

## KARST HİDROJEOLOJİSİ ARAŞTIRMALARINDA UYGULANAN YENİ YÖNTEMLER VE TÜRKİYE'DEN ÖRNEKLER

### NEW METHODS APPLIED IN KARST HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS AND EXAMPLES FROM TURKEY

Gültekin GÜNAY

Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 06532 Beytepe / Ankara.

**ÖZ:** Ülkemiz yeraltısuyu potansiyeli içinde önemli bir yeri bulunan karst yeraltısuyu kaynaklarının optimum düzeyde kullanıma sunulması, karst havzalarında yürütülen araştırma çalışmalarından en yüksek verimin elde edilmesine bağlıdır. Karstik ortamların olağan dışı karmaşık jeolojik ve hidrojeolojik yapısı, bu alanlarda yürütülen çalışmalarda güncel araştırma tekniklerinin sistematik bir biçimde uygulanmasını gerektirmektedir. Günümüzdü bilimsel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak karst çalışmalarına uygulanan bazı yardımcı araştırma tekniklerinde elde edilen gelişmeler; karst araştırmalarından daha ayrıntılı ve güvenilir sonuçların elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Burada, son yirmi yıl içinde Türkiye'de yürütülen karst çalışmalarında uygulanan güncel araştırma yöntemleri kısaca açıklanacak ve bu yöntemlerin uygulandığı bazı alanlardan örnekler verilecektir.

**ABSTRACT:** Having an important share in the groundwater potential of Turkey, optimum use of the karst groundwater resources depends on the effectiveness of investigative studies carried out in karst basins. The extraordinary complexity in geological and consequently hydrogeological structure of karstic terrains requires systematic application of some new, improved techniques in karst hydrogeological studies. New methods developed upon the recent scientific and technological improvement now allow to obtain more accurate and reliable results from karst investigations.

Recent investigative methods that have been applied in karst studies in Turkey for the last two decades are briefly explained giving some examples herein this paper.

#### GİRİŞ

Karst hidrojeolojisi, suda eriyebilen, genellikle kireçtaşı ve dolomit gibi karbonatlı kayalar ile alçıtaşı ve kayatuzu gibi evaporitik kayaların tamamını veya bir kısmını içeren alanlarda yeraltısuyu dolaşımı ile litoloji birimleri arasındaki ilişkiyi araştıran bir bilim dalıdır.

Türkiye'nin yaklaşık üçte biri çözünebilir karbonatlı kayalarla kaplıdır. Bu kayalar ülkemizde geniş karst alanlarını oluşturur. Türkiye'deki karst alanları; hidroelektrik enerji üretimi, sulama, içme, kullanma ve endüstri suyu temini gibi amaçlarla kullanılabilir önemli miktarlarda yüzey ve yeraltısuyu içerirler. Bu alanlarda, mevcut yüzey suyunun tamamına yakın bölümü karst yeraltısuyundan beslenmektedir. Ülkemizin kısa ve uzun vadede hidroelektrik enerji ile içme ve kullanma suyu olan gereksiniminin sürekli olarak artmakta olduğu göz önüne alındığında; söz konusu potansiyelin optimum kullanımına yönelik araştırmaların da sistematik ve sürekli bir biçimde devam ettirilmesinin ne denli önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Karstik bölgelerde, su kalitesi, drenaj, hidroelektrik enerji üretimi için su yapılarının inşası ve genel arazi kullanımı ile ilgili problemlerin çözümü karstik olmayan

alanlardan oldukça farklı yaklaşımlar gerektirir. Karbonatlı kayalarda oluşan karstik yüzey ve yeraltı şekilleri, su kaynaklarının geliştirilmesine yönelik mühendislik projelerinde önemli riskler yaratabilir. Türkiye'de birçok şehir merkezi ve tarım alanlarının ekonomisi karst yeraltısuyu kaynaklarına bağlıdır. İzmir ve Antalya şehirleri su ihtiyaçlarını karstik kaynaklardan sağlamaktadır. Yine Akdeniz sahili boyunca tarım alanlarının sulanmasında karstik kaynak sularından geniş ölçüde yararlanılmaktadır.

Burada geçtiğimiz yirmi yıl içinde Türkiye'de mevcut karst yeraltısuyu potansiyelinin optimum kullanımına yönelik olarak, yazarın da doğrudan ya da dolaylı olarak katıldığı çalışmalarda uygulanan araştırma yöntemleri kısaca özetlenecek, bu yöntemlerin uygulandığı alanlardan örnekler verilecektir. Söz konusu yöntemlerin Türkiye karstına uygulanması ile ilgili örnekler hakkında daha ayrıntılı bilgiler yazı ekinde yer alan kaynaklardan edinilebilir.

#### KARST ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİ

Karst alanlarında yeraltısuyu dolaşımının karstik olmayan alanlarla kıyaslandığında oldukça heterojen ve karmaşık olması, bu alanlarda yürütülen çalışmalarda

multidisipliner yaklaşımların uygulanmasını gerektirmektedir.

Karst araştırmalarında uygulanan başlıca yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

a) Hidrojeolojik haritalama çalışmaları, b) Jeomorfolojik çalışmalar, c) Araştırma sondajları, d) Yeraltısuyu izleme deneyleri, e) Boya seyreltme yöntemiyle akım ölçümleri, f) Çevresel izotop araştırmaları, g) Uzaktan algılama çalışmaları h) Mağara araştırmaları, i) Hidrojeokimyasal araştırmalar ve k) Jeofizik araştırmalar. Aşağıda, söz konusu araştırma ve çalışma yöntemlerinde uygulanan yaklaşımlar kısaca açıklanmakta ve bunlarla ilgili Türkiye'den örnekler verilmektedir.

### Hidrojeolojik Haritalama Çalışmaları

Hidrojeolojik haritalama çalışmaları, karst hidrojeolojisi araştırmalarının ilk aşamasını oluşturduğu gibi; bu haritalar belirli bir karst havzasında elde edilen bilgilerin kullanıcıya havza hakkında en fazla bilgiyi sağlayacak biçimde yansıtılmalıdır. İyi bir karst hidrojeolojisi haritası kullanıcıya akarsu drenaj ağı, karstik su noktaları ve yüzey şekilleri (kaynaklar, estavellalar, mağaralar, düdenler vs...), yerel ve genel yeraltısuyu akım yönleri hakkında güvenilir bilgiler sunmalıdır. Bölgesel jeolojik yapının bilinmesi, bölgesel yeraltısuyu akımının ve dolayısıyla karst akiferlerinin genel özelliklerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir.

Türkiye'de karst araştırmalarının yoğun olarak yürütüldüğü Toros Dağları zinciri içinde yer alan karstik havzalar son yirmi yıl içinde diğer bazı kişi ve kurumların yanısıra özellikle DSI Genel Müdürlüğü, MTA Genel Müdürlüğü, Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü, Hacettepe Üniversitesi Karst Araştırma Merkezi ve diğer Üniversitelerce araştırılmaktadır. DSI tarafından Birleşmiş Milletler Kalkınma Programının desteği ile yürütülen çalışmalar sonucunda Batı Toroslar'da 50.000 km<sup>2</sup>'lik bir sahanın; ayrıca HÜ Karst Araştırma Merkezinin yürüttüğü çalışmalar ile Batı, Orta ve Doğu Toroslar'da Dalaman, Eşençay, Antalya Traverten Platosu, Köprüçay, Ermenek ve Aşağı Zamantı havzalarını kapsayan 12.000 km<sup>2</sup>'lik alanın ayrıntılı karst hidrojeolojisi haritaları hazırlanmıştır.

### Jeomorfolojik Çalışmalar

Karst bölgelerinde, jeomorfolojik yapı ile karstik akiferlerin oluşması arasındaki yakın ilişki, hidrojeolojik problemlerin çözümünde jeomorfolojik analizlerin büyük öneme sahip olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle morfolojik yapıların ayrıntılı bir değerlendirmesi ile bir kısım hidrojeolojik problemlerin çözümüne yönelik ipuçlarının bulunması mümkündür. Jeolojik haritalama safhası, hidrojeolojik analizler gibi aynı zamanda jeomorfolojik analizler için de veri toplama safhasıdır. Kalitatif jeomorfolojik analizler sistematik veri toplamasını gerektirir.

Jeomorfolojik analizlerde yapılan işler beş safhaya ayrılabilir. İlk safhada karstik yapıların genel bir incelenmesi yapılır. İkinci safha, hava fotoğrafları ve topografik harita analizlerini içerir. Üçüncü safha, arazi çalışmaları sonucu elde edilen verilerden hipotezlerin türetilmesidir. Dördüncü safha, tektonik hareketler ve bunların röliyef gelişimi ile ilişkisini belirtmek için yapılan araştırmaları içerir. Beşinci safha ise araştırmaların ışığı altında bölgesel karst morfolojisinin gelişimine yönelik senaryoların sahada kontrol edilmesidir.

HÜ Karst Araştırma Merkezinin Köprüçay, Dalaman ve Aşağı Zamantı Havzalarında yürüttüğü araştırmalarda karşılaşılan bir kısım problemlerin çözümünde ayrıntılı jeomorfolojik analizlerin büyük yararlar sağladığı gözlenmiştir. Yukarı Eşençay Havzasında yürütülen bir araştırmada, karst yüzey şekillerinin gelişimi ile çizgisel unsurlar arasındaki ilişkinin belirlenmesinde jeomorfolojik analizlerden geniş ölçüde yararlanılmıştır.

### Araştırma Sondajları

Araştırma sondaj kuyuları, karst araştırmalarının özellikle su yapılarının fizibilite etüdlerini kapsayan bölümünde kullanılan temel araçlardan biridir. Araştırma kuyuları genellikle, formasyonların hidrojeolojik ve jeolojik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılır. Araştırma kuyuları ile problemleri jeolojik yapıların aydınlatılması, yeraltısuyu düzeyi değişiminin, yeraltısuyu akım yönünün, karstik erime boşluklarının boyutlarının belirlenmesi mümkün olmakta; ayrıca kayaçların permeabilite ve su tutma kapasiteleri gibi konularda oldukça yararlı veriler elde edilmektedir.

Araştırma amacı ile açılıp daha sonra yeraltısuyu gözlem kuyusuna dönüştürülen kuyulardan elde edilen veriler ile bölgesel yeraltısuyu düzeyi değişimi ile yağış rejimi arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ile Antalya-Kırgöz gibi bölgesel erozyon tabanında yer alan büyük karst kaynaklarının boşalım rejimlerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi mümkün olmaktadır.

Öte yandan, yine araştırma kuyularında yapılan basınçlı su deneylerinin analizi ile baraj aks yerlerinde ve rezervuar alanlarında yeralan kireçtaşlarında karstlaşmanın boyutları ve bu birimlerin su tutma kapasiteleri ayrıntılı biçimde değerlendirilebilmektedir.

Özellikle dağlık karst alanlarında yeraltısuyu akiferin oldukça derin kısımlarında yer almaktadır. Bu gibi alanlarda geçmişte yapılan su sondajlarında yeraltısuyunun oldukça derinde yer alması ve akiferin boşluklu bir yapıya sahip olması gibi nedenlerle su sondaj çalışmalarında istenilen verim sağlanamamaktaydı. Sondaj makine kapasitesinin yeterli olmamasından yada sondaj dolaşım suyunun sürekli yenilenmesi gibi güçlüklerden kaynaklanan problemler; son yıllarda su sondaj makinelerinde sağlanan gelişmelerle büyük oranda aşılmıştır. Halen DSI, MTA ve Köy Hizmetleri Genel Müdürlükleri'nine temin ettiği yeni sondaj makineleri ile 1500 m'yi

aşan derinliklerde su sondajı yapılabilen, kuru sistemle çalışan makineler sayesinde sondaj dolaşım suyunun karstik boşluklara kaçması gibi problemlerden etkilenmemektedir.

### Yeraltısu İzleme Deneyleri

Karst araştırmalarında yerel yada bölgesel yeraltısu akım yönünün ve yeraltısuyunun görünür hızının belirlenmesi amacıyla uygun koşulların mevcut olduğu durumlarda izleme deneylerinden yararlanılmaktadır. Bu amaçla karst yeraltısuyuna uygun bir noktadan; örneğin bir düden ya da mağaradan, izleyici enjekte edilerek, beklenen akım yönü üzerinde yer alan karstik kaynaklardan söz konusu izleyicinin çıkıp çıkmadığı araştırılır. Gözlem noktalarında enjekte edilen izleyicinin saptanması ile yerel ya da bölgesel karst yeraltısu akım yönü belirlenmiş olur. Enjeksiyon ve gözlem zamanları arasındaki farktan ve bu noktalar arasındaki uzaklıktan yararlanılarak görünür yeraltısu akım hızının hesaplanması da mümkündür.

Karst araştırmalarında kullanılan başlıca izleyiciler, floresan boyalar, kimyasal maddeler, spörlar ve yapay radyoaktif bileşiklerdir. Söz konusu izleyicilerin kullanım amaç ve yerleri arasında farklılıklar olmasına karşın en yaygın olarak kullanılan floresan boyalardır.

Yeraltısu izleme deneyinin yapıldığı sahanın hidrojeolojik özelliklerine ve bu alandaki yeraltısu akım koşullarına bağlı olarak; floresan boyalarla yapılan deneylerde gözlem noktalarında boyanın çıkış zamanının belirlenmesi bir kaç gün ile bir kaç ay arasında değişmektedir. Genellikle izleyici olarak kullanılan floresan boya konsantrasyonunun zamanla azalmasından dolayı, geçmişte yapılan deneylerde uzun süreli gözlem yapma olanağı oldukça sınırlı idi. Günümüzde floresan boyaların determinasyonunda kullanılan Fluorometre ve Spektrofluorometre cihazlarında ulaşılan teknolojik gelişmeler nedeniyle milyarda bir birim'in (ppb) altında kalan boya konsantrasyonları saptanabilmektedir. Bu gelişmeler ile boya deneylerinde uygulanan gözlem süreleri kısaltıldığı gibi; birden fazla enjeksiyon noktasından, farklı floresan boyalar enjekte edilmesi yoluyla bir kaç izleme deneyinin birlikte yapılması da mümkün olabilmektedir.

Türkiye'de ilk boya izleme deneyleri EİE ve DSİ tarafından Batı Toroslarda yer alan Manavgat ve Beyşehir Gölü havzalarında yapılmış ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

### Boya Seyreltme Yöntemleriyle Akım Ölçümleri

Karst araştırmalarında başlıca inceleme konularından birisi de önemli karstik kaynakların verdilerinin güvenilir bir biçimde ölçülmesidir. Toros karstı gibi dağlık morfolojinin hakim olduğu alanlarda, bölgesel hidrojeolojik araştırmalar açısından önem taşıyan büyük karstik boşalmaların dikkate değer bir bölümü klasik ölçüm yöntemlerinin uygulanamadığı derin vadiler içinde yer

almaktadır. Bu gibi alanlarda, boya seyreltme yöntemiyle söz konusu karstik boşalmaların verdilerinin güvenilir biçimde ölçülmesi mümkün olmaktadır. Toros karst alanında günümüzde değin yürütülen araştırmalar kapsamında, halen Oymapınar Baraj Gölünde 120 m su yükü altında bulunan, ortalama 35 m<sup>3</sup>/s'lik verdisiyle dünyanın tek gözeden boşalan en büyük karstik kaynağı olan Dumanlı kaynağının akımı Rhodamine WT kullanılarak, boya seyreltme deneyi ile güvenilir biçimde ölçülebilmektedir.

### Hidrojeokimyasal Çalışmalar

Son yıllarda sahada kullanılan ölçüm ve analiz sistemlerinde sağlanan gelişmeler sayesinde bölgesel karst yeraltısu araştırmaları içinde önemli bir yeri bulunan hidrojeokimyasal çalışmalardan daha güvenilir sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır. Karst yeraltısuyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yüzeye çıktığı andan itibaren hızla değişmesi, karst akiferindeki kimyasal süreçlerin güvenilir bir biçimde tanımlanabilmesi için yerinde yapılan ölçüm ve analizlerin önemini arttırmaktadır. Sıcaklık, pH, iletkenlik, tuzluluk, çözünmüş oksijen, çözünmüş karbondioksit vb parametrelerin ölçümlerinde kullanılan cihazların mevcut teknolojik gelişmelere bağlı olarak boyutlarının küçülmesi ve hassaslıklarının artması sonucunda hidrojeokimyasal saha çalışmalarından daha güvenilir veriler elde edilmeye başlanmıştır.

Saha çalışmalarında elde edilen bu gelişmeler sonucunda; Toroslarda yürütülen karst araştırmalarında, farklı karst yeraltısu akım sistemlerinin ayırt edilmesine yönelik çalışmalarda tatminkar sonuçlara ulaşılmıştır.

Öte yandan, yine hidrojeokimyasal modelleme konusundaki gelişmeler sonucunda, karst-sistemlerindeki mineral çözünme ve çökme reaksiyonlarının güvenilir tanımlanmaları yapılabilmekte; bu yolla, karstlaşmada etkili olan süreçler hakkında daha yeni bilgiler edinilebilmektedir.

### Mağara Araştırmaları

Karst sistemlerinin iç yapılarının gözlenmesi konusunda mağara araştırmalarının büyük önemi vardır. Karst yeraltısu sistemindeki güncel akım koşullarının ve özünme-çökme süreçlerinin yerinde gözlenmesi sistemin yerel ve bölgesel özelliklerinin tanınması açısından değerli bilgiler sunmaktadır. Son yıllarda, mağara araştırma ekipmanlarının çeşitlenmesi ve daha güvenli malzemelerin üretilmesi sonucunda ülkemizde yürütülen mağara araştırmalarından daha ayrıntılı sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda Aşağı Zamantı Havzasında, Aladağ ve Karanfıldağ yörelerinde bulunan Subatağı ve Sütlük mağaralarında -400 m, Anamur Çukurpınar mağarasında -1040 m'lik derinliklere inilebilmiş ve karst sisteminin bu derinliklerdeki fiziksel yapısı hakkında daha önceleri ulaşılamayan değerli bilgiler edinilmiştir.

### Çevresel İzotop Araştırmaları

Karst araştırmalarında, karstik kaynaklar arasındaki ilişkilerin ve bunların beslenme alanlarının belirlenmesi amacıyla genel olarak çevresel izotoplar olarak adlandırılan Trityum, Oksijen-18, Döteryum ve Karbon-14 izotoplarından yararlanılmaktadır.

Söz konusu izotoplardan Trityum ve Karbon-14 radyoaktif olup; karst yeraltısuyunun yeraltında kalış süresinin ve bölgesel yeraltısuyu akım hızının belirlenmesinde kullanılırlar. Trityum izotopuyla 50-100 yıla, Karbon-14 izotopuyla 50.000 yıla kadar olan yeraltısuyu yaşı belirlenebilmektedir.

Oksijen-18 ve Döteryum izotopları ise duyarlı olup; radyoaktif bozunmaya uğramazlar. Bu izotoplar başlıca yeraltısuyu beslenme alanı yükseltisinin belirlenmesi amacıyla kullanılırlar. Döteryum ve Oksijen-18 izotopları ile ayrıca, farklı dolaşım sistemlerinden beslenen karstik kaynakların ayırt edilmesi de mümkündür.

Öte yandan, Silikon-32, Radon gibi diğer bazı izotopların karst yeraltısuyu araştırmalarında kullanılabilirliği de halen araştırılmaktadır.

Çevresel izotopların Türkiye'deki karst araştırmalarında kullanılması 60'lı yıllarda Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın desteği ile başlamıştır. DSİ ve EİE tarafından geçmiş yıllarda yürütülen çevresel izotop araştırmalarının yanısıra Hacıtepe Üniversitesi Karst Araştırma Merkezi'nce yürütülen çalışmalar sonucunda; Batı ve Orta Toroslar ile Doğu Torosların bir kısım havzalarında karşılaşılan hidrojeolojik problemlere çözümler getirilmiştir. Örneğin Konya Kapalı havzasında yürütülen Karbon-14 araştırması ile yeraltısuyu yaşı (12-16000 yıl) saptanmış; Antalya-Kırkgöz kaynaklarının beslenme mekanizması ve yeraltısuyu geçiş zamanı belirlenmiş, Aşağı Zamantı Havzasında farklı karst yeraltısuyu dolaşım sisemleri ayırt edilmiştir.

### Jeofizik Araştırma Yöntemleri

Jeofizik yöntemlerin temel amacı karstlaşmış karbonatlı kayaların doğrudan gözlenmesi mümkün olmayan kısımlarının dolaylı yollarla incelenmesidir. Jeofizik çalışmalar, karst araştırmalarında her zaman büyük öneme sahip olan süresizlik zonlarının saptanmasını mümkün kılar. Bu süresizlikler, tüm yeraltı boşluklarını ve kanalları, karstlaşmış zonları, tektonik kırıkları ve kaya kütlelerinin homojenliğini bozan tüm diğer yapıları içerir. Karst ortamında bu yapılar çoğunlukla yüksek permeabiliteye sahiptir. Jeofizik yöntemler, kayaç kütlelerinin permeabilite ve porozite gibi jeohidrolojik karakteristiklerinin belirlenmesinde de kullanılır.

Ayrıca, kaliper, sıcaklık ve iletkenlik gibi loglar ile açılan araştırma kuyularında karst yeraltısuyunun derinlik boyunca davranışı hakkında da değerli bilgiler edinilir. Son yıllarda özellikle elektronik alanında sağlanan gelişmeler sonucunda, kuyu logu alımı aygıtları kolay-

lıkla taşınabilecek şekilde küçültülmüştür. Mevcut modern sistemler küçük arazi araçlarına monte edilerek kolaylıkla taşınabilmekte; bu durum Toroslar gibi dağlık alanlarda yürütülen karst araştırmalarında mobilizasyon kolaylığı sağlamaktadır.

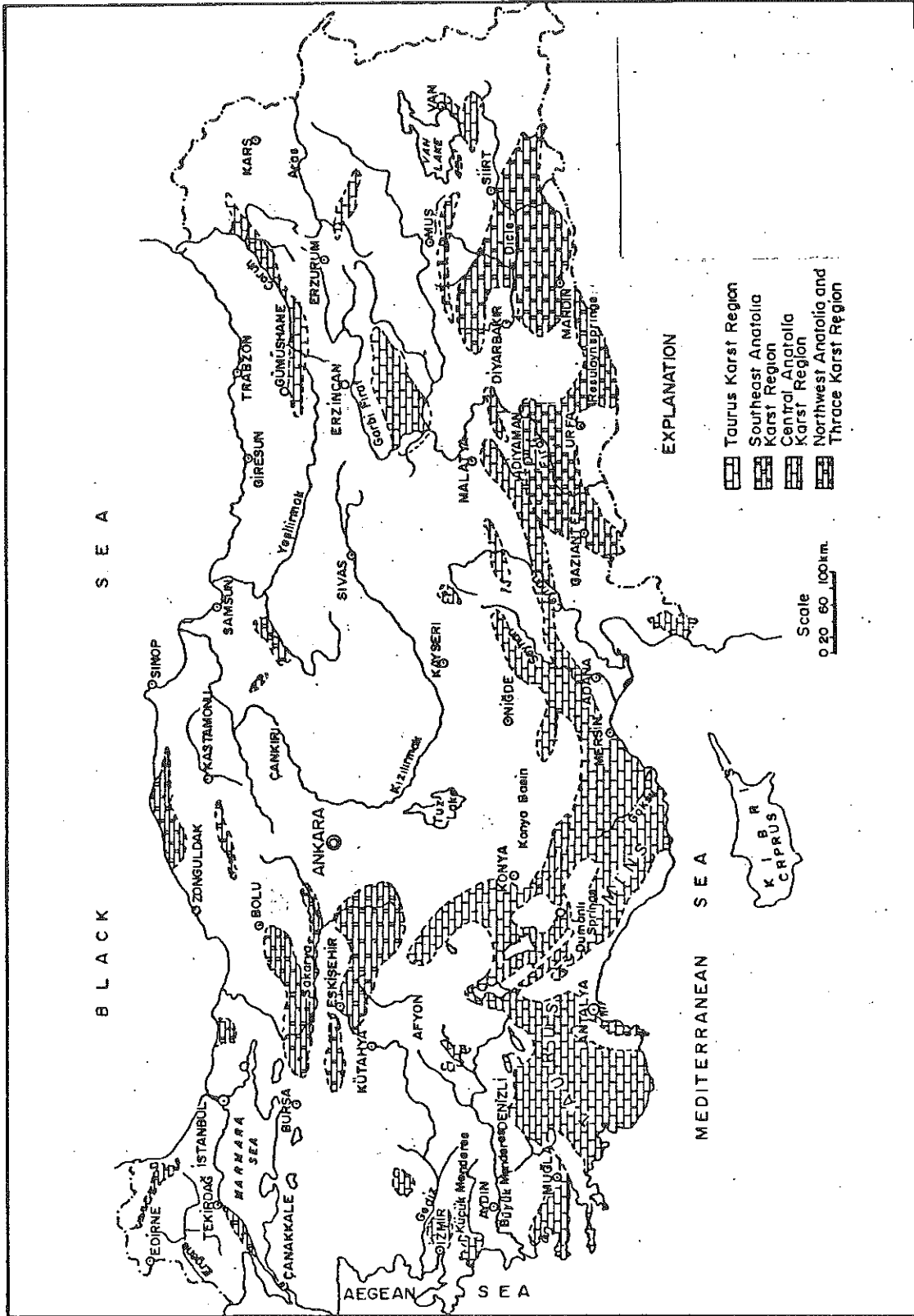
Türkiye'de karstik alanlarda günümüze değin yürütülen araştırmalarda jeofizik yöntemlerden oldukça yararlanılmıştır. Antalya Traverten Platosu, Bıyıklı düdeni akım yollarının uzanımının saptanması, Ovacık sahil kaynaklarına su taşıyan akım yollarının karaya doğru uzanımının incelenmesi, Keban Baraj gölündeki büyük karst boşluklarının derinlik ve yayılımının belirlenmesi gibi çalışmalarda jeofizik araştırmaların katkısı olmuştur.

Karst araştırmalarında, sondaj kuyularında rastlanan boşlukların ayrıntılı biçimde incelenmesi, bu boşluklarda bulunabilecek sedimanların özelliklerinin değerlendirilmesi yeraltı karstlaşmasının mevcut durumunun değerlendirilmesine yardımcı olur. Kuyularda rastlanan karstik boşlukların araştırılmasında son yıllarda kullanılan yöntemlerden birisi de kuyu televizyon kameralarıdır. Kuyu televizyon kamerası ile kullanıcı kamerayı kuyu boyunca isediği derinliğe indirerek, söz konusu erime boşluklarının ve sedimanların mevcu durumunu önünde bulunan görüntü ünitesinden anında inceleyebilir. Bu görüntülerin video kayıtları alınarak araştırmanın daha sonraki aşamalarında gereksinim duyulan ayrıntılı incelemeler yer ve zamanda bağımsız olarak yapılabilir. Sistemin kuyuya indirilmesi ve görüntü alınması kuyular- dan jeofizik log alımı çalışmalarında olduğu gibidir.

Kuyu kamerasının, kuyu duvarlarındaki erime boşluklarının gözlenmesi ve yerel jeolojik özelliklerin incelenmesi için uygun olmasına karşın; bu kameralar araştırma kuyularınca kesilen büyük mağaraların gözlenmesinde pek verimli değildirler. Kuyu kamerası kuyuda büyük bir boşluğa rastladığı zaman görüntü kalitesi bozulmakta ve bir metreyi aşan uzaklıklardan kaliteli görüntü alınmamaktadır. Bu problemin aşılması amacıyla büyük karst boşluklarının gözlenebilmesi için daha uygun olan yeni bir stereo-foto kamera yapılmıştır. Bu kameranın eskisinden üstün olan yanı daha güçlü bir flaş ışığına sahip olmasıdır. Kameranın istenilen yöne ayarlanması pusula ile kontrol edilir ve yüzeydeki görüntü netlikleri ayarlanır. Kameranın, karstik boşluğun derinliklerine indirilmesi sırasında her metrede ve her yönde stereo görüntülü 8 çekim yapılır. Türkiye'de kuyu televizyonu ve stereo kamera kullanılarak karstik boşlukların incelenmesine yönelik bazı çalışmalar DSİ tarafından Oymapınar Baraj'ında yürütülmüş ve yeraltı karstlaşması hakkında ayrıntılı bilgiler edinilmiştir.

### Uzaktan Algılama Çalışmaları

Başlangıçta sadece askeri amaçlar doğrultusunda yoğun bir şekilde yürütülen uzaktan algılama çalışmaları, günümüzde özellikle bilimsel araştırmalar bazında (yerbilimleri, şehir plancılığı, tarımsal ürün rekolte he-



Şekil 1. Türkiye'nin Karst Bölgeleri.

Figure 1. Karst Regions of Turkey.

sapları, çevre kirlenmesi vb) sivil amaçlı kullanımlara da hizmet sunmaya başlamıştır.

Uzaktan algılama çalışmalarına temel oluşturan verilerin temininde kullanılan uydu sayısının ve alınan görüntü kalitesinin artması, bu verilerin işlenmesinde kullanılan bilgisayar sistemlerinin küçülmesi ve ucuzlaşmasının bir sonucu olarak; uzaktan algılamaya dayalı bilimsel araştırmalarda son on yıl içinde dikkate değer bir artış olmuştur.

Türkiye'de de Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ve Karst Araştırma Merkezi, TÜBİTAK (Marmara Araştırma Merkezi), MTA, DİE, Anadolu Üniversitesi, Çukurova Üniversitesi, Ankara Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi gibi kamu kuruluşları ile bir kısım özel kuruluşlar çeşitli projelerin yürütülmesinde uzaktan algılama tekniklerini yaygın olarak kullanmaya başlamışlardır. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de sivil kullanıma açık Landsat-TM, Landsat-MSS ve SPOT görüntüleri üzerinde çeşitli amaçlarla çalışılabilmekte ve çok uzun süreler gerektiren araştırmaların daha kısa sürede bitirilmesi mümkün olabilmektedir.

Uzaktan algılama teknikleri çeşitli hidrojeolojik amaçlı çalışmalar için de geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunlardan başlıcaları şu şekilde sıralanabilir:

a) Kısa süreli ön arazi çalışması sonrasında, spektral ve alansal çözümlenmeleri yüksek olan özellikle Landsat-TM (30m\* 30m) ve SPOT (20m\* 20 m) gibi uydu görüntüleri üzerinde yapılacak bir yönlendirilmiş sınıflama (supervised classification) ile bir bölgedeki başlıca formasyonların birbirinden ayırt edilmesi (özellikle karstik amaçlı çalışmalarda karbonatlı kayaların yayılım alanlarının saptanması).

b) Yine çeşitli uydu görüntüleri üzerinde yapılacak çalışmalar sonucu herhangi bir bölgedeki kırık-çatlak sistemlerinin ortaya çıkarılması (bu çalışma genel anlamda tektonik çizgisellikleri saptamaya yönelik olmakla birlikte, özellikle baraj yeri seçimi etüdlerinde ve karstik bölgelerdeki ana kırık-çatlak sistemlerinin belirlenmesinde önemli rol oynar).

c) Özellikle Landsat-TM uydu görüntülerinin VI. bandı (termal bant) kullanılarak denize olan karst yeraltı suyu boşalım noktalarının, yüzeye yakın yeraltı suyunu içeren zonların ya da sıcak yeraltı suyu kaynaklarının bulunduğu alanların saptanması.

d) Birbiri üzerinde stereo binisi bulunan SPOT uydu görüntülerinden üretilen ve üzerinde topografik yükseklik verilerini de bulandıran Orto-imagajlar üzerinden hidrografik özelliklerin belirlenmesi,

e) Hidrojeolojik etütlerde olduğu kadar hidrolojik etütlerde de çok önemli bir yeri olan yağış (yağmur ve kar) verilerinin meteorolojik amaçlı uydu ve radar görüntüleri ile analizlerinin yapılabilmesi, mevcut kar örtüsü sınırlarının belirlenmesi.

Özellikle son yıllarda, Amerika ve Japonya gibi gelişmiş ülkelerde yağış tahmini ve yağış miktarı hesaplamalarında uydu ve radar verileri birlikte kullanılmaya başlamıştır. Bu amaç doğrultusunda Japonya'da birçok radardan oluşan bir gözlem ağı ile dakika bazında ve anında yağış analizleri yapılabilmektedir. Genel olarak AMEDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) adı verilen bu radar verileri ayrıca ülkenin tüm hidrolojik ve hidrojeolojik etüdlerinde kullanılmakta ve aşırı yağıştan kaynaklanacak sel, toprak kayması gibi doğal afetlerden etkilenecek bölgeler önceden saptanarak önlemler alınabilmektedir.

Yine, alansal çözümlenmesi düşük (2.5km\* 2.5 km veya 5km\* 5km gibi) olmakla birlikte büyük alanlarda çalışma yapılırken NOAA, METEOR veya METEOSAT serilerinde yer alan meteorolojik uydulardan da yararlanılabilmektedir. Örneğin; NOAA 9 uydusuna ait görüntüler ile yeryüzünün sıcaklık ve nemlilik özellikleri, NOAA 11 ve METEOSAT serisi uyduların görüntüsü ile de hava akımları yön ve şiddetleri, bulutluluk ve yine nemlilik gibi çeşitli özellikler saptanabilmektedir. Ayrıca kar örtüsü yayılım alanları da meteorolojik amaçlı uydularla olduğu gibi SPOT ve LANDSAT gibi yüksek çözünümelili uydu görüntüleri ile de saptanabilmektedir.

Ülkemizde karst araştırmalarına destek sağlayan ilk uzaktan algılama çalışmaları Eğirdir-Beyşehir Gölleri ile Akdeniz arasındaki alanda yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında söz konusu alanı içeren Landsat-1 ve Landsat-2 film verileri sağlanarak proje sahasını kapsayan görüntü mozayığı hazırlanmış ve çizgisellik verileri değerlendirilmiştir. HÜ Karst Araştırma Merkezi tarafından Dalaman, Eşençay, Antalya Traverten Platosu, Köprüçay ve Aşağı Zamantı havzalarında yürütülen araştırmalarda da uzaktan algılama verilerinden geniş ölçüde yararlanılmıştır. Ayrıca, Torosların Akdeniz sahili boyunca yer alan Ovacık, Kaş-Kalkan, Köyceğiz ve Antalya Traverten Platosu gibi alanlarda denize olan karst yeraltı suyu boşalım noktalarının belirlenmesi çalışmaları da uzaktan algılama verileri oldukça faydalı olmuştur.

#### YARARLANILAN KAYNAKLAR

**Bayarı, C. S., Arıkan, A., ve Günay, G., 1987,** Yukarı Eşençay Havzası (KD Fethiye) Karstlaşma Parametrelerinin Niceliksel Analizi: 11. Jeomorfoloji Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 11-13 Mart 1987, Ankara, s. 63-65. (öz).

**Bayarı, C. S. and Günay, G., 1990,** Travertine Formation due to Regional Groundwater Flow in Lower Zamantı Basin, Eastern Taurids-Turkey: Proc. of the International Symposium and Field Seminar on Hydrogeological Processes in Karst Terranes: 7-17 October, 1990, Antalya-Turkey, p. 104.

**Bayarı, C. S., and Kurttaş, T., 1993,** Geochemistry of Regional Groundwater Flow in the Aladağ Karstic Aquifer, Eastern Taurids-Turkey; Effect of Flow Conditions: Symposium for the 25th Anniversary of

- Earth Sciences at Hacettepe University, Beytepe, Ankara, 15p.
- Bayarı, C. S., 1986,** Yukarı Eşençay Havzası (KD Fethiye) Karst Hidrolojisi İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi (Doç. Dr. Alparslan Arıkan).
- Bayarı, C. S., 1991,** Aşağı Zamanlı Havzası (Aladağlar) Karst Hidrojeolojisi İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Prof. Dr. Gültekin Günay).
- Değirmenci, M., 1990,** Köprüçay Havzası Karst Hidrojeolojisi İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Prof. Dr. Gültekin Günay).
- Denizman, C.,** Antalya Traverten Platosu ve Kırkgöz Karst Kaynaklarının Hidrojeoloji İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi (Prof. Dr. Gültekin Günay).
- Ekmekçi, M.,** Ceyhan Berke Barajı ve Civarının Karst Hidrojeoloji İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Danışman: Prof. Dr. Gültekin Günay).
- Elkhatib, H., 1992,** Kaş-Kalkan Bölgesi Karst Hidrojeolojisi İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Prof. Dr. Gültekin Günay).
- Erguvanlı, K., Eroskay, S. O., and Günay, G., 1984.** Effects of The Oymapınar Dam and The Reservoir Lake Upon The Karst Environment. Int. Geol. Congress of Moscow-USSR, 4-14 August, 1984.
- Eroskay, S. O., and Günay, G., 1980,** Tecto-genetic Classification and Hydrogeological Properties of The Karst Regions in Turkey. Proceedings of Int. Symposium on Karst Hydrogeology, DSI-UNDP Project Publ.
- Eroskay, S. O., Günay, G., Arıkan, A. and Bayarı, C. S., 1988,** Oymapınar Barajında Yamaç Depolaması: Doğa, Türk Mühendislik ve Çevre Dergisi, c. 12, s. 1, 74-85s.
- Eroskay, S. O., Günay, G., Arkan, A., Bayarı, C. S., Ekmekçi, M., Değirmenci, M., and Yeşertener, C., 1985,** Quantitative Determination of Bank Storage in Reservoirs Constructed in Karstic Areas: Case Study of Oymapınar Dam. Int. Symposium on Karst Water Resources, Ankara, Turkey.
- Günay, G., 1981,** Manavgat Havzası ve Dolayımın Karst Hidrojeolojisi İncelemesi, (Doçentlik Tezi).
- Günay, G., 1984,** Karst Hydrogeology Investigations in Manavgat Basin and Vicinity (Antalya-Turkey). Int. Geol. Congress of Moscow-USSR, 4-14 August, 1984.
- Günay, G., 1985,** Karst Groundwaer Study in Manavgat River Basin Turkey, Int. Symp. on Karst Watter Resources, Ankara, Turkey.
- Günay, G., 1990,** Tectonic Influences on Groundwater Systems in Karst of Southern Turkey, International Symp. and Field Seminars on Hydrogeological Processes in Karst Terranes, Antalya, Turkey.
- Günay, G., 1993,** The Role of Orogeny and Related Tectonics on Karstification Processes in Taurus Karst Belt. Proc. of Int. Symp. and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terrane, Antalya, Turkey.
- Günay, G., ve Sihapi, H., 1978,** Eğridir-Beyşehir Gölleri ile Akdeniz Arasındaki Alanda Yapılan Karst Hidrojeolojisi Çalışmaları, Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu. p. 49-55.
- Günay, G., and Karanjac, J., 1980,** Dumanlı Spring Turkey-The Largest Karstic Spring in The World, Journal of Hydrology, 45:219-231. Elsevier Publ. Co., Amsterdam.
- Günay, G., and Karanjac, J., 1980,** Development of Karst Water Resouces in Turkey with Emphasis on Ground Water. Natural Resources Forum 4. p. 61-73.
- Günay, G., Arıkan, A., Bayarı, C. S. and Ekmekçi, M., 1985,** Quantitative Determination of Bank Storage in Reservoirs Construced in Karst Areas: Case Study of Oymapınar Dam, Turkey: Proc. of the International Symposium on Karst water Resources Research, 7-19 July, 1985, Ankara, Antalya-Turkey: Eds: G. Günay and A. I. Johnson, IAHS Publ. no. 161, pp. 321-332.
- Günay, G., and Bayarı, C. S., 1987,** Hidrojeolojik Değerlendirmeler Işığında Batı Toroslarda İzotop Hidrojeolojisi Çalışmaları, Hidrojeolojide İzotoplar ve Nükleer Teknikler Ulusal Semineri, 7-14 Kasım 1987, Çukurova Üniversitesi-Adana, 8s.
- Günay, G., Yiğitoğlu, M. and Bayarı, C. S., 1987,** Konya Kapalı Havzasında Karbon-14 İzotopu ile Yeraltısuyu Yaşının Tayini, Hidrojeolojide İzotoplar ve Nükleer Teknikler Ulusal Semineri, 9-14 Kasım 1987, Çukurova Üniversitesi-Adana, 15s.
- Günay, G., and Bayarı, C. S., 1989,** Isotope Survey of Western Taurids Karst Region, IAEA Research Contract RB 5019 Progress Report No. 1, Hacettepe University International Research Cener for Karst ater Resources, Ankara, 30p.
- Günay, G., and Elkhatib, H., 1990,** Hydrogeological Investigation of The Ovacık Karst Submarine Springs on The Mediterranean Coast of Turkey by Means of Remote Sensing Techniques, Proceeding of IAH 21st Congress of Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection, China.
- Günay, G. ve Bayarı, C. S., 1990,** Karst Akiferlerinin Giriş (Beslenim) ve Çıkış (Boşalım) Noktaları Olarak Mağaralar, 1. Ulusal Speleoloji Sempozyumu,

- 11-13 Mayıs 1990, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul (öz).
- Günay, G., Bayarı, C. S. and Denizman, C., 1991,** Isotope Survey of Western Taurids Karst Region, IAEA Research Contract RB 5019 Progress Report No. 2, Hacettepe University International Research Center for Karst Water Resources, Ankara 35p.
- Günay, G. and Değirmenci, M., 1990,** Origin and Cathment Area of the Olükköprü Karst Springs, Turkey, Proc. of Int. Symp. and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terranes, Antalya, Turkey.
- Günay, G., ve Elkhatib, H., 1993,** Potential of Remote Sensing in Karst Areas, Southern Turkey, Proc. of Int. Symp. and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terrane, Antalya, Turkey.
- Günay, G., Johnson, I., and Back, W., 1993,** Hydrogeological Processes in Karst Terranes, Proc. of Int. Symp. and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terrane, Antalya, Turkey.
- Günay, G. ve Bayarı, C. S., 1993,** Travertine Formation Due to Regional Artesian Karst Groundwater Flow in Lower Zamanlı Basin, Eastern Taurids, Turkey, Proc. of Int. Symp. and Field Seminar on Hydrogeologic Processes in Karst Terrane, Antalya, Turkey.
- Günay, G. ve Ekmekçi, M., 1993,** Present State of Groundwater Pollution and Its Future Trend in Antalya Travertine Plateau, Fourth Meeting of the Management Committee of the European Research Project on the Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas, Galway, Ireland.
- Tezcan, L., 1992,** İzotop Teknikleri ile Karstik Havzalarda Yeraltısuyu Akım Modelleri, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Danışman: Doç. Dr. Alparslan Arıkan).
- Yeşertencer, C., 1986,** Aşağı Dalaman Havzası Karst Hidrojeolojisi İncelemesi, H. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi (Danışman: Doç. Dr. Alparslan Arıkan).