	100.00	100.00	100.00	100.00	70.30	7.03	0.00	0.00	0.00	0.00	21.59	61.03	
Gerçek Buharlaştırma-terleme (ETg) (mm)	0.53	4.50	19.49	46.88	80.94	105.90	23.23	15.30	19.58	42.10	22.10	7.00	387.56
Eksik Su (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	102.37	100.86	60.36	7.52	0.00	0.00	271.11
Fazla Su (mm)	58.83	49.96	36.91	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	148.01

Çizelge 4.8. Weather Spark web sitesi Dodurga ilçesi verileri ile hesaplanmış Thornthwaite-Mather su bütçesi.

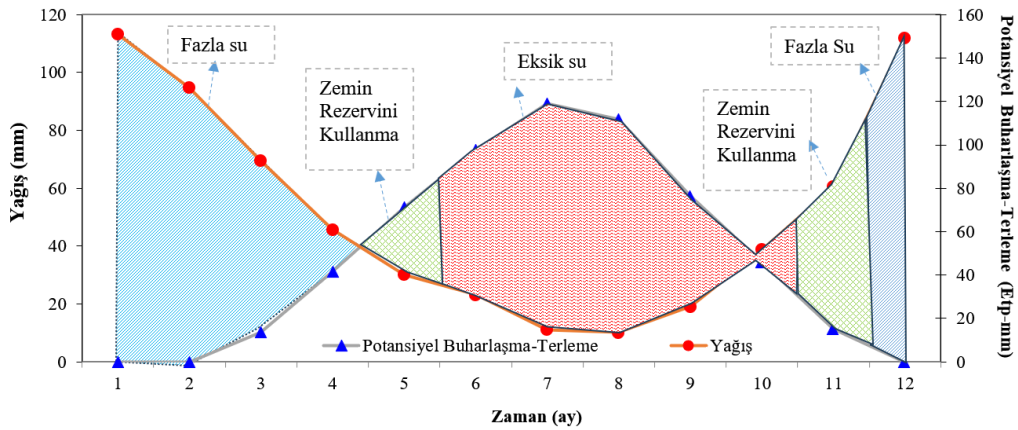
Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık Toplam (mm)
Enlem Düzeltmesi katsayısı (39. enlem için)	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82	
T: Aylık Ortalama Hava Sıcaklığı (°C)	-2.00	-1.00	3.00	8.00	12.00	16.00	19.00	19.00	15.00	10.00	4.00	0.00	
$i = (T / 5)^{1.514}$ Aylık Sıcaklık İndeksi	0.00	0.00	0.46	2.04	3.76	5.82	7.55	7.55	5.28	2.86	0.71	0.00	36.02
Yağış (mm)	20.80	21.40	27.10	35.20	29.80	23.20	11.00	10.20	19.10	37.50	39.70	33.50	308.50
Kar Su Eşdeğeri (mm)	92.40	73.30	42.35	10.70	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	20.80	78.30	319.40
Toplam Yağış (mm)	113.20	94.70	69.45	45.90	30.10	23.20	11.00	10.20	19.10	38.75	60.50	111.80	627.90
Potansiyel Evapotranspirasyon (ET _p) (mm)	0.00	0.00	13.16	37.54	57.89	78.73	94.61	94.61	73.49	47.64	17.90	0.00	515.56
Düzeltilmiş Pot. Evapotranspirasyon (m) (ET _{pdüzeltilmiş})	0.00	0.00	13.55	41.67	71.21	97.63	119.20	111.63	76.42	45.74	15.03	0.00	592.09
P-Etp	113.20	94.70	55.90	4.23	-41.11	-74.43	-108.20	-101.43	57.32	-6.99	45.47	111.80	
Rezervdeki Su	100.00	100.00	100.00	100.00	58.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.47	100.00	
Gerçek Buharlaşma (Et _g)(mm)	0.00	0.00	13.55	41.67	71.21	82.09	11.00	10.20	19.10	38.75	15.03	0.00	302.60
Eksik Su (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.54	108.20	101.43	57.32	6.99	0.00	0.00	289.49
Fazla Su (mm)	113.20	94.70	55.90	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.27	325.30

Her istasyon için hesaplanan potansiyel buharlaşma-terleme (Etp) ve yağış miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler çizilmiştir. Grafiklerde, su fazlası, zemin suyu kullanımı ve su eksikliği dönemleri görselleştirilmiştir. Bozüyük MGI'ye göre, yılın ilk Ocak-Şubat-Mart ve Nisan aylarında fazla su miktarı ortaya çıkarken, Mayıs-Haziran ve Kasım-Aralık aylarında zemin rezervinden kullanım ve Temmuz-Ağustos-Eylül-Ekim döneminde ise buharlaşacak su ancak yağış miktarı kadar gerçekleşmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Bozüyük MGI verileri ile hesaplanmış ETP ve yağış ilişkisi.

Weather Spark web sitesinden Dodurga ilçesi için alınan verilere göre, yılın Ocak-Şubat-Mart-Nisan ve Aralık aylarında fazla su miktarı ortaya çıkarken, Mayıs ve Kasım aylarında zemin rezervinden kullanım ve Haziran-Temmuz-Ağustos-Eylül-Ekim döneminde ise buharlaşacak su ancak yağış miktarı kadar gerçekleşmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Weather Spark verileri ile hesaplanmış ETP ve yağış ilişkisi.

Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin özeti Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Çizelge 4.10'da hesaplanan bütçe bileşenleri kaynağın beslenme alanı için değerlendirildiğinde, iklim ve uydu modelinden elde edilen veriler ile hesaplanan toplam yağış, E_g, E_p ve fazla su değerleri, Bozüyük MGİ verileriyle önemli farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Bu durumun nedeni, çalışma alanı kotunun, Bozüyük MGİ kotundan çok daha yüksekte olması ve bu istasyondan elde edilen yağış verilerinin, çalışma alanındaki yağışı (kar, yağmur, vb.) doğru yansıtmasıdır. Sonuç olarak, iklim-uydu modeli verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda, Bozüyük MGİ'ye kıyasla daha fazla yağış ve fazla su miktarı ancak daha düşük E_p ve E_g değerleri elde edilmiştir. Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanı ortalama kotu (1062 m) ile, Weather Spark (Dodurga beldesi) kotunun (1123 m) birbirlerine yakın olması sebebiyle, söz konusu alan için Weather Spark web sitesinden elde edilen yağış ve sıcaklık verileri kullanılmıştır (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.9. Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin genel özeti.

İstasyonlar	Toplam Yağış (mm/yıl)	Potansiyel Buharlaşma-Terleme (mm/yıl)	Gerçek Buharlaşma-Terleme (mm/yıl)	Fazla Su (mm/yıl)
Bozüyük MGİ	518.18	658.67	387.56	148.01
Weather Spark (Dodurga Beldesi)	627.90	592.09	302.60	325.30

Çizelge 4.10. Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı (269.81 km²) için istasyon özelinde Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin genel özeti.

İstasyonlar	Toplam Yağış (10 ⁶ m ³ /yıl)	Potansiyel Buharlaşma-Terleme (10 ⁶ m ³ /yıl)	Gerçek Buharlaşma-Terleme (10 ⁶ m ³ /yıl)	Fazla Su (10 ⁶ m ³ /yıl)
Bozüyük MGİ	139.81	177.71	104.57	39.93
Weather Spark (Dodurga Beldesi)	169.41	159.75	81.64	87.77

Çizelge 4.11. Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanı (10.6 km²) için istasyon özelinde Thornthwaite-Mather yöntemi ile hesaplanmış bütçe bileşenlerinin genel özeti.

İstasyonlar	Toplam Yağış (10 ⁶ m ³ /yıl)	Potansiyel Buharlaşma- Terleme (10 ⁶ m ³ /yıl)	Gerçek Buharlaşma-Terleme (10 ⁶ m ³ /yıl)	Fazla Su (10 ⁶ m ³ /yıl)
Weather Spark (Dodurga Beldesi)	6.66	6.28	3.21	3.45

Öncelikle, bu yöntem büyük ölçüde sıcaklığa dayalı bir yöntem olması nedeniyle, rüzgar hızı, güneş radyasyonu ve nem gibi parametreler ihmal edilmektedir. Bu gibi parametrelerin baskın olduğu bölgelerde, bu yöntem buharlaşma-terleme miktarlarının yanlış hesaplanmasına yol açabilmektedir.

İkinci olarak, Thornthwaite-Mather yöntemi, doğru sonuçlar elde edebilmek için uzun dönemli iklim verileri gerektirmektedir. Kısa dönemli veri setleri veya eksik veriler, hesaplamaların güvenilirliğini ve doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Çalışmada, gerçek buharlaşma-terleme miktarları, su bütçesini etkileyen kritik bir faktör olmasına rağmen, bu verilerin kaynak beslenme alanını temsil eden istasyonlardan elde edilen ölçümlerle karşılaştırılması mümkün olamamıştır. Bu durum, su bütçesi hesaplamalarında bazı belirsizliklere yol açmış ve gerçek buharlaşma-terleme miktarları kontrol edilememiştir.

4.2.5. Yüzeysel Akış ve Süzülme

Yüzeysel akış, yağışın (kar, yağmur vb.) toprak yüzeyine ulaştıktan sonra yüzey boyunca akarak derelere, göllere, nehir sistemlerine ve nihayetinde denizlere doğru hareket etmesi sürecidir. Bu akış, toprağın suyu emme kapasitesinin üzerine çıkması veya geçirimsiz yüzeylerin varlığı nedeniyle toprak tarafından emilemeyen suyun hareketini kapsamaktadır. Yüzeysel akış, su döngüsünün önemli bir parçasıdır ve su kaynaklarının yeniden beslenmesi, sel oluşumu ve erozyon gibi olaylarla yakından ilişkilidir (Tarboton, 2003; USGS, 2019).

Akım ölçümü yapılmamış havzalarda, yüzeysel akışı hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan SCS (Soil Conservation Service) – CN (Curver Number) yöntemi, ABD Tarım Bakanlığı'nın Doğal Kaynaklar Koruma Servisi (NRCS) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. SCS akış modeli, yağış miktarı ve havza için belirlenmiş bir katsayıya dayanan ampirik formül (Eş. 4.1 ve Eş. 4.2) kullanılarak akışa geçen su miktarını hesaplamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu modelde kullanılan havza katsayısı, "Eğri Numarası (CN)" olarak adlandırılır ve arazi kullanımı ile toprak özelliklerine bağlı olarak potansiyel yüzey akışını ifade eder (SCS, 1964, 1972).

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (4.1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.2)$$

Burada; P, yağış miktarını (mm), Q, yüzeysel akış miktarını (mm), S, su tutma potansiyelini (mm) ve CN, eğri numarasını ifade etmektedir.

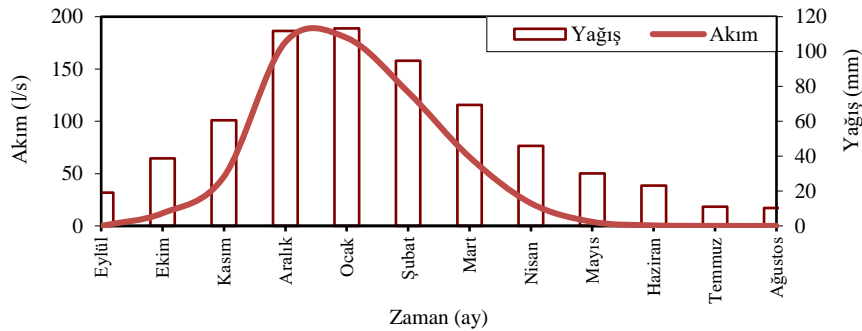
SCS-CN yönteminde, yüzeysel akış değerleri doğrudan yağışa bağlıdır. Yağış miktarı yüksek olduğunda, direkt akışa geçer ve daha büyük bir yüzeysel akış meydana gelir. Ancak bu akımın büyüklüğü, aynı zamanda CN değerine de bağlıdır. Ayrıca, bahsedilen SCS-CN yönteminde kar erimesi sonucu açığa çıkan suyun doğrudan akışa geçtiği kabulü yapılmıştır.

Çalışma alanı için önceki çalışmalarda herhangi bir akım ölçümüne rastlanmamıştır. Su bütçesinin önemli bir parametresi olan yüzeysel akış miktarının hesaplanabilmesi için ilk olarak, süzülme ve yüzeysel akış miktarlarının toplamı fazla su miktarına eşit olduğundan, Thornthwaite-Mather (1955) yöntemi ile hesaplanan fazla su değerleri ile Karasu Karst Kaynağı ortalama debisinin, beslenme alanına düşen yağıştan beslenmeye eşit olduğu varsayımıyla kütle dengesi eşitliğinden yüzeysel akış miktarları hesaplanmıştır. Ardından, kaynağın beslenme alanı ve kaynak kesitindeki drenaj alanı için yağış ve alan verileri kullanılarak, farklı CN değerlerine dayalı yağış-akım grafikleri

oluşturulmuştur. En uygun yağış-akım grafiği ve kütle dengesinden elde edilen yüzeysel akış değerleri ile arazi kullanım ve toprak haritalarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda söz konusu alanlara ait CN değerleri belirlenmiştir.

Karstik bir ortamda gerçekleştirilen bu çalışmada, öncelikle Karasu Karst Kaynağının beslenimi sağlayan bileşenler belirlenmiştir. Bunlar, Geyiktepe Formasyonuna ait mermerlerden gelen süzülme ile Karasu Karst Kaynağının akış yukarısında kalan drenaj alanından gelen yüzeysel akış ve süzülme miktarıdır ($1.842 \text{ m}^3/\text{s}$ veya $58.84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$).

Bu bilgiler ışığında, ilk olarak kaynağın akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından gelebilecek yüzeysel akış miktarı hesaplanmıştır. Weather Spark'tan alınan yağış verileri ve Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanı (10.6 km^2) kullanılarak, farklı CN değerleri için yağış-akım grafikleri oluşturulmuştur. Alanın toprak ve arazi kullanım haritası birlikte incelenmiş ve en uygun yağış-akım ilişkisini sağlayan CN değeri 72 olarak belirlenmiştir. Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı için oluşturulmuş yağış ve akım grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Weather Spark (Dodurga beldesi) yağış verisi ile elde edilen yağış-akım grafiği (CN:72 için).

CN için 72 değeri kullanılarak yüzeysel akış miktarı 157.26 mm , süzülme 168.03 mm olarak elde edilmiştir. Buna göre Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanı için yüzeysel akış miktarı $1.66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$, fazla su miktarı $3.45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$, süzülme miktarı ise $1.79 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ 'dır.

Karasu Karst Kaynağının akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından kaynaklanan süzülme (1.79×10^6 m³/yıl) ve yüzeysel akış (1.66×10^6 m³/yıl) ile kaynağa gelen katkılar, kaynağın ortalama debisinden (58.84×10^6 m³/yıl) çıkartılarak, Karasu Karst Kaynağı beslenme alanından gelen süzülme miktarı 55.39×10^6 m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değere, beslenme alanındaki diğer kaynaklar ve kuyuların boşalımları (0.41×10^6 m³/yıl) da eklenerek, beslenme alanında oluşan toplam süzülme miktarı 55.80×10^6 m³/yıl olarak bulunmuştur.

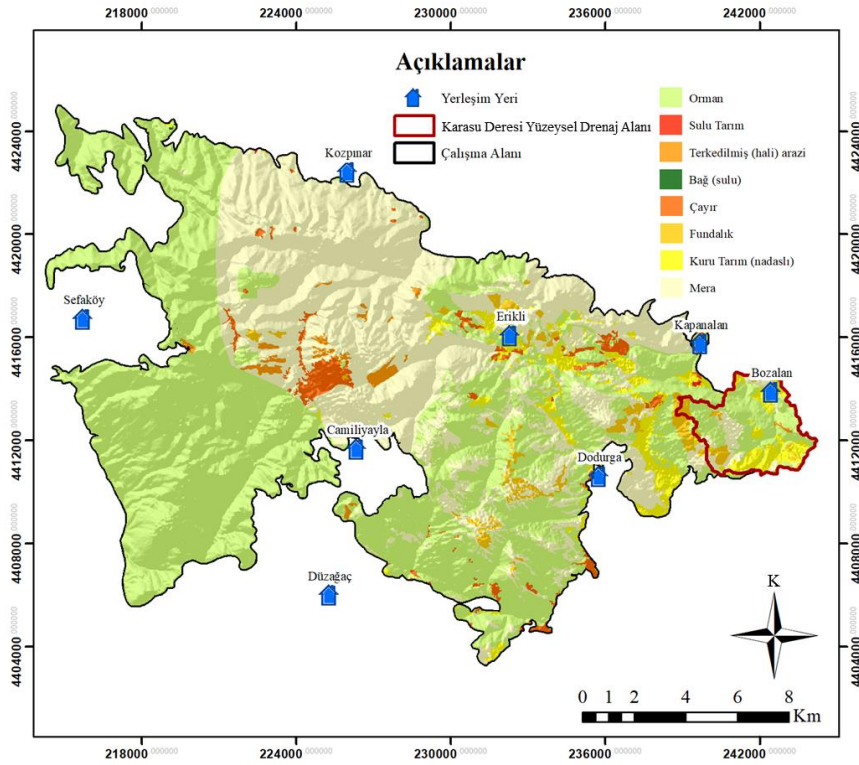
Beslenme alanındaki toplam süzülme miktarı (55.80×10^6 m³/yıl) ve Bozüyük MGİ ile Weather Spark verileri ile hesaplanan fazla su miktarları (sırasıyla 39.93×10^6 m³ /yıl ve 87.77×10^6 m³ /yıl) kullanılarak yüzeysel akış miktarları hesaplanmış olup, bu değerler sırasıyla -15.87×10^6 m³/yıl ve 31.97×10^6 m³/yıl olarak bulunmuştur. Bozüyük MGİ verileriyle hesaplanan fazla su miktarı, beslenme alanından gelen süzülme karşılayamazken, Weather Spark verileriyle hesaplanan yüzeysel akış miktarı bu süzülme karşılayabilmiştir.

SCS CN yöntemiyle ile, söz konusu istasyonlar ile hesaplanan yüzeysel akış miktarının desteklenmesi adına, farklı CN değerleri için yağış-akım grafikleri çizilerek ve uygun CN değeri belirlenmesi için ayrıca arazi kullanımı ve toprak haritası da kullanılmıştır. Tezin, "Arazi Kullanımı" bölümünde sunulan arazi kullanım örtüsü haritası (Bkz. Şekil 1.11) ve Şekil 4.21'de verilen çalışma alanına ait toprak haritası incelenmiş olup, çalışma alanının % 94 oranında orman ve yarı doğal alan ile kaplandığı görülmüştür.

Çizelge 4.12 incelendiğinde, çalışma alanı için orman formasyonu eğri numarası değerinin 55-70 aralığında olması beklenmiştir. Bozüyük MGİ ve Weather Spark (Dodurga beldesi) için uzun yıllar aylık ortalama toplam yağış verileri ve 55-70 aralığında her CN değeri için oluşturulan yağış-akım grafiklerindeki ilişkilere bakılmış olup, Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı için CN değeri 67 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, çalışma alanının %94'ünü kapsayan Orman Formasyonunun 55-70 arasında olması beklenen eğri numarasını doğrulamaktadır. Bu iki istasyon için tekrar yüzeysel akış değerleri hesaplanmış olup bu değerler, Bozüyük MGİ için 12.02×10^6 m³/yıl, Weather Spark (Dodurga beldesi) için, 32.02×10^6 m³/yıl'dır (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.12. Arazi kullanımı ve hidrolojik toprak gruplarına göre eğri numarası değerleri
(Chow ve ark., 1988; Özdemir, 2007).

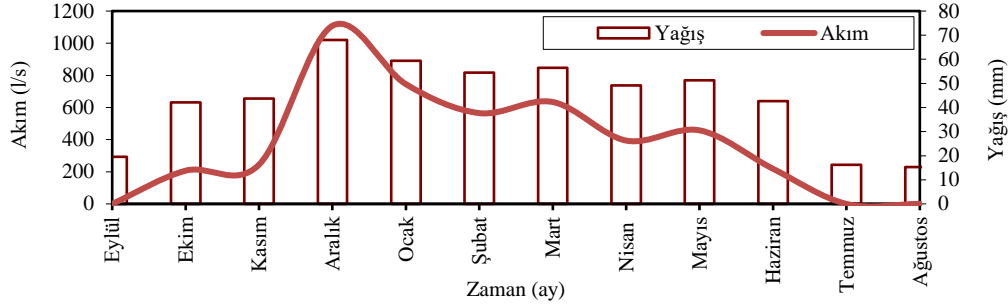
Arazi Kullanımı/Örtüsü	Hidrolojik Toprak Gruplarına Göre Eğri Numarası Değerleri			
	A	B	C	D
Orman Formasyonu	30	55	70	77
Tarım Alanları	72	81	88	91
Maki Formasyonu	45	66	77	83
Ot Formasyonu	39	61	74	80
Açık Alanlar Yerleşmeler	54	70	80	85
Zeytinlikler	36	60	73	79



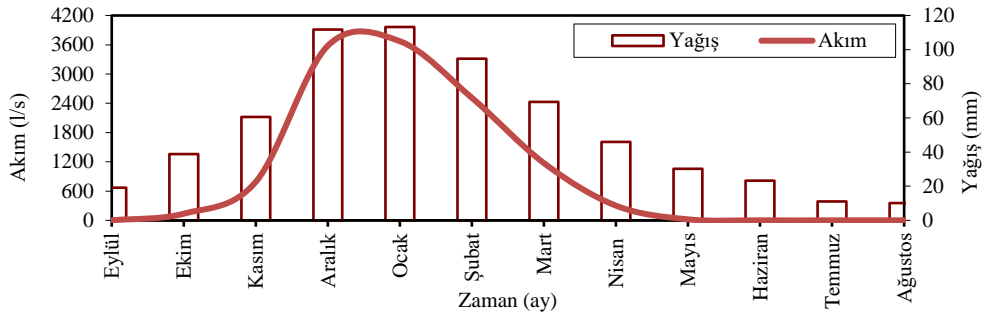
Şekil 4.21. Çalışma alanı toprak haritası.

Her istasyona ait yağış bu yağışlardan üretilen akımlara ait grafikler Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiştir. Şekil 4.22'de verilen, Bozüyük MGI'ye ait yağış hesaplanmış akım grafikleri incelendiğinde, bu iki parametrenin birbirleri ile uyumlu ilerlemediği, yağış verilerinin, havzaya ait CN değeri ile ortaya çıkan yüzeysel akım miktarlarını yansıtmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.23'te sunulmuş, Weather Spark verilerine ait yağış

verileri ile oluşturulmuş yağış-akım grafiği incelendiğinde, akım verilerinin yağışlar ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.22. Bozüyük MGİ yağış verisi ile elde edilen yağış-akım grafiği (CN:67 için).



Şekil 4.23. Weather Spark (Dodurga beldesi) yağış verisi ile elde edilen yağış-akım grafiği (CN:67 için).

Belirlenen yüzeysel akış miktarları Çizelge 4.13'te verilmiştir. Weather Spark websitesinden alınan yağış verileri ile hesaplanan yüzeysel akış değeri 118.67 mm'dir. Bozüyük MGİ için bu değer ise 44.54 mm olup, bu değer Weather Spark websitesinden elde edilen yüzeysel akıştan %62.47 oranda daha az olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13. Hesaplanan yüzeysel akış miktarları (beslenme alanı).

İstasyonlar	Yüzeysel Akış (mm/yıl)	Yüzeysel Akış (R) ($10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$)
Bozüyük MGİ	44.54	12.02
Weather Spark (Dodurga)	118.67	32.02

4.2.6. Su Bütçesi Hesaplamaları

Su bütçesi, belirli bir alan veya havza için yağış, buharlaşma-terleme, yüzeysel akış ve süzülme gibi bileşenlerin birlikte değerlendirme işlemidir. Su bütçesi analizi, su kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilir kullanımı için önemli bir değerlendirme olup, genel olarak, su bütçesi denklemi aşağıda (Eş. 4.3) verilmiştir.

$$P = ET + R + I \pm \Delta S \quad (4.3)$$

Burada; P yağışı (L^3/T), ET evapotranspirasyonu (L^3/T), R yüzeysel akışı (L^3/T), I süzülme (L^3/T) ve ΔS depolamadaki değişimi (L^3/T) ifade etmektedir.

Tez çalışma kapsamında, Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj (Çizelge 4.14) ve Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı (Çizelge 4.15) için su bütçeleri oluşturulmuştur.

Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan 10.6 km^2 'lik yüzeysel drenaj alanı için yapılan su bütçesi hesaplamalarına göre, alana yıllık toplam 6.66 milyon m^3 yağış düşmektedir. Bu yağışın 1.79 milyon m^3 'ü yeraltına süzülerek Karasu Karst Kaynağına beslenme sağlarken, 3.21 milyon m^3 'ü buharlaşma-terleme yoluyla kaybedilmektedir. Ayrıca, 1.66 milyon m^3 su yüzeysel akış olarak bölgeden taşınmaktadır. Sonuç olarak, beslenme ve boşalım arasında net bir fark bulunmamakta, su bütçesi dengede kalmaktadır (Çizelge 4.14).

Çizelge 4.14. Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı hidrolojik su bütçesi (10.6 km^2 yüzeysel drenaj alanı için).

İstasyonlar	Beslenme	Boşalım			Beslenme-Boşalım ($10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$)
	Toplam Yağış (P) ($10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$)	Süzülme (I) ($10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$)	Gerçek Buharlaşma-Terleme (ETg) ($10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$)	Yüzeysel Akış (R) ($10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$)	
Weather Spark (Dodurga Beldesi)	6.66	1.79	3.21	1.66	0.00

Çizelge 4.15 incelendiğinde, Bozüyük MGİ yağış ve sıcaklık verileri ile hesaplanan su bütçesinde, beslenme-boşalım ilişkisine bakıldığında, ciddi bir açık tespit edilmiştir. Bunun sebebi, meteoroloji istasyonunun bulunduğu kotun (754 m), Karasu Karst Kaynağının beslenme alanının ortalama kotundan (1400 m) çok daha alçakta yer almasıdır. Bununla birlikte, söz konusu meteoroloji istasyonunda kar yağışı ölçümleri, yağışa dahil edilse de beslenme alanına düşen toplam yağış miktarı sistem çıktılarını karşılayamamaktadır. Bozüyük MGİ verilerinin Karasu Karst Kaynağı sisteminin girdisini temsil etmediği anlaşılmıştır.

Karasu Karst Kaynağı su bütçesi çalışmaları kapsamında, beslenme alanı topoğrafya etkisini dikkate alan ve uzun yıllar ölçüm yapan meteoroloji gözlem istasyonunun bulunmaması, mevcut yağış değerlerinin noktasal yağışlar olup, alansal yağışı yeterince temsil edememesi ve çalışma alanı için gerçek yüzeysel akış ölçümlerinin olmaması gibi zorluklar yaşanmıştır. Bu zorluklar göz önüne alınarak, kaynağın ölçülen debisinden itibaren bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, kaynağın beslenme alanına düşen alansal yağışı belirlemek için iklim-uydu modellemesi kullanılmıştır. Weather Spark'tan elde edilen yağış (yağmur ve kar) ve sıcaklık verileri ile yapılan su bütçesi hesaplamaları sonucunda, Karasu Karst Kaynağını besleyen alansal yağış miktarı belirlenmiş ve kaynağın beslenme-boşalım ilişkisi ortaya konmuştur.

Karasu Karst Kaynağının beslenimini oluşturan tek kaynak Geyiktepe Formasyonu üzerine düşen yağıştır. Bu yağış miktarı, hidrojeolojik sistemde buharlaşma-terleme, yüzeysel akış ve süzülme olmak üzere üç bileşene ayrılmaktadır. Süzülme yolu ile Geyiktepe Formasyonu içerisinde dolaşıma geçerek Karasu Karst Kaynağının boşalımını sağlamaktadır. Bu boşalımın %96.88'i beslenme alanından süzülmeden, %3.11'i ise Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından gelen süzülmeden oluşmaktadır. Bu nedenle, yağış miktarı su bütçesi için önemli bir girdi parametresi olup, beslenme alanına düşen alansal gerçek yağış miktarının doğru şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Ancak, çalışma alanı ve çevresindeki meteoroloji gözlem istasyonları incelendiğinde, Karasu Karst Kaynağının boşalımını sağlayabilecek gerçek alansal yağış miktarını yansıtabilecek bir yağış kaydı bulunamamıştır.

Çizelge 4.15. Karasu Karst Kaynağı su bütçesi (269.81 km² beslenme alanı için).

	Beslenme	Boşalım			
İstasyonlar	Toplam Yağış (P) (mm/yıl)	Sızılma (I) (mm/yıl)	Gerçek Buharlaşma- Terleme (ETg) (mm/yıl)	Yüzeysel Akış (R) (mm/yıl)	Beslenme- Boşalım (mm/yıl)
Bozüyük MGI	518.18	206.81	387.56	44.54	-120.73
WeatherSpark (Dodurga Beldesi)	627.90	206.81	302.60	118.67	-0.18
İstasyonlar	Toplam Yağış (P) (10⁶ m³/yıl)	Sızılma (I) (10⁶ m³/yıl)	Gerçek Buharlaşma- Terleme (ETg) (10⁶ m³/yıl)	Yüzeysel Akış (R) (10⁶ m³/yıl)	Beslenme- Boşalım (10⁶ m³/yıl)
Bozüyük MGI	139.81	55.80	104.57	12.02	-32.58
WeatherSpark (Dodurga Beldesi)	169.41	55.80	81.64	32.02	-0.05

5. HİDROJEOKİMYA VE İZOTOP HİDROLOJİSİ

Tez çalışması kapsamında, hidrojeolojik yapının ortaya konması amacıyla hidrojeokimyasal ve izotopik ölçüm ve örnekleme gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları ve izotop içeriklerinin birlikte değerlendirilmeleri, suların kökeni, beslenme ve dolaşım mekanizması ile su noktaları arasındaki ilişkilerin anlaşılması, hidrojeolojik sistemi kavramsal modellerinin ortaya konmasında büyük öneme sahiptir.

Hidrojeokimyasal ve izotopik özelliklerin belirlenmesi çalışmaları kapsamında Eylül 2023 ve Mayıs 2024 tarihlerinde arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu arazi çalışmalarında su noktalarının fizikokimyasal parametreleri (sıcaklık, toplam çözünmüş madde, özgül elektriksel iletkenlik ve çözünmüş oksijen) yerinde ölçülmüş, majör iyon ve izotop analizleri için su örnekleri alınmıştır.

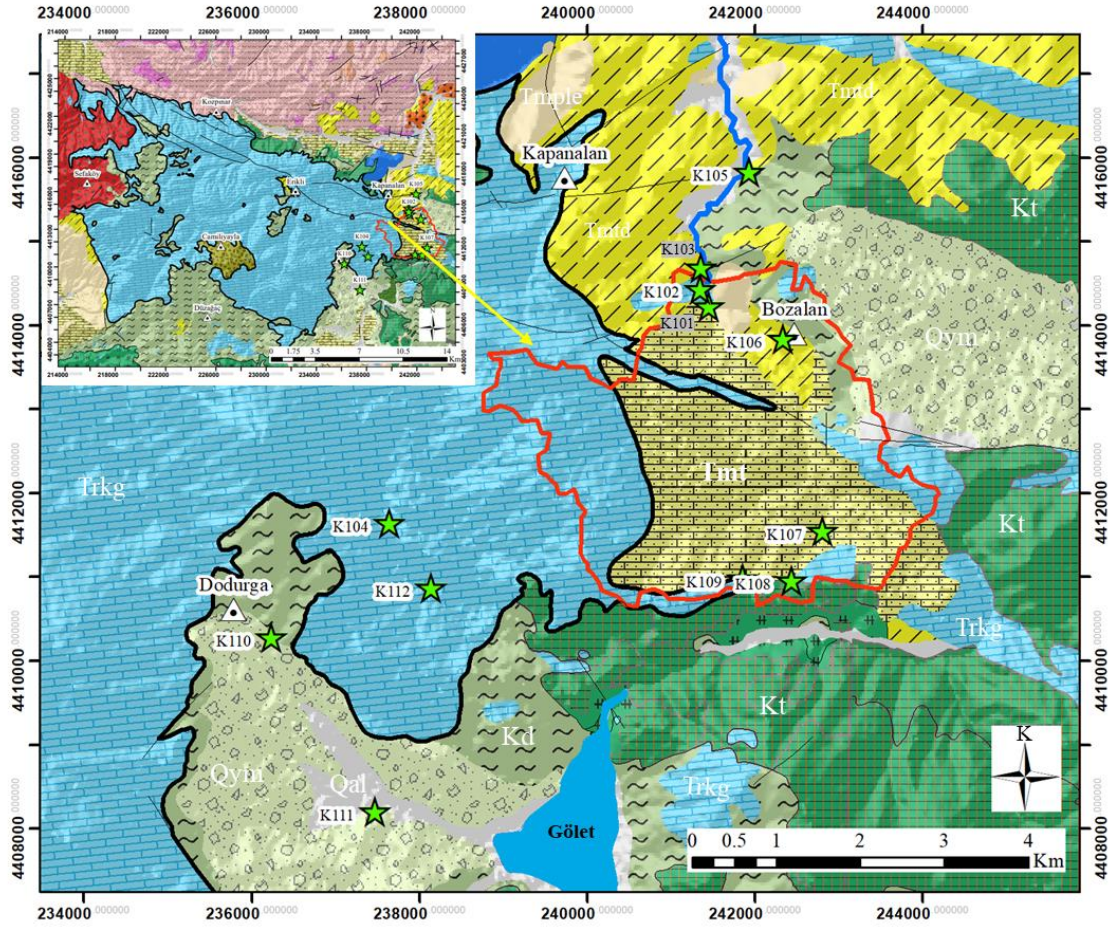
5.1. Örnekleme Yapılan Lokasyonlar

Çalışma alanı ve yakın dolayında Karasu Karst Kaynağının hidrojeokimyasal özelliklerini ortaya koyabilmek amacı ile önceki çalışmalar derlenmiş ve ofis çalışmaları sonucu HGM tarafından 2001 yılında basılmış İ23-b3 paftasına ait topoğrafik harita ile MTA tarafından derlenen İ23 jeoloji haritası ve uzaktan algılama yöntemleri ile arazi çalışması sonucunda örnekleme yapılabilecek noktalar (kaynak, dere, çeşme) belirlenmiştir.

Kurak dönemi temsil eden arazi çalışmasında, 4 noktada örnekleme yapılmıştır. Yağışlı dönemi temsil eden arazi çalışmasında ise, önceki dönemdeki örnekleme noktalarına ilave olarak 8 farklı noktadan daha örnek alınmış, böylece toplam 12 noktada yerinde fizikokimyasal özellikler ölçülmüş, örnekleme yapılmıştır (Şekil 5.1, Şekil 5.2). Örnekleme noktalarına ait genel bilgiler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çalışma alanındaki örnekleme noktalarına ait genel bilgiler.

	Kod	Tarih	X	Y	Z (m)	Açıklama
Kurak Dönem	K101	13 Eylül 2023	754 903	4 414 327	850	Kaynağın ilk çıkış noktası
	K102	13 Eylül 2023	754 814	4 414 475	836	Kaynağın ana çıkış noktası
	K103	13 Eylül 2023	754 790	4 414 739	827	Kaynağın ana boşalım noktasının 115 m ilerisinde can suyu olarak bırakılan suyun kanala alındığı nokta.
	K104	13 Eylül 2023	751 225	4 411 271	1149	Kurupınar Çeşme
Yağışlı Dönem	K101	19 Mayıs 2024	754 903	4 414 327	850	Kaynağın ilk çıkış noktası
	K102	19 Mayıs 2024	754 814	4 414 475	836	Kaynağın ana çıkış noktası
	K103	19 Mayıs 2024	754 790	4 414 739	827	Kaynağın ana boşalım noktasının 115 m ilerisinde can suyu olarak bırakılan suyun kanala alındığı nokta.
	K104	19 Mayıs 2024	751 225	4 411 271	1149	Kurupınar Çeşme
	K105	19 Mayıs 2024	755 226	4 415 740	811	Karasu Karst Kaynağı ana çıkış noktasının akış aşağısında yaklaşık 1.67 km uzakta bulunan Karasu Deresi devamı.
	K106	19 Mayıs 2024	755 758	4 413 775	895	Bozalan köyü içerisinde bulunan bir çeşme.
	K107	19 Mayıs 2024	756 390	4 411 523	1005	Gümece Çeşme
	K108	19 Mayıs 2024	756 054	4 410 906	1070	No4 Çeşme
	K109	19 Mayıs 2024	755 476	4 410 897	1086	No6 Çeşme
	K110	19 Mayıs 2024	749 916	4 409 813	1135	Şırlakçı Çeşme
	K111	19 Mayıs 2024	751 289	4 407 829	1058	Ayşe Çeşme
	K112	19 Mayıs 2024	751 771	4 410 534	1119	No24 Çeşme



Açıklamalar

- ★ Örnekleme Noktaları
- ▲ Yerleşim
- Fay
- Karasu Deresi
- Kaynak Akış Yukarısında Kalan Drenaj Alanı
- Kaynak Beslenme Alanı

Kuvaterner	Qal	Alüvyon
Kuvaterner	Qym	Yamaç Molozu
Üst Miyosen? - Pliyosen	Temple	Emet Formasyonu
Üst Miyosen? - Pliyosen	Tmkt	Karaköy Volkanitleri
Miyosen	Tmkt	Tunçbilek Formasyonu
Miyosen	Tmtd	Demirbilek Üyesi
Alt-Orta Eosen	Tea	Alaçam Graniti
Üst Kretase	Kt	Tavşanlı Ofiyoliti
Üst Kretase	Ka	Arifler Melanjı
Üst Kretase	Kd	Devlez Formasyonu
Üst Triyas –Alt Kretase	Trkg	Geyiktepe Formasyonu
Jura -Kretase	JKk	Köyiçi Formasyonu
Kuvaterner	CŞ	Sakarya Graniti
Paleozoyik	Pzst	Taşarası Formasyonu
Paleozoyik	Pzsa	Alınca Formasyonu
Paleozoyik	Pzsao	Ortaburun Üyesi

Şekil 5.1. Çalışma alanındaki yerinde ölçüm ve örnekleme yapılan su noktaları lokasyon haritası.



Şekil 5.2. Çalışma alanı ve çevresinde yerinde ölçüm ve örnekleme yapılan su noktalarına ait fotoğraflar.



Şekil 5.2. Çalışma alanı ve çevresinde yerinde ölçüm ve örnekleme yapılan su noktalarına ait fotoğraflar (devam ediyor).

5.2. Hidrojeokimyasal Analizler

Hidrojeokimyasal analizler için kurak dönem ve yağışlı dönem olmak üzere iki dönem örnekleme yapılmıştır. Örnekleme sırasında, yerinde ölçüm çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Suyun bazı fiziksel ve kimyasal parametreleri arazi koşullarında örnek noktası başında uygun ölçüm cihazları kullanılarak sağlıklı ölçülebilmektedir. Çalışma kapsamında çözülmüş oksijen, sıcaklık (T), özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ) ve toplam çözülmüş madde (TÇM) YSI 56MPS Multi-Probe marka ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Cihazın pH ölçüm probunda problem olmasından kaynaklı olarak, pH değerleri laboratuvar ortamında ölçülmüştür. Majör iyon analizleri, sodyum (Na^+), potasyum (K^+), magnezyum (Mg^{2+}), kalsiyum (Ca^{2+}), lityum (Li^+), amonyum (NH_4^+) gibi katyonları ve karbonat (CO_3^{2-}), bikarbonat (HCO_3^-), florür (F^-), klorür (Cl^-), bromür (Br^-), sülfat (SO_4^{2-}), nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}) anyonlarını içermektedir. Majör iyon analizleri, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Hidrojeoloji Mühendisliği Programı bünyesinde yer alan Su Kimyası ve Çevresel Tritiyum Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Yerinde Ölçülmüş Fizikokimyasal Parametrelerin Değerlendirilmesi

Su örneklerinin fizikokimyasal parametrelerinin değerlendirilmesi, suyun karakterizasyonunda ve çeşitli çevresel etkilerin analizinde önemli bir adımdır. Yeraltısuyunun, akım yolu boyunca fiziksel ve kimyasal özellikleri değişime uğramaktadır. Özellikle karstik ortamlarda yerinde ölçüm ve analizlerin yapılması, su noktalarındaki kimyasal sürecin doğru ve güvenilir bir şekilde tanımlanabilmesine olanak sağlamaktadır (Freeze ve Cherry, 1979; Chapman, 1996).

Örneklere ait yerinde ölçülen fizikokimyasal parametre sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Eylül 2023 ve Mayıs 2024 dönemlerinde Karasu Karst Kaynağı ilk çıkış ve ana çıkış noktaları da içinde bulunmak üzere örneklenen 4 noktanın (K101, K102, K103, K104), genel olarak fiziksel ve kimyasal parametrelerinde büyük değişiklikler gözlenmemiş olup, değişkenlik katsayıları (CV) %4.30-%14.64 arasında değişmektedir. K104 noktasında yağışlı dönemde önemli sıcaklık değişiklikleri gözlenmiştir. Çözülmüş Oksijen (ÇO) ve Çözülmüş Oksijen Yüzdesi (ÇO%) değerleri ise benzer aralıklarda olup, bu parametrelerde önemli bir değişiklik gözlenmemektedir.

Çizelge 5.2. Su örneklerine ait yerinde ölçülen fizikokimyasal parametreler.

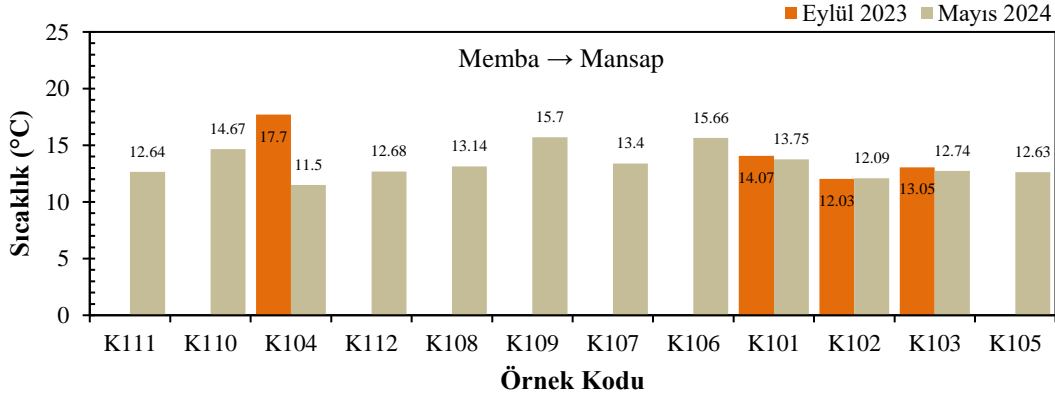
	Örnek Kodu	T (°C)	pH	ÖEİ (µS/cm)	TÇM (ppm)	ÇO (ppm)	ÇO %
Kurak Dönem	K101	14.07	7.31	497	230	1.70	18.0
	K102	12.03	7.28	470	234	1.78	18.3
	K103	13.05	7.52	463	235	1.92	21.0
	K104	17.70	6.94	598	301	1.70	20.0
Yağışlı Dönem	K101	13.75	7.39	415	260	1.77	18.9
	K102	12.09	7.45	404	231	1.87	19.3
	K103	12.74	7.65	406	231	1.83	19.2
	K104	11.50	7.13	497	284	1.82	19.1
	K105	12.63	7.63	407	234	1.86	19.3
	K106	15.66	7.08	867	502	1.69	19.0
	K107	13.40	6.85	736	422	1.79	19.1
	K108	13.14	6.79	976	580	1.79	19.2
	K109	15.7	6.63	1045	604	1.70	19.1
	K110	14.67	7.35	541	311	1.69	19.0
	K111	12.64	7.33	548	307	1.84	19.7
	K112	12.68	7.05	516	303	1.78	19.1
En Düşük		11.50	6.63	404.00	230.00	1.69	18.00
En Yüksek		17.70	7.65	1045.00	604.00	1.92	21.00
Ortalama (K101-K102-K103-K104 için)		13.37	7.33	468.75	250.75	1.80	19.23
Standart Sapma (K101-K102-K103-K104 için)		1.96	0.22	64.76	27.92	0.08	0.94
Değişkenlik Katsayısı (%) (K101-K102-K103-K104 için)		14.64	3.06	13.82	11.13	4.30	4.91

*pH değerleri laboratuvar ortamında ölçülmüştür.

5.2.1.1. Sıcaklık

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere, kurak döneme ait örnek noktalarında ölçülen sıcaklıklar 12.03°C ile 17.70°C arasında değişirken, yağışlı dönemde 11.50°C ile 15.70°C arasında değişim göstermektedir (Şekil 5.3) Yağışlı dönemde K101 (kaynak ilk çıkış) ve K102 (kaynak ana çıkış) örneklerinin sıcaklıklarının da kurak döneme çok yakın olduğu

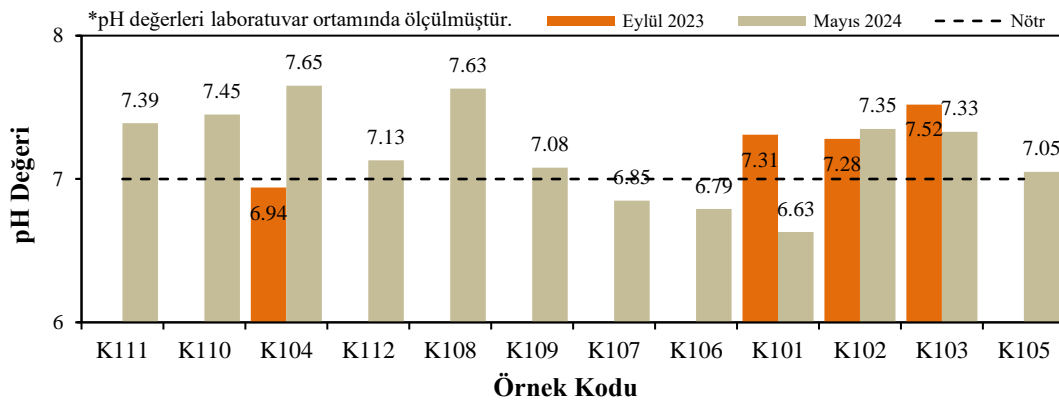
gözlemlenmiştir. Genel olarak yağışlı dönemdeki sıcaklıkların kurak döneme göre biraz daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3. Örnekleme dönemlerindeki sıcaklık değişimleri.

5.2.1.2. Hidrojen İyonu Aktivitesi (pH)

Kurak döneme ait pH değerleri 6.94 ile 7.52 arasında değişirken, yağışlı dönemde 6.63 ile 7.65 arasında değişim göstermektedir (Şekil 5.4). K101, K102 ve K104 noktalarında yağışlı dönemde pH değeri artmış, K103'te ise diğer örneklere oranla yüksek olan pH değerinde bir miktar artış olmuştur. Yağışlı dönemde pH değerleri geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Grafikteki örnek kodları, memba-mansap ilişkisine göre sıralanmıştır.

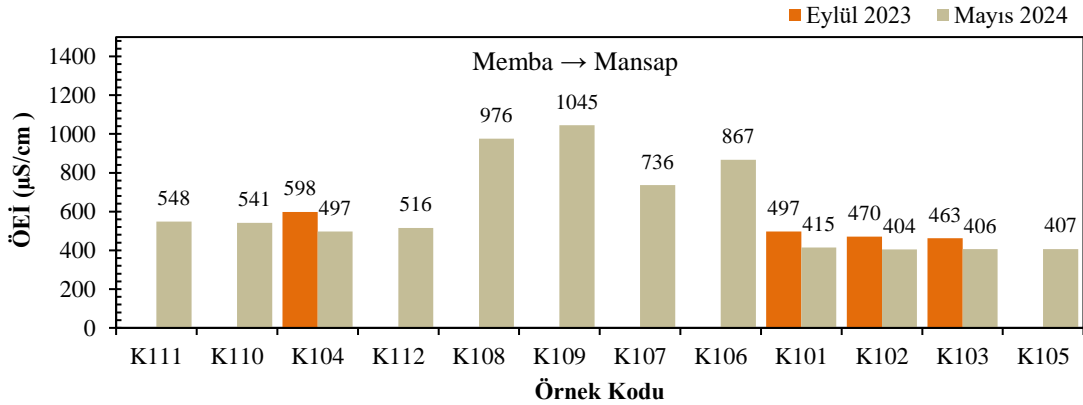


Şekil 5.4. Örnekleme dönemlerindeki pH değişimleri.

5.2.1.3. Özgül Elektriksel İletkenlik (ÖEİ)

Elektriksel iletkenlik sudaki toplam çözülmüş iyon miktarı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Suyun sıcaklığı iyon çözünürlüğünü değiştirdiğinden hidrokimyasal değerlendirmelerde suyun 25°C'deki elektriksel iletkenliği kullanılmakta, 25°C'deki elektriksel iletkenliğe özgül elektriksel iletkenlik (ÖEİ) denmektedir.

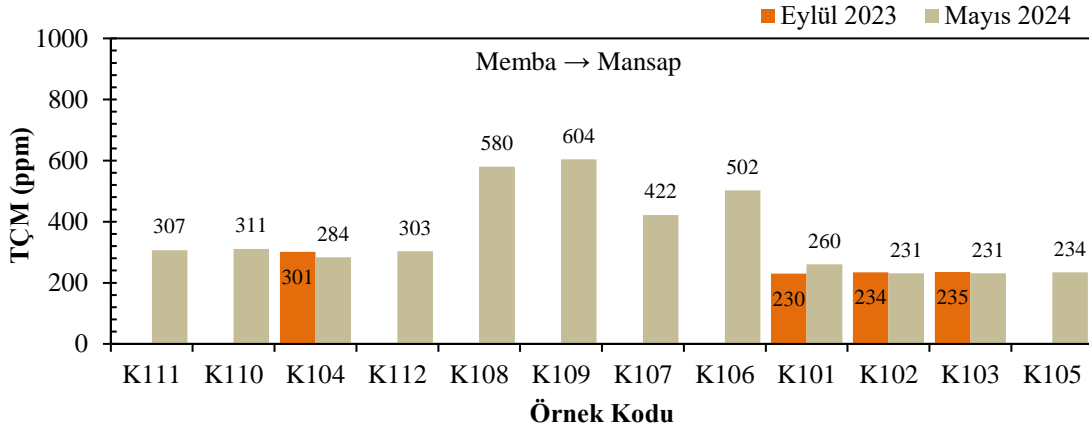
Örneğin 25°C'deki elektriksel iletkenlik değerleri incelendiğinde, kurak dönem ÖEİ değerleri 463 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ile 598 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında iken, yağışlı dönemde 404 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ile 1045 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir (Şekil 5.5). Kurak dönem ile yağışlı dönemde aynı lokasyonlarda (K01, K102, K103, K104) ölçülen ÖEİ değerleri arasında büyük bir değişiklik gözlenmemiştir. Yağışlı dönemde, özellikle K106, K107, K108 ve K109 noktalarında diğer örnekleme noktalarına göre çok daha yüksek ÖEİ değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 5.5. Örnekleme dönemlerindeki ÖEİ değişimleri.

5.2.1.4. Toplam Çözülmüş Madde (TÇM)

Toplam çözülmüş madde miktarı incelendiğinde, kurak dönem TÇM değerleri 230 ppm ile 301 ppm arasında iken, yağışlı dönemde 231 ppm ile 604 ppm arasında değişmektedir. K101, K102, K103 ve K104 noktalarında sırasıyla, %13.04 artış, %1.28 azalma, %1.70 azalma ve %5.64 azalma olmuştur (Şekil 5.6). Yağışlı dönemde TÇM değerlerinin bazı noktalarda oldukça yüksek olduğu (özellikle K108 ve K109) gözlenmiştir.

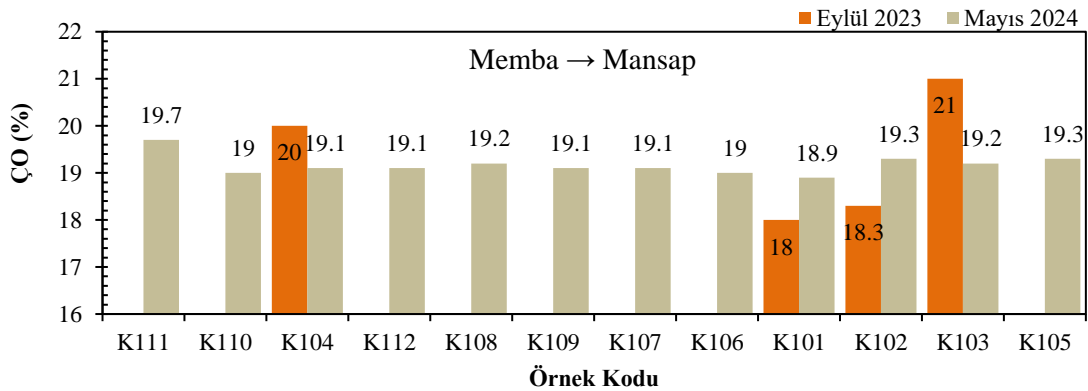


Şekil 5.6. Örnekleme dönemlerindeki TÇM değişimleri.

5.2.1.5. Çözünmüş Oksijen (ÇO)

Sulardaki çözünmüş oksijen miktarı, suyun sıcaklığı, akış hızı, kirlenme durumu, atmosferin kısmi basıncı, tuz oranı ve biyolojik olaylar gibi faktörlere bağlıdır. Çözünmüş oksijen, su kirliliğini değerlendirme aşamasında önemli parametrelerden birisidir (Yanık ve ark., 2001).

Çözünmüş oksijen miktarları incelendiğinde, kurak dönem ÇO değerleri 18% ile 21% arasında iken, yağışlı dönemde 18.9% ile 19.7% arasında değişmekte olup, değerler her iki dönemde de oldukça benzerdir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Örnekleme dönemlerindeki çözünmüş oksijen (%) değişimleri.

5.2.2. Laboratuvar Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Laboratuvarda anyon ve katyon derişimleri mg/l (miligram/litre) olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler, daha sonra meq/l'ye (miliekivalent/litre) dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, her iyonun moleküler ağırlığı ve değeri dikkate alınarak yapılmıştır. İlk olarak, her iyonun mg/l cinsinden ölçülen derişimi, moleküler ağırlığına bölünerek miliekivalent cinsinden ifade edilmiştir. Daha sonra, bu değerler, her iyonun değerliğine göre meq/l birimine çevrilmiştir. Bu sayede, anyon ve katyon derişimleri karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

5.2.2.1. Elektro-nötralite Analizi

Elektro-nötralite (EN) analizleri, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kimyasal analizin doğruluğunun kontrolü için yapılmaktadır. Bu analizdeki temel prensip, doğal sularda iyonik formdaki anyon ve katyonların birbirine eşit olması gerekliliğidir (APHA ve ark., 1989). Bu durum, çözeltinin elektriksel olarak nötr olması anlamına gelmektedir. Elektro-nötralite, Eş. 5.1'de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$EN = \frac{\sum Katyon - \sum Anyon}{\sum Katyon + \sum Anyon} \times 100 \quad (5.1)$$

Laboratuvarda yapılan su analizinin doğru kabul edilebilmesi için EN değerinin ± 5 'nin altında olması beklenmektedir, aksi takdirde analiz tekrarlanmalıdır (APHA ve ark., 1989).

Çalışma alanı çevresinde alınan su örneklerinin majör iyon analizi sonuçları Çizelge 5.3'te verilmektedir. Analiz sonuçları için majör iyon dengesi hesapları yapılmış ve EN (%) değerlerinin, APHA ve ark. (1989) tarafından belirtilen ± 5 hata payı içinde olduğu görülmüştür (Çizelge 5.3).

Bu doğrultuda; çalışma alanından alınan su örneklerin hidrojeokimyasal analiz sonuçlarının, tez kapsamında yapılacak değerlendirmelerde güvenilir bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.3. İnceleme alanı ve yakın dolayında kurak ve yağışlı dönemde örnekleme yapılan su noktalarına ait majör iyon analiz sonuçları

	Örnek Adı	Kasyonlar							Anyonlar										EN (%)	ÖEİ (µS/cm)
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁴⁺	Li ⁺	ΣKasyon	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	F ⁻	Br ⁻	ΣAnyon		
		(meq/l)							(meq/l)											
Kurak Dönem	K101	0.077	0.020	4.096	0.988	-	-	5.182	-	4.706	0.071	0.064	0.051	0.051	-	-	-	4.892	-2.878	497
	K102	0.061	0.012	3.950	1.017	-	-	5.040	-	4.804	0.067	0.078	0.032	0.032	-	-	-	4.981	-0.589	470
	K103	0.060	0.010	3.632	1.030	-	-	4.732	-	4.804	0.069	0.072	0.038	0.038	-	-	-	4.983	2.586	463
	K104	0.181	0.014	5.250	0.546	-	-	5.991	-	5.490	0.102	0.301	0.132	0.132	-	0.005	-	6.031	0.328	598
Yağışlı Dönem	K101	0.058	0.011	3.319	0.692	0.011	-*	4.091	-	4.215	0.072	0.060	-*	0.051	-*	0.001	-*	4.399	3.620	415
	K102	0.050	0.011	3.266	0.713	0.010	-*	4.049	-	4.023	0.038	0.076	-*	0.032	-*	0.001	-*	4.170	1.470	404
	K103	0.058	0.012	3.301	0.715	0.012	-*	4.098	-	4.119	0.043	0.073	-	0.041	-*	0.001	-*	4.277	2.140	406
	K104	0.121	0.011	4.254	0.295	0.006	-*	4.686	-	4.408	0.089	0.306	-	0.143	-*	0.008	-	4.955	2.790	497
	K105	0.057	0.012	3.215	0.692	0.039	-*	4.016	-	4.023	0.049	0.070	0.035	0.038	0.002	0.001	-	4.217	2.450	407
	K106	0.487	0.032	6.206	1.816	0.025	-*	8.566	-	7.389	1.230	0.315	-	0.104	-*	0.010	0.001	9.049	2.740	867
	K107	0.182	0.015	6.359	0.657	0.038	-*	7.252	-	6.715	0.402	0.215	0.001	0.259	-*	0.004	-	7.597	2.320	736
	K108	0.700	0.005	7.395	1.363	0.000	-	9.463	-	7.100	1.837	0.707	0.001	0.508	-*	0.007	0.001	10.162	3.560	976
	K109	1.788	0.007	6.313	1.751	0.000	-	9.858	-	5.754	4.030	0.410	-*	0.222	-*	0.013	0.001	10.429	2.810	1045
	K110	0.172	0.009	4.223	1.207	0.047	0.000	5.658	-	5.465	0.071	0.218	0.001	0.015	-*	0.004	-*	5.774	1.010	541
	K111	0.212	0.054	2.415	2.920	0.062	0.003	5.666	-	5.181	0.136	0.180	0.001	0.279	-*	0.026	-	5.802	1.180	548
	K112	0.191	0.009	4.692	0.300	0.034	0.000	5.225	-	4.889	0.104	0.338	0.001	0.106	-*	0.008	0.001	5.445	2.060	516

*Laboratuvar sonuçlarına göre kasyon ya da anyon derişimleri, 0.01 mg/l'dan daha düşük seviyede ölçülmüştür.

5.2.2.2. Majör İyon Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışma alanı ve çevresinden alınan su örneklerinin analiz sonuçları, su-kayaç etkileşim süreçlerini ve su türlerini (hidrojeokimyasal fasiyesler) belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler, Back (1966) tarafından tanımlanan hidrojeokimyasal fasiyes sınıflamasına göre yapılmıştır. Su kütleleri arasındaki ilişkiler ve su kütlelerinin bölgesel dağılımının ortaya konmasında majör iyon bolluklarını dikkate alan dairesel, Piper (1944) ve Schoeller (1962) diyagramları kullanılmaktadır.

Çalışma alanı ve yakın çevresindeki boşalım sağlayan su örneklerinin anyon ve katyon sıralaması ve su fasiyesi Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te özetlenmiştir. Çizelgelere bakıldığında, genel olarak suların benzer kökenli olup, Ca^{2+} katyonu ve HCO_3^- anyonu baskın olduğu gözlenmektedir. İlk dört örneğin (K101-K102-103-104) kurak ve yağışlı dönem majör iyon değişimleri de Şekil 5.8'de verilmiştir.

Çalışma alanı ve dolayında kurak ve yağışlı dönemlerde örneklenen su noktalarına ait dairesel diyagramlar Şekil 5.9'da, Piper diyagramları Şekil 5.10'da ve Schoeller diyagramı ise Şekil 5.11'de verilmektedir.

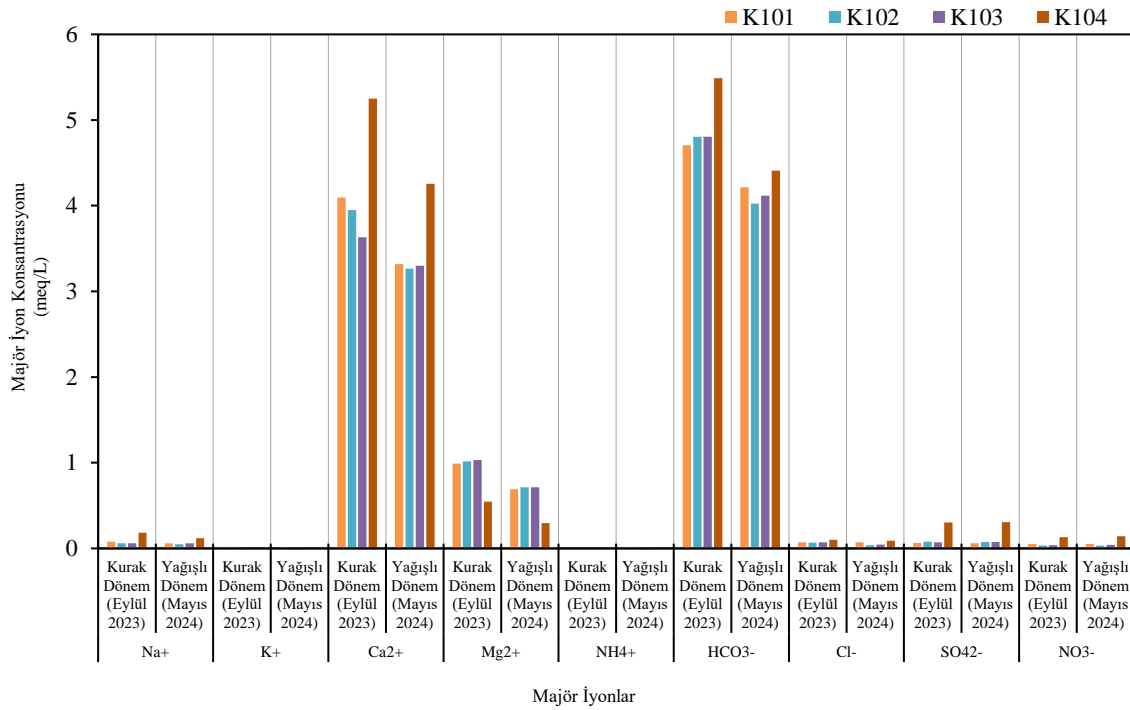
Dairesel diyagramlar incelendiğinde, K106, K108 ve K109 kodlu örnekler iyon bolluğu açısından daha zengindir. Piper diyagramına göre, K109 numaralı örnek, $Ca+Mg$, $Na+K/HCO_3$, $Cl+SO_4$ fasiyesinde çıkmış olup, tarımsal kaynaklı kirlilik göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Diğer örneklerin ise, $Ca-Mg-HCO_3$ fasiyesinde olduğu anlaşılmıştır. Schoeller diyagramına göre, alınan örneklerin birbirlerine göre köken olarak benzerlik taşıdığı görülmektedir.

Çizelge 5.4. Kurak döneme ait örneklerin anyon-katyon sıralaması ve su fasiyesi sınıflandırması.

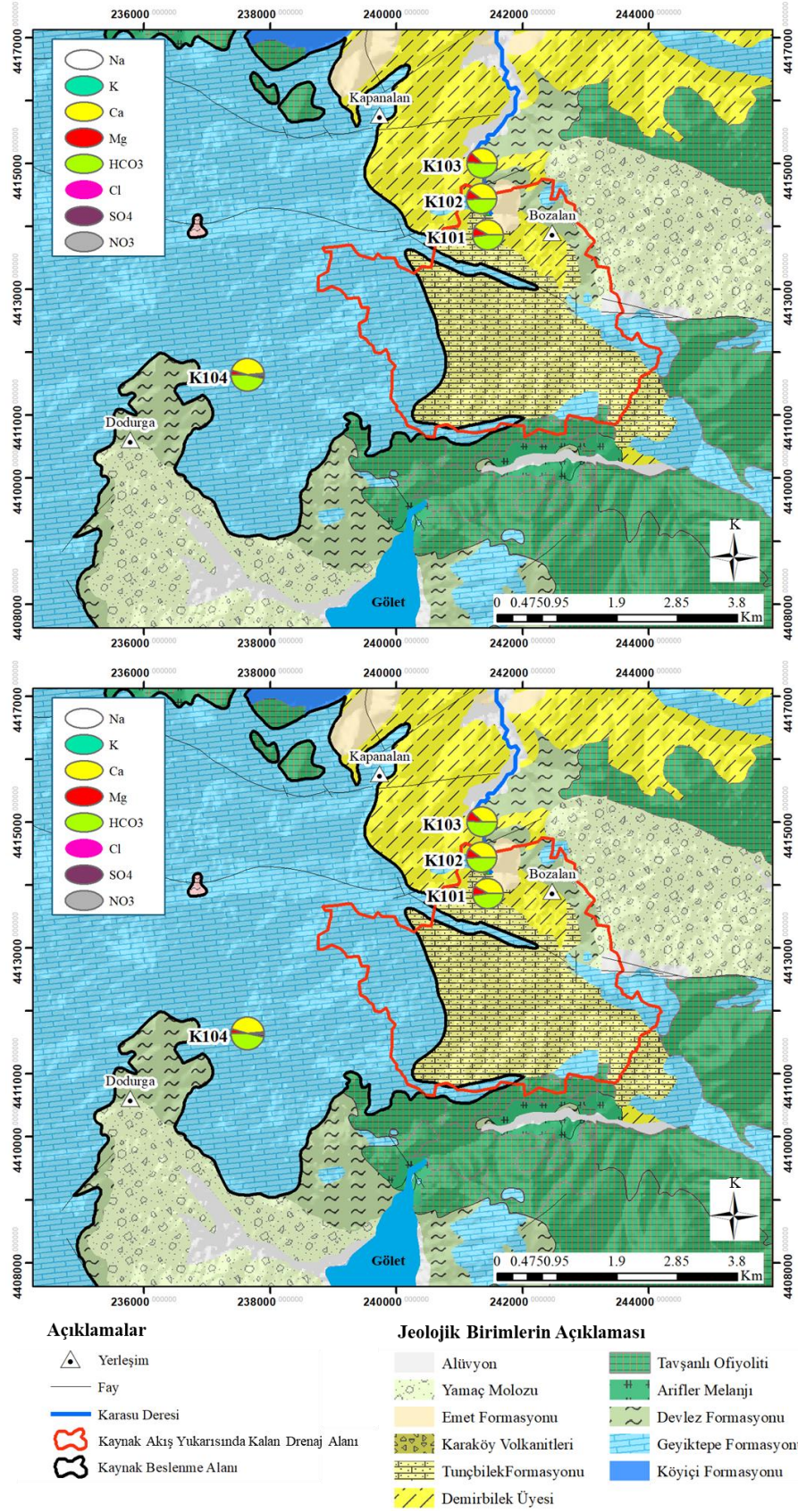
	Örnek Adı	Katyon Sıralaması	Anyon Sıralaması	Su Fasiyesi
Kurak Dönem	K101	Ca >Mg>Na>K	$HCO_3 > Cl > SO_4 > NO_3$	Ca-Mg- HCO_3
	K102	Ca >Mg>Na>K	$HCO_3 > SO_4 > Cl > NO_3$	Ca-Mg- HCO_3
	K103	Ca >Mg>Na>K	$HCO_3 > SO_4 > Cl > NO_3$	Ca-Mg- HCO_3
	K104	Ca >Mg>Na>K	$HCO_3 > SO_4 > NO_3 > Cl$	Ca-Mg- HCO_3

Çizelge 5.5. Yağışlı döneme ait örneklerin anyon-katyon sıralaması ve su fasiyesi sınıflandırması.

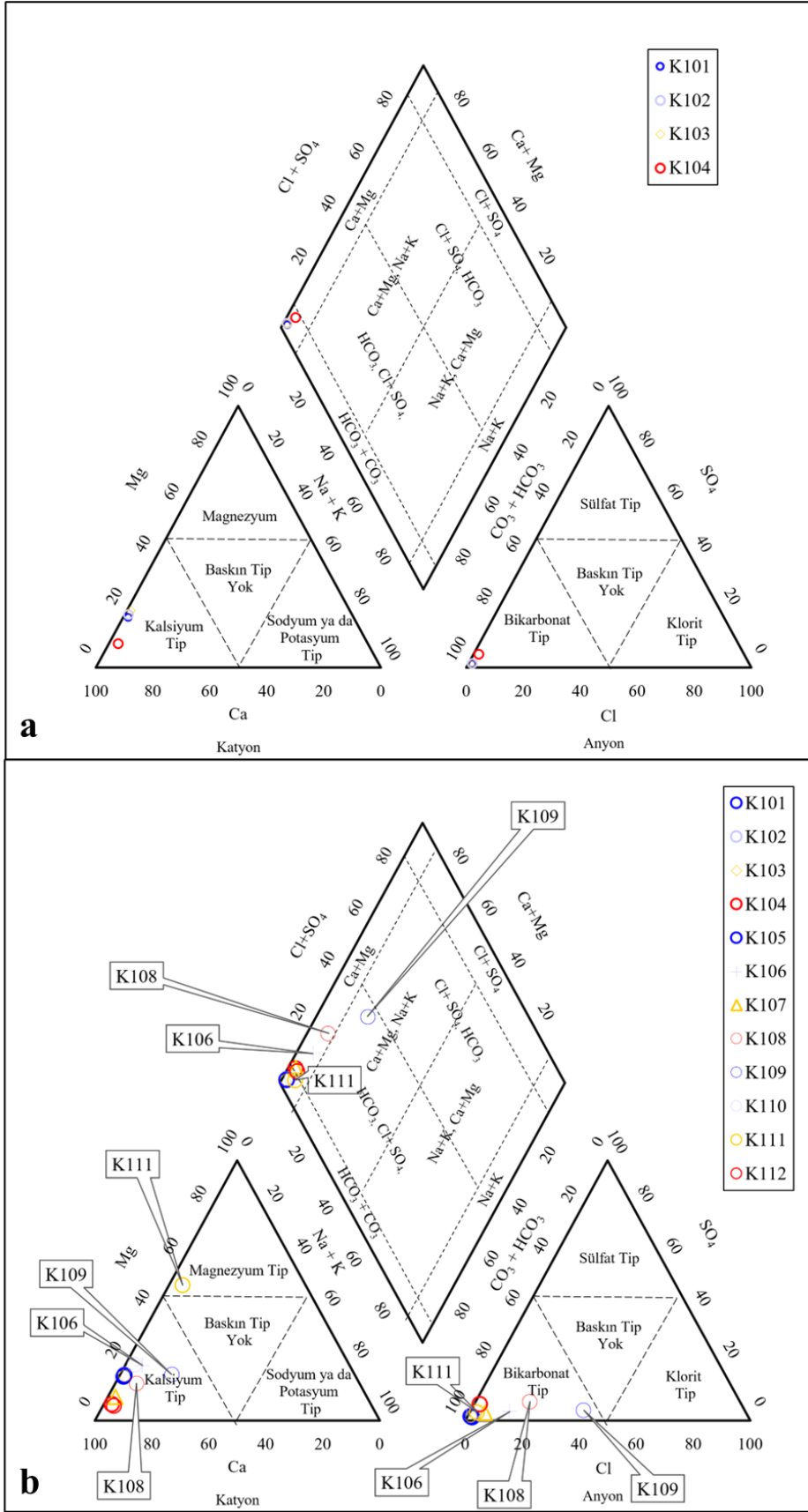
Örnek Adı	Katyon Sıralaması	Anyon Sıralaması	Su Fasiyesi
K101	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K102	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >SO ₄ >Cl>NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K103	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >SO ₄ >Cl>NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K104	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K105	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >SO ₄ >Cl>NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K106	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K107	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >Cl>NO ₃ >SO ₄	Ca-Mg-HCO ₃
K108	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K109	Ca >Na>Mg>K	HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃	Ca+Mg, Na+K / HCO ₃ ⁻ , Cl+SO ₄
K110	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >Cl>SO ₄ >NO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
K111	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >NO ₃ >SO ₄ >Cl	Ca-Mg-HCO ₃
K112	Ca >Mg>Na>K	HCO ₃ >SO ₄ >NO ₃ >Cl	Ca-Mg-HCO ₃



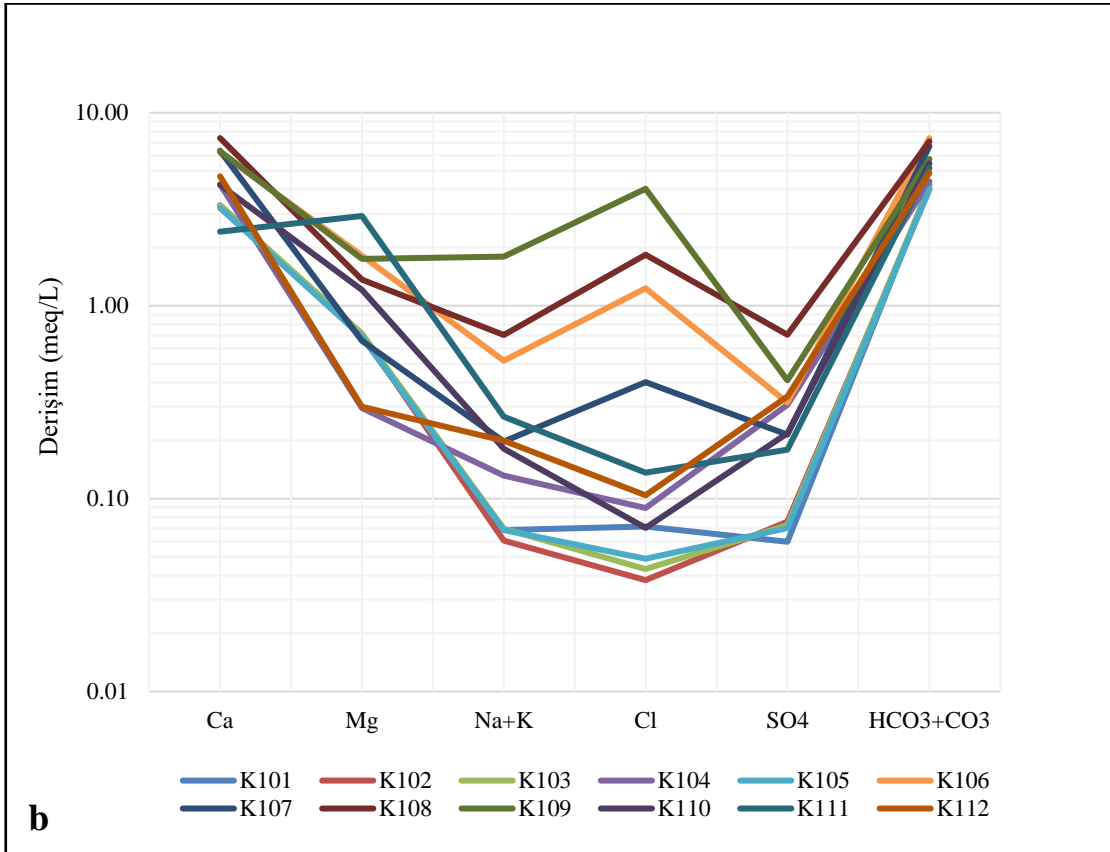
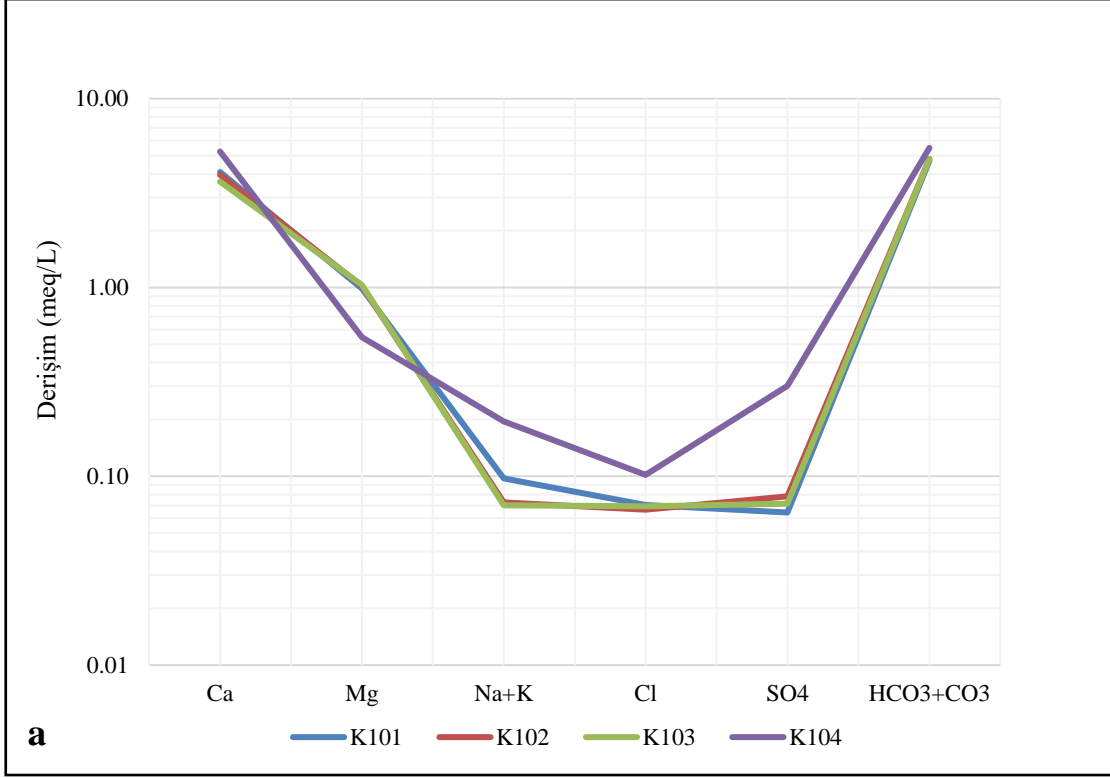
Şekil 5.8. K101-K102-K103 ve K104 kodlu örneklerin kurak ve yağışlı dönem majör iyon konsantrasyonlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.9. Çalışma alanı ve çevresindeki kurak (a) ve yağışlı (b) dönemde alınan su örneklerine ait dairesel diyagramlar.

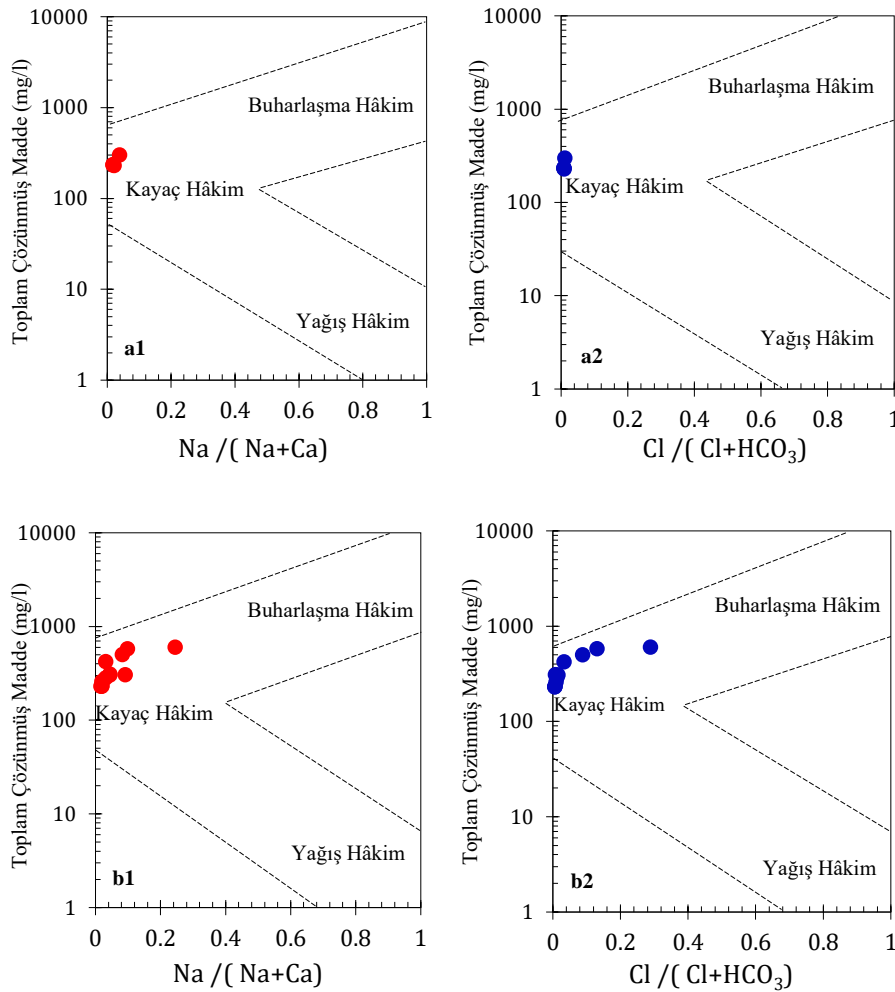


Şekil 5.10. Çalışma alanı ve yakın dolayında kurak (a) ve yağışlı (b) dönemlerde örneklenen su noktalarına ait Piper Diyagramı.



Şekil 5.11. Çalışma alanı ve çevresindeki kurak (a) ve yağışlı (b) dönemlerde alınan su örneklerine ait Schoeller Diyagramı.

Gibbs diyagramları (Gibbs, 1970), su kimyası ve hidrojeokimyasal analizlerde, suyun kimyasal bileşimini ve bu bileşim üzerindeki kontrol edici faktörleri anlamak için kullanılan önemli araçlarındandır. Şekil 5.12'de yer alan Gibbs diyagramları, kurak ve yağışlı döneme ait örneklerin $Na/(Na+Ca)$ ve $Cl/(Cl+HCO_3)$ oranlarına göre toplam çözünmüş katı (TÇM) miktarlarını göstermektedir. Bu diyagramlar, suyun kimyasal bileşiminin kayaç çözünmesi, buharlaşma veya yağış gibi farklı süreçler tarafından nasıl etkilendiğini ortaya koymaktadır. Her diyagramda da örnekler, kayaç çözünmesi hâkim olan bölgeye yakın yer almakta olup, bu durum kurak ve yağışlı dönemdeki suyun kimyasal bileşiminin büyük ölçüde kayaç çözünmesi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Ayrıca, buharlaşma ve yağışın etkileri de diyagramlarda belirli bölgelerle tanımlanmıştır. Bu tür diyagramlar, suyun hidrojeokimyasal süreçler boyunca izlediği yolları anlamak için kritik öneme sahiptir.



Şekil 5.12. Kurak (a1-a2) ve yağışlı (b1-b2) dönemlere ait Gibbs Diyagramları.

5.2.2.3. Doygunluk İndisi (SI) Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Doygunluk indisi, suyun belirli bir mineralle doymunluk durumunu ifade eden bir parametredir. Doygunluk indisi, Eş. 5.2 ile hesaplanmaktadır.

$$SI = \log\left(\frac{IAP}{K}\right) \quad (5.2)$$

Eşitlikte, IAP (Ion Activity Product), çözeltideki iyonların etkinlik ürününü temsil ederken ve K ise mineralin çözünlük çarpanıdır. SI değeri pozitif olduğunda çözeltili, mineralin çökmesi yönünde bir eğilim göstermektedir. Bir başka deyişle, mineral aşırı doymunluk durumdadır. SI değeri negatifse, çözeltili mineralin çözünlmesi yönünde bir eğilim gösterir, yani mineral doymun değil durumdadır. SI'nin sıfır olduğu durum ise mineralin çözeltide denge halinde olduğunu yani doymun olduğunu belirtmektedir. Bu hesaplama, yeraltı suları ve çeşitli hidrojeolojik süreçlerde, mineral çözünlüğünün anlaşılması ve tahmin edilmesi açısından önemli bir araçtır (Appelo ve Postman, 2010).

USGS tarafından geliştirilen PhreeqC yazılımı ile Karasu Karst Kaynağı ve çevresinden alınan su örneklerinin doymunluk indisleri değerlendirilmiş olup, Anhidrit (CaSO_4), Aragonit (CaCO_3), Kalsit (CaCO_3), kısmi karbondioksit basıncı (pCO_2), Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Florit (CaF_2), Jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Halit (NaCl) ve Silvit (KCl) doymunluk hesaplamaları yapılmıştır. Kurak dönem örneklerine ait analiz sonuçları Çizelge 5.6'da ve yağışlı dönem örneklerine ait analiz sonuçları Çizelge 5.7'de sunulmuştur.

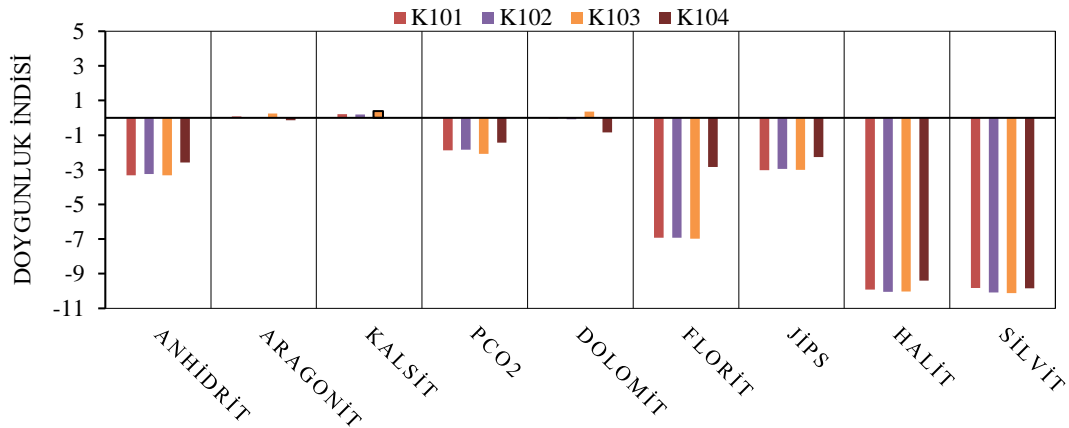
Çizelge 5.6. Kurak döneme ait doymunluk indisi analiz sonuçları.

Kod	Anhidrit	Aragonit	Kalsit	pCO ₂	Dolomit	Florit	Jips	Halit	Silvit
K101	-3.32	0.08	0.22	-1.87	-0.05	-6.92	-3.02	-9.91	-9.83
K102	-3.25	0.04	0.19	-1.83	-0.09	-6.93	-2.94	-10.04	-10.09
K103	-3.31	0.25	0.39	-2.07	0.36	-6.97	-3.01	-10.03	-10.12
K104	-2.57	-0.14	0.01	-1.43	-0.84	-2.83	-2.27	-9.39	-9.84

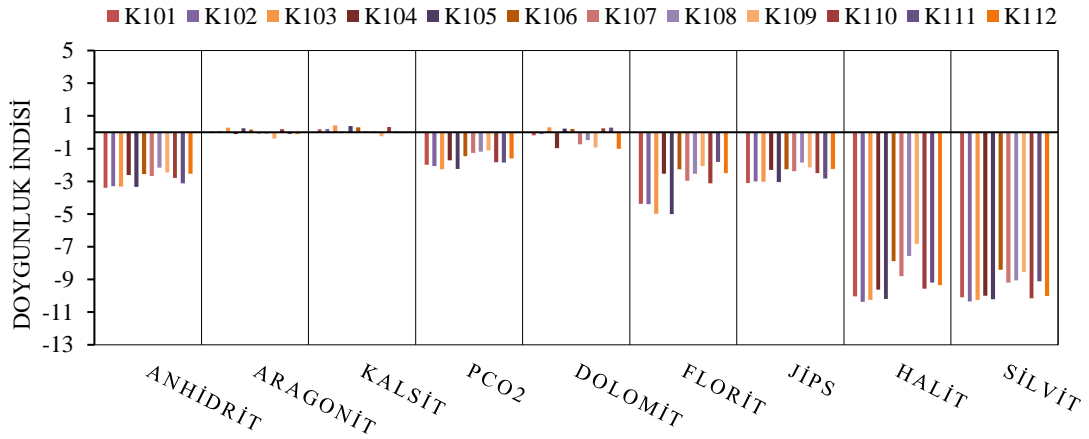
Çizelge 5.7. Yağışlı döneme ait doygunluk indisi analiz sonuçları.

Kod	Anhidrit	Aragonit	Kalsit	pCO ₂	Dolomit	Florit	Jips	Halit	Silvit
K101	-3.4	0.04	0.18	-1.99	-0.19	-4.38	-3.1	-10.03	-10.09
K102	-3.3	0.07	0.21	-2.07	-0.1	-4.39	-3	-10.37	-10.35
K103	-3.32	0.28	0.42	-2.26	0.31	-4.99	-3.02	-10.25	-10.26
K104	-2.61	-0.11	0.03	-1.71	-0.97	-2.54	-2.31	-9.62	-9.99
K105	-3.34	0.24	0.39	-2.25	0.23	-5	-3.04	-10.2	-10.21
K106	-2.56	0.16	0.31	-1.45	0.21	-2.26	-2.26	-7.89	-8.41
K107	-2.68	-0.08	0.07	-1.26	-0.73	-2.96	-2.38	-8.8	-9.2
K108	-2.16	-0.08	0.06	-1.18	-0.49	-2.53	-1.86	-7.57	-9.06
K109	-2.45	-0.39	-0.25	-1.11	-0.93	-2.06	-2.15	-6.82	-8.55
K110	-2.8	0.18	0.33	-1.84	0.24	-3.12	-2.49	-9.57	-10.16
K111	-3.13	-0.11	0.04	-1.85	0.29	-1.82	-2.83	-9.19	-9.12
K112	-2.54	-0.11	0.03	-1.59	-1.01	-2.5	-2.24	-9.35	-10.02

Tüm örnekler kalsit ve aragonite doygun, dolomite göre de bazı örnekler doygundur. Ancak diğer minerallere (anhidrit, florit, jips, halit, silvit) karşı doygunluk söz konusu değildir (Şekil 5.13 ve Şekil 5.14). Genel olarak, örneklerin doygunluk indisleri incelendiğinde, yeraltısuyu dolaşımının yerel dolaşımdan çok yaygın dolaşımın baskın olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.13. Kurak döneme ait doygunluk indisi grafiği.



Şekil 5.14. Yağışlı döneme ait doygunluk indis grafiği.

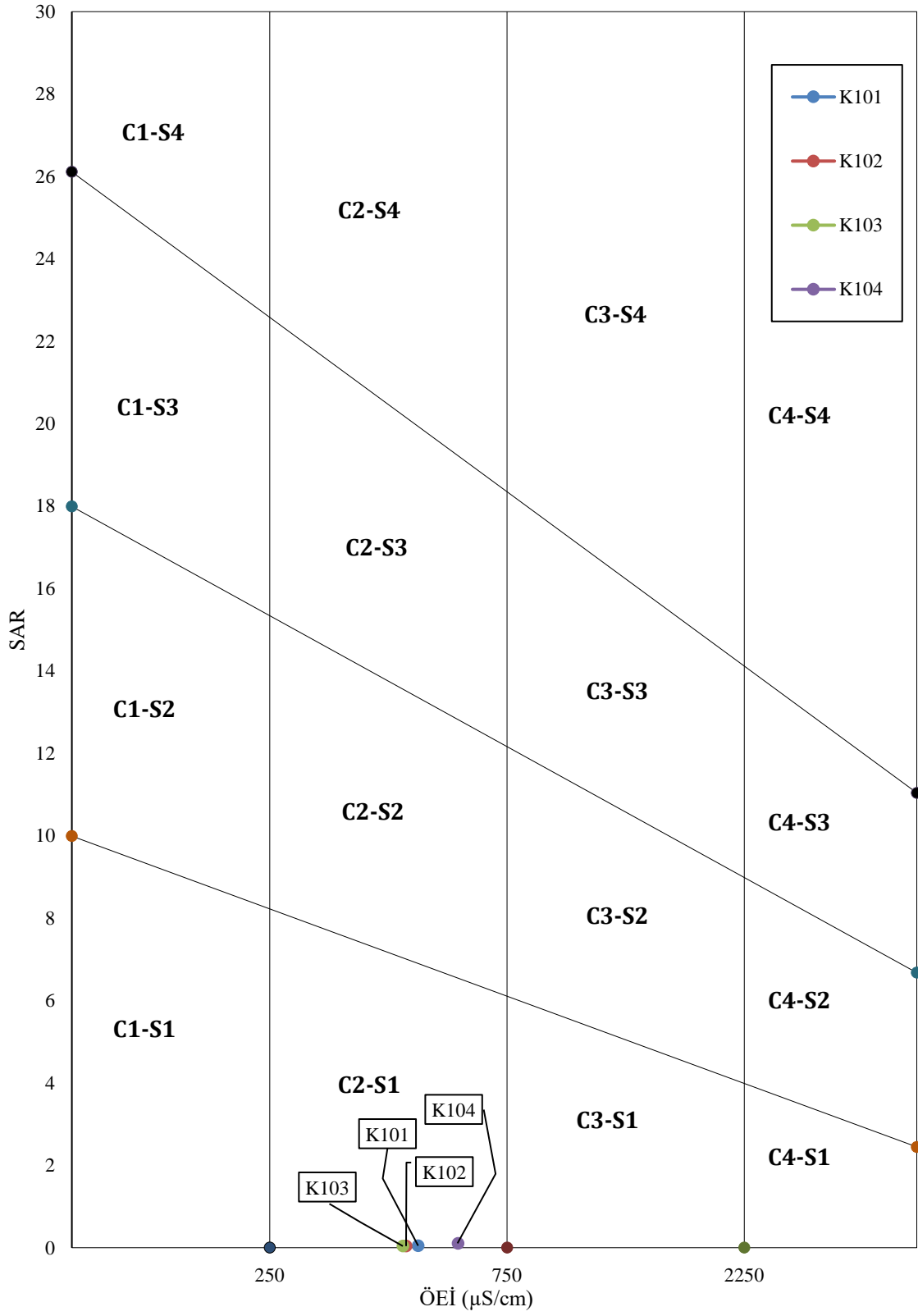
5.3. Su Kalitesi

Karasu Karst Kaynağı, Bozüyük ilçesi başta olmak üzere Bilecik ilinin çoğu ilçesine içme suyu sağlamaktadır. Suların sertlik durumunu ortaya koymak amacıyla, APHA (1999) sınıflandırması kullanılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiş olup, tüm örneklenen suların “Çok Sert Su” sınıfında çıktığı görülmüştür.

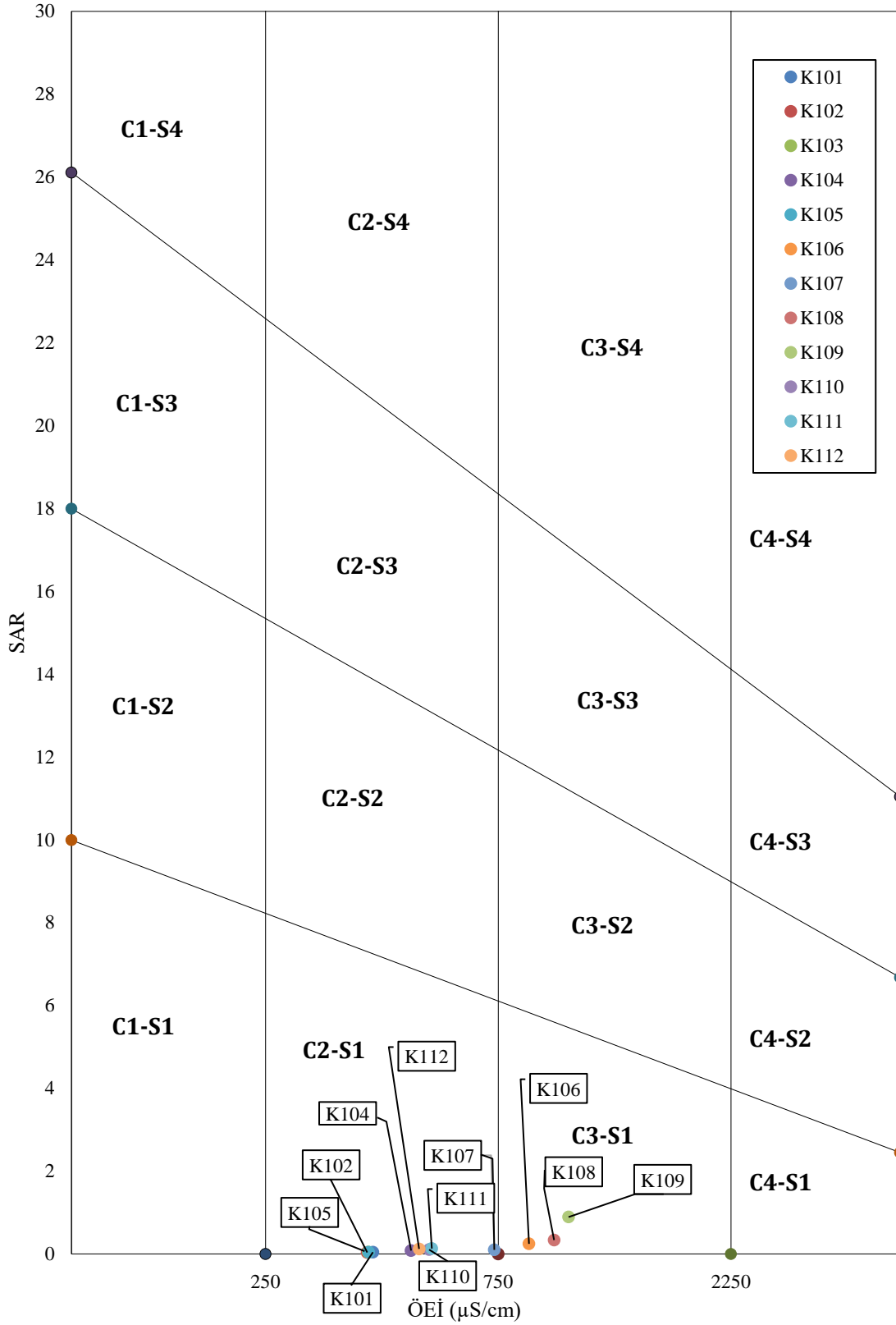
Çizelge 5.8. Çalışma alanı ve çevresinden alınan su örneklerinin sertlik sınıflaması.

	Kod	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Sertlik (Mg-CaCO ₃ /L) (ppm)	Sınıflama
Kurak Dönem	K101	82.08	12.01	254.42	Çok Sert Su
	K102	79.15	12.36	248.54	Çok Sert Su
	K103	72.79	12.51	233.28	Çok Sert Su
	K104	105.21	6.63	290.02	Çok Sert Su
Yağışlı Dönem	K101	66.52	8.41	200.74	Çok Sert Su
	K102	65.45	8.66	199.10	Çok Sert Su
	K103	66.15	8.69	200.97	Çok Sert Su
	K104	85.25	3.58	227.61	Çok Sert Su
	K101	64.43	8.41	195.52	Çok Sert Su
	K102	124.36	22.07	401.42	Çok Sert Su
	K103	127.44	7.98	351.08	Çok Sert Su
	K104	148.19	16.56	438.23	Çok Sert Su
	K101	126.51	21.27	403.50	Çok Sert Su
	K102	84.62	14.67	271.72	Çok Sert Su
	K103	48.40	35.48	266.98	Çok Sert Su
	K104	94.03	3.64	249.78	Çok Sert Su

Çalışma sırasında örneklenen su noktalarının sulama açısından uygunluk durumlarının belirlenmesi için ABD Tuzluluk Diyagramı kullanılmıştır. Ayrıca ABD Tuzluluk Diyagramına göre örneklerin ÖEİ ve sodyum absorpsiyon oranları (SAR) yağışlı ve kurak dönemde alınan örnekler için değerlendirilmiştir. Diyagram, iki ana parametreye göre suyun sınıflandırılmasını sağlamakta olup, bunlar ÖEİ ve sodyum absorpsiyon oranıdır. ÖEİ, suyun içerisindeki toplam çözünmüş iyon miktarını göstermekte, SAR değeri ise suyun sodyum içeriğini, kalsiyum ve magnezyum içeriğine göre oranlamaktadır (US Salinity Laboratory Staff, 1954) Kurak dönemde alınan su örnekleri ABD Tuzluluk Diyagramına göre “C2-S1” sınıfı, diğer bir ifade ile “orta tuzlu su ve düşük sodyumlu su” olarak analiz edilmiştir (Şekil 5.15). Yağışlı dönemde ise, Bozalan Köyü merkezindeki K106 kodlu, No4 Çeşme olarak adlandırılan K108 kodlu ve No6 Çeşme olarak adlandırılan K109 kodlu örnekler “C3-S1” sınıfına girmiş olup, söz konusu örnekler haricindeki diğer sular “C2-S1” sınıfına girmiştir (Şekil 5.16). “C2-S1” sınıfındaki sular, “orta düzeyde tuzluluk ve düşük sodyum” taşımaktadır. Bu nedenle, çoğu bitki için güvenli bir şekilde sulamada kullanılabilir. “C3-S1” sınıfındaki sular ise daha yüksek tuzluluğa sahiptir, ancak yine de düşük sodyum riski taşımaktadır. Özetle, “C2-S1” sınıfına giren örnekler genel olarak daha güvenli, “C3-S1” sınıfına giren örnekler için ise daha dikkatli kullanım gerekmektedir.



Şekil 5.15. Kurak dönem örneklerine ait ABD Tuzluluk Diyagramı.



Şekil 5.16. Yağışlı dönem örneklerine ait ABD Tuzluluk Diyagramı.

Suyun kalitesini değerlendirmek için farklı standartlar ile su örneklerinin ölçülen değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.9’da, suyun çeşitli kimyasal parametreleri için Türk Standartları (TS266, 2005), Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017), ve Avrupa Birliği (EC, 1998) standartları verilmiştir. Aynı zamanda, iki farklı dönemdeki (kurak ve yağışlı dönem) kaynak ana çıkış suyu değerleri de listelenmiştir. Çizelge 5.9’a göre, örneklerdeki su kalitesi parametreleri hem ulusal hem de uluslararası standartların belirlediği sınırların altında yer almakta ve bu da suyun içilebilir ve güvenli olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.9. İçme suyu standartları ve su örneklerinin ölçülen değerleri.

Parametre	Türk Standartları (TS266)	Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO)	Avrupa Birliği (EC)	Kaynak Ana Çıkış / Kurak Dönem	Kaynak Ana Çıkış / Yağışlı Dönem
BİRİNCİL STANDARTLAR, mg/l					
Florür (F)	1,5	1,5	1,5	<0.01	0.02
Nitrat (NO ₃)	50	50	50	1.97	2.01
İKİNCİL STANDARTLAR, mg/l					
pH	6,5-9,5	6,5-8,0	6,5-9,5	7.28	7.45
Sülfat (SO ₄)	250	500	250	3.77	3.64
Klorür (Cl)	250	250	250	2.36	1.34
Toplam Çözülmüş Madde	-	1000	-	234	231
İLAVE PARAMETRELER, mg/l					
Kalsiyum (Ca)	-	300	-	0.45	65.45
Sertlik (CaCO ₃ olarak)	-	500	-	248.54	199.1
Magnezyum (Mg)	50	50	-	12.36	8.66
Potasyum (K)	12	-	-	0.45	0.43
Sodyum (Na)	200	200	200	1.41	1.14
Amonyum (NH ₄)	0,5	1,5	0,5	<0.01	0.18

Gelecekte Karasu Karst Kaynağının su kalitesi, mevcut verilere dayalı olarak olumlu bir tablo çizmektedir. Analiz edilen parametreler hem ulusal hem de uluslararası içme suyu standartlarının belirlediği sınırların oldukça altında kalmakta, bu da suyun içilebilirliği ve güvenliği konusunda güven verici bir durumu ortaya koymaktadır. Florür ve nitrat gibi birincil inorganik kimyasalların konsantrasyonlarının düşük olması, suyun kirlilikten etkilenmemiş olduğunu göstermektedir. Ayrıca, suyun pH değerleri, ideal aralıkta seyrederek asidik veya bazik sapmaların olmadığını, sertlik seviyelerinin ise kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını ortaya koymaktadır. Ancak, gelecekteki iklim değişiklikleri ve olası kirlilik kaynakları dikkate alınarak, su kalitesinin sürekli olarak izlenmesi ve koruma önlemlerinin alınması önem arz etmektedir. Böylece, Karasu Karst

Kaynağı hem ekolojik dengeyi koruyacak hem de güvenli içme suyu teminini sürdürecektir.

5.4. İzotop Analizleri

Hidrojeolojik çalışmalarda en yaygın kullanılan çevresel izotoplar arasında, döteryum, oksijen-18 ve trityum yer almaktadır. Döteryum ve oksijen-18 kararlı izotoplar iken, trityum ise radyoaktif bir izotop olup, yarılanma ömrü 12.4 yıldır. Suyu oluşturan elementlerin izotopları, moleküler yapıda bulunduğu için bu izotopların bollukları, suyun hidrolojik döngü sırasında maruz kaldığı süreçlerden etkilenmektedir (Clark and Fritz, 1997).

İzotop analizleri ile suyun yaşı, kökeni ve farklı su kütleleri arasındaki etkileşimler hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Karst araştırmalarında, karstik sistemler arasındaki ilişkileri ve bunların beslenme alanlarını belirlemek için sıklıkla kullanılan çeşitli izotoplar bulunmaktadır. Bu izotoplar arasında bulunan trityum, yeraltısuyunun bağlı yaşını belirlemek ve yeraltısuyunun akiferde ne kadar süreyle kaldığını ve yenilendiğini saptamak, diğer bir deyişle dolaşım mekanizmasının ortaya konması için kullanılmaktadır (Tezcan, 1993, Clark ve Fritz,1997).

Kurak dönemde 4 adet, yağışlı dönemde 12 (kurak dönemdeki 4 adet noktalarına ilave olarak 8 örnek daha) adet olmak üzere toplamda 16 adet izotop örneği için trityum analizi yapılmıştır.

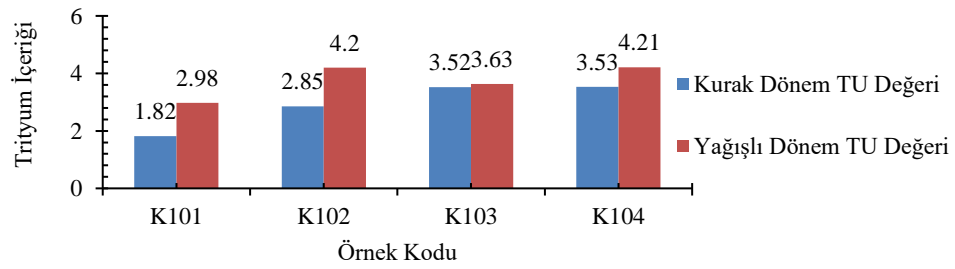
5.4.1. Trityum

Tez çalışma alanında ve çevresinde boşalım sağlayan 12 farklı su noktasında kurak ve yağışlı dönemde gözlenen trityum değerleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 5.10. Örneklerin trityum analiz sonuçları.

Kod	Kod	Kot (m)	Açıklama	³ H (TU)
Kurak Dönem	K101	850	İlk Çıkış	1.82
	K102	836	Ana Kaynak	2.85
	K103	827	Kanal	3.52
	K104	1149	Kurupınar Ç.	3.53
Yağışlı Dönem	K101	850	İlk Çıkış	2.98
	K102	836	Ana Kaynak	4.2
	K103	827	Kanal	3.63
	K104	1149	Kurupınar Ç.	4.21
	K105	811	Havza Çıkış	2.94
	K106	895	Köy İçinde Ç.	5.26
	K107	1005	Gümece Ç.	5.23
	K108	1070	No4 Ç.	5.22
	K109	1086	No6 Ç.	3.89
	K110	1135	Şırlakçı Ç.	5.13
	K111	1058	Ayşe Ç.	2.07
	K112	1119	No24 Ç.	5.34

Yağışlı dönemde, örneklenen ilk 4 noktanın trityum değerlerinin, kurak döneme göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiş olup, değerler 2.07 TU – 5.26 TU arasında değişiklik göstermektedir. Örneğin, kaynağın ilk çıkış noktası ve ana çıkış noktasında kurak dönemde 1.82 TU ve 2.85 TU değerleri hesaplanmış olup, yağışlı dönemde bu değerler sırasıyla, 2.98 TU ve 4.20 TU olarak analiz edilmiştir (Şekil 5.17).



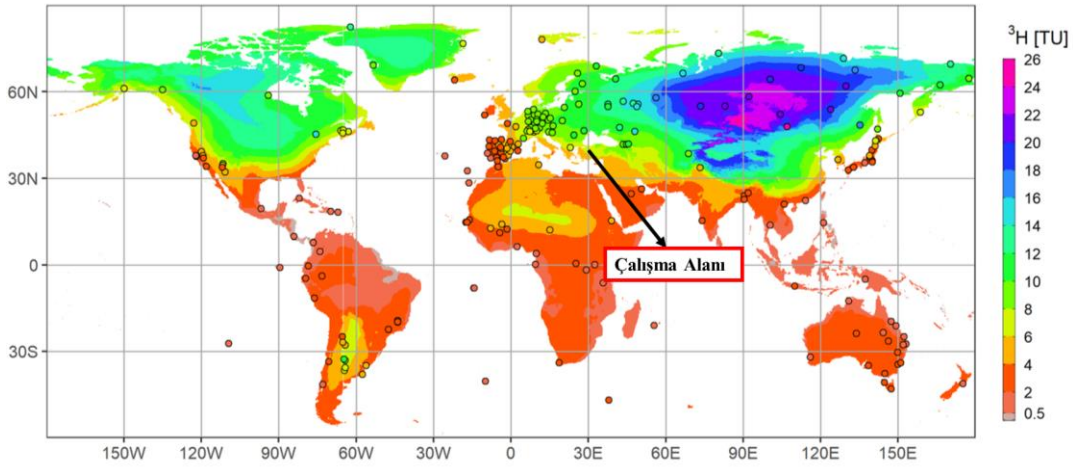
Şekil 5.17. K101, K102, K103 ve K104 kodlu örneklerin kurak ve yağışlı dönemdeki trityum içerikleri.

Yağışlı dönemlerde gözlemlenen ³H (trityum) değerlerindeki artış, yıllık yağışlardan süzülen suların etkisini göstermektedir. Diğer yandan, kurak dönemlerde kaynaktan çıkan suyun, trityum konsantrasyonunun daha düşük olduğu, bir başka deyişle suyun akiferde

bekleme süresinin uzadığı anlaşılmaktadır. Bu süreç, kurak dönemlerde suyun daha uzun bir zaman diliminde akiferde kaldığı ve daha eski suyun kaynaklardan boşaldığını göstermektedir. Başka bir ifade ile Karasu Karst Siteminde, yağışlı dönemde yerel (kanal) akım ve kurak dönemde ise yaygın (kırık-çatlak sitemleri) akımın baskın olduğuna işaret etmektedir. Bu durum örnekleme yapılan su noktalarının mevsimsel olarak yağışlara duyarlı olduğunu göstermektedir.

Trityum izotopu, sürekli bozunmaya uğradığı için, bir bölgede yeraltısuyunu besleyen yağışın trityum içeriğinin bilinmesi durumunda, yeraltısuyunun ağırlıklı ortalama yaşı belirlenebilir ve/veya farklı yeraltısularının karışımı hakkında öngörülerde bulunulabilmektedir (Tezcan, 1993).

Wassmuth ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışma da 2008-2018 yılları arasında GNIP (Global Network of Isotope in Precipitation) olarak bilinen istasyonlarda yapılan ölçümler kullanılarak, jeostatistiksel teknikler ile oluşturulmuş bir tahmin modelinden elde edilmiş yağışlardaki trityum içeriklerinin dağılımını gösteren bir harita ortaya konmuştur. Bu haritaya göre tez alanına düşen yağışların trityum içerikleri 6-8 TU olarak belirlenmiştir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Yağışların trityum içeriklerine göre küresel dağılımı (Wassmuth ve ark., 2022).

Beslenme alanına düşen yağış yeraltusuyunu beslediğine göre; yarılanma ömrü ve mevcut izotop miktarı kullanılarak, örneklerinin yaşını bulmak için Jurgens ve ark., (2012) tarafından Eşit. 5.3 kullanılmıştır.

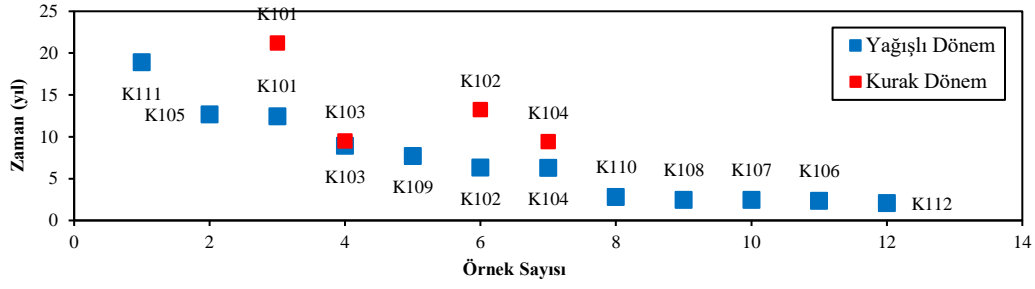
$$N_s(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5.3)$$

Bu formülde, $C_s(t)$; analiz yapıldığı zamandaki trityum konsantrasyonu (TU), C_0 ; yağışa ait trityum konsantrasyonu (TU), λ ; trityum bozunma sabiti (t^{-1}), t ; beslenme ile analiz arasındaki zaman periyodunu (t) ifade etmektedir. Fiziksel yarı ömür ile bozunma sabiti arasında " $t_{1/2} = 0.693 / \lambda$ " eşitliği kullanılmaktadır.

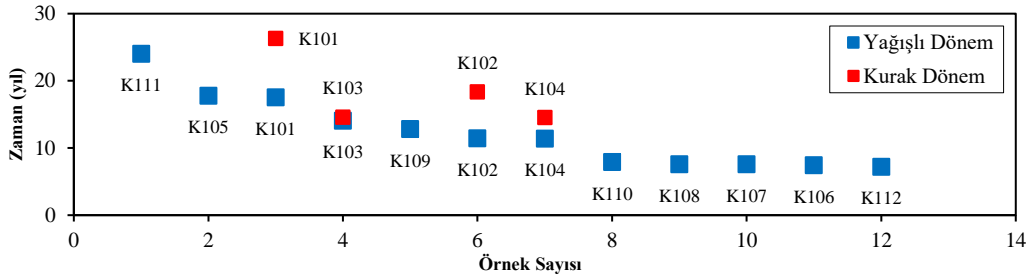
Değerlendirmelere göre, kurak dönemde K101 örneği, en düşük trityum seviyesine sahip olduğu için nispeten en yaşlı su olup, akiferde kalış süresi yaklaşık 21.2-26.3 yıl arasında değişmektedir. K103 ve K104 örnekleri K101'e göre daha yüksek trityum seviyelerine sahip olduğundan görece daha genç sular olup görece yaşları, 9.4-14.5 arasında değişim göstermektedir. Yağışlı dönemde ise K111 örneği görece en yaşlı su (18.9-24 yıl) iken, K112 (2-7.2 yıl) en genç sudur (Çizelge 5.11). Yağışların trityum (6-8 TU) içeriklerine göre, örneklerin yaşları grafikler üzerinde de değerlendirilmiş olup, yağış 8 TU içerdiği takdirde, örneklerin görece yaşları 5 yıl artmaktadır (Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22).

Çizelge 5.11. Örneklerin görece yaşları.

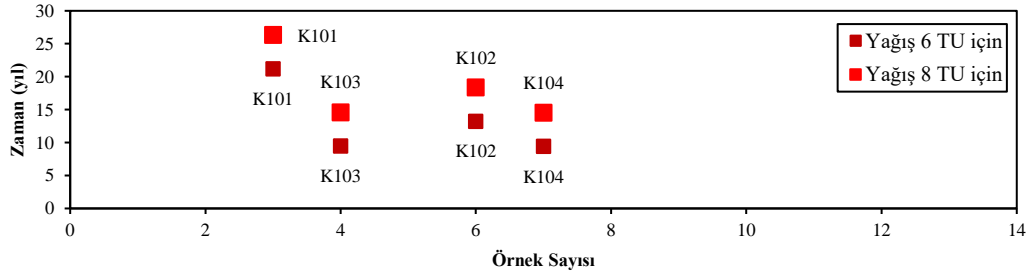
Kod	Kod	Yaş (6 TU Başlangıç)	Yaş (8 TU Başlangıç)
		(yıl)	
Kurak Dönem	K101	~21.2	~26.3
	K102	~13.2	~18.3
	K103	~9.5	~14.5
	K104	~9.4	~14.5
Yağışlı Dönem	K101	~12.4	~17.5
	K102	~6.3	~11.4
	K103	~8.9	~14.0
	K104	~6.3	~11.4
	K105	~12.7	~17.8
	K106	~2.3	~7.4
	K107	~2.4	~7.5
	K108	~2.5	~7.5
	K109	~7.7	~12.8
	K110	~2.8	~7.9
	K111	~18.9	~24.0
	K112	~2.0	~7.2



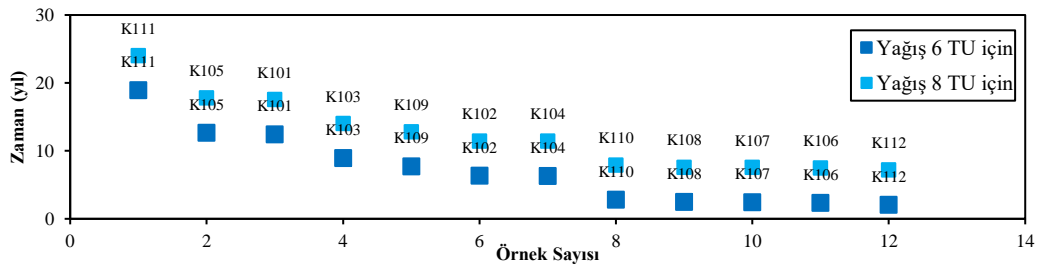
Şekil 5.19. 6 TU için kurak dönem ve yağışlı dönem için örnek yaşları.



Şekil 5.20. 8 TU için kurak dönem ve yağışlı dönem için örnek yaşları.



Şekil 5.21. Kurak dönem yağış içeriği 6 TU ve 8 TU için örnek yaşları.



Şekil 5.22. Yağışlı dönem yağış içeriği 6 TU ve 8 TU için örnek yaşları.

6. KARASU KARST KAYNAĞI AKİFERİNİN HİDRODİNAMİĞİ

Karst, çözünebilen kayaçların (kireçtaşı, dolomit, jips, halit vb.) çözünmesiyle oluşan, kendine özgü morfolojik ve hidrolojik özellikler sergileyen yer şekilleridir. Karstik alanlarda, kaynak, mağara, dolin, obruk oluşumları gözlenebilmektedir. Karstik akiferler doğal (mineral birikimi, erozyon vb.) ve insan kaynaklı (tarımsal kimyasallar, endüstriyel atıklar, yerleşim alanlarından sızan kirleticiler vb.) kirleticilere karşı oldukça duyarlıdırlar. Bulundurdukları karstik yapılar nedeniyle kirleticilerin hızla yayılmasına neden olabilmektedirler. Karstik akiferlerin gelişimi, dinamik bir süreç olup, zaman ve konuma göre değişim göstermektedir (Milanović, 1981; USGS,2021).

Karst kaynakları, yeraltısuyunun yüzeyle bulunduğu önemli noktalardır ve bu kaynaklar, suyun yeraltında izlediği karmaşık yolların, bölgedeki jeolojik, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullarının bir yansımasıdır. Bu bölümde, Karasu Karst Kaynağının boşalım miktarları incelenerek kaynağa ait hidrodinamik özellikler değerlendirilmiştir.

6.1. Kaynak Sınıflandırması

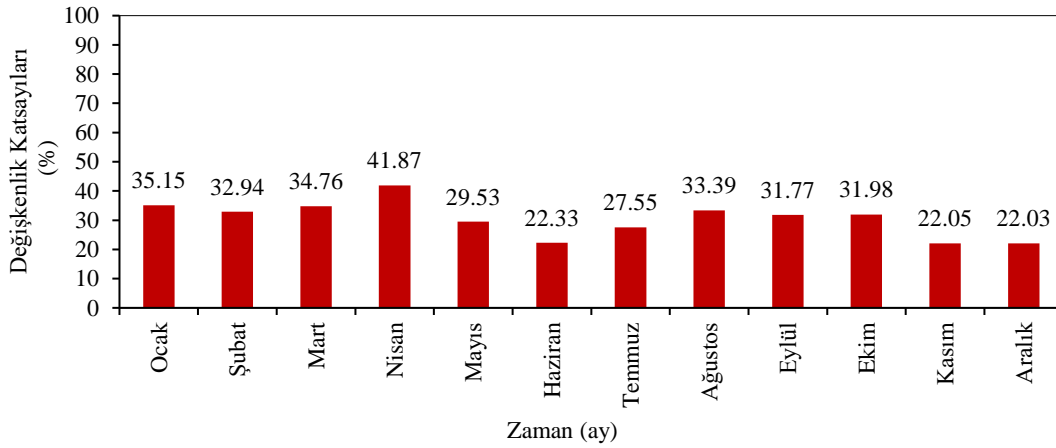
Karst kaynakları, kaynağın debisi ve akış sürekliliği (sürekli, mevsimsel ya da aralıklı), kaynağın morfolojisi, çıkış şekli, kaynağın beslenme şekli (allojenik, otojenik) ve hidrolik özelliklerine (doğrudan ya da dolaylı akış) göre sınıflandırılabilir.

Karasu Karst Kaynağı, Geyiktepe Formasyonundan boşalan, yıl boyunca sürekli akan karstik bir kaynaktır. Karasu Karst Kaynağına ait uzun yıllar aylık debi değerlerine göre en yüksek debi (Q_{max}) 3.669 m³/s ve en düşük debi (Q_{min}) 0.347 m³/s arasında olup, aylık ortalama debi (Q_{ort}) 1.842 m³/s olarak hesaplanmıştır (

Çizelge 6.2)

Meinzer (1923) sınıflamasına göre Karasu Karst Kaynağı, 1.842 m³/s ortalama debisiyle 2. derece (0.283–2.83 m³/s) büyüklükte bir kaynak sınıfına girmektedir (Çizelge 6.1).

Kaynak değişkenlik katsayısı (CV) ise, kaynak debisinin standart sapması (STD) ile aritmetik ortalaması arasındaki oranın yüzde ifadesidir. Sınıflandırmalarda, Karasu Karst Kaynağının uzun yıllar ortalama aylık debi değerleri kullanılmıştır. Değişkenlik katsayısının %10'dan küçük olduğu durumlar genellikle düşük değişkenlik (kararlı), %10–25 arasında değişken, %25'ten büyük ise yüksek değişkenlik söz konusudur (EPA, 1989). Karasu Karst Kaynağına ait aylık değişkenlik katsayıları 0.220 – 0.418 arasında değişmekte olup, oranlar ise %22.03 ile %41.87 arasında değişmektedir. Kaynak değişkenlik katsayısı (CV), haziran, kasım ve aralık ayları için “değişken” olarak sınıflandırılırken, diğer aylarda “yüksek değişkenlik” sınıfına girdiği görülmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Karasu Karst Kaynağına ait debilerin aylık değişkenlik katsayıları.

Çizelge 6.1. Boşalım miktarına göre kaynak sınıflaması (Meinzer, 1923).

Büyükük	Ortalama Debi
1. Derece	$\geq 2.83 \text{ m}^3/\text{s}$
2. Derece	0.283 – 2.83 $\text{ m}^3/\text{s}$
3. Derece	28.3 – 283 l/s
4. Derece	6.31-28.3 l/s
5. Derece	0.631 – 63.1 ml/s
6. Derece	63.1 – 631 ml/s
7. Derece	7.9 – 63.1 ml/s
8. Derece	<7.9 ml/s

Çizelge 6.2. Karasu Karst Kaynağı aylık ortalama debi değerleri.

YILLAR / Debi (m ³ /s)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1978	-	-	3.62	3.108	3.453	2.735	2.116	2.461	1.836	1.824	1.719	1.893
1979	2.295	2.904	2.58	2.452	2.235	2.131	2.178	2.131	1.822	1.61	1.529	1.553
1980	1.757	2.449	2.488	3.375	3.065	2.701	2.342	1.994	1.914	1.816	1.666	1.75
1981	2.194	2.523	3.669	3.666	-	-	-	-	-	1.733	1.665	2.036
1982	-	-	-	2.663	-	-	2.7	-	-	1.871	-	-
1983	-	-	-	1.815	-	-	-	-	-	1.697	-	-
1984	-	-	-	2.907	-	-	-	-	-	1.899	-	-
1985	-	-	-	2.447	-	-	-	-	-	1.641	-	-
1986	-	-	-	2.633	-	-	-	-	-	1.279	-	-
1987	-	-	-	1.729	-	-	-	-	-	2.011	-	-
1988	-	-	-	-	1.974	-	-	-	1.913	-	-	-
1989	-	-	-	1.898	-	-	-	-	1.167	-	-	-
1990	-	-	-	-	2.317	-	-	-	1.473	-	-	-
1991	-	-	-	1.129	-	-	-	1.742	1.124	-	-	-
1992	-	-	-	-	-	2.384	-	1.8	1.48	1.387	-	-
1993	-	-	-	-	2.356	-	-	-	-	1.148	-	-
1994	-	-	-	1.696	-	-	-	-	1.105	-	-	-
1995	-	-	-	2.596	-	-	-	-	1.431	-	-	-
1996	-	-	-	-	2.091	-	-	-	1.433	-	-	-
1997	-	-	-	-	-	2.24	-	-	1.537	-	-	-
1998	-	-	-	2.133	-	-	-	-	1.596	-	-	-
1999	-	-	-	1.94	1.887	-	-	-	-	1.081	-	-
2000	-	-	-	2.448	-	-	-	-	1.401	-	-	-
2001	0.981	-	0.8735	0.8	1.003	1.29	1.088	0.932	0.779	0.841	0.994	1.035
2002	2.162	2.187	2.871	1.666	2.619	2.46	2.555	2.074	1.19	1.924	1.376	1.84
2003	1.211	1.467	1.535	1.643	2.1	2.167	1.93	1.478	1.2	1.455	1.397	1.321
2004	1.23	1.7	2.09	2.35	2.203	1.458	1.291	-	1.117	1.041	0.8765	-
2005	0.892	1.029	2.677	2.916	2.029	1.691	1.441	1.234	1.203	1.142	1.189	1.279
2006	1.329	1.455	2.234	3.183	2.733	2.426	1.879	1.614	1.34	-	-	-
2007	-	-	-	0.859	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	1.507	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.96	-	-
2010	-	-	-	-	1.815	-	-	0.614	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	2.059	-	-	-	0.946	0.789	-	-
2012	-	-	-	2.58	-	-	-	-	0.789	-	-	-
2013	-	-	-	-	0.812	-	-	-	0.392	-	-	-
2014	-	-	-	0.347	-	-	-	-	0.647	-	-	-
2015	-	-	-	3.076	-	-	-	-	0.786	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	2.014	-	-	-
2017	-	-	-	1.52	-	-	-	-	1.521	-	-	-
2018	-	-	-	0.912	-	-	-	-	-	0.768	-	-
2019	-	-	-	0.802	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	-	-	-	1.032	-	-	-	-	-	0.483	-	-
2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ortalama												
Aylık Debi (m³/s)	1.561	1.964	2.464	2.057	2.162	2.153	1.952	1.643	1.302	1.427	1.379	1.588
Standart Sapma	0.549	0.647	0.856	0.861	0.638	0.481	0.538	0.549	0.414	0.456	0.304	0.350
Değişkenlik Katsayısı(%)	35.15	32.94	34.76	41.87	29.53	22.33	27.55	33.39	31.77	31.98	22.05	22.03
En Yüksek Debi (m³/s)	2.295	2.904	3.669	3.666	3.453	2.735	2.7	2.461	2.014	2.011	1.719	2.036
En Düşük Debi (m³/s)	0.892	1.029	0.8735	0.347	0.812	1.29	1.088	0.614	0.392	0.483	0.8765	1.035

6.2. Hidrograf ve Kaynak Çekilme Analizi

Akım hidrografı, debinin zamana göre değişimini göstermektedir. Bu değişim, beslenme miktarının ve akım yollarının kaynak boşalımındaki nihai sonucudur. Karstik akiferler yağışlara karşı çok hassas ve hızlı tepki veren hidrojeolojik sistemlerdir. Özellikle yoğun yağışlardan sonraki, birkaç saat içinde dahi kaynak debisinde ani ve büyük artışlar meydana gelebilmektedir. Akiferin depolama katsayısı, iletimlilik katsayısı, geometrisi, kaynağın beslenme rejimi gibi karakteristik özelliklerini belirlenmek için kaynak çekilme analizlerinden yararlanılmaktadır (Kresic ve Bonacci, 2010; Aydın, 2005).

Karasu Karst Kaynağının yıllar bazında çizilen akım hidrografları Şekil 6.2’de verilmekte olup 1978-1980 ve 2001-2006 yılları arası için oluşturulan akım hidrografları ise sırası ile Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te verilmektedir. Söz konusu hidrograflara göre, bu yıllar içerisinde genel olarak kaynak debisinin Nisan ve Mayıs aylarında en yüksek ve Kasım ayında ise en düşük değere sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kaynak çekilme analizi, özellikle karstik alanlarda, yeraltısuyu sisteminin dinamiklerini anlamak için kullanılan bir araçtır. Bu analiz, bir kaynağın debisinin zaman içindeki değişimini inceleyerek, bu değişimlerin altında yatan hidrolojik süreçlerin anlaşılmasını sağlamaktadır. Çekilme döneminde çekilmenin birden fazla eğimli doğrularla gözlenmesi karst hidrolojik zonları hakkında bilgi verir (Ford ve Williams, 2007). Tez kapsamında, Karasu Karst Kaynağının 1978-1980 ve 2001-2006 yılları arasındaki debi ölçümleri kullanılarak kaynak çekilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Karasu Karst Kaynağına ait yıllara göre çekilme dönemleri Çizelge 6.3’te verilmiştir. Analizlerde, Maillet (1905) eşitliği (Eş. 6.1) kullanılmıştır.

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (6.1)$$

Burada, Q_0 ; kaynağın azalmaya başladığı andaki en yüksek debisini (m^3/s), Q_t ; kaynağın t anındaki debisini (m^3/s), α ; kaynak çekilme katsayısını ($gün^{-1}$) ve t ; çekilme süresini (gün) ifade etmektedir.

$$V_S = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (6.2)$$

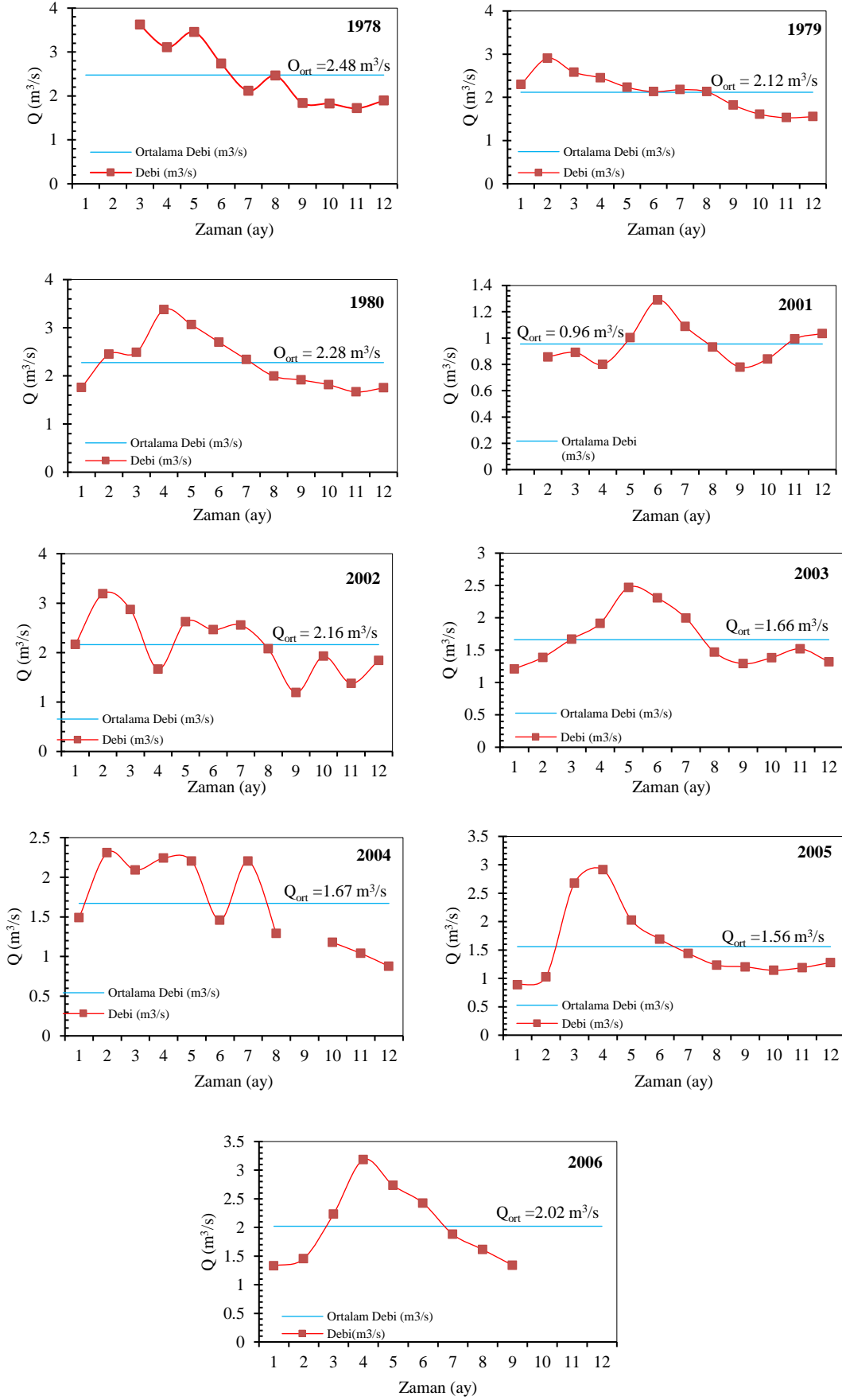
$$V_r = \frac{Q_t}{\alpha} \quad (6.3)$$

$$V_d = V_S - S_r \quad (6.4)$$

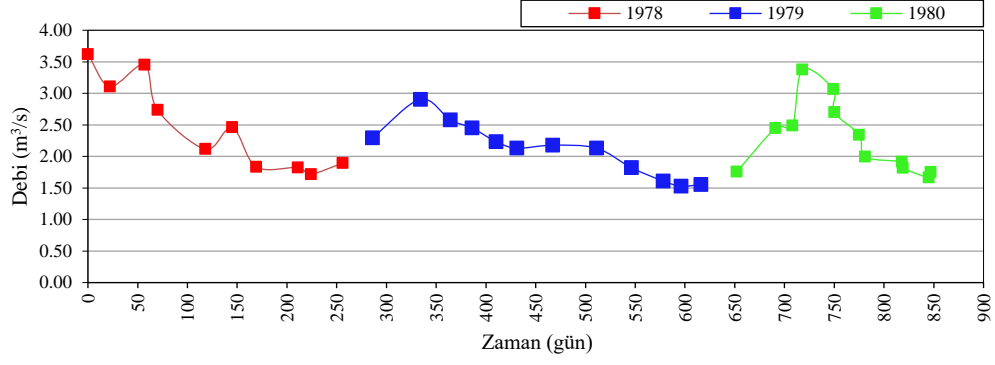
Bu eşitlikler ile, akiferin toplam depolama kapasitesi (V_s), çekilme dönemin sonunda akiferde kalan su hacmi (V_r) ve t süresinde boşalan su hacmi (V_d) hesaplanmıştır. Birimleri L^3 'tür.

Çizelge 6.3. Karasu Karst Kaynağına ait yıllara göre çekilme dönemleri.

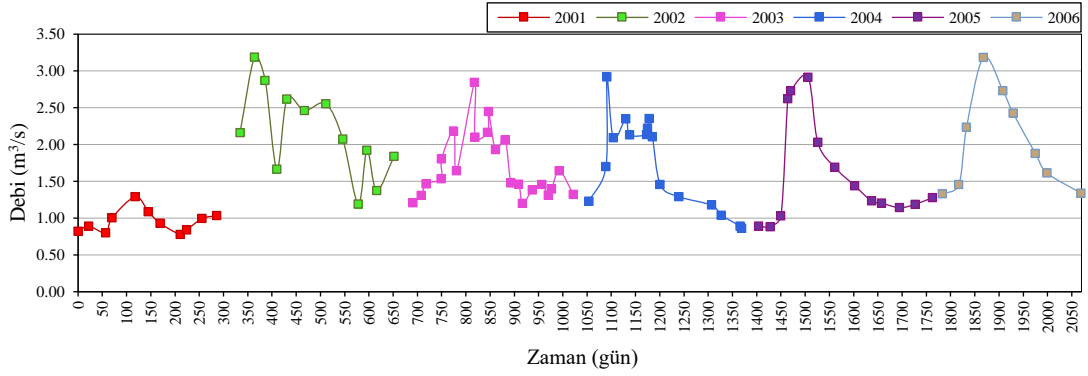
Yıl	Çekilme Dönemleri	Yıl	Çekilme Dönemleri
1978	Mart-Kasım	2003	Mayıs-Aralık
1979	Şubat-Kasım	2004	Şubat-Kasım
1980	Nisan-Kasım	2005	Nisan-Ekim
2001	Haziran-Eylül	2006	Nisan-Ekim
2002	Şubat-Aralık		



Şekil 6.2. Yıllara göre debi-zaman grafikleri.

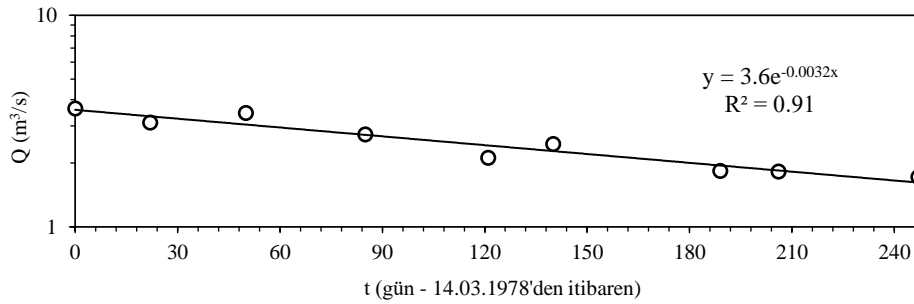


Şekil 6.3. 1978-1980 yılları arası Karasu Karst Kaynağı akım hidrografı.



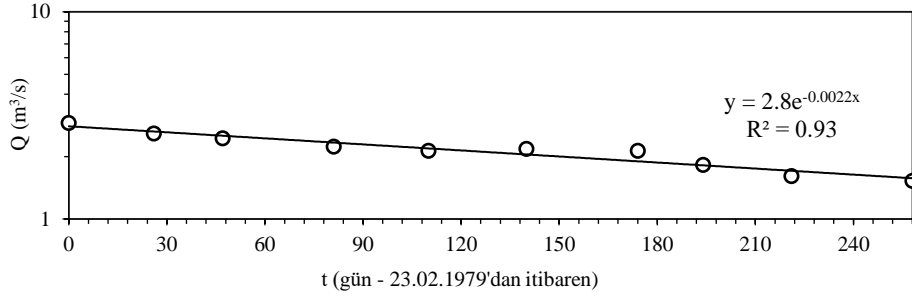
Şekil 6.4. 2001-2006 yılları arası Karasu Karst Kaynağı akım hidrografı.

1978 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalımın tek bir evrede gerçekleştiği belirlenmiş olup, çekilme katsayısı $3.2 \times 10^{-3} \text{ gün}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.5).



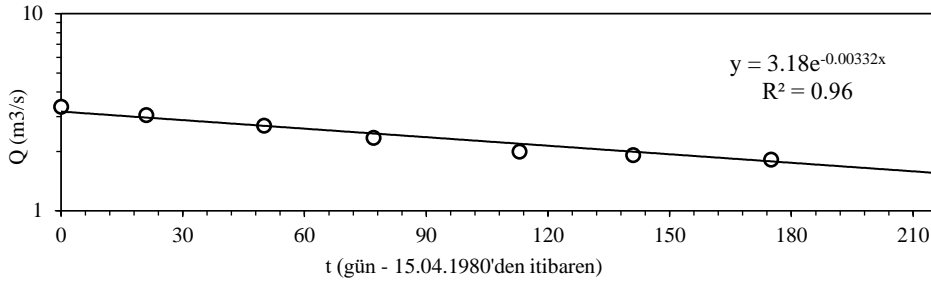
Şekil 6.5. 1978 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

1979 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalım 2.2×10^{-3} gün⁻¹ çekilme katsayısı ile tek bir evrede gerçekleşmiştir (Şekil 6.6).



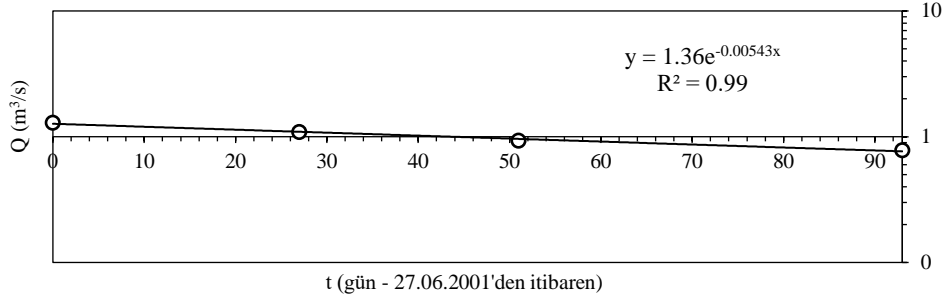
Şekil 6.6. 1979 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

1980 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalım tek bir evrede gerçekleşmiş, çekilme katsayısı 3.3×10^{-3} gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.7).



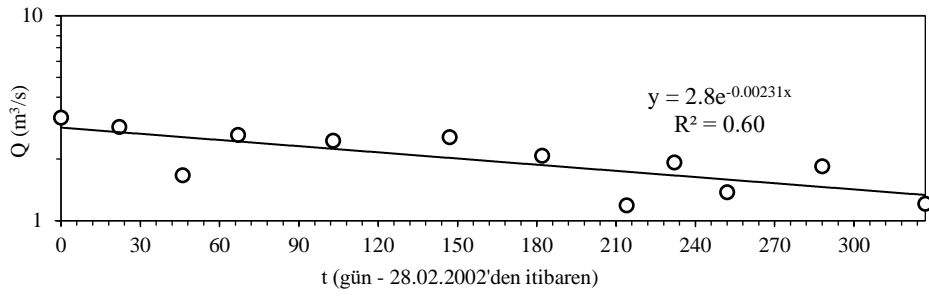
Şekil 6.7. 1980 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

2001 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalımın tek bir evrede gerçekleştiği belirlenmiş olup, çekilme katsayısı 5.4×10^{-3} gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.8).



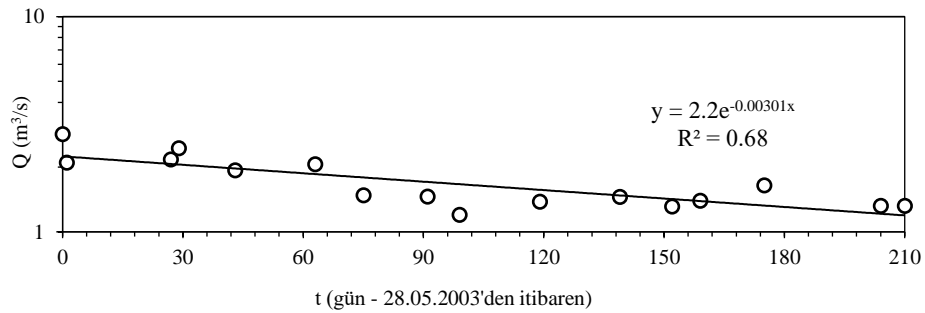
Şekil 6.8. 2001 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

2002 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğine göre, boşalım tek bir çekilme dönemi ile gerçekleşmiş, çekilme katsayısı 2.3×10^{-3} gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.9).



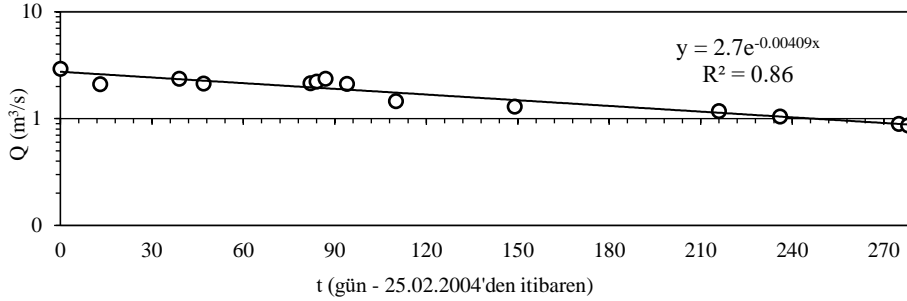
Şekil 6.9. 2002 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

2003 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalımın 3.0×10^{-3} gün⁻¹ çekilme katsayısı ile tek bir evrede gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 6.10).



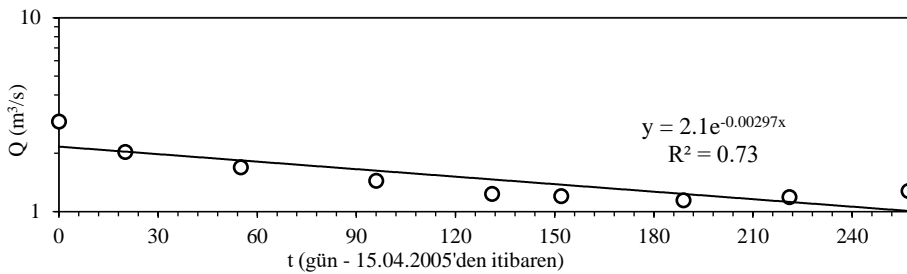
Şekil 6.10. 2003 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

2004 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalımın tek dönemde gerçekleştiği belirlenmiş olup, çekilme katsayısı 4.0×10^{-3} gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.11).



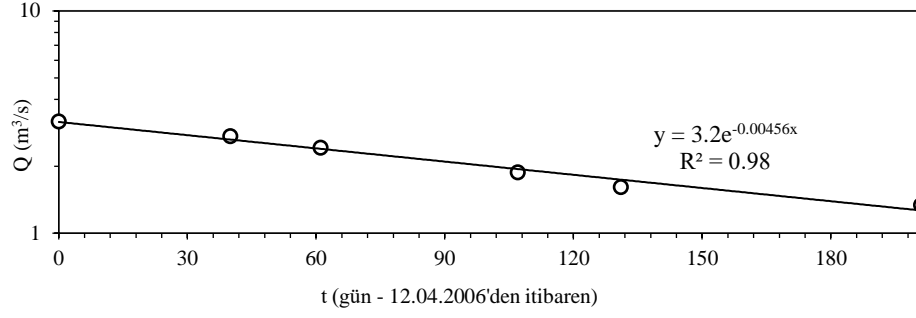
Şekil 6.11. 2004 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

2005 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalım tek evrede gerçekleşmiş olup, çekilme katsayısı 3.0×10^{-3} gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. 2005 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

2006 yılı aylık debi değerleri ile oluşturulan Karasu Karst Kaynağı kaynak çekilme grafiğinde, boşalım tek evrede gerçekleşmiş, çekilme katsayısı 4.56×10^{-3} gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. 2006 yılı Karasu Karst Kaynağına ait kaynak çekilme grafiği.

Tüm çekilme analizlerine bakıldığında, en yüksek çekilme katsayısı ($5.4 \times 10^{-3} \text{ gün}^{-1}$) 2001 yılında, en düşük çekilme katsayısı ($2.2 \times 10^{-3} \text{ gün}^{-1}$) ise 1979 yılında hesaplanmıştır. Analiz yapılan yıllara ait ortalama çekilme katsayısı değerinin ise $3.5 \times 10^{-3} \text{ gün}^{-1}$ olduğu saptanmıştır (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.4. Karasu Karst Kaynağı 1978-1980 ve 2001-2006 yılları arası debi değişkenlik yüzdeleri ve çekilme katsayı değerleri.

Yıl	Q_{ort}	Q_{max}	Q_{min}	Debi Değişkenlik Yüzdesi (%)	Kaynak Çekilme Katsayısı (α)
	(m^3/s)	(m^3/s)	(m^3/s)	$Q_d, (Q_{max}-Q_{min})/Q_{max}$	($gün^{-1}$)
1978	2.476	3.620	1.719	52.51	3.2×10^{-3}
1979	2.118	2.900	1.530	47.24	2.2×10^{-3}
1980	2.276	3.380	1.670	50.59	3.3×10^{-3}
2001	0.955	1.290	0.841	63.81	5.4×10^{-3}
2002	2.160	3.187	1.221	61.69	2.3×10^{-3}
2003	1.662	2.843	1.321	53.53	3.0×10^{-3}
2004	1.671	2.917	0.862	70.45	4.1×10^{-3}
2005	1.560	2.916	1.279	56.14	3.0×10^{-3}
2006	2.021	3.183	1.340	57.90	4.6×10^{-3}
Ortalama	1.880	2.920	1.310	57.10	3.5×10^{-3}

Ortalama kaynak çekilme süresi 232 gün olup, toplam hacim 93.3 milyon metreküp (V_s) olarak belirlenmiştir. Çekilme dönemi süresince boşalan su miktarı 27.6 milyon metreküp (V_d) iken, çekilme dönemi sonunda sistemde kalan su miktarı 65.62 milyon metreküp (V_r) olarak tespit edilmiştir. Boşalan suyun toplam hacme oranı %33.24, kalan suyun toplam hacme oranı ise %66.7 olarak belirlenmiştir. İki yıl arasındaki beslenme miktarı ise 24.4 milyon metreküp olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, Karasu Karst Sisteminin

çekilme ve beslenme dinamikleri ile su yönetimi stratejilerinin planlanmasında ve gelecekteki su rezervlerinin değerlendirilmesinde kullanılabilecek bilgileri sağlamaktadır (Çizelge 6.5).

Çizelge 6.5. Maillet (1905) yöntemine göre kaynak çekilme analiz sonuçları.

Parametre	1978	1979	1980	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Ortalama
Çekilme katsayısı (gün^{-1})	0.0032	0.0022	0.0033	0.0031	0.0023	0.0030	0.0041	0.0030	0.0046	0.0035
Çekilme süresi (gün)	247	258	217	93	327	210	278	257	201	232
Toplam hacim ($*10^6 \text{ m}^3$) (Vs)	96.1	108.1	82.9	200.5	106.4	64.4	58.0	63.0	60.0	93.3
Çekilme dönemi süresince boşalan su miktarı ($*10^6 \text{ m}^3$) (Vd)	44.92	55.29	38.37	1.99	32.54	20.68	14.60	15.34	25.05	27.6
Çekilme dönemi sonunda kalan su miktarı ($*10^6 \text{ m}^3$) (Vr)	51.17	52.84	44.50	198.5	73.91	43.69	43.41	47.62	34.92	65.62
Boşalan su miktarının toplam hacime oranı (%)	46.75	51.13	46.30	0.99	30.57	32.12	25.17	24.36	41.77	33.24
Kalan su miktarının toplam hacime oranı (%)	53.2	48.9	53.7	99.0	69.4	67.9	74.8	75.6	58.2	66.7
İki yıl arasındaki beslenme miktarı (10^6 m^3)		57.0	30.0		47.4	-9.5	14.3	19.5	12.3	24.4

Korkmaz (1989) tarafından, 43 farklı boşalım katsayısına sahip, 21 yıllık dinamik rezerv ve yeraltısuyu boşalımları hesaplanarak, istatistiksel metotlar ile söz konusu boşalım katsayıları dikkate alınarak akiferler 4 gruba ayrılmıştır. Çizelge 6.6'ya göre, Karasu Karst Kaynağı değişkenlik yüzdesi (Q_d) ve kaynak çekilme katsayılarına (α) göre 3. tip akifer sınıfında olup, kaynağın yıllık yağışlardan etkilendiği belirlenmiştir.

Çizelge 6.6. Boşalım katsayılarına göre akifer tipleri sınıflandırması (Korkmaz, 1989).

Akifer Tipi	Kaynak Çekilme Katsayısı ($\alpha_{\text{ort, gün}^{-1}}$)	Etkilendiği Yağış Türü	Debi Değişkenliği, Q_d (%)
1. Tip Akiferler	≤ 0.0035	Ortalama yıllık yağıştan eklenik (kümülatif) sapma, P_e	≤ 6
2. Tip Akiferler	0.00035 – 0.00175	Ortalama yıllık yağıştan eklenik sapma değerlerinin kurak ve yağışlı dönem değerleri ile ayrı ilişkili, P_e	6-27
3. Tip Akiferler	0.00175 – 0.0126	Yıllık yağış, P_y	27-92
4. Tip Akiferler	≥ 0.0126	Aylık yağış, P_a	≥ 92

Malik ve Vojtkova (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, kaynak çekilme katsayısı ve eşitliğine göre kaynağın bağlı olduğu akiferin karstlaşma derecesinin belirlenmesi ile ilgili bir sınıflama yapılmış, bu sınıflama Karasu Karst Kaynağına da uygulanmıştır. Bu sınıflamaya göre, Karasu Karst Kaynağı ortalama çekilme katsayısına (α) göre, Geyiktepe Formasyonu'na ait mermerlerin karstlaşma derecesi “2” olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.7).

Çizelge 6.7. Kaynak çekilme katsayısı ve eşitliğine göre karstlaşma derecesi sınıflandırması (Malik ve Vojtkova, 2012) (Değiştirilmiş ve sadeleştirilmiştir.)

Karstlaşma Derecesi	Yeraltısuyu Akış ve Alt Rejim Tipi	Kaynak Çekilme Eşitliği	Kaynak Çekilme Katsayısı, α	Karstlaşma Derecesinin Özellikleri
0.5	Tek laminar alt rejim, düşük α_1 değeri	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha t}$	$\alpha_1 < 0.001$	Genellikle tektonik kırık/çatlakların (fayların) ve makaslama zonunun, ayrılmış/ezilmiş malzemeler ile dolu olup, boşalımla ilişkili olarak yüksek tepki göstermesi durumu. Genel olarak derin yeraltısuyu dolaşımı gerçekleşir.
1			$\alpha_1 = 0.001 - 0.0025$	
2	Tek laminar alt rejim, yüksek α_1 değeri	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha t}$	$\alpha_1 = 0.0025 - 0.007$	Tektonik kırık/çatlakların (fayların) boşalımla ilişkili olarak yüksek iletkenlik ve düşük tepki süresi gösterdiği ayrılmış/ezilmiş malzeme ile dolu olması durumu. Bazı/belirli durumlarda derin yeraltısuyu dolaşımı gerçekleşir.
2.3			$\alpha_1 > 0.007$	

Aydın (2005) tarafından Bilecik ilinde yer alan yaklaşık 28.35 km² akifer yüzey alanına sahip Nardın Karst Sistemi için iyi gelişmiş karstik kanallar ve kırık-çatlak sistemlerine sahip olduğu ve yeraltısuyunun bu kırık-çatlak sistemleri aracılığıyla akışa geçtiği belirtilmiştir. Nardın Karst Sistemi'nin çekilme katsayısı 10⁻² civarında olup, Karasu Karst Sistemi'nden 10 kat daha yüksektir. Bu durum Karasu Karst Sistemi'nin daha az gelişmiş bir karst sistemine sahip olduğunu göstermektedir.

6.3. Karasu Karst Kaynağının Kavramsal Modeli

Hidrojeolojik kavramsal model, belirli bir yeraltısuyu sistemini bütün bileşenleri ile kurgulayıp, birbirleri ile olan ilişkilerinin ortaya konulduğu ve sistemi daha iyi anlamamız için yapılan bir değerlendirmedir.

Karasu Karst Kaynağının beslenme alanı, batıda Alaçam Graniti ile kuzeyde Alınca Formasyonu, güney-güney doğuda Tavşanlı Ofiyoliti ve Arifler Melanjı ile sınırlanmış olup, yüzey alanı 269.81 km^2 'dir.

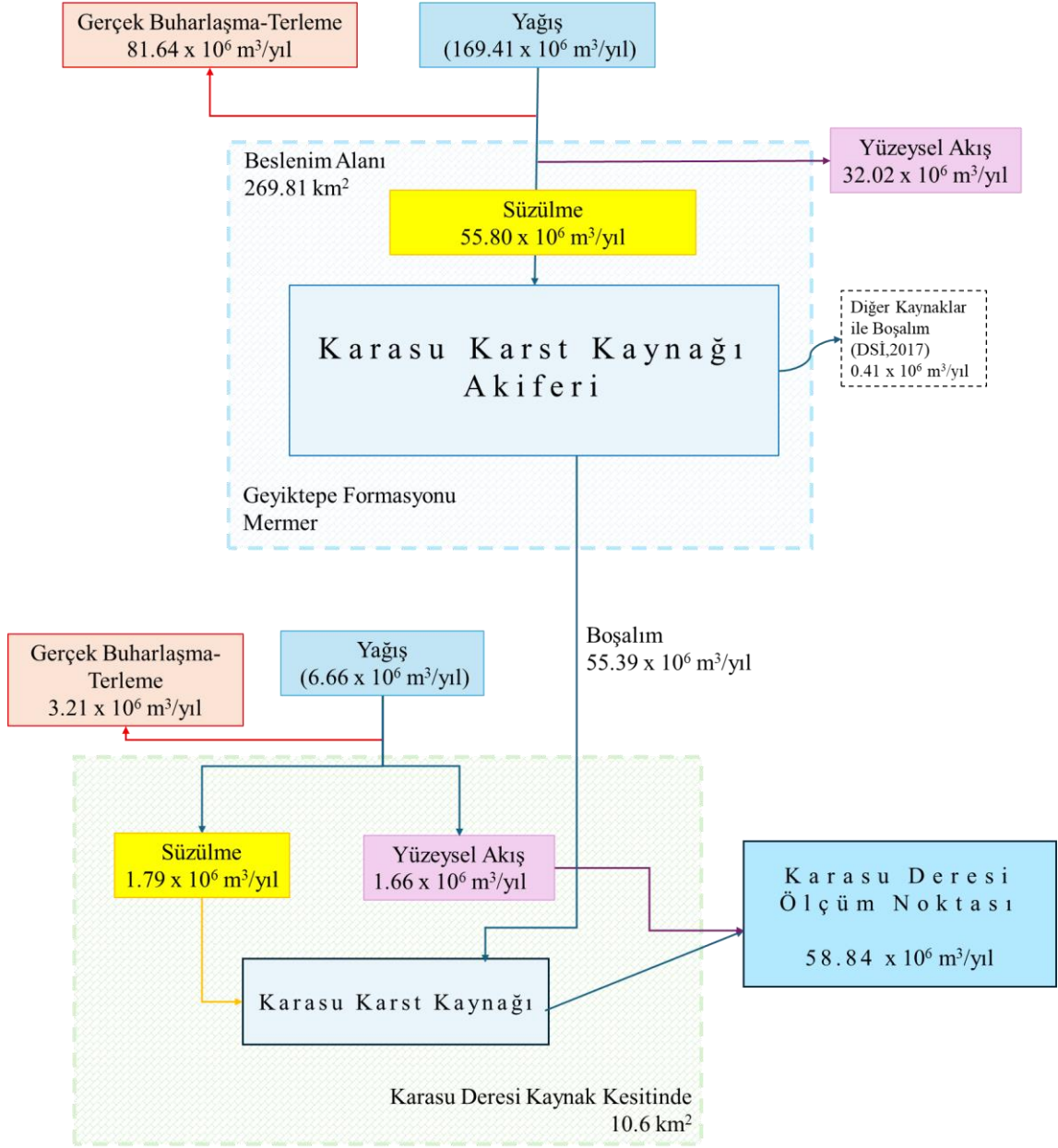
Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı olan 10.6 km^2 için yıllık yağıştan beslenim $6.66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olup, gerçek buharlaşma-terleme miktarı $3.21 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ 'dır. Ayrıca yıllık yüzeysel akış miktarı $1.66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olup, süzülme miktarı ise $1.79 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

Karasu Karst Kaynağı, beslenme alanında yılda $169.41 \times 10^6 \text{ m}^3$ yağış, $81.64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ gerçek buharlaşma-terleme ve $32.02 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ yüzeysel akış meydana gelmektedir. Beslenme alanında oluşan toplam süzülme miktarı $55.80 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ 'dır. Karasu Karst Kaynağı karstik bir kaynak olup, Geyiktepe Formasyonuna ait mermerlerden yılda $55.39 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ boşalım miktarı ve Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından gelen yüzeysel akış birlikte $58.84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ ile boşalır. Karasu Karst Kaynağı boşalımı ile Karasu Deresi oluşmaktadır.

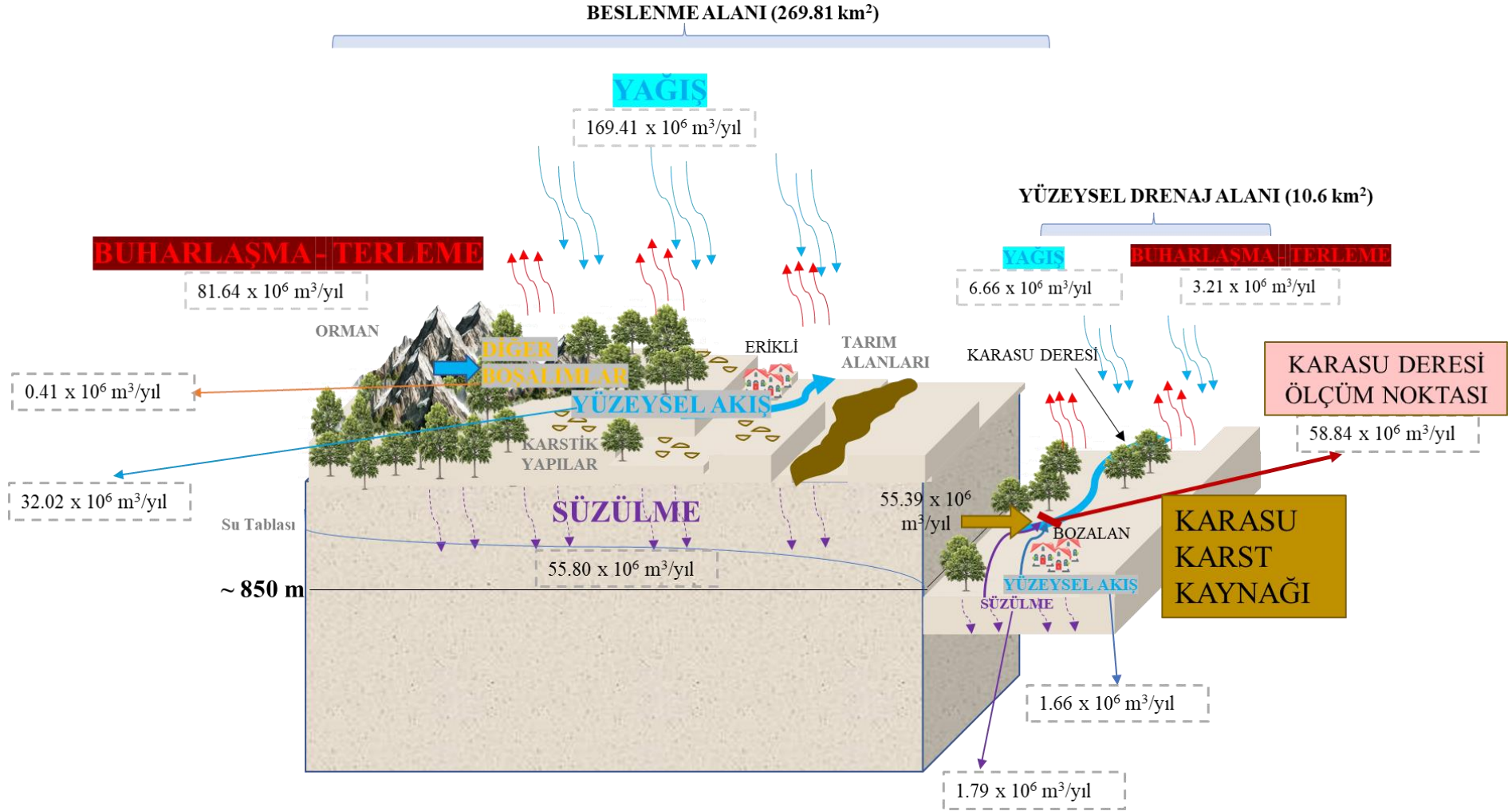
Buna ilave olarak, Karasu Karst Kaynağı için yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, ileri derece karstlaşmanın olmadığı, kaynaktan boşalan suyun, akiferin tektonizma kontrollü kırık-çatlak sisteminden boşaldığı anlaşılmıştır.

Kaynaktan boşalan suyun hidrokimyasal ve izotop analizleri değerlendirildiğinde, su içeriğinin kayaç çözünmesine bağlı olarak CaCO_3 bileşeni ile zenginleştiği, kurak dönem boşalan suların yaşlı su olabileceği, yağış döneminde ise yağışlardan hassas bir şekilde etkilenmesi sonucu kaynaktan boşalan suyun daha gençleştiği sonucuna varılmıştır. Karasu Karst Sisteminde, yağışlı dönemde yerel (kanal) akım ve kurak dönemde ise yaygın (kırık-çatlak sistemleri) akımın baskın olduğu sular drene olmaktadır ve kaynağın mevsimsel olarak beslenmeye (yağış, vb.) duyarlı olduğunu saptanmıştır.

Karasu Karst Kaynağına ait oluşturulan kavramsal modelin şematik gösterimi Şekil 6.14'te, blok diyagramı ise Şekil 6.15'te sunulmuştur.



Şekil 6.14. Karasu Karst Kaynağı kavramsal modeli şematik gösterimi.



Şekil 6.15. Karasu Karst Kaynağı kavramsal modeli blok diyagramı.

7. KARASU KARST KAYNAĞI BESLENME ALANI DUYARLILIK ANALİZİ

Karasu Karst Kaynağı, Bozüyük ve çevre ilçeler için içme suyu olarak kullanılan bir su kaynağı olduğundan bölge için stratejik bir önem taşımaktadır. Karasu Karst Kaynağı kirliliğe açık mermer sisteminden beslendiğinden, kaynağın kalite standartlarının değişmemesi için kirlilik duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalarla, geleceğe dönük tarımsal kirlilik ve insan kaynaklı kirlilik kaynağı olabilecek diğer faktörlerin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında Karasu Karst Kaynağının bağlı olduğu akifer sisteminin EPIK metodu ile yeraltısuyu duyarlılık haritası oluşturulmuştur.

Doerfliger ve ark. (1999) tarafından İsviçre’de geliştirilen EPIK metodu, karstik akiferlerdeki yeraltısuyunun, kirliliğe duyarlılığının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu metotta, epikarst (E), koruyucu örtü (P), süzülme koşulları (I) ve karst kanal gelişimi (K) değerlendirmeye alınmıştır. EPIK, çok parametrelili bir ağırlıklandırma ve değerlendirme yöntemidir. Her bir parametreye göre orantısal önem aralığı yansıtan bir çarpan atanmaktadır (Çizelge 7.1). Her parametre için verilen puanlar, parametreye ilişkin çarpan ile çarpılıp, daha sonra toplanarak duyarlılık indeksi elde edilmektedir. Duyarlılık indeksi Eşit. 7.1 ile hesaplanmaktadır. Duyarlılık indeksi ne kadar yüksek ise, alanın duyarlılığı o kadar azdır. Son olarak, duyarlılık indeksi farklı sınıflara ayrılarak, nihai değerler (S1, S2, S3) atanmaktadır (Doerfliger ve ark., 1999).

$$F_p = \alpha \times E_i + \beta \times P_j + \gamma \times I_k + \delta \times K_l \quad (7.1)$$

Eşitlikte verilen; F_p : EPIK duyarlılık indeksi, α : epikarst parametresinin ağırlık katsayısı, E : epikarst parametresinin derecelendirme katsayısı, β : koruyucu örtü parametresinin ağırlık katsayısı, P : koruyucu örtü derecelendirme katsayısı, γ : süzülme koşulları ağırlık katsayısı, I : süzülme koşulları derecelendirme katsayısı, δ : karst kanal gelişimi ağırlık katsayısı ve K : karst kanal gelişimi derecelendirme katsayısı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 7.1. EPIK parametrelerine ait standart ağırlık katsayıları (Doerfliger ve ark., 1999).

Epikarst (E)	Koruyucu Örtü (P)	Süzülme Koşulları (I)	Karstik Kanal Gelişimi (K)
α	β	γ	δ
3	1	3	2

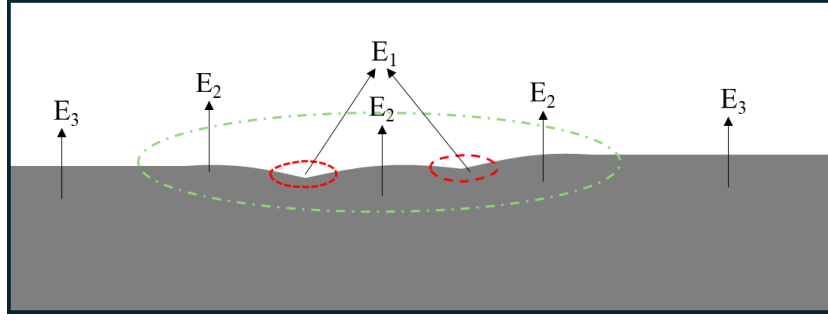
7.1. Epikarst Durumu (E)

Epikarst, karstik bölgelerde herhangi bir toprak tabakasının altında bulunan bir zondur. Toprak varlığı yok ise, epikarst morfolojik özellikleri, karstik bir oluşum olan “karen” yapılarına benzemektedir.

Çalışma alanının morfolojik ve jeolojik yapısı dikkate alınarak epikarst durumu belirlenmiştir. İ23 a2-a3 ve İ23 b1-b2-b3-b4 topoğrafik haritalarındaki dolin yapıları, arazi çalışmaları esnasında gözlemlenen uvalalar ve ayrıca Google Earth Pro programı aracılığıyla belirlenen dolin, uvala yapıları ve karst vadileri gibi karstik yapılar sayısallaştırılmıştır. Bu sayısallaştırma işleminde karstik yapılara E₁, bu karstik yapılar haricinde; bu alanların arasında kalan ara bölgelere E₂ ve karstik yapıların bulunmadığı alanlara ise E₃ tanımlaması yapılmıştır (Şekil 7.1 ve Çizelge 7.2). E₁ sınıflandırılması 1 puan, E₂ sınıflandırması 2 puan ve E₃ sınıflandırılması 4 puana karşılık gelmektedir. Bu puanlar, E için belirlenmiş standart ağırlık katsayısı ile çarpılmıştır (Bkz. Çizelge 7.1).

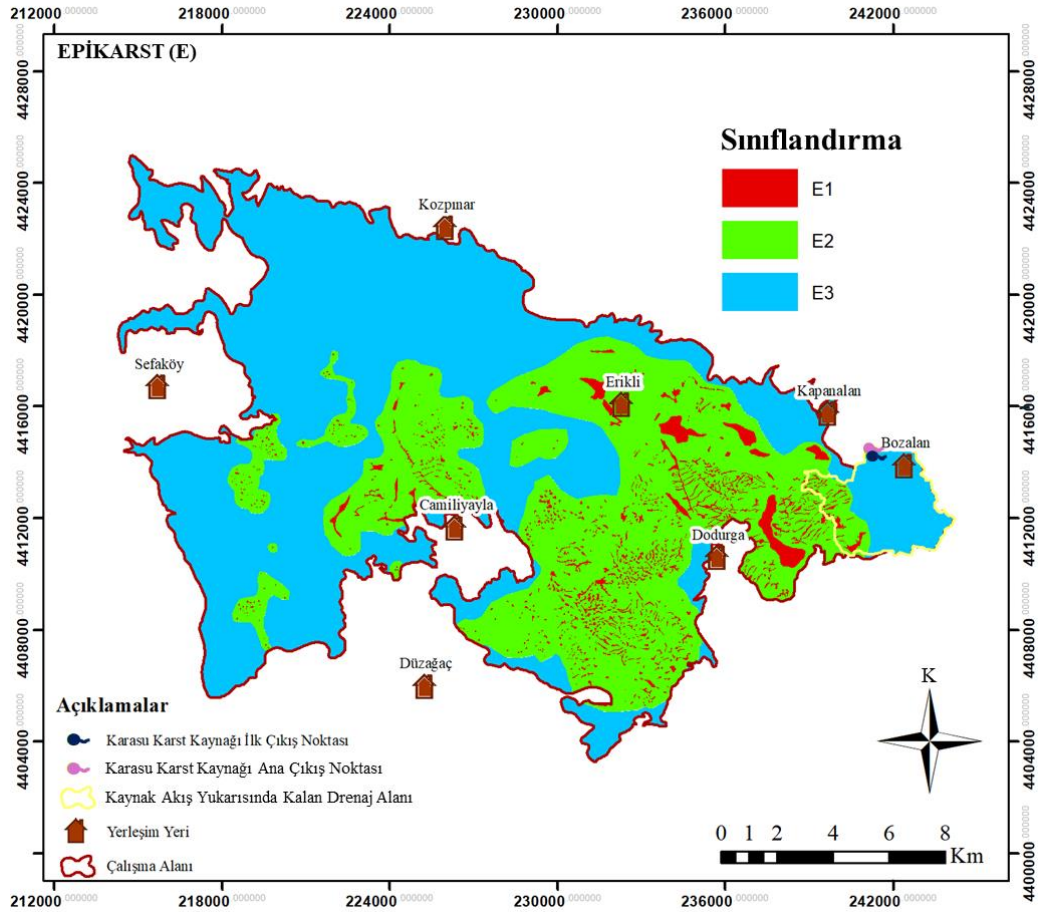
Çizelge 7.2. Epikarst parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).

Epikarst	Açıklamalar	Derecelendirme
Çok iyi gelişmiş	E ₁ Mağaralar, obruklar veya dolinler, düdenler lapy, karen alanları, yüksek çatlaklı yüzeyler	1
Orta derece gelişmiş	E ₂ Sıralı obruk oluşumlarındaki ara bölgeler, kuru vadiler, orta derece çatlaklı yüzeyler	2
Az derece ya da bulunmayan	E ₃ Karstik yapıların bulunmadığı, düşük çatlak yoğunluğunun gözlemlendiği alanlar	4



Şekil 7.1. Çalışma alanı için epikarst sınıflandırma gösterimi.

Çalışma alanına ait epikarst (E) parametresi için puanlandırma CBS tabanlı programlar kullanılarak yapılmıştır. Çalışma alanına ait epikarst sınıflandırma haritası Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. Çalışma alanına ait epikarst (E) parametresi sınıflandırması.

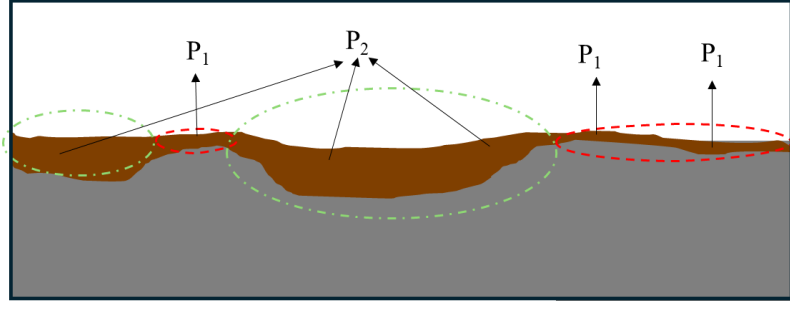
7.2. Koruyucu Örtü (P)

Koruyucu örtü (P) parametresi, akifer üzerinde var olan toprak kalınlıklarına göre değerlendirilmektedir. Ayrıca, akiferin çevresel risklere karşı ne kadar iyi korunduğunu anlamada yardımcı bir parametredir. Görece yüksek bir P parametresi, akiferin daha iyi korunduğunu göstermektedir.

Çalışma alanına ait toprak haritası, Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilmiş olup, koruyucu örtü belirlenmesinde bu haritada yer alan toprak derinliği verileri kullanılmıştır. Bu veriler, Doerfliger ve ark. (1999) tarafından geliştirilen sınıflama sistemine göre değerlendirilmiş (Şekil 7.3 ve Çizelge 7.3) sınıflama, P1 ve P2 olmak üzere iki ayrı kategoriye ayrılmıştır. P1 sınıflandırması 1 puan ve P2 sınıflandırması ise 2 puana karşılık gelmektedir. Bu puanlar, P için belirlenmiş standart ağırlık katsayısı ile çarpılmıştır.

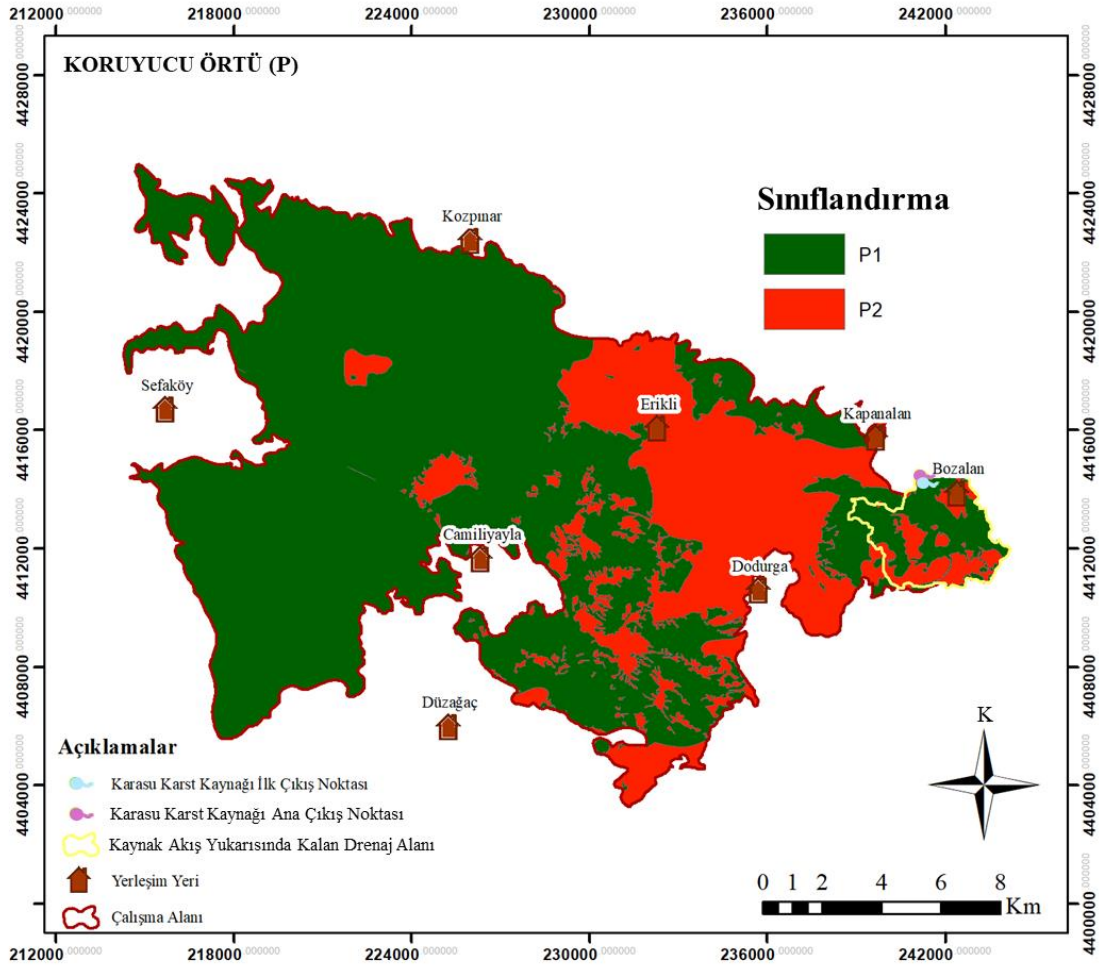
Çizelge 7.3. Koruyucu örtü parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).

Koruyucu Örtü (P)	Açıklamalar	Derecelendirme	
	A. Karbonatlı kayaların üzerinde bulunan toprak veya yüksek iletkenliği olan tabakalar (pekişmemiş malzeme) üzerinde bulunan toprak	B. Düşük iletkenliği olan jeolojik birimler üzerinde bulunan toprak	
Mevcut Değil	P ₁ 0 - 20 cm toprak kalınlığı	1 m'den daha ince tabakalar üzerinde 0 - 20 cm toprak kalınlığı	1
↓	P ₂ 20 - 100 cm toprak kalınlığı	1 m'den daha ince tabakalar üzerinde 20 - 100 cm toprak kalınlığı	2
	P ₃ 100 - 200 cm toprak kalınlığı	<100 cm toprak kalınlığı ya da 100 cm'den büyük toprak kalınlığı ve <100 cm toprak kalınlığı ile birlikte düşük iletkenlik	3
	Mevcut	P ₄ > 200 cm toprak kalınlığı	>8m çok düşük iletkenlikli jeolojik birim veya 1 m toprağı kalınlığı ve 6 m'den daha kalın çok düşük iletkenlikli jeolojik birim



Şekil 7.3. Çalışma alanı için koruyucu örtü sınıflandırma gösterimi.

Çalışma alanına ait koruyucu örtü (P) parametresi için puanlandırma CBS tabanlı programlar kullanılarak yapılmıştır. Çalışma alanına ait koruyucu örtü sınıflandırma haritası Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4. Çalışma alanına ait koruyucu örtü (P) parametresi sınıflandırması.

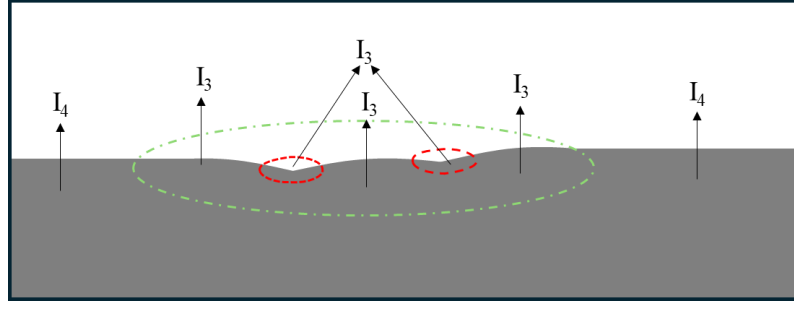
7.3. Süzülme Durumu (I)

Süzülme durumu, suyun yüzeyden itibaren akifere doğru nasıl ilerlediğini değerlendiren bir parametredir. Bu parametre, yağış rejimi, toprak örtüsü, yüzey şekilleri ve insan faaliyetleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Görece yüksek süzülme, akiferin kirlilik riskini artırabilmektedir.

Çalışma alanında haritalanan dolin, uvala yapıları ve karst vadileri, Karasu Karst Kaynağının beslenme alanında suyun yeraltına süzülme süreçlerinde etkin bir rol oynamaktadır. Süzülme durumu (I) parametresinde, Doerfliger ve ark., (1999) tarafından hazırlanan sınıflandırma (Çizelge 7.4) dikkate alınarak, dolin, uvala yapıları, karst vadileri ve bu karstik yapıların ara bölgeleri I3 sınıfına, bu yapıların dışında kalan karstik yapı bulundurmayan alanlar ise I4 sınıfına dahil edilmiştir. I3 sınıflandırması 3 puanla, I4 sınıflandırması ise 4 puanla ifade edilmektedir (Şekil 7.5).

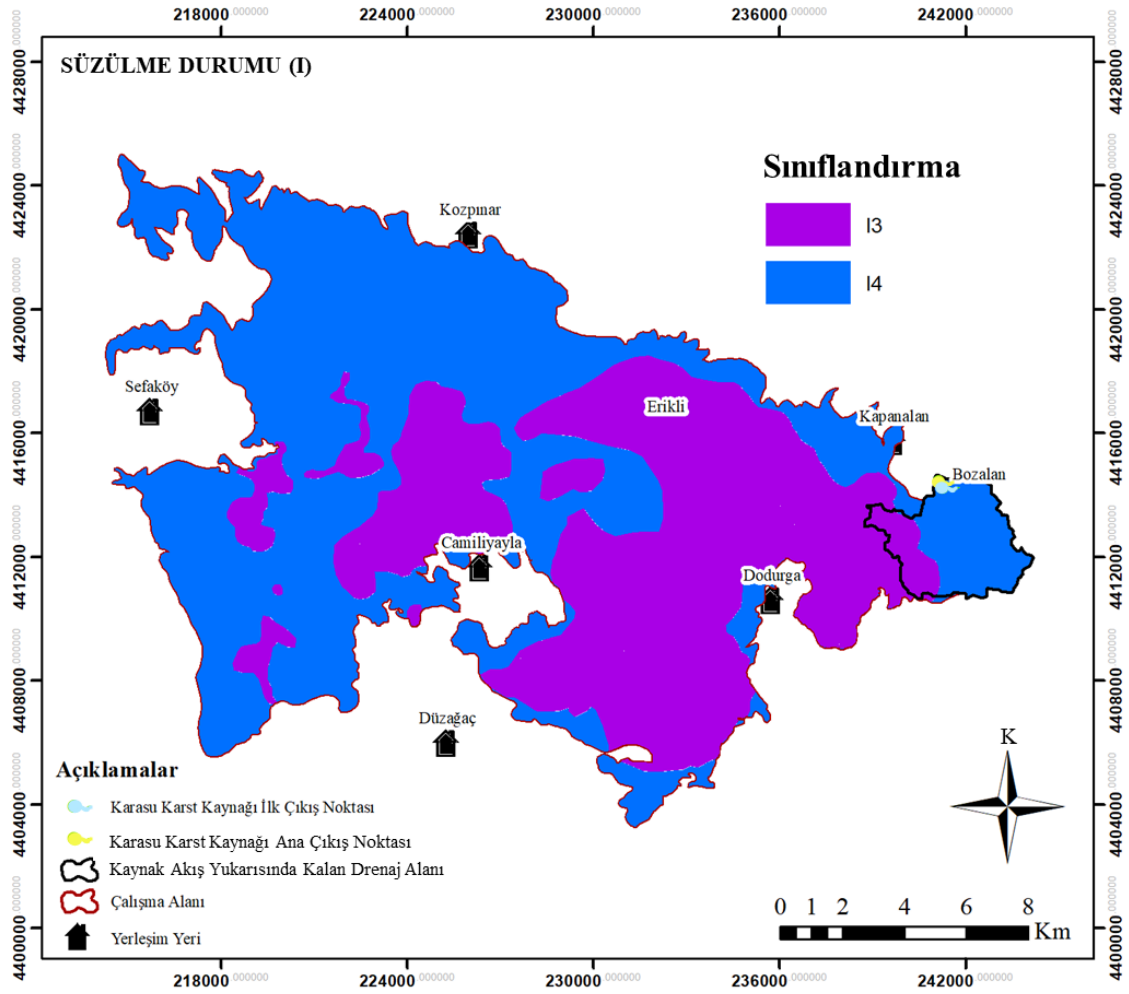
Çizelge 7.4. Süzülme koşulları parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Doerfliger ve ark., 1999).

Süzülme Koşulları	Açıklamalar	Derecelendirme
Noktasal Beslenme	I ₁ Sürekli veya geçici akarsular ya da bu akarsuların beslediği obruk ya da dolinler ya da yapay drenaj ağlarının da olduğu söz konusu akarsuların oluşturdukları drenaj alanları	1
	I ₂ II'de bahsedilen drenaj alanı (yapay drenaj alanı hariç) eğimi tarım alanları için %10'dan ve meralar için %25'ten fazla olan alanlar	2
	I ₃ II'de bahsedilen drenaj alanı (yapay drenaj alanı hariç) eğimi tarım alanları için %10'dan ve meralar için %25'ten az olan alanlar. Yüzey suyu toplayan alçak düzlükler ve bu alçak alanları besleyen yamaçlar (Eğimi: tarım alanları için %10'dan, çayır ve meralar için %25'ten fazla olan yamaçlar).	3
Yaygın Beslenme	I ₄ Su toplama alanının geri kalanı	4



Şekil 7.5. Çalışma alanı için süzülme durumu (I) sınıflandırma gösterimi.

Çalışma alanına ait süzülme durumu (I) parametresi için puanlandırma CBS tabanlı programlar kullanılarak yapılmıştır. Çalışma alanına ait süzülme durumu (I) puanlandırma haritası ise Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6. Çalışma alanına ait süzülme durumu (I) parametresi sınıflandırması.

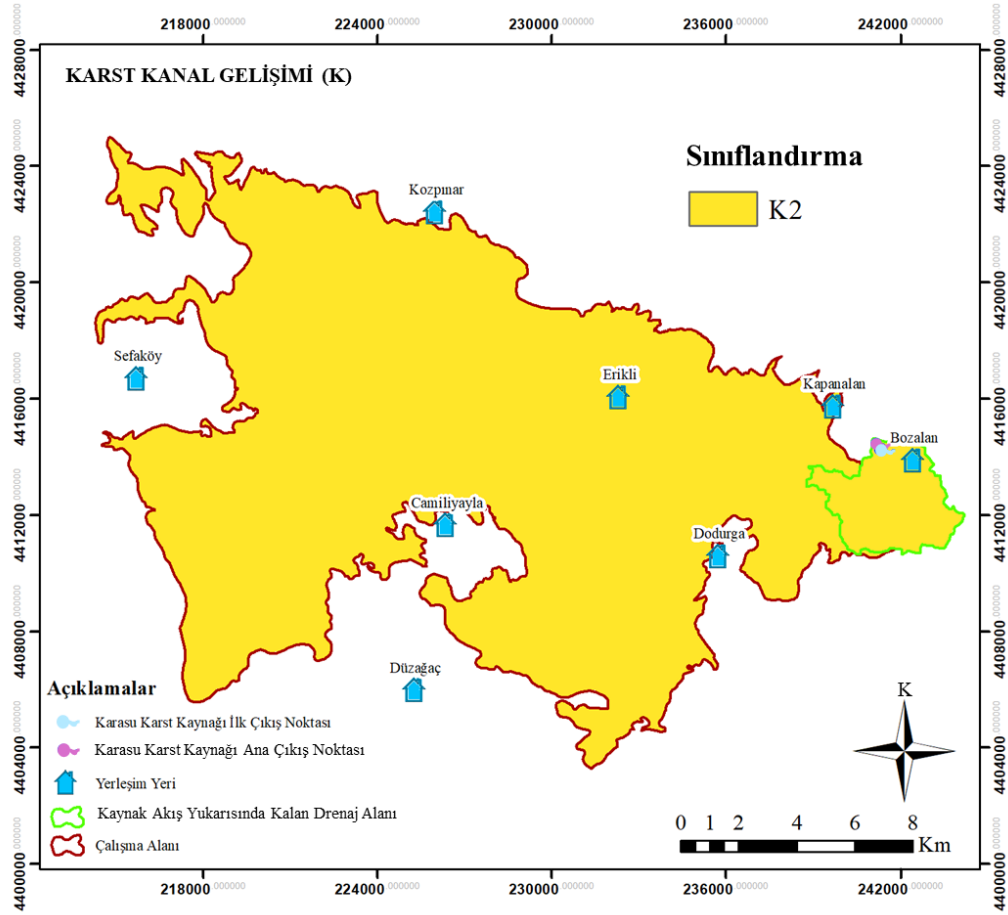
7.4. Karstik Kanal Gelişimi (K)

Karst kanal gelişimi, akiferin iç yapısını ve suyun hareket ettiği yolların karmaşıklığını değerlendirmektedir. Daha fazla gelişmiş bir karst kanal, suyun kirlilik kaynaklarından etkilenme riskini arttırmaktadır.

Çalışma alanı, nispeten az gelişmiş karstik kanal gelişimine sahiptir. Karasu Karst Kaynağı beslenme alanındaki karstik yapıların dağılımına bakıldığında karstın yoğun olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, Doerfliger ve ark., (1999) tarafından hazırlanan karstik kanal gelişimi (K) sınıflandırılmasına göre (Çizelge 7.5) çalışma alanı K2 olarak sınıflandırılmış ve beslenme alanının tamamında bu sınıf için aynı puanlama (2 puan) yapılmıştır. Çalışma alanına ait karst kanal gelişimi (K) parametresinin puanlandırması CBS tabanlı programlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanına ait karstik kanal gelişimi (K) puanlandırma haritası ise Şekil 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.5. Karstik kanal gelişimi parametresine ait sınıflandırma ve derecelendirme (Dorfliger ve ark., 1999).

Karstik Kanal Gelişimi	Açıklamalar	Derecelendirme
Çok iyi gelişmiş karstik kanal gelişimi	K ₁ İyi gelişmiş bir karstik kanal varlığı (desimetre ile metre boyutunda kanallara sahip, nadiren kapalı/tıkanmış ve iyi bağlantılı bir ağ	1
Az gelişmiş karstik kanal gelişimi	K ₂ Zayıf gelişmiş bir karstik kanal varlığı (küçük kanal ağı, ya da kötü bağlantılı veya dolu ağ, ya da desimetre veya daha küçük boyutlu açıklıklara sahip ağ).	2
Karışık veya çatlaklı akifer	K ₃ Gözenekli ortamdaki süzülme koşullarının kontrol ettiği sistemden ortaya çıkan kaynak varlığı. Karstik olmayan sadece çatlaklı akifer ortamı	3



Şekil 7.7. Çalışma alanına ait karstik kanal gelişimi (K) parametresi sınıflandırması.

7.5. Nihai Sınıflandırma (EPIK)

Çalışma alanında, EPIK yönteminde belirtilen her bir parametre (E, P, I, K) için değerlendirme yapılmıştır. Her bir parametreye ait raster verileri üst üste bindirilerek, nihai toplam (F) dağılımı elde edilmiştir. Bu puanlar, 17 ile 30 arasında değişiklik göstermektedir. Hesaplanan EPIK duyarlılık indeksi (F) sonuçları doğrultusunda, çalışma alanı duyarlılık sınıflarına ayrılmıştır. Bu sınıflar Çizelge 7.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.6. EPIK duyarlılık indisi ve duyarlılık sınıfları (Doerfliger ve ark., 1999).

EPIK Duyarlılık İndisi (F)	Duyarlılık	Duyarlılık Sınıfı
$F \leq 19$	Çok Yüksek	S1
$20 < F < 25$	Yüksek	S2
$F > 25$	Orta	S2
P4 varlığı	Düşük	-

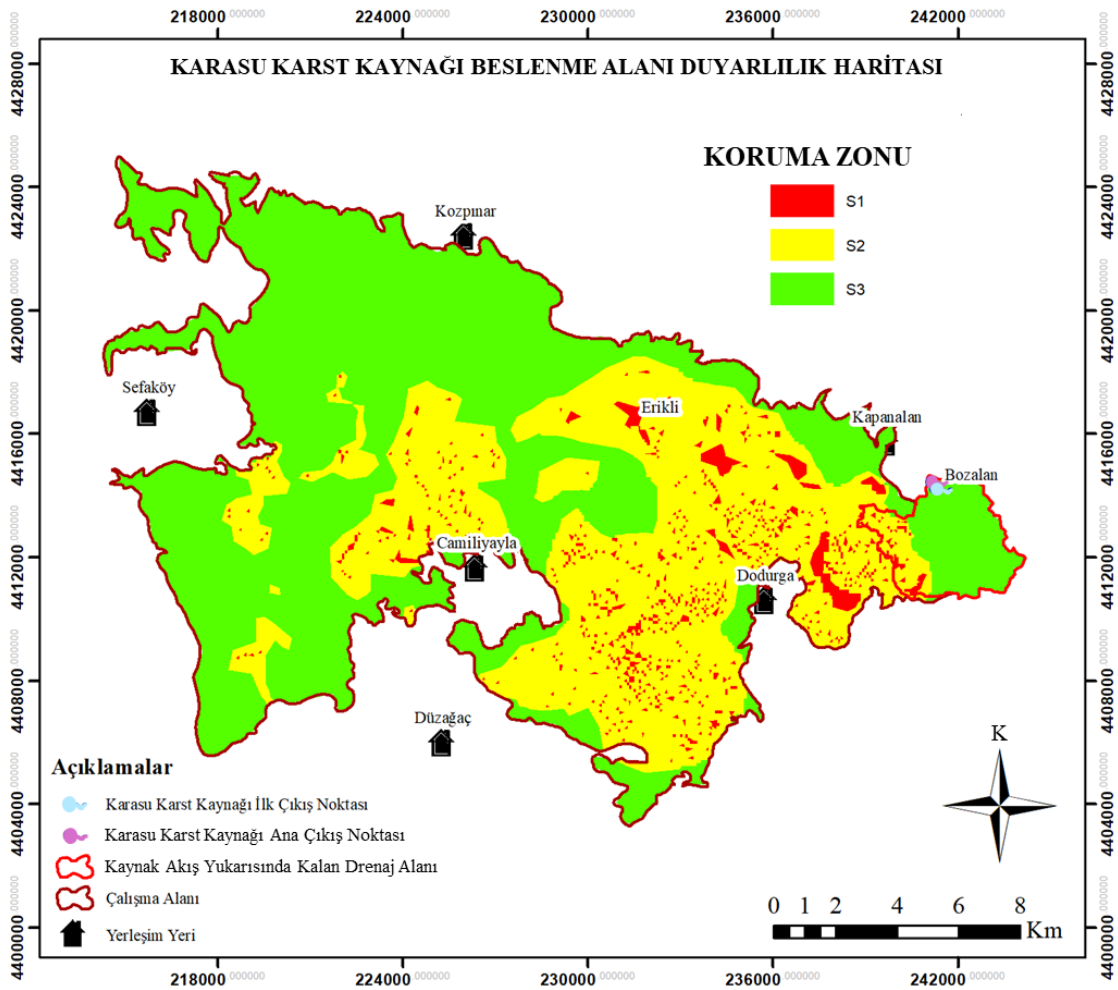
Doerfliger ve ark., (1999) tarafından geliştirilen EPIK duyarlılık indisi ve duyarlılık sınıflarına göre, çalışma alanı S2 ve S3 olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 7.8). S2 olarak sınıflandırılan alanlar, yüksek düzeyde duyarlılığa sahipken, S3 sınıfındaki alanlar orta düzeyde duyarlılık göstermektedir. Çalışma alanının %3.3'ü S1, % 39.7'si S2 ve %57'si ise S3 sınıfına girmektedir.

S1 koruma zonuna giren noktaların genel dağılımı incelendiğinde, bu noktaların çoğunlukla toprak kalınlığının az olduğu dolin ve uvala yapılarında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu alanlar çok yüksek hassasiyete sahiptir. Karstik yapıların geniş yüzey alanları ve yüksek geçirgenlikleri, yağış sularının hızla yeraltına sızmasına neden olmaktadır. Bu durum, yüzeydeki kirleticilerin doğrudan yeraltısuyuna taşınmasına ve su kalitesinde bozulmalara neden olabilecektir. Ayrıca, bu bölgelerdeki ince toprak örtüsü ve derinlik farkları, kirleticilerin filtrelenme potansiyelini azaltarak suyun daha hızlı kirlenmesine neden olabilir. İnsan faaliyetleri açısından değerlendirildiğinde, karstik yapılar su kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu yapıların bulunduğu alanlarda tarım, sanayi, madencilik gibi faaliyetler sonucu ortaya çıkan kirleticiler, yüzeyden hızla yeraltısuyuna taşınabilmektedir. Özellikle gübre, pestisit, endüstriyel atıklar ve yerleşim alanlarından kaynaklanan kirlilik, bu bölgelerdeki su kalitesini hızla bozabilmektedir. Bu nedenle, karstik alanlarda insan faaliyetlerinin dikkatle planlanması ve denetlenmesi büyük önem taşır. Elde edilen duyarlılık haritası incelendiğinde, S2 koruma zonuna giren alanların, karstik yapıların ara bölgelerine denk geldiği görülmektedir. Bu bölgeler, karstik yapılar kadar hassas olmasa da yüksek duyarlılığa sahiptir. Zamanla karstlaşmanın da artacağı düşünülürse, yakın gelecekte yeraltıları kalite açısından daha çok etkilenecektir. S3 zonuna giren bölgeler ise orta duyarlılık düzeyine sahiptir.

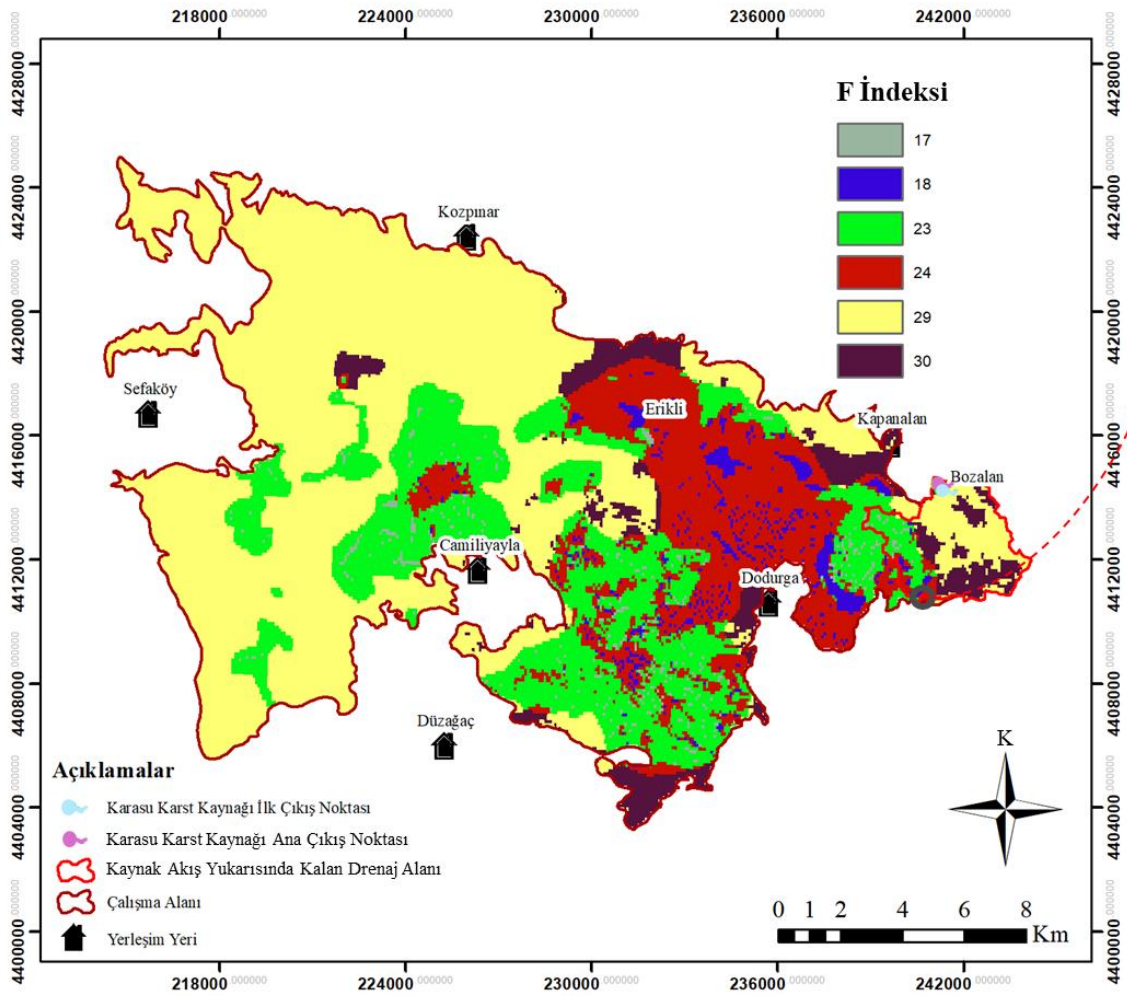
Arazi çalışmaları sırasında, çalışma alanı sınırları içerisinde bir atık depolama alanı görülmüştür (Şekil 7.9). Bu bölge F indeksi 23-24 olan noktalara denk gelmekte, S2 koruma zonu içerisinde olup, yüksek duyarlılığa sahiptir. Karstik sistemlerde iyi gelişmiş kırık-çatlak sistemleri ve üçüncül gözeneklilik, kirleticilerin geniş alanlara yayılmasını kolaylaştırarak, bölgedeki su kaynaklarını tehdit edebilmektedir. Bu nedenle, karstik

bölgelerde atık depolama faaliyetlerinden kaçınılmalı ve alternatif, daha güvenli depolama yöntemleri tercih edilmelidir.

Ayrıca elde edilen EPIK haritaları, gelecekte yapılacak izleme deneyleri ile elde edilecek yeraltı suyu hızlarıyla karşılaştırılarak kalibre edilebilir. Bu karşılaştırma, haritaların daha kesin sonuçlar verebilmesi adına önemli olacaktır.



Şekil 7.8. Çalışma alanına ait duyarlılık haritası.



Şekil 7.9. Çalışma alanına ait F indeksi dağılımı.

8. KARASU KARST KAYNAĞININ İKLİM SENARYOLARI İLE MİKTAR DEĞERLENDİRMESİ

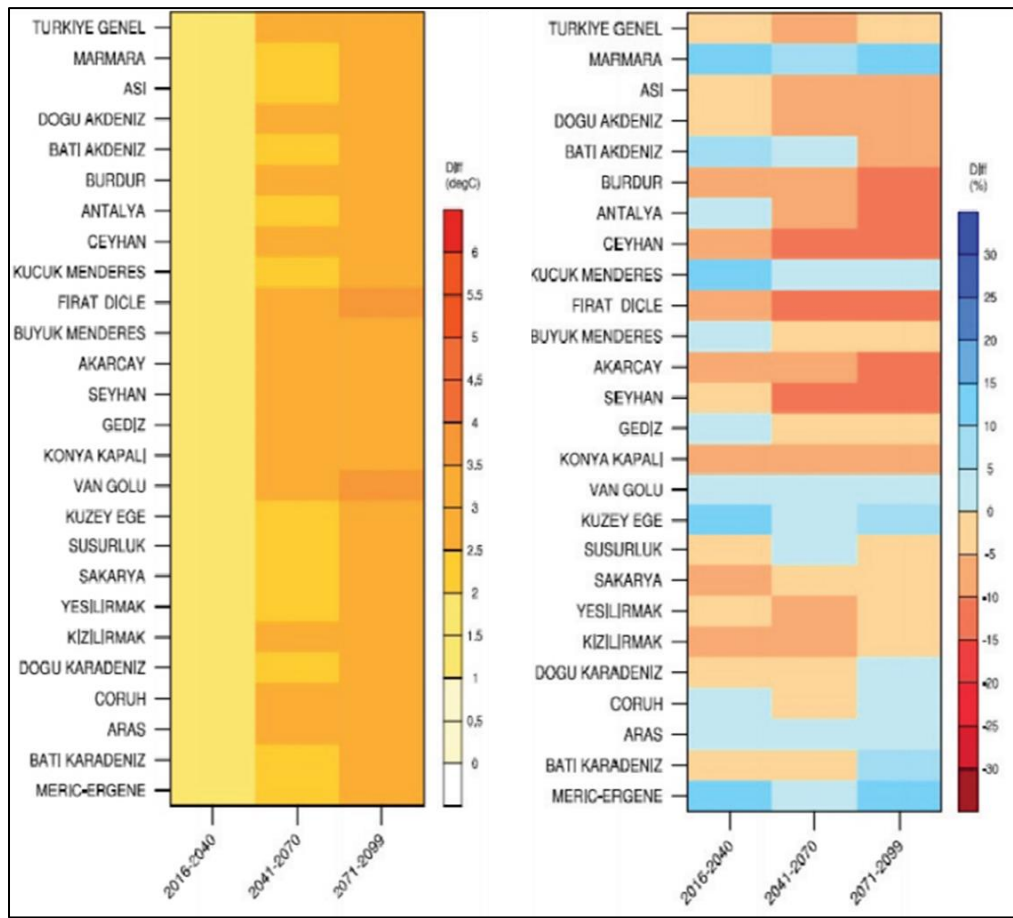
İklim değışikliği, dünya genelinde su kaynakları üzerinde olumsuz yönde önemli derecede bir baskı oluşturmaktadır. Artan sıcaklıklar, buharlaşma oranlarını yükselterek su kaynaklarının azalmasına neden olurken, değışen yağış rejimleri de suyun miktarını etkilemektedir. Özellikle karstik alanlarda, su miktarında ve kalitesinde hızlı değışim yaşanabilmektedir. Bu durum, tarım, sanayi ve içme suyu ihtiyacı olan bölgelerde suyun sürdürülebilir yönetimini zorlaştırmaktadır.

İklim senaryoları, gelecekteki iklim koşullarını tahmin etmek için kullanılan önemli araçlardır. Bu senaryoların üretiminin çok sayıda farklı parametreyle ilişkili olması nedeniyle, senaryoların ve buna bağlı projeksiyonların oluşturulması çok karmaşık işlemlerdir. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), iklim değışikliği konusunda güvenilir ve kapsamlı raporlar sunmak amacıyla 1990 yılında kurulmuş olup, bilim insanlarının katkılarıyla çalışmaktadır. Türkiye için, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait HadGEM2-ES küresel model sonuçlarının, RegCM4 bölgesel modeli kullanılarak ölçek küçültülmüş projeksiyonları incelenerek ele alınmıştır ve ayrıca Türkiye’de bulunan havzalar için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları üretilmiştir (Şekil 8.1 ve Şekil 8.2) (MGM, 2015).

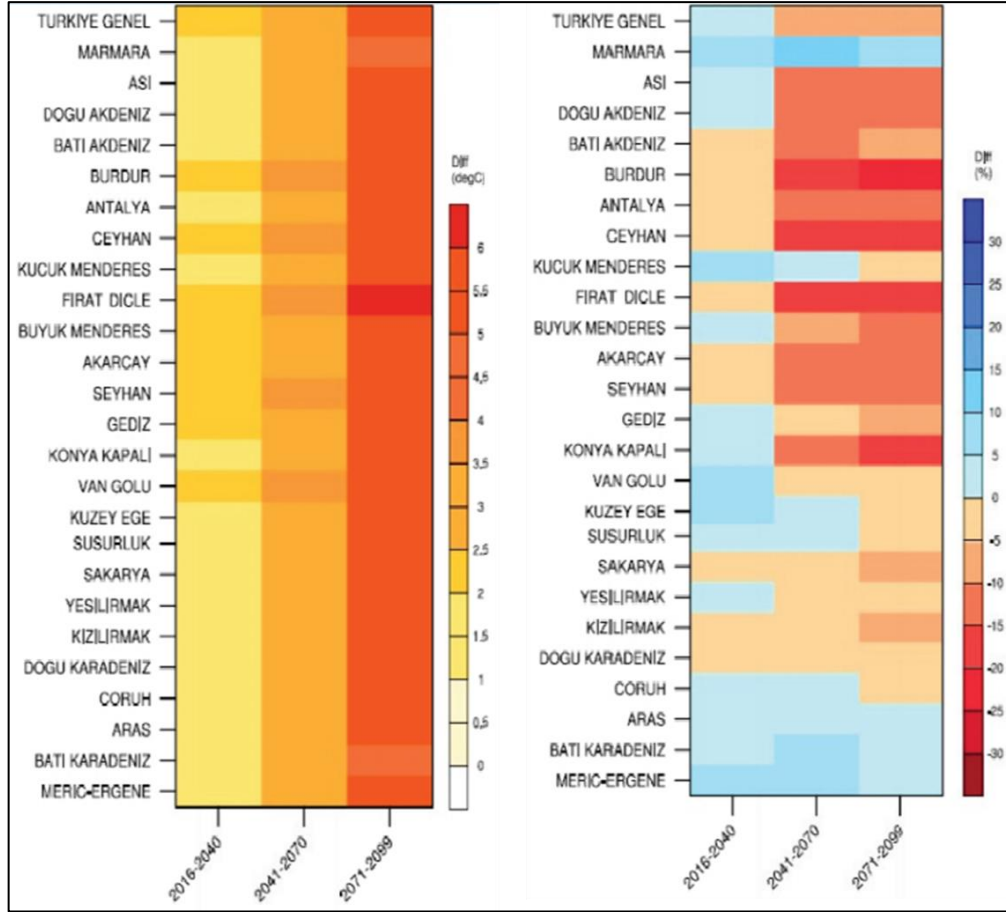
RCP4.5 ve RCP8.5 gibi farklı senaryolar, sera gazı emisyonlarının çeşitli düzeylerini temsil etmekle birlikte, sıcaklık artışları, yağış değışiklikleri ve buharlaşma oranları gibi iklim unsurlarındaki olası değışimleri öngörmeye yardımcı olabilmektedir. Özellikle su kaynakları yönetiminde, bu senaryolar sayesinde gelecekteki su talebi, su kalitesi ve suyun mevsimsel dağılımı gibi unsurlar daha iyi planlanabilmektedir.

Karasu Karst Kaynağının beslenme alanının büyük bir çoğunluğu Sakarya Havzası sınırları içerisinde bulunmaktadır. RCP4.5 senaryosuna göre, Sakarya Havzası’nda 2011-2040 yılları arasında yağış miktarında %10 düşüş ve sıcaklıkta 1.5°C artış, 2041-2070

yıllarında ise %5 yağış miktarı azalması ve 2°C sıcaklık artışı beklenmektedir. RCP8.5 senaryosunda ise, 2011-2040 arasında %5 yağış miktarı azalması ve 2.5°C sıcaklık artışı, 2041-2070 yılları arasında %5 yağış miktarı düşüşü ve 3°C sıcaklık artışı öngörülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, tezin "Hidroloji" bölümünde Dodurga ilçesine ait WeatherSpark web sitesinden alınan yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak, çalışma alanı için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 2011-2040 ve 2041-2070 yılları arasındaki yağış, potansiyel buharlaşma, gerçek buharlaşma ve fazla su değerleri, Thornthwaite-Mather (1955) yöntemiyle hesaplanmıştır (Şekil 8.3).



Şekil 8.1. RCP4.5 senaryosuna göre havzalara ait sıcaklık ve yağış tahminleri (MGM, 2015).



Şekil 8.2. RCP8.5 senaryosuna göre havzalara ait sıcaklık ve yağış tahminleri (MGM, 2015).

Şekil 8.3'te Dodurga ilçesi için yağış, potansiyel buharlaşma (Etp), gerçek buharlaşma (Etg) ve fazla su değerlerinin hem referans dönemi (1980-2016) hem de gelecekteki RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları altında farklı yıllar için nasıl değişeceği gösterilmektedir.

Referans döneminde yağış miktarı 627.90 mm, potansiyel buharlaşma 592.09 mm, gerçek buharlaşma 302.60 mm ve fazla su miktarı 325.30 mm olarak hesaplanmıştır.

RCP4.5 senaryosuna göre 2011-2040 döneminde yağış miktarı %10 azalarak 565.11 mm'ye düşerken, potansiyel buharlaşma 639.08 mm'ye yükselmiş, gerçek buharlaşma 301.13 mm ve fazla su miktarı 263.98 mm olarak belirlenmiştir. RCP8.5 senaryosu altında ise aynı dönemde yağış miktarı yine %5 düşerken, potansiyel buharlaşma 655.51

mm'ye, gerçek buharlaşma 317.15 mm'ye yükselmiş ve fazla su miktarı 282.23 mm'ye düşmüştür. 2041-2070 döneminde RCP4.5 senaryosu altında potansiyel buharlaşma 671.95 mm'ye, gerçek buharlaşma 318.21 mm'ye yükselirken, fazla su miktarı 278.30 mm'ye kadar düşmüştür. RCP8.5 senaryosunda ise potansiyel buharlaşma 690.26 mm, gerçek buharlaşma 328.72 mm'ye yükselmiş, fazla su miktarı ise 272.90 mm'ye düşmüştür.

Genel olarak, iklim senaryolarına göre yağışların azalması ve sıcaklıkların artmasıyla birlikte potansiyel buharlaşma değerlerinde önemli bir artış ve buna bağlı olarak fazla su miktarında belirgin bir azalma öngörülmektedir. Bu durum, özellikle RCP8.5 senaryosunda, su kaynakları potansiyelinde azalmalara yol açabilecek bir tablo ortaya koymaktadır.

En kötü senaryo olan RCP8.5'te elde edilen yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak, Karasu Karst Kaynağı beslenme alanında ve kaynak akış yukarısında kalan drenaj alanı 2041-2070 yılları arası için hidrolojik bütçe hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplama göre söz konusu drenaj alanından gelen yüzeysel akış ve süzülme miktarının sırasıyla, 1.47×10^6 m³/yıl ve 1.42×10^6 m³/yıl olacağı öngörülmüştür (Çizelge 8.1). Kaynak beslenme alanından gelecek süzülme miktarı ise 45.24×10^6 m³/yıl olarak hesaplanmıştır (Çizelge 8.2). Bu üç bileşenin, Karasu Karst Kaynağının boşalmasına katkı sağlamasıyla, kaynağın toplam boşalım debisinin 48.37×10^6 m³/yıl'a düşeceği tahmin edilmektedir.

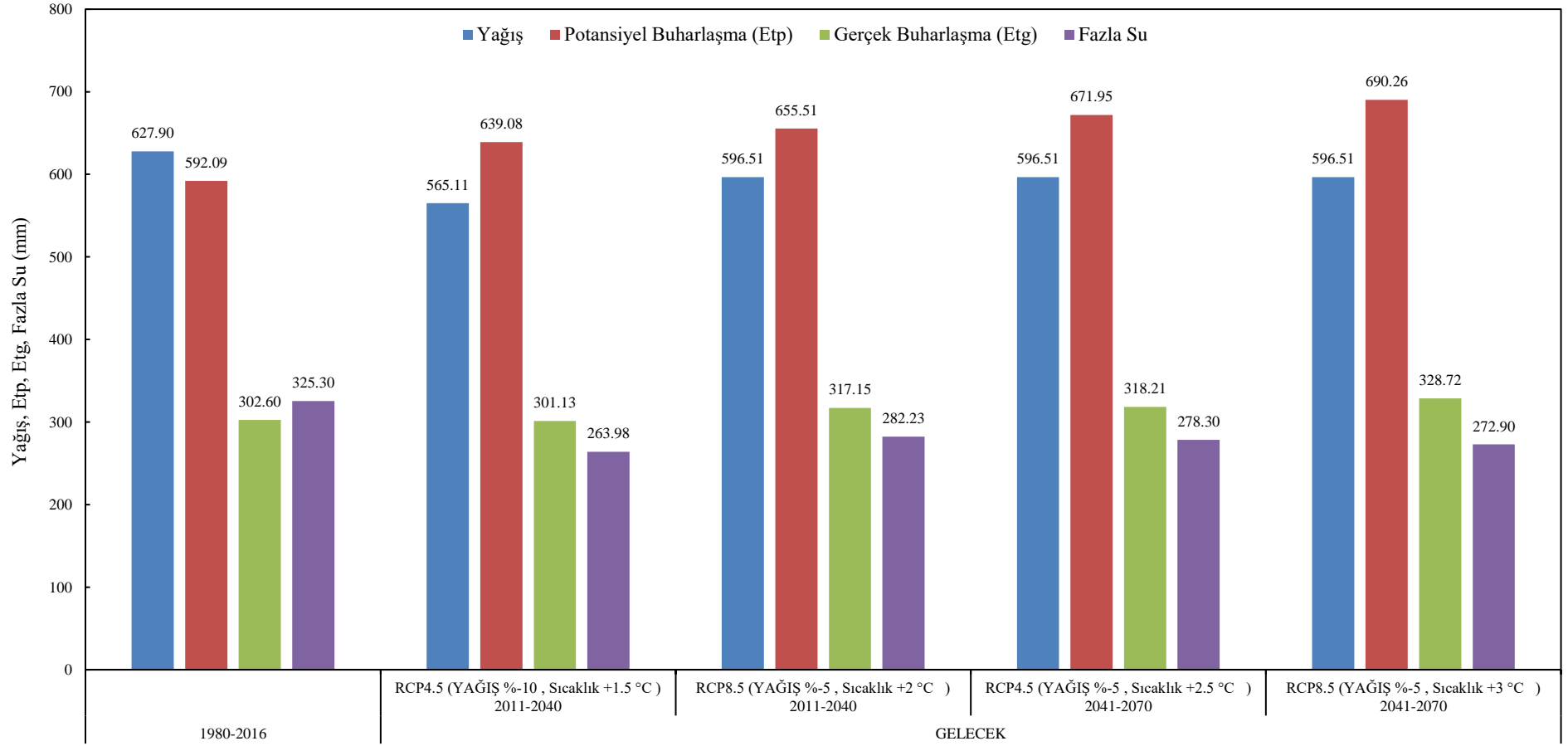
RCP8.5 senaryosuna göre yapılan Thornthwaite-Mather su bütçe hesaplamaları, 2041-2070 yılları için Karasu Karst Kaynağının boşalım debisinin %17.79 (0.312 m³/s) oranında azalacağını öngörmektedir. Bu azalma, artan sıcaklık ile değişen yağış düzenlerinin potansiyel etkilerini yansıtmaktadır. Mevcut durumda Karasu Karst Kaynağının boşalım debisi 58.84×10^6 m³/yıl iken, gelecekte bu değer 48.37×10^6 m³/yıl olarak hesaplanması, su yönetimi ve korunması açısından önemli bir uyarı niteliğindedir. Bu durum, hem Karasu Karst Kaynağı ve bu kaynağa bağlı ekosistemler üzerinde dikkate değer etkiler yaratabilmektedir.

Çizelge 8.1. RCP8.5'e göre 2041-2070 yılları için Thornthwaite - Mather su bütçe hesabı
(Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı).

Beslenim	Boşalım			Beslenim-Boşalım (mm/yıl)
	Yağış (P) (RCP8.5) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	Gerçek Buharlaşma (Etg) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	Yüzeysel Akış (R) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	
6.32	3.48	1.47	1.42	-0.05

Çizelge 8.2. RCP8.5'e göre 2041-2070 yılları için Thornthwaite - Mather su bütçe hesabı
(Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı için).

Beslenim	Boşalım			Beslenim-Boşalım (mm/yıl)
	Yağış (P) (RCP8.5) (mm/yıl)	Gerçek Buharlaşma (Etg) (mm/yıl)	Yüzeysel Akış (R) (mm/yıl)	
596.51	328.72	98.81	174.09	-5.12
Yağış (P) (RCP8.5) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	Gerçek Buharlaşma (Etg) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	Yüzeysel Akış (R) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	Süzülme (I) (*10 ⁶ m ³ /yıl)	Beslenim-Boşalım (*10 ⁶ m ³ /yıl)
160.94	88.69	28.39	45.24	-1.38



Şekil 8.3. RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yağış, potansiyel buharlaşma-terleme, gerçek buharlaşma-terleme ve fazla su miktarları.

9. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile, Karasu Karst Kaynağı ve çevresinin jeoloji, hidroloji, hidrojeoloji, hidrojeokimya ve izotop hidrolojisi çalışmaları sentezlenerek, Karasu Karst Kaynağının sürdürülebilir yöntemine temel oluşturabilecek kavramsal modelinin oluşturularak, kaynağın bağlı olduğu akiferin kirliliğe karşı duyarlılığı ve iklim değişikliklerine verebileceği tepkiler analiz edilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

9.1. Sonuçlar

MTA (2011) tarafından sağlanan 1/100000 ve 1/25000 ölçekli jeoloji haritaları ve ilgili raporlar kullanılarak, çalışma alanının jeoloji haritası, hidrojeoloji haritası ile jeolojik ve hidrojeolojik kesitler oluşturulmuştur. Oluşturulan kesitler doğrultusunda, Karasu Karst Kaynağının beslenme alanının, en fazla Geyiktepe Formasyonu birimiyle sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, bu beslenme alanı 269.81 km² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı 13.2 km² olarak hesaplanmış olup, 2.6 km²'lik kısmı, beslenme alanı sınırları içerisinde olması nedeniyle, Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzey drenaj alanı 10.6 km² olarak alınmıştır.

Ortalama debisi 1.842 m³/s olan Karasu Karst Kaynağı, en düşük 0.779 m³/s, en yüksek 3.669 m³/s olarak ölçülmüş olup, çeşitli belediyelere içme suyu sağlamaktadır. Karasu Karst Kaynağı, ilk çıkışından sonra dere olarak akar ve tahsis fazlası yine dere yatağına bırakılmaktadır.

Karasu Karst Kaynağının debi ölçümü yapılan dere kesitinde, Karasu Karst Kaynak akımları ile kaynağın membasında kalan havzadan gelen yüzeysel akış toplamı kaydedilmektedir. Bu bilgiler ışığında hidrolojik çalışmalar ve su bütçesi çalışmaları yapılmıştır.

Çalışma alanına ait hidrolojik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden bölgedeki 10 meteoroloji gözlem istasyonuna ait aylık yağış ve sıcaklık verileri alınmıştır. 10 meteoroloji gözlem istasyonu arasında yağış-kot ilişkilerine bakılmış ve Bilecik MGİ, Bozüyük- Dodurga MGİ ve Bozüyük MGİ'nin yüksek korelasyon katsayısı verdiği görülmüştür. Ancak Bilecik MGİ'nin (524 m), çalışma alanı (1400 m) ortalama kotuna göre çok aşağıda kalması, çalışma alanına uzaklığı ile Bozüyük MGİ ile benzer ortalama değerler vermesi ve Bozüyük/Dodurga MGİ'nin ise çok kısa ölçüm verilerinin olması nedeniyle bu iki istasyon değerlendirme dışına alınmıştır. Genel olarak mevcut ve uzun dönem kayıt yapan MGİ'lerin çalışma alanının ortalama kotunu temsil edememesi nedeniyle Karasu Karst Kaynağının boşalım debisini sağlayacak yağış ve sıcaklık verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda, Weather Spark adlı web sitesi ile Dodurga beldesine ait iklim-uydu modellemesi verileri kullanılmıştır. Bozüyük MGİ ise mevcuttaki MGİ'lerin çalışma alanını temsil etmemesini gösterebilmek için kıyaslama amacıyla değerlendirilmiştir.

Çalışma alanındaki toplam yağış miktarı, Karasu Karst Kaynağının boşalım debisini etkileyen tek beslenme olması ile birlikte çalışma alanının kotu itibarıyla kar yağışı da yağış miktarını yüksek derecede etkilemektedir. Bu bilgiler göz önüne alınarak, yağış miktarlarına kar yağışı verileri de dahil edilmiş olup, Bozüyük MGİ ve Weather Spark verilerine göre toplam yağış verileri, sırasıyla 518.18 mm ($139.81 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$) ve 627.90 mm ($169.41 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$) olarak hesaplanmıştır.

Bozüyük MGİ'ye göre uzun yıllar ortalama sıcaklık 10.7 °C ve Weather Spark verilerine göre uzun yıllar ortalama sıcaklık 8.6 °C olarak hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında Thornthwaite (1948) yöntemi kullanılarak potansiyel buharlaşma-terleme ve Thornthwaite-Mather (1955) yöntemi kullanılarak çalışma alanına ait gerçek buharlaşma-terleme değerleri hesaplanmıştır. Bozüyük MGİ ve Weather Spark (Dodurga beldesi) için potansiyel buharlaşma-terleme miktarı sırasıyla, 658.67 mm, 592.09 mm ile gerçek buharlaşma-terleme miktarları sırasıyla 387.56 mm ve 302.60 mm olarak

hesaplanmıştır. Fazla su miktarları ise Bozüyük MGİ için 148.01 mm olup, Weather Spark (Dodurga beldesi) için 325.3 mm olarak hesaplanmıştır.

Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanı (10.6 km²) için Weather Spark verileri kullanılmış olup, potansiyel buharlaşma-terleme miktarı, 6.28×10⁶ m³/yıl ile gerçek buharlaşma-terleme miktarı; 3.21×10⁶ m³/yıl olup, fazla su miktarı ise 3.45×10⁶ m³/yıl olarak hesaplanmıştır.

Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı (269.81 km²) için Bozüyük MGİ ve Weather Spark verilerine göre potansiyel buharlaşma-terleme miktarları sırasıyla, 177.71×10⁶ m³/yıl ve 159.75×10⁶ m³/yıl ile gerçek buharlaşma-terleme miktarları sırasıyla, 104.57×10⁶ m³/yıl ve 81.64×10⁶ m³/yıl olup, fazla su miktarları ise sırasıyla, 39.93×10⁶ m³/yıl ve 87.77×10⁶ m³/yıl olarak hesaplanmıştır.

Çalışma alanı için önceki çalışmalarda ölçülmüş herhangi bir yüzeysel akış miktarına rastlanamaması nedeniyle Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı ve Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan drenaj alanından gelecek yüzeysel akış miktarının belirlenmesi için SCS-CN yöntemi kullanılmıştır. Karasu Karst Kaynağının debisi Geyiktepe Formasyonuna ait mermerlerden gelen beslenme ve Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzey drenaj alanından gelen yüzeysel akış ve süzülme ile toplamda 58.84×10⁶ m³/yıl olarak ölçülmüştür. Bu bilgiler ışığında, CN değeri belirlenirken, fazla suyun, yüzeysel akış ve süzülme miktarına eşit olması durumu dikkate alınarak ilk olarak söz konusu yüzeysel drenaj alanı için hesaplamalar yapılmış olup, Weather Spark'tan alınan yağış verileri ve alan büyüklüğü (10.6 km²) kullanılarak, farklı CN değerleri için yağış-akım grafikleri oluşturulmuştur. Alanın toprak ve arazi kullanım haritası birlikte incelenmiş ve en uygun yağış-akım ilişkisini sağlayan CN değeri 72 olarak belirlenmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından gelen yüzeysel akış ve süzülme ile olan katkı (3.45×10⁶ m³/yıl), kaynağın ortalama debisinden 58.84×10⁶ m³/yıl (1.842 m³/s.) çıkartılarak, beslenme alanından süzülme ile gelen Karasu Karst Kaynağının boşalımın 55.39×10⁶ m³/yıl olduğu belirlenmiştir.

Weather Spark ve Bozüyük MGİ yağış verileri ve beslenme alanına göre farklı CN değerleri için yüzeysel akış miktarları hesaplanmış olup, en uygun yağış-akım grafiğini ve beslenme alanından gelen süzülme miktarını veren CN değeri tespit edilmiştir. Karasu Karst Kaynağı beslenme alanı eğri numarası 67 olarak belirlenmiş, arazi kullanımı ve toprak haritası da bu değeri desteklemiştir. Bu iki istasyon için yüzeysel akış değerlerinin, Bozüyük MGİ için $12.02 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$, Weather Spark (Dodurga beldesi) için $32.02 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olduğu saptanmıştır.

Bozüyük MGİ yağış ve sıcaklık verileri ile hesaplanan su bütçesinde, beslenim-boşalım ilişkisine bakıldığında, ciddi bir açık tespit edilmiştir. Bunun sebebi, meteoroloji istasyonunun bulunduğu kotun (754 m), Karasu Karst Kaynağının beslenim alanının ortalama kotundan (1400 m) çok daha alçakta yer almasıdır. Bununla birlikte, söz konusu meteoroloji istasyonunda kar yağışı ölçümleri, yağışa dahil edilse de beslenim alanına düşen toplam yağış miktarının sistem çıktılarını karşılayamadığı ve Bozüyük MGİ verilerinin Karasu Karst Kaynağı sisteminin girdisini temsil etmediği anlaşılmıştır.

Karasu Karst Kaynağı su bütçesi çalışmaları kapsamında, beslenim alanı topoğrafya etkisini dikkate alan ve uzun yıllar ölçüm yapan meteoroloji gözlem istasyonunun bulunmaması, mevcut yağış değerlerinin noktasal yağışlar olup, alansal yağış yeterince temsil edememesi ve kaynak beslenim alanında ve Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanında gerçek yüzeysel akış ölçümlerinin olmaması gibi zorluklar yaşanmıştır. Bu zorluklar göz önüne alınarak, kaynağın ölçülen debisinden itibaren bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, kaynağın beslenim alanına düşen alansal yağış belirlemek için iklim-uydu modellemesi kullanılmıştır. Weather Spark'tan elde edilen yağış (yağmur ve kar) ve sıcaklık verileri ile yapılan su bütçesi hesaplamaları sonucunda, Karasu Karst Kaynağını besleyen alansal yağış miktarı belirlenmiş ve kaynağın beslenim-boşalım ilişkisi ortaya konmuş ve Weather Spark (Dodurga beldesi) verilerinin Karasu Karst Kaynağının boşalımını sağladığı ve bu boşalımın %96.88'inin beslenim alanından süzülme ile %3.11'inin ise Karasu Karst Kaynağı akış yukarısında kalan yüzeysel drenaj alanından gelen yüzeysel akış miktarından oluştuğu sonucuna varılmıştır.

Hidrojeokimyasal ve izotopik özelliklerin belirlenmesi çalışmaları kapsamında Eylül 2023 ve Mayıs 2024 tarihlerinde arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu arazi çalışmalarında su noktalarının fizikokimyasal (sıcaklık, özgül elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş madde ve çözünmüş oksijen) parametreleri yerinde ölçülmüş olup, majör iyon ve izotop analizleri için su örnekleri alınmıştır. Kurak dönemi temsil eden arazi çalışmasında, 4 noktadan örnekleme yapılmıştır. Yağışlı dönemi temsil eden arazi çalışmasında ise, önceki dönemde yapılan örnekleme noktalarına ilave olarak 8 farklı noktada daha yerinde fizikokimyasal özellikler ölçülmüş, majör iyon ve izotop analizleri için örnekleme yapılmıştır.

Genel olarak suların benzer kökenli olup, Ca^{2+} ve HCO_3^- iyonlarının baskın olduğu, Back (1989) hidrojeokimyasal fasiyes sınıflandırmasına göre K109 numaralı örneğin, $\text{Ca}+\text{Mg}$, $\text{Na}+\text{K}/\text{HCO}_3$, $\text{Cl}+\text{SO}_4$ fasiyesinde, diğer örneklerin ise, $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3$ fasiyesinde olduğu anlaşılmıştır.

Gibbs diyagramlarına göre örnekler, kayaç çözünmesi hâkim olan bölgeye yakın yer almakta olup, bu durum kurak ve yağışlı dönemdeki suyun kimyasal bileşiminin büyük ölçüde kayaç çözünmesi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

Genel olarak, tüm örnekler kalsit ve aragonite doygun, dolomite göre de bazı örnekler doygundur. Ancak diğer minerallere (anhidrit, florit, jips, halit, silvit) karşı doygun olmadığı gözlenmiştir.

Kaynaktan boşalan suyun hidrojeokimyasal ve izotop analizleri değerlendirildiğinde, su içeriğinin kayaç çözünmesine bağlı olarak CaCO_3 bileşeni ile zenginleştiği, kurak ve yağışlı dönemlerde alınan izotop analizleri karşılaştırıldığında, yağışlı dönemde trityum değerlerindeki artış, yağışların suyu yenilediği ve bu yenilenmenin trityum konsantrasyonunu artırdığını göstermektedir. Kurak dönemde ise suyun daha yaşlı olduğu, yenilenme hızının daha düşük olduğu sonucuna varılabilmektedir.

ABD Tuzluluk Diyagramları çizilmiş, Bozalan Köyü merkezindeki K106 kodlu, No4 Çeşme olarak adlandırılan K108 kodlu ve No6 Çeşme olarak adlandırılan K109 kodlu örnekler “C3-S1”, söz konusu örnekler haricindeki diğer sular “C2-S1” sınıfına girmiştir. “C2-S1” suyu genel olarak daha güvenli, “C3-S1” ise biraz daha dikkatli kullanım gerektiren bir su türüdür.

Örneklerdeki su kalitesi parametreleri (Florür, Nitrat, pH, Sülfat, Klorür, TÇM, Kalsiyum, Sertlik (CaCO_3 olarak), Magnezyum, Potasyum, Sodyum, Amonyum) hem ulusal hem de uluslararası standartların belirlediği sınırların altında yer almakta ve bu da suyun içilebilir ve güvenli olduğunu göstermektedir.

Karasu Karst Kaynağı, debi büyüklüğüne ve debi değişkenlik katsayısına göre sınıflandırılmıştır. Meinzer (1923) sınıflamasına göre, $1.842 \text{ m}^3/\text{s}$ ortalama debisiyle 2. derece ($0.283 - 2.83 \text{ m}^3/\text{s}$) büyüklükte bir kaynak sınıfına girmektedir. Kaynağın beslediği akifer, Karasu Karst Kaynağına ait, debi değişkenlik yüzdesi (Q_d) ve kaynak çekilme katsayılarına (α) göre 3. tip akifer sınıflandırmasına girip, kaynağın yıllık yağışlardan etkilendiği belirlenmiştir.

Karasu Karst Kaynağına ait çekilme katsayısı, her yıl için farklılık göstermekte olup, en düşük değeri 2002 yılında (0.0023 gün^{-1}), en yüksek değeri ise 2001 yılında (0.0054 gün^{-1}) gözlenmiştir. Karasu Karst Kaynağı için yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, ileri derece karstlaşmanın olmadığı, kaynaktan boşalan suyun, akiferin tektonizma kontrollü kırk-çatlak sisteminden boşaldığı anlaşılmıştır.

Karasu Karst Kaynağını beslenme alanı ve Karasu Karst Kaynağının akış yukarısında kalan drenaj alanı için EPIK metodu ile duyarlılık analizleri yapılmıştır. Buna göre çalışma alanının %3.3’ü S1, % 39.7’si S2 ve %57’si ise S3 sınıfına girmektedir. S1 koruma zonuna giren noktaların genel dağılımı incelendiğinde, bu noktaların çoğunlukla toprak kalınlığının az olduğu dolin ve uvala yapılarının yoğunlaştığı alanlarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu alanlar çok yüksek hassasiyete sahiptir.

RCP8.5 senaryosuna göre yapılan Thornthwaite-Mather hidrolojik bütçe hesaplamalarına göre, 2041-2070 yılları için Karasu Karst Kaynağının boşalım debisinin %17.79 (0.312 m³/s) oranında azalacağı öngörülmektedir.

Tez çalışması ile, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları doğrultusunda, “Temiz Su ve Sanitasyon” ile “Herkes için Erişilebilir Su ve Atık Su Hizmetlerini ve Sürdürülebilir Su Yönetimini Güvence Altına Almak” olarak belirlenen 6. Hedefe ve “İklim Eylemi” ile iklim değişikliği ve etkileri ile mücadele için acilen eyleme geçmek olarak belirlenen 13. hedefe ulaşmaya yönelik katkı sağlamakla birlikte, DSİ ve ilgili belediyeler için kaynağın sürdürülebilir yönetim planlamasına temel oluşturacak bilgiler elde edilmiştir.

9.2. Tartışma ve Öneriler

Tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular ve varılan sonuçlar belirli bir oranda belirsizlik içermektedir. Belirsizliklerin en büyük kaynağı uygulama yöntemlerinin gerektirdiği verilerin eksik ve yeterli olmamasıdır. Karşılaşılan temel sorunlardan biri, Karasu Karst Kaynağının boşalım debisini sağlayan temsil edici meteoroloji gözlem istasyonu/istasyonlarının bulunmamasıdır. Bu nedenle, bütçe hesaplamalarında, iklim-uydu modelleme verileri kullanılmıştır. Ancak, bu veriler 1980-2016 yılları ile sınırlıdır, bu da uzun vadeli değişimlerin değerlendirilmesini kısıtlamakta olup, verilerin kesinliğini etkileyebilmektedir. Tezin ilgili bölümünde anlatıldığı gibi, kaynağın beslenme alanı kotunu temsil eden, yüksekliklere uygun şekilde meteoroloji gözlem istasyonları kurulmalı, beslenme alanına ait alansal yağışın (yağış, kar yağışı, vb.) ve sıcaklık ölçümlerinin, düzenli ve saatlik/günlük/aylık olacak şekilde yapılması gerekmektedir.

Tez çalışması kapsamında, Thornthwaite (1948) ve Thornthwaite-Mather (1955) yöntemleri kullanılmıştır. Thornthwaite (1948) yöntemi, iklim verilerine dayalı olarak potansiyel buharlaşma-terleme miktarını belirlemektedir ancak rüzgar hızı, güneş radyasyonu ve nem gibi önemli parametreleri ihmal ettiği için bazı bölgelerde hatalı sonuçlara yol açabilmektedir. Ayrıca, Thornthwaite-Mather (1955) yönteminin güvenilirliği için uzun dönemli iklim verileri gereklidir. Kısa dönemli veya eksik veriler

hesaplamaların doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Gerçek buharlaşma-terleme miktarları, su bütçesini etkileyen kritik bir faktör olmasına rağmen, kaynak beslenme alanını temsil eden bir meteoroloji gözlem istasyonu verileri ile karşılaştırılmadığı için bazı belirsizlikler oluşmuştur.

Karasu Karst Kaynağı içme suyu amaçlı kullanılan bir su kaynağı olmasına rağmen, kaynağın debisi, belirli yıllarda ölçülmüş olsa da, aylık olarak düzenli bir izleme yapılamamıştır. Ayrıca, debi ölçümünün yapıldığı noktanın kesin lokasyonu belirsizdir. Bu durum, debi verilerinin kaynak boşalmasını ne derece doğru temsil ettiği konusunda belirsizlik yaratmaktadır. Bu belirsizlik, özellikle debi verileri kullanılarak yapılan tüm analizlerde sonuçların güvenilirliği üzerinde etkili olmuştur. Dolayısıyla, debi miktarlarına dayalı hesaplamalar belirli bir hata payı içermektedir. Karasu Karst Kaynağının sürdürülebilir yönetimi için, günlük ve aylık olarak düzenli debi ölçümlerinin doğru lokasyonlarda yapılması uygun olacaktır.

Su kalitesi izleme çalışmalarıyla ilgili olarak, geçmişte Karasu Karst Kaynağında su kalite ölçümleri yapılmışsa da, bu verilere ulaşmak mümkün olmamıştır. Bu durum, kaynağın hidrojeokimyasal ve izotopik içeriklerinin geçmiş verilerle karşılaştırılmasını engellemiş ve su kalitesinin zaman içindeki değişimlerini değerlendirmeyi zorlaştırmıştır. Uzun vadede yapılacak su kalite izleme çalışmaları, kaynağın çevresel ve iklimsel değişimlere nasıl tepki verdiğini anlamak açısından önemlidir. Bu kapsamda, kaynağın, hidrojeokimyasal ve izotopik içerikleri gibi verilerinin düzenli olarak toplanması, zamansal değişimlerin anlaşılması ve doğru yönetim stratejilerinin oluşturulması Karasu Karst Kaynağı ve bu kaynağa bağlı canlılar için hayati öneme sahiptir.

Kaynağın beslenme alanının duyarlılığının belirlenmesine yönelik yapılan duyarlılık analizinde de bazı sınırlamalar söz konusudur. Karstik yapılar genellikle uydu görüntülerinden ve HGM topoğrafik haritalarından sayısallaştırılmıştır, ancak bu yapıların detaylı bir arazi çalışması ile desteklenmesi gerekmektedir. Gözlenen karstik yapılar üzerinde geniş çaplı bir arazi incelemesi gerçekleştirilerek, bu yapıların doğruluğu ve alansal yayılımı netleştirilmelidir. Ayrıca, izleme deneyleri yapılarak yeraltısu akım

hızlarının hesaplanması ve bu verilerin EPIK parametreleri için yapılan puanlamalarla yeniden değerlendirilmesinin yapılması uygun olacaktır. Bu noktadaki belirsizlikler, duyarlılık analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilir. Bu nedenle, saha çalışmaları ve izleme deneyleriyle mevcut analizlerin güçlendirilmesi önerilmektedir.

İklim değişikliği senaryoları kapsamında, Karasu Karst Kaynağının zamanla boşalım debisinin azalması öngörülmektedir. Bu durum, kaynak suyu miktarını doğrudan etkileyerek hem su kullanıcılarını hem de ekosistemleri tehdit edebilir. Ayrıca, kaynağın beslenme alanında tespit edilen katı depolama alanı, su kalitesi açısından da risk teşkil etmektedir. Bu tehditler, özellikle kaynak suyunu içme ve kullanma suyu olarak kullanan belediyeler ve Karasu Karst Kaynağına bağlı ekosistemler için önemlidir.

Karasu Karst Kaynağının korunması için yerel yönetimler ve ilgili kuruluşlarla iş birliği içinde kapsamlı koruma ve yönetim stratejileri geliştirilmelidir. Bu bağlamda, karstik alanların ekosistem dengesi göz önünde bulundurularak, koruma planları ve düzenlemeleri oluşturulmalı, bu alanların bozulmasını engellemek amacıyla gerekli tedbirler alınmalıdır. Kaynağın beslenme alanında herhangi bir endüstriyel faaliyet (mermer ocaklarının faaliyete geçmesi, vs.) ve/veya şehirleşme (konut ve yol projeleri, vs.) hem su kalitesinin korunması hem de miktarının sürdürülebilir bir şekilde devam etmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bölgedeki planlama süreçlerinde, bu su kaynağının korunması ve uzun vadeli yönetimi için dikkatli ve bilimsel temelli kararlar alınması gerekmektedir. Ayrıca, yerel halk ve yöneticiler arasında karstik arazilerin ekolojik önemi konusunda bilinçlendirme faaliyetleri düzenlenmelidir. Eğitim programları ve seminerler, toplumun bu alanların korunmasına yönelik farkındalığını artırarak, sürdürülebilir yönetimi destekleyecektir.

10. KAYNAKLAR

- Açıkel, Ş., Gökova-Azmacık (Muğla) Karst Kaynaklarında Akım ve Tuzlu Su Karışımı Dinamiğinin Kavramsal Modellenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2012**.
- AFAD, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> (Erişim Tarihi: **8 Ağustos 2024**).
- Appelo, C.A.J, Postman, D., Geochemistry, Groundwater and Pollution, 2nd Edition, A.A. Balkema, **2010**.
- APHA, AWWA and WPCF, Standart Methods for the Estimation of Water and Waste Water (17th Edition), American Dublic Health Association, Washington, USA, **1989**.
- APHA, AWWA and WPCF, Standart Methods for the Estimation of Water and Waste Water (20th Edition), American Dublic Health Association, Washington, USA, **1999**.
- Al-Charideh, A. Environmental Isotope Study Of Groundwater Discharge From The Large Karst Springs in West Syria: A Case Study Of Figeş And Al-Sin Springs. Environmental Earth Sciences, 63 (1), 1-10, **2011**.
- Al-Charideh, A. Recharge Rate Estimation In The Mountain Karst Aquifer System Of Figeş Spring, Syria. Environmental Earth Sciences, 65 (1), 1169-1178, **2012**.
- Ankara Üniversitesi, Kar Etüdü, Hidroloji Ders Notları, **2013**, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99057/mod_resource/content/1/Hidroloji6.pdf (Erişim Tarihi: **7 Eylül 2024**).
- Aydın, H., Harmanköy – Beyyayla (Bilecik) Karst Sisteminin Morfoloji – Hidrojeoloji İlişkileri Açısından İncelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2005**.
- Back, W., Hydrogeochemical Facies and Groundwater Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain, US Geological Survey Professional Paper, Vol. 498A, 42 s., **1966**.
- BEBKA, Bozüyük İlçe Raporu, Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı, **2023**.

- Bilecik Valiliği, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Bozüyük İlçesi, Karasu Deresi Kaynağı ve Vadisi Doğal Sit Alan Tescili, **2021**, <https://bilecik.csb.gov.tr/bozuyuk-ilcesi-karasu-deresi-kaynagi-ve-vadisi-dogal-sit-alan-tescili-duyuru-420212> (Erişim Tarihi: **29 Mayıs 2024**).
- Bonacci, O., Andric, I., Karst Spring Catchment: An Example From Dinaric Karst. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 6211–6223, **2015**.
- Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Springer, Dordrecht, **1982**.
- Chapman, D., *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2nd ed.). E & FN Spon, **1996**.
- CCGM, Comission for the Geological Map of the World, <https://ccgm.org/en/> (Erişim Adresi: **15 Eylül 2024**).
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.R, *Applied Hydrology*, McGraw- Hill Inc., New York, **1988**.
- Clark, I.D., Fritz, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, 342, **1997**.
- Dışişleri Bakanlığı, Dünyanın Hızla Artan Su İhtiyacına Çözüm Arayışları: Dünya Üçüncü Su Forumu ve Bakanlar Konferansı, https://www.mfa.gov.tr/dunyanin-hizla-artan-su-ihtiyacina-cozum-arayislari_-dunya-ucuncu-su-forumu-ve-bakanlar-konferansi.tr.mfa (Erişim Adresi: **29 Eylül 2024**).
- Doerfliger, N. Jeannin P.Y., Zwahlen F., *Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method Of Defining Protection Areas Using A Multi-Attribute Approach And GIS Tools (EPIK Method)*, *Environmental Geology*, 39 (2), 165-176, **1999**.
- DSİ, Bozüyük Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu, 3. Bölge Müdürlüğü, Eskişehir, **1982**.
- DSİ, Bilecik-Bozüyük Karasu Kaynağı Karst Hidrojeolojik Etüt Raporu, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuyu Dairesi Başkanlığı, Ankara, **2017** (Yayımlanmamış).
- DSİ, Sakarya Havzası Master Plan Nihai Rapor, Ankara, **2017**.
- DSİ, DSİ 2023 Yılı Performans Programı, Ankara, **2023**.

- Ekmekçi, M., Akdeniz, U., Coşkuner, T. ve Yurdaer, D., Tacin (Bünyan -Kayseri) karst kaynağının hidrodinamik özellikleri, 56. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, 14 – 20 Nisan, Ankara, 154-156, **2003**.
- EC, Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Communities, L 330, 32-54, **1998**.
- EPA, Groundwater Monitoring in Karst Terranes Recommended Protocols and Implicit Assumptions, Digital Version Courtesy of The Karst Waters Institute, 79 s., **1989**.
- Ford, D., Williams, P., Karst Hydrogeology and Geomorphology. Wiley, **2007**.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., Groundwater: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., **1979**.
- Gaillard, T., Roux, J.C., Hauchard, E., the hydrogeological karstic chalk system of the Yport springs (Seine-Maritime, France): Investigations and resource exploitation, Geological Society, 517(1), **2022**.
- Ghobadi, M. H., Dehban Avan Stakhri, M., Mirarabi, A. Investigating the hydrogeological properties of springs in a karstic aquifer in Dorfak region (Guilan Province, Iran). Environmental Earth Sciences, 77(3), **2018**.
- Gibbs, R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170, 870, **1970**.
- HKEP, Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması Projesi Sakarya Havzası Proje Nihai Raporu, Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, **2013**.
- IRAP, İl Afet Risk Azaltma Planı, T.C. Bilecik Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, **2021**.
- Iván, V., Mádl-Szőnyi, J., Vulnerability assessment and its validation: the Gömör-Torna Karst, Hungary and Slovakia. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), 261–273, **2017**.
- Jones, C. J. R., Springer, A. E., Tobin, B. W., Zappitello, S. J., Jones, N. A. Characterization and hydraulic behaviour of the complex karst of the Kaibab

- Plateau and Grand Canyon National Park, USA. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), 237–260, **2017**.
- Kiyani, V., Esmaili, A., Alijani, F., Samani, S., Investigation of Drainage Structures In The Karst Aquifer System Through Turbidity Anomaly, Hydro Geochemical And Stable Isotope Analyzes (Kiyani Springs, Western Iran), **2020**.
- Korkmaz, N., “Akiferin Boşalım Katsayılarına Göre Gruplandırılması Üzerine Bir Araştırma”, DSİ Teknik Bülteni, Ankara, 69(1), 51-58, **1989**.
- Kresic, N., Bonacci, O., Spring discharge hydrograph, 129–163, **2010**.
- Küçükayman, A., Bozüyük-Tavşanlı-Kütahya arasının jeolojisi. MTA Dergisi No. 8356, **1987**.
- Maillet, E., Essais D'Hydraulique Souterraine et Fluviatile, Librairie Sci., A. Hermann, **1905**.
- Malík, P. and Vojtková, S., Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. Environmental Earth Sciences, 65(1), 2245–2257, **2012**.
- Megherfi, K., Maza, M., Saou, A., Seidel, J.L., Hydrochemical and statistical study of karstic spring waters of Bejaia coastal area (North Algeria), Arabian Journal of Geosciences, 13(1), **2020**.
- MGM, İklim Sınıflandırılması Bilecik, <https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=BILECIK> (Erişim tarihi: **12 Nisan 2024**).
- MGM, Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği, MGM Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü, TR2015-CC, Ankara, **2015**.
- Meinzer, O.E., Outline of ground water hydrology. U.S Geological Survey, Washington, **1923**.
- Milanovic, P.T., Karst Hydrogeology, 1st Edition, Water Resources Publications, **1981**.
- MTA, Bilecik İli Maden ve Enerji Kaynakları, https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden_potansiyel_2010/Bilecik_Madenler.pdf (Erişim Tarihi: **30 Ağustos 2024**).

- MTA, Kütahya İ23 Paftası, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, **2011**.
- Netopil, R., The classification of water springs on the basis of the variability of yields. *Studia Geographica* 22(1), 145–150, **1971**.
- Özdemir, H., SCS CN Yağış-Akış Modelinin CBS ve Uzaktan Algılama Yöntemleriyle Uygulanması: Havran Çayı Havzası Örneği (Balıkesir), *Coğrafi Bilimler Dergisi* 5 (2), 1-12, **2007**.
- Özkan, S., Bozüyük ovasının hidrojeolojik incelemesi ve yeraltısuyu bilanço hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, **2006**.
- Parkhurst, D.L., User's guide to PHREEQC--A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4227, USA, **1995**.
- Petalas, C. P., Akrotos, C. S., Tsihrintzis, V. A., Hydrogeological Investigation of a Karst Aquifer System. *Environmental Processes*, 5(1), 155–181, **2017**.
- Piper, A. M., A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions – American Geophysical Union*, 25, 914-923, **1944**.
- Poşluk, E. Bozüyük (Bilecik) Güneydoğusu Tersiyer İstifi Stratigrafisi ve Yapısal Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2013**.
- Sanz, E., Rosas, P., Menendez-Pidal, I., Drainage and siphoning of a karstic spring: a case study, *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(3), 183-197, **2016**.
- Sánchez, D., Antonio Barberá, J., Mudarra, M., Andreo, B., Martín, J. F. Hydrochemical and isotopic characterization of carbonate aquifers under natural flow conditions, Sierra Grazalema Natural Park, southern Spain. *Geological Society, London, Special Publications*, 466(1), 275–293, **2017**.
- SCS, Hydrology – National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C, **1964**.
- SCS, Hydrology – National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C, **1972**.

- Schoeller, H., Les eaux souterraines, Mason et cie, Paris, 642 s., **1962**.
- Tarboton, D.G., Rainfall-Runoff Processes, Workbook, Utah State University, **2003**.
- TAGEM, Tarımsal Sulama Sektör Politika Belgesi, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Ankara, **2021**.
- Tezcan, L., Karst Akifer Sistemlerinin Trityum İzotopu Yardımıyla Matematiksel Modellemesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **1993**.
- Terzic, J., Markovic, T., Reberski, K. L., Hydrogeological properties of a complex Dinaric karst catchment: Miljacka Spring case study. Environmental Earth Sciences, 72(4), 1129–1142, **2014**.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Corine Nedir?, <https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/nedir.html> (Erişim tarihi: **1 Haziran 2024**).
- Thornthwaite, C.W., An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, 38, 55-94., **1948**.
- Thornthwaite, C.W., and Mather, J.R, The water balance: Centerton, N.J., Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, 8 (1), 1–104, **1955**.
- TS 266, İnsani Tüketim Amaçlı Sular, Türk Standartları Enstitüsü, ICS 13.060.20, Ankara, **2005**.
- TÜİK, Su ve Atıksu İstatistikleri, 2022, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atıksu-Istatistikleri-2022-49607> (Erişim tarihi: **29 Mayıs 2024**).
- TÜİK, Genel Nüfus Sayımları ve Adrese Dayalı Nüfus Sistemi Sonuçları, <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=n%C3%BCfus> (Erişim Tarihi: **07 Mayıs 2024**).
- US Salinity Laboratory Staff, Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, U.S. Dept. Agriculture Hand Book, (**1954**).
- USGS, Karst Aquifers, Water Resources Mission Area, (**2021**) <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/karst-aquifers> (Erişim Tarihi: **12 Ağustos 2024**).

- USGS, Surface Runoff and the Water Cycle, (2019) <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/surface-runoff-and-water-cycle> (Erişim Tarihi: **7 Eylül 2024**).
- Vogelbacher, A., Kazakis, N., Voudouris, K., Bold, S., Groundwater Vulnerability and Risk Assessment in A Karst Aquifer of Greece Using EPIK Method. *Environments*, 6(11), 116, **2019**.
- Yanık T., Aras, N.M. Çiltař A. K., Su Kalitesine Giriş Ders Notları, Ziraat Fakóltesi Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, **2001**.
- Yerbilimleri Portali, MTA, <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/> (Erişim Tarihi: **15 Eylül 2024**).
- Yılmaz, B., Bozüyük (Bilecik) Muratdere (Bozüyük-Bilecik)`deki Cu-Mo ve Au cevher oluşumlarının maden jeolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2005**.
- Zeydalinejad, N., Nassery, H. R., Shakiba, A., Alijani, F., Prediction of the karstic spring flow rates under climate change by climatic variables based on the artificial neural network: a case study of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6), **2020**.
- Wassmuth, S.T., Araguás, L.J., Cobia, L., Wassenaar, L.I., High spatial resolution prediction of tritium (3H) in contemporary global precipitation, *Scientific Reports*, 12(1), **2022**.
- Weather Spark, <https://weatherspark.com/y/95993/Average-Weather-in-Dodurga-Turkey-Year-Round> (Erişim Tarihi: **8 Temmuz 2024**).
- WHO, Guidelines for Drinking-water Quality, 4th Edition, WHO Library Cataloguing in Publication Data, **2017**.
- WRI, Aqueduct Water Risk Atlas, <https://www.wri.org/data/aqueduct-water-risk-atlas> (Erişim Tarihi: **26 Aralık 2023**).