

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL İLİ GENELİNDE YÖNETİLEN AKİFER ŞARJI (MANAGED
AQUIFER RECHARGE/MAR) POTANSİYEL ALANLARININ ÇOK
KRİTERLİ KARAR VERME ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özlem YILDIZ YÜKSEKOL

Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programı

OCAK 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL İLİ GENELİNDE YÖNETİLEN AKİFER ŞARJI (MANAGED
AQUIFER RECHARGE/MAR) POTANSİYEL ALANLARININ ÇOK
KRİTERLİ KARAR VERME ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özlem YILDIZ YÜKSEKOL
(706211024)**

Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı

Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Orkan ÖZCAN

OCAK 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 706211024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Özlem YILDIZ YÜKSEKOL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "İSTANBUL İLİ GENELİNDE YÖNETİLEN AKİFER ŞARJI (MANAGED AQUIFER RECHARGE/MAR) POTANSİYEL ALANLARININ ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Orkan ÖZCAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İrfan YOLCUBAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Semih Sami AKAY
İstanbul Topkapı Üniversitesi

Teslim Tarihi : **20 Aralık 2024**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2025**





Canım oğlum Umut Cem'e,



ÖNSÖZ

Bu çalışma “İstanbul İli Genelinde Yönetilen Akifer Şarjı (Managed Aquifer Recharge/MAR) Potansiyel Alanlarının Çok Kriterli Karar Verme Analizi ile Belirlenmesi” adıyla İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı, Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programına bağlı olarak yüksek lisans tezi olarak hazırlanmış olup, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 45173 proje numarası ile desteklenmiştir.

Yüksek lisans ders dönemimden itibaren değerli bilgi birikimini benimle paylaşan, İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri öğretim üyesi danışman hocam sayın Doç. Dr. Orkan ÖZCAN’a katkılarından dolayı saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavımda bilgi birikimlerini ve değerli katkılarını esirgemeyen jüri üyeleri İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın Prof. Dr. İrfan YOLCUBAL ve İstanbul Topkapı Üniversitesi Harita ve Kadastro Bölümü öğretim üyesi sayın Dr. Semih Sami AKAY’a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın önemli bir bölümünde kullanılmış olan çok önemli ve kıymetli verileri, tez çalışmam için paylaşan İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü’ne saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni hep destekleyen, her zaman yanımda olan annem Havva YILDIZ ve babam Hakkı YILDIZ’a sonsuz teşekkür ederim.

Her zaman desteklerini benden esirgemeyen değerli eşim Onur YÜKSEKOL’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın son 6,5 yılında bana eşlik eden ve büyük bir olgunlukla üçüncü kez tez yazmama şahit olan, -her ne kadar öğrenim hayatımın bitmesini içten içe dilese bile- beni bu şekilde kabul edip her zaman destek olmaya çalışan sevgili oğlum, hayat ışığım, küçük arkadaşım ve büyük mutluluk kaynağım Umut Cem YÜKSEKOL’a en içten, en derin sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2025

Dr. Özlem YILDIZ YÜKSEKOL
(Jeoloji Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	2
1.2 Literatür Özeti	5
1.3 Yönetilen Akifer Şarjı (Managed Aquifer Recharge-MAR).....	9
1.3.1 Yönetilen akifer şarjı yöntemleri (MAR) ve uygulamaları	11
2. ÇALIŞMA ALANI.....	17
3. VERİ VE YÖNTEM.....	21
3.1 Verilerin Elde Edilmesi ve Hazırlanması	21
3.2 AHP Yöntemi	29
3.2.1 Hidrojeoloji.....	32
3.2.2 Yükseklik	34
3.2.3 Eğim.....	36
3.2.4 Yağış	37
3.2.5 Arazi Örtüsü/Arazi Kullanım.....	39
3.2.6 Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü Farkı İndeksi (NDVI)	41
3.2.7 Eğri Numarası (Curve number - CN)	43
3.2.8 Yeraltı suyu seviyesi.....	44
3.2.9 Drenaj yoğunluğu	46
3.2.10 Toprak Tipi	48
4. BULGULAR.....	51
5. TARTIŞMA.....	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

AHP	: Analitik Hiyerarşı Prosesi
BM	: Birleşmiş Milletler
CHRS	: Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (Hidrometeoroloji ve Uzaktan Algılama Merkezi)
CN	: Eğri Numarası (Curve Number)
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü)
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
JHO	: Jeohidrolik Ortamlar
MAR	: Managed Aquifer Recharge
MCDA	: Multi Criteria Decision Analysis (Çok kriterli karar verme analizi)
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NDVI	: Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü Farkı İndeksi
SKA	: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
TOPSIS	: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği)
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü).



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Başlıca MAR tipleri, amaçları ve uygulama alanları.	13
Çizelge 3.1: AHP Karşılaştırma skalası ve açıklamaları (Saaty, 1980; Saaty, 2001).31	
Çizelge 3.2: Parametre sayısına göre RI (rastgele indeks) değerleri (Saaty, 1980)... 31	
Çizelge 3.3: Hidrojeoloji kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	33
Çizelge 3.4: Yükseklik kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	35
Çizelge 3.5: Eğim kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.36	
Çizelge 3.6: Yağış kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.38	
Çizelge 3.7: Arazi Örtüsü/Arazi Kullanım kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	40
Çizelge 3.8: NDVI kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	42
Çizelge 3.9: Eğri Numarası (CN) kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	43
Çizelge 3.10: Yeraltı suyu seviyesi kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	45
Çizelge 3.11: Drenaj yoğunluğu kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	47
Çizelge 3.12: Toprak tipi kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.	49
Çizelge 4.1: On kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisi.....	51
Çizelge 4.2: Yedi kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisi.	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Çalışma kapsamındaki işlem akışı.	4
Şekil 1.2: Farklı bölgelerde farklı amaçlara yönelik MAR uygulamaları (Alam ve diğ., 2021).	11
Şekil 1.3: Farklı bölgelerde uygulanan MAR metotları (Inowas (Url-1); Alam ve diğ., 2021).	12
Şekil 2.1: Çalışma alanı.	17
Şekil 2.2: İstanbul il alanı hidrojeolojik ortamlar haritası (İBB, 2020b).	19
Şekil 3.1: Çalışma alanı jeoloji haritası (İBB, 2018).	22
Şekil 3.2: Çalışma alanı hidrojeolojik ortamlar haritası.	22
Şekil 3.3: Çalışma alanı yükseklik haritası.	23
Şekil 3.4: Çalışma alanı eğim haritası.	24
Şekil 3.5: Yağış haritası.	25
Şekil 3.6: Arazi örtüsü/arazi kullanım haritası.	25
Şekil 3.7: NDVI haritası.	26
Şekil 3.8: Eğri numarası (CN-Curve Number) haritası.	27
Şekil 3.9: Yeraltı su seviyesi haritası.	27
Şekil 3.10: Drenaj yoğunluğu haritası.	28
Şekil 3.11: Toprak tipi haritası.	29
Şekil 3.12: Yeniden sınıflandırılmış hidrojeoloji haritası.	34
Şekil 3.13: Yeniden sınıflandırılmış yükseklik haritası.	35
Şekil 3.14: Yeniden sınıflandırılmış eğim haritası.	37
Şekil 3.15: Yeniden sınıflandırılmış yağış haritası.	39
Şekil 3.16: Yeniden sınıflandırılmış arazi örtüsü/arazi kullanımı haritası.	41
Şekil 3.17: Yeniden sınıflandırılmış NDVI haritası.	42
Şekil 3.18: Yeniden sınıflandırılmış eğri numarası (Curve Number-CN) haritası. ...	44
Şekil 3.19: Yeniden sınıflandırılmış yeraltı su seviyesi haritası.	46
Şekil 3.20: Yeniden sınıflandırılmış drenaj yoğunluğu haritası.	48
Şekil 3.21: Yeniden sınıflandırılmış toprak tipi haritası.	50
Şekil 4.1: MAR Projeleri için on kritere göre belirlenmiş potansiyel uygunluk haritası.	56
Şekil 4.2: MAR Projeleri için yedi kritere göre belirlenmiş potansiyel uygunluk haritası.	59
Şekil 4.3: On kriterli ve yedi kriterli uygunluk haritaları için ortak MAR için uygun alanlar haritası.	60
Şekil 4.4: On kriterli ve yedi kriterli modellerin ortak pikseller benzerlik haritası. ...	60



İSTANBUL İLİ GENELİNDE YÖNETİLEN AKİFER ŞARJI (MANAGED AQUIFER RECHARGE/MAR) POTANSİYEL ALANLARININ ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

İstanbul gibi yoğun nüfuslu ve hızlı kentleşen bir metropolde, iklim değişikliği, düzensiz yağış rejimleri ve artan su talebi, bu tür yenilikçi yaklaşımların gerekliliğini artırmaktadır. Bu çalışma, İstanbul'un su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için kapsamlı bir analiz sunarak, Yönetilen Akifer Şarjı (MAR) projelerinin uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. MAR, akiferlerin kontrollü bir şekilde yeniden doldurulması yoluyla yeraltı su rezervlerini artırmayı ve suyun doğal döngüsüne yeniden kazandırılmasını hedeflemektedir. MAR, sadece su kaynaklarının korunmasında değil, aynı zamanda taşkın riskinin azaltılması, yeraltı su seviyelerinin dengelenmesi ve ekosistemlerin korunması gibi çok yönlü faydalar sağlamaktadır. Özellikle ekonomik sürdürülebilirlik açısından, bu tür projeler hem tarım hem de sanayi sektöründe su kaynaklarına erişimi kolaylaştırarak ekonomik faydalar sunmaktadır.

Çalışmada, MAR için uygun alanların belirlenmesinde, hidrojeoloji, yükseklik, eğim, arazi kullanımı, yağış, normalleştirilmiş bitki örtüsü farkı indeksi, eğri numarası, yeraltı su seviyesi, drenaj yoğunluğu, toprak tipi ve gibi çok çeşitli kriterler kullanılmıştır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile bu kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile çeşitli analizlerle potansiyel alanlar görselleştirilmiştir. Bu kapsamda on kriterli, yedi kriterli, beş kriterli ve üç kriterli veri setlerinden ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiş ve her dört yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde, on kriterli analiz sonuçlarına göre İstanbul'un toplam yüzey alanının yaklaşık %25'inin MAR uygulamaları için uygun olduğu belirlenmiştir. Yedi kriterli analizde bu oran yaklaşık %24 olarak hesaplanmıştır. Beş kriterli analizde İstanbul'un toplam yüzey alanının yaklaşık %23'ünün, üç kriterli analizde ise yaklaşık %25'inin MAR uygulamaları için uygun olduğu belirlenmiştir. On kriterli ve yedi kriterli modellerin ortak haritası hazırlanıp, her iki analizde de uyum gösteren alanlar dikkate alındığında, bu oran %21 olarak bulunmuştur. On kriterli ve beş kriterli modellerin ortak haritası hazırlanıp, her iki analizde de uyum gösteren alanlar dikkate alındığında, bu oran %18 olarak bulunmuştur. On kriterli ve üç kriterli modellerin ortak haritası hazırlanıp, her iki analizde de uyum gösteren alanlar dikkate alındığında, bu oran %16'ya düşmektedir. Ayrıca, on kriterli analizde "5 numaralı çok uygun alanlar" 343 km², "4 numaralı uygun alanlar" ise 1043 km² olarak hesaplanmıştır. Yedi kriterli analizde ise "5 numaralı çok uygun alanlar" 283 km², "4 numaralı uygun alanlar" 1010 km² olarak bulunmuştur. On kriterli ve yedi kriterli modellerin ortak harita analizinde, "5 numaralı çok uygun alanlar" 259 km², "4 numaralı uygun alanlar" ise 908 km² olarak hesaplanmıştır. Beş kriterli analizde ise "5 numaralı çok uygun alanlar" 370 km², "4 numaralı uygun alanlar" 912 km² olarak bulunmuştur. On kriterli ve beş kriterli modellerin ortak harita analizinde, "5 numaralı çok uygun alanlar" 256 km², "4 numaralı uygun alanlar" ise 739 km² olarak hesaplanmıştır. Üç kriterli analizde ise "5

numaralı çok uygun alanlar” 627 km², “4 numaralı uygun alanlar” 741 km² olarak bulunmuştur. On kriterli ve üç kriterli modellerin ortak harita analizinde, “5 numaralı çok uygun alanlar” 300 km², “4 numaralı uygun alanlar” ise 554 km² olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar, MAR projelerinin uygulanabilirliği açısından kullanılan kriterlerin ve analiz yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır. Bu tez çalışması, İstanbul’un su yönetimi stratejilerinde rehber niteliğinde bir temel oluşturmaktadır. Çalışmada belirlenen potansiyel MAR alanları, yerel yönetimler, çevre koruma grupları ve diğer paydaşlar için önemli bir referans olacaktır. Bu sonuçlar, İstanbul’un su güvenliğini artırma, çevresel sorunları hafifletme ve ekonomik katkıları artırma hedeflerine ulaşılmasında uzun vadeli bir katkı sağlayacaktır. Çalışma, MAR yöntemlerinin uygulanabilirliği ve sürdürülebilir su yönetiminde etkili karar alma süreçlerine ışık tutmaktadır. Bu tez, su kaynaklarının korunması ve yönetiminde yenilikçi çözümler arayan diğer araştırmalar için de bir model teşkil etmektedir.



DETERMINATION OF POTENTIAL AREAS FOR MANAGED AQUIFER RECHARGE (MAR) IN ISTANBUL USING MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS

SUMMARY

This thesis focuses on identifying potential areas for Managed Aquifer Recharge (MAR) applications across Istanbul Province using a comprehensive Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) framework. As urbanization intensifies and climate change exacerbates water scarcity, the demand for sustainable water management strategies has become increasingly critical. MAR, an innovative approach to groundwater management, aims to replenish aquifers through controlled recharge techniques, ensuring reliable water sources for various uses while supporting ecological balance. The primary objective of this study is to determine the most suitable areas for MAR applications within Istanbul. This involves evaluating the region's hydrogeological, environmental, and climatic conditions to identify areas with high potential for successful MAR projects. Beyond geographical suitability, the study also considers economic, social, and environmental sustainability to provide a comprehensive decision-making framework. To achieve these goals, the research undertakes a comprehensive analysis of Istanbul's geological and hydrogeological characteristics to identify regions that are most favorable for Managed Aquifer Recharge (MAR). This involves applying Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) techniques in conjunction with GIS-based mapping to integrate diverse datasets and evaluate the suitability of various areas. Furthermore, the study assesses the identified MAR potential areas through an in-depth evaluation of their economic, social, and environmental impacts. These efforts collectively aim to contribute significantly to the development of sustainable water management strategies tailored to the unique challenges and opportunities present in Istanbul.

Istanbul, as Turkey's largest metropolitan area, faces significant challenges in managing its water resources due to rapid population growth, unplanned urban development, and erratic precipitation patterns. During the summer months, insufficient rainfall to replenish surface water sources, coupled with increased evaporation and water consumption, exacerbates water scarcity. Additionally, intense rainfall over impermeable urban surfaces often leads to flooding, causing substantial damage to infrastructure. MAR has the potential to address these challenges by storing excess rainwater underground and mitigating the adverse effects of urbanization on natural water cycles.

The study employs a rigorous methodology combining scientific evaluation and practical considerations, ensuring its findings are actionable and applicable to real-world scenarios. Managed Aquifer Recharge (MAR) is a globally recognized water management approach involving the deliberate recharge of aquifers through techniques tailored to specific regional needs. These methods aim to address issues such as seasonal water shortages, groundwater depletion, and salinity intrusion in

coastal aquifers. MAR techniques vary widely, including infiltration basins, injection wells, and the use of treated wastewater or stormwater for recharge.

The benefits of MAR extend beyond water storage, offering solutions for flood risk mitigation, enhancement of water quality through natural filtration, and maintenance of ecological flows during dry periods. MAR also provides a cost-effective alternative to more energy-intensive water supply options, such as desalination. In Istanbul's context, MAR could help manage the impacts of urbanization on groundwater systems while contributing to long-term water security and sustainability.

Istanbul, spanning both Europe and Asia, presents diverse geographical and climatic characteristics that influence its water resource management. The region features a mix of urbanized areas, agricultural lands, forests, and water bodies, each contributing uniquely to the hydrological cycle. With its strategic location and dense population, Istanbul experiences significant pressures on its water resources, making it a prime candidate for MAR applications.

The study area includes various geological formations with differing permeability and water retention capacities. These formations, coupled with topographical variations, play a crucial role in determining the feasibility of MAR projects. Additionally, Istanbul's climate, characterized by wet winters and dry summers, necessitates innovative solutions to balance seasonal water availability.

This research adopts a multi-criteria decision-making approach supported by Geographic Information Systems (GIS) to evaluate MAR potential. The methodology integrates ten criteria critical for assessing MAR suitability: hydrogeology, slope, elevation, precipitation, land use/land cover, normalized difference vegetation index (NDVI), curve number, groundwater level, drainage density, and soil type. These criteria were selected based on their relevance to MAR processes and were weighted using the Analytical Hierarchy Process (AHP). This structured technique allows for the systematic comparison of criteria, ensuring that their relative importance is accurately represented. GIS tools were employed to process and analyze spatial data, resulting in detailed maps illustrating MAR suitability across Istanbul. The ten-criteria analysis identified hydrogeology as the most influential factor, with a calculated weight of 22.22%. This reflects its direct impact on groundwater recharge, highlighting the importance of permeability, porosity, and aquifer water levels for the success of MAR projects. Elevation, with a weight of 3.95%, was recognized for its lower influence, as higher altitudes can impede water infiltration, reducing their suitability for MAR applications. Slope, weighted at 6.81%, affects water flow dynamics, where steeper slopes limit infiltration potential due to faster surface runoff. Precipitation, at 13.61%, plays a key role in determining the volume of water available for recharge, with intensity and distribution directly influencing MAR feasibility. Land use/land cover was weighted at 6.81%, emphasizing the role of natural vegetation and land use types, such as forests or agricultural fields, in promoting water percolation. NDVI, which measures vegetation health and density, was assigned a weight of 4.54%, underscoring its role in enhancing infiltration through healthy plant cover. The Curve Number, with a weight of 8.94%, indicates runoff potential, where lower values correlate with greater infiltration capacity. Groundwater level, weighted at 13.61%, represents the existing saturation conditions and the storage capacity of aquifers. Drainage density, with a weight of 9.07%, was identified as a critical factor, influencing surface water flow and infiltration dynamics. Finally, soil type also played a minor role with a weight of 5.44%, in determining recharge potential, emphasizing the layered influence of each criterion in MAR suitability.

To enhance the analysis, a secondary evaluation was conducted using a streamlined seven-criteria model focusing on the most influential factors: hydrogeology, groundwater level, drainage density, curve number, slope, land use/land cover, and soil type. This dual approach enabled a comprehensive comparison between detailed and simplified analyses, highlighting the trade-offs between precision and efficiency. The AHP normalization for the seven-criteria dataset revealed the weight distribution among the criteria. Hydrogeology was the most influential, with a weight of 34.84%, emphasizing its crucial role in MAR projects due to its representation of groundwater storage capacity and permeability. Effective groundwater recharge relies on identifying areas with favorable hydrogeological characteristics, particularly in achieving sustainable and efficient water management. The groundwater level, with a weight of 17.69%, reflects the current saturation state and the aquifers' capacity to store water. Drainage density with a weight of 10.94%, indicating its importance in managing surface runoff. High drainage density supports aquifer recharge by directing water flow to areas with infiltration potential, showcasing the natural drainage network's significance in MAR feasibility. The Curve Number, with a moderate weight of 11.48%, reflects its role in evaluating runoff influenced by soil type and land cover. This parameter is essential for identifying areas where infiltration can be maximized, thereby aiding in MAR success. Slope was weighted at 8.71%, reflecting its influence on water flow dynamics. Lower slopes facilitate infiltration, making them more suitable for MAR, while steeper slopes tend to increase surface runoff, reducing recharge potential. Land use/land cover, with equal impact with the slope which was weighted of 8.71%, remains important for understanding human activities and vegetation cover in assessing recharge suitability, particularly in urban or semi-urban areas. Lastly, soil type was recognized for its lesser direct impact on MAR with 7.62% weight.

In addition, after the seven-criteria analysis, AHP analyses consisting of five-criteria and three-criteria data sets were conducted according to the highest weight ratio. The criteria used in the five-criteria analysis and their weights are as follows; hydrogeology 41.31%, groundwater level 21.10%, drainage density 13.77%, curve number 13.49% and slope 10.33%. In the three-criteria analysis, hydrogeology was 54.35%, groundwater level 28.15%, curve number 17.50%.

Hydrogeology emerged as the most critical criterion, reflecting the importance of permeability and groundwater recharge capacity. Groundwater level, drainage density and curve number also played significant roles, indicating areas where reduced surface runoff promotes effective infiltration. Conversely, steep slopes and impermeable soils were identified as limiting factors for MAR feasibility.

In the analyses conducted within the scope of the study, according to the results of the ten-criteria analysis, it was determined that approximately 25% of the total surface area of Istanbul is suitable for MAR applications. In the seven-criteria analysis, this rate was calculated as approximately 24%. In the five-criteria analysis, it was determined that approximately 23% of the total surface area of Istanbul is suitable for MAR applications, and in the three-criteria analysis, approximately 25% of the total surface area of Istanbul is suitable for MAR applications. When the joint map of the ten-criteria and seven-criteria models was prepared and the areas showing agreement in both analyses were taken into consideration, this ratio was found to be 21%. When the common map of the ten-criteria and five-criteria models was prepared and the areas showing agreement in both analyses were taken into consideration, this rate was found to be 18%. When the joint map of the ten-criteria and three-criteria models is prepared

and the areas showing agreement in both analyses are taken into consideration, this rate decreases to 16%. In addition, in the ten-criteria analysis, “Highly suitable areas numbered 5” was calculated as 343 km² and “Suitable areas numbered 4” was calculated as 1043 km². In the seven-criteria analysis, “Highly suitable areas numbered 5” was found to be 283 km² and “Suitable areas numbered 4” was found to be 1010 km². In the joint map analysis of the ten-criteria and seven-criteria models, “Highly suitable areas numbered 5” was calculated as 259 km² and “Suitable areas numbered 4” was calculated as 908 km². In the five-criteria analysis, “Highly suitable areas numbered 5” were found to be 370 km² and “Suitable areas numbered 4” were found to be 912 km². In the joint map analysis of the ten-criteria and five-criteria models, “Highly suitable areas numbered 5” was calculated as 256 km² and “Suitable areas numbered 4” as 739 km². In the three-criteria analysis, “Highly suitable areas numbered 5” were found to be 627 km² and “Suitable areas numbered 4” were found to be 741 km². In the joint map analysis of the ten-criteria and three-criteria models, “Highly suitable areas numbered 5” were calculated as 300 km² and “Suitable areas numbered 4” as 554 km².

This study establishes a robust framework for identifying MAR potential areas in Istanbul, providing actionable insights for sustainable water management. The integration of MCDA and GIS tools ensures that the findings are both scientifically rigorous and practically relevant. The identified MAR zones offer opportunities for mitigating water scarcity, reducing flood risks, and enhancing ecological resilience. The implications of this research extend beyond Istanbul, offering a replicable model for other urban regions facing similar water management challenges. By promoting the adoption of MAR as a sustainable solution, this thesis contributes to the global discourse on innovative approaches to water resource management, aligning with broader goals of climate adaptation and sustainable development.



1. GİRİŞ

Uluslararası literatürde “Managed Aquifer Recharge” veya “MAR” olarak bilinen Yönetilen Akifer Şarjı, temel olarak akiferlerin daha sonra su kullanımı veya çevresel fayda için çeşitli tekniklerle yeniden doldurulmasıdır.

Son yıllarda, değişen iklim koşulları sebebiyle özellikle yaz mevsiminde yüzey sularını besleyecek yağışların yetersiz kalması, kurak dönemlerde buharlaşma oranı ve su tüketiminin artmasıyla, dünyanın birçok yerinde olduğu gibi İstanbul’da da alternatif su kaynakları ihtiyacını doğurmaktadır. Bununla birlikte, kısa sürede büyük hacimli yağışların düştüğü ve bu yağışların kent içinde geçirimsiz alanların geniş yayılımı sebebiyle sellere/taşkınlarla sebep olduğu ve altyapı-kanalizasyon sistemlerine hasar verdiği gözlenmektedir.

Yönetilen akifer şarjı, yeraltı sularının doğal olarak depolandığı akiferlerin, bölgeye özel tekniklerin uygulanması ile depoladığı su hacminin artırılmasıdır. Dünyada birçok örneği uygulanmış ve uygulanmakta olan “Yönetilen Akifer Şarjı” projeleri;

- Kurak dönemlerde daha stabil su temini sağlanması,
- Mevcut yeraltı suyu miktarına su eklenmesi,
- Akıntı ve taşkınların bertaraf edilmesi,
- Yeraltı suyu rezervuarlarının su seviyesindeki düşüşleri azaltmak veya ortadan kaldırılması,
- Tuzlu su girişini azaltılması veya durdurulması,
- Yeraltı suyu kalitesinin artırılması,
- Üretim mevsimlerinde kullanım için sezon dışı su depolamak,
- Minimum akım akışını artırılması ve göl seviyelerini korumak için depolanan suyun kuru dönemlerde salınmasına izin verilmesi (ekosistemden faydalanma),
- Arazi çökmesinin azaltılması gibi amaçlara hizmet etmektedir.

Kuraklığın afet boyutlarına ulaştığı yaz aylarında ve deprem gibi afet durumlarında yeraltı sularının kullanılabilir olabilmesi için öncelikle bu potansiyele sahip alanların belirlenmesi gerekmektedir. Tüm dünyanın ortak sorunu olan ve giderek artan su ihtiyacı göz bulundurulurken tasarlanan ve İstanbul’da, yeraltı sularının kurak dönemlerde kullanılmak üzere depolama kapasitesinin artırılması, doğal yağmur suyunun kazanımı ve afet risklerini azaltmanın amaçlandığı bu tez çalışmasında, “yönetilen akifer şarjı” potansiyeli olan bölgeler; çeşitli uzaktan algılama teknikleriyle birlikte ve coğrafi bilgi sistemleri analizleri ile belirlenmiştir. Bölgenin arazi kullanımı, eğim, morfoloji, toprak yapısı, yağış özellikleri, yeşil alanlar, drenaj, yeraltı su seviyesi, jeoloji ve hidrojeoloji gibi detaylı özellikleri dikkate alınarak analitik hiyerarşi süreci ile hem potansiyel alan için hem de kullanılacak teknikler için uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır.

Doğanın öneminin daha iyi anlaşıldığı ya da anlaşılması gerektiği bu yüzyılda, çevremizi korurken yenilikçi çözümler üretmek kaçınılmaz hale gelmiştir. Tatlı su tüm içme, kullanma, tarımsal ve endüstriyel amaçlar için kullanılmakta olduğu için çok önemlidir ve mümkün olduğunca israf edilmeden doğal ortamında korunmalıdır. Suyun buharlaşmayla kaybını önlemek, daha sonra kullanılmak üzere akifer kapasitesini artırmak veya çok önemli bir su kaynağı olan yağmur suyunu daha sonra kullanılmak üzere yeraltında depolamak veya doğal su döngüsüne kazandırmak için yönetilen akifer şarjı potansiyel alanlarını belirleyip, sonraki aşamada etüt yapılabilecek pilot bölgelere karar verilmesi gerekmektedir. Bu tez sonucu itibarıyla ile özellikle kentsel alanlarda geçirimli alanların ve suyun toplanıp yeraltına kazandırılabilmesi potansiyel MAR alanlarının tespiti ile su kaynaklarını yönetme, kuraklıkla mücadele, fazla suyun afetlere yol açmasının önlenmesi ve mikroklimatik koşulların korunması sağlanabileceğinden elde edilen çıktıları son derece önemlidir.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının temel amacı, İstanbul’da yeraltı suyu depolama ve zenginleştirme (Managed Aquifer Recharge, MAR) projeleri için potansiyel alanların belirlenmesidir. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, hızla artan nüfus, iklim değişikliği ve plansız kentleşme gibi sorunlarla mücadelede kritik bir öneme sahiptir. İstanbul hem Türkiye’nin en büyük metropolü hem de ekonomik faaliyetlerin yoğunlaştığı bir merkez olarak, bu baskıların en yoğun şekilde hissedildiği şehirlerden biridir. Özellikle

kuraklık risklerinin artması ve mevcut su kaynaklarının kullanımında yaşanan sıkıntılar, alternatif su yönetimi stratejilerinin uygulanmasını bir zorunluluk haline getirmiştir.

MAR projeleri, yeraltı su kaynaklarının doğal yöntemlerle beslenmesini ve mevcut su varlıklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak bu sorunlara çözüm sunmaktadır. Ancak bu tür projelerin başarısı, uygulanacağı alanların doğru bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Bu tez çalışmasında, İstanbul'un doğal, hidrojeolojik ve çevresel koşullarına uygun olarak MAR projeleri için en ideal bölgelerin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın ana hedefleri şunlardır:

1. İstanbul'un jeolojik, hidrojeolojik ve çevresel faktörlerini inceleyerek MAR projelerine uygun bölgelerin belirlenmesi.
2. Çok kriterli karar verme analizleri (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak, bilimsel ve objektif bir değerlendirme yapılması.
3. İstanbul için uzun vadeli, sürdürülebilir bir su yönetim planının oluşturulmasına katkı sağlanması.

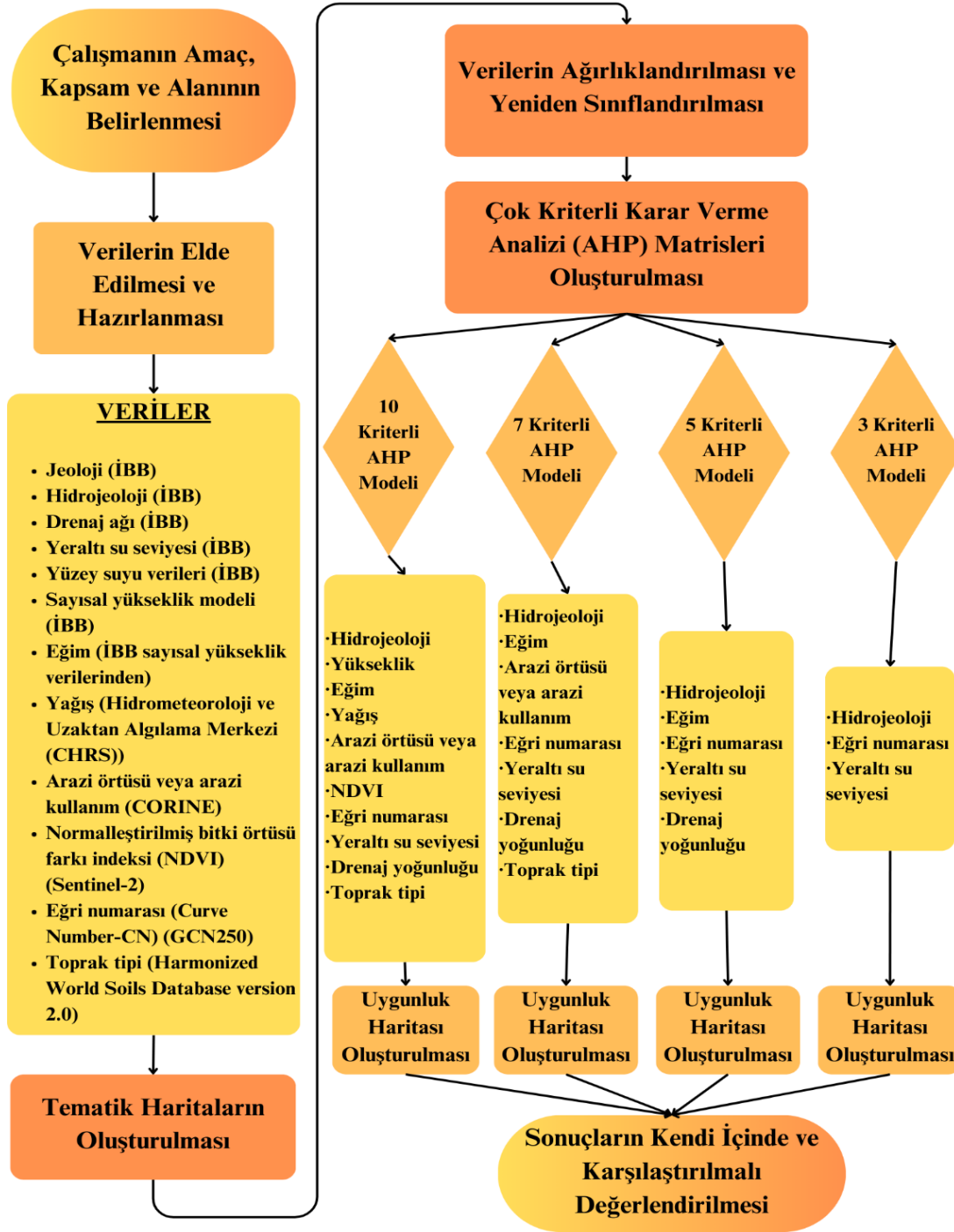
Kontrolsüz yeraltı suyu çekimi, iklimsel değişiklikler, nüfus artışı, geleneksel su kaynaklarının azalması, değişen iklim koşullarından dolayı kurak dönemlerde oluşan aşırı buharlaşma nedeniyle yeraltı suları tehlikeye girmektedir. Bu sebeple alternatif çözümler üretilmesi gerekmektedir.

Bu projenin amacı, başta analitik hiyerarşi süreci ve diğer CBS uygulamaları ile İstanbul'da yeraltı suyunun depolanması ve zenginleştirilmesi için potansiyel alanları belirlemektir. Dünya literatüründe benzer çalışmalarda bu tür çalışmalar yaygınlaşmasına rağmen, geçirgen alanlar genellikle yüzeysel olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada bölgenin jeolojik özellikleri de değerlendirilerek, litolojik özelliklere dayalı yüzey altı geçirgenlik durumu da incelenmiştir.

Uzaktan algılama sistemleri, şehirlerin ve ülkelerin arazi kullanımı/kaplaması hakkında bilgi edinmede en kısa ve en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu proje kapsamında kentsel yapılaşma, arazi kullanımı, jeoloji, eğim, morfoloji, drenaj ağı, litolojik birimlerin geçirgenliği ve gözenekliliği gibi detaylı özellikler bir arada

değerlendirilerek analitik hiyerarşi süreci ile uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır. Tüm parametreler göz önünde bulundurularak analitik hiyerarşi süreci ile yönetilen akifer şarjı potansiyeli olan alanlar belirlenmiştir. Çalışma kapsamındaki tüm süreçler Şekil 1.1’de özetlenmiştir (Şekil 1.1).

Bu çalışmanın sonuçlarının hem akademik hem de pratik anlamda su kaynakları yönetimi alanına değerli bir katkı sunması beklenmektedir.



Şekil 1.1: Çalışma kapsamındaki işlem akışı.

1.2 Literatür Özeti

Yaakob (2008), tez çalışmasında çok kriterli karar verme (MCDM) problemlerini çözmek için TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution-İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği) yöntemine bulanık sistemler ve ağları entegre ederek yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu araştırmada, fayda ve maliyet kriterlerini alt sistemler olarak ele alan bir metodoloji geliştirilmiştir. Çalışmanın temel katkıları arasında, karar verme sürecindeki belirsizliklerin üstesinden gelmek için tip-1, tip-2 ve Z bulanık kümelerinin kullanımı yer almaktadır. Ayrıca, karar analizini geliştirmek amacıyla kural tabanlı toplama ve birleştirme işlemlerine sahip bulanık ağlar tanıtılmıştır. Performans göstergeleri olan Spearman Rho ve Kendall Tau korelasyonları kullanılarak geliştirilen yöntemlerin karşılaştırmalı doğrulaması yapılmıştır. Metot, finansal varlıkların sıralandığı bir borsa senaryosunda uygulanarak geliştirilen algoritmaların pratik kullanımı gösterilmiştir. Çalışmada, karar vermedeki belirsizliklerin klasik MCDM teknikleriyle yeterince ele alınamadığı vurgulanmış ve bulanık kümelerle TOPSIS yönteminin entegrasyonunun karmaşık karar ortamlarında daha sağlam, şeffaf ve uygulanabilir çözümler sunduğu belirtilmiştir. Bu yöntem, çevre yönetimi, kaynak tahsisi ve finansal piyasa gibi alanlarda kesin sıralama ve alternatifler arasında seçim gerektiren durumlarda uygulanabilir olarak değerlendirilmiştir.

Page ve diğ. (2018), şehirlerin artan su gereksinimlerini sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için gelecekte su kaynaklarını ve depolama yöntemlerini çeşitlendirmenin gerekliliğini vurgulamışlardır. Çalışmada yönetilen akifer şarjı (MAR) uygulamalarının şehir bölgelerinde su kaynaklarını çeşitlendirmek amacıyla benimsenmesinde gecikmeler yaşandığını belirtilmiş ve MAR uygulamalarının sürdürülebilir şehir su yönetimini desteklemek için örnekler sunulmuştur. Yeniden şarj edilen su kaynakları farklı kaynaklardan sağlanabilmekte ve şehirlerde MAR, kullanılmayan yağmur suyu ve arıtılmış atıksu gibi kaynakları geri dönüştürme ve su kaynaklarını maksimize etme fırsatı sunmakta olduğu vurgulanmıştır. Sonuç kısmında, MAR uygulamalarında, şehirlerde sürdürülebilir su yönetimini desteklemek için etkili bir araç olduğuna ancak bu tür projelerin benimsenmesini engelleyen, son gelişmelerin yetersiz bilinirliği, maliyetlerin şeffaflığının eksikliği ve şehir su kaynaklarının ve çevre yönetiminin parçalı yapısı gibi bazı faktörlerin bulunduğu belirtilmiştir.

Sallwey ve diğ. (2018), MAR projelerinin uygulanabilirliğini değerlendiren çok kriterli karar verme (MCDA) yöntemlerini detaylı bir şekilde ele almıştır. Çalışmada, MAR projelerinde kullanılan kriterlerin çeşitliliği, ağırlıklandırma yöntemleri ve uygunluk haritaları doğruluk oranları karşılaştırılmıştır. MAR projelerinin başarısını artırmak için veri kalitesinin önemine vurgu yapılmıştır. Veri eksikliğinin MAR uygulamaları üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek için disiplinler arası bir yaklaşım benimsenmesi gerektiği belirtilmiştir. Çalışma, MAR'ın sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinde nasıl entegre bir çözüm sunabileceğini göstermekle birlikte, MCDA yöntemlerinin bu süreçteki potansiyelini de ortaya koymuştur. Özellikle Afrika ve Asya gibi bölgelerde MAR uygulamaları için yerel veri setlerinin oluşturulmasının kritik önem taşıdığı belirtilmiştir.

Sandoval ve diğ. (2019), Filipinler'in düşük yağışlı ve yüzey suyunun sınırlı olduğu bölgelerde yeraltı suyunun önemli bir su kaynağı olduğunu belirtip, son yıllarda Filipinler'in birçok bölgesinde yeraltı suyunun tükenmesi ve kirlenmesi sorunlarının ortaya çıktığını ve hızlı kentleşmenin doğal akifer yeniden şarjını olumsuz etkilediğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada, seçilen havzalarda yapay yeraltı suyu şarjı için potansiyel alanları belirlemek hedeflenmiş olup, farklı faktörler, yapay yeraltı suyu şarjı için uygun alanları tanımlamada kullanılmıştır. Sonuçlar, AHP kullanarak etkilerine göre sıralanmış ve çoğu alanın orta derecede uygun olduğu bulgusuna varılmıştır.

Zhang ve diğ. (2019), Çin'in kuzey bölgelerinde MAR projeleri için uygun alanların belirlenmesine yönelik bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, bölgedeki yeraltı su seviyelerinin düşmesi ve tarımsal su talebinin artması sebebiyle MAR'ın önemi vurgulanmıştır. Araştırmada, analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve GIS yöntemleri birleştirilerek uygunluk haritaları oluşturulmuş ve MAR projelerinin su döngüsü üzerindeki olumlu etkileri incelenmiştir. Ayrıca, MAR'ın tarımsal sulama ve içme suyu ihtiyaçlarını karşılamada uzun vadeli bir çözüm sunduğu belirtilmiştir. MAR projelerinin uygulanabilirliğini artırmak için tarım politikalarının yeniden düzenlenmesi gerektiği ve çiftçilerin bu tür projeler konusunda bilinçlendirilmesinin önemi vurgulanmış olup, MAR projelerinin yeraltı suyu kalitesini iyileştirebileceğini de gösterilmiştir.

Toosi ve diğ. (2020), coğrafi bilgi sistemlerini (CBS), çok kriterli analizleri ve hidrolojik modelleri bir araya getirerek yağmur suyu hasadı (RWH) bölgelerini

seçmeyi amaçlayan bu çalışmada sosyo-ekonomik faktörleri içeren potansiyel RWH alanlarını belirlemek için CBS tabanlı çok kriterli karar analizi (MCDA) sunulmaktadır. Bu faktörler, drenaj ağlarından uzaklık, yollar, kentsel alanlar, fay hatları, çiftlikler ve kuyular gibi unsurları içermektedir. Önerilen metodoloji, İran'ın kuzeydoğusundaki Mashhad Ovası Havzası gibi büyük bir alanda uygulanmış olup, çalışma alanının %48'sinin RWH için uygun olmadığını göstermiştir. Geri kalan alan, zayıf, orta ve iyi RWH potansiyeline sahip üç bölgeye ayrılmış ve bu bölgeler sırasıyla toplam potansiyelin %31'ini, %43'ünü ve %26'sını kapsamaktadır. İyi RWH potansiyeli olan bölgeler için en iyi uygulamaların göletler, kontrol barajları ve teraslamalar olduğu belirtilmiş olup bununla birlikte her bir sistem tarafından alınabilecek ön tahmini yağış miktarı da sunulmuştur.

Zghibi ve diğ. (2020), Tunus'un kurak ve yarı kurak bölgelerinde MAR projelerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, coğrafi bilgi sistemleri (GIS) tabanlı çok kriterli karar analizi (MCDA) yöntemi kullanılmıştır. Arazi kullanımı, eğim, toprak yapısı, hidrolojik parametreler ve mevcut su kaynaklarının kalitesi gibi faktörler dikkate alınarak uygunluk haritaları oluşturulmuştur. Sonuçlar, MAR projelerinin özellikle geçirgen topraklara sahip bölgelerde etkili olduğunu göstermiştir. MAR'ın bölgesel su kıtlığını azaltmada stratejik bir çözüm sunabileceği ancak bu tür projelerin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için yerel yönetimlerin ve toplulukların projeye aktif katılımının sağlanması gerektiği savunulmuştur. Sosyal kabul ve ekonomik sürdürülebilirlik faktörlerinin MAR projelerinin başarısındaki kritik rolü vurgulanmıştır.

Jhariya ve diğ. (2021), Hindistan'ın Raipur kentinde MAR için uygun alanların belirlenmesine yönelik bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, GIS tabanlı çok kriterli karar analizi (MCDA) ve elektriksel direnç ölçümleri kullanılmıştır. Jeoloji, jeomorfoloji, yağış, toprak yapısı ve eğim gibi parametreler değerlendirilerek uygunluk haritaları oluşturulmuştur. Araştırmada, MAR uygulamalarının yeraltı suyu potansiyelini artırma potansiyeli ortaya konmuş ve bu sonuçların %80 doğruluk oranıyla yerel veri setleriyle doğrulandığı belirtilmiştir. Özellikle kentsel alanlarda yeraltı suyu tükenmesini önlemek için MAR'ın kullanılabilirliği gösterilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemin gelecekteki kentsel su yönetimi projelerinde önemli bir bileşen olabileceği ifade edilmiştir.

Papadopoulos ve diğ. (2022), sel sularının kullanılması yoluyla yönetilen akifer şarjı (MAR) sistemlerinin uygulanması için tercih edilen alanların seçimi için hibrit bir bulanık çok kriterli metodoloji önermiştir. Bu çok kriterli denklemde, dokuz kriter seçilmiş ve yedi şarj alanı göz önünde bulundurulmuştur. Kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için logaritmik bulanık tercih programlamasına dayalı bir bulanık analitik hiyerarşi süreci (FAHP) kullanılmıştır. Çalışmada önerilen metodoloji, Yunanistan'ın Kuzeydoğu bölgesindeki Xanthi ilinin güneydoğusundaki tarımsal ova akifer sisteminde uygulanmıştır.

Mouhoumed ve diğ. (2023), Djibouti gibi kurak ve su stresi yaşayan bir ülkede bulanık analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve ideal çözüme benzerlik sırası tekniği (TOPSIS) yöntemlerini birleştirerek bir model oluşturmuş ve MAR yapıları için uygun alanları belirlemişlerdir. Çalışmada dokuz karar kriteri belirlenmiştir. Ayrıca, TOPSIS yöntemi kullanılarak karar katmanları birleştirilmiş ve çalışma alanı önceliklendirilmiştir. Sonuçlar, yağış, eğim ve NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gibi faktörlerin en etkili karar parametreleri olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmada Djibouti'nin %16,38'inin çok yüksek, %17,96'sının yüksek ve %30,41'inin orta derecede MAR faaliyetleri için potansiyele sahip olduğu ortaya koyulmuştur.

Kawara ve diğ. (2023), MAR uygulamalarının su kaynakları yönetimindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, Japonya'da hem kırsal hem de kentsel bölgelerde MAR projelerinin uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve bu projelerin su kaynaklarının sürdürülebilirliğine olan katkısı detaylı bir şekilde ele alınmıştır. MAR projelerinde kullanılan teknolojilerin maliyet etkinliği analiz edilmiş ve özellikle yağmur suyu hasadıyla desteklenen sistemlerin başarı oranını artırdığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, MAR uygulamalarının, yerel toplulukların su ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini artırdığı ve aşırı yağış dönemlerinde su depolama potansiyelini geliştirdiği vurgulanmıştır. MAR uygulamalarının yaygınlaşması için kamu farkındalığının artırılması, eğitim programlarının düzenlenmesi ve devlet desteklerinin önemi öne çıkarılmıştır.

Martins ve diğ. (2024), Güney Portekiz'de MAR uygulanabilirliği için bir değerlendirme çalışması yapmıştır. Çalışmada, GIS ve MCDA yöntemleri birleştirilmiştir. AHP ve AGREEMAR gibi iki farklı ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak MAR için uygun alanlar belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, bölgenin %78'inin orta düzeyde MAR uygunluğuna sahip olduğunu, %22'sinin ise

yüksek uygunluk gösterdiğini ortaya koymuştur. AGREEMAR yöntemi, sosyal ve ekonomik faktörlerin entegrasyonunu sağlayarak daha geniş bir bakış açısı sunmuştur. Ayrıca, ağırlık değişimlerinin sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için duyarlılık analizi yapılmış ve AGREEMAR yönteminin daha kararlı sonuçlar verdiği bulunmuştur. MAR projelerinin su kaynakları yönetim stratejilerine katkı sağlayabileceği ve bu tür projelerin uygulama sürecinde paydaş katılımının kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır.

1.3 Yönetilen Akifer Şarjı (Managed Aquifer Recharge-MAR)

Yeraltı suyu, dünyanın en önemli tatlı su kaynaklarından biridir ve yaklaşık 2,5 milyar insanın günlük yaşamında hayati bir rol oynamaktadır. Günümüzde yeraltı suyu kaynakları, aşırı tüketim, kirlilik, tarımsal faaliyetler ve iklim değişikliği gibi faktörler nedeniyle büyük bir baskı altındadır. İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri, su döngüsünde değişiklikler, kuraklık ve seller gibi aşırı sonuçlar, kutup ve dağ buzullarının erimesi, toprak neminde değişiklikler gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021). Ayrıca, tarımsal faaliyetler için kaynaklardan aşırı su çekilmesi ve suyun verimli kullanılmaması gibi nedenlerle birçok tatlı su ekosistemi, ekonomik ve ekolojik değerini yitirmektedir (Uyduranoğlu Öktem ve Aksoy, 2014). Bu sorunların çözümü için geliştirilen yöntemlerden biri olan Yönetilen Akifer Şarjı (Managed Aquifer Recharge-MAR), doğal veya yapay yollarla yeraltı suyu akiferlerinin yeniden beslenmesini sağlayarak su kaynaklarını daha sürdürülebilir hale getirmeyi hedeflemektedir. MAR projeleri, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile özellikle SKA 6 (Temiz Su ve Sanitasyon), SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) ve SKA 13 (İklim Eylemi) kapsamında, suyun güvenli, sürdürülebilir ve etkili bir şekilde yönetilmesi için temel çözümler sunabilir olduğundan doğrudan ilişkilidir. Bu tür uygulamalar, suyun kontrollü bir şekilde yeraltı akiferlerine yönlendirilmesiyle, su depolama, taşkın yönetimi, su kalitesinin iyileştirilmesi ve ekolojik sistemlerin desteklenmesi gibi çok çeşitli faydalar sunmaktadır. Bu yöntem, özellikle su kıtlığı yaşayan bölgelerde, şehirleşmenin yoğun olduğu alanlarda ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir araç olarak kullanılmaktadır.

Yönetilen Akifer Şarjı, yeraltı suyu akiferlerinin planlı ve kontrollü bir şekilde suyla beslenmesini ifade etmektedir. Bu süreçte yüzey suları (nehir, göl, yağmur suyu gibi),

arıtılmış atık sular veya diğer su kaynakları kullanılarak yeraltı suyu seviyeleri yükseltilmekte ve akiferler korunmaktadır. İklim değişikliği etkilerinin ve bölgesel su sıkıntılarının gözlendiği çağda olduğumuz göz önünde bulundurulursa, MAR yöntemlerinin, suyun yeniden kullanılabilirliğini artırması ve doğal kaynakları koruyarak ekonomik ve ekolojik faydalar sağlaması önümüzdeki yıllarda daha da çok önem kazanacaktır. Bu yüzden şimdiden uygun alanların güvenilir verilere dayanılarak tespit edilmesinin ileride yapılacak uygulama projeleri için büyük adımlar olacağı düşünülmektedir. MAR yöntemleri hem kentsel hem de kırsal alanlarda uygulanabilmekte ve başlıca aşağıdaki alanlarda etkili çözümler sunmaktadır (Gale, 2005; Alam ve diğ., 2021; Dillon ve diğ., 2022):

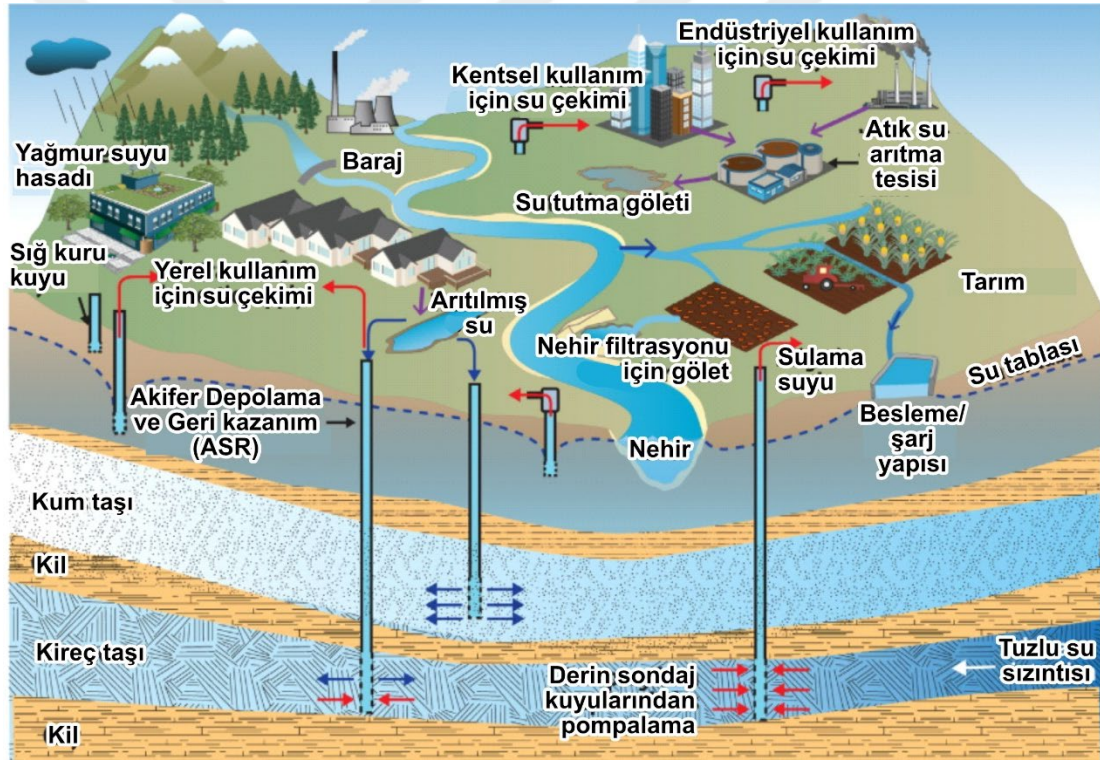
1. Su kıtlığına çözüm ve su kalitesinin artırılması: Su kıtlığının olduğu bölgelerde, yeraltı suyu rezervlerinin yeniden şarjını sağlar. Yeraltına sızan su, doğal filtrasyon süreçlerinden geçerek temizlenir.
2. Doğal filtrasyon: Su, yeraltına sızma sürecinde doğal bir filtrasyon geçirerek su kalitesini artırır.
3. Taşkın yönetimi: Fazla suyun depolanmasını sağlayarak taşkın risklerini azaltır.
4. Ekosistem koruma: Yeraltı suyu seviyelerinin artırılması, sulak alanlar ve tarımsal faaliyetler için kritik olan ekosistemleri destekler. Kuraklık, yağış düzensizlikleri ve aşırı hava olaylarının etkilerini azaltmak için esnek bir çözüm sunar.

Yönetilen Akifer Şarjı (MAR) yöntemleri, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik etkileriyle de dikkat çekmektedir. MAR uygulamaları, özellikle su kıtlığı yaşayan bölgelerde sürdürülebilir su kaynakları yönetimi sağlayarak ekonomik anlamda önemli faydalar sunmaktadır. Örneğin, tarımsal üretkenliği artırarak ekonomik kazanç sağlar ve uzun vadede suyun taşınması ve depolanmasıyla ilgili maliyetleri düşürür (Dillon ve diğ., 2022). Bunun yanı sıra, MAR projeleri, suyun doğal filtrasyon sürecinden geçmesiyle su kalitesini artırır ve arıtma maliyetlerini azaltır. Ancak, MAR projelerinin uygulanabilirliği, başlangıç maliyetlerinin yüksekliği, altyapı ihtiyaçları ve yerel yönetimlerle toplulukların koordinasyonu gibi faktörlerle sınırlı olabilir (Ward ve Dillon, 2011). Ayrıca, MAR sistemlerinin yanlış yönetilmesi durumunda yeraltı suyu kirliliği ve çevresel bozulma gibi ekonomik zararlara da yol açabileceği belirtilmiştir (Sallwey ve diğ., 2018). Bu bağlamda, MAR

uygulamalarının ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak için iyi planlanmış ve yerel koşullara uygun bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

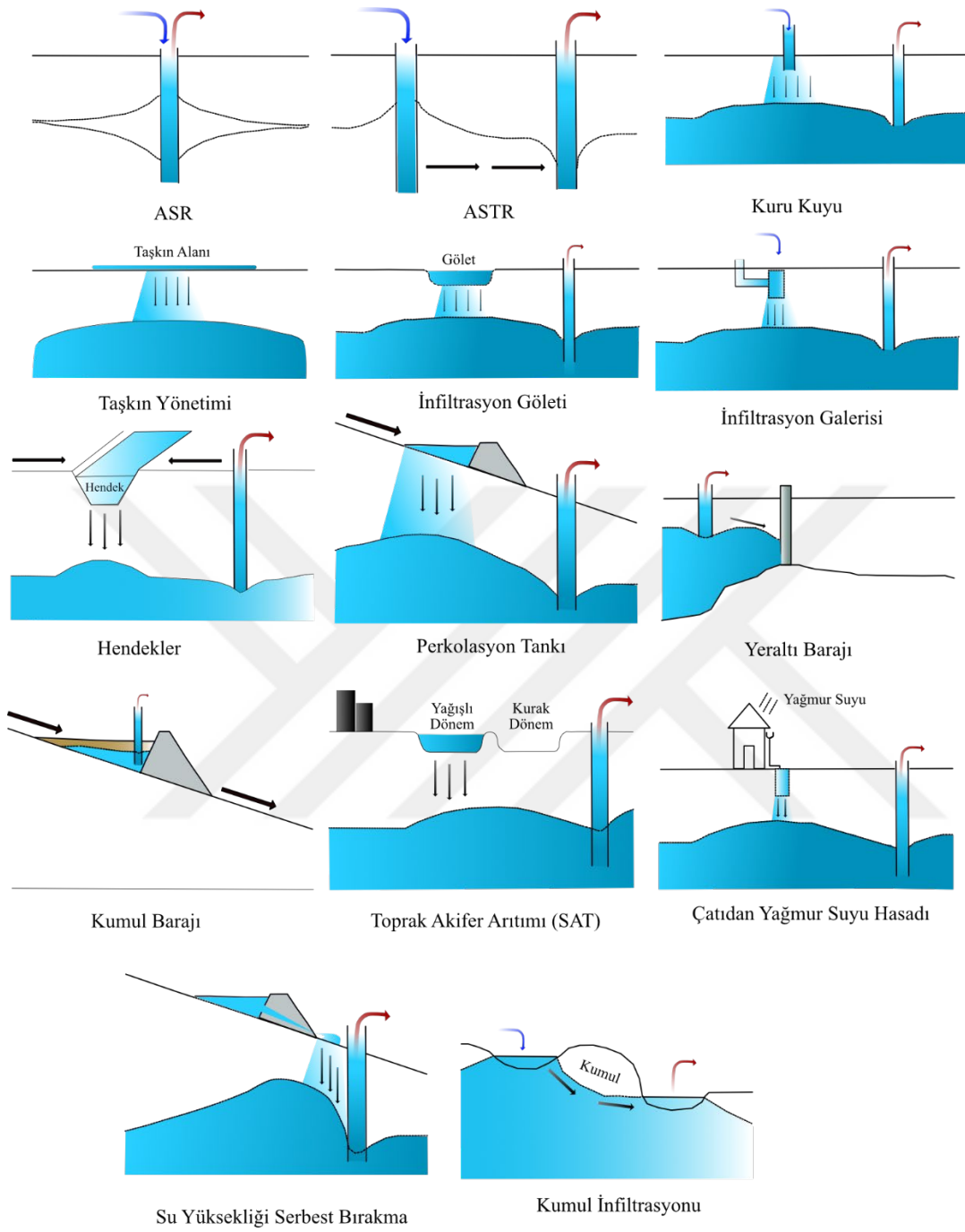
1.3.1 Yönetilen akifer şarjı yöntemleri (MAR) ve uygulamaları

MAR, uygulandığı bölgenin jeolojik yapısına, hidrojeolojik özelliklerine ve mevcut su kaynaklarına bağlı olarak farklı yöntemlerle uygulanabilir (Şekil 1.1). Managed Aquifer Recharge (MAR), sürdürülebilir su yönetimi için yenilikçi ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, suyun sadece kısa vadeli ihtiyaçlarını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda uzun vadede su kaynaklarının korunmasına, iklim değişikliğine uyuma ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Özellikle su kıtlığı ve aşırı su kullanımı gibi sorunlarla mücadelede kritik bir araç olan MAR, doğal kaynakların korunması ve toplumsal faydaların artırılması açısından büyük bir potansiyele sahiptir.



Şekil 1.2: Farklı bölgelerde farklı amaçlara yönelik MAR uygulamaları (Alam ve diğ., 2021).

Farklı bölgelerde uygulanan MAR metotları Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Ayrıca başlıca MAR yöntemleri, amaç ve uygulama örnekleri Çizelge 1.1'de derlenmiştir. Çizelgede de görüldüğü üzere farklı kaynaklardan, hangi yöntemlerin hangi ortamlar için uygun olduğu, hangi çalışmaların hangi amaçlarla yapıldığı alıntılanmıştır. Aynı zamanda bu yöntemlerin daha önce uygulanmış lokal örnekleri de Çizelge 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.3: Farklı bölgelerde uygulanan MAR metotları (Inowas (Url-1); Alam ve diğ., 2021).

Çizelge 1.1:Başlıca MAR tipleri, amaçları ve uygulama alanları.

MAR Tipi	Tanım	Yöntem	Amaç	Uygun Alanlar	Uygulama Örneği	Kaynak
Akifer Depolama ve Geri Kazanım (Aquifer Storage and Recovery- ASR)	Su, yeraltı kuyuları aracılığıyla akiferlere enjekte edilir ve ihtiyaç halinde geri alınır.	Kuyular aracılığıyla suyun derin yeraltı tabakalarına enjekte edilmesi.	Yeraltı suyunu depolamak ve kurak dönemlerde su sağlamak.	Kentsel ve kıyı bölgeleri.	ABD (Florida): İçme suyu depolama.	Dillon ve diğ. (2022), UNESCO (2021)
Akifer Depolama, Transfer ve Geri Kazanım (Aquifer Storage, Transfer, and Recovery - ASTR)	ASR'nin bir varyasyonu; su, başka bir noktadan geri pompalanır.	Su bir kuyudan enjekte edilir, başka bir kuyudan geri alınır.	Daha geniş su paylaşım sistemleri kurmak.	Dağlık veya geçiş bölgeleri.	Avustralya (New South Wales): Bölgesel su transferi.	Dillon ve diğ. (2022), Maliva ve Missimer (2012)
Kuru Kuyular (Dry Well)	Su, kuru kuyular aracılığıyla yeraltına yönlendirilir.	Kuru kuyular, yeraltı suyu seviyesini artırmak için kullanılır.	Yeraltı su seviyesini artırmak ve taşkınları yönetmek.	Kurak bölgeler, suyun az olduğu yerler.	ABD (Nevada): Kuru kuyu ile su temini.	Dillon ve diğ. (2022), UNESCO (2021)
İnfiltrasyon Galerisi (Infiltration Gallery)	Su, galeriler aracılığıyla yeraltına yönlendirilir.	Geçirgen yüzeylerde galeriler açılır, su bu galeriler aracılığıyla yeraltına sızdırılır.	Yüzey sularını yeraltına aktararak su seviyelerini artırmak.	Kentsel alanlar ve kıyı bölgeleri.	Avrupa (Belçika): Su arıtımı ve yeraltı suyu temini.	Dillon ve diğ. (2022), Gale (2005)

Çizelge 1.1 (devam): Başlıca MAR tipleri, amaçları ve uygulama alanları.

MAR Tipi	Tanım	Yöntem	Amaç	Uygun Alanlar	Uygulama Örneği	Kaynak
Nehir Filtrasyonu (Bank Filtration)	Nehir suyu, yeraltı su tabakasına süzülerek pompalanır.	Nehir suyunun yeraltı su tabakasına süzülmesi için filtreleme sistemleri kullanılır.	Su kalitesini artırmak ve suyu depolamak.	Nehir kenarı ve deltalar.	Almanya (Elbe Nehri): İçme suyu temini.	Dillon ve diğ. (2022), Gale (2005)
İnfiltrasyon Göleti/Havuzu (Infiltration Pond)	Su, yüzeydeki gölet ve havuzlardan yeraltına sızdırılır.	Geçirgen topraklarda geniş havuzlar oluşturulur ve su bu alanlarda tutulur.	Yeraltı suyunu yenilemek ve taşkınları kontrol etmek.	Tarımsal alanlar ve düşük eğimli bölgeler.	İsrail (Tel Aviv): Sulama için su depolama.	UNESCO (2021), FAO (2015)
Kumul Filtrasyonu (Dune Filtration)	Kumullarda yeraltına su sızdırılarak doğal filtreleme yapılır.	Su, kumullar yoluyla yeraltına sızdırılır ve filtelenir.	İçme suyunun doğal yollarla filtelenmesi.	Sahil bölgeleri ve kumul alanları.	Hollanda: İçme suyu arıtımı.	Dillon ve diğ. (2022), UNESCO (2021)
Toprak Akifer Arıtımı (Soil Aquifer Treatment - SAT)	Kısmen arıtılmış atık suyun toprak yoluyla filtelenerek yeraltına sızdırılması.	Kısmen arıtılmış atık su, yüzeyden infiltrasyon yoluyla yeraltına iletilir.	Su kalitesini iyileştirmek ve yeraltı suyunu yenilemek.	Kentsel alanlar ve kıyı bölgeleri.	İsrail (Dan Bölgesi): Atık su arıtımı.	Maliva ve Missimer (2012), Dillon ve diğ. (2022)

Çizelge 1.1 (devam): Başlıca MAR tipleri, amaçları ve uygulama alanları.

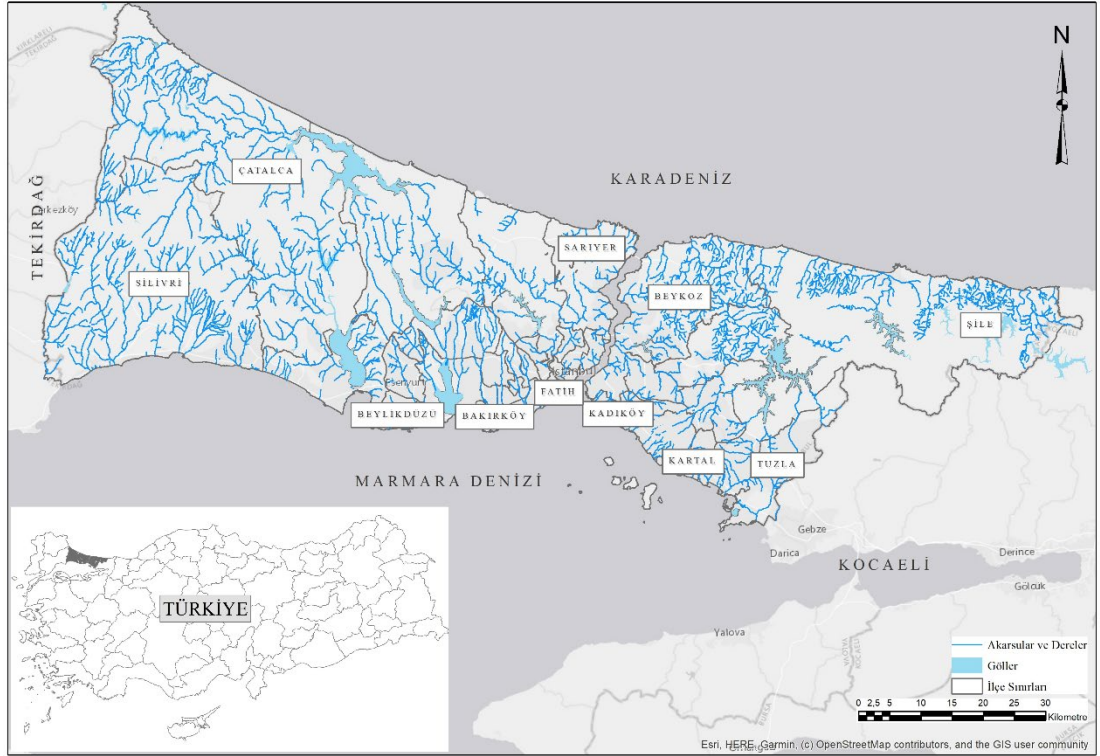
MAR Tipi	Tanım	Yöntem	Amaç	Uygun Alanlar	Uygulama Örneği	Kaynak
Perkolasyon Tankları (Percolation Tank)	Yağmur suyu toplamak ve depolamak için sığ depolar oluşturulur.	Yağmur suyunun tutulduğu ve yeraltına yönlendirildiği depolama tankları.	Yağışlı dönemlerde su toplamak, yeraltı su seviyesini artırmak.	Kurak ve yarı kurak bölgeler.	Hindistan: Tarımsal su yönetimi.	UNESCO (2021), Gale (2005)
Yeraltı Barajları (Subsurface Dam)	Yeraltında geçirimsiz bariyerler inşa edilerek suyun tutulması.	Akiferlerde geçirimsiz bariyerler oluşturulur, su yeraltında tutulur.	Su kaybını önlemek ve yeraltı suyu depolamak.	Kuru ve yarı kurak bölgeler.	Brezilya: Tarımsal sulama.	UNESCO (2021), Gale (2005)
Kum Barajı (Sand Dam)	Kum barajları inşa edilerek suyun yeraltına yönlendirilmesi.	Kum barajları kullanılarak su biriktirilir ve yeraltına yönlendirilir.	Su depolamak ve taşkınları kontrol etmek.	Yüksek eğimli bölgeler ve kurak bölgeler.	Kenya: Su temini için kum barajları.	Dillon ve diğ. (2022), UNESCO (2021)
Su Yüksekliği Serbest Bırakma (Recharge Release)	Su, yeraltı sistemlere serbest bırakılarak yeniden beslenir.	Su doğrudan yeraltına bırakılır ve doğal olarak emilir.	Su seviyelerini yükseltmek, su depolama sağlamak.	Kurak bölgeler, sulama alanları.	Hindistan ve Avustralya: Su seviyelerini artırma ve sulama projeleri.	Dillon ve diğ. (2022), Gale (2005)

Çizelge 1.1 (devam): Başlıca MAR tipleri, amaçları ve uygulama alanları.

MAR Tipi	Tanım	Yöntem	Amaç	Uygun Alanlar	Uygulama Örneği	Kaynak
Hendekler (Trenches)	Yağmur suyunu toplamak ve yönlendirmek için kazılmış açık kanallar.	Yağmur suyunun açık hendekler aracılığıyla toplanması ve yeraltına yönlendirilmesi.	Erozyonu önlemek, yeraltı suyunu artırmak.	Eğimli araziler ve yarı kurak bölgeler.	Hindistan: Toprak koruma projeleri.	FAO (2015), Gale (2005)
Bariyerler ve Setler (Barriers and Bunds)	Yağmur suyunun yönünü değiştirmek ve akışını yavaşlatmak için kullanılan yapılar.	Akış yönünü değiştiren veya suyun birikmesini sağlayan bariyerlerin kurulması.	Yeraltı suyunu artırmak, sel kontrolü.	Dağlık ve eğimli bölgeler.	Nepal: Toprak yönetimi.	FAO (2015), Gale (2005)
Taşkın Yöntemi (Flooding)	Yağmur suyu veya sel sularının kontrollü şekilde belirli bir alan üzerinde biriktirilmesi.	Sel ve yüzey akışının yeraltına sızdırılması.	Sel kontrolü ve yeraltı suyu şarjı.	Düz araziler ve su taşkınına eğilimli alanlar.	Mısır: Obruk tarımı.	UNESCO (2021), Bouwer (2002)
Akış Toplama (Runoff harvesting)	Yağıştan gelen yüzey akışını depolama yapıları ile toplamak ve su kaybını azaltmak.	Toplanan akışın yeraltına sızdırılması.	Suyun korunması ve stratejik depolama.	Kurak ve yarı kurak bölgeler.	Kenya: Topluluk su projeleri.	Gale (2005), Bouwer (2002)

2. ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı tüm İstanbul'dur. İstanbul, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan, Avrupa ve Asya kıtalarını birleştiren stratejik bir şehirdir. Türkiye'nin en büyük metropolü ve aynı zamanda kültürel, ekonomik ve sosyal anlamda merkezi konumunda olan İstanbul, toplamda 5461 km²'lik bir yüzey alanına sahiptir. Avrupa ve Asya kıtalarını birleştiren İstanbul Boğazı, şehri doğal bir şekilde iki bölgeye ayırır. İstanbul'un yüzey alanının 1898 km²'lik kısmı Avrupa yakasında, 3563 km²'lik kısmı ise Asya yakasında yer almaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Çalışma alanı.

Şehrin toplam yüzey alanının yaklaşık %44'ü ormanlardan oluşmaktadır, tarım alanları ve yerleşim yerleri de şehirde önemli bir yer tutmaktadır (İSTKA, 2022; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024). İstanbul'un topoğrafyası genelde değişken bir yapıya sahiptir ve bu özellik, şehirde arazi kullanımı ve su yönetimini doğrudan etkilemektedir. Yükseklik değerleri 0 metre (deniz seviyesinden) başlayarak, en yüksek nokta olan Aydos Tepesi'nde 538 metreye kadar çıkmaktadır (İBB, 2020a).

Şehir, kuzey-güney yönlü Çatalca Platosu (Avrupa yakası) ve Kocaeli Platosu (Asya yakası) arasında yer almaktadır. Şehir, kuzeyde Karadeniz, güneyde Marmara Denizi ve doğuda Boğaziçi ile çevrelenmiştir. İstanbul'un topografik yapısı, su kaynaklarının dağılımını ve taşkın potansiyelini de şekillendirmektedir (İSKİ, 2024).

İstanbul'da Akdeniz iklimi ile Karadeniz iklimi arasında geçiş özellikleri gösteren bir iklim yapısı hâkimdir. Yazlar sıcak ve nemli, kışlar ise serin ve yağışlı geçmektedir. Şehrin yıllık ortalama sıcaklığı yaklaşık 14,8°C olup, yıllık ortalama yağış miktarı 662,5 mm'dir (Url-2). Yağışlar genellikle kuzeyde Karadeniz etkisiyle artış gösterirken, güneyde Marmara kıyılarında daha az yağış almaktadır. Şehirde en yağışlı dönem sonbahar ve kış aylarıdır. Kar yağışı ise genellikle ocak ve şubat aylarında görülmektedir (Url-2).

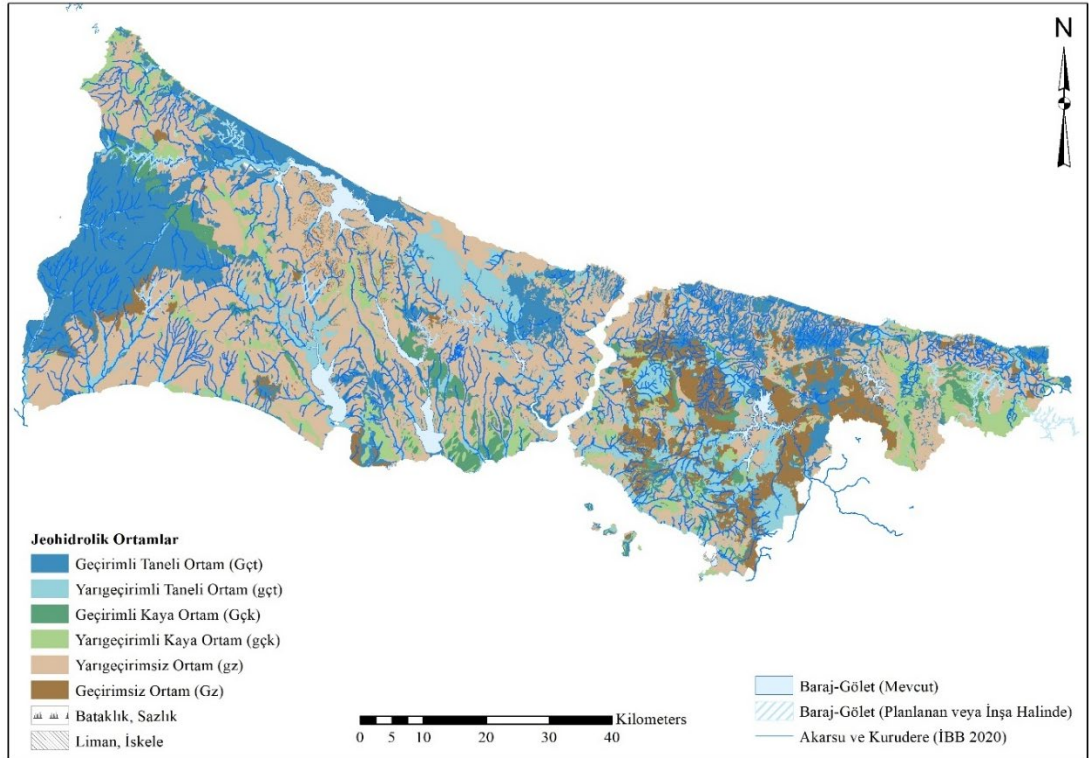
Şehrin doğal bitki örtüsü, Karadeniz ormanları ile Akdeniz bitki örtüsü arasında geçiş özellikleri taşır. Kuzey bölgelerinde geniş yapraklı meşe, kayın ve kestane gibi orman türleri yaygındır. Bunun yanında güney bölgelerinde maki ve fundalık türleri bulunur (Url-3). Ancak şehirleşmenin etkisiyle doğal bitki örtüsünde ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Ormanlık alanların yoğunluğu, özellikle kuzey bölgelerde görülmekle birlikte bu alanlar da son yıllarda kentleşme ve altyapı projelerinin baskısı altındadır.

İstanbul, Türkiye'nin en hızlı büyüyen şehirlerinden biridir. 2024 itibarıyla nüfusu 16 milyonu aşmış olup, bu nüfusun %64'ü Avrupa yakasında yaşamaktadır (Url-4). İstanbul, iç göçle birlikte uluslararası göçlerin de en fazla hedeflediği şehirlerden biridir. Şehrin nüfus yoğunluğu, arazi kullanımını ve doğal kaynaklara olan talebi artırmaktadır. Özellikle su kaynakları üzerindeki baskı, nüfus artışı ve kuraklık gibi etmenlerle daha da büyümüşür (İSKİ, 2024).

İstanbul'da su kaynakları hem yeraltı hem de yüzey suları bakımından önem arz eder. Şehrin su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan önemli su kaynakları arasında Terkos Gölü, Büyükçekmece Gölü ve Ömerli Barajı gibi yüzey suyu kaynakları yer almaktadır (İSKİ, 2024). Bununla birlikte, yeraltı suları da özellikle taşkın dönemlerinde stratejik bir rol oynar. Ancak bu kaynaklar, artan nüfus, plansız kentleşme ve iklim değişikliği gibi faktörler nedeniyle giderek daha fazla baskı altındadır (FAO, 2015).

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından 2020 yılında hazırlanmış olan "İstanbul İl Alanının Hidrojeolojik Ortamları" adlı

rapora göre litolojik birimler geçirimsizlik ve gözenekliliklerine göre; geçirimli taneli ortam (Gçt), geçirimli kaya ortam (Gçk), yarı geçirimli taneli ortam (gçt) ve yarı geçirimli kaya ortam (gçk) olarak 4 grup olarak tanımlanmıştır. Söz konusu rapora göre (İBB, 2020b), geçirimli taneli ortamlar (Gçt), Avrupa yakasında Silivri'nin kuzeyi, Kilyos'un güneyi ve Terkos Gölü'nün batısı civarında geniş alanlar kaplamaktadır; Anadolu yakasında ise, Karadeniz'e bakan taraflarda Kocaeli il sınırına yakın kesimlerde yaygın olarak görülmektedir (Şekil 1.2). Geçirimli kaya ortamlar (Gçk), Avrupa yakasında Büyükçekmece Gölü-Haliç arasında ve Çatalca civarında gözlemlenirken, Anadolu yakasının doğusunda dağınık halde birkaç bölgede gözlemlenmektedir (Şekil 1.2). Yarı geçirimli taneli ortamlar (gçt), Avrupa yakasında en geniş yayılımı Sarıyer civarında gösterirken, Anadolu yakasının batı ve güney kesimlerinde yer yer dağılım göstermektedir (Şekil 1.2). Yarı geçirimli kaya ortamlar (gçk), Avrupa yakasının güneyinde Küçükçekmece Gölü civarında ve kuzey batı kesimlerinde yer yer gözlemlenirken, Anadolu yakasında ise Kocaeli il sınırına yakın kesimlerde geniş alanlar halinde dağılım göstermektedir (Şekil 1.2).



Şekil 2.2: İstanbul il alanı hidrojeolojik ortamlar haritası (İBB, 2020b).

Tarım alanları, İstanbul'un kuzey ve doğu bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Çatalca ve Şile gibi ilçeler, tarımsal faaliyetlerin merkezindedir. Bu alanlar genellikle tahıl, sebze ve meyve üretimi için kullanılmaktadır. Ancak, hızlı kentleşme ve sanayileşme nedeniyle

tarım alanlarında azalma gözlemlenmektedir. İstanbul'un sınırlı tarım alanları, sürdürülebilir arazi kullanım planlamasını gerekli kılmaktadır (FAO, 2015).

Tüm bu coğrafi, demografik ve doğal özellikler, İstanbul'un yönetilen yeraltı suyu besleme (MAR) projeleri için farklı fırsatlar ve kısıtlamalar sunduğunu göstermektedir. Şehrin heterojen yapısı, MAR projelerinin uygulanacağı alanların dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini ve planlanmasını gerektirir.



3. VERİ VE YÖNTEM

Bu kısım iki bölümden oluşmaktadır. Birinci kısımda veriler ve verilerin kaynakları ve analizler için hazır hale getirilmesinden bahsedilecek olup, ikinci kısımda kullanılan ağırlıklı hiyerarşi yönteminden (AHP) bahsedilecektir.

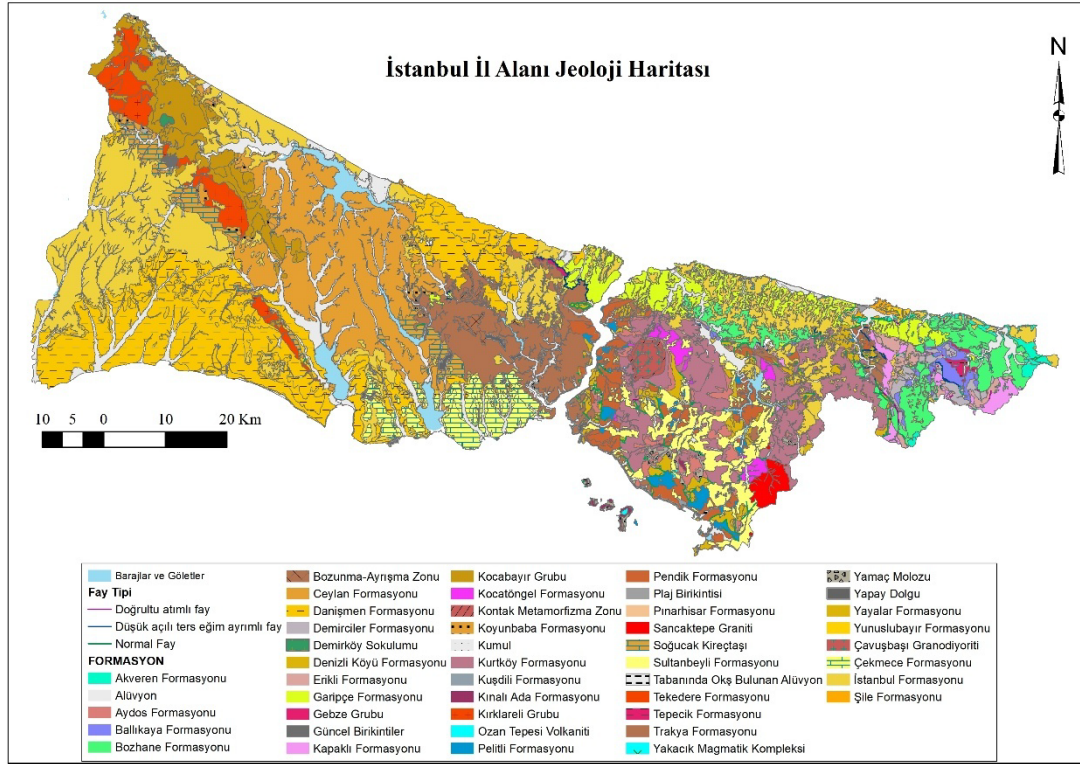
3.1 Verilerin Elde Edilmesi ve Hazırlanması

MAR projelerinin başarıyla uygulanabilmesi için kapsamlı ve doğru verilere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, güvenilir verileri elde etme aşaması, çalışmanın temel yapı taşıdır. Veri derleme işlemine kamu kurumlarında bulunan çalışma ile ilgili mevcut veriler araştırılarak başlanmıştır. Çalışma ile ilgili en güncel verilerin İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü'nde bulunduğu gözlemlenmiştir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü ile irtibata geçilerek jeoloji (Şekil 3.1), hidrojeoloji (drenaj ağı, yeraltı su seviyesi ve yüzey suyu verileri dahil olarak) ve sayısal yükseklik modeli verileri direkt olarak kurumdan elde edilmiştir. Hem kurumdan hem de diğer kaynaklardan elde edilen veriler çeşitli tekniklerle düzenlenerek tematik haritalar oluşturulmuştur.

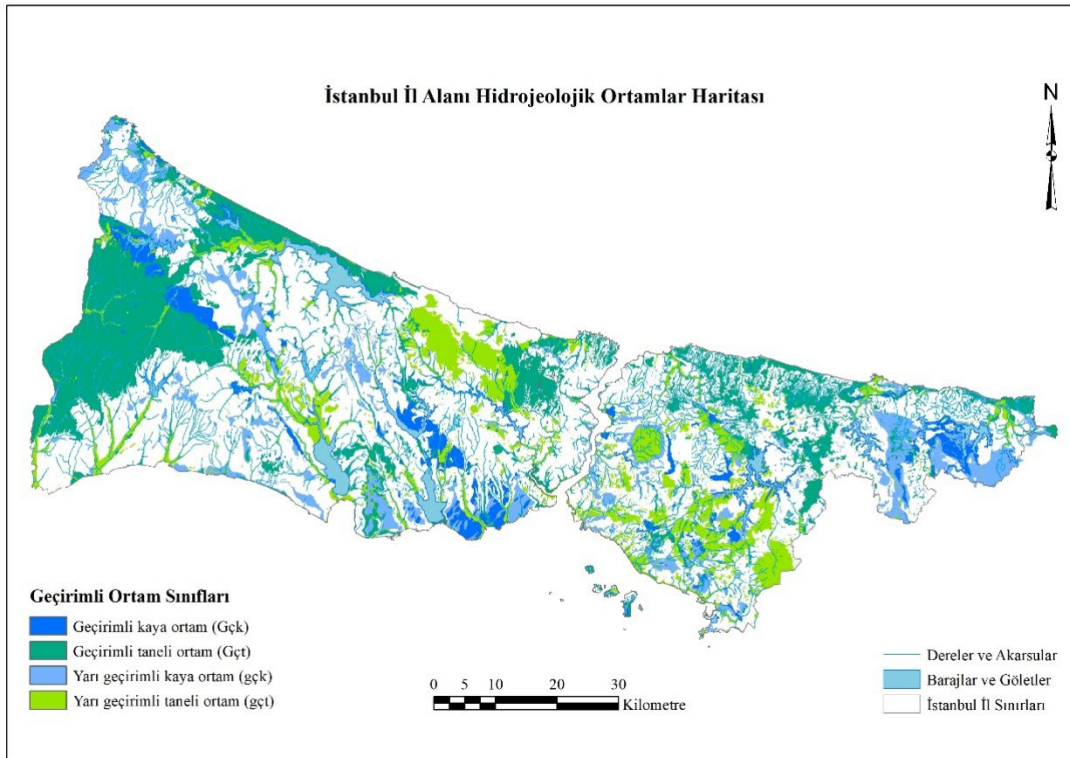
MAR projelerinde, suyun yeraltına sızması ve depolanması, akiferlerin geçirgenlik özelliklerine bağlıdır. Yüksek geçirgenliğe sahip akiferler, suyun hızlı ve etkin bir şekilde depolanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bölgedeki jeolojik formasyonların su geçirgenliği ve depolama kapasitesinin iyi tanımlanmış olması çok önemlidir. 2024 yılında İBB tarafından yapılmış olan hidrojeoloji çalışması kapsamında İstanbul için en güncel veriler bulunmaktadır (İBB, 2020b).

Bu rapor kapsamında hazırlanan hidrojeoloji haritası vektör veri formatında ve iki parça harita halinde teslim alınmıştır. Daha sonra vektör veri formatındaki iki harita birleştirilmiş ve jeohidrolik ortamlar (JHO) sınıfına göre düzenlenip raster veri formatına dönüştürülmüştür. Raster veri formatına dönüştürülürken hidrojeoloji çalışmada en önemli kriter olarak kullanıldığı için geçirimli ve yarı geçirimli ortamlar

dikkate alınmış olup, diğer ortamlar (liman, bataklık vs.) veya litolojik olarak geçirimsizlik özelliği elverişli olmayan kısımlar dikkate alınmamıştır (Şekil 3.2).

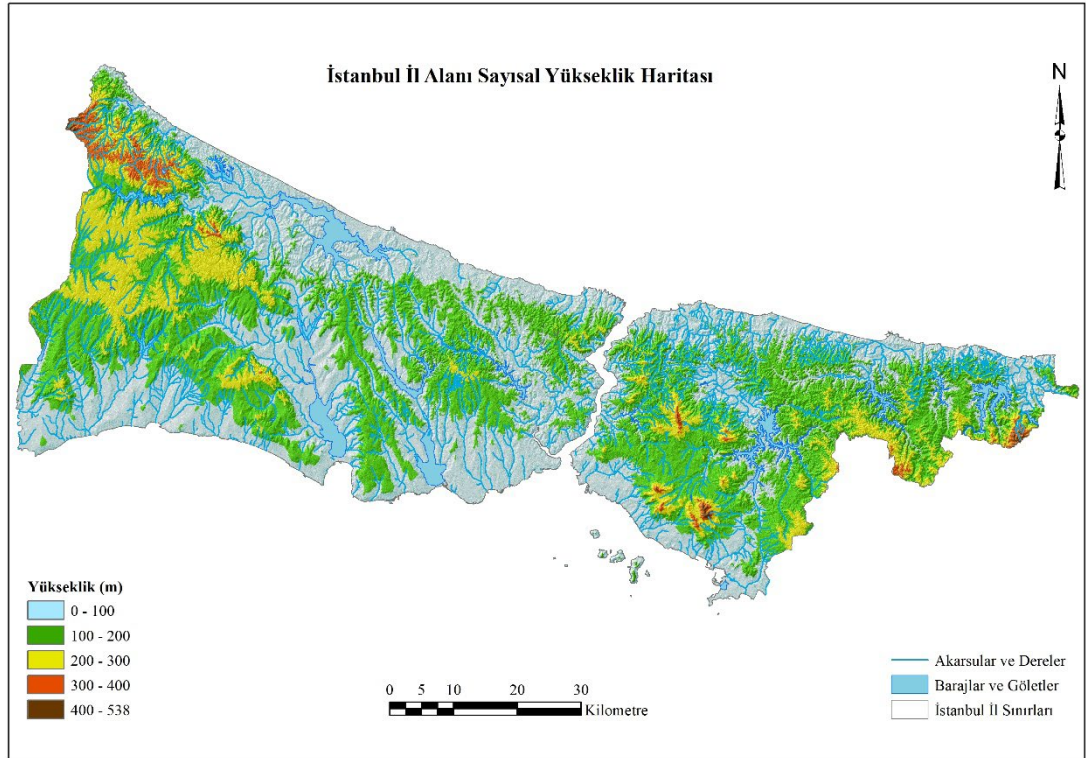


Şekil 3.1: Çalışma alanı jeoloji haritası (İBB, 2017).



Şekil 3.2: Çalışma alanı hidrojeolojik ortamlar haritası.

Yükseklik, suyun yerçekimi etkisiyle hareketini ve basınç gradyanlarını etkilemektedir. Yüksek rakımlı bölgelerde, suyun aşağı yönlü hareketi doğal bir avantaj sağlayabilmektedir, fakat yükseklik farkları, suyun pompalanması ve dağıtımı için enerji gereksinimlerini ve dolayısıyla maliyetleri artırabilir. Yükseklik verisi daha önce de bahsedildiği gibi kurumdan elde edilmiştir. Raster veri formatında olan bu veri tüm İstanbul birleşik olacak halde düzenlenip, yükseklik değerleri sınıflanarak harita üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3.3).

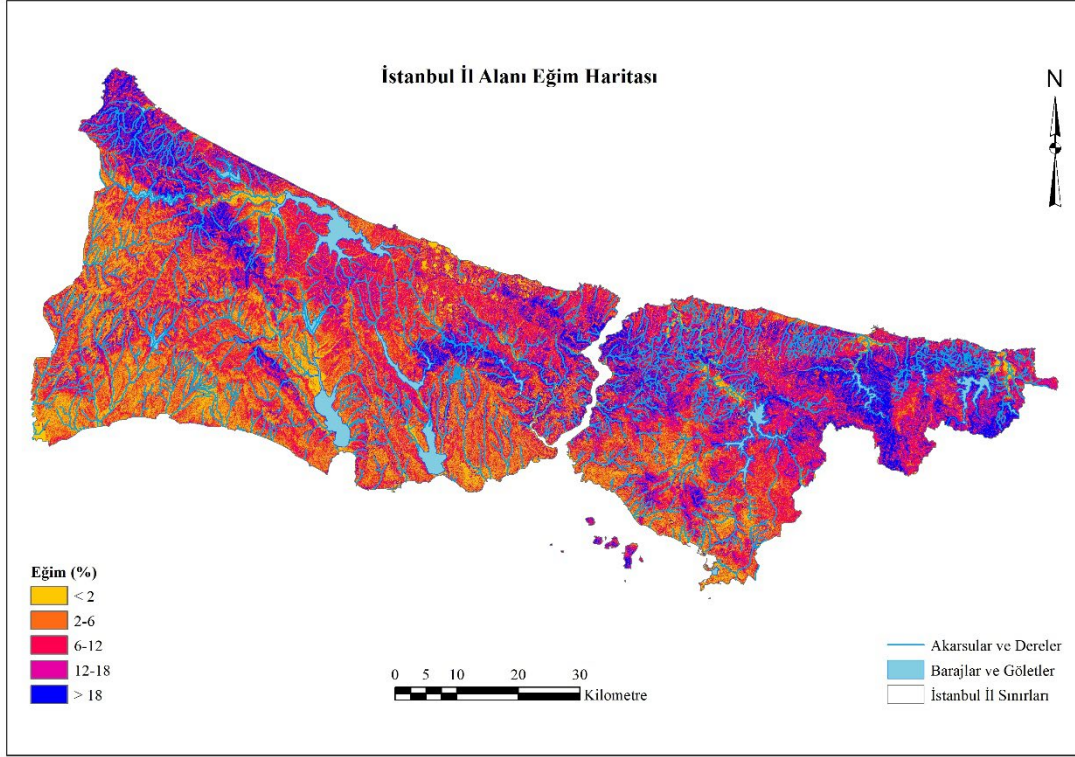


Şekil 3.3: Çalışma alanı yükseklik haritası.

Arazi eğimi, suyun yüzeyden yeraltına sızma hızını ve yönünü belirlemektedir. Yüksek eğimli arazilerde, yüzey akışı artarak suyun yeraltına sızması azalabilir ve bu durum, MAR projelerinin verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Arazi eğimi, MAR projelerinin planlanmasında kritik bir faktördür. Eğim, İBB’den elde edilmiş olan sayısal yükseklik modeli verilerinden ArcGIS 10.8.2 programında “3D analyst tools” sekmesi altında bulunan “raster surface” ve “slope” araçlarıyla (tool) ile hazırlanmıştır (Şekil 3.4).

Yağış; Hidrometeoroloji ve Uzaktan Algılama Merkezi (CHRS) sitesinden yıllık olarak, 2003-2021 yılları arasındaki veriler elde edilmiştir (Url-5). ArcGIS 10.8.2 programında önce “spatial analyst tools” sekmesi altında bulunan “map algebra” ve “raster calculator” araçlarında 2003-2021 yılları arasındaki verilerin ortalama raster

verisi oluşturulmuştur. Daha sonra aynı programda “conversion tools” sekmesi altında bulunan “from raster” ve “raster to point” araçları kullanılarak raster veri nokta verisine dönüştürülmüştür. Üçüncü aşama olarak ise bu nokta verileri kullanılarak bir enterpolasyon yöntemi olan “IDW” analizi (spatial analyst tools_interpolation_IDW) kullanılarak yağış haritası oluşturulmuştur (Şekil 3.5).

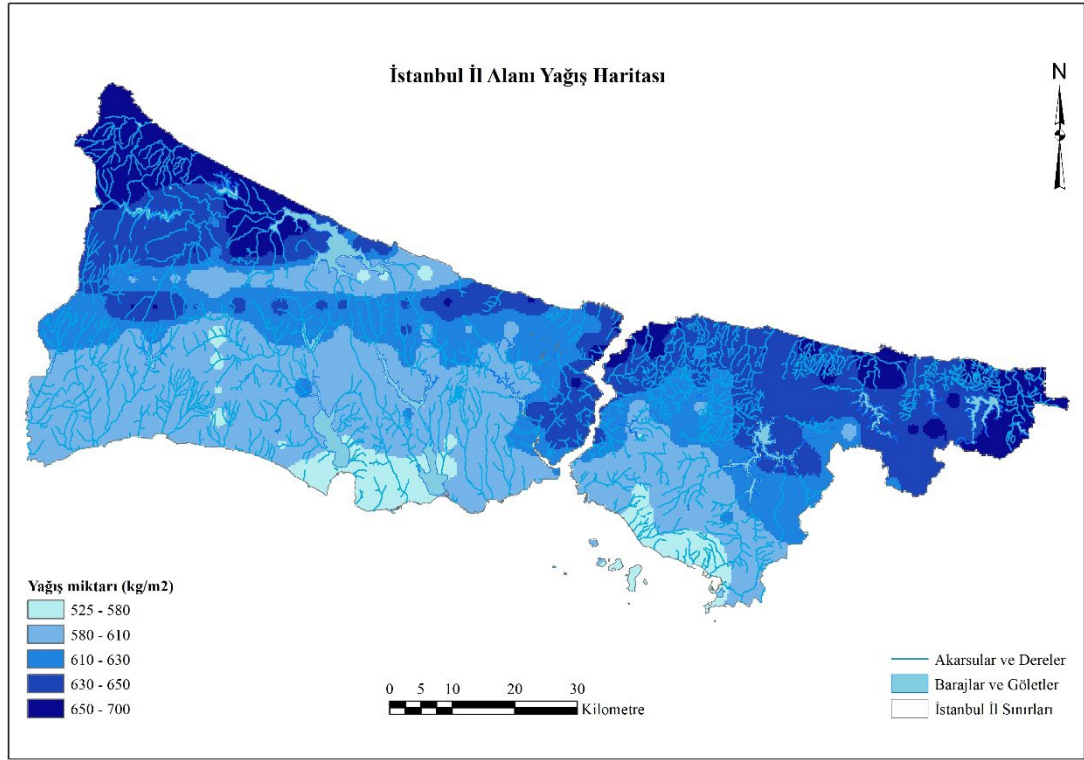


Şekil 3.4: Çalışma alanı eğim haritası.

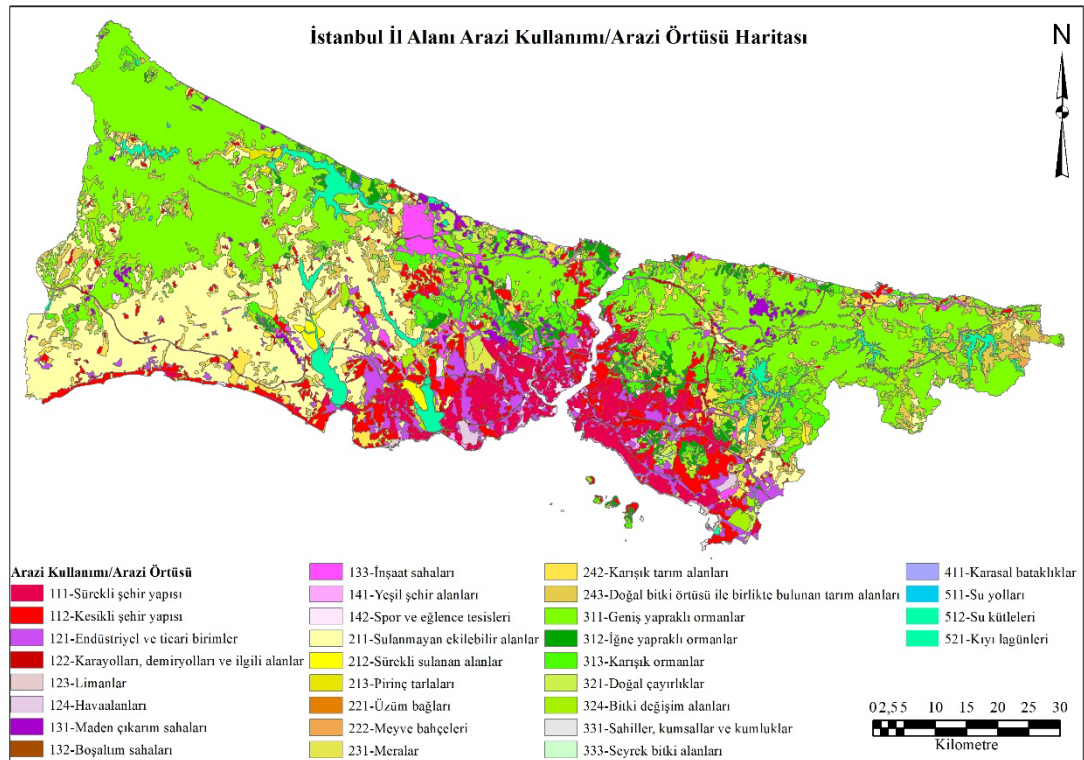
Arazi örtüsü veya arazi kullanım; yüzey suyu akışını, buharlaşma-terleme oranlarını ve yeraltı suyu besleme süreçlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Arazi örtüsü dinamiklerinin anlaşılması, akifer şarjı alanlarının önceliklendirilmesine yardımcı olur. Akifer şarjı faaliyetlerinin çevresel bütünlükten ödün vermeden mevcut arazi kullanımlarıyla entegre edilebileceği alanların belirlenmesine yardımcı olur. CORINE arazi örtüsü 2018 (Url-6) verileri kullanılarak ArcGIS 10.8.2 programında harita hazırlanmıştır (Şekil 3.6).

Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü Farkı İndeksi (NDVI); bitki örtüsü, toprak geçirgenliğini, su sızma oranlarını ve genel akifer şarjı potansiyelini etkilediği için MAR projelerinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Daha yüksek NDVI değerleri daha sağlıklı bitki örtüsüne işaret etmekte ve bu da tipik olarak toprağın nem tutma ve süzülme kapasitesinin artmasına karşılık gelmektedir. Bol bitki örtüsü bulunan alanlar

yeraltı suyunun yeniden şarj edilmesi için yani MAR için uygun olabilecek bölgeleri işaret etmektedir.

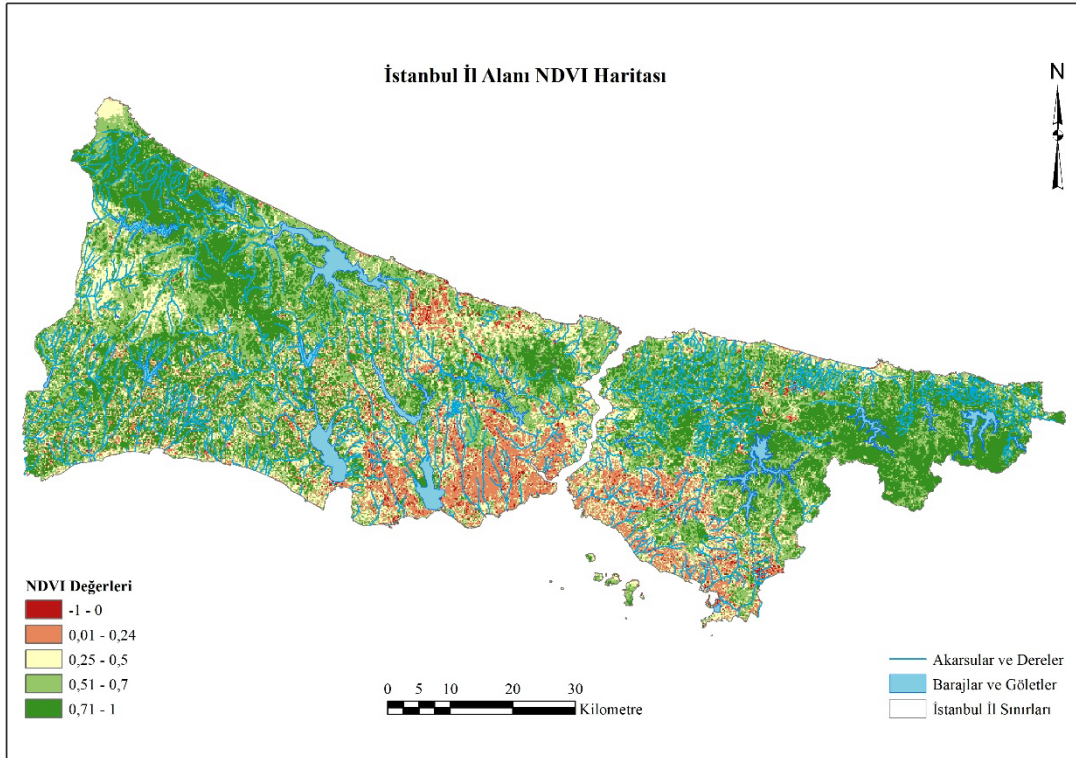


Şekil 3.5: Yağış haritası.



Şekil 3.6: Arazi örtüsü/arazi kullanım haritası.

ArcGIS’te Sentinel-2 görüntülerinden, “raster calculator” aracı kullanılarak $NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$ formülü ile oluşturulmuştur. (Şekil 3.7).

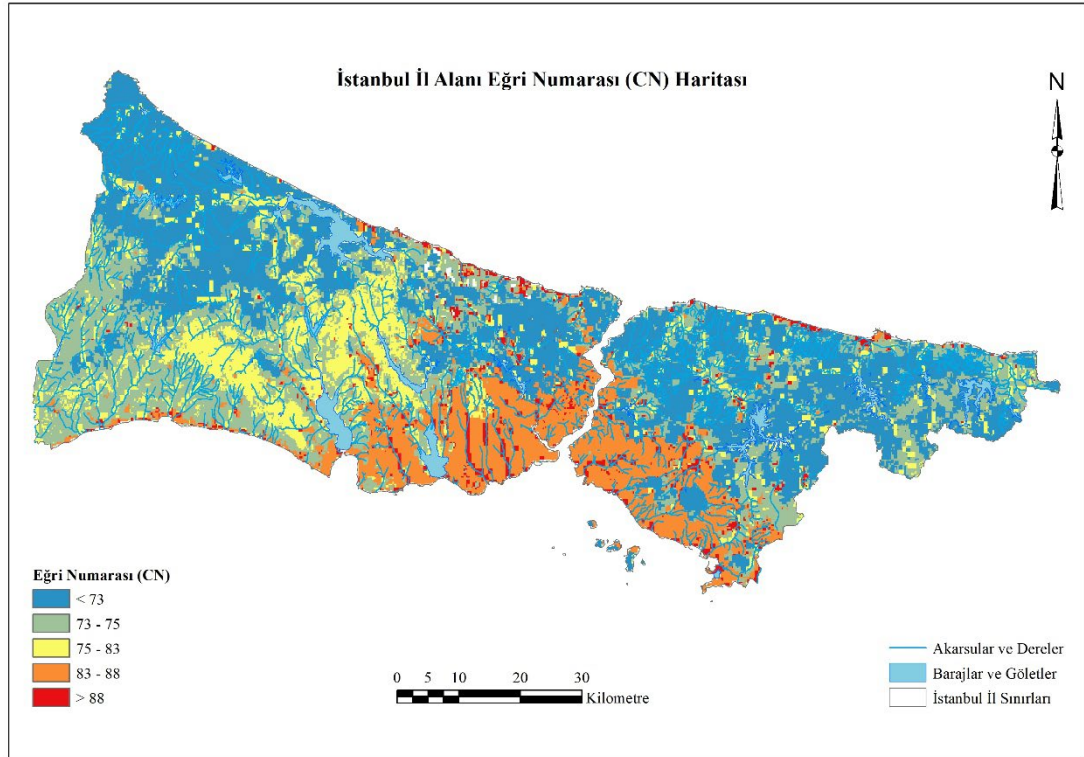


Şekil 3.7: NDVI haritası.

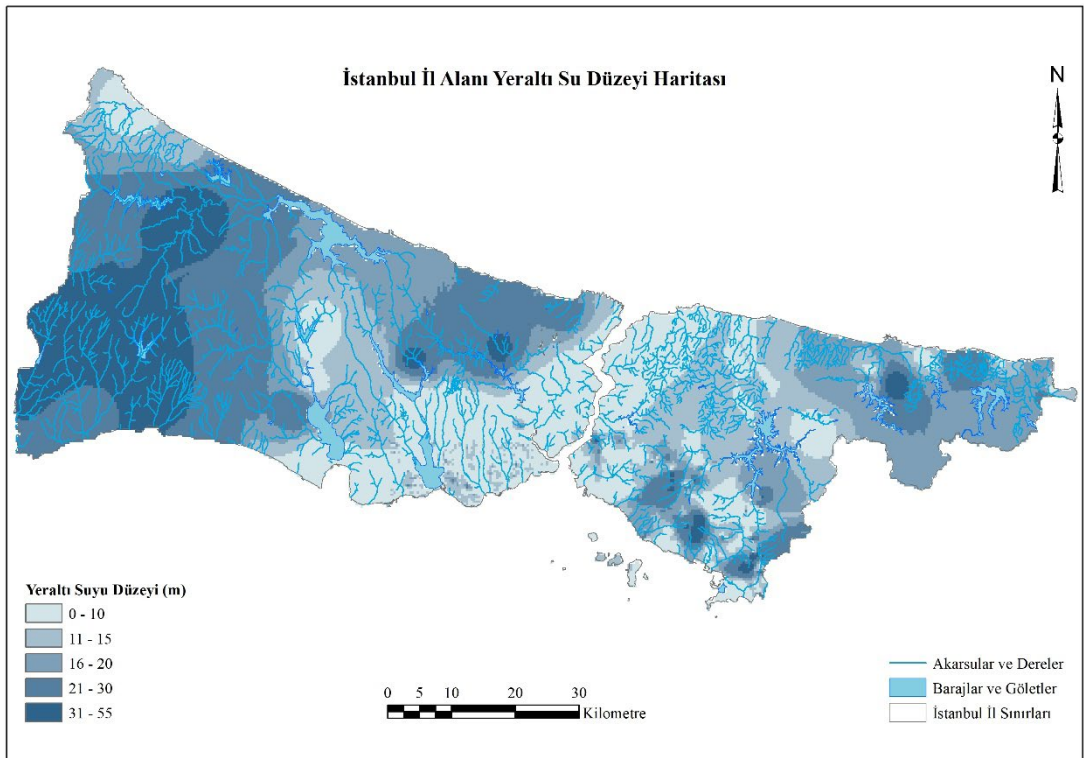
Eğri numarası veya orijinal adıyla “curve number” (CN), yağış-akış ilişkilerini modellemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle yüzey akışının tahmin edilmesinde etkilidir ve arazi kullanımı, toprak tipi ve hidrolik koşullar gibi faktörleri dikkate alarak her bir arazi parçası için bir CN değeri atar. CN değeri, 0 ile 100 arasında değişmekte olup; düşük değerler düşük yüzey akışını, yüksek değerler ise yüksek yüzey akışını göstermektedir. Çalışma kapsamında “GCN250” hidrolojik modelleme ve tasarım için eğri numaraları (Url-7) (Jaafar ve diğ., 2019) verilerinden yararlanılarak harita oluşturulmuştur. Buradan Türkiye için “ARCII = average” indirilmiş ve düzenlenmiştir (Şekil 3.8).

Yeraltı suyu seviyeleri, MAR projelerinde kullanılan kriterlerden biridir. Mevcut yeraltı suyu seviyesinin belirlenmesi, şarj edilecek suyun depolanabileceği alanın hacmini ve akiferin su kabul kapasitesini anlamak için faydalı olmaktadır. İBB’nin sondaj verilerinden elde edilen su seviyeleri nokta verisi olarak (vektör veri) harita oluşturulmuştur, daha sonra bir enterpolasyon yöntemi olan “IDW” analizi (spatial

analyst tools_interpolation_IDW) kullanılarak yeraltı su seviyesi haritası oluşturulmuştur (raster verisi) (Şekil 3.9).



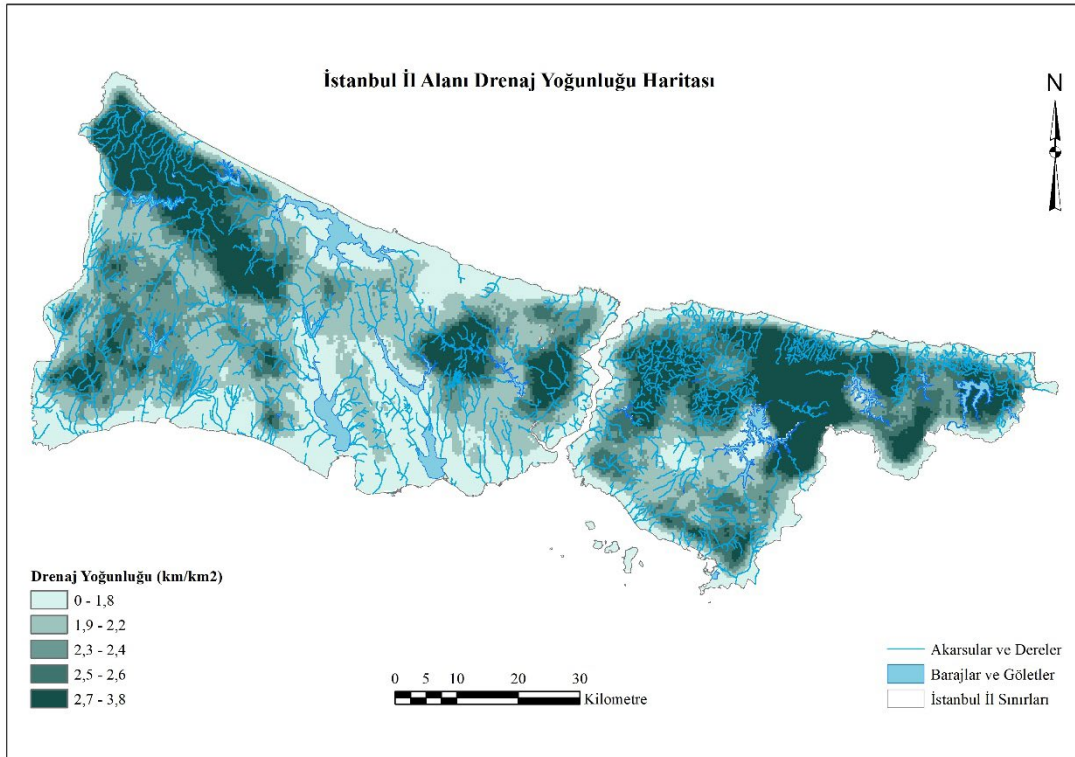
Şekil 3.8: Eğri numarası (CN-Curve Number) haritası.



Şekil 3.9: Yeraltı su seviyesi haritası.

Drenaj yoğunluğu haritaları, yüzey suyu bağlantısı ve yeraltı suyu şarjı için potansiyel yollar hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Yüksek drenaj yoğunluğuna sahip alanlar daha önemli yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerine maruz kalabilmekte ve bu da onları akifer şarjı yöntemleri için uygun hale getirebilmektedir. Düşük drenaj yoğunluğuna sahip alanlar, yeraltı suyunun yenilenmesini optimize etmek için alternatif şarj stratejileri veya ekstra altyapı gerektirebilir. İBB'den alınan drenaj ağı verisi ile ArcGIS 10.8.2 programı kullanılarak drenaj yoğunluğu haritası oluşturulmuştur (spatial analyst tools_density_line density) (Şekil 3.10).

Toprak özelliklerinin anlaşılması, uygun akifer şarjı tekniklerinin seçilmesi ve infiltrasyon oranlarının tahmin edilmesi için gereklidir. İyi drene edilmiş topraklara sahip alanlar akifer şarjı faaliyetleri için elverişliiyken, sıkıştırılmış veya geçirimsiz topraklara sahip alanlar infiltrasyonu artırmak için ek önlemler gerektirebilir. Toprak verileri “Harmonized World Soils Database version 2.0” veritabanından elde edilmiştir (Url-8) (Şekil 3.11).



Şekil 3.10: Drenaj yoğunluğu haritası.

Elde edilen tüm veriler İstanbul il alanı sınırlarına göre düzenlenmiştir ve “resample” aracıyla 5 m mekansal çözünürlüklü raster veri formatına dönüştürülmüştür. Veriler incelendiğinde koordinat sistemlerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Analiz

işlemi kapsamında veriler, İstanbul ilinin bulunduğu konum kapsamında UTM WGS 84 35N projeksiyon koordinat sistemine dönüştürülmüştür.

Şekil 3.11: Toprak tipi haritası.

MAR projeleri için uygun alanların belirlenmesinde objektif ve bilimsel bir yöntem izlemek amacıyla çok kriterli karar verme (MCDA) teknikleri kullanılmaktadır (Sallwey ve diğ. 2018; Sandoval ve diğ. 2019; Zhang ve diğ. 2019; Zghibi ve diğ. 2020; Jhariya ve diğ. 2021; Mouhoumed ve diğ. 2023; Kawara ve diğ. 2023). Bu kapsamda, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi tercih edilmiştir.

düzenlenmesidir. Bu hiyerarşi, genellikle üç ana seviyeye ayrılmaktadır; hedef, kriterler ve alt kriterler ve alternatifler. Hedef, karar verme probleminin nihai amacını belirlerken, kriterler ve alt kriterler, karar vericinin değerlendireceği faktörleri oluşturmaktadır. Alternatifler ise, kriterlere göre değerlendirilen seçeneklerdir. Bu hiyerarşik yapı, AHP'nin karar süreçlerinde sistematik bir yaklaşım sağlamasına yardımcı olmaktadır. AHP süreci, karar vericinin, her bir alternatifin kriterlere göre önemini ve uygunluğunu değerlendirmesine olanak tanımaktadır (Saaty, 1980).

AHP, karmaşık karar verme problemlerini basitleştirerek, çeşitli kriterlerin ağırlıklandırılmasını ve sıralanmasını sağlar. MAR projeleri için temel kriterler hidrojeoloji (geçirimli ortamlar), yükseklik, eğim, yağış, arazi örtüsü/arazi kullanım, normalize bitki örtüsü indeksi, eğri numarası (curve number), yeraltı suyu seviyesi, drenaj yoğunluğu, toprak tipi ve bunların alt kriterleri belirlenmiştir. Kriterlere farklı ağırlıklar atamak gereklidir; çünkü hepsinin MAR uygulanabilirliği üzerinde aynı derecede etkisi yoktur ve bu nedenle uygunluk haritalarının entegrasyonu sırasında buna göre ağırlıklandırılmalıdır. Kriterlere ağırlık atamak için çeşitli yöntemler vardır. Bu çalışmada ağırlık atamaları için ikili karşılaştırma (pairwise yöntemi) tercih edilmiştir ve buna göre kriterler ve alt kriterler arasında bir hiyerarşi oluşturulmuştur. Uzman görüşleri ve literatürden elde edilen veriler ışığında, kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir.

AHP yöntemi, karar vericilerin her kriter ve alternatif için çift yönlü karşılaştırmalar yapmasını gerektirmektedir. Bu karşılaştırmalar, Saaty (1980; 2001)'nin önerdiği 1-9 ölçeği ile gerçekleştirilmektedir. Bu ölçek, iki kriter veya alternatif arasındaki göreceli önemin derecesini belirtir ve 1 ile 9 arasında bir değerle ifade edilir. Örneğin, 1 değeri, iki kriterin eşit önemde olduğunu gösterirken; 9 değeri, bir kriterin diğerine göre çok yüksek derecede daha önemli olduğunu ifade etmektedir. Bu karşılaştırmalar sonucunda, her kriterin ve alternatifin göreceli ağırlıkları hesaplanır. Ölçek değerleri ve anlamları, karar vericinin iki alternatif arasında yaptığı karşılaştırmada nasıl bir ağırlık belirleyeceğini göstermektedir (Çizelge 3.1).

Bu ölçek, karar vericinin iki kriter veya alternatif arasındaki karşılaştırmalarda öznel yargılarını sayısal değerlere dönüştürmesine olanak tanır. Örneğin, eğer A kriteri, B kriterine göre 3 kat daha önemli ise, A ve B arasındaki karşılaştırma 3 olacaktır. Aynı şekilde, B kriterinin A'ya göre önemi 1/3 olacak şekilde belirlenmektedir. Bu

karşılaştırmaların yapılmasında terslik ilkesi uygulanmaktadır, yani A kriteri B'ye göre daha önemli ise, B'nin A'ya göre önemi 1/3 olmalıdır.

Çizelge 3.1: AHP Karşılaştırma skalası ve açıklamaları (Saaty, 1980; Saaty, 2001).

Değer	Açıklamalar
1	İki kriter eşit önemde
3	Bir kriter diğerinden biraz daha önemli
5	Bir kriter diğerinden belirgin şekilde daha önemli
7	Bir kriter diğerinden çok daha önemli
9	Bir kriter diğerinden çok yüksek derece daha önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler, daha hassas karşılaştırmalar için kullanılır

AHP'de en önemli adımlardan biri de tutarlılık analizidir. Karar vericilerin değerlendirmelerinin tutarlılığını kontrol etmek için tutarlılık oranı (*CR*) hesaplanmaktadır. Eğer tutarlılık oranı %10'un altında ise, değerlendirmelerin tutarlı olduğu kabul edilmekte ve sonuçlar güvenilir sayılmaktadır. Ancak, *CR* değeri %10'dan büyükse, karar vericinin değerlendirmeleri tutarsız kabul edilmekte ve yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. *CR*'nin hesaplanmasında kullanılan tutarlılık indeksi (*CI*), aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Formül 3.1):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.1)$$

Burada, λ_{max} değeri matrisin ağırlık vektörlerine bölünmesi ve sonuçların ortalamasının alınmasıyla elde edilir ve *n* matrisin boyutu yani kriter sayısıdır. *CR* (Tutarlılık Oranı) ise şu şekilde hesaplanır:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.2)$$

RI, rastgele indeks olarak bilinen ve karar matrisinin boyutuna bağlı olarak değişen bir sabittir (Saaty, 1980) (Çizelge 3.2). Örneğin çalışma alanı için 10 kriter kullanıldığından, *n*=10 için *RI* = 1,49'dur. Tutarlılık oranı, AHP'nin güvenilirliğini sağlayan çok önemli bir unsurdur ve *CR* değeri 0,10'dan küçük olduğunda, karar vericilerin değerlendirmeleri tutarlı olarak kabul edilmektedir.

Çizelge 3.2: Parametre sayısına göre *RI* (rastgele indeks) değerleri (Saaty, 1980).

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,5	1,49

AHP yöntemi hem nitel hem de nicel verilerle çalışabilir ve bu özelliği sayesinde farklı türdeki problemler için esnek bir çözüm sunmaktadır. AHP'nin en büyük avantajlarından biri, karar vericilerin değerlendirmelerini sayısal bir biçime dökerek tutarlılığı kontrol etmelerine olanak tanımasıdır. Bununla birlikte, AHP'nin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle, karar vericilerin yaptığı karşılaştırmaların öznel olması, karar sürecinde taraflılığa neden olabilmektedir. Ayrıca, çok sayıda kriter ve alternatif olduğunda, AHP yöntemi karmaşık hale gelebilmekte ve zaman alıcı olabilmektedir. Bunun yanında, yüksek boyutlu problemler için AHP kullanımı zorluğa neden olabilmektedir. Bu tür durumlar için uzman görüşlerine başvurmak, daha doğru sonuçlar elde edilmesine yardımcı olabilmektedir (Saaty, 1980).

AHP'nin farklı uygulama alanları vardır. Çevre ve doğal kaynak yönetimi, şehir planlama, işletme yönetimi ve sağlık hizmetleri gibi birçok alanda AHP uygulanabilmektedir. Örneğin, bir bu çalışmada olduğu gibi bir yeraltı suyu yönetimi projesinde, AHP kullanılarak potansiyel yönetilen yeraltı suyu şarj (MAR) alanları değerlendirilmektedir. AHP, bu tür projelerde daha yapılandırılmış ve bilimsel bir değerlendirme sağlamaktadır (Saaty, 1980).

Tez çalışmasında öncelikle tüm alanlar için “reclassify” yani yeniden sınıflandırma yapılmıştır. Sallwey ve diğ. (2018), Sandoval ve diğ. (2019), Zhang ve diğ. (2019), Zghibi ve diğ. (2020), Jhariya ve diğ. (2021), Mouhoumed ve diğ. (2023), Kawara ve diğ. (2023) yayınlarında kullanılan kriterlerin ortalaması alınarak ve konusunda uzman akademisyenlere danışılarak alt kriterlerin sınıflandırmaları yapılmış ve AHP matrisleri oluşturulmuştur.

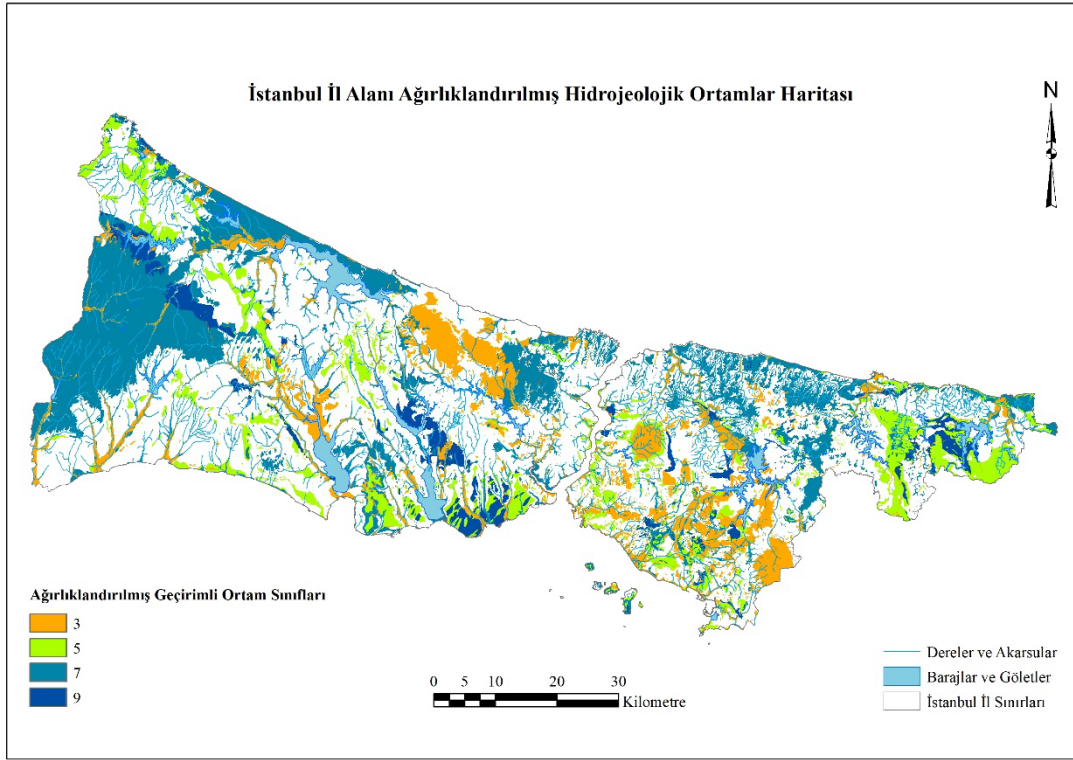
3.2.1 Hidrojeoloji

Hidrojeoloji kriteri, toprak ve kayaların suyu ne şekilde depoladığı, ilettiği ve geçirdiği özellikleri tanımlamaktadır. Hidrojeolojik özellikler, suyun toprağa sızma hızı, yeraltı su seviyeleri ve geçirgenlik gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir. MAR (Managed Aquifer Recharge) projeleri, büyük oranda hidrojeolojik analizlere dayanmaktadır. Hidrojeoloji verisinin güvenilir olması bu tarz projelerin başarılı olması için kritik öneme sahiptir. İyi bir hidrojeolojik analiz, suyun depolanabilirliğini ve akışını optimize etmeye yardımcı olmaktadır. Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak hidrojeoloji kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3: Hidrojeoloji kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Hidrojeoloji	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
Geçirimli Kaya Ortam (Gçk)	9	Geçirimli kaya ortamları, kayaçların suyu hızlı bir şekilde iletebildiği ortamlardır. Bu ortamlar, özellikle yer altı suyu için önemli alanlardır. Karbonatlı kayaçlar (kireçtaşı, dolomit) veya poroz kayaçlar bu sınıfa girebilir. Geçirimli kaya ortamlarında su, yüksek hızla hareket eder ve suyun yer altı akışının yönetilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu ortamlar, yer altı su rezervlerinin kalitesini ve miktarını belirler.
Geçirimli Taneli Ortam (Gçt)	7	Geçirimli taneli ortamlar, kum, çakıl, kumlu çakıl gibi yer altı suyu taşıyabilen ve suyun geçişine izin veren ortamları ifade eder. Bu tür ortamlar, suyun hızlı bir şekilde sızmasına ve yer altına ulaşmasına imkan sağlamaktadır. Bu, yer altı su kaynaklarının beslenmesi için çok önemlidir. Ayrıca, suyun kirlenme riski bu tür ortamlarda daha yüksek olabilir.
Yarı geçirimli Kaya Ortam (gçk)	5	Yarı geçirimli kaya ortamları, suyun geçişini sınırlayan ama yine de bir miktar geçişi mümkün kılan kayaçlardır. Bu tür ortamlar, bazalt, andezit gibi kayaçlardan oluşabilir. Suyun yer altına sızma oranı bu ortamda geçirimli kaya ortamlarına göre daha düşük olur, fakat yine de önemli bir geçiş söz konusudur. Bu tür kayaçlar yer altı suyu yönetiminde dikkate alınmalıdır çünkü suyun hareketi yavaş olsa da su seviyelerini etkileyebilir.
Yarı geçirimli Taneli Ortam (gçt)	3	Yarı geçirimli taneli ortamlar, kumlu kil, çakıl karışımları gibi suyun geçişini sınırlayan ama yine de bir miktar geçişe izin veren ortamlar olarak tanımlanabilir. Bu ortamlar, geçirimli taneli ortamlara göre daha düşük geçirgenliğe sahiptir ve suyun sızma hızı daha yavaş olur. Ancak, yine de yer altı su seviyelerinin yükselmesine ve suyun taşınmasına olanak verir.
Diğer (Yarıgeçirimsiz Ortam (gz), Geçirimsiz Ortam (Gz), Bataklık, Sazlık, Liman, İskele)	-	Bu sınıf, suyun geçişine tamamen engel olan veya çok düşük geçirgenliğe sahip olan ortamlardır. Bataklıklar, sazlıklar, limanlar ve iskeleler gibi ortamlarda suyun geçişi son derece sınırlıdır. Yarı geçirimsiz ortamlar (killi, kayalık zeminler), suyun geçişini engelleyerek yer altı suyunun hareketini kısıtlar. Bu tür ortamlarda yer altı su seviyeleri yüksek olsa bile, suyun taşınması zorlaşır ve bu nedenle bu tür ortamlar genellikle düşük öncelikli ve risk taşımayan bölgeler olarak değerlendirilir.

Yukarıdaki çizelgeye dayanarak yeniden sınıflandırılmış hidrojeoloji haritası Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12: Yeniden sınıflandırılmış hidrojeoloji haritası.

3.2.2 Yükseklik

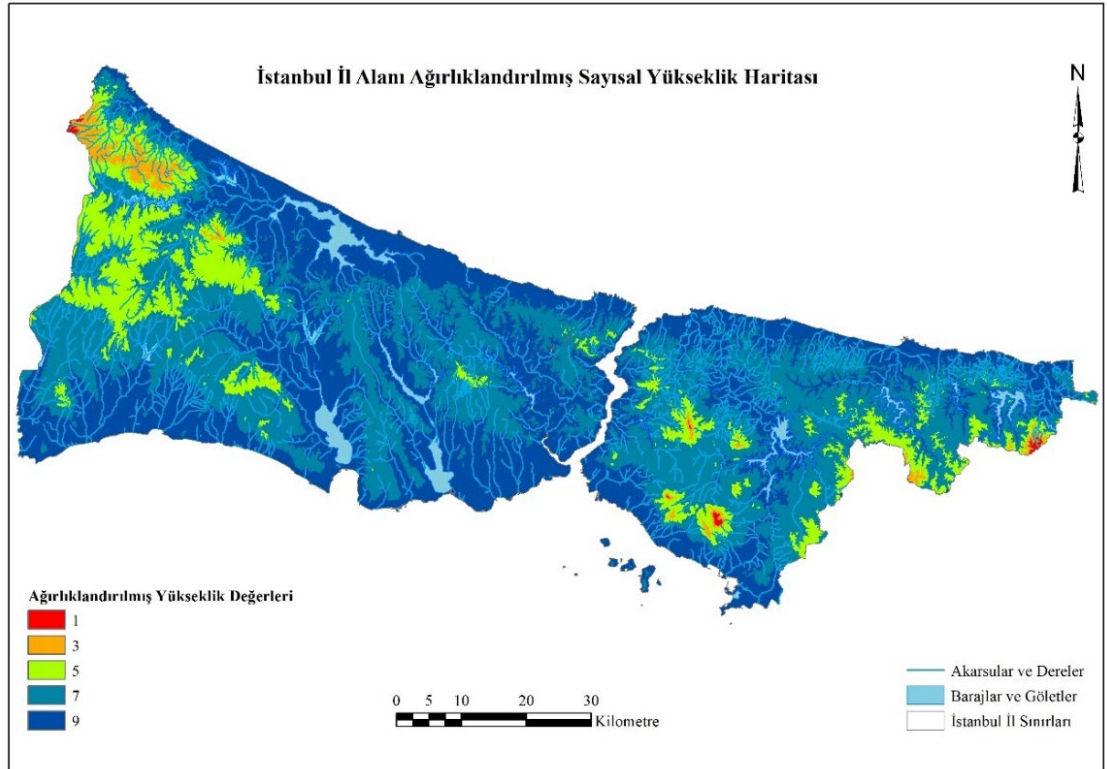
Yükseklik, bir bölgenin deniz seviyesinden ne kadar yukarıda olduğunu gösteren bir parametredir ve suyun hareketini, buharlaşmasını ve yer altı su seviyelerini etkileyebilmektedir. Yüksek alanlar, genellikle suyun daha hızlı hareket etmesine ve yüzeyden akmasına neden olmaktadır. Alçak alanlarda ise suyun hareketi daha yavaş olabilmektedir. Yüksek bölgeler ise eğimli arazilerle ilişkilidir, bu da suyun yüzeyde hızla akmasına ve yeraltına sızma potansiyelinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, MAR projelerinde yükseklik düşük olan alanlar daha uygun kabul edilir (Kawara ve diğ., 2024). Yükseklik, MAR projelerinin yer seçiminde ve suyun depolanabilirliğini değerlendirirken önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, yükseklik değişimleri, yağış miktarını ve buharlaşma oranlarını da etkileyebilmektedir.

Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak yükseklik kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Bununla birlikte çizelge 3.4'e göre sınıflandırılmış yükseklik değerlerinden oluşturulmuş yükseklik haritası Şekil 3.13'te yer almaktadır.

Çizelge 3.4: Yükseklik kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Yükseklik (m)	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
<100	9	En uygun yükseklik aralığıdır. Bu alanlarda suyun birikmesi ve yeraltına sızması maksimum düzeydedir.
100-200	7	Su birikimi ve yeraltına sızma potansiyeli hala yüksektir, ancak daha düşük yüksekliklere göre biraz sınırlıdır. Eğim değerleriyle birlikte değerlendirilmelidir.
200-300	5	Orta düzeyde uygunluk gösterir. Bu bölgelerde muhtemel eğim artışı nedeniyle suyun birikim potansiyeli azalabilir.
300-400	3	Düşük uygunluk gösterir. Suyun infiltrasyon ve depolanma potansiyeli azalır.
>400	1	En az uygun yükseklik aralığıdır. Yüzey akışı bu bölgelerde maksimum seviyeye ulaşır, suyun yeraltına sızma potansiyeli çok düşüktür.



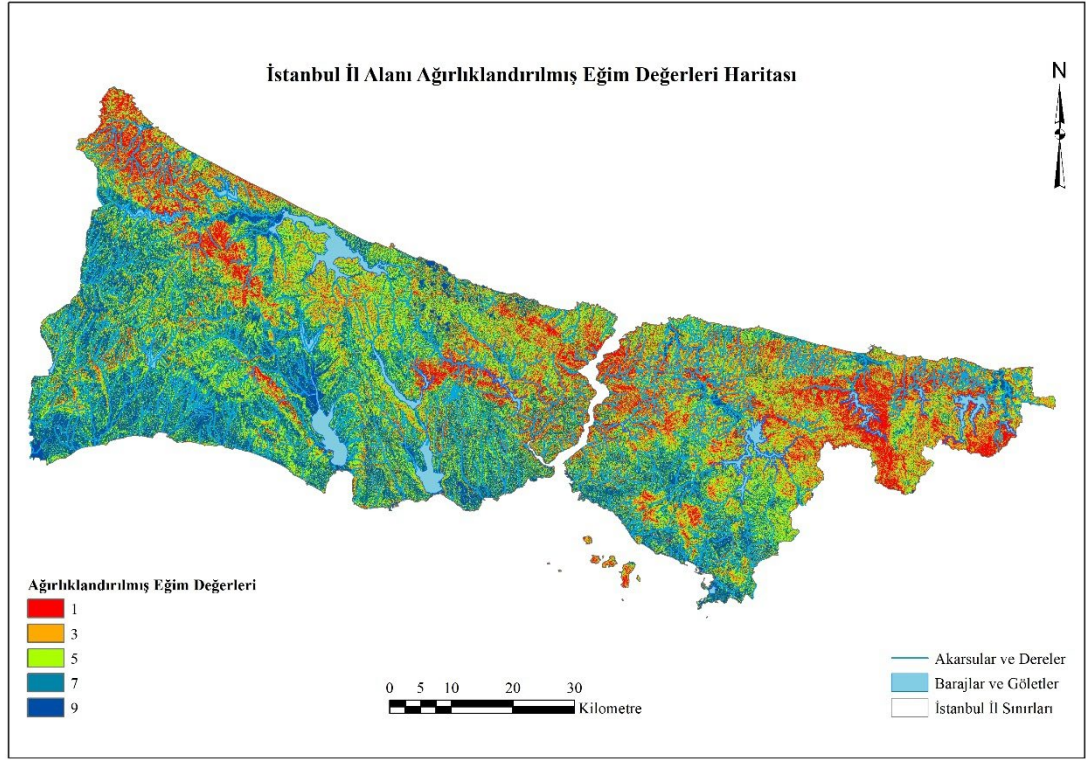
Şekil 3.13: Yeniden sınıflandırılmış yükseklik haritası.

3.2.3 Eğim

Eğim, suyun akış hızı ve yönünü etkileyen önemli bir topografik parametredir. Yüksek eğimli arazilerde suyun yüzeyden akış hızı daha yüksek olmaktadır, bu da suyun toprakta sızma kapasitesini azaltabilmektedir. Düşük eğimli alanlar ise suyun daha uzun süre toprağa sızmasını sağlayabilmektedir. Eğim, MAR projelerinde suyun ne hızla akacağı ve depolanabileceği konusunda önemli bir gösterge olmaktadır. Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak eğim kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.5'te verilmiştir. Bu sınıflandırmaya ait eğim haritası Şekil 3.14'te yer almaktadır.

Çizelge 3.5: Eğim kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Eğim (%)	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
< 2	9	Çok düşük eğimli alanlar, suyun birikmesi ve yeraltına sızması için en uygun bölgeleri oluşturur. Bu bölgelerde yüzey akışı minimum düzeydedir.
2-6	7	Hafif eğimli bölgelerdir ve MAR için uygunluk taşımaktadırlar. Suyun birikimi hala mümkündür, ancak daha düşük eğimlere göre yüzey akışı biraz daha fazladır.
6-12	5	Orta eğimli alanlar, suyun birikim potansiyelini azaltır. Bu bölgelerde suyun bir kısmı yeraltına sızarken, önemli bir kısmı yüzey akışına geçer.
12-18	3	Yüksek eğimli alanlar suyun hızlı yüzey akışıyla taşınmasına neden olur, bu da yeraltına sızma potansiyelini ciddi şekilde düşürür.
> 18	1	Çok yüksek eğimli alanlar, MAR projeleri için uygun olmayan bölgeler olarak değerlendirilir. Suyun yüzeyde hızlı hareketi nedeniyle sızma imkanı oldukça sınırlıdır.



Şekil 3.14: Yeniden sınıflandırılmış eğim haritası.

3.2.4 Yağış

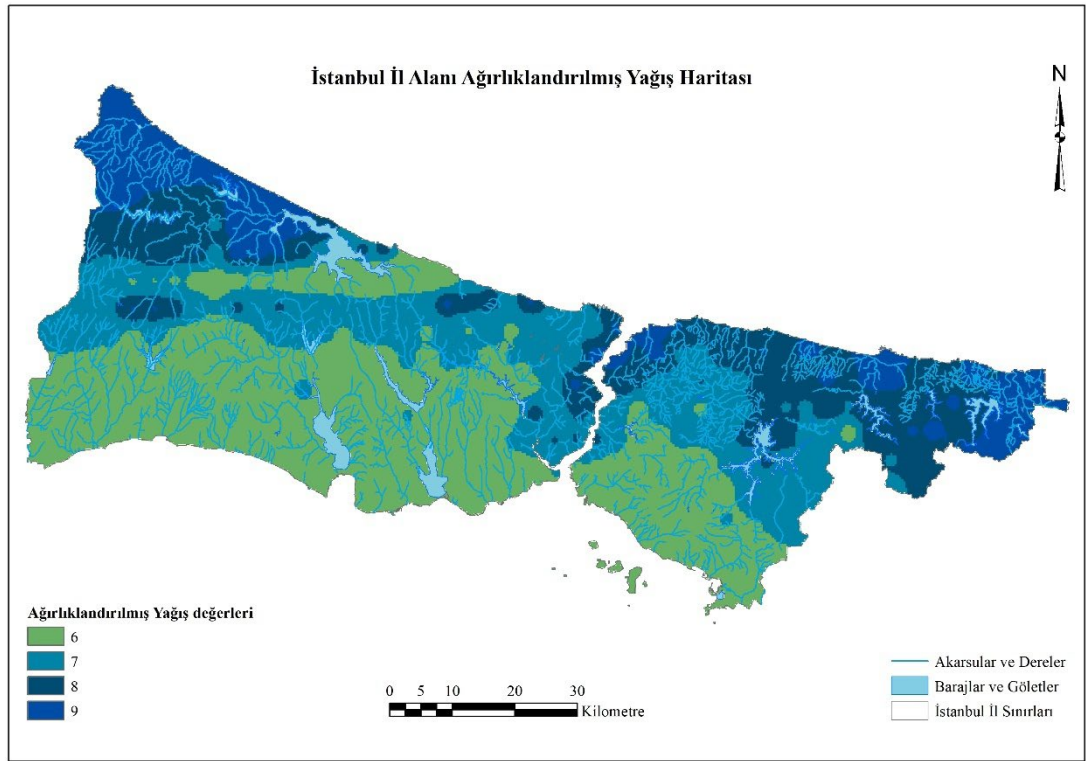
Yağış miktarı, yeraltı suyu besleme potansiyeli açısından MAR (Managed Aquifer Recharge) projelerinde hesaba katılması gereken önemli bir kriterdir. Yüksek yağış, yeraltı suyu depolama kapasitesini artırabilecek su kaynaklarının sağlanması için önemli bir fırsat sunmaktadır. Yeterli miktarda yağış, toprak nem seviyesini artırarak suyun yeraltına sızmasına ve akiferlerin beslemesine olanak tanımaktadır. Ancak, aşırı yağış, yüzeysel su akışını artırarak erozyon riskini yükseltebilir ve toprak stabilitesini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, MAR projelerinde fazla yağış uygun bir şekilde yönetilmeli, suyun toprakta depolanması ve yer altına iletilmesi optimize edilmelidir.

Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak yağış kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.6'da verilmiştir. Yıllık yağış verilerine dayalı bu sınıflandırmaya dayanarak oluşturulmuş bu sınıflandırmaya göre görselleştirilen yağış haritası Şekil 3.15'te bulunmaktadır. Yüksek yağış miktarları, MAR projelerinde yüksek bir avantaj sağlamaktadır, çünkü bu projeler için gerekli olan suyun büyük bir kısmı yüzey akışından ve doğal yağıştan sağlanmaktadır. Ancak, bu yağış miktarının doğru bir şekilde yönetilmemesi durumunda su kayıpları, toprak erozyonu ve taşkın gibi

olumsuz sonuçlarla karşılaşılabilir. Dolayısıyla, yağış miktarına dayalı tasarım stratejileri, suyun hem toprakta tutulmasını hem de yer altına verimli bir şekilde sızmasını optimize etmeyi hedeflemelidir. Burada tasarımın doğru yapıldığı varsayılarak en yüksek yağış alan kısım en yüksek puanı almıştır.

Çizelge 3.6: Yağış kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Yağış (mm)	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
525-580	6	Bu yağış aralığı MAR projeleri için orta düzeyde uygunluk sunar. Yağış miktarı suyun yeraltına sızmasını kolaylıkla destekleyebilir.
580-610	7	Yağış miktarının arttığı bu bölgelerde suyun yüzeyde birikme ve yeraltına sızma potansiyeli daha yüksektir.
610-630	8	Yüksek yağışlı alanlar, MAR projeleri için oldukça uygun kabul edilir. Toprak nem dengesini artırarak sağlıklı bitki örtüsü ve tarım faaliyetleri için elverişli bir ortam oluşturur. Yeraltı suyu besleme kapasitesi oldukça iyi derecededir.
>630	9	En yüksek yağış seviyesine sahip alanlardır, yeraltı suyu besleme potansiyelini maksimum düzeye çıkarır. Yüksek yağış miktarı, yer altı suyu kaynaklarının maksimum düzeyde beslenmesine olanak tanır ve MAR projeleri için ideal bölgeleri temsil eder. Ancak, bu seviyelerdeki yağış, yüzey akışı ve toprak kayması gibi sorunlara yol açabileceğinden dikkatli planlama gerektirir. Taşkın bölgeleri için tasarlanmış MAR tipleri düşünülebilir. Doğru tasarım ve yönetim olmadan sorunlara neden olabilir.



Şekil 3.15: Yeniden sınıflandırılmış yağış haritası.

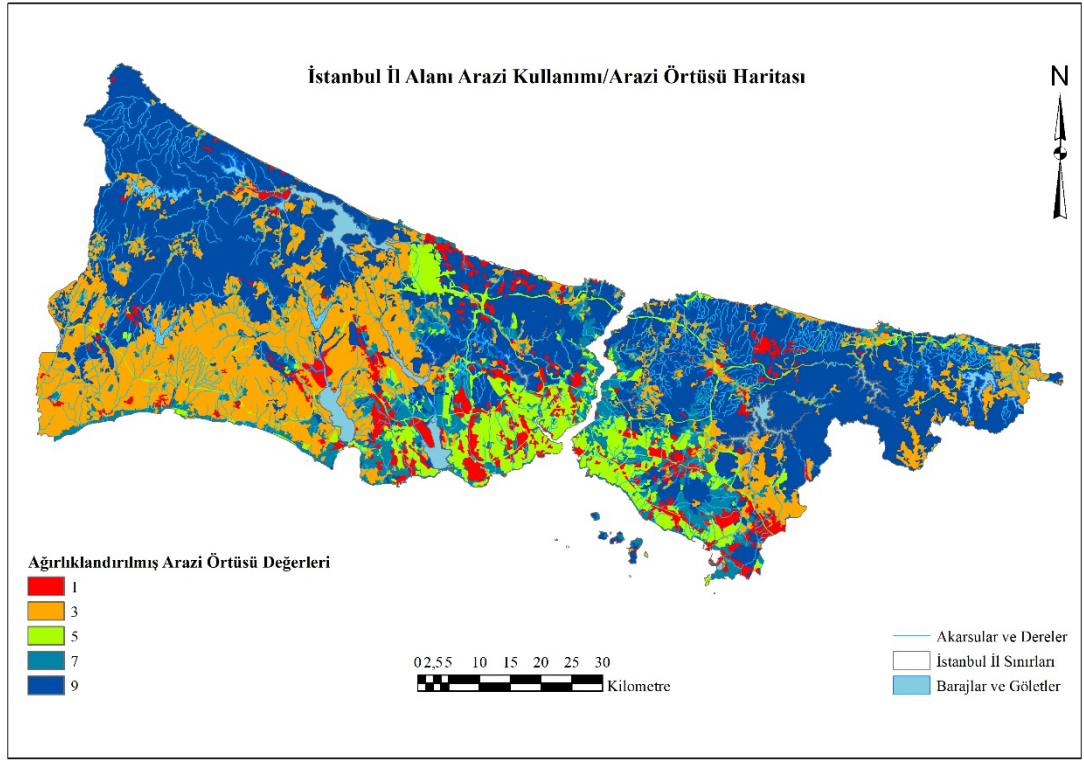
3.2.5 Arazi Örtüsü/Arazi Kullanım

Arazi örtüsü veya arazi kullanımı, bir bölgedeki toprak yüzeyini kaplayan bitki örtüsü ve insan faaliyetlerini ifade etmektedir. Farklı arazi kullanımı türleri, suyun hareketini, buharlaşmasını ve yer altına sızmasını farklı şekillerde etkileyebilmektedir. Örneğin; ormanlar, suyun daha hızlı toprağa sızmasını sağlarken, beton zeminler suyun yüzeyden hızlıca akmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte arazi kullanım durumlarına göre kirlilik faktörü de göz önünde bulundurulmalıdır. MAR projelerinde, arazi kullanımının doğru bir şekilde analiz edilmesi, suyun depolanmasını ve yönetilmesini doğrudan etkileyebilmektedir. Arazi örtüsünün yoğunluğu, bitki örtüsünün sağlığı ve arazi kullanım şekilleri, suyun verimli bir şekilde depolanmasında ve yer altına iletilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak arazi örtüsü/ arazi kullanım kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.7’de verilmiştir. Çizelge 3.7’deki sınıflandırmalara göre oluşturulmuş arazi kullanım/arazi örtüsü haritası Şekil 3.16’da yer almaktadır.

Çizelge 3.7: Arazi Örtüsü/Arazi Kullanım kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Arazi Örtüsü/ Arazi Kullanımı	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
Ormanlık alanlar, çayırlar-meralar, su kütleleri	9	MAR projeleri için en uygun kategoriye temsil eder. Bu bölgeler suyun toprakta tutulmasını ve doğal bir geçirgenlik sağlar böylece suyun yeraltına sızma potansiyelini maksimize eder.
Yerleşim alanları (küçük şehirler, köyler, kasabalar), yeşil şehir alanları, bataklık-lagün ortamları, su yolları	7	Bu alanlar kısmen insan etkisi altındadır, ancak suyun yeraltına sızması için hala uygun koşullar sunabilir.
Yerleşim alanları (büyük şehirler)	5	Büyük şehirlerin yoğun yapılaşması yüzey geçirgenliğini azaltır, ancak bazı yeşil alanlar ve su yolları uygunluk sağlayabilir (küçük ölçekli projelerde değerlendirilebilir).
Sulanmayan ekilebilir alanlar, behçeler-bağlar, karışık tarım alanları, sahil-kumsal alanları	3	MAR projeleri için düşük uygunluğuna sahip alanlardır. Tarım alanları, toprak yapısını değiştirebilir. Bu bölgelerde yüzey akışı genellikle yüksektir ve geçirgenlik sınırlıdır. Bununla birlikte yüksek gübreleme ve ilaçlama olan bölgelerde toprak ve yeraltı sularında kirlilik gelişebilir.
Endüstriyel ve ticari alanlar, maden ve boşaltım sahaları, sürekli sulanan tarım alanları, pirinç tarlaları	1	MAR projeleri için uygun olmayan alanları temsil eder. İnsan faaliyetlerinin yoğun olduğu bu bölgelerde, yüzey geçirgenliği minimum düzeydedir ve kirlilik oranı çok yüksektir.



Şekil 3.16: Yeniden sınıflandırılmış arazi örtüsü/arazi kullanımı haritası.

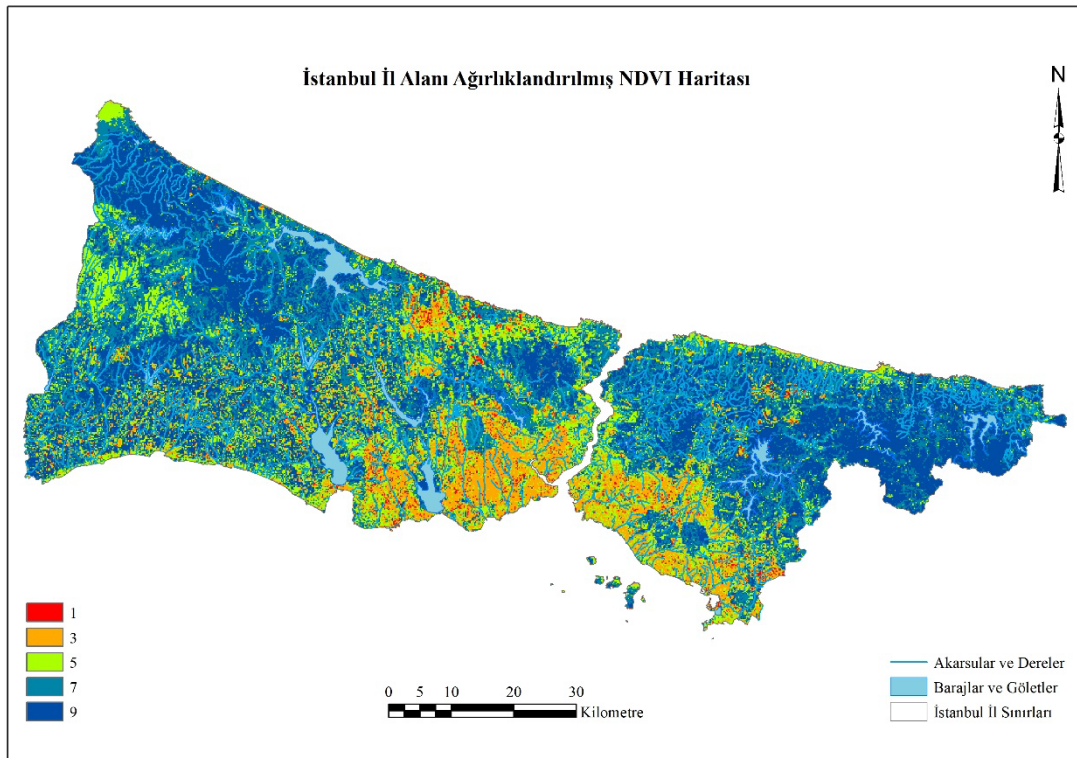
3.2.6 Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü Farkı İndeksi (NDVI)

NDVI, bitki örtüsünün sağlığını ve yoğunluğunu belirlemek için kullanılan bir indeks olmaktadır. Bu indeks, bitkilerin ışığı nasıl yansıttığını ölçerek, sağlıklı bitki örtüsünün varlığını ve yoğunluğunu göstermektedir. Yüksek NDVI değerleri, sağlıklı bitki örtüsünün bulunduğunu, düşük değerler ise bitki örtüsünün azaldığını veya stres altında olduğunu göstermektedir. MAR projelerinde, NDVI verileri, bitki örtüsünün suyun depolanabilirliğine etkisini anlamak için kullanılmaktadır. Sağlıklı ve yoğun bitki örtüsü, suyun toprakta daha fazla tutulmasına yardımcı olabilmektedir.

Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak NDVI kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.8’de verilmiştir. Bu sınıflandırmalara dayanılarak hazırlanan NDVI haritası ise Şekil 3.17’de bulunmaktadır.

Çizelge 3.8: NDVI kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

NDVI Değeri	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
0,71-1	9	MAR projeleri için en uygun alanlardır. Yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü ifade eder. Bu alanlar suyun toprağa sızmasını artırarak yeraltı suyu beslenmesine önemli katkı sağlar.
0,51-0,70	7	Bitki örtüsü yeterince sağlıklıdır ve suyun infiltrasyonunu destekler. Bu alanlar MAR projeleri için oldukça uygundur.
0,25-0,50	5	Orta yoğunlukta bitki örtüsünü temsil eder. Bu bölgelerde suyun sızma potansiyeli yüksektir, ancak yoğun bitki örtüsüne göre daha sınırlıdır. MAR projeleri açısından orta derecede uygunluk gösterir.
0,01-0,24	3	MAR projeleri için düşük uygunluğa sahip alanlardır. Zayıf veya seyrek bitki örtüsü nedeniyle yüzey akışı artar ve suyun yeraltına sızma potansiyeli azalır.
-1-0	1	Bitki örtüsü olmayan veya ölü bitkilerle kaplı alanları temsil eder. Bu bölgelerde suyun toprakta tutulması mümkün olmamakta ve yüzey akışı dominant hale gelmektedir. MAR projeleri için uygun değildir.



Şekil 3.17: Yeniden sınıflandırılmış NDVI haritası.

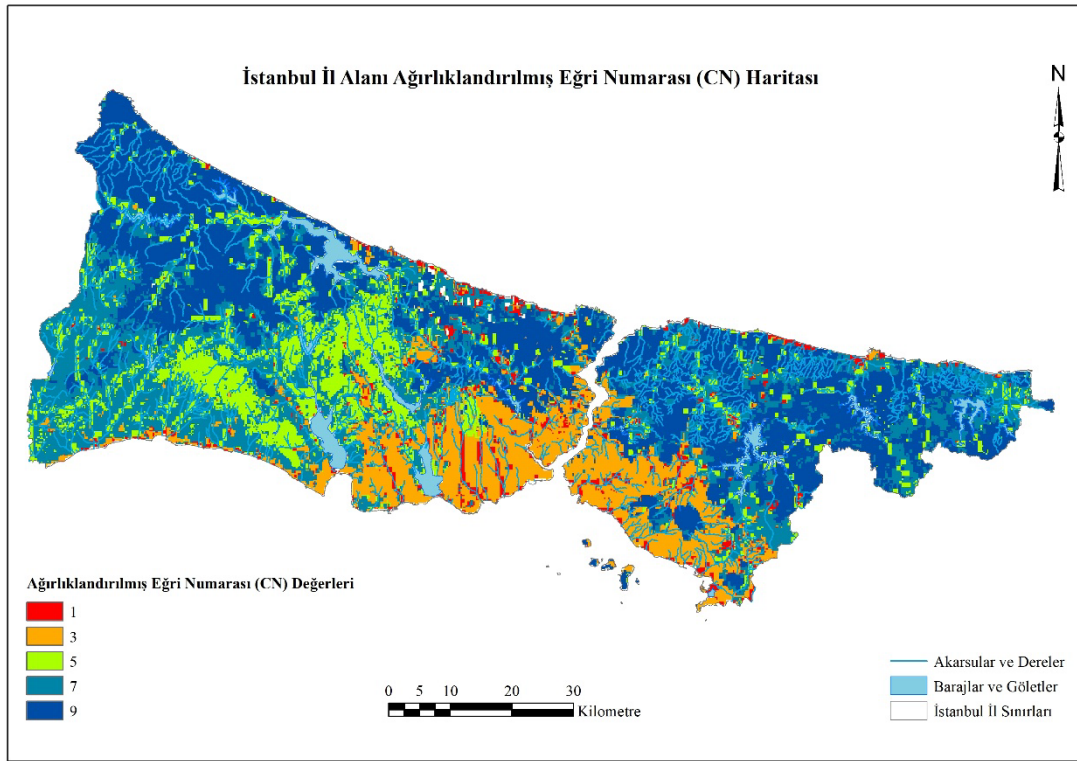
3.2.7 Eğri Numarası (Curve number - CN)

Eğri numarası (CN), Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı'nın Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından geliştirilmiş bir hidrolojik ampirik parametredir. CN, suyun toprak üzerinden ne kadar hızlı hareket edeceğini belirleyen bir parametredir. Daha düşük CN değeri, suyun daha kolay sızmasına ve erozyon riskinin azalmasına neden olur. Eğri numarası, arazinin yüzey akışını belirlemek için kullanılan bir yöntem olmaktadır. Bu değer, arazinin kullanım şekline, toprak tipine ve bitki örtüsüne bağlı olarak suyun yüzeyden akış hızını tahmin etmektedir.

Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak CN kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.9'de verilmiştir. Bu sınıflandırmaya ait CN haritası ise Şekil 3.18'de bulunmaktadır.

Çizelge 3.9: Eğri Numarası (CN) kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Eğri Numarası (CN)	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
<73	9	Düşük CN değerleri, yüzey akışının minimum düzeyde olduğunu ve suyun yeraltına sızma potansiyelinin maksimum seviyeye ulaştığını gösterir. Bu bölgeler MAR için en uygun alanlardır.
73-75	7	Yüzey akışının nispeten hala düşük olduğu bu aralıklarda suyun yeraltına sızması mümkündür ve MAR projeleri için oldukça uygundur.
75-83	5	Orta seviyede CN değerleri, yüzey akışının artmaya başladığını ve sızma potansiyelinin azaldığını gösterir. Bu bölgeler MAR için kısmen uygun kabul edilir.
83-88	3	Yüksek CN değerleri, yüzey akışının yoğunlaştığını ve yeraltına sızma potansiyelinin önemli ölçüde azaldığını gösterir. Bu alanlar MAR için düşük uygunluğa sahiptir.
>88	1	Çok yüksek CN değerleri, yüzey akışının maksimum düzeye ulaştığını ve sızma potansiyelinin minimum olduğunu ifade eder. Bu bölgeler MAR projeleri için uygun olmayan alanlardır.



Şekil 3.18: Yeniden sınıflandırılmış eğri numarası (Curve Number-CN) haritası.

Yüksek CN değerleri, suyun yüzeyde daha hızlı hareket etmesine ve daha az suyun toprağa sızmasına neden olmaktadır. MAR projelerinde, CN değeri doğru bir şekilde hesaplanarak, suyun depolanabilirliği ve yüzey akışının yönetilmesi sağlanmaktadır. Yüksek CN değerleri, genellikle drenaj sorunlarına yol açabilmektedir, bu yüzden bu parametrenin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

3.2.8 Yeraltı suyu seviyesi

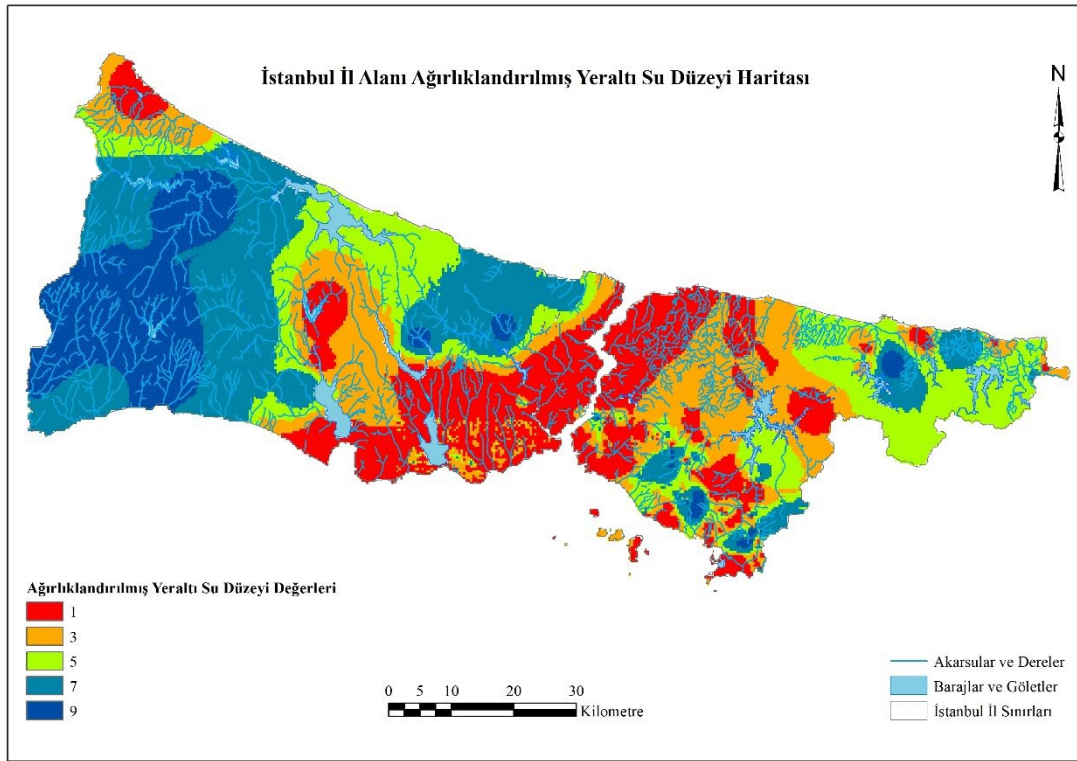
Yeraltı suyu, sulama, içme suyu temini ve doğal ekosistemler için kritik bir kaynaktır. Yeraltı suyu seviyesi, bir bölgedeki yer altı su kaynaklarının derinliğini ve seviyesini göstermektedir. MAR projelerinde yeraltı su seviyelerinin izlenmesi, depolama stratejilerini ve suyun ne kadarının yeraltına iletilmesi gerektiğini belirlemek için gereklidir. Yeraltı suyu seviyesinin çok derin olması, suyun yer altına sızmasını zorlaştırabilirken, sık seviyeler suyun hızla yer altına inmesine yardımcı olabilmektedir. Bununla birlikte çok sık yeraltı suyu seviyeleri, akiferin doluluk oranının yüksek olduğunu ve ek su depolama potansiyelinin sınırlı olduğunu ifade etmektedir. Yeraltı suyu seviyesi, aynı zamanda arazinin su dengesi ve su kullanımı üzerinde de belirleyici bir faktördür. Yeraltı suyu, su kaynağının derinliği ve

kullanılabilirliğiyle doğrudan ilişkilidir. MAR projeleri için ideal yeraltı su seviyesi genellikle 20-140 m olarak belirtilmiştir (Zaidi ve diğ., 2015).

Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak yeraltı suyu seviyesi kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.10'da verilmiştir. Bu çizelgedeki değerler baz alınarak hazırlanan yeraltı suyu seviyesi haritası Şekil 3.19'da yer almaktadır.

Çizelge 3.10: Yeraltı suyu seviyesi kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Yeraltı Suyu Seviyesi (m)	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
<10	1	Yeraltı suyu seviyesi çok sığdır, bu da akiferin neredeyse dolu olduğunu ve ek su depolama kapasitesinin çok sınırlı olduğunu gösterir.
11-15	3	Yeraltı suyu seviyesi biraz daha derindir, ancak akiferin depolama kapasitesi hala sınırlıdır.
16-20	5	Orta seviyedeki yeraltı suyu düzeyleri, akiferin kısmen uygun olduğunu ve MAR projeleri için potansiyel taşıdığını ifade eder.
21-30	7	Yeraltı suyu seviyesi daha derindir ve bu da akiferin yeterli depolama kapasitesine sahip olduğunu gösterir. Bu alanlar MAR projeleri için oldukça uygundur.
31-55	9	Yeraltı suyu seviyesi derin olup, akiferin maksimum depolama kapasitesine sahip olduğunu ifade eder. Bu bölgeler MAR projeleri için en ideal alanları temsil eder.



Şekil 3.19: Yeniden sınıflandırılmış yeraltı su seviyesi haritası.

3.2.9 Drenaj yoğunluğu

Drenaj yoğunluğu, bir bölgedeki drenaj sistemlerinin yoğunluğunu ve etkinliğini ifade eder. Bu kriter, yüzeysel su akışını ve suyun toprak tarafından tutulma oranını belirlemek açısından önemlidir. Düşük drenaj yoğunluğu, suyun toprakta daha fazla zaman geçirerek yer altına sızmasına olanak tanır. Buna karşın, yüksek drenaj yoğunluğu, suyun daha hızlı hareket etmesine ve yüzeyden uzaklaşmasına neden olur. MAR projelerinde drenaj yoğunluğunun değerlendirilmesi, suyun depolanmasını ve yer altına iletilmesini optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Drenaj yoğunluğu sınıfları, proje sahasının uygunluk derecelerini belirlemek için skarlama sistemiyle analiz edilmektedir.

Drenaj yoğunluğu, yüzey suyu akışının ve toprağın su tutma kapasitesinin dengelenmesini sağlayan önemli bir kriterdir. MAR projelerinde, suyun verimli bir şekilde toprakta tutulması ve yer altına sızdırılması için drenaj yoğunluğu değerlerine dayalı doğru bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Yüksek drenaj yoğunluğuna sahip bölgeler, suyun hızlı bir şekilde yer altına iletilmesi açısından öncelikli bölgeler olarak değerlendirilmelidir. Özellikle suyun yeraltına doğru sızmasını teşvik eden uygun drenaj ağları, bu analizde önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır.

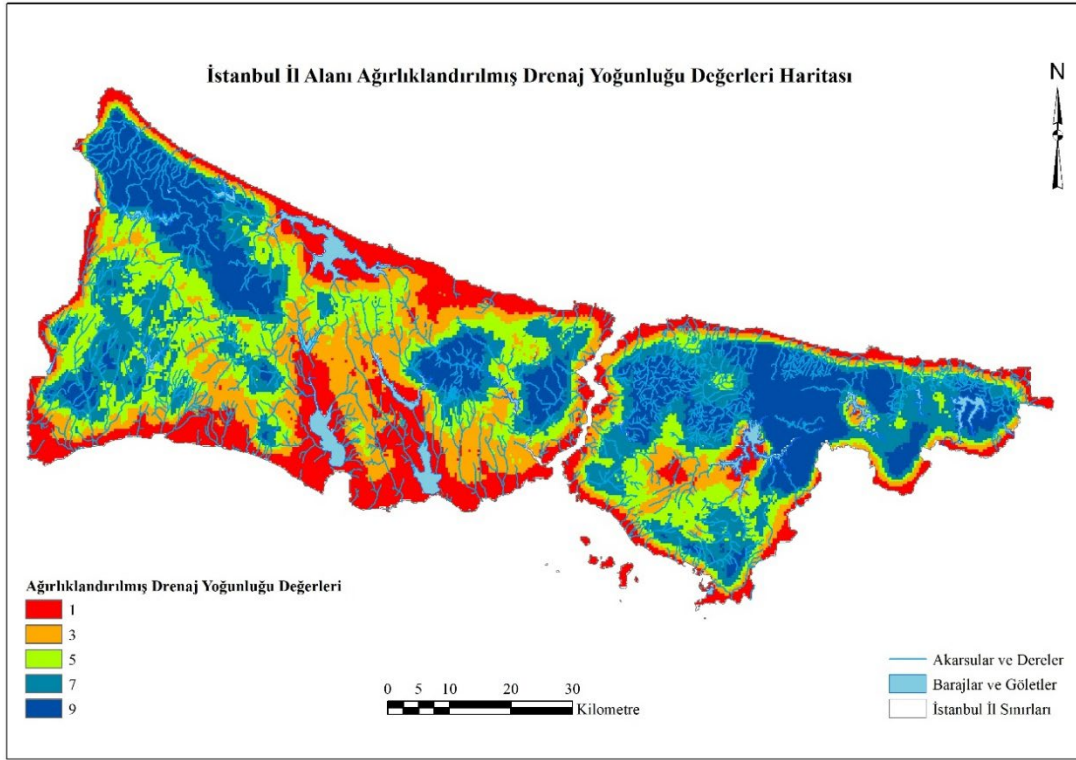
Önceki bölümde belirtilen referanslara ve uzman görüşlerine dayanarak drenaj yoğunluğu kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.11’de verilmiştir. Bu sınıflandırılmayla oluşturulmuş drenaj yoğunluğu haritası Şekil 3.20’de bulunmaktadır.

Çizelge 3.11: Drenaj yoğunluğu kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Drenaj Yoğunluğu (km/km ²)	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
0-1,8	1	Çok düşük drenaj yoğunluğu, suyun yayılmasına neden olur ve suyun etkili bir şekilde toplanmasını zorlaştırır. Bu bölgeler MAR projeleri için daha az uygundur.
1,8-2,2	3	Düşük drenaj yoğunluğu, suyun bir kısmının yeraltına sızabileceği, ancak toplanmasının zor olduğu alanlardır.
2,2-2,4	5	Orta yoğunlukta drenaj sistemlerine sahip alanlardır. Suyun hem toplanması hem de yeraltına yönlendirilmesi için dengeli alanları temsil eder.
2,4-2,6	7	Yüksek drenaj yoğunluğuna sahip alanlardır. Suyun etkin bir şekilde akış yolları boyunca toplanabileceği ve yönlendirilebileceği bölgeleri işaret eder.
2,7-3,8	9	Çok yüksek drenaj yoğunluğuna sahip bölgelerdir. MAR projeleri için ideal koşullar sağlar çünkü suyun yönlendirilmesi için doğal akış yolları oldukça gelişmiştir.

Literatürde drenaj yoğunluğu değeri suyun mobilitesinin yüksek olduğu yani yüzey akışının hızlı olduğu alanlar olarak değerlendirilip, drenaj yoğunluğunun yüksek olduğu bölgeler MAR için uygun olmayan alanlar olarak değerlendirilmiştir (Sandoval ve diğ. 2019; Zhang ve diğ. 2019; Zghibi ve diğ. 2020; Jhariya ve diğ. 2021; Mouhoumed ve diğ. 2023; Kawara ve diğ. 2023). Bu çalışmada İstanbul’un coğrafi koşulları da göz önünde bulundurularak ve suyun geçirimli olduğu alanlar ve yüzey akışı diğer kriterlerle de kontrol edildiğinden, drenaj yoğunluğunun yüksek olduğu

alanlar suyun toplanabileceği, su yoğunluğunun fazla olacağı alanlar olarak değerlendirilip sınıflama bu mantık çerçevesinde oluşturulmuştur.



Şekil 3.20: Yeniden sınıflandırılmış drenaj yoğunluğu haritası.

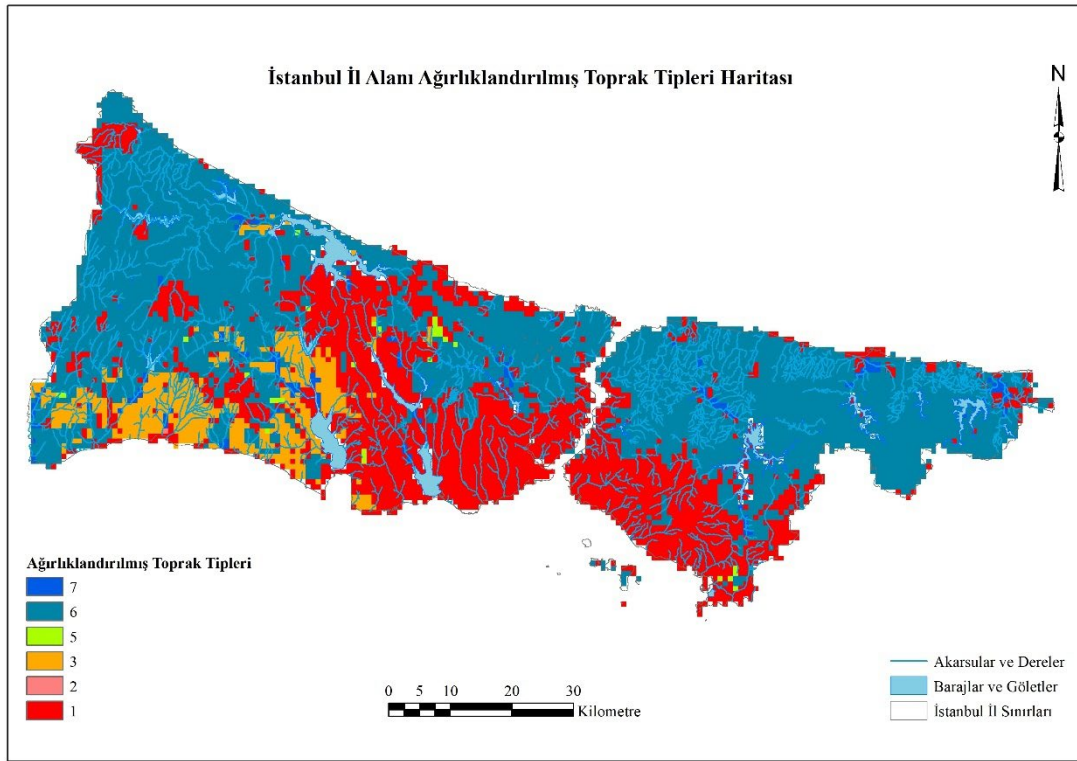
3.2.10 Toprak Tipi

Toprak tipi, bir bölgedeki toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler. Toprak türleri, suyun ne şekilde hareket edeceğini ne kadarının emileceğini ve ne kadarının yüzeyden akacağını etkilemektedir. Farklı toprak tipleri, MAR projelerinin başarısı üzerinde farklı etkiler yaratabilir. Örneğin; kumlu topraklar, suyu hızla geçirebilirken, killi topraklar suyu tutma kapasitesine sahiptir. Toprak tipi, aynı zamanda toprakta suyun depolanabilirliği, su tutma kapasitesi ve geçiş hızı üzerinde belirleyici bir faktördür. Bu nedenle, toprak tipi analizi, MAR projelerinin tasarımında kritik bir rol oynar.

Önceki bölümde belirtilen referanslara, FAO (2015) raporuna ve uzman görüşlerine dayanarak toprak tipi kriterinin alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması açıklamalarıyla birlikte Çizelge 3.12’de verilmiştir. Toprak tiplerinin sınıflandırılmasının ardından çizelgede gözlenen değerlere göre oluşturulmuş toprak tipleri haritası ve sınıflandırma değerlerine ait görselleştirmeler Şekil 3.21’de görülmektedir.

Çizelge 3.12: Toprak tipi kriteri alt kriterlerinin yeniden sınıflandırılması ve açıklamaları.

Toprak Tipi	Ağırlıklandırma Sınıfı	Açıklama
Leptosoller	1	Çakıllı ve/veya taşlı toprak yapısıyla bilinen bu toprak tipi düşük geçirgenliğe sahiptir. Bu nedenle MAR projeleri için en az uygun kategoridedir.
Gleysoller	2	Yüksek su tutma kapasitesine sahip suya doymuş topraklardır. Sulak arazilerin topraklarıdır ve çoğu zaman sığ yeraltı suyunun da göstergesidir. Bu durum suyun yeraltına sızmasını sınırlayarak uygunluğu azaltır.
Acrisoller	3	Düşük geçirgenlik ve su tutma kapasitesine sahiptir. Yüksek kil içeriğine sahiptir. Genellikle MAR projeleri için çok uygun değildir.
Histosoller	3	Yüksek organik madde içeriği ile suya doymuş topraklardır aynı zamanda yeraltı su seviyesi sığ bölgelerde bulunurlar. Stabilite ve geçirgenlik açısından genellikle çok uygun değildir.
Vertisoller	3	Şişmiş ve ağır killer barındırırlar. Şişme ve çatlama yapan yapısı ile düşük geçirgenliğe sahiptir. MAR projelerinde kullanımı sınırlıdır.
Technosols	4	İnsanlığa ait malzemeler (artefakt) içeren topraklardır. Genellikle kentsel alanları temsil ederler. Yapısal duruma bağlı olarak bazı projelerde kullanılabilir.
Regosoller	5	Birleşmemiş ince taneli yapısı nedeniyle daha fazla geçirgenlik sağlar. Orta düzeyde MAR uygunluğu taşır.
Cambisoller	6	Ayrışmış kil ve karbonat barındıran yapısı ile orta-iyi derecede geçirgenlik ve iyi su tutma kapasitesine sahiptir. MAR projeleri için uygun kabul edilebilir.
Fluvisoller	7	Nehir yataklarına özgü olan bu alüvyal topraklar, yüksek geçirgenlikleri ve su depolama kapasiteleri ile bölge özelinde MAR projeleri için en uygun toprak tipidir.



Şekil 3.21: Yeniden sınıflandırılmış toprak tipi haritası.

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) analizi ve bunun sonucunda elde edilen ağırlıklar ile MAR projeleri için uygunluk haritalarının oluşturulmasına dair bulgular sunulmaktadır. AHP, kriterlerin karşılaştırılması ve her bir kriterin toplamda ne kadar önemli olduğunu belirlemek için kullanılan bir karar destek yöntemidir. Çalışmada kullanılan kriterler önceki bölümde de belirtildiği üzere hidrojeoloji, yükseklik, eğim, yağış, arazi örtüsü/arazi kullanımı, normalleştirilmiş bitki örtüsü farkı indeksi (NDVI), eğri numarası (CN), yeraltı suyu seviyesi, drenaj yoğunluğu ve toprak tipi olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan AHP kriter ağırlıkları çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: On kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisi.

Kriterler	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Hidrojeoloji (a)	1,00	7,00	4,00	2,00	4,00	6,00	3,00	2,00	3,00	5,00
Yükseklik (b)	0,14	1,00	0,57	0,29	0,57	0,86	0,50	0,29	0,43	0,71
Eğim (c)	0,25	1,75	1,00	0,50	1,00	1,50	0,75	0,50	0,75	1,25
Yağış (d)	0,50	3,50	2,00	1,00	2,00	3,00	1,50	1,00	1,50	2,50
Arazi Örtüsü/Arazi Kullanım (e)	0,25	1,75	1,00	0,50	1,00	1,50	0,75	0,50	0,75	1,25
NDVI (f)	0,17	1,17	0,67	0,33	0,67	1,00	0,50	0,33	0,50	0,83
Eğri Numarası (g)	0,33	2,00	1,33	0,67	1,33	2,00	1,00	0,67	1,00	1,67
Yeraltı Suyu Seviyesi (h)	0,50	3,50	2,00	1,00	2,00	3,00	1,50	1,00	1,50	2,50
Drenaj Yoğunluğu (i)	0,33	2,33	1,33	0,67	1,33	2,00	1,00	0,67	1,00	1,67
Toprak Tipi (j)	0,20	1,40	0,80	0,40	0,80	1,20	0,60	0,40	0,60	1,00

AHP süreci, belirlenen kriterler arasındaki önem derecelerini matematiksel bir formülle hesaplamak için kullanılmıştır. Kriterler, birbirine göre karşılaştırılarak her birine bir ağırlık atanmıştır. Bu aşamada, her bir kriterin çalışma alanındaki MAR

projelerinin uygunluğuna nasıl katkı sağladığı belirlenmiştir. Aşağıda, elde edilen ağırlıklar ve her kriterin yüzdesel katkısı yer almaktadır:

Hidrojeoloji %27,22 olarak hesaplanmıştır. Hidrojeoloji, yeraltı suyu beslemesi ile doğrudan ilişkili bir faktördür ve bu nedenle en yüksek ağırlığa sahiptir. Su geçişliliği, geçirgenlik ve yeraltı suyu seviyeleri, MAR projelerinin etkinliğini doğrudan etkilemektedir.

Yükseklik %3,95 olarak hesaplanmıştır. Yükseklik, suyun yer değiştirmesini etkileyen bir parametredir. Yüksek alanlar, suyun yeraltına sızmasını engelleyebilmekte ve bu nedenle sınırlı bir etkiye sahip olabilmektedir.

Eğim %6,81 olarak hesaplanmıştır. Eğim, suyun akış hızını ve yönünü belirleyen bir faktördür. Yüksek eğim, suyun yüzeyde hızla hareket etmesine neden olabilir, bu da sızma potansiyelini azaltmaktadır.

Yağış %13,61 olarak hesaplanmıştır. Yağış miktarı, suyun yüzeydeki hareketini ve yeraltına sızma oranını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yağış yoğunluğu, suyun erişilebilirliğini ve dolayısıyla MAR projelerinin başarısını etkileyebilmektedir.

Arazi örtüsü/arazi kullanım %6,81 olarak hesaplanmıştır. Arazi örtüsü ve arazi kullanımı, suyun toprağa ne kadar sızabileceğini etkileyen önemli bir faktördür. Tarım arazileri veya orman alanları gibi doğal örtüler, suyun sızmasını artırabilmektedir.

NDVI %4,54 olarak hesaplanmıştır. NDVI, bitki örtüsünün sağlığını ve yoğunluğunu belirlemek için kullanılan bir parametredir. Sağlıklı bitki örtüsü, suyun toprağa sızmasını artırarak MAR projelerinin etkinliğini artırmaktadır.

Eğri numarası (CN) %8,94 olarak hesaplanmıştır. Eğri numarası, yüzey akışını belirleyen bir parametredir ve suyun yeraltına sızma kapasitesini etkilemektedir. Düşük eğri numarası değerlerine sahip alanlar daha fazla suyun sızmasını sağlamaktadır.

Yeraltı suyu seviyesi %13,61 olarak hesaplanmıştır. Yeraltı suyu seviyesi, suyun yeraltında ne kadar depolanabileceğini göstermektedir ve bu, MAR projelerinin etkinliğini belirleyen önemli bir faktördür.

Drenaj Yoğunluğu %9,07 olarak hesaplanmıştır. Drenaj yoğunluğu, suyun yüzeydeki hareketini ve toprakta suyun birikme miktarını etkilemektedir. Yüksek drenaj yoğunluğuna sahip alanlarda suyun yeraltına sızmasını zorlaştıracaktır.

Toprak Tipi %5,44 olarak hesaplanmıştır. Toprak tipi, suyun geçirgenliğini etkileyen bir faktördür. Toprak tiplerine göre bölgenin geçirimsizlik kapasitesi değişkenlik göstermektedir.

Bu ağırlıklar, her bir kriterin MAR projelerine katkısını belirler ve sonuç olarak çalışma alanındaki MAR uygulamaları için en uygun bölgelerin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Lambda max (λ_{max}) ve Consistency Index (CI) değerleri, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yönteminde karar vericilerin tutarlılık seviyesini ölçmek için kritik parametrelerdir. Bu değerler, kriterler arasındaki karşılaştırmaların ne derece tutarlı olduğunu ve karar verme sürecinin güvenilirliğini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. AHP'nin temel amacı, bir dizi alternatifin, belirli kriterler doğrultusunda değerlendirilmesini sağlamak ve bu alternatifler arasında en uygun olanını seçmektir. Ancak, bu karar verme sürecinin sağlıklı olabilmesi için kullanılan kriterler arasındaki karşılaştırmaların tutarlı olması gerekmektedir. Aksi takdirde, karar verme sürecinin güvenilirliği sorgulanabilir hale gelmektedir. AHP analizi sırasında, verilen karşılaştırmaların tutarlılığını değerlendirmek için kullanılan en yaygın araçlardan biri olan CI, lambda max (λ_{max}) değeri ile hesaplanır ve matrisin tutarlılığına dair daha spesifik bir ölçüm sunar. CI değeri, CR (consistency ratio) ile birlikte matrisin ne kadar tutarlı olduğunu gösteren bir ölçüdür. CR değeri 0'a yakınsa, karşılaştırmaların yüksek derecede tutarlı olduğu ve karar vericilerin kıyaslamalarında belirgin bir tutarsızlık bulunmadığı anlaşılır. CR değeri 0,1'in üzerinde bir değere sahipse, bu tutarsızlıkların göz önünde bulundurulması gerektiğini ve karar vericilerin yeniden değerlendirme yapmaları gerektiğini işaret eder.

On kriterli veri seti AHP matrisine göre λ_{max} değeri 10,00 olarak hesaplanmıştır, bu veri setinde kriter sayısı yani n 10 olduğu için daha önce belirtilen formülden yola çıkılarak, önce $(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ formülünü (formül 3.1) kullanarak CI değeri elde edilmiştir. CI, 0,0002 olarak bulunmuştur. Rastgele indeks olarak bilinen RI değeri, 10 kriter için 1,49 olarak belirtilmiştir (Saaty, 1980) (Çizelge 3.2). CI değeri RI değerine bölünerek elde edilen CR değeri (formül 3.2) ise 0,0001 olarak bulunmuştur. Bu düşük CI değeri, kriterler arasındaki karşılaştırmaların oldukça tutarlı olduğunu göstermektedir. AHP'nin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için, CR değeri genellikle 0,1'den küçük olmalıdır. Bu CR değeri, verilen lambda max değeri ve CI değeri ile

analizdeki tutarlılığın oldukça yüksek olduğunu ve karar vericilerin kıyaslamalarındaki tutarsızlığın minimal düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma sonunda, her bir kriterin AHP kriterlerinin ağırlıkları doğrultusunda MAR projeleri için uygunluk haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Bu harita, çalışma kapsamında belirlenen kriterlere ve onların ağırlıklarına göre İstanbul'un MAR projeleri için uygunluğunu görsel olarak ortaya koymaktadır. Her bir kriterin harita üzerindeki etkisi, kriterin ağırlığına göre belirlenmiştir. Haritada uygunluk oranları yeniden sınıflandırılmış ve 1-9 ölçeği yerine daha anlaşılır bir lejant oluşturduğu için 1 en düşük ve 5 en yüksek olmak üzere, 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. 1-9 aralığında ağırlıklandırılan kriterler haritada daha iyi anlaşılması için yeniden sınıflandırılmış ve uygunluk oranları 1 en düşük ve 5 en yüksek olmak üzere, 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. 1; en uygun olmayan alanlar, 2; düşük düzeyde uygun alanlar, 3; orta düzeyde uygun olanlar, 4; uygun alanlar ve 5; çok uygun alanlar olarak anlamlandırılmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular MAR projelerinin hangi bölgelerde daha verimli bir şekilde uygulanabileceğine dair güçlü bir temel sunmaktadır. Bu haritalar ve analizler, yerel yönetimler ve su yönetim otoriteleri tarafından su kaynaklarını daha etkin kullanmak için referans alınabilecektir.

Çalışma kapsamında karar verme sürecini daha pratik ve hızlı hale getirmek amacıyla on kriterli veri setinden bölgenin coğrafi koşulları da düşünülerek daha fazla önemli olabileceği düşünülen yedi kriter seçilerek “yedi kriterli AHP analizi” gerçekleştirilmiştir. Yükseklik kriteri genellikle eğimle birlikte değerlendirilmesi gereken bir kriterdir, yüksek alanlarda eğimin daha belirgin olması da muhtemeldir. Bu yüzden yüksekliği ayrı bir kriter olarak kullanmak yerine, eğimi kullanmak bu iki kriteri sadeleştirmeye yardımcı olmuştur. Yağış kriteri bölge için genellikle uygun bir profil göstermektedir; bu yüzden için yedi kriterli modelde dikkate alınmamıştır. NDVI verisi bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlığının ölçütünü, dolayısıyla bu çalışmada geçirgenliği ve yüzey akışını temsil etmektedir. Ancak arazi örtüsü/ arazi kullanımı, eğri numarası ve toprak tipleri de benzer şekilde bu tür verilerle ilgili olduğu düşünüldüğünden yedi kriterli modelde NDVI verisi dikkate alınmayarak sadeleştirmeye gidilmiştir. Bu analizde; hidrojeoloji, drenaj yoğunluğu, eğri numarası, arazi kullanım/arazi örtüsü, yeraltı suyu seviyesi, toprak tipi ve eğim kriterleri kullanılarak aşağıdaki AHP matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Yedi kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisi.

Kriterler	a	b	c	d	e	f	g
Hidrojeoloji (a)	1,00	4,00	4,00	3,00	2,00	3,00	5,00
Eğim (b)	0,25	1,00	1,00	0,75	0,50	0,75	1,25
Arazi Örtüsü/Arazi Kul. (c)	0,25	1,00	1,00	0,75	0,50	0,75	1,25
Eğri Numarası (d)	0,33	1,33	1,33	1,00	0,60	1,00	1,70
Yeraltı Suyu Seviyesi (e)	0,50	2,00	2,00	1,67	1,00	1,50	2,50
Drenaj Yoğunluğu (f)	0,33	1,33	1,33	1,00	0,40	1,00	1,67
Toprak Tipi (g)	0,20	0,80	0,80	0,59	0,67	0,60	1,00

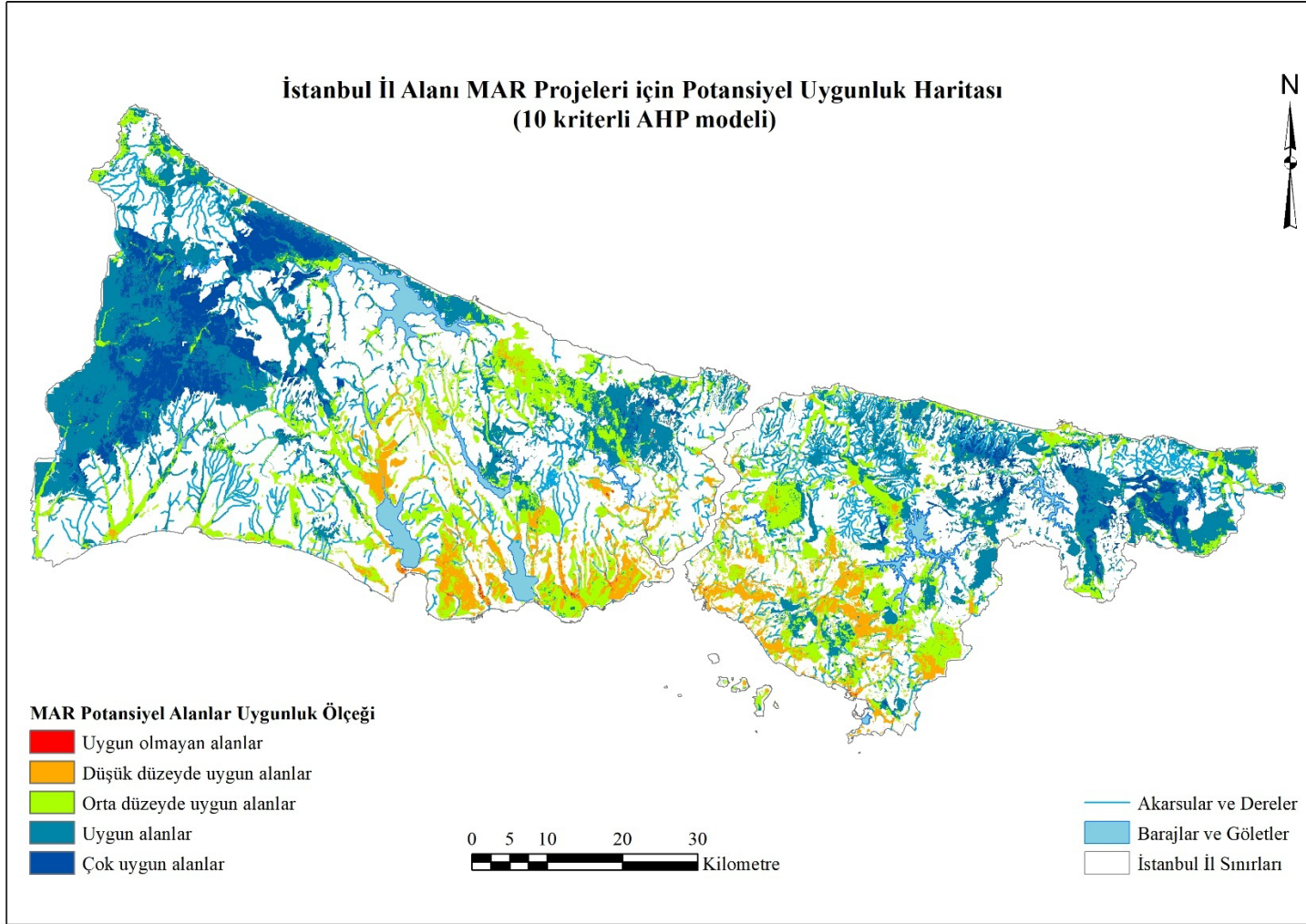
Yedi kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisinin normalleştirilmesi sonucunda kriter ağırlıkları hesaplanmış ve bu kriterlerin yüzdelik dağılımları elde edilmiştir. Buna göre;

Hidrojeoloji %34,84 ile ağırlık dağılımında açık ara en yüksek oranı almıştır. Bu durum, hidrojeolojinin MAR projelerinde temel öneme sahip olduğunu göstermektedir. Yeraltı suyu depolama kapasitesi ve geçirgenlik seviyesini temsil eden bu kriter, suyun akiferlere başarılı bir şekilde şarj edilmesini sağlayacak alanların tespitinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, bölgedeki yeraltı suyu yönetiminde sürdürülebilirlik ve etkinlik hedefleniyorsa, hidrojeoloji belirleyici bir faktör olacaktır.

Yeraltı suyu seviyesi %17,69 ile ikinci önemli kriter olmuştur. Daha derin yeraltı suyu seviyeleri, akiferin ek su depolama potansiyelini artırmakta ve MAR projelerinin başarısını desteklemektedir. Sığ yeraltı suyu seviyeleri ise doluluğun yüksek olduğunu göstermekte ve MAR projeleri için uygunluğu azaltmaktadır.

%11,48 ile orta düzeyde bir ağırlığa sahip olan eğri numarası kriteri toprak tipi ve arazi örtüsüne dayalı olarak yüzey akış miktarını değerlendirmektedir. MAR projelerinde, yüzey akışının kontrol edilmesi ve infiltrasyonu teşvik edecek alanların belirlenmesi önemlidir. Bu kriter, arazi kullanım ve toprak özelliklerinin MAR projelerinde nasıl bir rol oynayacağını anlamak için kullanılmaktadır.

%10,94 ile orta düzeyde ağırlığa sahip olan drenaj yoğunluğu kriteri, yüzey akışının yoğunluğunu ifade etmektedir. Yüksek drenaj yoğunluğu, suyun hızla akması yerine akiferlere beslenme potansiyelini artırmaktadır. Bu kriterin yüksek bir ağırlık alması, MAR projelerinde doğal drenaj yapısının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.1: MAR Projeleri için on kritere göre belirlenmiş potansiyel uygunluk haritası

Eğim %8,71 olarak hesaplanmıştır. Eğimin nispeten düşük bir ağırlığa sahip olması, MAR projelerinin genellikle düşük eğimli alanlarda yapılma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Düşük eğim, yüzey akışını azaltarak suyun yeraltına sızmasını kolaylaştırmaktadır. Yüksek eğimli bölgeler suyun hızlı bir şekilde akmasına neden olacağı için, bu bölgeler genellikle MAR projeleri için daha az uygun kabul edilir.

Arazi örtüsü/arazi kullanımı kriteri de eğim ile aynı oranda %8,71 etkisi olan bir kriterdir. Bu durum, arazi kullanımının diğer kriterlere göre daha az belirleyici olduğunu gösterir. Bununla birlikte, insan faaliyetlerinin arazi üzerindeki etkisini anlamak için hala önemlidir. Özellikle kentsel bölgelerde, arazi örtüsüne bağlı olarak uygun alanların belirlenmesi için bu kriter dikkate alınmalıdır.

En düşük ağırlığa sahip kriter %7,62 ile toprak tipi olmuştur. Toprak tipleri, MAR projelerinde suyun yüzeyden akiferlere ulaşma etkinliğini belirlemektedir. Daha geçirgen ve gözenekli topraklar (örneğin, Fluvisoller) MAR projeleri için daha uygunken, kayalık ve suya doygun topraklar (örneğin, Leptosoller ve Gleysoller) bu tür projelerde sınırlı potansiyele sahiptir.

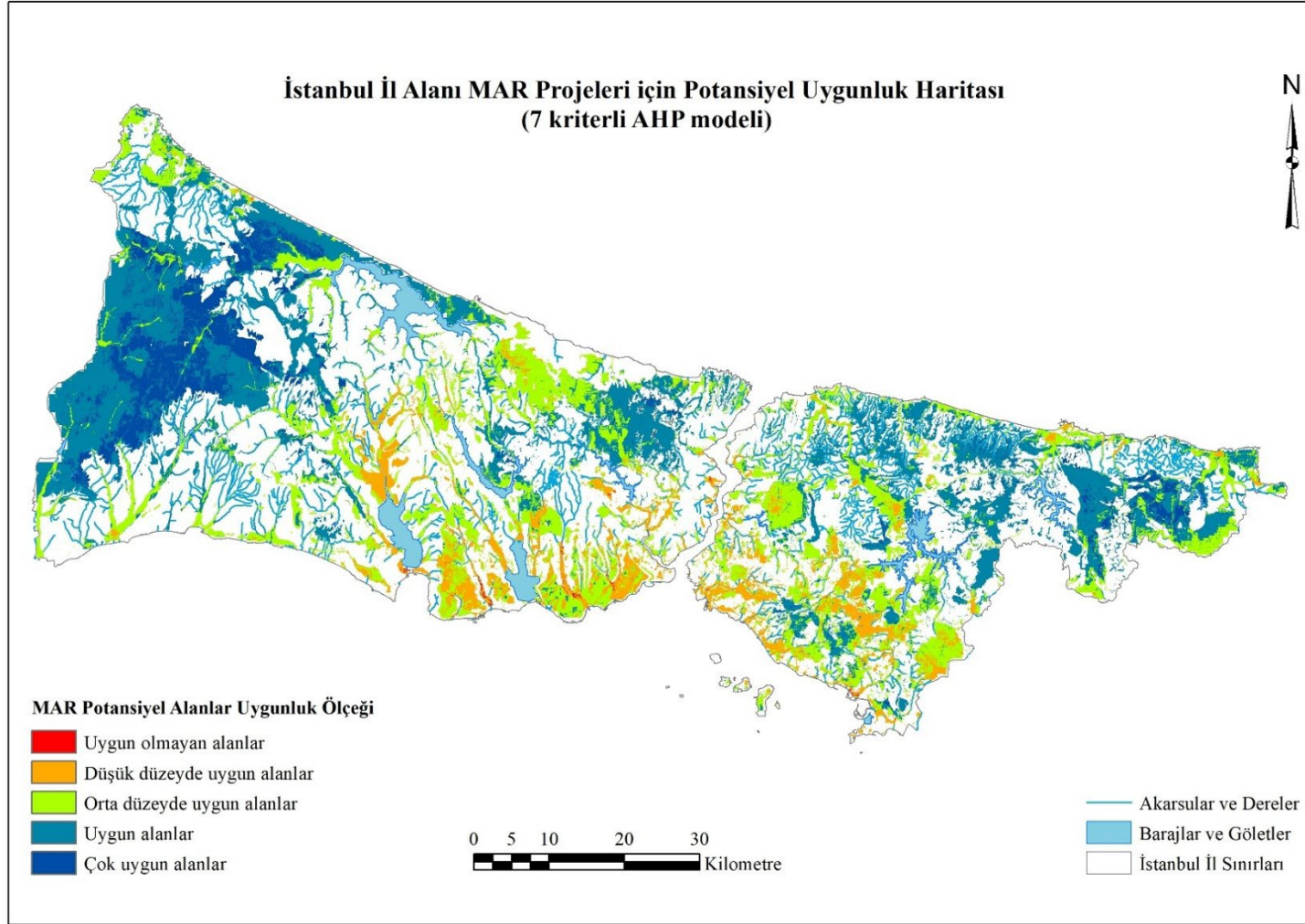
Hidrojeoloji ve yeraltı suyu seviyesi kriterleri toplam ağırlığın yaklaşık %53'ünü oluşturarak analiz üzerindeki etkinin yaklaşık yarısına sahiptir. Bu yedi kriterli veri setine göre MAR projelerinde doğal su döngüsünü etkileyen faktörlerin en önemli kriterler olduğunu açıkça göstermektedir. Hidrojeoloji burada belirleyici rol oynamıştır, çalışmanın temel hedefine uygun olarak analizde merkezi bir önem taşıdığını ifade etmektedir.

Yedi kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisine göre λ_{max} değeri 7,04 olarak hesaplanmıştır, bu veri setinde kriter sayısı yani n 7 olduğu için daha önce belirtilen formülden yola çıkılarak, önce $(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ formülünü (formül 3.1) kullanarak CI değeri elde edilmiştir. CI, 0,01 olarak bulunmuştur. Rastgele indeks olarak bilinen RI değeri, 7 kriter için 1,32 olarak belirtilmiştir (Çizelge 3.2). CI değeri RI değerine bölünerek (formül 3.2) elde edilen CR değeri ise 0,005 olarak bulunmuştur. Bu düşük CI değeri, kriterler arasındaki karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir. AHP'nin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için, CR değeri genellikle 0,1'den küçük olmalıdır. Bu CR değeri, verilen lambda max değeri (λ_{max}) ve CI değeri ile analizdeki tutarlılığın oldukça yüksek olduğunu ve karar vericilerin kıyaslamalarındaki tutarsızlığın minimal düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

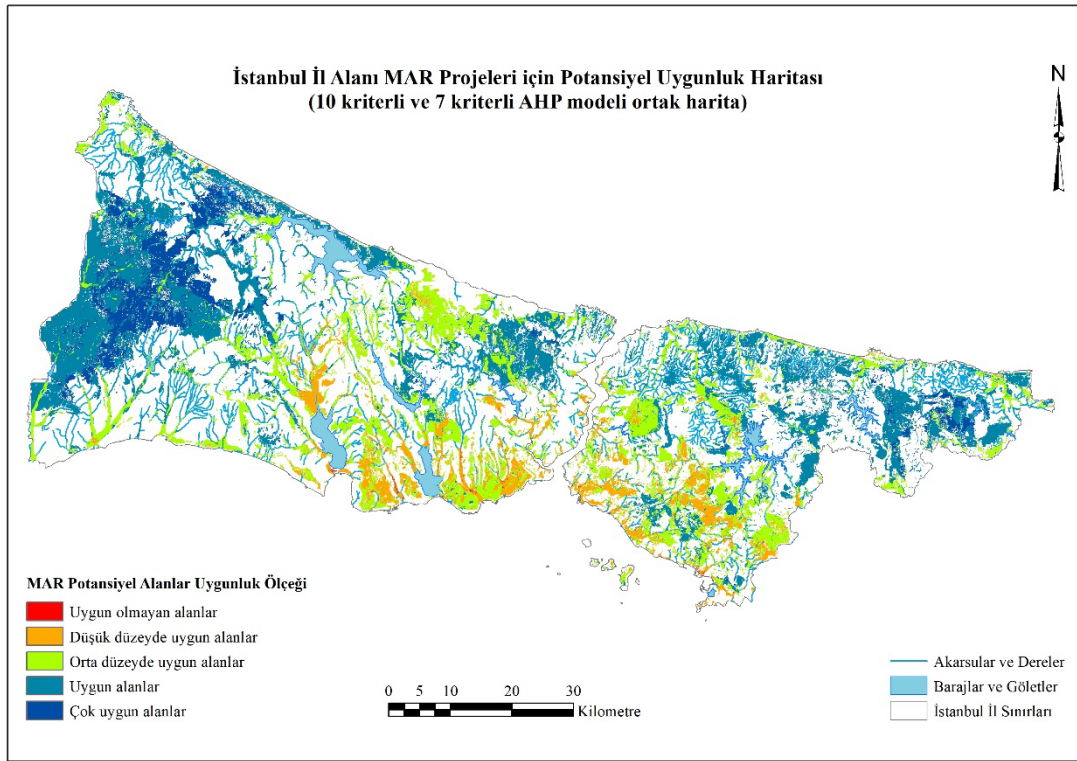
Çalışma sonunda, her bir kriterin AHP kriterlerinin ağırlıkları doğrultusunda MAR projeleri için uygunluk haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.2). Bu harita, çalışma kapsamında belirlenen kriterlere ve onların ağırlıklarına göre İstanbul'un MAR projeleri için uygunluğunu görsel olarak ortaya koymaktadır. Her bir kriterin harita üzerindeki etkisi, kriterin ağırlığına göre belirlenmiştir. 1-9 aralığında ağırlıklandırılan kriterler haritada daha iyi anlaşılması için yeniden sınıflandırılmış ve uygunluk oranları 1 en düşük ve 5 en yüksek olmak üzere, 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. 1; uygun olmayan alanlar, 2; düşük düzeyde uygun alanlar, 3; orta düzeyde uygun alanlar, 4; uygun alanlar ve 5; çok uygun alanlar olarak anlandırılmıştır.

Her iki analiz sonucunda elde edilen uygunluk haritaları görsel olarak özellikle MAR için uygun potansiyeli olan alanlarda büyük oranda benzerlik göstermektedir. Her iki analizde de kuzey bölgelerde (Çatalca, Silivri ve Şile gibi) yer alan alanlar “çok uygun alanlar” ve “uygun alanlar” sınıfında belirlenmiştir. On kriterli analiz ile yedi kriterli analiz oldukça benzer özellikler göstermektedir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Yedi kriterli analizde hidrojeoloji ve yeraltı suyu seviyesi gibi kriterlerin ağırlıkları baskın hale gelmiş ve sonuçlara daha fazla etki etmiştir. Yedi kriterli analiz, hesaplama süresi ve veri gereksinimi açısından daha hızlı ve uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. On kriterli ve yedi kriterli AHP analizlerinin sonuçları görsel ve istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3'te “raster calculator” aracıyla her iki harita birleştirilip ortak olarak gösterdiği uygun ve uygun olmayan alanlar görselleştirilmiştir. Şekil 4.4'te ise yine “raster calculator” aracıyla birebir aynı özelliği taşıyan her piksele tek bir numara (1) değeri verilirken, aynı özellikte olmayan pikseller için 0 değeri verilerek sadece birebir örtüşen alanlar görsel olarak düzenlenmiştir. Bu analizin sonucunda elde edilen haritanın öznetelik tablosunda 1 değerli piksel sayısı (eşleşen bölgeler) 55.941.855 ve 0 değerli piksel sayısı (farklı bölgeler) 37.623.822 olarak gözlenmiştir. Toplam piksel sayısını ve eşleşen piksel oranını kullanarak benzerlik oranı;

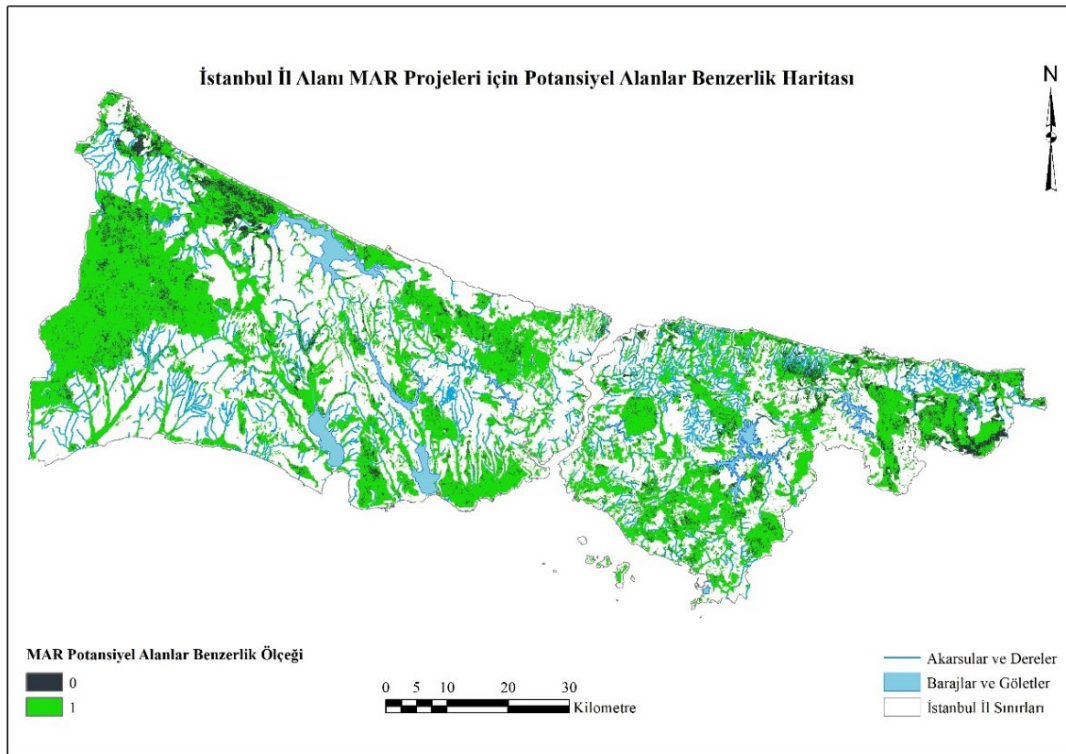
- Toplam piksel = 82.639.925+11.618.908= 94.258.833 olarak hesaplanmış ve
- Benzerlik oranı (%) = (Eşleşen Piksel Sayısı (82.639.925) / Toplam Piksel Sayısı (94.258.833)) * 100
- Buna göre her iki haritanın benzerlik oranı %87,7 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.2: MAR Projeleri için yedi kritere göre belirlenmiş potansiyel uygunluk haritası.



Şekil 4.3: On kriterli ve yedi kriterli uygunluk haritaları için ortak MAR için uygun alanlar haritası.



Şekil 4.4: On kriterli ve yedi kriterli modellerin ortak pikseller benzerlik haritası.

Çalışma kapsamında karar verme sürecini daha pratik ve hızlı hale getirmek amacıyla yedi kriterli veri setinden bölgenin coğrafi koşulları da düşünülerek en yüksek ağırlığa sahip ilk beş kriter kullanılarak sadeleştirmeye gidilmiştir ve “beş kriterli AHP analizi” gerçekleştirilmiştir. Bu analizde; hidrojeoloji, eğim, eğri numarası, yeraltı suyu seviyesi ve eğim kriterleri kullanılarak aşağıdaki AHP matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3: Beş kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisi.

Kriterler	a	b	c	d	e
Hidrojeoloji (a)	1,00	4,00	3,00	2,00	3,00
Eğim (b)	0,25	1,00	0,75	0,50	0,75
Eğri Numarası (c)	0,33	1,33	1,00	0,60	1,00
Yeraltı Suyu Seviyesi (d)	0,50	2,00	1,67	1,00	1,50
Drenaj Yoğunluğu (e)	0,33	1,33	1,00	0,67	1,00

Beş kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisinin normalleştirilmesi sonucunda kriter ağırlıkları hesaplanmış ve bu kriterlerin yüzdelik dağılımları elde edilmiştir. Buna göre;

Hidrojeoloji %41,31 ile ağırlık dağılımında açık ara en yüksek oranı almıştır. Bu durum, hidrojeolojinin MAR projelerinde temel öneme sahip olduğunu göstermektedir. Yeraltı suyu depolama kapasitesi ve geçirgenlik seviyesini temsil eden bu kriter, suyun akiferlere başarılı bir şekilde şarj edilmesini sağlayacak alanların tespitinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, bölgedeki yeraltı suyu yönetiminde sürdürülebilirlik ve etkinlik hedefleniyorsa, hidrojeoloji belirleyici bir faktör olacaktır.

Yeraltı suyu seviyesi %21,10 ile ikinci önemli kriter olmuştur. Daha derin yeraltı suyu seviyeleri, akiferin ek su depolama potansiyelini artırmakta ve MAR projelerinin başarısını desteklemektedir. Sığ yeraltı suyu seviyeleri ise doluluğun yüksek olduğunu göstermekte ve MAR projeleri için uygunluğu azaltmaktadır.

%13,49 ile orta düzeyde bir ağırlığa sahip olan eğri numarası kriteri toprak tipi ve arazi örtüsüne dayalı olarak yüzey akış miktarını değerlendirmektedir. MAR projelerinde, yüzey akışının kontrol edilmesi ve infiltrasyonu teşvik edecek alanların belirlenmesi önemlidir. Bu kriter, arazi kullanım ve toprak özelliklerinin MAR projelerinde nasıl bir rol oynayacağını anlamak için kullanılmaktadır.

%13,77 ile orta düzeyde ağırlığa sahip olan drenaj yoğunluğu kriteri, yüzey akışının yoğunluğunu ifade etmektedir. Yüksek drenaj yoğunluğu, suyun hızla akması yerine akiferlere beslenme potansiyelini artırmaktadır. Bu kriterin yüksek bir ağırlık alması, MAR projelerinde doğal drenaj yapısının önemini vurgulamaktadır. Özellikle suyun yeraltına doğru sızmasını teşvik eden uygun drenaj ağları, bu analizde önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır.

Eğim %10,33 olarak hesaplanmıştır. Eğimin nispeten düşük bir ağırlığa sahip olması, MAR projelerinin genellikle düşük eğimli alanlarda yapılma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Düşük eğim, yüzey akışını azaltarak suyun yeraltına sızmasını kolaylaştırmaktadır. Yüksek eğimli bölgeler suyun hızlı bir şekilde akmasına neden olacağı için, bu bölgeler genellikle MAR projeleri için daha az uygun kabul edilir.

Hidrojeoloji ve yeraltı suyu seviyesi kriterleri toplam ağırlığın yaklaşık %62'sini oluşturarak analiz üzerindeki etkinin yarısından fazlasına sahiptir. Bu beş kriterli veri setine göre MAR projelerinde doğal su döngüsünü etkileyen faktörlerin en önemli kriterler olduğunu açıkça göstermektedir. Hidrojeoloji burada belirleyici rol oynamıştır, çalışmanın temel hedefine uygun olarak analizde merkezi bir önem taşıdığını ifade etmektedir.

Beş kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisine göre λ_{max} değeri 5 olarak hesaplanmıştır, bu veri setinde kriter sayısı yani n 5 olduğu için daha önce belirtilen formülden yola çıkılarak, önce $(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ formülünü (formül 3.1) kullanarak CI değeri elde edilmiştir. CI, 0,0003 olarak bulunmuştur. Rastgele indeks olarak bilinen RI değeri, 5 kriter için 1,12 olarak belirtilmiştir (Çizelge 3.2). CI değeri RI değerine bölünerek (formül 3.2) elde edilen CR değeri ise 0,0003 olarak bulunmuştur. Bu düşük CI değeri, kriterler arasındaki karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir. AHP'nin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için, CR değeri genellikle 0,1'den küçük olmalıdır. Bu CR değeri, verilen lambda max değeri ve CI değeri ile analizdeki tutarlılığın oldukça yüksek olduğunu ve karar vericilerin kıyaslamalarındaki tutarsızlığın minimal düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

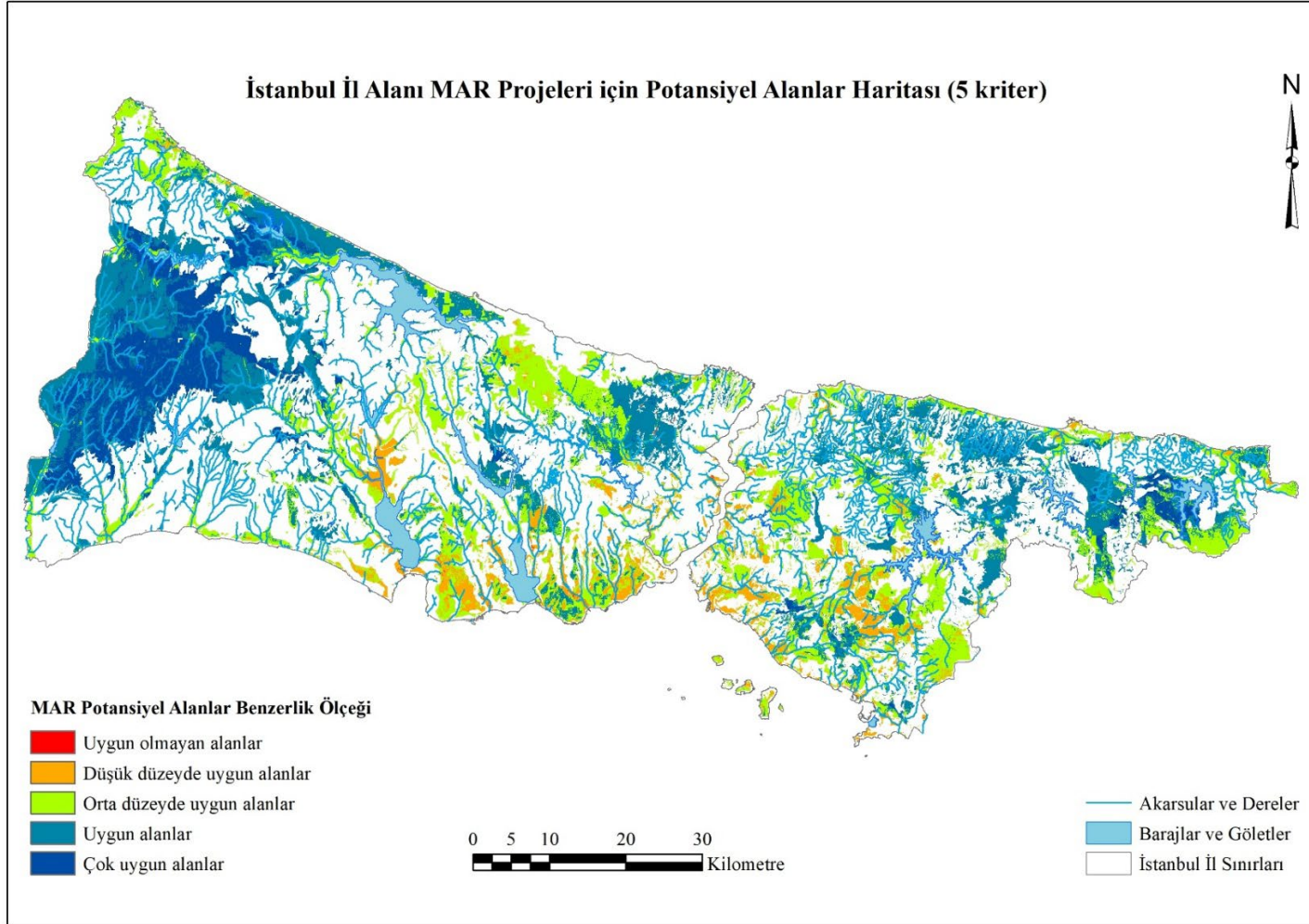
Çalışma sonunda, her bir kriterin AHP kriterlerinin ağırlıkları doğrultusunda MAR projeleri için uygunluk haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.5). Bu harita, çalışma kapsamında belirlenen kriterlere ve onların ağırlıklarına göre İstanbul'un MAR projeleri için uygunluğunu görsel olarak ortaya koymaktadır. Her bir kriterin harita üzerindeki etkisi, kriterin ağırlığına göre belirlenmiştir. 1-9 aralığında ağırlıklandırılan kriterler haritada daha iyi anlaşılması için yeniden sınıflandırılmış ve uygunluk oranları 1 en düşük ve 5 en yüksek olmak üzere, 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. 1; uygun olmayan alanlar, 2; düşük düzeyde uygun alanlar, 3; orta düzeyde uygun alanlar, 4; uygun alanlar ve 5; çok uygun alanlar olarak anımlandırılmıştır.

On kriterli ve beş kriterli analiz sonucunda elde edilen uygunluk haritaları görsel olarak özellikle MAR için uygun potansiyeli olan alanlarda büyük oranda benzerlik göstermektedir. Her iki analizde de kuzey bölgelerde (Çatalca, Silivri ve Şile gibi) yer alan alanlar “çok uygun alanlar” ve “uygun alanlar” sınıfında belirlenmiştir. On kriterli analiz ile beş kriterli analiz oldukça benzer özellikler göstermektedir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.5). Beş kriterli analizde hidrojeoloji ve yeraltı suyu seviyesi gibi kriterlerin ağırlıkları baskın hale gelmiş ve sonuçlara daha fazla etki etmiştir. Beş kriterli analiz, yedi kriterli ve on kriterli yöntemlere göre hesaplama süresi ve veri gereksinimi açısından daha hızlı ve uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. On kriterli ve beş kriterli AHP analizlerinin sonuçları görsel ve istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6'da “raster calculator” aracıyla her iki harita birleştirilip ortak olarak gösterdiği uygun ve uygun olmayan alanlar görselleştirilmiştir. Şekil 4.7'de ise yine “raster calculator” aracıyla birebir aynı özelliği taşıyan her piksele tek bir numara (1) değeri verilirken, aynı özellikte olmayan pikseller için 0 değeri verilerek sadece birebir örtüşen alanlar görsel olarak düzenlenmiştir. Bu analizin sonucunda elde edilen haritanın öznetelik tablosunda 1 değerli piksel sayısı (eşleşen bölgeler) 71.341.254 ve 0 değerli piksel sayısı (farklı bölgeler) 22.915.727 olarak gözlenmiştir. Toplam piksel sayısını ve eşleşen piksel oranını kullanarak benzerlik oranı;

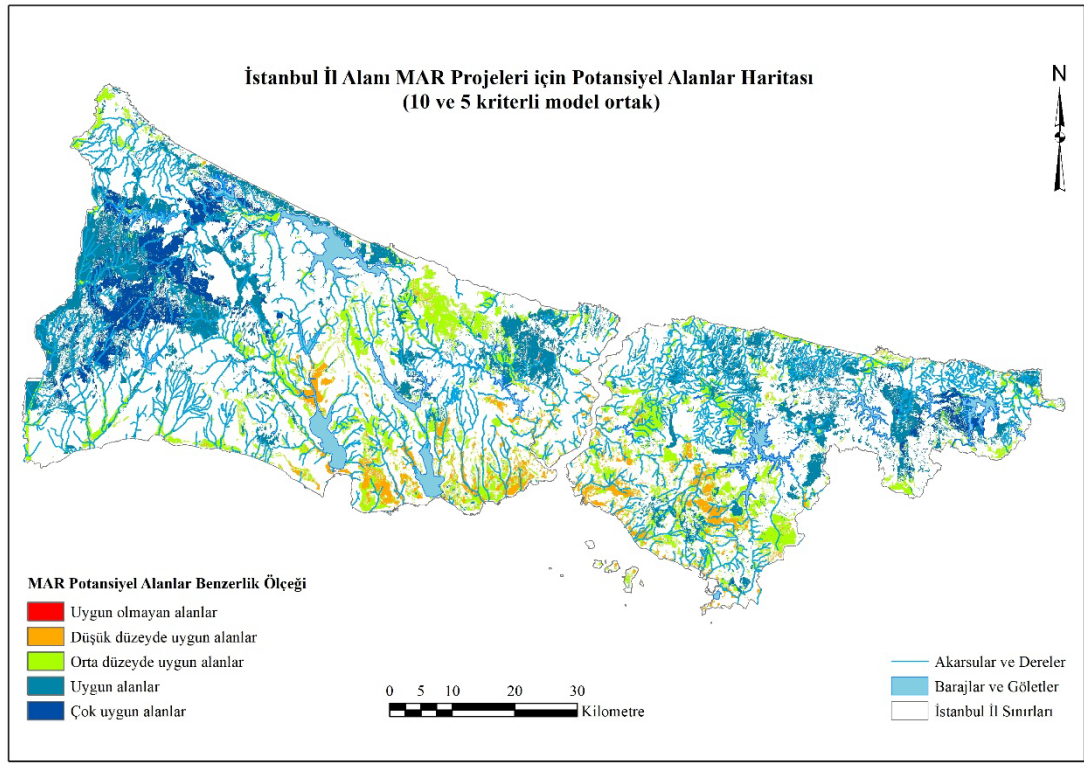
•Toplam piksel = 71.341.254 +22.915.727 = 94.256.981 olarak hesaplanmış ve

•Benzerlik oranı (%) = (Eşleşen Piksel Sayısı (71.341.254) / Toplam Piksel Sayısı (94.256.981)) * 100

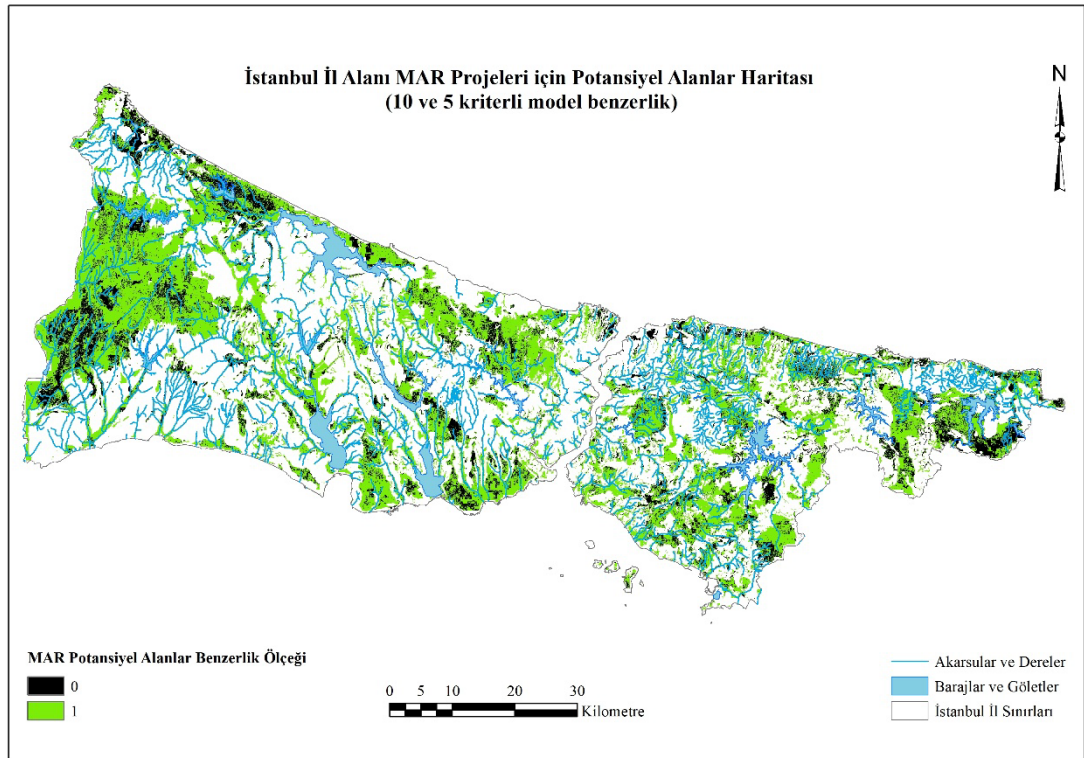
•Buna göre her iki haritanın benzerlik oranı %75,7 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5: MAR Projeleri için beş kriterle belirlenmiş potansiyel uygunluk haritası.



Şekil 4.6: On kriterli ve beş kriterli uygunluk haritaları için ortak MAR için uygun alanlar haritası.



Şekil 4.7: On kriterli ve beş kriterli modellerin ortak pikseller benzerlik haritası.

Çalışma kapsamında karar verme sürecini daha pratik ve hızlı hale getirmek amacıyla beş kriterli veri setinden bölgenin coğrafi koşulları da düşünülerek en yüksek ağırlığa sahip ilk üç kriter kullanılarak sadeleştirmeye gidilmiştir ve “üç kriterli AHP analizi” gerçekleştirilmiştir. Bu analizde; hidrojeoloji, eğri numarası ve yeraltı suyu seviyesi kullanılarak aşağıdaki AHP matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.3: Beş kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisi.

Kriterler	a	b	c
Hidrojeoloji (a)	1,00	3,00	2,00
Eğri Numarası (b)	0,33	1,00	0,60
Yeraltı Suyu Seviyesi (c)	0,50	1,67	1,00

Üç kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisinin normalleştirilmesi sonucunda kriter ağırlıkları hesaplanmış ve bu kriterlerin yüzdelik dağılımları elde edilmiştir. Buna göre;

Hidrojeoloji %54,35 ile ağırlık dağılımında açık ara en yüksek oranı almıştır. Bu durum, hidrojeolojinin MAR projelerinde temel öneme sahip olduğunu göstermektedir. Yeraltı suyu depolama kapasitesi ve geçirgenlik seviyesini temsil eden bu kriter, suyun akiferlere başarılı bir şekilde şarj edilmesini sağlayacak alanların tespitinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, bölgedeki yeraltı suyu yönetiminde sürdürülebilirlik ve etkinlik hedefleniyorsa, hidrojeoloji belirleyici bir faktör olacaktır.

Yeraltı suyu seviyesi %28,15 ile ikinci önemli kriter olmuştur. Daha derin yeraltı suyu seviyeleri, akiferin ek su depolama potansiyelini artırmakta ve MAR projelerinin başarısını desteklemektedir. Sığ yeraltı suyu seviyeleri ise doluluğun yüksek olduğunu göstermekte ve MAR projeleri için uygunluğu azaltmaktadır.

%17,50 ile orta düzeyde bir ağırlığa sahip olan eğri numarası kriteri toprak tipi ve arazi örtüsüne dayalı olarak yüzey akış miktarını değerlendirmektedir. MAR projelerinde, yüzey akışının kontrol edilmesi ve infiltrasyonu teşvik edecek alanların belirlenmesi önemlidir. Bu kriter, arazi kullanım ve toprak özelliklerinin MAR projelerinde nasıl bir rol oynayacağını anlamak için kullanılmaktadır.

Hidrojeoloji ve yeraltı suyu seviyesi kriterleri toplam ağırlığın yaklaşık %82'sini oluşturarak analiz üzerindeki etkinin çoğuna sahiptir. Bu üç kriterli veri setine göre MAR projelerinde doğal su döngüsünü etkileyen faktörlerin en önemli kriterler olduğunu açıkça göstermektedir. Hidrojeoloji burada belirleyici rol oynamıştır, çalışmanın temel hedefine uygun olarak analizde merkezi bir önem taşıdığını ifade etmektedir.

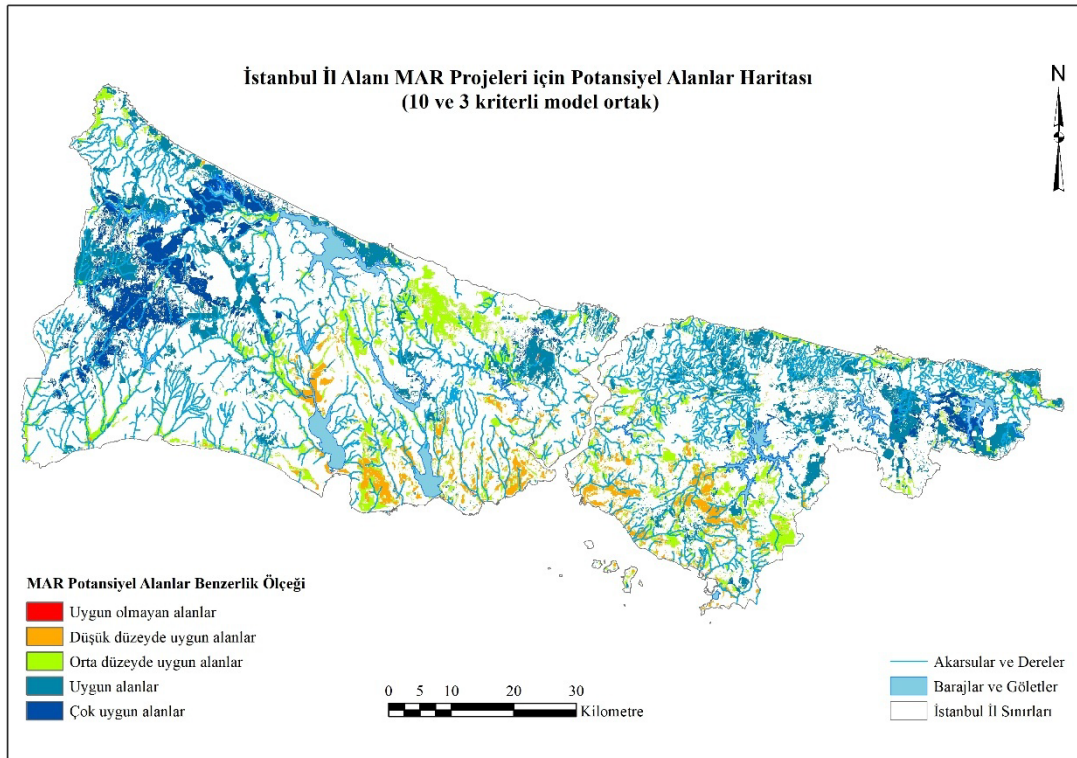
Üç kriterli veri seti için oluşturulan AHP matrisine göre λ_{max} değeri 3 olarak hesaplanmıştır, bu veri setinde kriter sayısı yani n 3 olduğu için daha önce belirtilen formülden yola çıkılarak, önce $(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ formülünü (formül 3.1) kullanarak CI değeri elde edilmiştir. CI, 0,00062 olarak bulunmuştur. Rastgele indeks olarak bilinen RI değeri, 3 kriter için 0,58 olarak belirtilmiştir (Çizelge 3.2). CI değeri RI değerine bölünerek (formül 3.2) elde edilen CR değeri ise 0,0011 olarak bulunmuştur. Bu düşük CI değeri, kriterler arasındaki karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir. AHP'nin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için, CR değeri genellikle 0,1'den küçük olmalıdır. Bu CR değeri, verilen lambda max değeri ve CI değeri ile analizdeki tutarlılığın oldukça yüksek olduğunu ve karar vericilerin kıyaslamalarındaki tutarsızlığın minimal düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma sonunda, her bir kriterin AHP kriterlerinin ağırlıkları doğrultusunda MAR projeleri için uygunluk haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.8). Bu harita, çalışma kapsamında belirlenen kriterlere ve onların ağırlıklarına göre İstanbul'un MAR projeleri için uygunluğunu görsel olarak ortaya koymaktadır. Her bir kriterin harita üzerindeki etkisi, kriterin ağırlığına göre belirlenmiştir. 1-9 aralığında ağırlıklandırılan kriterler haritada daha iyi anlaşılması için yeniden sınıflandırılmış ve uygunluk oranları 1 en düşük ve 5 en yüksek olmak üzere, 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. 1; uygun olmayan alanlar, 2; düşük düzeyde uygun alanlar, 3; orta düzeyde uygun alanlar, 4; uygun alanlar ve 5; çok uygun alanlar olarak anlamlandırılmıştır.

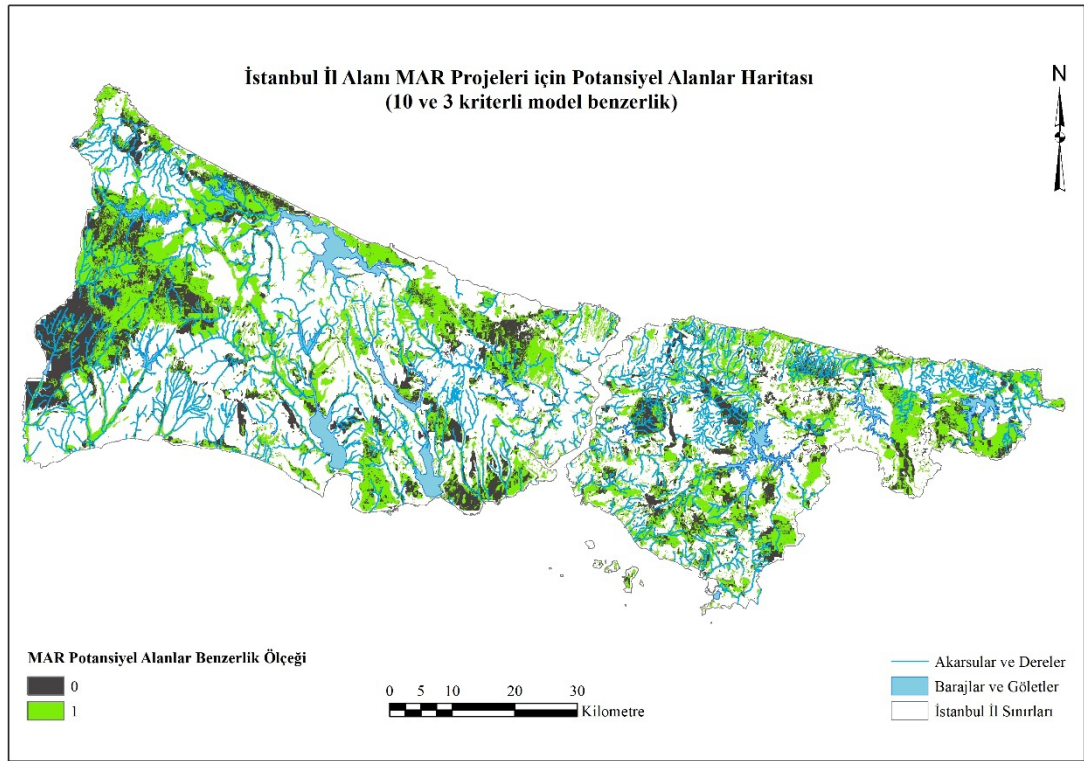
On kriterli ve üç kriterli analiz sonucunda elde edilen uygunluk haritaları görsel olarak özellikle MAR için uygun potansiyeli olan alanlarda büyük oranda benzerlik göstermektedir. Her iki analizde de kuzey bölgelerde (Çatalca, Silivri ve Şile gibi) yer alan alanlar “çok uygun alanlar” ve “uygun alanlar” sınıfında belirlenmiştir. On kriterli analiz ile üç kriterli analiz oldukça benzer özellikler göstermektedir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.8). Üç kriterli analizde hidrojeoloji ve yeraltı suyu seviyesi gibi kriterlerin ağırlıkları baskın hale gelmiş ve sonuçlara daha fazla etki etmiştir. Üç kriterli analiz, hesaplama

süresi ve veri gereksinimi açısından daha hızlı ve uygulanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. On kriterli ve üç kriterli AHP analizlerinin sonuçları görsel ve istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9’da “raster calculator” aracıyla her iki harita birleştirilip ortak olarak gösterdiği uygun ve uygun olmayan alanlar görselleştirilmiştir. Şekil 4.10’da ise yine “raster calculator” aracıyla birebir aynı özelliği taşıyan her piksele tek bir numara (1) değeri verilirken, aynı özellikte olmayan pikseller için 0 değeri verilerek sadece birebir örtüşen alanlar görsel olarak düzenlenmiştir. Bu analizin sonucunda elde edilen öznetelik tablosunda 1 değerli piksel sayısı (eşleşen bölgeler) 60.099.497 ve 0 değerli piksel sayısı (farklı bölgeler) 34.159.336 olarak gözlenmiştir. Toplam piksel sayısını ve eşleşen piksel oranını kullanarak benzerlik oranı;

- Toplam piksel = 60.099.497 + 34.159.336 = 94.258.833 olarak hesaplanmış ve
- Benzerlik oranı (%) = (Eşleşen Piksel Sayısı (60.099.497) / Toplam Piksel Sayısı (94.258.833)) * 100
- Buna göre her iki haritanın benzerlik oranı %63,8 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.9: On kriterli ve üç kriterli uygunluk haritaları için ortak MAR için uygun alanlar haritası.



Şekil 4.10: On kriterli ve üç kriterli modellerin ortak pikseller benzerlik haritası.

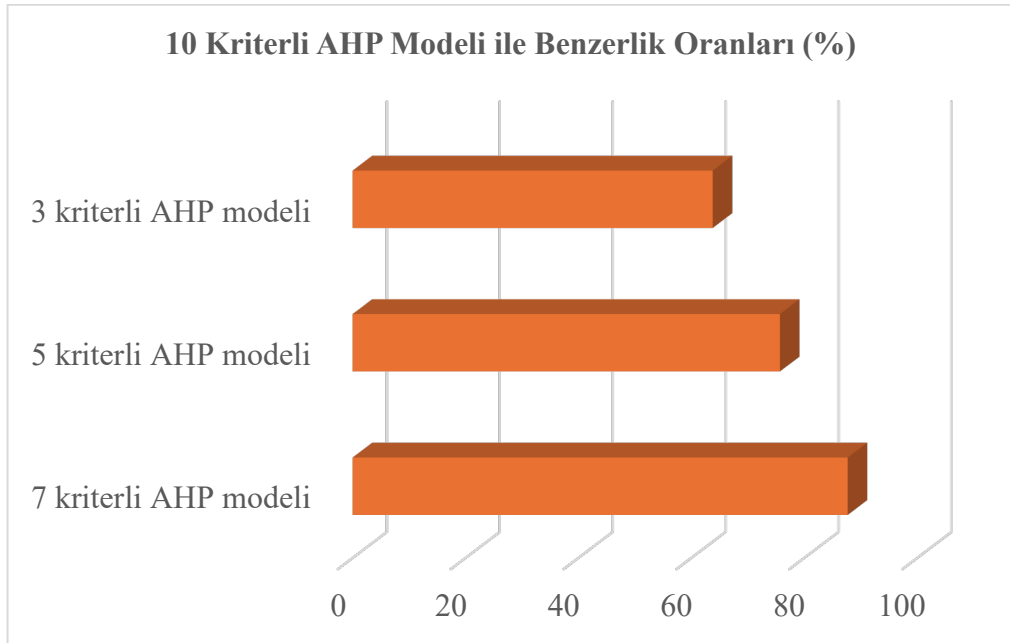
İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2020) raporuna göre; batıda büyük bir kısmı İstanbul'un Silivri, Çatalca ilçelerinde bulunan doğuya doğru Büyükçekmece ve Küçükçekmece göllerini de kapsayan bir akifer havzası olan "B01 İstanbul Eosen Kireçtaşı Akifer havzası", geçirimli kaya ortam olup, Soğucak formasyonunun karstik resifal kireçtaşı litolojisine sahiptir. Yapılan analizlere göre Avrupa yakasında en uygun alanlar bu havza içerisinde belirlenmiştir. Bu akifer havzasında bulunan çok uygun alanlar, Silivri'nin kuzeyi ile Çatalca'nın batı kesimlerinde ve Küçükçekmece gölü kuzeybatısında Sazlıdere barajı civarındaki alanlar olarak gözlemlenmiştir. Bir diğer önemli akifer havzası "B02 Batı İstanbul Neojen akifer havzası" olarak tanımlanmış havzadır. Geçirimli taneli ortam olup, İstanbul formasyonunun Kıraç üyesi kum çakıl litolojisi gözlemlenmektedir. Silivri'nin büyük bir kısmını kapsamakta olan akifer havzası aynı zamanda bir parça da Çatalca'nın batı kısmını içerisine almaktadır. Uygun alanları içerisinde bulunduran bu havza 343 km²'lik yüzey alanıyla oldukça büyük bir alana yayılmaktadır. Avrupa yakasında, raporda yerel akifer olarak tanımlanan "B03 Terkos Neojen akiferi" diğer önemli bir akiferdir. Hidrolojik ortamı geçirimli taneli ortam, litolojisi kum-çakıl ve formasyonu İstanbul Formasyonu, Kıraç üyesidir. Terkos gölü çevresinde yayılım göstermekte ve buralarda bu çalışmada hazırlanmış MAR uygunluk haritalarına göre çok uygun-uygun alanlar olarak

sınıflandırılmıştır. Sarıyer-Eyüpsultan ilçeleri sınırlarında bulunan başka bir uygun alan da yine bu raporda “b15 Yeniköy-Göktürk Neojen akıtarı” olarak tanımlanmıştır. Bu akıtarı yarıgeçirimli taneli ortam olarak sınıflandırılmış, litolojisi kil arakatkılı çakıl mercekli kum olup, formasyonu Danişmen formasyonu, Ağaçlı üyesidir. Anadolu yakasında ise neredeyse tüm uygun ve çok uygun alanlar Şile ilçesinde bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri “D10 İstanbul Triyas dolomitik kireçtaşı akifer havzası”, “D09 Şile kireçtaşı akiferi”, “D08 Kurna kireçtaşı akiferi”, “D17 Darlık Barajı batısı Neojen akiferi”, “D18 Ömerli Barajı doğusu Neojen akiferi” ve “Ağva kırıntılı kireçtaşı akıtarı”dır. Hem Avrupa yakasında hem de Anadolu yakasında bu akifer ve akıtarı alanları gelecek MAR çalışmaları için ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir.

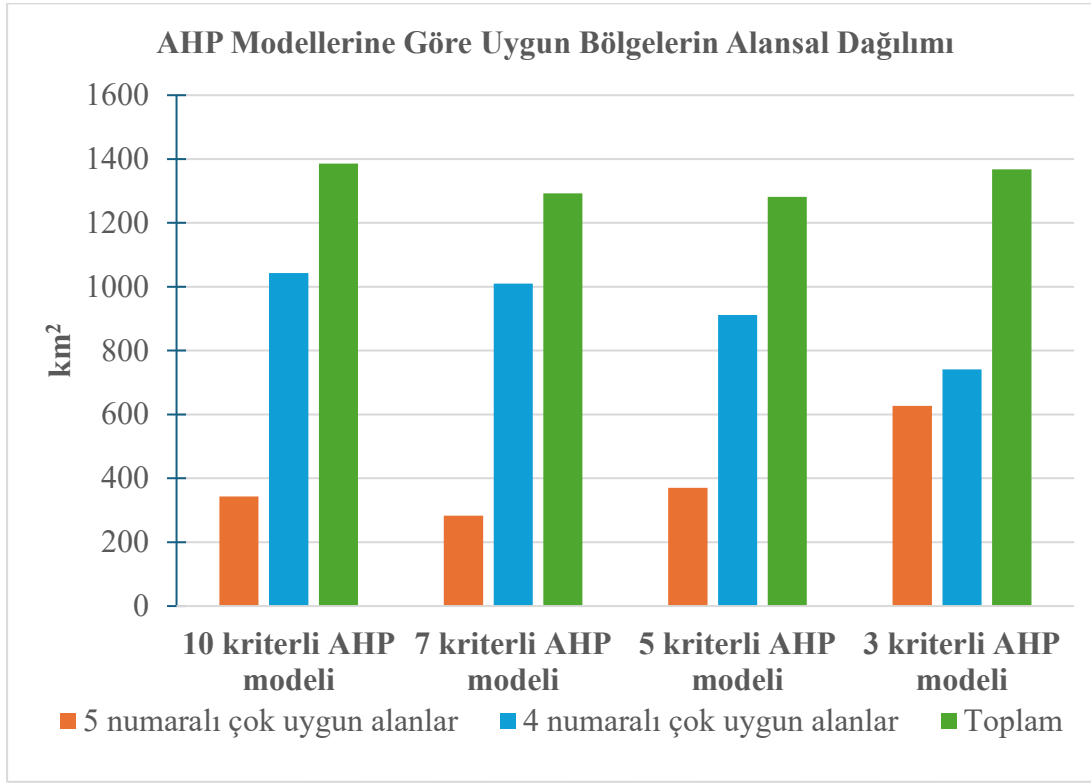


5. TARTIŞMA

Bu çalışmada farklı kriter sayılarına sahip modellerin karşılaştırılması yapılarak, hidrojeoloji, yükseklik, eğim, yağış, arazi örtüsü/arazi kullanımı, normalleştirilmiş bitki örtüsü farkı indeksi (NDVI), eğri numarası (CN), yeraltı suyu seviyesi, drenaj yoğunluğu ve toprak tipi gibi faktörlerin model doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Sırasıyla; on kriterli, yedi kriterli, beş kriterli ve üç kriterli AHP modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller arası benzerlikler incelendiğinde modellerin önemli oranda ilk oluşturulan on kriterli AHP modeli ile benzerlik taşıdığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.1). “4 Numaralı uygun alanlar” ve “5 numaralı çok uygun alanlar” birlikte değerlendirildiğinde toplam uygun alanların yüzölçümünün kriter sayısı düştükçe azaldığı gözlemlenmektedir (Şekil 5.2); bununla birlikte on kriterli AHP modeline göre beş kriterli ve üç kriterli model analiz edildiğinde “5 numaralı çok uygun alanlar” olarak tanımlanan alanların yüzölçümü daha yüksek olarak belirlenmiştir (Şekil 5.2). Yine de modeller arası ciddi bir fark bulunmamakla birlikte, önemli kriterler doğru verilerle desteklendiğinde, veri kısıtı yaşanan bölgelerde ve hızlı sonuç alınması gereken çalışmalarda az kriterli veri setinden bu analizi yapmak mümkün görünmektedir.



Şekil 5.1: On kriterli AHP modeli ile diğer AHP modellerinin benzerlik oranları.



Şekil 5.2: Farklı sayıda kriterlerden oluşturulan AHP modellerine göre belirlenen uygun bölgelerin alansal dağılımı.

Literatürde, kriter sayısının azaltılmasının sonuç tutarlılığı üzerindeki etkileri sıkça incelenmiştir (Saaty, 2001; Malczewski, 2006; Sallwey ve diğ., 2018). Çok kriterli karar verme analizlerinde her bir kriterin ayrı ayrı değerlendirilmesi, karar verme sürecinin doğruluğunu artırmaktadır. Bu karşılaştırma, karar vericilerin farklı ölçeklerde ve zaman kısıtlamaları altında hangi yöntemi kullanmaları gerektiğine dair önemli bir rehber sunmaktadır. Ancak bu tip çalışmalarda bölgenin koşulları da göz önünde bulundurularak hangi kriterin ne kadar önemli olduğunu belirlemek çok önemlidir. Yapılacak bir ön çalışmada hızlı sonuç görmek adına bölge için en önemli olabilecek kriterleri belirleyip elde olan veriler de göz önünde bulundurularak daha az kriterli bir veri seti çalışılabilir ve benzer sonuçlar elde edilebilmektedir.

Benzer çalışmalar incelendiğinde, çok kriterli değerlendirme yöntemlerinin potansiyel MAR alanlarını belirlemede güvenilir sonuçlar sunduğu görülmektedir. Özellikle, toprak yapısı, arazi kullanımı ve yağış gibi ek faktörlerin hesaba katılmasının su hareketleri üzerindeki tahminleri iyileştirdiği ifade edilmektedir. Bu bağlamda, on kriterli modelin en kapsamlı değerlendirme imkanı sunduğu ve daha yüksek doğruluk

sağlayabileceği söylenebilir. Ancak, daha az kriterle çalışan modellerin de belirli uygulamalar için yeterli olabileceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, modelleme sürecinde kriter seçimi, amaca yönelik olarak optimize edilmelidir. Yapılan çalışma göstermiştir ki; her bir kriter doğru bölgenin belirlenmesi için bir kısıt oluşturmaktadır ve kriter sayısı arttıkça potansiyel alan haritalarında daha keskin sonuçlara ulaşmak daha ulaşma olasılığı yükselmektedir.

Seçilen kriterlerin bölgesel ve iklimsel farklılıklara duyarlı olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmada kullanılan kriterlerin İstanbul'un jeolojisi, coğrafyası ve iklimine göre ağırlıkları belirlenmiş ve yeniden sınıflandırılması yapılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarla, benzer coğrafi bölgelerde benzer analizler yapılarak modelin genel geçerliliği test edilebilir ve yeni kriterler eklenerek model doğruluğunu artırabilmek mümkündür.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya çapında nüfus artışı ve giderek kuraklaşan iklim koşulları, içme ve kullanma suyunun talebini artırırken, özellikle yeraltı suyu gibi tatlı su kaynaklarına yönelik sürdürülebilir yönetim uygulamalarının benimsenmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Yönetilen Akifer Şarjı (Managed Aquifer Recharge-MAR), yeraltı suyu kaynaklarını koruyarak, bu kaynakların yenilenmesini sağlayan ve kuraklık gibi zorluklarla başa çıkmayı mümkün kılan gelecek vaat edici teknikler bütünü olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, İstanbul ilinin su kaynaklarının sürdürülebilirliğini artırmak için önemli bir rol oynamaktadır. Belirlenmiş olan potansiyel alanlarda yapılacak MAR uygulamaları akiferlerin doğru bir şekilde şarj edilmesini sağlayarak yeraltı su kaynaklarının korunması ve hem güncel olarak hem de gelecek nesillerin su teminini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu tez çalışmasıyla elde edilen bulgular İstanbul'un su güvenliğini artırmak ve su kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla karar vericilere önemli bir rehber sunmaktadır. MAR yöntemleri, sel ve taşkınların önlenmesi veya etkilerinin azaltılması gibi çevresel faydalar sağlamanın yanı sıra, doğal çevrenin korunması ve gelecekteki çevresel sorunların önlenmesine de katkıda bulunmaktadır. Çalışma, çevresel olarak hassas bölgelerin belirlenmesine ve doğal çevrenin korunmasına ve gelecekteki çevresel sorunların önlenmesine yardımcı olacaktır.

MAR projelerinin başarısı, yeniden şarj yapıları için uygun alanların doğru ve titiz bir şekilde seçilmesine dayanmaktadır. Aynı zamanda yüksek maliyetli projeler de oldukları için doğru yer seçimi çok önemlidir. Doğru alan seçimi, MAR uygulamalarının etkinliğini ve sürdürülebilirliğini direkt olarak etkilemektedir.

Literatürde coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve çok kriterli karar verme analizi (MCDA) tekniklerinin birleşimiyle, geniş coğrafi alanlarda MAR uygulamaları için uygun bölgelerin belirlenmesinde büyük avantaj sağladığını çokça ortaya koyulmuştur. Bu tez çalışmasında da MAR için potansiyel taşıyan alanların belirlenmesinde coğrafi

bilgi sistemleri (CBS) ve çok kriterli karar verme analizi (MCDA) teknikleri birlikte kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerde, on kriterli analiz sonuçlarına göre İstanbul'un toplam yüzey alanının yaklaşık %25'inin MAR uygulamaları için uygun olduğu belirlenmiştir. Yedi kriterli analizde bu oran yaklaşık %24 olarak hesaplanmıştır. Beş kriterli analizde İstanbul'un toplam yüzey alanının yaklaşık %23'ünün, üç kriterli analizde ise yaklaşık %25'inin MAR uygulamaları için uygun olduğu belirlenmiştir. On kriterli ve yedi kriterli modellerin ortak haritası hazırlanıp, her iki analizde de uyum gösteren alanlar dikkate alındığında, bu oran %21 olarak bulunmuştur. On kriterli ve beş kriterli modellerin ortak haritası hazırlanıp, her iki analizde de uyum gösteren alanlar dikkate alındığında, bu oran %18 olarak bulunmuştur. On kriterli ve üç kriterli modellerin ortak haritası hazırlanıp, her iki analizde de uyum gösteren alanlar dikkate alındığında, bu oran %16'ya düşmektedir.

Ayrıca, on kriterli analizde “5 numaralı çok uygun alanlar” 343 km², “4 numaralı uygun alanlar” ise 1043 km² olarak hesaplanmıştır. Yedi kriterli analizde ise “5 numaralı çok uygun alanlar” 283 km², “4 numaralı uygun alanlar” 1010 km² olarak bulunmuştur. On kriterli ve yedi kriterli modellerin ortak harita analizinde, “5 numaralı çok uygun alanlar” 259 km², “4 numaralı uygun alanlar” ise 908 km² olarak hesaplanmıştır. Beş kriterli analizde ise “5 numaralı çok uygun alanlar” 370 km², “4 numaralı uygun alanlar” 912 km² olarak bulunmuştur. On kriterli ve beş kriterli modellerin ortak harita analizinde, “5 numaralı çok uygun alanlar” 256 km², “4 numaralı uygun alanlar” ise 739 km² olarak hesaplanmıştır. Üç kriterli analizde ise “5 numaralı çok uygun alanlar” 627 km², “4 numaralı uygun alanlar” 741 km² olarak bulunmuştur. On kriterli ve üç kriterli modellerin ortak harita analizinde, “5 numaralı çok uygun alanlar” 300 km², “4 numaralı uygun alanlar” ise 554 km² olarak hesaplanmıştır.

Seçilen kriterler bölgesel ve iklimsel farklılıklara duyarlı olmakla beraber, bu çalışmada kullanılan kriterlerin İstanbul'un jeolojisi, coğrafyası ve iklimine göre ağırlıkları belirlenmiş ve yeniden sınıflandırılması yapılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarla, benzer coğrafi bölgelerde benzer analizler yapılarak modelin genel geçerliliği test edilebilir ve yeni kriterler eklenerek model doğruluğunu artırabilmek mümkündür.

Akifer şarjı (MAR) potansiyel alanlarının belirlenmesi, su kaynakları yönetimindeki riskleri azaltabilir ve gelecekteki su krizlerini önleyebilir veya hafifletebilir. Ayrıca, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi ekonomik faydalar sağlayabilir, su kaynaklarına erişim ve su kalitesinin korunması, su temini ve tarım gibi sektörlere olumlu etkiler yapabilir. Bu nedenlerle yapılmış olan tez çalışması İstanbul ilinin su kaynakları yönetimi, çevresel koruma ve su güvenliği gibi kritik konularda uzun vadeli ve sürdürülebilir katma değer sağlama potansiyeline sahiptir.

Bu tez çalışmasıyla birlikte İstanbul ilinin MAR potansiyeline ilişkin sayısal veri ve bilgi üretilmiş olup, bu veriler ile gelecekteki projeler ve kararlar için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Çok kriterli karar verme ve ağırlıklı hiyerarşi süreci gibi analitik yöntemlerin kullanılmasını içermesi itibarıyla benzer projelerde de kullanılabilir ve gelecekteki su kaynakları yönetimi projelerinde de faydalı olabilecektir. Söz konusu tez çalışmasının yerel yönetimler, uzmanlar, çevre koruma grupları ve diğer paydaşlar arasında iş birliği ve katılımı teşvik edeceği ve ileride yapılacak uygulama projelerine ivme kazandırması beklenmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, İstanbul ili su kaynakları yönetiminde daha etkin politikaların geliştirilmesi, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve ekonomik faydaların artırılması açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., & Mohanty, S. K. (2021). Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. *In Science of the Total Environment*, 768. doi:10.1016.2021.144992.
- Andries, W., & Clarke, S. (2023). Using Multi-criteria analysis to identify groundwater zones potentially impacted by Managed Aquifer Recharge. doi: 10.2139.4494447.
- Dillon, P., Alley, W. M., Zheng, Y., & Vanderzalm, J. L. (editors). (2022). Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance. *IAH Special Publication*. Retrieved from <https://recharge.iah.org/>
- Dupont, F., Sterckx, A., & Dijkma, R. (2018). *Managed Aquifer Recharge (MAR) Suitability maps and standardized suitability index, the case study of the Occitanie region (South France)*. Hollanda: International Groundwater Resources Assessment Centre Wageningen University and Research Internship report.
- FAO (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014 (Update 2015). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (Rapor No:106). Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- İBB (2017). *İstanbul İli, 1/25.000 Ölçekli Arazi Kullanımına Esas Jeolojik Etüt Raporu*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- İBB (2020a). *İstanbul İli Pendik-Sancaktepe-Sultanbeyli-Tuzla İlçeleri Heyelan Farkındalık Kitapçığı*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- İBB (2020b). *Deprem Sonrası İçme ve Kullanma Suyu Teminine Yönelik Olarak İstanbul İl Alanı Hidrojeolojik Ortamlarının (Yeraltı Suyu Ortamları) Tespiti ve Toplanma-Barınma-Çadır Alanları İle İlişkisi Raporu*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- İSKİ (2024). *İstanbul'un Su Kaynakları Raporu*. İstanbul: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
- Jaafar, H., & Ahmad, F. (2019). GCN250, global curve number datasets for hydrologic modeling and design. *Sci Data* 6, 145. doi:10.6084.7756 202.
- Jhariya, D. C., Mondal, K. C., Kumar, T., Indhulekha, K., Khan, R., & Singh, V. K. (2021). Assessment of groundwater potential zone using GIS-based multi-influencing factor (MIF), multi-criteria decision analysis

- (MCDA) and electrical resistivity survey techniques in Raipur city, Chhattisgarh, India. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(3), 375–400. doi:10.2166.2021.129.
- Kawara, A. Q., Elsebaie, I. H., & Alnahit, A. O.** (2024). Groundwater recharge potential zone modeling in the Wadi Al-Lith Basin, Saudi Arabia. *Applied Water Science*, 14(6). doi:10.1007.13201.024.02172.9.
- Martins, T. N., Leitão, T. E., Oliveira, M. M., Panagiotou, C. F., Stefan, C., Chkirbene, A., & Portela, M. M.** (2024). Proposal for a managed aquifer recharge feasibility index for southern Portugal using multi-criteria decision analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, 26. doi: 10.1016.2024.101280.
- Mouhoumed, R. M., Ekmekcioğlu, Ö., Başakın, E. E., & Özger, M.** (2023). Integrated Fuzzy AHP-TOPSIS Model for Assessing Managed Aquifer Recharge Potential in a Hot Dry Region: A Case Study of Djibouti at a Country Scale. *Water (Switzerland)*, 15(14). doi: 10.3390.15142534.
- Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J., & Sidhu, J.** (2018). Managed aquifer recharge (MAR) in sustainable urban water management. *Water*, 10(3). doi: 10.3390.10030239.
- Papadopoulos, C., Spiliotis, M., Pliakas, F., Gkiougkis, I., Kazakis, N., & Papadopoulos, B.** (2022). Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Analysis for Selecting Discrete Preferable Groundwater Recharge Sites. *Water*, 14(1). doi:10.3390.14010107.
- Saaty T.L.,** (1980). The analytic hierarchy process (AHP), *The Journal of the Operational Research Society* 41 (11), 1073-1076.
- Saaty, T. L.,** (2001). Deriving The Ahp 1-9 Scale From First Principles. International Symposium on the Analytic Hierarchy Process (ISAHP) Berne, Switzerland: August 2-4.
- Sallwey, J., Bonilla Valverde, J., Vásquez López, F., Junghanns, R., & Stefan, C.** (2019). Suitability maps for managed aquifer recharge: A review of multi-criteria decision analysis studies. In *Environmental Reviews* 27 (2), 138–150). *Canadian Science Publishing*. doi:10.1139.2018-0069.
- Sallwey, J., Schlick, R., Valverde, J. P. B., Junghanns, R., López, F. V., & Stefan, C.** (2019). Suitability mapping for managed aquifer recharge: Development of web-tools. *Water (Switzerland)*, 11(11). doi: 10.3390.11112254.
- Sandoval, J. A., & Tiburan, C. L.** (2019). Identification of potential artificial groundwater recharge sites in Mount Makiling Forest Reserve, Philippines using GIS and Analytical Hierarchy Process. *Applied Geography*, 105(January), 73–85. doi: 10.1016.2019.01.010.
- Sufyan, M., Martelli, G., Teatini, P., Cherubini, C., & Goi, D.** (2024). Managed Aquifer Recharge for Sustainable Groundwater Management: New Developments, Challenges, and Future Prospects. *Water (Switzerland)* 16 (22). doi:10.3390.16223216.

- Tarım ve Orman Bakanlığı.** (2021). *İklim Değişikliği ve Tarım Değerlendirme Raporu*. Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü.
- UNESCO** (2021). *Managing Aquifer Recharge A Showcase for Resilience and Sustainability*. Paris: UNESCO.
- Uyduranoğlu Öktem, A. ve Aksoy, A.** (2014). *Türkiye'nin Su Riskleri Raporu*. İstanbul: WWF-Türkiye Raporu.
- Ward, J. ve Dillon, P.** (2011). *Robust policy design for managed aquifer recharge. Waterlines Report Series*, (Rapor No: 38), Canberra, Australia: National Water Commission.
- Yaakob, A. M. B.** (2008). *Multi Criteria Decision Making Methodology for Fuzzy Rule Based Systems and Networks Using TOPSIS Mathematics* (Doctoral dissertation). Retrieved from https://pure.port.ac.uk/ws/portalfiles/portal/8909552/Final_PhD_Thesis_July_2017_Abdul_Yaakob.pdf
- Zaidi, F. K., Nazzal, Y., Ahmed, I., Naeem, M., & Jafri, M. K.** (2015). Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. *Journal of African Earth Sciences*, 111, 156–169. doi:10.1016.2015.07.008.
- Zghibi, A., Mirchi, A., Msaddek, M. H., Merzougui, A., Zouhri, L., Taupin, J. D., Chekirbane, A., Chenini, I., & Tarhouni, J.** (2020). Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid mediterranean coastal aquifer. *Water (Switzerland)*, 12(9). doi:10.3390.12092525.
- Zhang, H., Xu, Y., & Kanyerere, T.** (2019). Site assessment for MAR through GIS and modeling in West Coast, South Africa. *Water (Switzerland)*, 11(8). doi:10.3390.11081646.
- Url-1** <<https://www.inowas.com/mar/>>, erişim tarihi 16.08.2024.
- Url-2** <<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL>>, erişim tarihi 16.08.2024.
- Url-3** <<http://www.istanbul.gov.tr/>>, erişim tarihi 10.09.2024.
- Url-4** <<https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>>, erişim tarihi 12.08.2024.
- Url-5** <<https://chrs.web.uci.edu/>>, erişim tarihi 20.11.2024.
- Url-6** <<https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/>>, erişim tarihi 20.05.2024.
- Url-7** <https://figshare.com/articles/dataset/GCN250_global_curve_number_datasets_for_hydrologic_modeling_and_design/7756202>, erişim tarihi 15.11.2024.
- Url-8** <<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-anddatabases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>>, erişim tarihi 20.05.2024.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Özlem YILDIZ YÜKSEKOL

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : 2009, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
- Yüksek lisans : 2012, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
- Doktora : 2021, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
- Yüksek lisans : 2025, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Uygulamaları Ana Bilim Dalı, Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Jeoloji Mühendisliği doktorasını tamamladı.
- 2020-2024 yılları arasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü'nde Jeoloji Mühendisi olarak görev yaptı.
- 2010-2020 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görev yaptı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yildiz Yuksekol O., Ozcan O.** 2024. Determining Potential Managed Aquifer Recharge Areas in Istanbul Using Multi-Criteria Decision Analysis. 4th International Graduate Studies Congress, 5-8 June, 2024 İstanbul, Türkiye.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ozer B., Fırat E., Yılmaz K.K., Turkkan Karaoglu G., Fitoz E., Yıldiz Yüksekol O., Alphan T., Onder G.** 2023. Flood Risk Mitigation in Highly Urbanized Area by Nature Based Solutions: The Case of Istanbul Esenyurt. European Geosciences Union General Assembly, 23–28 April 2023 Vienna, Austria.
- **Yildiz Yuksekol O., Tugrul A., Yılmaz M., Onat B., Cinku K., Avcı E., Beren M., Fitoz E., Talay, T., Bostancıoğlu İ., Duran K.** 2022. Construction Raw Material (Aggregate/Crushed Stone) Needs Analysis and Investigation of Sustainable Raw Material Supply Methods with Innovative Approaches for Urban Transformation

Related to Istanbul's Earthquake Risk and Fragile Building Stock. 74th Geological Congress of Turkey, Ankara, Türkiye.

- **Oztas T., Kariptas C., Kurcenli E., Yildiz Yuksekol O., Fitoz E., Talay T., Bostancioglu İ., Duran K.** 2022. Strategic Importance of Hydrogeology and Groundwaters of İstanbul Provincial Area. 74th Geological Congress of Turkey, Ankara, Türkiye.
- **M., Esenli F., Kariptas C., Aydin Z., Yildiz Yuksekol O., Fitoz E., Talay T., Bostancioglu İ., Duran K.** 2022. Strategic Importance of Natural Construction Material (Clay, Sand, Gravel) Presence in Istanbul Area. 74th Geological Congress of Turkey, Ankara, Türkiye.
- **Aldanmaz, E., Güçtekin, Aykut, Yildiz Yuksekol, O.** 2020. Mantle source characteristics of Triassic alkaline lavas within the Antalya Nappes, SW Turkey. European Geosciences Union General Assembly, 4–8 May 2020 Vienna, Austria.
- **Aldanmaz, E., van Hinsbergen, Douwe, Yildiz Yuksekol, O., Schmidt, Max, McPhee, Peter, Meisel, Thomas, Güçtekin, Aykut, Mason, P.R.D.** 2020. Effects of reactive dissolution of orthopyroxene in producing incompatible element depleted melts and refractory mantle residues during early fore-arc spreading: Constraints from ophiolites in eastern Mediterranean. *Lithos.* 360-361. 105438. 10.1016/j.lithos.2020.105438.
- **Tigli O., Yildiz Yuksekol, O., Güçtekin A., Aldanmaz E.** 2018. Petrological and Geochemical Characteristics of Triassic Volcanic Rocks in the Antalya Nappes. 8. Geochemistry Symposium Antalya, Türkiye.
- **Yildiz Yuksekol, O., Aldanmaz, Ercan, Güçtekin, Aykut, Meisel, Thomas.** 2018. Osmium Isotope and HSE Geochemical Variations Of Mantle Rocks From The Kızıldağ Ophiolite In Southern Turkey. 71st Geological Congress of Türkiye Ankara, Türkiye.
- **Yildiz Yuksekol, Ozlem, Aldanmaz, Ercan, Güçtekin, Aykut, van Hinsbergen, Douwe, Mason, P.R.D.** 2016. Petrological constraints on the mantle peridotites from the Cretaceous ophiolites in southern Turkey and northern Cyprus. European Geosciences Union General Assembly 17-22 April Vienna, Austria.