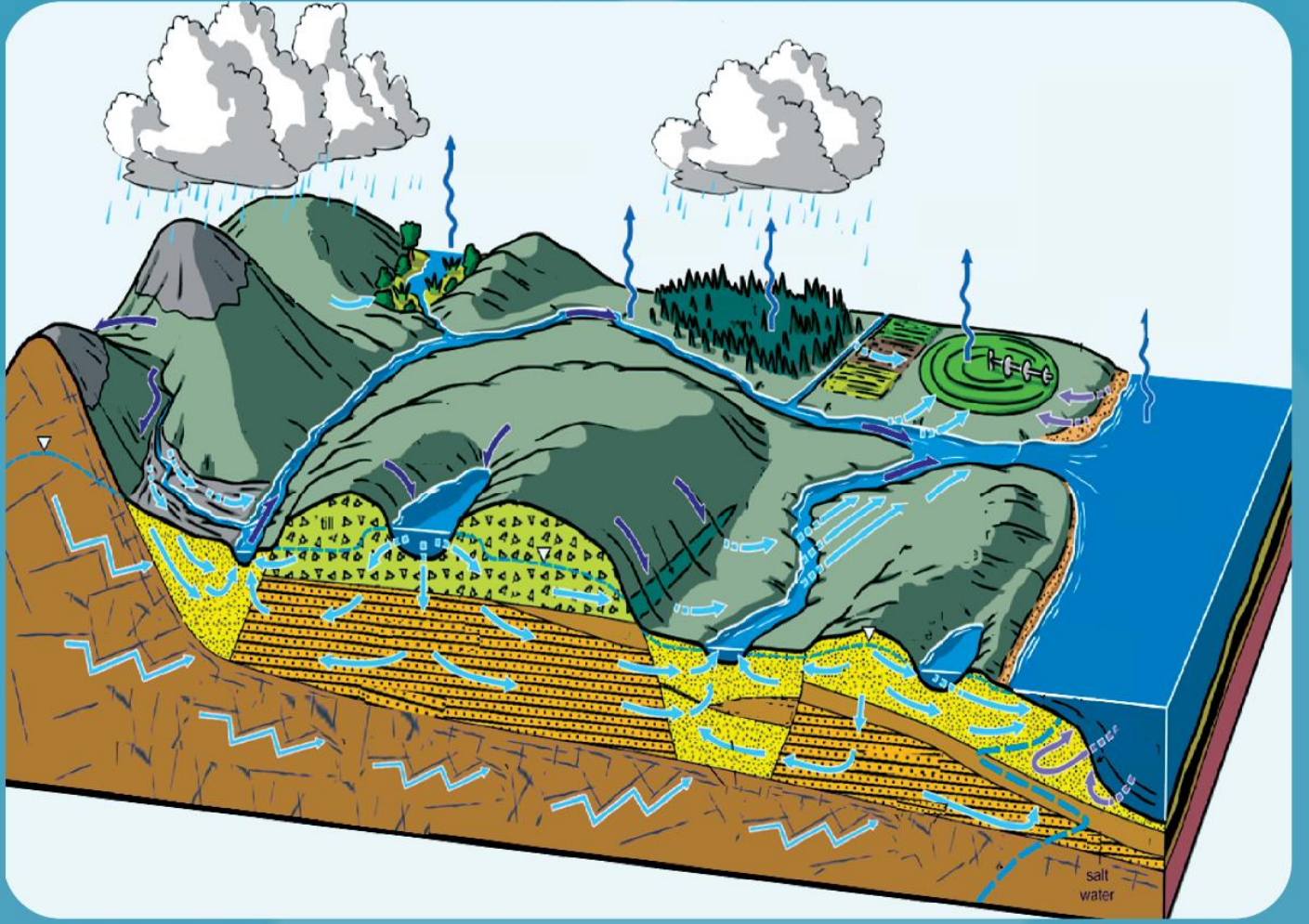




Su evrimimizdeki Yer Altı Suyu

Yeryüzünün En Önemli
Tatlı Su Kaynağını Tanımak

Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry
Warren Wood ve Douglas Mackay

Çeviren: Alper Elçi



THE
GROUNDWATER
PROJECT

Su evrimimizdeki Yer Altı Suyu

Yeryüzünün En Önemli

Tatlı Su Kaynağını Tanımak

The Groundwater Project

Eileen Poeter

*Colorado School of Mines, Golden,
Colorado, ABD*

Ying Fan

*Rutgers, The State University of New Jersey,
New Brunswick, New Jersey, ABD*

John Cherry

*G360 Institute for Groundwater Research,
Guelph, Ontario, Kanada*

Warren Wood

*Michigan State University, East Lansing,
Michigan, ABD*

Douglas Mackay

*University of California, Davis,
California, ABD*

Çeviri: Alper Elçi

*Dokuz Eylül Üniversitesi
Izmir, Türkiye*

Su evrimimizdeki Yer Altı Suyu

**Yeryüzünün En nemli
Tatlı Su Kaynağını Tanımak**

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

Tüm hakları saklıdır. Bu yayın telif haklarıyla korunmaktadır. Bu kitabın hiçbir bölümü, yazarlardan yazılı izin alınmadan herhangi bir biçimde veya yolla çoğaltılamaz (izin istemek için iletişim: permissions@gw-project.org). Ticari dağıtım ve çoğaltma kesinlikle yasaktır.

GW-Project çalışmaları gw-project.org adresinden ücretsiz olarak indirilebilir. GW Project'in çalışmasını indirmek için herhangi bir kimse gw-project.org bağlantılarını kullanabilir ve paylaşabilir. GW Project belgelerini başka internet sitelerinde kullanıma sunmaya veya belgelerin kopyalarını doğrudan başkalarına göndermeye izin verilmez.

Copyright © 2020 Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood ve Douglas Mackay (Yazarlar)

Groundwater Project tarafından yayımlanmıştır, Guelph, Ontario, Kanada, 2020.

Poeter, Eileen.

Su çevrimimizdeki yer altı suyu – Yeryüzünün en önemli tatlı su kaynağını tanımak / Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood ve Douglas Mackay – Guelph, Ontario, Kanada, 2020.

Çeviren: Prof.Dr. Alper Elçi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, Nisan 2021. 139 sf.

Özgün adı: Groundwater in Our Water Cycle – Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source

ISBN: 978-1-77470-008-2

Lütfen Groundwater Project e-posta listesine kaydolmayı düşünün ve yeni kitap sürümleri, etkinlikler ve Groundwater Project'e katılmanın yolları hakkında bilgi sahibi olun. E-posta listemize kaydolmanız, küresel bir yer altı suyu topluluğu oluşturmamıza yardımcı olur. [Kayıt](#).

Atıf: Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, Doug Mackay, 2020, [Su çevrimimizdeki yer altı suyu – Yeryüzünün en önemli tatlı su kaynağını tanımak](#). (Çev. Alper Elçi). The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.



Alan Editörleri: John Cherry ve Eileen Poeter

Kurul: John Cherry, Stephen Moran, Everton de Oliveira ve Eileen Poeter

Yürütme Kurulu: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood ve Yan Zheng.

Kapak Resmi: Hinton (2014)'ten uyarlanmış

İthaf

Bu kitabı bizden önce gelen ve bize yer altı suları hakkında bildiklerimizi öğreten akademisyenlere, uygulayıcılara ve eğitimcilere; güzel ve biricik gezegenimiz Dünya için sürdürülebilir bir yol açmayı arzulayan tüm gelecek akademisyenlere, uygulayıcılara ve eğitimcilere ithaf ediyoruz.

İçindekiler Tablosu

İTHAF	iv
İÇİNDEKİLER TABLOSU.....	v
‘THE GROUNDWATER PROJECT’ ÖNSÖZÜ.....	vii
ÖNSÖZ	viii
ÇEVİRENİN ÖNSÖZÜ	ix
TEŞEKKÜR.....	x
1 GİRİŞ	1
2 AMAÇ.....	1
3 YERYÜZÜNÜN SİHHİ TESİSAT SİSTEMİ	3
4 SU ÇEVİRİMİMİZİN ZEMİN ALTI KISMI	11
4.1 SIĞ GÖRÜNÜM	11
4.2 DAHA DERİN GÖRÜNÜM	13
Yer Altı Suyunun Araziyle Bağlantısı	16
Yer Altı Suyunun Akarsularla Bağlantısı.....	18
Yer Altı Suyunun Kaynaklarla Bağlantısı	24
Yer Altı Suyu ve Kuyular	27
4.3 BÖLGESEL ÖLÇEK GÖRÜNÜMÜ	29
Akiferler ve Sınırlayıcı Birimler	30
Akifer Depolama	33
4.4 KITASAL ÖLÇEK GÖRÜNÜMÜ	36
5 YER ALTI SUYUNUN KALIŞ SÜRESİ	39
6 YERYÜZÜNÜN TÜM ARAZİLERİNDE YER ALTI SUYUNUN BİR ROLÜ VARDIR	42
6.1 DAĞ ORTAMLARINDA YER ALTI SUYU.....	42
6.2 KARST ORTAMLARDA YER ALTI SUYU	43
6.3 SÜREKLİ DON OLAN ORTAMLARDA YER ALTI SUYU	45
7 YERYÜZÜNÜN HİDROLOJİK SİSTEMİNDE YER ALTI SUYUNUN BENZERSİZ İŞLEVLERİ	46
7.1 HİDROLOJİK DÜZENLEYİCİ OLARAK YER ALTI SUYU	47
7.2 YER ALTI SUYU BİR JEOKİMYASAL FABRİKA VE TAŞIMA BANDIDIR	51
Yer Altı Suyundaki Doğal Kimyasal Unsurlar.....	52
Yer Altı Suyundaki Çözünmüş Bileşenlerin Kökeni.....	56
Tuzlu, Mineral Zengini Yer Altı Suyunun Oluşumu	61
Kuru ve Sulak İklimlerde Jeokimyasal Fabrikalar ve Taşıma Bantları	65
7.3 ATIK DEPOLAMA YERİ OLARAK YER ALTI SUYU (GÖZDEN İRAK, GÖNÜLDEN DE İRAK).....	67
7.4 KÜRESEL HAYAT DESTEK SİSTEMİ OLARAK YER ALTI SUYU	75
Tarım ve İçme Suyu için Yer Altı Suyu	75
8 KAYBOLAN YER ALTI SUYU	79
9 YER ALTI SUYU YÖNETİMİNDE ZORLUKLAR	81
10 SONSÖZ	84

11	ALİŞTIRMALAR	85
11.1	YAŞADIĞINIZ BÖLGEYİ DİKKATE ALIN:.....	85
11.2	TÜM BÖLGELERDEKİ GENEL KOŞULLARI DİKKATE ALIN:.....	85
12	KAYNAKLAR	87
13	ALİŞTİRMA ÇÖZÜMLERİ	94
13.1	YAŞADIĞINIZ BÖLGEYİ DİKKATE ALIN:.....	94
13.2	TÜM BÖLGELERDEKİ GENEL KOŞULLARI DİKKATE ALIN:.....	113
14	YAZARLAR HAKKINDA	135
15	ÇEVİREN HAKKINDA	138

‘The Groundwater Project’ Önsözü

Birleşmiş Milletler Su Üyeleri ve Ortakları, yıllık temalarını birkaç yıl önceden belirler. “Yer Altı Suyu: Görünmezi görünür yapmak”, 22 Mart 2022 Dünya Su Gününün temasıdır. Yer altı sularını görünür yapma hedefi olan 2020'deki ilk Yeraltı Suyu Projesi (GW-Project) kitaplarının toplum önüne ilk çıkışı için bu durum çok yerinde olmuştur.

Kanada'da 2019'da kayıtlanmış ve kâr amacı gütmeyen bir kuruluş olan GW-Project, kendini eğitimde ilerlemeye katkıda bulunmaya adanmıştır; anlama ve problem çözme için bilginin oluşturulması ve yayılmasına yeni bir yaklaşım getirmiştir. GW Project, yer altı suyu bilgisinin demokratikleştirilmesi için küresel bir platform olarak <https://gw-project.org/> internet sitesini işletmektedir ve şu ilkeyi esas alarak kurulmuştur:

“Bilgi bedava olmalı ve en iyi bilgi, bedava bilgi olmalı.” Anonim

GW-Project'in misyonu, yer altı suları hakkında bilgi edinmek ve yer altı suyunun ekolojik sistemlerle ve insanlıkla nasıl ilişkili olduğunu ve bunları sürdürdüğünü anlamak isteyen herkese birçok dilde ücretsiz çevrimiçi olarak erişilebilir, ilgi çekici, yüksek kaliteli eğitim malzemeleri sağlamaktır. Bu, farklı disiplinlerden profesyonellerin gönüllülüğüne dayanan yeni bir tür küresel eğitim çabasıdır ve akademisyenleri, danışmanları ve emeklileri içermektedir. GW Project, artan katılımı birlikte altı kıtadan 14'ten fazla ülke ve 200'den fazla kuruluşla ilişkili yüzlerce gönüllüyü kapsamaktadır.

GW-Project devam etmekte olan bir çabadır ve önümüzdeki yıllarda internetin mevcut olduğu her yerde indirilmek üzere önce İngilizce ve sonra diğer dillerde yüzlerce kitap çevrimiçi olarak yayınlanmaya devam edecektir. GW-Project yayınları, eğitim sürecini destekleyen çeşitli yer altı suyu uygulamaları için kamuya açık yazılım sağlamanın veya bunlara bağlanmanın yanı sıra videolar, dersler, laboratuvar gösterimleri ve öğrenme araçları gibi destekleyici materyalleri de içerir.

GW Project yaşayan bir tuzelliktir, bu nedenle zaman zaman kitapların sonraki baskıları yayınlanacaktır. Kullanıcıların revizyon önermeleri için çağrı yapılır.

GW-Project topluluğunun bir parçası olduğunuz için teşekkür ederiz. Kitapları ve ilgili materyalleri kullanma deneyiminizi sizden duymayı umuyoruz. Fikirleri ve gönüllüleri memnuniyetle karşılarız!

GW-Project Yönlendirme Kurulu

Ağustos 2020

Önsöz

Bu kitap, gezegenimizin su döngüsünde yer altı suyunun rolü ve önemi hakkındadır ve GW-Projesi'nin başlıca ürünüdür. Geçtiğimiz on yılda, yaklaşmakta olan küresel su krizine dikkat çeken birçok kitap yayınlandı. Birçoğu tatlı suyun insanlık için muazzam önemine ve karşılaştığımız çok sayıda su sorununa odaklanmış olsa da, hiçbirisi su bilimi uzmanlarınca, su çevrimindeki yer altı suyu bölümünü konu etmek üzere geniş bir okuyucu kitlesi için bu kitap kadar kapsamlı bir şekilde yazılmadı. "Su Çevrimimizdeki Yer Altı Suyu: Yeryüzündeki En Önemli Tatlı Su Kaynağını Tanımak" başlıklı bu kitap ile "gizli" yer altı suları okuyucu için hayat buluyor.

Bu kitap, genişleyen kapsamı karşılayabilmek üzere giderek daha fazla uzmanlığa ihtiyaç duyulduğu için ortak yazarların her birinden aşamalı olarak yardım isteyen Eileen Poeter tarafından başlatıldı. Son ürün, özel ilgi alanları saha araştırması, yer altı suyu akışının analizi ve modellemesi, jeokimya ve kirlilik de olan dünya çapında tanınan kıdemli uzmanlar tarafından hazırlanan bir kitaptır. Sonuç, GW-Projesi'nin bilgiyi sentezleme ve karmaşıklığın öteki yüzünde basitliğe ulaşma arayışında teşvik etmeye çalıştığı türde bir işbirliği çabasıdır.

Yazarların hepsi GW-Projesi'nin Yönlendirme Kurulunda yer almaktadır. Kitabı hazırlarken, diğer konuların yanı sıra yer altı suyu yönetimi konusunda uzmanlardan tavsiyeler aldılar. Kitap kapsamlı bir hakem incelemesine tabi tutuldu. Dolayısıyla bu kitap, yer altı suyunun daha iyi yönetimi ve korumasını desteklemek yararına yer altı suyu bilgilerini aktarmak ve yer altı suyu bilincini kazandırmak için dünyanın acilen ihtiyaç duyduğu türden disiplinler arası işbirliğini temsil etmektedir.

John Cherry, GW-Project Lideri
Guelph, Ontario, Kanada, Ağustos 2020

Çevirenin Önsözü

GW-Project kapsamında herkesin ücretsiz kullanımına açık olan kitaplar 2020 senesinin ortasında çevrimiçi olarak yayınlanmaya başlamıştır. Bu projeden ilk haberdar olduğumda yayınlanan kitapları inceledikten sonra İngilizce yazılan bu kitapların yer altı suyu ile ilgili bilginin yaygınlaştırılmasında önemli bir rol oynayacakları kanaatine vardım. Dolayısıyla bu asil girişim ve çabanın bir parçası olmak istedim ve kitap dizisinin ilk yayınlanan kitaplardan biri olma özelliğini taşıyan “Su Çevrimizdeki Yer Altı Suyu” başlıklı eseri Türkçe bilim kitabı dağıtıcısına kazandırmak için GW-Project Yönlendirme Kuruluna başvurarak projeye katkı koyabilmenin kıvancını yaşayabildim.

Yer altı suyu, gerek miktar gerekse kalite bakımından kullanılabilirliği ile yer üstü sularına göre öne çıkan bir tatlı su kaynağıdır. Akarsu ve göllerdeki suların erişilebilirliği, maruz kaldıkları pek çok çevresel baskı ve depolama yapılarının niceliksel etkileri nedeniyle azalmaktadır ve buna bağlı olarak yer altı suyunun kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Kullanımın artması da doğal olarak sorunları beraberinde getirmektedir. Bu bakımdan, yer altı suyunun su çevrimindeki yerinin bütünleşik bir bakış açısıyla iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu kitap, görünmeyen bir kaynak olarak yer altı suyunu görünür kılmak amacıyla sadeleştirilmiş bir teknik anlatım ile bu su kaynağımızı tüm yönleriyle ele almaktadır ve temel düzeyde olması bakımından yer altı suyunu bilmeyenler için de faydalıdır. Ülkemizde de son zamanlarda yer altı suyu yönetiminin önemli olduğunun farkına varılmış olması nedeniyle bu konuda hem ülkemizde hem de dilimizin kullanıldığı diğer ülkelerde de yararlanılabilecek bir bilgi kaynağının sunulabildiği düşünülmektedir.

Kitabın metin ve şekillerinde birçok teknik terim kullanılmaktadır. Bu terimlerin kabul görmüş Türkçe karşılıkları kullanılmaya çalışılmış, gerekli görülen yerlerde ise Türkiye Bilimler Akademisinin yayınladığı ve internet üzerinden de kullanıma açtığı Türkçe Bilim Terimleri Sözlüğü’nden yararlanılmıştır. Kitabın çevirisinde mümkün olabildiğince yazarların kendilerine özgü anlatım tarzının da korunarak, doğru ve anlaşılır bir biçimde çalışmaya gayret edilmiş olsa da, bazı hatalar gözden kaçmış olabilir. Böyle hataları okuyucuların anlayışla karşılamalarını umuyor ve bunları bana ilettiklerinde minnettar olacağımı ve bir sonraki sürümde gerekli düzeltmelerin yapılacağını belirtmek isterim.

Çevirinin gözden geçirilmesinde ve düzeltilmesinde katkısı olan Prof. Dr. Şebnem Elçi’ye ayrıca teşekkür ederim. Kitabın, başta hidrojeoloji, hidroloji ve çevre bilimleri alanlarında çalışanlara olmak üzere, yer altı suyunu merak eden ve hakkında bilgi edinmek isteyen herkese faydalı olmasını dilerim.

Prof. Dr. Alper Elçi
Dokuz Eylül Üniversitesi
İzmir, Türkiye, Nisan 2021

Teşekkür

Kapsamlı ve faydalı incelemeleri ve bu kitaba yaptıkları katkılar için aşağıdaki kişilere en içten şükranlarımızı sunarız:

- ❖ Hugh Whiteley, Bağımsız İnşaat Mühendisliği Profesyoneli ve Konuk Öğretim Üyesi olarak çalışan Emekli Öğretim Üyesi, University of Guelph, Kitchener, Kanada;
- ❖ Kamini Singha, Profesör, Jeoloji ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, ABD;
- ❖ Ineke Kalwij, Yer altı Suyu Danışmanı, Kalwij Water Dynamics Incorporated, Vancouver, British Columbia, Kanada;
- ❖ Garth van der Kamp, Araştırma Ortağı, Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Kanada; Eski Araştırma Bilim İnsanı, Environment Canada;
- ❖ Ian Stewart, Yardımcı Doçent, Beşeri Bilimler, King's College, London, Ontario, Kanada;
- ❖ Allan Freeze, Emekli Profesör, Jeoloji Mühendisliği, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Kanada; ve
- ❖ Fred Phillips, Emekli Profesör, Yer ve Çevre Bilimleri Bölümü, New Mexico Tech, Socorro, New Mexico, ABD.

Amanda Sills'in gözetimi ve bu kitabın prodüksiyonu için ve yazı düzeltme için Elhana Dyck'e minnettarız, ikisi de Groundwater Project, Guelph, Ontario, Kanada'dan. Kitabın tamamlanmasını teşvik ederek Groundwater Project, São Paulo, Brezilya'dan Everton de Oliveira, Diego Nogueira ve Bruna Soldera'ya rehberlikleri ve katkıları için teşekkür ederiz. Kitabın Türkçe'ye çevirisi için Alper Elçi'ye teşekkür ederiz.

Eileen Poeter
Ying Fan
John Cherry
Warren Wood
Douglas Mackay

Su Çevrimimizdeki Yer Altı Suyu

Yeryüzünün En Önemli

Tatlı Su Kaynağını Tanımak

The Groundwater Project

1 Giriş

Bu gezegendeki suyun varlığı, bildiğimiz şekliyle hayatın var olmasına izin veren temel özelliktir. Gezegendeki su dolaşımı, tüm organizmaların yaşam düzenlerini kontrol etmeye devam ediyor ve bireysel ve toplumsal insan sağlığının yanı sıra ekolojik sağlığın da temelini oluşturuyor. Suyun su çevriminde nasıl ve nerede dolaştığını bilmek, akıllı su yönetiminin üzerine inşa edildiği temeldir.

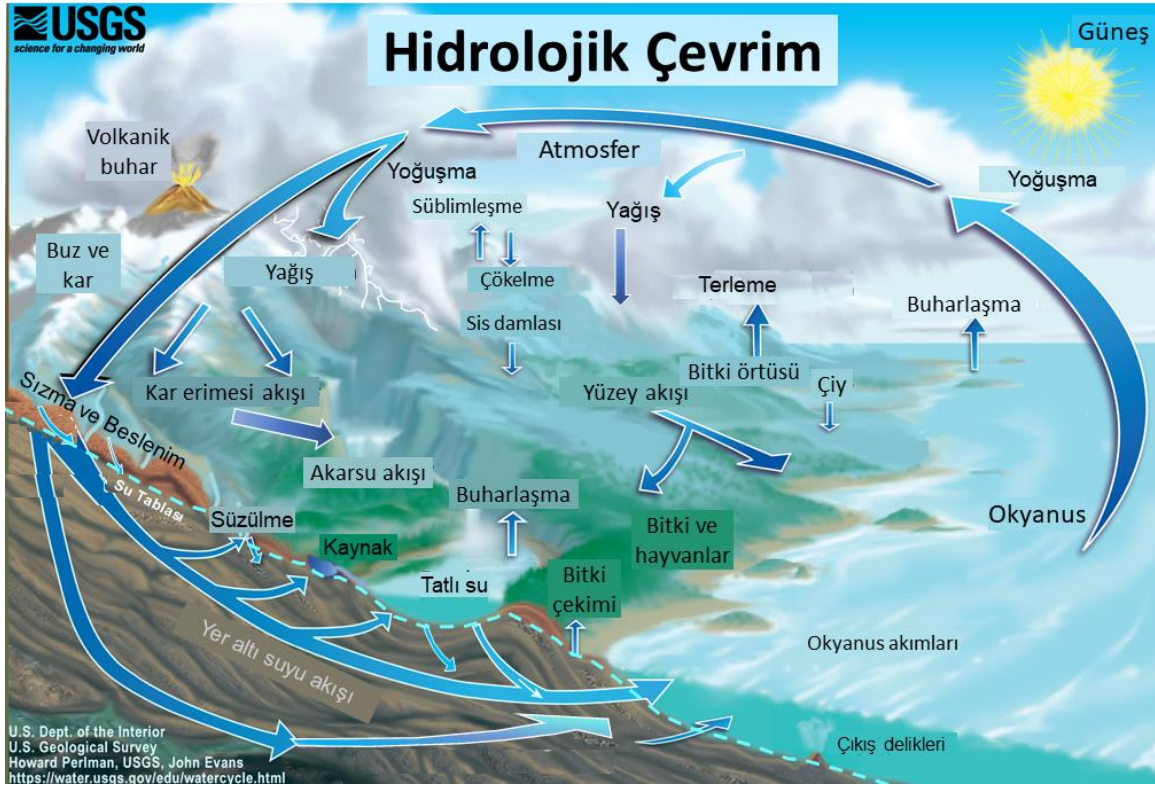
İnsan faaliyetinin Dünya gezegeninin jeolojik süreçleri üzerindeki etkileri şimdi o kadar önemlidir ki, resmen benimsenmesi için jeolojik zamanın yeni bir alt bölümü olan Antroposen Dönemi önerilmiştir. Doğal süreçlerin bilgisi, müreffeh ve değişimle başa çıkabilen kültürlerde insanın hayatta kalması için her zaman büyük önem taşımıştır. Şimdi insan faaliyeti bu süreçleri beklenmedik şekillerde değiştiriyor, bu nedenle bu doğal süreçleri ve üzerindeki insan kaynaklı etkileri anlamak, bunların sürdürülebilir yönetimine yönelik bilgi geliştirilmesi bakımından çok önemlidir.

Birleşmiş Milletler 2016 Dünya Su Kalkınma Raporu (UNWWAP, 2016), dünyanın 2030 yılına kadar %40 küresel su açığı ile karşı karşıya kalabileceğini öngörmektedir. Bu şaşırtıcı rakamın, iklim değişikliği, genişleyen kentleşme ve nüfus artışı nedeniyle artan küresel sıcaklıklarla daha da kötüleşeceği tahmin edilmektedir. 2025 yılına kadar küresel nüfusun üçte ikisi su sıkıntısı altında yaşayacak. Küresel Su Krizi acildir ve küresel çözümleri belirlemek, önceliklendirmek ve hızlandırmak için yenilikçilik gerektirmektedir.

Yer altı suyu, küresel su krizinin çözümünde yer almak zorundadır çünkü yeryüzü sıvı tatlı suyunun %99'unu oluşturmaktadır (Shiklomanov, 1993) ve nehirlerin, göllerin, sulak alanların ve ekolojik sistemlerin yaşatılması için hayati öneme sahiptir. Ancak çok az insan yer altı suyunu görür çünkü kara yüzeyinin altında gizlidir. Bu "gizliliğin" üstesinden gelmek için okuyucu, yeryüzünün tatlı sularını yeni bir şekilde tahayyül etmeye, nehirlerde, göllerde ve sulak alanlarda gördüğümüz tüm yüzey suyunun yeryüzünün geniş tatlı su haznesinin sadece görünen kısmı olduğunu düşünmeye davet edilmektedir; başka deyişle, sadece "buz dağının görünen kısmı" olduğunu ve "buz dağın" gizli kısmının buzdan ziyade sıvı yer altı suyu olduğunu.

2 Amaç

Bu kitap, hidrolojik çevrim olarak da adlandırılan su evrimimizin daha geniş bağlamında yer altı suyu bilimini tanıtıyor. Şekil 1'de gösterildiği gibi hidrolojik döngü, suyun dünya yüzeyinin üzerinde, üstünde ve altında sürekli hareketidir.



Şekil 1 - Hidrolojik çevrim, suyun dünya yüzeyinin üzerinde, üstünde ve altında sürekli hareketi (USGS, 2020'den uyarlanmıştır).

Bu kitap, yer altı suyunun sıvı tatlı suyumuzun %99'unu oluşturmaya rağmen, akiferlerden fazla çekim yapmadan yer altı suyunun yalnızca bir kısmının erişilebilir olduğunu açıklamaktadır. Sonuç olarak, bu hayati kaynağı tüketmeden devasa yer altı suyu rezervinin yıllık olarak yalnızca küçük bir kısmı kullanılabilir. Buna rağmen, küresel yer altı suyu çekimi son 50 yılda dört kattan fazla artmış ve okyanuslardaki mevcut 3,1 mm/yıl artışın yaklaşık% 25'ine neden olmuştur (Wood ve Hyndman, 2018).

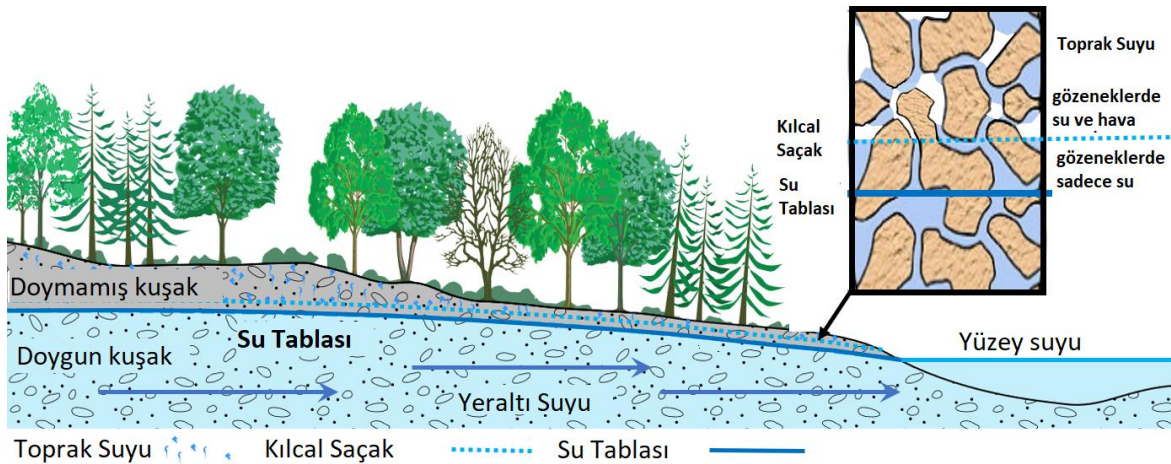
Yer altı suyu, bozunma ve jeomorfolojik süreçlerle yeryüzünü şekillendirir. Nehirler, göller ve sulak alanlar, suya ihtiyaç duyduklarında onları besleyen ve yüzey suyu fazla olduğunda akışlarının bir kısmını alan yer altı suyu haznesi ile akış alışverişi yapan yer altı suyunun yüzeysel tezahürleridir. Bu kitap, görebildiğimiz yüzey suyunun sürekli olarak akan ve hidrolojik çevrimi takviye eden gizli yer altı suyu haznesine bağlanma ve bu hazne tarafından desteklenme şekillerine dikkat çekmektedir. Yer altı suyunun bu sürekli akışı, doğal ve ayrıca antropojenik (insan yapımı) kimyasallar için bir taşıma bandıdır. Bu tür kimyasalların dağılımı, yer altı suyunun nerede içmeye uygun olduğunu belirler ve toprağın mahsul yetiştirme kabiliyeti, büyük ölçüde yer altındaki suyun toprakla nasıl etkileşime girdiğine bağlıdır.

Bu kitap, yer altı suyu akışı ile taşınan doğal ve antropojenik kimyasalları dâhil etmek için "su çevrimimizdeki yer altı suyu" konusuna geniş bir bakış açısıyla yaklaşmakta ve diğer [GW-Project kitaplarında](#) kapsamlı bir şekilde açıklanan birçok konuyu tanıtmaktadır. Yer altı suyu, yüzey suyu akışını düzenleyerek, ekosistemleri destekleyerek

ve yeryüzündeki tüm yaşam için su sağlayarak birçok hizmet sağlar. Kısacası yer altı suyu, yeryüzünün yaşam destek sistemidir.

3 Yeryüzünün Sıhhi Tesisat Sistemi

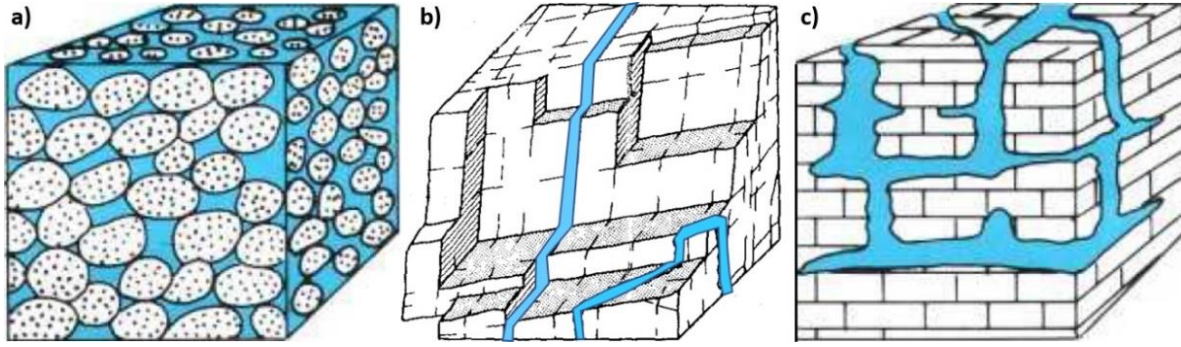
Pek çok durumda, yer altı suyu, yağışın yer yüzeyinden sızması ve bu yüzeyin altında her yerde belli bir derinlikte kavramsal bir yüzey olarak bulunan su tablasına süzülmesi sonucu meydana gelmektedir (Şekil 2). Su tablasının derinliği bölgeden bölgeye değişmektedir. Suyun deliğe akmaya başladığı seviyenin altına kadar bir sondaj deliği açılarak (veya su yüzeye yakınsa, kazılarak) ve yer yüzeyinden su yüzeyine kadar mesafe ölçülerek derinliği ölçülebilir. Bir göl veya nehirdeki su yüzeyi, kara yüzeyinin göl veya nehrin kıyısıyla buluştuğu yerde su tablası haline gelir (Şekil 2). Yani, bir kıyı şeridi boyunca bulunan su yüzeyi, kara yüzeyinin altına uzanır. Kıyı şeridi boyunca su genellikle karadan göle veya nehre akar (boşalır), ancak bazı durumlarda akış yönü su kütesinden toprağın içine doğrudur.



Şekil 2 - Göl veya dere gibi bir su kütesine ait yüzeyinin kıyı çizgisiyle buluştuğu yerde su tablası zeminin altına uzanır (USGS, 2019a'dan uyarlanmış).

Su moleküllerinin yer altı katlarına yapışması ve su moleküllerinin içtutunumu sonucu oluşan kılcal kuvvetler nedeniyle su, su tablasının üzerindeki toprak gözeneklerine az bir mesafe yükselmektedir. Bu kılcal kuvvetler, suyu aşağı doğru çeken yerçekimi kuvvetinin tersine, toprak suyunu yukarı çekmektedir. Bu durum, içindeki gözenek boşluklarını doldurmak için suyu mutfak tezgâhından yukarı çeken kuru bir süngere benzemektedir. Bu bölgeye kılcal saçak denir. Kılcal bölgenin üstünde ve yüzeye kadar uzanan “doymamış” veya “vadoz” kuşak, içerisindeki bir kısım boşlukların hava, bazılarının su ile dolu olduğu bölgedir. Su tablasının altında, su, Şekil 3'te gösterildiği gibi, çökel parçacıkların arasındaki tüm boşlukları (gözenekleri), kırık (çatlak) ve kaya kanallarının içindeki (mağaraları) tüm boşlukları doldurur. Kara yüzeyinin üst birkaç bin

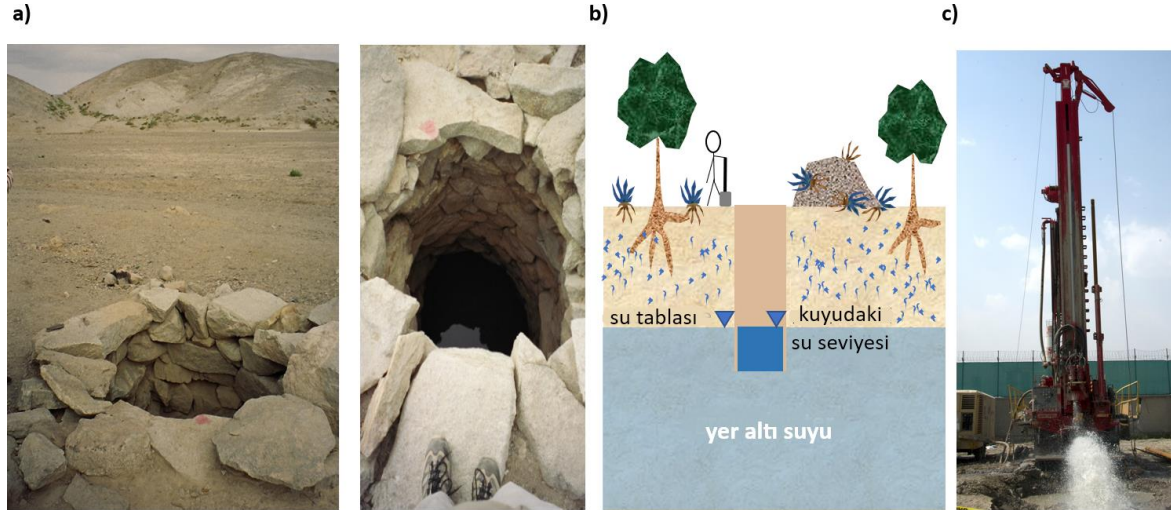
metresindeki tüm çökel ve kayalarda, parçacık, çatlak veya oyuklar arasındaki açık boşlukların birbirine bağlı olduğu boşluğa gözeneklilik denir. Gözeneklilik, jeolojik malzemenin açık boşluk olan ve akışkanı tutabilen kısmıdır. Birbirine bağlı gözenek boşlukları jeolojik malzemeyi geçirgen hale getirir, yani yer altı suyunun malzeme içinden akmasına izin verir. Geçirgenlik, jeolojik malzemenin çatlaklarından ve gözeneklerinden suyun geçme kolaylığının bir ölçüsüdür.



Şekil 3 - Su tablasının altında, yer altındaki malzemenin içerisinde görülen a) çökel parçacıkları arasındaki gözenekleri; b) kaya çatlaklarını ve c) karst olarak bilinen karbonatlı kaya mağaralarını su doldurur (a ve c Heath, 1983; b Gale, 1982'den uyarlanmış).

Akiferler, kullanışlı hacimlerde su depolayan ve ileten jeolojik katmanlar olarak tanımlanır. Akiferler, onları çevreleyen jeolojik katmanlardan daha gözenekli ve geçirgendir. Su tablasının altındaki temiz bir kaba kum yatağı, akifer için iyi bir örnektir. Sınırlayıcı birimler, akiferlere ve akiferlerden yer altı suyu akışına engel teşkil eder. Kaba kum katmanları arasında düşük geçirgenliğe sahip bir kil katmanı veya çatlak bazalt katmanları arasında kırılmamış bazalt kaya katmanı sınırlayıcı birimlere örneklerdir.

Su tablasının kazma ve kürekler veya küçük ekskavatörler kullanılarak ulaşılabilecek kadar sığ olduğu dünyanın birçok bölgesinde elle kazılan kuyular yaygındır. Gobi Çölü'nde göçebeler tarafından uzun zaman önce kazılmış bir kuyunun içine bakarak su tablasını görebiliriz (Şekil 4). Çoğu durumda, su kuyuları daha derindir ve elle kazılmak yerine ağır hizmet tipi, kamyonu monteli sondaj kuleleri ile açılır. Açılan kuyular tipik olarak küçük bir çaplıdır ve kuyudaki su yüzeyini görmek zor ya da imkânsız olabilir, bu nedenle Şekil 4'de görülen elle kazılmış bir kuyu işe yaramaktadır.



Şekil 4 – Su tablasına erişmek için kuyular icat edilmiştir. a) Sudan yansıyan gökyüzü ile Gobi Çölü'nde el ile kazılmış bir kuyu (fotoğraf Cherry, 2019'dan). b) Su tablasını kesen el ile kazılmış bir kuyunun şematik gösterimi (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org). c) Motorlu su kuyusu sondaj kulesinin fotoğrafı (fotoğraf Mellin, 2013'den).

Yer altı suyu, hidrolojik çevrimin ayrılmaz bir parçasıdır. Şekil 5'te, hidrolojik çevrimi hareket halindeyken gösteren bir videoya bağlantı verilmiştir.



Şekil 5 – Hidrolojik çevrimin bir animasyonunu [izlemek için tıklayın](#) (NASA, 2020).

Su, hidrolojik çevrimin atmosferik kısmına buharlaştırma yoluyla girer ve yağış ile çıkar. Atmosferdeki suyun hareketine güneş tarafından güç verilmektedir ve hareket, sıvı yüzey su kütleleri (örn. göller, akarsular, okyanuslar) ve havadaki su buharı arasındaki sürekli su molekülleri alışverişi ile kontrol edilir.

Güneşin enerjisi yüzey su kütlelerini ısıtırken tek tek su moleküllerinin komşu moleküllerle bağlarını koparmasına ve atmosfere kaçmasına neden olur. Aynı zamanda, gaz hâlindeki su molekülleri tek tek sıvı su ile temas ederler ve emilirler. Havanın ve yüzey suyunun sıcaklığına ve havadaki su buharı miktarına bağlı olarak, bu değişim ya buharlaşma (suyun yüzeyden havaya net hareketi) ya da yoğunlaşma (suyun havadan yüzeye

net hareketi) ile sonuçlanır. Havanın su buharını tutma kabiliyeti sınırlıdır, bu nedenle havadaki su buharı miktarı hâkim olan sıcaklıkta tutabileceği maksimum miktarı (doygunluğu) aşarsa, fazla su buharı çiy veya sis oluşturarak sıvı su olarak yoğunlaşır.

Buharlaşıma nemli hava meydana getirir. Dünya yüzeyi yakınındaki hava, güneş tarafından ısıtıldıkça genişler ve yükselir. Dünyanın atmosferi yüzeye yakın daha sıcaktır ve yukarıda daha soğuktur, bu nedenle yükselen nemli hava, su buharı içeriğinin doygunluğu aştığı noktaya kadar soğuduğu bir yükseltiye ulaşır. Fazla su buharı daha sonra sorguç şeklinde küçük damlacıklar (veya yere yakınsa sis) hâlinde yoğunlaşır. Küçük damlacıklar, birbirleriyle çarpışarak ve su buharının yüzeylerinde yoğunlaşmasıyla büyürler. Yeterince büyürlerse, havanın kaldırma kuvveti ile tutulamayacak kadar ağırlaşır ve sorguçlardan yağmur damlaları, kar, karla karışık yağmur veya dolu şeklinde yağış şeklinde düşerler.

Yağış yer yüzeyine düştüğünde:

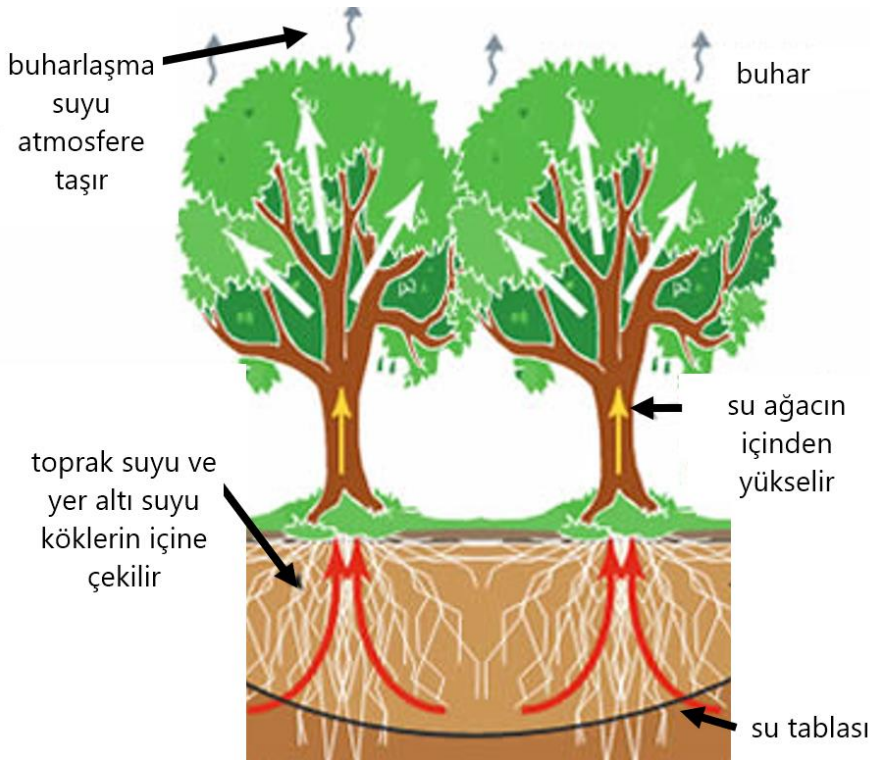
- 1) Atmosfere buharlaşarak geri dönebilir;
- 2) Yer yüzeyinden akarak (yüzey akışı) veya su tablasının üstündeki geçici olarak doymuş sığ toprak katmanlarından (yüzeyaltı akışı) yer üstündeki akarsular gibi su kütlelerine akarak ve akarsularda yağış akışı hâline gelir; ya da,
- 3) Toprağın içine sızar.

Sızan su, vadoz bölgesine girer ve bir kısmı bitki örtüsü tarafından kullanılır. Vadoz bölgesinde fazla su olduğunda, su tablasına süzülerek yer altı suyu sisteminin beslenimine dönüşür. Beslenim gerçekleştiğinde, su tablası yükselir, yer altı suyu sisteminde su depolanır ve su, yüzeye boşaldığı nehirlerle, göllere, bataklıklara ve okyanuslara doğru yavaşça akar. Yavaş hareket eden bu su, boşalım alanlarına doğru hareket ederken yer altında depolanır ve kuraklık sırasında bile yüzey su kütlelerine su sağlayan bir düzenleyici (veya tampon) görevi görür. Kuru mevsimlerde devam eden akarsu akışına baz akışı denir. Çoğu havzada yer altı suyu boşalımı, baz akışın ana kaynağı ve çoğunlukla tek kaynağıdır.

Su, kıtalardan okyanuslara doğru ilerlerken yüzey, yer altı ve atmosfer arasında taşınır. Yer altı suyunun çoğu, okyanusa akarsu akışının baz akış bileşeni olarak ulaşmaktadır, ancak yer altı sularının bir kısmı, kıyı şeridinde yakın sızıntı olarak doğrudan okyanusa boşalmakta ve bir kısmı buharlaşma yoluyla hidrolojik çevrimin atmosferik kısmına yeniden katılmaktadır. Okyanusa ulaşmadan atmosfere giren yer altı sularının çoğu kapalı alçaltılarda meydana gelir. Aral Denizi (Kazakistan ve Özbekistan arasında), Hazar Denizi (Avrupa ve Asya arasında) ve Ölü Deniz (Ürdün Çöküntü Vadisi'nde) ile Ölüm Vadisi'nin (ABD'nin güneybatısında) tuzlu su havuz ve bataklıkları, bu tür kapalı drenaj sistemlerine örneklerdir.

Buharlaşıma hem karadan hem de okyanustan meydana gelmektedir, ancak okyanus gezegenimizin %71'ini kaplar ve kara yüzeyinden farklı olarak okyanus yüzeyi kurumaz, bu nedenle okyanustan buharlaşma için sonsuz bir su kaynağı vardır.

Dolayısıyla, hidrolojik çevrimin okyanustan başladığını söyleyerek bunu genellikle basitleştiririz. Ancak, bitki örtüsünden terlemenin dahil olduğu kara yüzeyinden gelen buharlaşma-terleme, büyük miktarda suyu sığ yer altından atmosfere taşıyabilir. Bitki kökleri, suyu topraktan ve su tablasından çekerek bitkinin içinden yukarıya taşır (Şekil 6). Tek bir ağacın günde 500 litre suyu topraktan atmosfere taşıması alışılmadık bir durum değildir. Küresel olarak, karaya düşen suyun %70 ila 75'i terleme yoluyla veya buharlaşarak atmosfere geri döner (Dai ve Trenberth, 2002). Yani, yağmurun yalnızca %25 ila 30'u yerin içerisinden ve nehirlerden akarak okyanuslara geri döner. Yıllık ortalama olarak, okyanusa ulaşan nehir suyunun yaklaşık yarısı yer altı suyudur (Reitz ve diğ., 2017) ve yaklaşık yarısı yüzey üzerinden veya sığ yer altının içinden "hızlı akış" biçiminde akmaktadır.



Şekil 6 – Ağaçlar, topraktan ve/veya su tablasından atmosfere su çekerler. Burada bir ağaç korusunun altında gösterildiği gibi su tablasında bir alçaltıyı meydana getirerek tek bir ağacın günde 500 litre suyu yer altından atmosfere taşıması, alışılmadık bir durum değildir (USEPA, 2012'den uyarlanmış).

Göller, göletler, akarsular gibi küçük su kütlelerinin yanı sıra yer yüzeyinden buharlaşmanın ve suyun bitki gözeneklerinden terlemesinin birleşimi toplu olarak, suyun yeryüzünden atmosfere hareketini oluşturan evapotranspirasyon olarak adlandırılır.

İklim kuraklığı, bir yerin yıllık yağış (P) ve potansiyel evapotranspirasyon (PET) oranına göre tanımlanmaktadır. PET, toprakta sınırsız su kaynağı olması durumunda buharlaşabilecek ve terleyebilecek su miktarıdır. PET, daha yüksek sıcaklık, daha düşük nem ve daha yüksek rüzgâr hızı olan bölgelerde daha yüksektir. Kuraklığın seviyesi, yağış

miktarının potansiyel evapotranspirasyona bölünmesi olan Kuraklık Endeksi (AI) ile tanımlanmaktadır.

Nemli bölgeler, AI değeri 0,65'ten büyük olan ve tipik olarak yılda 500 milimetreden (mm/yıl) fazla yağış alan bölgeler olarak tanımlanmaktadır. Yerine göre büyük ölçüden değişmesine rağmen, nemli bölgelerde:

- yer altı suyu beslenimi tipik olarak yılda birkaç kez gerçekleşir.

Kuru, yarı-nemli bölgelerde AI, 0,5 ila 0,65 arası olur.

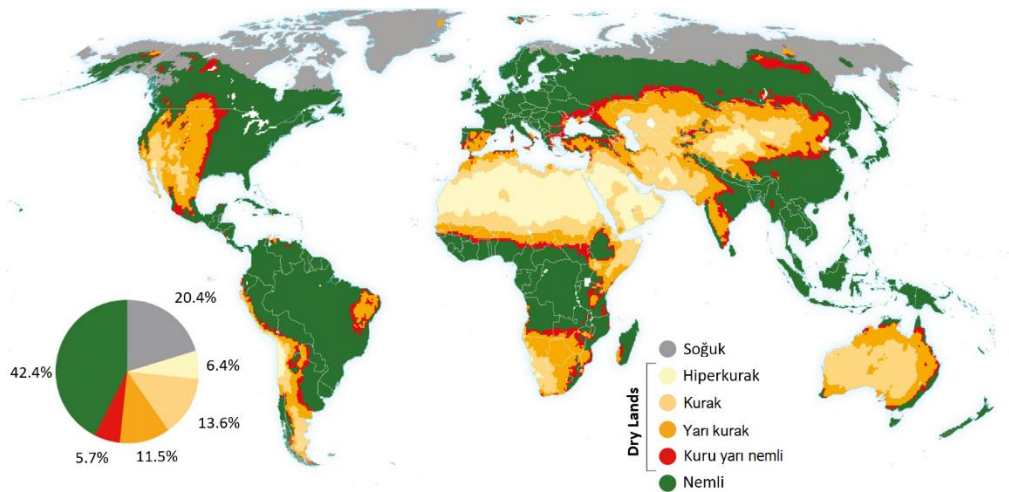
Yarı kurak bölgeler, 0,2 ile 0,5 arasında AI'si olan alanlar olarak tanımlanır. Genellikle 250 ila 500 mm/yıl mertebesinde yağış alırlar. Kurak bölgeler, 0,05 ila 0,2 arasında AI değerine sahiptir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde:

- yağışın büyük bir kısmı evapotranspirasyon ile kaybolarak sadece küçük bir miktar su tablasına ulaşır (sıfıra yakın bir değerden yağışın %4'üne kadar); ve
- yer altı suyu beslenimi sık gerçekleşir.

Hiper-kurak bölgelerde AI, 0,05'den küçük olur ve:

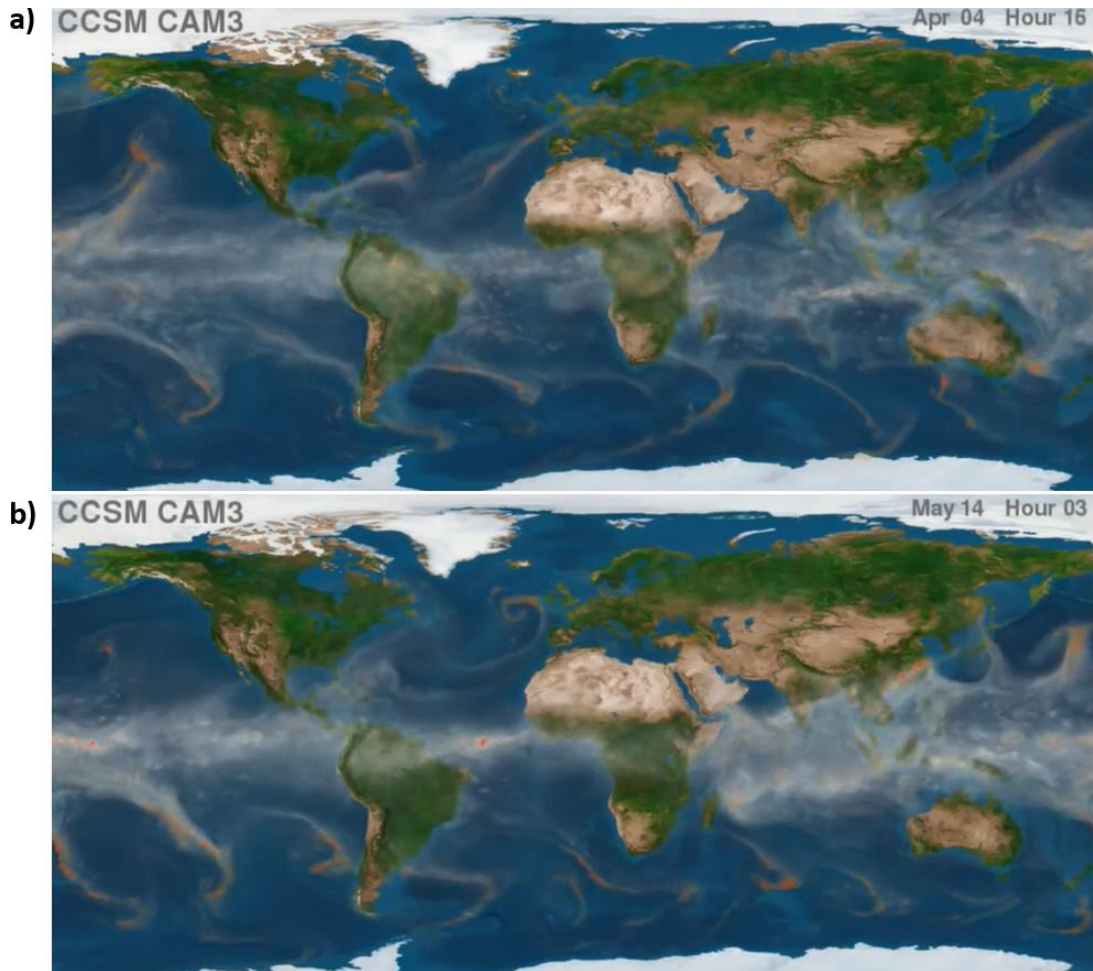
- yer altı suyu beslenimi sadece bir fırtına olayını takiben topraktan yeterince su sızması için yeterli akış toplayan alçaltılarda meydana gelir, böylelikle fazla su, su tablasına ulaşır; ve
- yer altı suyu genellikle tek su kaynağıdır çünkü yüzey suları, buharlaşmanın su moleküllerini ortadan kaldırması ve çözünmüş tuzları yüzey suyu kütlelerinde geride bırakması nedeniyle tuzlu olma eğilimindedir.

Yarı kurak ve kurak bölgelerin dağılımı Şekil 7'de gösterilmektedir. Kurak bölgeler yaklaşık 2,5 milyar insana ev sahipliği yapmakta, dünyadaki gıdanın kabaca % 44'ünü ve dünyadaki besi hayvanlarının yaklaşık % 50'sini yetiştirmektedir.



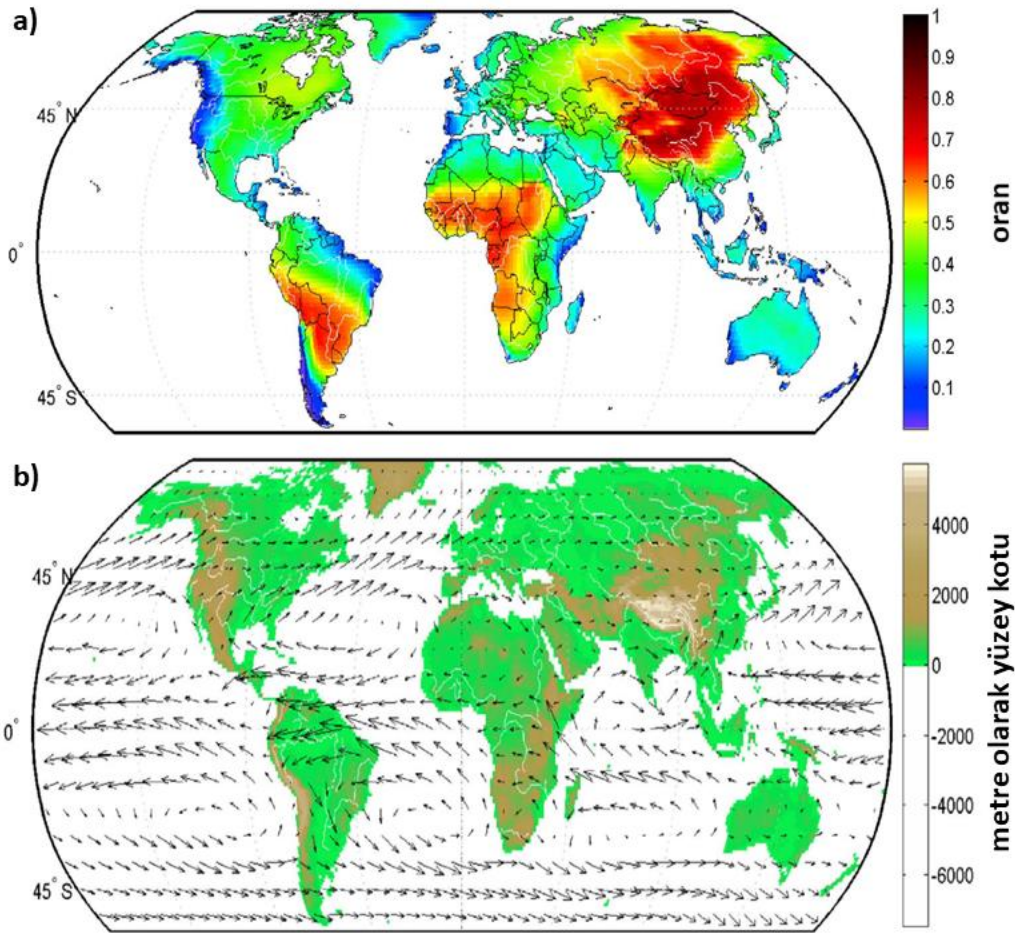
Şekil 7 – Kuraklığın yeryüzündeki dağılımı (European Commission Joint Research Center, 2020'den uyarlanmış).

Evapotranspirasyonun yeryüzü üzerindeki dağılımı Şekil 8'deki videoda gösterilmektedir. Video, Birleşik Devletler Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi (USNCAR), su buharı ve yağışın Topluluk İklim Sistemi Modeli simülasyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Videoda, bulutlar (beyaz siğiller) hem okyanuslardan hem de kıtalardan, özellikle Amazon yağmur ormanları gibi tropikal yağmur ormanlarından yükselmektedir. Videodaki turuncu patlamalar, bulutlar suyla ağırlaştığında yağışın başlamasını gösterir. Bu yağış olayları, hem okyanustan hem de kıtalardan buharlaşmayla "beslenmektedir". Videoda gösterildiği gibi, karadaki bir konumdan yükselen su buharı, yukarıdaki hareket eden hava kütlelerine katılarak bunun buhar içeriğine katkıda bulunabilir ve ardından rüzgâr ile taşınarak kıtadaki başka bir yerde yağmur olarak yağabilir. Bu sürece yağış geri çevrimi denir çünkü bu yağış karaya düşen yağmur şeklinde başlar, sonra buharlaşır ve tekrar yağış haline gelir.



Şekil 8 - 2010'daki bir zaman periyodunca bir iklim simülasyon modeli tarafından oluşturulan buharlaşma ve evapotranspirasyon (beyaz) ve yağış (turuncu) animasyonunu [görüntülemek için tıklayın](#) . Turuncu noktalar, a) Güney Amerika'daki Amazon yağmur ormanının kuzey ucunda ve b) Güney Amerika'nın kuzeydoğusundaki Atlantik Okyanusu'nda ve ayrıca güneydoğu Çin'de fırtınanın başladığını gösterir. Fırtınaların başlangıcı videoda turuncu patlamalarla daha net ortaya çıkıyor (USNCAR, 2020).

Geri çevrimli yağış, okyanustan uzak bölgelerde görülen toplam yağışın büyük bir kısmını oluşturabilmektedir (Şekil 9a). Örneğin, Güney Amerika'nın güney kesimindeki yağışın yarısından fazlası Amazon ormanlarında terleyen sudan kaynaklanmaktadır (van der Ent ve diğ., 2010). Şekil 8'deki video bağlantısı, su buharının Amazon Havzasından yükseldiğini ve And Dağları'nın doğu kanadı boyunca güneye doğru hareket ettiğini ve sonunda güneydeki La Plata Nehri Havzasında çökeldiğini göstermektedir. Bir havza, nehir sistemleri arasındaki topoğrafik ayrımı birleştiren bir hatla tanımlandığı gibi bir nehir sistemi tarafından akaçlanan alandır; burada bir taraftaki su damlası bir nehre, diğer taraftaki diğer nehre akar. Yer altı suyu havzaları nehir havzaları ile çakışabilir, ancak farklı da olabilir ve bitişik yer altı suyu havzaları arasındaki en yüksek su seviyelerini birleştiren hat ile tanımlanmaktadır. Şekil 9b'deki oklar, Şekil 8'deki videoda simüle edilen atmosferdeki buhar taşınımının yönüne karşılık gelmektedir. Bir bölge, nemli deniz havasının kıtaya ulaştığı yerden ne kadar uzaksa, yağışı da rüzgâr üstü yöndeki karanın evapotranspirasyonuna o kadar çok bağlıdır. Güneydeki La Plata Havzası Amazon'dan gelen terlemeye bağımlı olduğundan, Amazon'a “yeşil okyanus” denilmiştir.



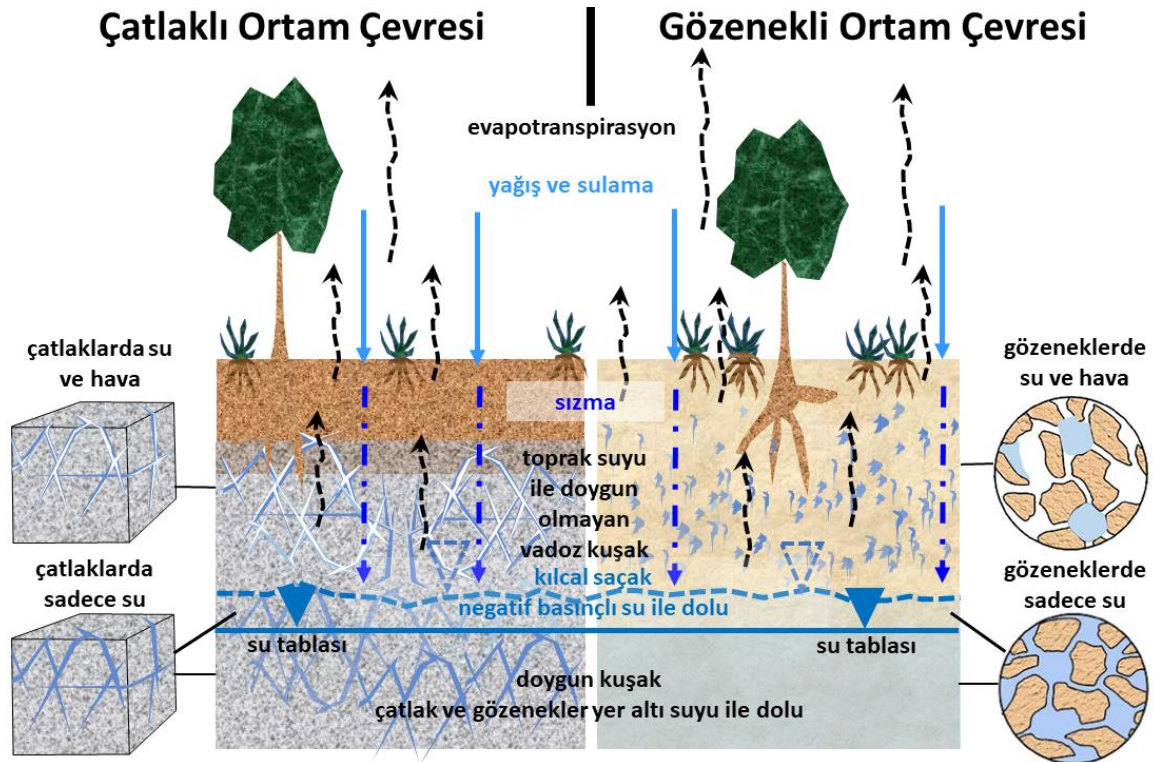
Şekil 9 – Geri çevrimli yağış: Yükselti metre olan bir topoğrafik haritanın üzerine yerleştirilmiş olarak a) renkler, karadaki buharlaşma kaynaklı yağışın tahmini oranını göstermektedir; ve b) okların boyu ve yönü, atmosferik buhar taşınımının büyüklük ve yönünü göstermektedir (van der Ent ve diğ., 2010).

4 Su Çevrimimizin Zemin Altı Kısım

Yer altı suyunun hidrolojik çevrimdeki rolünü incelemek için, Groundwater Project (GWP) kitaplarının çoğunun vakfedildiği hidrolojik çevrimin opak, anlaşılması zor, yer altı bölümünü düşünün.

4.1 Sığ Görünüm

Yağış, yer yüzeyinin altına hareket ettiğinde buna sızma denilmektedir (Şekil 10'daki koyu mavi aşağı doğru kesikli oklar). Şekil 10'da, solda çatlak bir ortamın çevresini ve sağda gözenekli bir ortam çevresi gösterilmektedir. Çatlaklı kayada su, çatlaklardan geçerken, gözenekli ortamda su, tanecikli parçacıklar arasındaki boşluklarda hareket etmektedir. Akış süreçleri her iki sistemde de aynıdır, ancak jeolojik malzemenin doğası farklıdır.



Şekil 10 - Doymamış bölgeden kılcal saçığa ve yer altı suyunu yeniden beslediği su tablasına sızmayı gösteren şematik. Doymamış bölgedeki su genellikle sızma olarak aşağıya (mavi oklar) veya evapotranspirasyon (siyah oklar) olarak yukarı doğru hareket eder, bu nedenle, yanal su hareketi görülebilen yerel alanlar olmasına rağmen akış genellikle tek boyutlu olarak düşünülür (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Kısa bir yağmur olayından gelen su, yalnızca sığ bir derinliğe sızar, ancak uzun, hafif yağmurlar daha derine sızar ve bazen su tablasına (Şekil 10'da dolu bir üçgenle işaretlenmiş düz yatay çizgi) ulaşarak yer altı suyunu beslenimi olur. Yanal su hareketinin yerel alanları bulunmasına rağmen, su tablasının üstündeki bölgede akış aslında tek boyutludur.

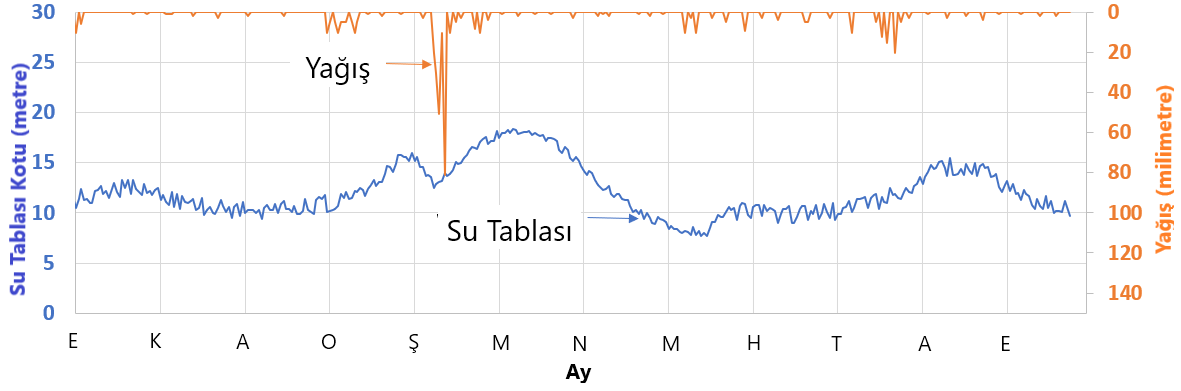
Su tablasının altında çatlaklar ve gözenekler suyla doludur ve su basıncı atmosferik basınçtan (pozitif bağıl basınç) daha yüksektir. Su tablasının aksine, gözenekler ve çatlaklar su ve hava karışımı ile doldurulur ve su basıncı atmosferik basınçtan (negatif bağıl basınç) daha düşüktür.

Kılcal saçak üzerindeki bölge doymamış bölge olarak adlandırılır çünkü toprak gözenekleri sadece kısmen su ile doludur; aynı zamanda vadoz bölgesi olarak da adlandırılır (Şekil 10). Yer altı malzemesi kaya veya kum da olsa (yani yüzeydeki topraktan farklı olabilir), vadoz bölgesindeki su, su tablasının altındaki doymuş bölgedeki yer altı suyundan ayırt etmek için genellikle toprak suyu olarak adlandırılır. Toprak suyu, Şekil 10'daki vadoz bölgesi boyunca mavi şekillerle gösterilmektedir. Vadoz bölgesindeki suyun negatif bağıl basıncı, kılcal kuvvetlerden kaynaklanmaktadır.

Su tablasının yakınında, kılcal kuvvetler, gözeneklerin ve kırıkların tamamen suyla dolu olduğu ancak su basıncının negatif olduğu kılcal bir saçak oluşturur (Şekil 10). Kılcal saçak, kum yataklarındaki gibi büyük gözeneklerde su tablasının birkaç on milimetre yukarısına ve kil yataklarındaki gibi küçük gözeneklerde veya kayalardaki küçük kıl çatlaklarında su tablasının birkaç metre yukarısına uzanır. Kılcal saçak yer altı suyu bölgesi gibi suya doymuş olsa da, suyun negatif basıncı nedeniyle doymamış bölgenin bir parçası olarak kabul edilir. Bu nedenle vadoz bölge terimi, kılcal saçakları kapsamaktadır.

Toprak su haznesi, kılcal kuvvetlerle daha fazla su tutulamayacak kadar dolduğunda, yerçekimi fazla suyu aşağı çekerek su tablasına ulaştırır. Sızan yağış yer altı suyu haznesini takviye ettiği için bu sürece yer altı suyu beslenimi denir. Yer altı suyu, yalnızca toprak suyu fazlası olduğunda ve olan yerlerde takviye edilir. Takviye edilen su, yavaş yavaş boşalma yerlerine doğru akarken yer altı suyu sisteminde depolanır.

Yer altı daha ıslak olduğunda kılcal kuvvetler daha az etkiye sahiptir, böylece sığ yer altı daha fazla nem içerdiğinde suyun su tablasına taşınması daha olasıdır. Dolayısıyla, yağışlı ve soğuk mevsimlerde veya sürekli yağmur veya kar erimesi görülen dönemlerde, sızan su, su tablasına ulaşabilir ve yer altı suyu haznesine eklenebilir. Şüphesiz, tüm yağmur olayları yer altı suyu haznesini takviye etmez; çoğu olay sadece vadoz bölgesini ıslatarak toprak su haznesini takviye eder ve bitki örtüsünün terlemesi ile tüketilir. Su tablasına ulaşan yer altı suyu beslenimin zamanlaması ve büyüklüğü, toprak özelliklerine ve su tablasının derinliğine ve ayrıca yağışın ardından su tablasının yükselmesiyle gösterildiği gibi yağış süresine ve şiddetine bağlıdır (Şekil 11).



Şekil 11 - Yağış ve su tablasının yükselme ve düşme zamanlamasına örnek. Yağış miktarı, daha büyük yağış olayların aşağıya doğru daha büyük sıçrama ile görülebilecek şekilde ters ekseninde gösterilmiştir. Su tablası yükselişi tipik olarak gecikmelidir (örnekteki durumda su tablasının yağış meydana geldikten yaklaşık bir ay sonra zirveye ulaştığına dikkat edin) ve yükselen su seviyeleri yağış olayından daha uzun sürelidir. Yerel pompalama gibi diğer faktörler su tablası yüksekliğini etkiler, bu nedenle büyük yağış olayları ile su tablası yüksekliği arasındaki korelasyon bire bir değildir (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Karadaki bitki örtüsü (karasal bitki örtüsü) su temini için vadoz bölge haznesini kullanır. Bitki kökleri, hava içerdiği için bu bölgeyi kaplar ve oksijen, kök solunumu için elzemdir (tıpkı nefes almamız gibi). Bitkiler, toprak suyunun bitkiye hareketini arttırmak için köklerindeki etkili su basıncını düşürerek toprak suyunu köklerine çekerler.

Kurak bölgelerde, sık yer altı suyu çoğu bitki türünün büyümesi için çok fazla tuz içerebilmektedir, bu nedenle bitki örtüsü yalnızca tuza dayanıklı bitki türlerinden oluşacaktır. Ayrıca, kurak bölgelerde, taban suyu bitkileri adı verilen bazı bitkiler, yer altı suyunu çekebilmek için köklerini yüzeyin yeterince altına kadar büyütürler. Taban suyu bitkilerine kavak, söğüt, okaliptüs ve Rus zeytin ağaçları; tuz sediri gibi çalılar; ve yonca gibi mahsuller örnek verilebilir. Taban suyu bitki kökleri genellikle 15 metreye kadar derinliklere uzanmaktadır, ancak bazı tuzlu sedir köklerinin Süveyş Kanalı boyunca 30 metre derinliğe kadar uzandığı bulunmuştur.

Bazı hayvan türlerinin bir kıtadan diğerine girişinin (örneğin İngiltere'den Avustralya'ya getirilen tavşanlar) aşırı bir ekolojik dengesizliğe neden olabileceği konusunda önemli bir farkındalık var. Ancak, yerli olmayan, yer altı suyu tüketen bitkilerin (örneğin Avustralya'dan okaliptüs ağaçları; Avrasya ve Afrika'dan tuz sediri) diğer kıtalardaki kuru bölgeler üzerindeki etkisine dair çok daha az farkındalık vardır. Bu tür bitkiler, yerli bitkileri ve tarımı etkileyen istenmeyen yer altı suyu tüketicileri haline gelebilir.

4.2 Daha Derin Görünüm

Sızan yağış su tablasına ulaştığında su tablası yükselir. Yerçekimi, yer altı suyunun Şekil 12'deki enine kesit yüzünde gösterildiği gibi su tablası yüksekliğinin daha yüksek olduğu konumlardan su tablasının daha alçak olduğu konumlara yanal olarak akmasına neden olur. Şekil 12'deki dikey yüzdeki kahverengi çerçeve, vadoz bölgeden geçen önceki bir boyutlu akışın görünümünü (Şekil 10), daha büyük, iki boyutlu bir uzamsal akış

örtüsüne yerleştirmektedir. Yer altı suyu akışı üç boyutlu biçimlerde gerçekleşir, ancak önce görselleştirmeyi ve anlatımı basitleştirmek için akışı iki boyutlu bir kesit olarak ele almaktayız.



Şekil 12 - Yer altı suyu sisteminin beslenimi gerçekleştikten sonra, eğimli su tablası suyu yanal olarak tepelerden derelere sızdığı vadilere doğru hareket ettirir. Ekli çerçeve, Şekil 10'daki tek boyutlu akışı daha geniş bir uzamsal bağlama yerleştirir (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

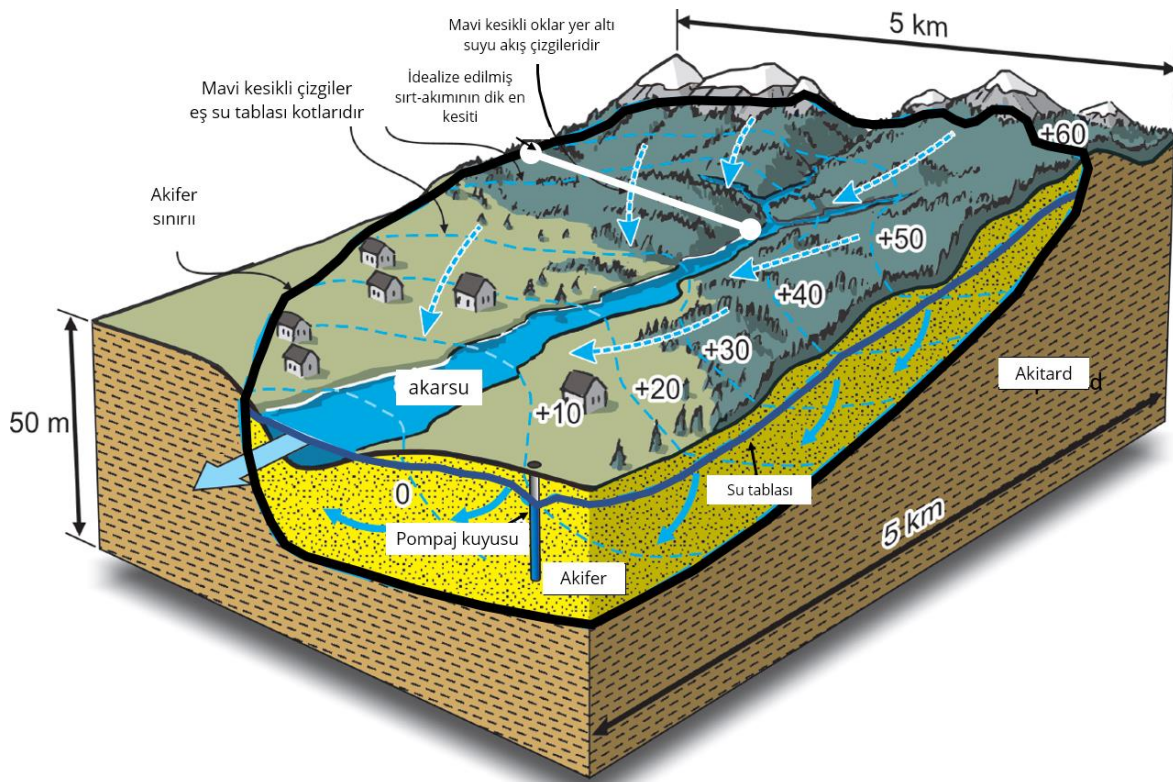
Su tablası, yaylaların altında daha yüksektir, çünkü yağış karaya daha yüksekten girmiştir ve yer altı suyu aşağıdaki yer altı suyu sistemine ve alçak bölgelere doğru akmaktadır. Yaylalardan boşalım alanına suyun akış hızı, beslenim (su tablasına sızan su) hızına, beslenim ve boşalım alanları arasındaki yükseklik farkına ve yer altı suyunun içinden aktığı toprak ve kayaların geçirgenliğine bağlıdır. Kuraklık varsa, suyun dereye doğru akması ve yüzeyden sızarak yeniden takviye edilememesi nedeniyle yaylalardaki su tablası düşer, böylece jeolojik birimlerin gözeneklerinde veya çatlaklarında biriken su serbest kalarak su tablasının düşmesine neden olur. Yayladaki su tablası düştüğünde, yer altı suyunun derelere doğru akış hızı yavaşlar, ancak su tablası dere yatağı yüzey seviyesinin altına inene kadar su dereye boşalmaya devam eder.

Bir piyezometre, uzunluğunun kısa bir bölümü boyunca yer altı suyu girişine açık olan küçük çaplı bir kuyudur. Piyezometredeki su yüzeyinin deniz seviyesine göre yüksekliği, suyun potansiyel enerjisinin bir ölçüsü olan hidrolik yük (genellikle sadece "yük" olarak anılır) olarak bilinmektedir.

Yer altı suyu, yüksek hidrolik yüklü (yüksek potansiyel enerji) noktalardan düşük hidrolik yüklü (düşük potansiyel enerji) noktalara doğru akar. Bir yayla altındaki su tablasını takviye eden su aşağıya ve ovalara doğru hareket ederken, hareket eden su ile akifer yapısı arasındaki sürtünmeden dolayı enerji kaybeder, bu nedenle potansiyel enerji

ısıya dönüştürülürken akış yolu boyunca hidrolik yük azalmaktadır ancak bu ısı ölçülemeyecek kadar küçük olmaktadır.

Şekil 12'de görülen ön yüzdeki akış sistemi, ortasındaki bir akarsu vadisinin solu ve sağındaki sırtlara dik bir kesit boyunca hareket eden akışı ile idealleştirilmiş bir enine kesiti temsil etmektedir. Su, yer yüzeyinden sızar ve su tablasına doğru süzülür, ardından aşağı, yanal ve yukarı akış bileşenlerinin kombinasyonları ile akarsuya boşalmak üzere yol bulur. Bu, "idealleştirilmiş" bir görünümüdür çünkü tüm akış çizim düzleminde meydana geliyormuş gibi görünmektedir. Yani akış, suyun yalnızca üst sınırdan girip çıkması ve sayfanın düzlemine girip buradan çıkmaması ile iki boyutludur. Doğal ortamlarda, yer altı suyu akışı Şekil 13'teki şemada gösterildiği gibi üç boyutludur. Şekil 13'teki mavi kesikli çizgiler eşit hidrolik yük noktalarını birbirine bağlar ve devamlı mavi oklar, hidrolik yük eğiminden aşağıya doğru hareket eden yer altı suyu akışını temsil eder. Kavramsal olarak, Şekil 12, Şekil 13'teki akıntıyı dik kesen kalın beyaz çizgiyi izlemektedir. Şekil 12, akışın sırt ve akarsuya dik olduğunu göstermesine rağmen, doğal bir sistemdeki akış Şekil 13'te gösterildiği gibi bunlara dik değildir. Yani akış bileşenleri, dağ eteklerindeki akışyukarısı alanlardan girer ve ovaların akışaşağısı alanlarından çıkar.



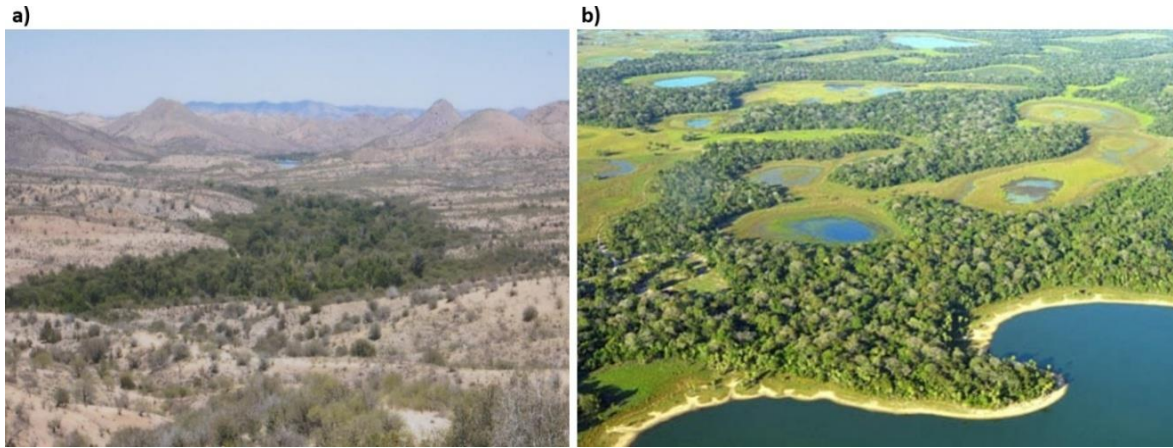
Şekil 13 - Yer altı suyu akışı, bir yer altı suyu havzasında gösterildiği şekliyle üç boyutludur (su tablası kalın koyu mavi bir çizgi ile gösterilmiştir, ince kesikli mavi çizgiler üç boyutlu olarak eş hidrolik yük eğrilerini ve kesikli mavi oklar yer altı suyu akış yönlerini göstermektedir). Şekil 12'deki iki boyutlu diyagram, kalın beyaz kesit çizgisiyle gösterildiği gibi sırt ve akarsuya dik olan bir enine kesitteki akışı temsil etmektedir. Şekil 12, sırttan akarsuya akışın genel örüntüsünü temsil etse de, üç boyutlu saha ortamında kesitin ön ve arka yüzlerine giren ve buradan çıkan akışı göz ardı etmektedir, dolayısıyla Şekil 12, idealize edilmiş bir yer altı suyu akış konseptidir (Rivera, 2014'ten uyarlanmıştır).

Tepelerden vadilere gelen bu yanal akış önemlidir. Bir vadideki su tablası, yaylalardakine göre yüzeye daha yakındır ve yüksek arazilerin altındaki su tablasında olduğu kadar yükselip alçalmaz, çünkü vadideki su tablası üstünde bulunan tüm yamaçtaki yer altı suyu beslenimi ile düzenlenir. Günlerce yağmur yağmazsa, tepeler kuruyabilir ancak yer altı suyu akışı nispeten yavaş olduğu için vadiler hâlâ yüksek arazilerden yer altı suyu alabilmektedirler. Kurak zamanlarda, günler, hatta yıllar öncesinde tepelerde görülen yer altı suyu beslenimi, hâlen vadilere doğru “yolda” olur. Böylece tepelerden vadilere yer altı sularının gecikmeli taşınması, vadilerin kurak zamanlarda su almasını sağlamaktadır.

Bu bakımdan, yer altı suyu sistemi bir banka hesabına benzer; su, tepelerin altında, vadilere yavaş bir "posta hizmeti" yoluyla sürekli olarak "nakit" gönderen ve “yerel müşterilerden nakit” alamadığı zaman vadiye ulaşan "bir hesaptaki para" olarak depolanmaktadır. Böylelikle vadinin sıkıntılı dönemlere hazır olabilmek üzere sabit bir geliri vardır. Bu, vadilerdeki ağaçların, uzun kurak mevsime sahip yerlerde bulunan tepelerdeki ağaçlardan daha büyük ve daha sağlıklı olmasının nedenlerinden biridir.

Yer Altı Suyunun Araziyle Bağlantısı

Su tablasının derinliği, tepeden vadiye yamaçlar boyunca farklı konumlarda bulunan farklı bitki türlerinden kısmen sorumludur, çünkü kuraklığa dayanıklı bitkiler sadece kurak bölgelerdeki tepelerde, suya toleranslı bitkiler akarsuların yakınında yaşayabilirler (Şekil 14). Kurak iklimlerdeki ova boşalım alanlarında, buharlaşma ile su atmosfere kaybedilerek tuz birikmesi meydana gelmektedir. Bu tür ortamlarda tuza dayanıklı bir bitki örtüsü gelişmektedir.



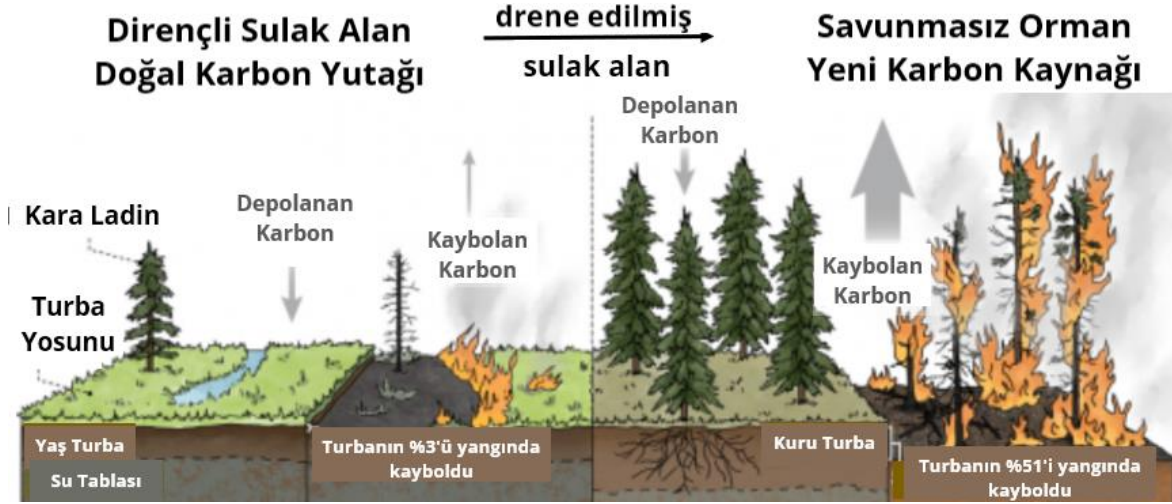
Şekil 14 - Su tablasının derinliği, bir yerde büyüyen bitki örtüsü türlerini etkileyebilir. a) Arizona, Amerika Birleşik Devletleri (soldaki resim) gibi su sıkıntısı olan bir çevrede ağaçlar, su tablasının sığ olduğu akarsu koridoru boyunca büyürken, su tablasının bitki köklerinin ulaşamayacağı kadar derinde olan tepelerde çöl çalıları ve çayır yetişir (The Old Pueblo, 2014). b) Brezilya'daki Mato Grosso do Sul'da bulunan Pantanal sulak alanları gibi suyun çok fazla olduğu yerlerde ağaçlar su tablasının üstündeki, oksijen bakımından zengin, doymamış bölgede köklerinin büyümeye yer olduğu tepelerde bulunur; diğer yandan göl kıyıların yakınında, yer altı suyu tablası yer yüzeyine o kadar yakın ki, ağaç kökleri toprağın gözeneklerinde hava yok denecek kadar az olduğu için yeterli oksijen alamazlar (Wikimapia, 2020. "Pantanal Mato-Grossense Milli Park" Wikimapia'dan CC BY 4.0 lisansıyla).

Su tablası altımızda her yerde bulunur ve insanlar arazi şeklini, bitki örtüsünü değiştirdiğinde veya tarım ve inşaat için yer altı suyunu maksatlı çektiğinde, su tablasına olan derinliği değiştirmiş oluruz. Bu genellikle insanlar ve ekolojik sistemler için sorunlu sonuçlara yol açmaktadır. Ancak eylemlerimize ilişkin bilinçli kararlar vermek için değişiklikler yapmadan önce sonuçları tahmin edebiliriz. Öngörülen sonuçlara bağlı olarak, devam etmemeye karar verebilir veya olumsuz etkileri azaltmak için değişiklikleri yeniden planlayabiliriz.

Su tablasının derinliği, arazinin ısıya nasıl tepki vereceği üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilir. Örneğin, okaliptüs ağaçlarının doğal bitki örtüsü olduğu Avustralya'nın sıcak ve kuru alanlarında, su tablasının doğal konumu, okaliptüs ağaçlarının ürün ekimi için temizlenmesinden sonra kara yüzeyinin altında daha derindedir. Bunun nedeni, ağaçların sızan suyu yakalayarak toprak nemini tüketmesi ve bunun da en düşük yer altı suyu beslenimi ile sonuçlanmasıdır. Ağaçlar temizlendikten sonra ürünler daha az yer altı suyu tüketir, bu nedenle yer altı suyu beslenimi artar ve su tablası yükselir. Su tablası yer yüzeyine yakın olduğunda, su buharlaşarak çözünmüş maddeler arta kalır, toprakta biriken tuz çökeltileri oluşur ve dolayısıyla toprağı ekinlere uygunsuz hale getirir. Toprak tuzlanması, tüm dünyada her yıl ekili alan kaybının bir nedenidir. Tuzlanmayı önlemek için arazi kullanımının yönetimi, birçok tarım bölgesinde tarımsal üretkenlik bakımından önemlidir.

Su tablası derinliğinin peyzajı etkilemesine bir başka örnek, Elbein (2019) tarafından Pulitzer Ödülü kazanan National Geographic makalesi "Fidan Dikme Programları Yarardan Çok Zarar Verebilir" adlı makalesinde açıkladığı gibi orman yangınlarıdır. Sulak alanlardaki sığ su tablasının, normal orman yangınları ile büyük yıkıma neden olan yangın felaketleri arasındaki farkı yaratabileceğini açıklıyor. Kanada'nın Alberta kentinde 2016 yılında meydana gelen ve Kanada tarihinin en pahalıya mal olan orman yangını olan Fort McMurray orman yangınında durum buydu. Turbalık olarak bilinen bir tür sulak alan olan yosunlu bataklıklar, kuzey Kanada ve Rusya'nın çok geniş bir bölümünü kaplar. Turba, yosun gibi kısmen çürümüş organik maddelerden oluşmaktadır. Turbalıklar, binlerce yıl boyunca yavaş yavaş atmosferden ayrılan büyük miktarlarda karbon içermektedir. Turba oluştukça, tipik ağaçların (Alberta örneğinde kara ladin) daha azını destekler. Daha az ağaçla, daha fazla beslenme suyu su tablasına ulaşır, böylece su tablası yüzeye yaklaşır. Sığ su tablası, orman yangınlarından sonra turbalıkların daha çabuk toparlanmasına yol açar. Turbalıklar genellikle az şiddetli yangınlarla karşılaşır ve yangın sırasında kaybedilen karbonu nispeten kısa bir süre içinde geri kazanabilirler çünkü sığ su tablası, yangının turbanın derinliklerinde yanmasını önler. Fort McMurray bölgesinde bir ladin ormanı oluşturmak amacıyla turbalıklar kurutulduğunda, çevresel bir ayarlama meydana gelmiş oldu: Kara ladin ağaçları daha çok su kullanmıştı, su tablası düşmüştü, daha sığ turbanın yerini daha kuru bir yosun türü almıştı (yangın geciktirici yerine çıra gelmiş oldu), büyük ağaçlar büyük bir yakıt deposu haline gelmişti ve ardından Fort McMurray orman yangını

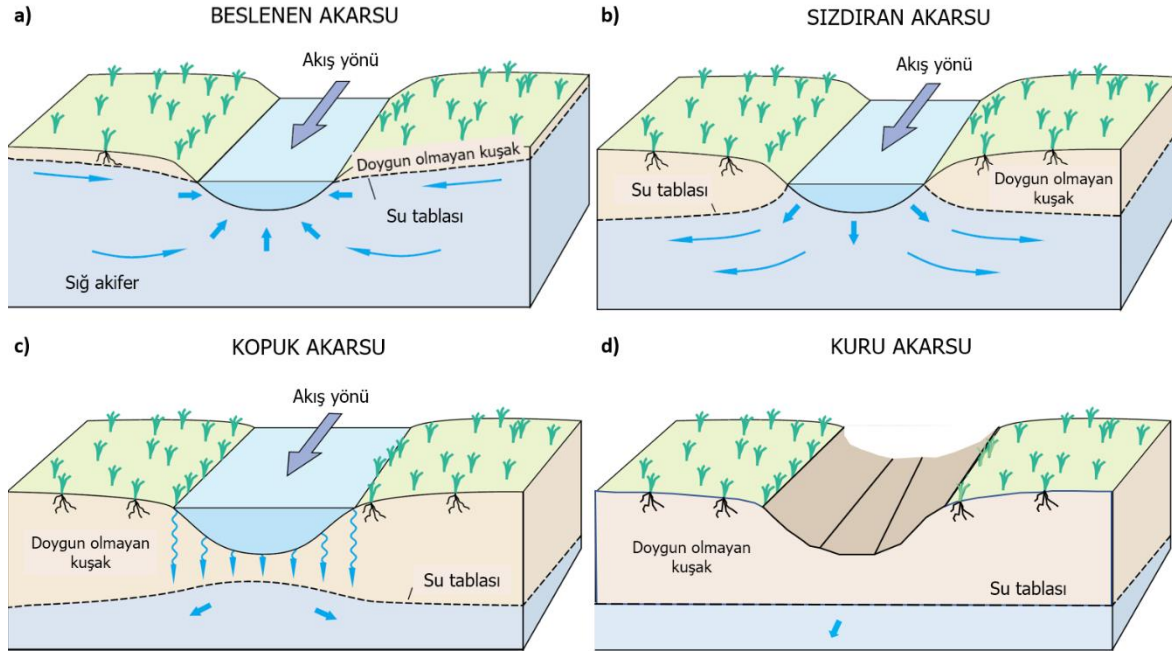
ortaya çıkmıştı. Şiddetli şekilde yanan turbalıklar, yangından atmosfere salınan karbonun geri kazanılması için uzun süreler gerektirir (Şekil 15). Basın, sığ yer altı suyu akış sistemine insan müdahalesinin olayda kilit bir rol oynadığını fark etmeden, bu yangını iklim değişikliğiyle ilgili aşırı doğa olaylarına bağladı.



Şekil 15 - Bilim adamları, 2016 Fort McMurray yangınından sonra araziye incelediler ve insanların siyah ladin ormanı dikebilmek amacıyla turbalıkların altındaki su tablasının düşürüldüğü alanda, yangının daha şiddetli olduğunu, daha derinlerin yandığını ve böylelikle depolanması binlerce yıl zaman alan karbon kayıplarına neden olduğunu keşfettiler (Elbein, 2019'ı esas alarak; resim Wilkinson, 2018).

Yer Altı Suyunun Akarsularla Bağlantısı

Tepelerin altındaki su tablası akarsulardaki veya akarsuların altındaki su seviyesinden daha yüksekse yer altı suyunun yüksek araziden alçak arazilere hareketi devam eder. Yer altı suyu alan akarsu kesimlerine beslenen akarsular denir (Şekil 16a). Akarsu akışıyla yüzen bir salcının bakış açısından görülebileceği gibi, beslenen akarsular, akarsuyun aşağısına doğru mesafeyle orantılı artan hacimde su taşır (genişleyerek ve/veya derinleşerek ve/veya daha hızlı akarak). Bu, yer altı suyunun yüzeye boşalımının birincil mekanizmasıdır. Yer altı suyu sisteminden bir akarsuya giren su, akarsuyun baz akışını devam ettirir. Su tablasının akarsudaki su yüzeyi yükseltisinden daha derin olduğu yerlerde, su akarsudan yer altına akar. Suyun yer altına sızdığı akarsu kesimlerine sızdıran akarsular adı verilir (Şekil 16b ve c). Akıntı ile yüzen bir salcı bakış açısından sızdıran akarsuların akışaşağısı mesafeyle akışı azalır (sığlaşır ve/veya daralır ve/veya daha yavaş akar) ve sonunda kuru bir nehir yatağı haline gelebilir (Şekil 16d). Amerika Birleşik Devletleri'nin güneybatısındaki kuru vadilerdeki gibi bazı dönemlerde kuruyan akarsulara kesikli ya da mevsimsel akarsular denir. Yeterli yer altı suyu depolayacak kadar beslenim olduğu için kuru dönemler boyunca akarsuya çıkış akımın desteklendiği, dolayısıyla esas olarak her zaman beslenen akarsulara sürekli akarsular denir.



Şekil 16 - a) beslenen, b) sızdıran, c) kopuk-sızdıran ve d) kuru akarsulara ait çizimler (Winter ve diğ., 1998'den uyarlanmıştır).

Akarsularda akan sular, katkıda bulunan aşağıdaki bileşenlerin bir kombinasyonudur:

- arazi üzerinden akan yağış;
- su tablasının üzerindeki geçici olarak doymuş toprak bölgelerinden akan sızma (yüzeyaltı akış veya hızlı akış olarak adlandırılır);
- yer altı suyu boşalımı; ve,
- insan faaliyeti (esas olarak yağmur suyu kanalizasyonlarından, endüstrilerdeki ve su arıtma tesislerindeki noktasal deşarjlardan ve tarımsal drenajdan akış).

Akarsulara yer altı suyu boşalımı, yağmursuz günler ve aylar boyunca akarsuların kurumamasına neden olmaktadır. Uzun zaman önce akarsudan uzakta meydana gelmiş olan yer altı suyu beslenimi, yavaş ve sürekli bir şekilde dereye doğru aktığı için bu akış devam etmektedir.

Akarsu akışının doğal bileşenlerinin oranları yerel iklime ve jeolojiye bağlı olarak değişse de, küresel ölçekte nehirlerde akan suyun yaklaşık yarısı, kalıcı olarak doymuş yer altı suyu sistemi üzerinden nehre boşalan uzun vadeli akıştan gelmektedir ve diğer yarısı yüzey üzerinden ya da geçici doymuş tabakalardan geçen yağışın yüzey akışından kaynaklanmaktadır. Yüzey akışın bir kısmı yer yüzeyi üzerinde meydana gelmektedir, gerçi çoğu yüzey akış, genellikle vadoz bölgesinde düşük geçirgenlikli katmanlar üzerinde tünemiş geçici doymuş bölgelerde başlatılmak suretiyle sığ yer altından akmaktadır. Akarsu yakınındaki kılcal saçak bölgesi, sızma saçağa ulaştığında bir yüzeyaltı akış bileşeni sağlayabilir. Böylelikle, bölgedeki negatif su basıncı durumu pozitif basınç olarak değişir.

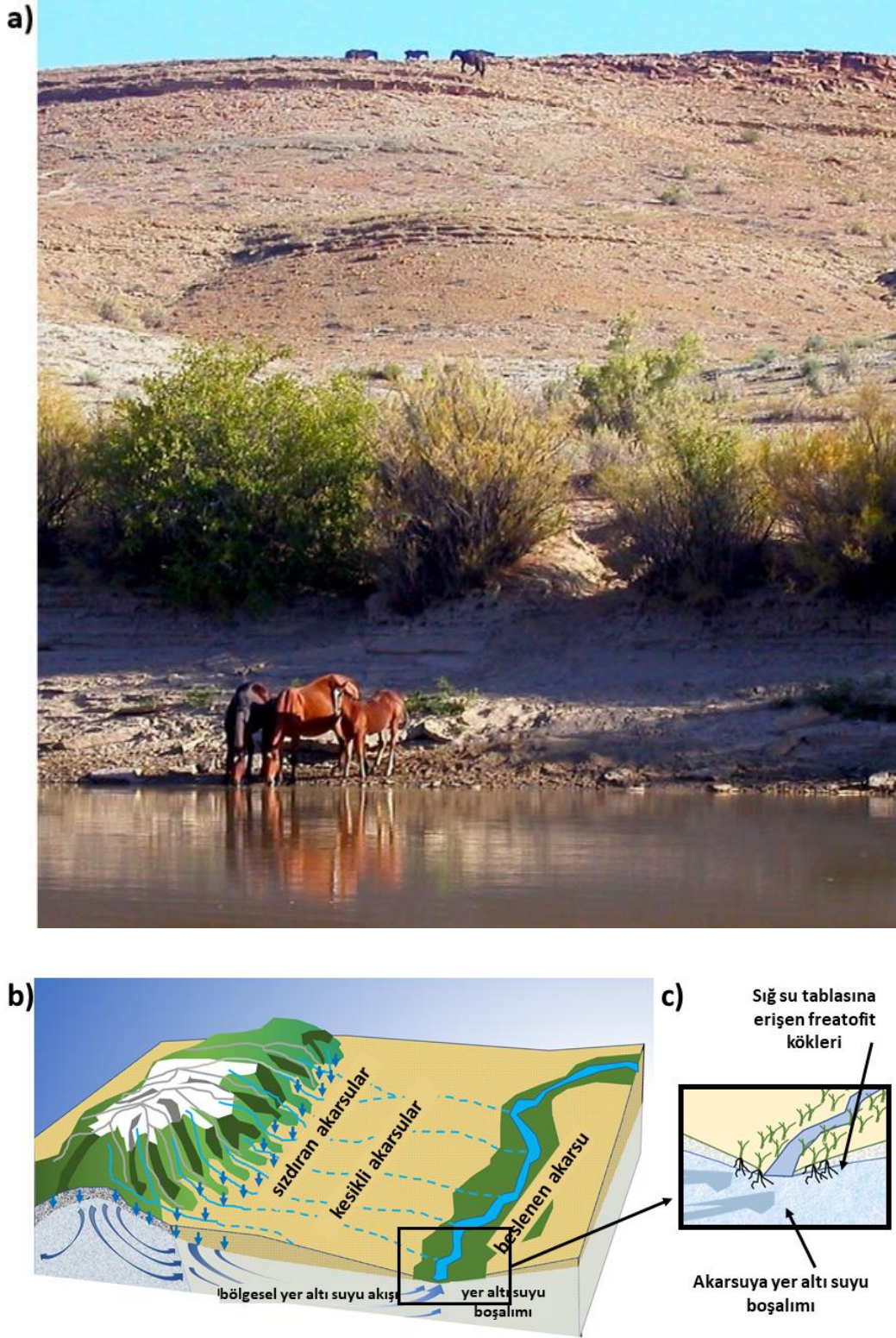
Bu durumda kılcal saçakta tutulan su mobilize olur ve su hızla akarsuya doğru hareket eder. Bu olay, kılcal saçak etkisi olarak bilinir.

Akış mecralarındaki su hareketinin bazı hidrologlar tarafından yüzey akışı olarak isimlendirildiğini belirtmekte yarar vardır, ancak biz bu akışa akarsu akışı (boşalım ya da deşarjı) derken, yüzey akış terimi, yağış akışın ya yer yüzeyinden akarak ya da geçici doygun zemin katmanlarından geçerek akarsulara doğru yol alan sular için ayrılmıştır.

Bir akarsu parçası, Şekil 16'da gösterildiği gibi, bir günde veya bir mevsimde beslenen, bir diğerinde sızdıran olabilir; bunların tümü akarsu ile çevresindeki su tablası arasındaki görece su seviyesine bağlı olmaktadır. Şartlar, bir akarsuyun uzunluğu boyunca birçok kez beslenen ve sızdıran arasında değişebilir. Akarsu üzerindeki bir konumda akan su iki koşula bağlıdır. Birincisi, alanın akışyukarısı kısımlarında belki de günler önce meydana gelen, akarsu tarafından akaçlanarak akarsuya doğru akan ve sonra akarsu kanalı boyunca akan, alanın akışyukarısı kısımlarında meydana gelen yağış ve/veya kar erimesine bağlıdır. İkincisi, doğrudan akarsuyun altındaki su tablasının seviyesine bağlıdır. Akarsuyun altındaki su tablası, kuvvetli yer altı suyu akışı nedeniyle yüksek olabilir veya kuraklık ya da akarsuyun yakınındaki freatofitlerin yoğun kullanımı nedeniyle düşmüş olabilir. Bu nedenle, akarsu yakınında, akarsuyun ve su tablasının yükseklikleri, hem yerel hem de uzaktaki hava, iklim, bitki örtüsü ve araziye bağlı olarak farklı nedenlerle ve farklı hızlarla yükselip alçalabilir.

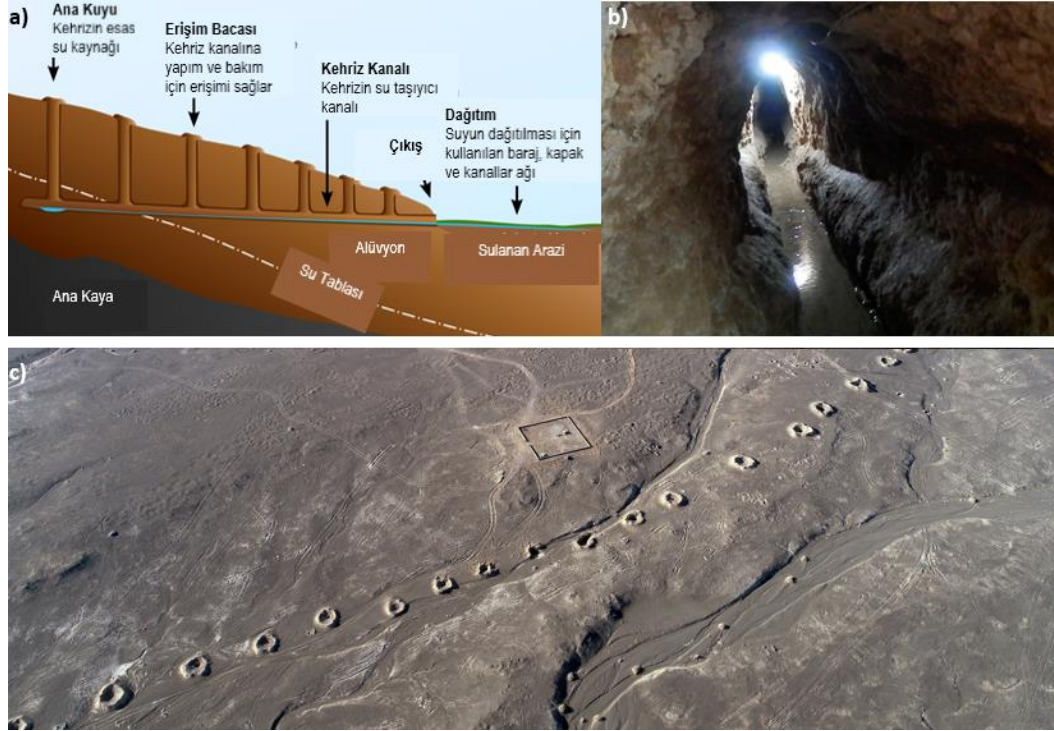
Yer altı suyu ve yüzey suyu kütleleri arasındaki sürekli, dinamik ve iki yönlü alışveriş, yer altı suyu ile yüzey suyu arasındaki yakın bağlantıyı göstermektedir. Bir anda bir su molekülü yer altı suyu haznesine ait iken, daha sonraki anda sadece yer altı suyuna dönmek üzere tekrar yüzey suyu haznesine ait olmaktadır. Bu yer altı suyu – yüzey suyu sürekliliğinin kavranması, su kaynaklarımızın yönetimi açısından önemlidir.

Sızdıran akarsular, yer altı suyu haznesinin takviye edilmesinde kurak havzalarda önemli bir rol oynamaktadır. Yeryüzünün birçok kurak bölgesinde, çevredeki dağlar vadilerden daha fazla yağış alarak dağdaki derelere su sağlanır. Yüksek arazideki dere yatakları genellikle su tablasından daha yukarıdadır. Bu dereler, dağların dışına ve dağ eteğine yakın kuru vadi tabanındaki çökeller üzerinden akarken, sularını kaybederler ve böylece Şekil 17'de gösterildiği gibi yer altı suyunu beslerler. Kuru vadi yüzeylerindeki yağış eksikliği, yer altı suyunu bu bölgelerde değerli kılmaktadır. Bu kuru vadilerdeki sığ su tablası, Şekil 17'de gösterildiği gibi beslenen akarsulara neden olmanın yanı sıra başka türlü mümkün olamayacak bitki ve hayvan yaşamını desteklemektedir.



Şekil 17 - Kuru vadilerdeki sığ su tablası, uzak yaylalarda beslenen yer altı suyunun boşalımının sonucudur. Bu boşalım, başka türlü imkânsız olan bitki ve hayvan yaşamını destekler: a) tuzlu sedir, suyu doğrudan nehrin yakınındaki sığ su tablasından çekecek kadar derine kök salar ve yaban atlar, Amerika Birleşik Devletleri Utah'taki Green River nehrine bölgesel yer altı suyu boşalımı sayesinde hayatta kalabilirler (fotoğraf Leitz, 2009); b) dağ eteklerinin yakınındaki sızdıran akarsular, bu kurak bölgedeki nehrin boşalmak üzere uzun mesafeler akan yer altı suyu sistemini beslenimle takviye eder; ve c) nehrin yakınındaki sığ su tablasının, taban suyu bitki kökleri tarafından çekildiğini gösteren çizim (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Kurak bölgelerdeki insanlar, suyu çöl ovalarına getirmek ve tarıma dayalı büyük, serpilten medeniyetler geliştirmek için uzun, düşük eğimli tünellerle dağlara şaftlar kazarak eski zamanlardan beri bu tür yer altı suyu kaynaklarına erişmişlerdir (Şekil 18). Qanat veya kehriz olarak bilinen bu yapılar ilk olarak yaklaşık 3000 yıl önce Ortadoğu’da oluşturuldu.

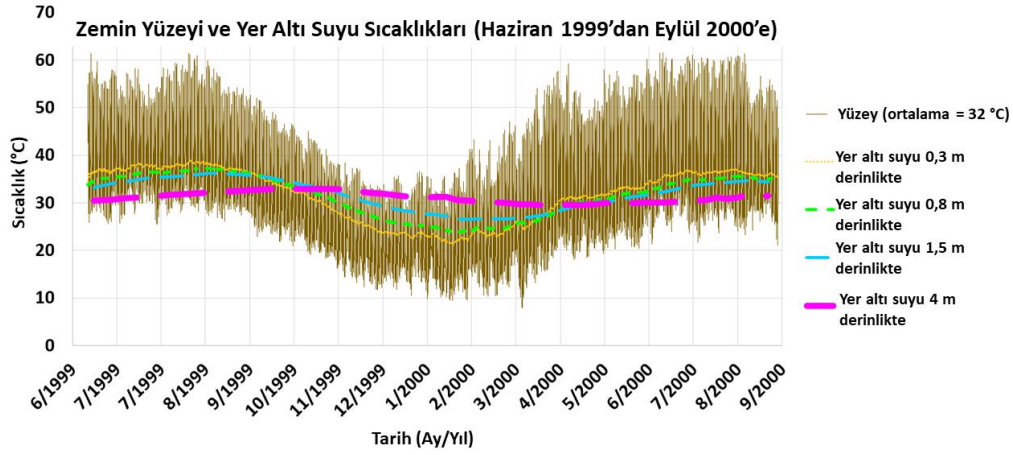


Şekil 18 – Kadim kültürler, dağlardan çöle suyu getirmek için kehrizleri (qanat’ları) inşa etmişler: a) Qanat çizimi (Bailey, 2009. “Tipik bir kehrizin bir en kesiti” Samuel Bailey’den CC BY 3.0 lisansı; b) bir kehriz içerisinden fotoğraf (Naeinsun, 2012. “İsfahan, İran yakınlarında bir kehriz tüneli” Naeinsun’dan CC BY-SA 3.0 lisansı); ve c) Sincan, Çin’de kehriz sistemi (panoramastock.com, 2020).

Bazı yerlerde insanlar suyu çoğunlukla sulama için doğrudan akarsulardan yönlendirirler. Su, sızdıran bir akarsudan yönlendirildiğinde, insan müdahalesi, yeraltı suyu sisteminin akarsudan alacağı beslenimden yoksun bırakır.

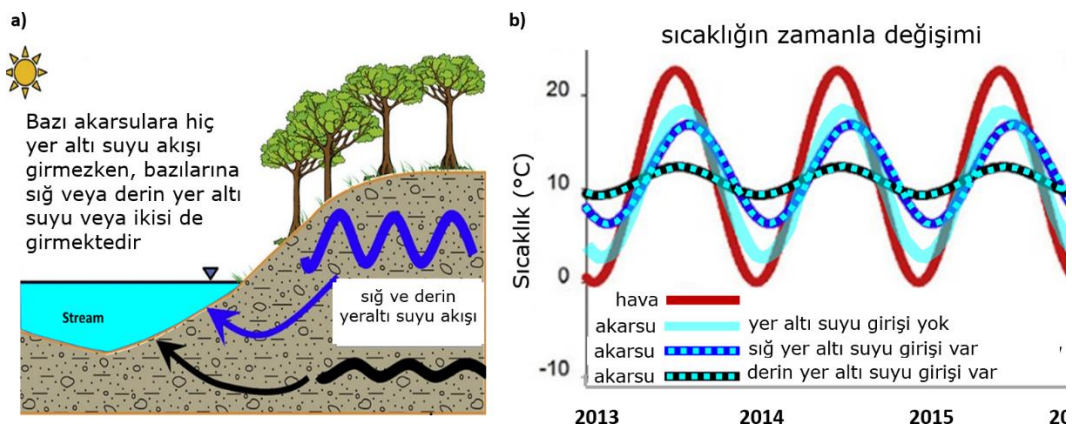
Akarsu Sıcaklığının Yer altı Suyu İle Ayarlanması

Akarsulara yer altı suyu beslemesinin gecikmeli gelişi, dünyadaki beslenen akarsular için güvenilir bir su kaynağı sağlamaktadır. Bu, sucül ekosistemlerin sağlığı açısından önemlidir, çünkü birçok hayvan türü için besin zincirinin temelini oluşturan balıklar ve sucül bitkiler, yağmur kesilir kesilmez kuru akacak olan bir akarsuda yaşayamazlar. Yer altı suyunun akarsulara kararlı olarak sızması da akarsu sıcaklığını düzenler, çünkü yer altı suyu atmosferin günlük (ve mevsimsel) ısınması ve soğumasından yalıtılmıştır. Sonuç olarak, Şekil 19’da gösterildiği gibi sıcaklığı, yüzey sıcaklığı kadar değişmemektedir.



Şekil 19 - Sığ yer altı suyu sıcaklığı mevsimsel olarak değişmektedir, ancak yüzey sıcaklığı kadar değil. Sıcaklıktaki değişimin büyüklüğü derinlikle azalmaktadır. Ayrıca, derinlikle (sarıdan yeşile, maviye ve pembe, her biri daha uzun çizgilerle), yer altı suyunun sıcaklık tepesi ve dipleri, tepesi ve dip yüzey sıcaklıklarından daha büyük gecikme göstermektedir. Orta derinliklerde (örneğin 4 metre, kalın, pembe) yer altı suyu sıcaklığı, yüzeydeki ortalama yıllık sıcaklığına yakın bir değerde epey sabittir (bu konumda 32 °C). Genellikle, yaklaşık 10 metreden daha derindeki yer altı suyunun sıcaklığı, ortalama yüzey sıcaklığından daha yüksektir çünkü yeryüzünün çekirdeğinden yayılan jeotermal enerji tarafından ısınır (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

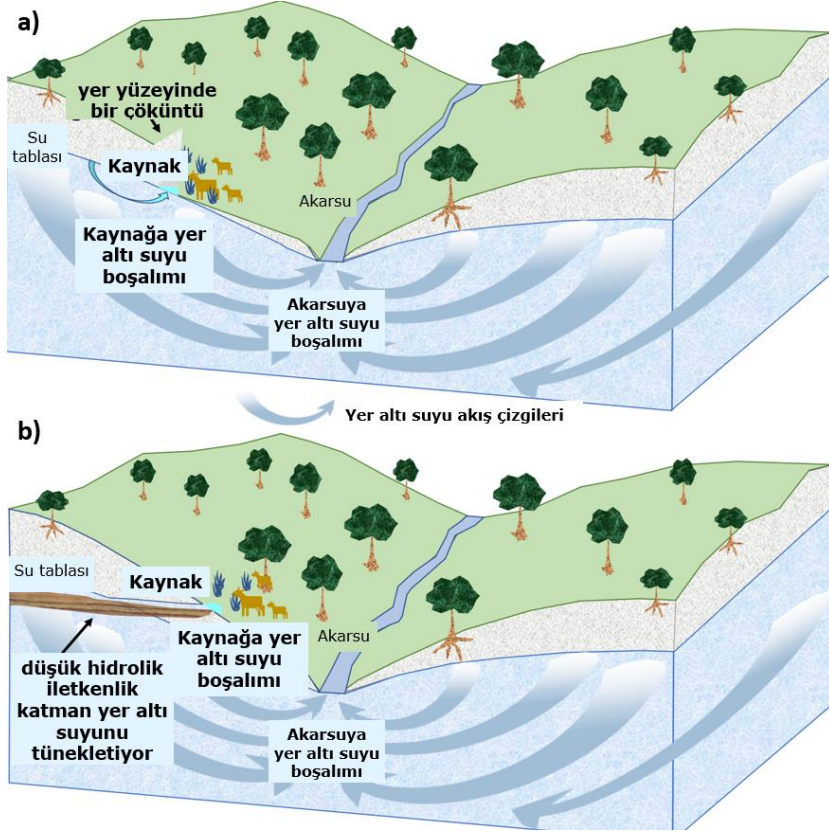
Bu nedenle, bir dereye boşalan yer altı suyu, Şekil 20'de gösterildiği gibi yazın dere suyundan daha soğuk ve kışın daha sıcaktır. Dere altındaki daha sıcak yer altı suyu, dere tabanının donmasını önler. Tekrardan, bu durum, sadece dar bir sıcaklık aralığında hayatta kalabilen çoğu balık ve diğer su canlısı için önemlidir. Bir akarsu veya gölün tabanından sızan yer altı suyu oksijen içerebilir ve dolayısıyla balıkların yumurta bırakması için elverişli olabilir veya su oksijenden yoksun (anoksik) ve dolayısıyla balıklar için elverişsiz olabilir. Toprak sıkılaştırma, asfaltlama veya organik atıkların bertarafı gibi beslenme alanlarındaki arazi kullanım değişiklikleri nedeniyle anoksik koşullar gelişebilir.



Şekil 20 – Hava, akarsu ve yer altı suyu sıcaklığı ilişkisinin bir çizimi: a) bazı akarsular yer altı suyu akışı almaz, diğerleri sığ yer altı suyu girişi veya derin yer altı suyu akışı veya her ikisini birden alır; b) hava sıcaklığındaki dalgalanmanın (kırmızı), su sıcaklıklarına göre daha aşırı olduğu görülür; yer altı suyunu almayan bir akarsuda ortam hava sıcaklıklarına göre daha yumuşak bir sıcaklık dalgalanması (açık mavi) olur, sığ yer altı suyu girişi alan bir akarsu daha bastırılmış sıcaklık dalgalanmaları (kesikli açık ve koyu mavi) ve en bastırılmış sıcaklık dalgalanmaları (kesikli açık mavi ve siyah), derin yer altı sularını alan bir akarsuda görülür (Briggs ve diğ., 2018'den uyarlanmıştır).

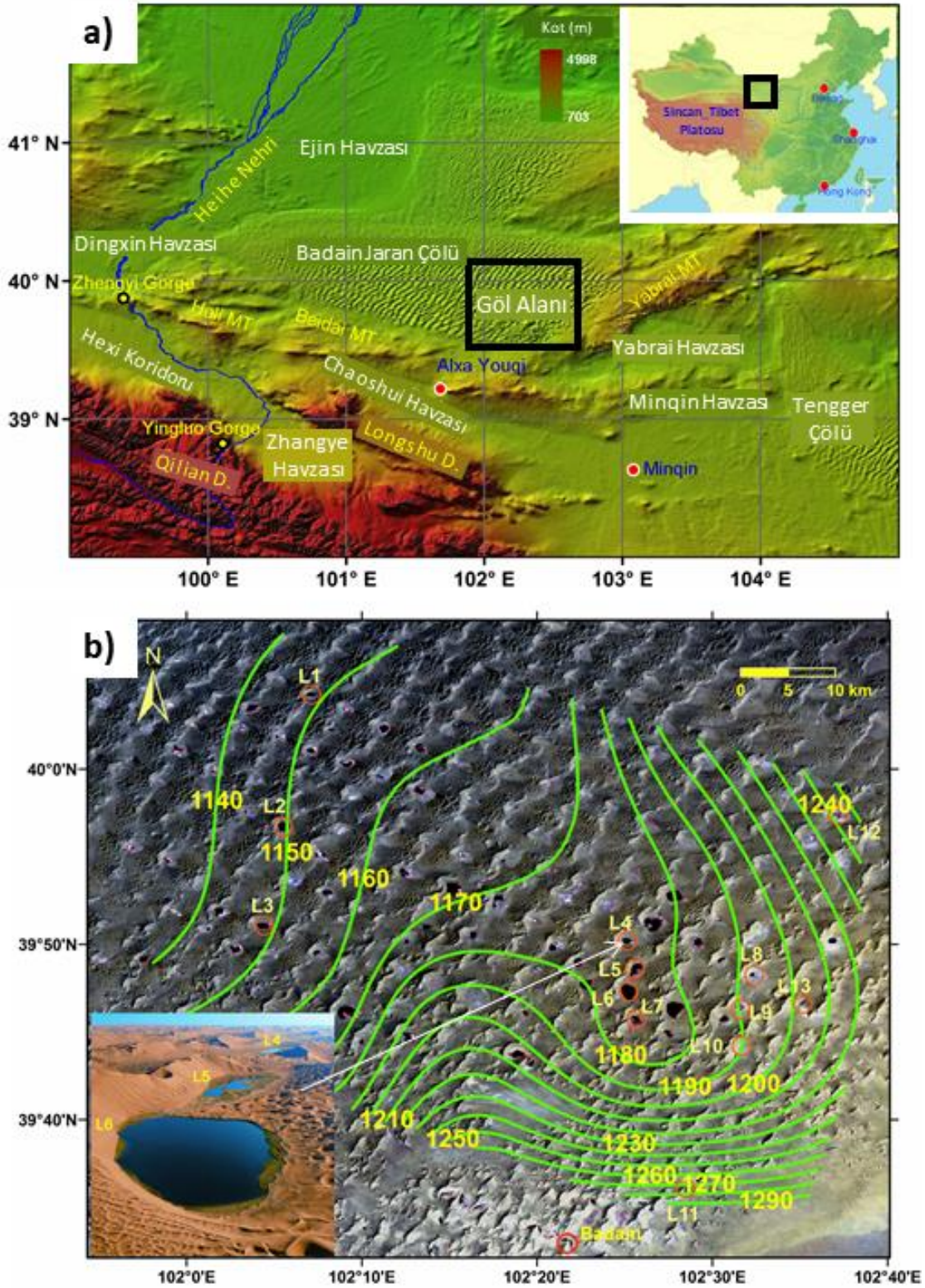
Yer Altı Suyunun Kaynaklarla Bağlantısı

Kaynaklar, yer altı sularının boşalmasıyla beslenir. Su tablasının zemin yüzeyiyle kesiştiği yerde meydana gelirler. Şekil 21a'da gösterildiği gibi su tablasını kesen bir yamaç boyunca yer yüzeyindeki bir çöküntüde oluşabilirler veya Şekil 21b'de gösterildiği gibi, daha düşük geçirgenliğe sahip bir jeolojik birimin yer altı suyu tablasının üstündeki suyu tünediği (kısırdığı) bir yerde meydana gelebilirler.



Şekil 21 - Kaynaklar, su tablasının yer yüzeyiyle kesiştiği yerde meydana gelir: a) yüzey topografyasındaki bir çukurda; veya, b) yer altı suyunun üzerinde tünediği bir jeolojik formasyonun yüzeyde yüzlek verdiği yerde (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Kaynaklar, insanlık tarihinin önemli bir parçası olmuştur ve bugün su kaynakları yüz milyondan fazla insana ve suyu şişeleyen işletmelere içme suyu sağlamaktadır. Büyük kaynaklar, erken Roma'nın su kemerlerine su sağlamaktaydı ve bugün halen Roma'nın suyunu sağlamaktalar. Vahalar (çöl pınarları), Çin ve Avrupa arasındaki İpek Yolu ticaret rotasının büyük bir kısmı boyunca suyun kaynağıydı. Kuzey İpek Yolu, Çin'deki Badain Jaran Çölünden (dünyanın 4. büyük çölü) geçmekteydi ve bugün bile, 100'den fazla yer altı suyu beslemeli göl, dünyanın en büyük kumulları içinde yer alan kaynaklardır (Şekil 22 ve Şekil 23). Bu göller çöldeki yaşamsal vahaları ve ekolojii sürdürmekteler. Benzer şekilde, Doğu Afrika'nın Büyük Rift Vadilerine doğru uzun mesafelerle yakınsayan ve kaynak olarak boşalan yer altı suları, yüzyıllar süren kuraklıklara rağmen erken dönem insan atalarının toplumları için yaşam destek sistemi olarak varsayıldı.

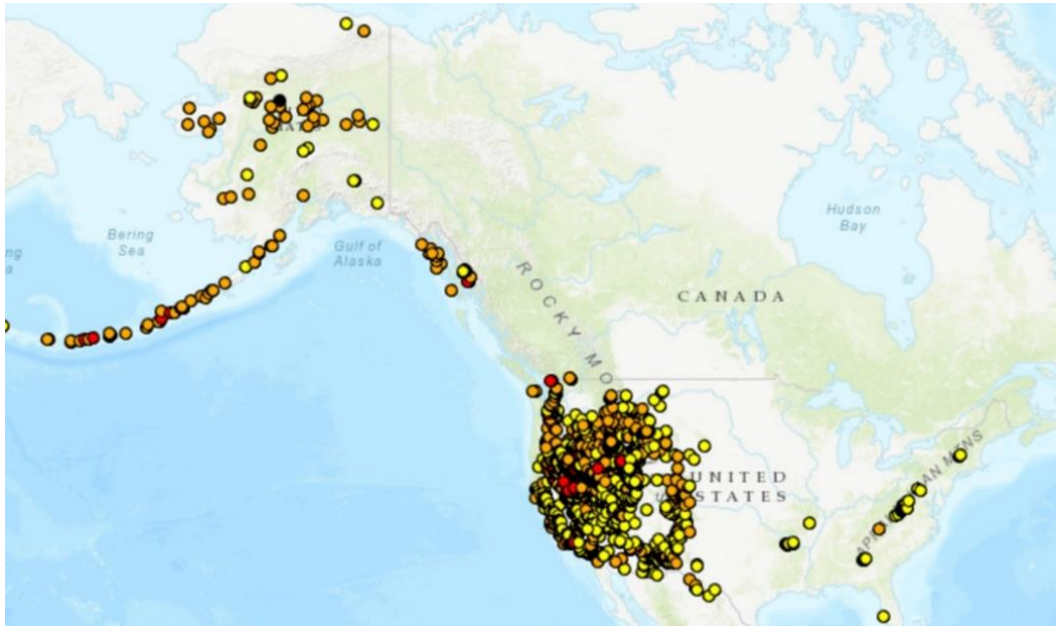


Şekil 22 - Yer altı suyu kaynakları, Çin'in Badain Jaran Çölü'nde dünyanın en yüksek kumulları arasında göller oluşturur. Bu göller tatlı sudan aşırı tuzluya kadar çeşitlilik gösterir ve çöldeki hayati vahaları ve ekolojii sürdürmektedirler. a) Badain Jaran Çölü ve göl alanının konumu (Jiao, 2015); (b) 24 Mayıs 2003 tarihinde çöldeki göllerin çoğunu kapsayan bölgenin Landsat Tematik Haritasından, ICESat (Buz, Bulut ve arazi yükselti uydusu)'tan tahmin edilen 10 m'lik yer altı suyu eş seviye eğrileri ile birlikte görüntüsü (Jiao, 2015)



Şekil 23 - Çin'deki Badain Jaran Çölündeki kum tepelerinin arasındaki göllerden birinin fotoğrafı (Jiao, 2017).

Bazı kaynakların boşalımı, aynı yerdeki diğer yüzey sularından çok daha sıcaktır. Bu termal kaynaklardaki yer altı suyu, ya volkanik aktivite ile ilişkili erimiş yer altı kayası ya da yeryüzünün soğutma çekirdeğinden yüzeyine iletilen ısı ile ısınan derin kayalar tarafından ısıtıldığı bir derinliğe akar. Isındıkça suyun yoğunluğu azalır, bu nedenle su yükselir ve yüzeye ulaştığında bir sıcak kaynak (kaplıca) olarak tezahür eder. Kaplıcalar, Şekil 24'te gösterildiği gibi Kuzey Amerika'nın tektonik olarak aktif batı kesimlerinde sıkça görülmelerinin gösterdiği gibi genellikle jeolojik olarak yakın zamanda meydana gelen magmatik aktivitenin yakınında bulunur.



Şekil 24 - Termal kaynaklar genellikle, Kuzey Amerika'daki termal kaynakların bu Google Earth haritasında gösterildiği gibi, jeolojik olarak yakın zamanda ortaya çıkan magmatik aktivitenin yakınında meydana gelir (harita USNOAA, 2019'dan; veri Berry ve diğ., 1980'den).

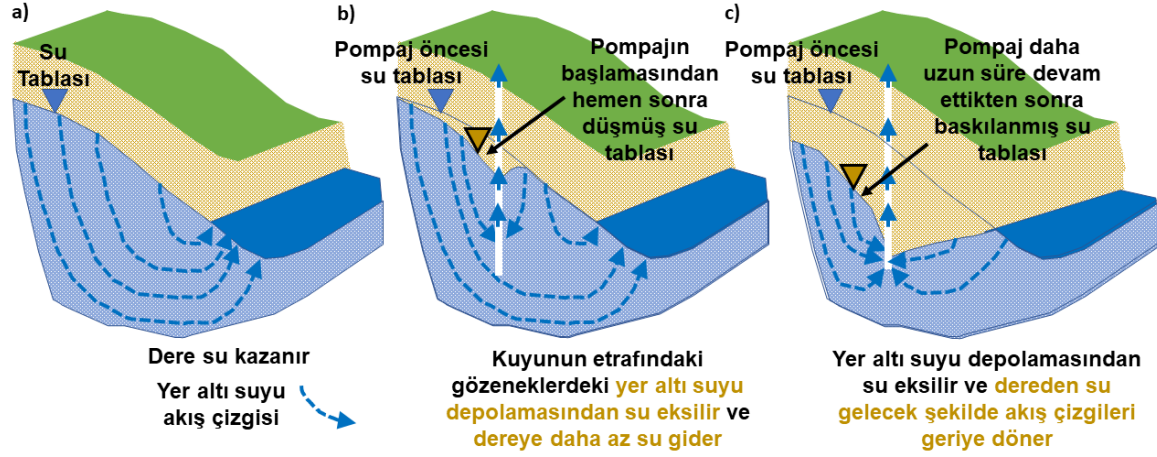
Bazen yer altı suyu derinlerde ısıtılır ve bir çatlak bölgesi veya bir fay yoluyla yüzeye doğrudan bir bağlantı hattı bulunmaktadır ve periyodik olarak büyük miktarda su fışkırtan bir gayzer oluşturur. Fışkırtmayla soğutulan su, tekrar ısıtıldığı hazneye geri akarak daha az yoğun hale gelir ve ısıtılmış çözünmüş gazlarla daha fazla basınçlanır. Bir noktadan sonra, üstteki su sütununun ağırlığı, suyu tutmak için yetersiz kalır ve su fışkırır. Bu özellikler (Şekil 25) kaplıcalar kadar yaygın değildir.



Şekil 25 – İzlanda'daki ünlü Strokkur gayzeri (Tille, 1996. "[Yakından Strokkur'un püskürmesi](#)" Andreas Tille'den [CC BY-SA 3.0](#) lisansı ile).

Yer Altı Suyu ve Kuyular

İnsanlar, kuyuları kullanarak yer altından su pompaladıkları için yer altı suyunun yüzeyle dinamik alışverişine başka bir etken daha getirmekteler. Pompalama, kuyu yakınındaki su seviyelerini düşürerek suyun depolamadan kuyuya doğru akmasına neden olur. Bu, kuyudan uzaktaki su seviyelerini düşürür ve kuyunun etrafında koni şeklinde bir su seviyesi yüzeyi oluşturur. Pompalamadan önceki ile sonraki su seviyesi arasındaki farka düşüm denir ve koni şeklindeki su seviyesi yüzeyine bir depresyon konisi veya bir düşüm konisi denir (Şekil 26a ve b). Pompalama devam ederse, gelen akışlar kuyuya pompalanan hacmi dengeleyene kadar depresyon konisi büyür. Çekme konisi bir akarsuya uzandığında, akarsudaki su, akarsu yatağından yer altı suyu sistemine sızar (Şekil 26c).

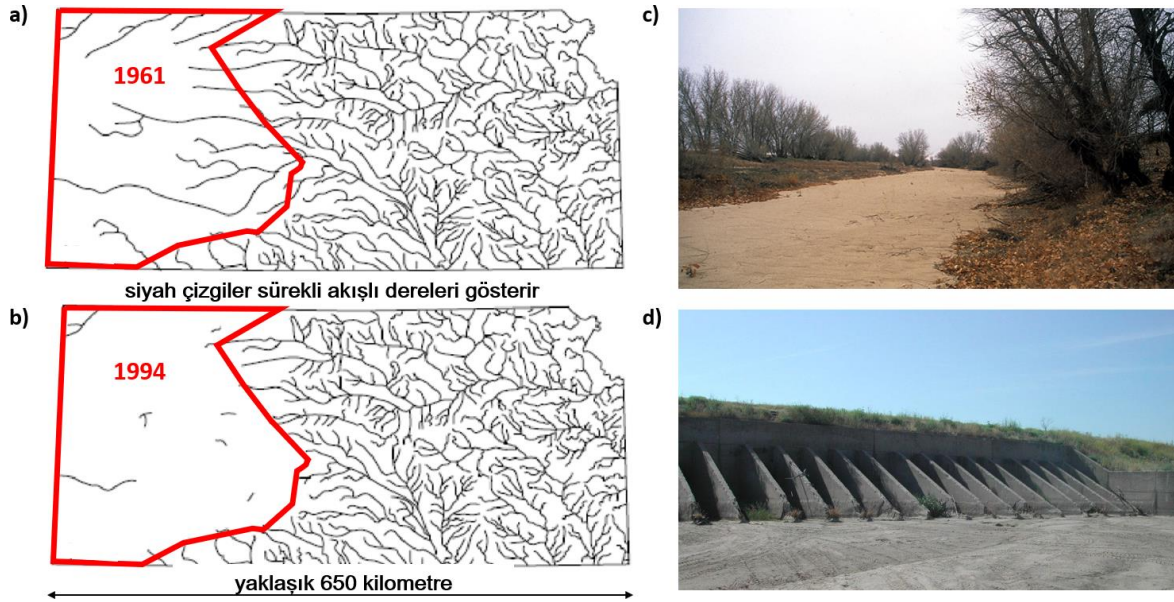


Şekil 26 - Bir akarsu yakınındaki bir kuyudan su pompajının, su tablasını düşürdüğünü gösteren çizim: a) pompajdan önce; b) pompaja başladıktan kısa bir süre sonra yer altı suyu depolamasından su gelir ve akarsuya doğru daha az su akar, böylece akarsudaki akışı azaltır; c) pompaja devam ederken, su tablası, suyun akarsudan kuyuya aktığı yere kadar düşürülür, böylece akarsu akışı daha da azalır ve akarsudaki su yüzeyi kotu alçalır (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Yer altı suyu, diğer çıkarılabilir kaynakların çoğunun aksine yenilenebilir olabilmektedir. Böylelikle sonsuza kadar sürecek bir yer altı suyu kaynağı geliştirmek mümkündür ki bu oldukça arzu edilen bir toplumsal sonuçtur. Ancak yer altı suyu, bir tarafın kullanımının söz konusu taraf için oldukça faydalı olabileceği, ancak bu kullanımın diğerlerine ve/veya kaynağın uzun vadede varlığını sürdürebilmesine zararlı olabileceği paylaşımlı bir kaynaktır. Bu nedenle, "ortak malların trajedisini" (bireysel kullanıcıların paylaşımlı bir kaynağı kendi çıkarları doğrultusunda kullanarak meydana gelen kolektif eylemin, paylaşılan kaynağın tüketilmesine veya bozulmasına neden olarak tüm kullanıcıların ortak yararına aykırı oluşan durum) önlemek için toplumsal yönetim gereklidir. Bu tür bir toplumsal yönetim için sürdürülebilirlik terimi önerilmiştir. Yer altı suyu geliştirilmesinde sürdürülebilirlik, sıklıkla doğal olarak takviye edilenden daha az yer altı suyu çekilmesi olarak yorumlanmaktadır. Bu yönetim yaklaşımına güvenli debi denmektedir. Bununla birlikte, genişleyen yer altı suyu düşüm konisi, mevcut evapotranspirasyonu azaltabilir, bitişik yüzey sularından sızmaya neden olabilir ve doğal şartlar altında boşaltılabilecek suyu yakalayabilir. Eğer yer altı suyu çekimi bu kaynaklarla dengelenirse, sürdürülen debi olarak adlandırılan yeni bir denge sağlanır. Sürdürülen debiye dayalı yönetim, çekimin daha büyük olan hidrolojik çevrim ile sisteme bağlanan su kaynakları üzerindeki etkisini ihmal eder. Hidrolojik çevrimin bir bölümünde yapılan bir değişiklik, çevrimin diğer bölümlerini etkiler ve bu nedenle kültürel veya yasal sonuçlara yol açabilir.

Yer altı suyu çekimi, yer altı suyu sistemi beslenimini aşarsa yer altı suyu kaynakları sürdürülemez, çünkü yer altı suyu seviyeleri düşecek ve sonunda bölgedeki akifer ve akarsuların gözeneklerinde depolanan yer altı suyu artık mevcut olmayacaktır. Pompalanan su miktarı beslenme miktarını aşarsa, koni, akiferin artık iyi bir su kaynağı olmadığı yere kadar genişlemeye ve derinleşmeye devam eder. Buna bir örnek, Amerika

Birleşik Devletleri, Kansas'taki Ogallala akiferinden aşırı yer altı suyu pompalanmasıdır. Beslenimi aşan miktardaki bu çekime, yer altı suyunun tükenmesi, yer altı suyu madenciliği veya aşırı yer altı suyu çekimi denilmektedir. Kansas'ta yer altı suyunun aşırı kullanımı, Şekil 27'de gösterildiği gibi yaklaşık 20 milyon hektarlık bir alandaki akarsuların kurumasına neden olacak şekilde su seviyesinde düşüşlere neden olmuştur.

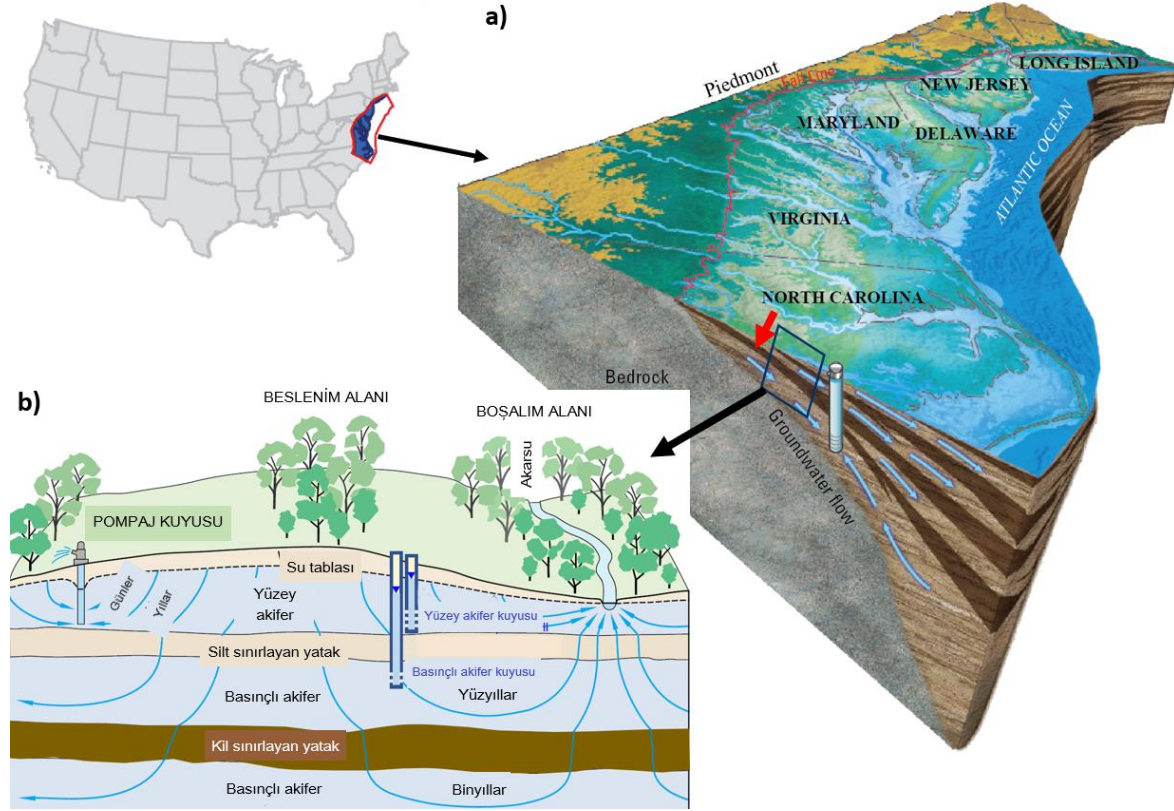


Şekil 27 – Yer altı suyu pompalama, Kansas. Amerika Birleşik Devletleri, altındaki Ogallala Akiferin depolamasından su eksiltmiştir. Böylece su tablası, a) 1961'teki sürekli akışlı derelerin (KGS, 1998) b) 1994'e kadar kurumasına (KGS, 1998) neden olacak seviyeye düşmüştür. Bu durum c) (Charlton, 2018) ve d) (USNWS, 2012) fotoğraflarında gösterilmiştir.

Bazen insanlar suyu bir yerden diğerine aktararak hidrolojik çevrimi daha da karmaşık hale getirirler. Bazen bu aktarma, suyu bir drenaj havzasından diğerine aktaran boru hatlarından geçirerek olur, ancak daha sıklıkla insanlar farkında olmadan "sanal" suyu taşırlar. Sanal su, bir ülkeye gelen ancak başka bir ülkedeki pompalanan su kullanılarak o ülkede yetiştirilen, şişelenen veya üretilen bir üründe bulunan sudur.

4.3 Bölgesel Ölçek Görünümü

Daha da uzaktan bakacak olursak (Şekil 28), yer altı suyu sistemlerini bulunduran üç boyutlu, bölgesel, genellikle katmanlı jeolojik birimler görünür hale gelir. Jeolojik katmanlar şu nedenlerle oluşur: 1) çökeller su veya esen rüzgâr tarafından serilirler; ve 2) üst kıta kabuğunun yaklaşık % 73'ünü kaplayan tortul kayaçlar, orijinal katmanlı yapılarını koruyacak şekilde konsolide edilir. Bu katmanlı yapı önemlidir, çünkü hem yer altı suyu depolama hacmi hem de yer altı suyu akışının kolaylığı katmanların gözenekliliğine ve geçirgenliğine bağlı olarak farklılık gösterir ve bir dizi akifer ve sınırlayıcı birimler oluşturur.

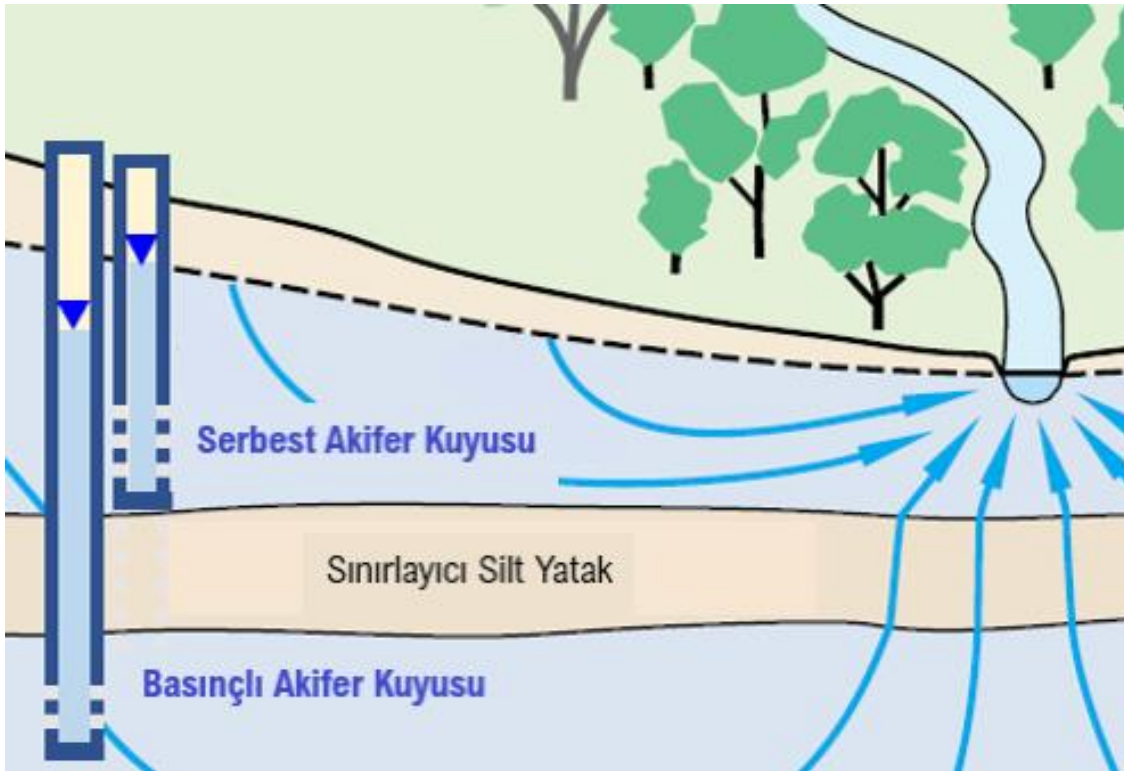


Şekil 28 - Yer altı suyu sistemlerinin bölgesel görünümü. a) Amerika Birleşik Devletleri'nin orta Atlantik kıyı ovası çökellerin denize doğru derinleşmesi (USGS, 2019b'den uyarlanmıştır), pencere ile çerçevelenen; b) daha büyük bölgesel yer altı suyu sisteminin küçük bir parçası olan yerel akiferlerin ve katmanlı akiferlerin ve sınırlayıcı birimlerin gösterimi (Winter ve diğ., 1998, Heath 1983'ten uyarlandığı gibi).

Akiferler ve Sınırlayıcı Birimler

Bir kuyu açarken, belli bir noktada doymuş koşullarla karşılaşılacaktır. Burası, yer altı suyu bölgesinin en üstü ve serbest akiferin üst sınırı olan su tablasının bulunduğu noktadır. Bu yer altı suyu bir serbest akiferde depolanır ve Şekil 28b'de yer yüzeyinin hemen altındaki akifer olarak işaretlenmiştir. Sondaj daha büyük derinliklere devam ettikçe, tipik olarak birinci sınırlayıcı yatağın üstü ile karşılaşılır (Şekil 28b). Kuyu bir boru ile kapatılırsa, serbest akiferdeki yer altı suyu kuyuya sızamaz ve su borudan dışarı atılırsa, çamurlu silt tabanlı boş bir boru olacaktır. Sondaj, sınırlayıcı yatak boyunca aşağı doğru devam ederken, kuyuya boruyu dolduracak kadar hızlı su sızamaz, çünkü sınırlayıcı yatak düşük geçirgenlikli silt veya kilden oluşmaktadır. Bir noktadan sonra delgi, sınırlayıcı yatağın dibine ulaşır ve altındaki kum tabakasına girer. Su, aniden hızlı bir şekilde sondaj deliğine girer ve su seviyesi, alttaki kum yatağını aşacak bir seviyeye yükselir. Bu kum yatağı, gözenekli ve geçirgen olduğu için başka bir akiferdir, ancak bu durumda akifer içindeki su seviyesi, basınç altında olduğu için akiferin üstünden daha yüksektedir, bu nedenle basınçlı veya artezyen akifer olarak adlandırılır (Şekil 28b). Bu akiferdeki yer altı suyu, üstündeki silt yatağı tarafından sınırlandırıldığı için basınçlıdır. Sınırlayan yataklar fazla geçirgen değildir ve su bunların içinden yavaşça geçer, böylece alttaki sınırlandırılmış birimde yüksek bir su basıncı korunmuş olur. Kuyu, sınırlayan yatağı delip geçtiğinde,

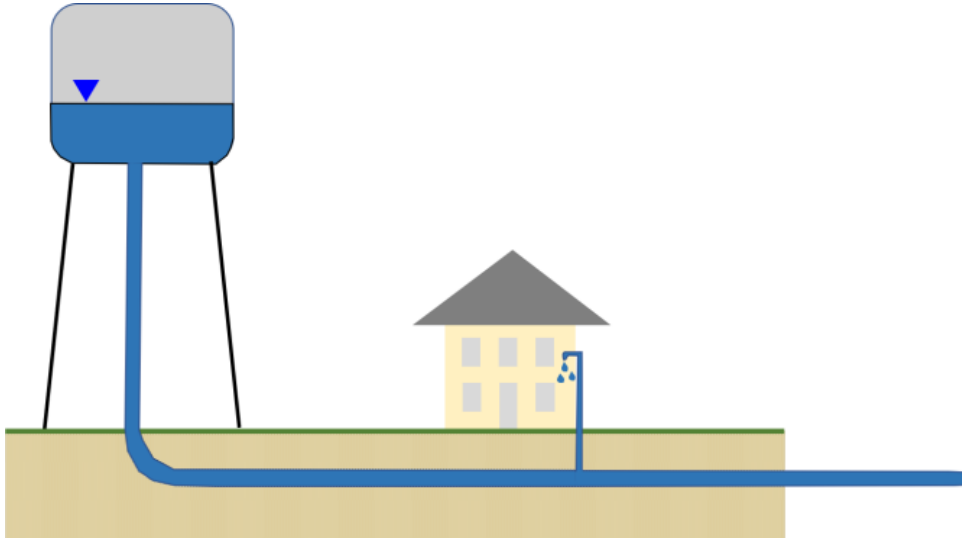
basıncı akifer içindeki basınçlı su, basınçlı akiferdeki hidrolik yük seviyesine kadar kuyu kaplamasına akar (Şekil 29, basınçlı ve serbest akiferlerdeki kuyuların yakın bir görüntüsünü sunmaktadır). Buna karşılık, üst akiferdeki su seviyesi, üstten düşük geçirgenliğe sahip bir yatakla sınırlı değil ve bu serbest akiferdeki bir kuyuda su seviyesi, su tablasına yükselir. Serbest akifer, yükselen ve düşen su tablasını barındırdığı için su tablası akiferi olarak da adlandırılır. Şekil 29'daki sıkı akifer kuyusundaki su seviyesinin, sınırlayıcı yatağın altındaki akiferin kuyusundaki daha düşük su seviyesine göre daha yukarıda olması, suyun burada sınırlayıcı yatak içerisinden aşağı doğru akması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 29 – Şekil 28b'de gösterilen kuyuların yakın planı. Kesikli çizgiler, formasyondan gelen suyun kuyuya girebileceği kuyuların "süzgeçli" bölümlerini gösterir. Serbest akifer kuyusundaki su, su tablası seviyesine yükselirken, basınçlı akifer kuyusundaki su seviyesi, sınırlayıcı yatağın tuttuğu basınç nedeniyle basınçlı akiferin üstüne çıkar (Winter ve diğ., 1998'dan uyarılma, Heath, 1983'den uyarıldığı gibi).

Basıncı akiferdeki yer altı suyu basıncının nedenini araştırmak için, Şekil 28b'den uzaklaşarak akifer istifinin ve sınırlandırıcı yatakların daha büyük bir yer altı suyu sisteminin küçük bir parçası olduğu anlaşılan Şekil 28a'da gösterilen daha büyük resimdeki yerine bakınız. Birbirini izleyen kum, silt ve kil yatakları hafifçe denize doğru eğiliyor. Kum ve çakıl gibi kaba malzemelerde ince silt ve killerin bulunduğu ara katmanlı bu jeolojik yapı, dünyadaki kıyı ovalarına özgüdür. Daha büyük resim, basınçlı akiferin denizden uzakta yukarı doğru eğimli olduğunu (Şekil 28a'da sola doğru) ve nihayetinde kara yüzeyiyle kesiştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 28a'da kırmızı okla gösterilen bu konumda, üstteki silt tabakası mevcut olmadığından akifer artık basınçlı değildir, dolayısıyla serbest

bir akiferdir ve yağıştan beslenim su tablasına sızmaktadır. Bu beslenim noktası, kuyunun açıldığı yerden daha yüksekte olduğu için, bu ilâve yükseklik, basınçlı akiferi deldiğimiz yerde aşağıya inen suyun ağırlığına (basınca) karşılık gelir. Bu durum, suyun bir yerleşimdeki tüm evlere akabilmesi için suyun hidrolik yükünün kulede en yüksek olduğu, ayaklı su haznesi bulunan küçük bir kasabadaki su temin sistemine biraz benzemektedir (Şekil 30). Su temin borusu sokak seviyesinin altında olsa bile evin ikinci katında musluk açıldığında kuledeki su seviyesi evdeki musluğun su seviyesinden daha yüksek olduğundan dışarıya su fışkırtıyor.

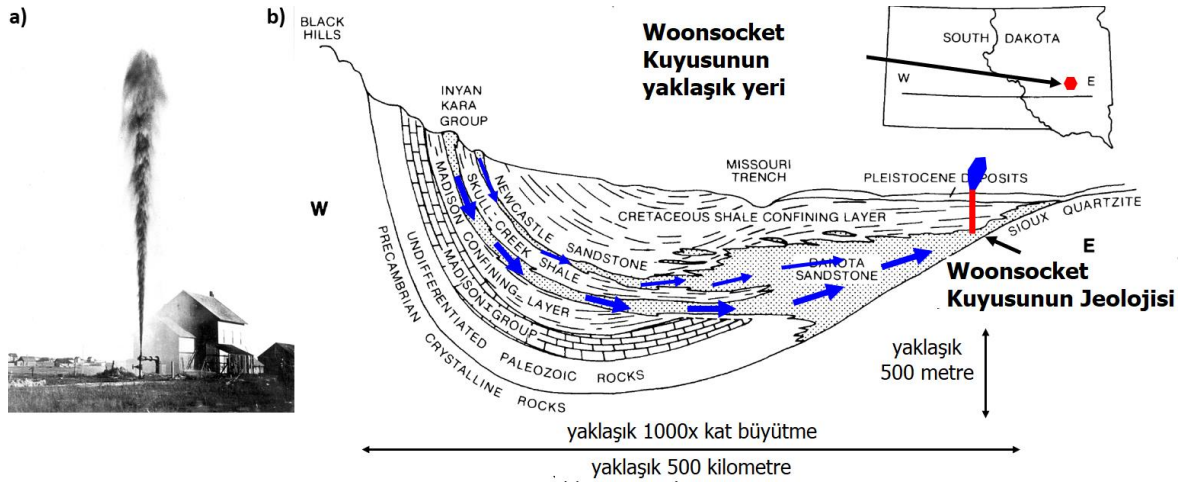


Şekil 30 - Su temin borusu sokak seviyesinin altında olsa bile, bir evden daha yüksekteki su haznesi musluklarda güçlü su basıncı sağlar (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Su haznesinin yer altı suyu sistemine "biraz benzer" olduğunu söylüyoruz, çünkü yerin altındaki yer altı suyu sisteminden farklı olarak su temini borusu gözenekli malzeme ile dolu değildir. Su, gözenekli bir malzemede bir noktadan diğerine akarken açık bir boruya kıyasla önemli ölçüde daha fazla enerji kaybeder. Bir yer altı suyu sistemindeki serbest akifer bile yer altı suyunun akarsulara doğru yukarı aktığı alanlarda derinde basınçlıdır. Ayrıca, akiferin sadece derin kısmına açık bir kuyuda sadece su tablasından daha yüksek bir su seviyesi değil bazen su kuyudan pompasız çıkacak şekilde yer yüzeyinden daha yüksekte bir su seviyesi görülebilir. Su seviyesi yüzeyden daha yüksek olan bir kuyuya akan kuyu denir. Akan kuyular hem serbest hem de basınçlı akiferlerde bulunabilir.

Woonsocket, Güney Dakota, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ünlü bir akan artezyen kuyusu, 1888'de yüksek basınçlı bir yer altı suyu akiferine girerek bir "fışkıran kuyuya" neden olmuştur (Şekil 31a). Basınç, Şekil 31b'nin batı ucundaki Dakota akiferinin mostra alanında beslenim ve suyun düşük geçirgenliğe sahip şistin altındaki Dakota akiferinden akarak oluşmuştur, öyle ki basınç, akış boyunca akiferden sızıntı ile düşürülememiştir. Woonsocket kuyusu akifere açıldığında (Şekil 31b'nin doğu tarafındaki

kırmızı çizgi ile temsil edilmektedir), su yüksek bir akış hızıyla dışarıya fışkırmıştır (Şekil 31a). Zamanla, akiferde depolanan su hacmi azaldı, bu nedenle basınç düştü ve kuyu artık bir akan kuyu değildi (yani, kuyudaki su seviyesi yer yüzeyinin altına düştü). O zamandan sonra kuyudan su çekmek için bir pompaya ihtiyaç duyuldu. Akan artezyen kuyuları eskiden dünyanın birçok yerinde yaygındı, ancak şimdi pompaj, akiferdeki yer altı suyu basıncını düşürdüğü için daha az yaygındır.



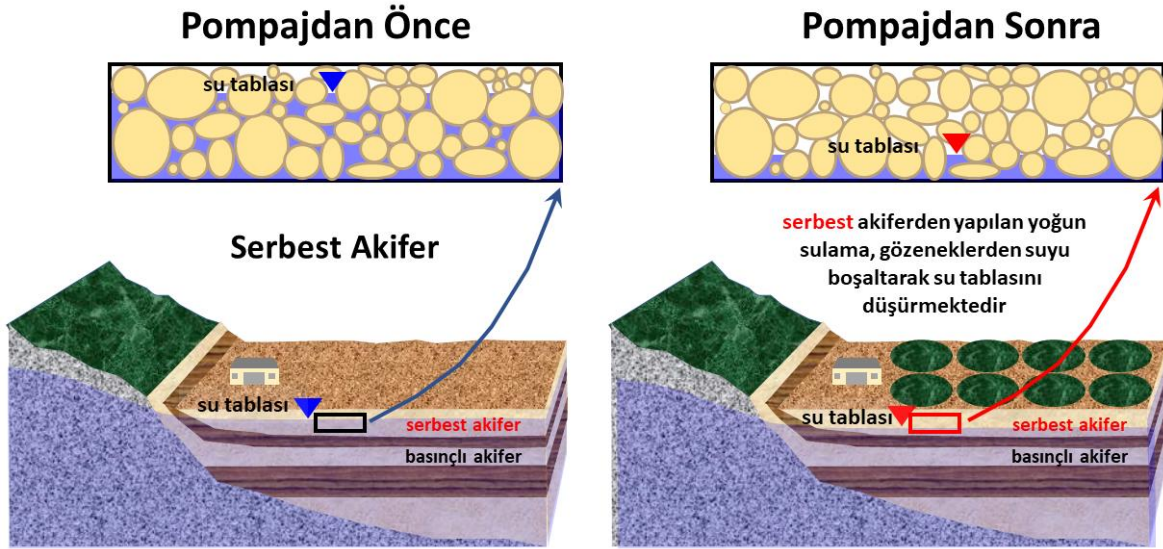
Şekil 31 – Bir akan artezyen kuyusu: a) Dakota akiferindeki Woonsocket kuyusu 1888’de açılmıştır, çıkışı 1900’de fotoğraflanarak (Darton, 1900); ve, b) Batıdaki beslenimin şist örtü tabakasının altından akıp doğuda yüksek basınca neden olmasını gösteren Dakota akiferinin en kesiti (Bredehoeft, 1983’ten uyarlanmıştır).

Serbest ve basınçlı akiferler arasındaki ayrım birçok nedenden dolayı önemlidir. Örneğin, bir serbest akifer, kara yüzeyiyle yakından bağlantılı olduğundan kirlenmeye karşı daha korumasızdır ve akiferin su seviyesi, yağmur ve kuraklığa karşılık olarak daha fazla dalgalanır. Basınçlı bir akifer bir nebze korunmuştur, su daha az kirletici madde içermeye eğilimindedir ve su seviyeleri yağıştaki kısa vadeli değişikliklere bu kadar tepki vermez. Basınçlı bir akiferdeki suyun, Şekil 28b’de gösterildiği gibi yer altı suyu sisteminde kalma süresi genellikle daha uzundur. Serbest su, bazı bölgelerde çok uzun bir kalma süresine sahip olabilirken, tipik olarak günler ile yıllar arasındadır. Buna karşın, basınçlı taneli akiferlerdeki (çatlaklı olmayan kaya) suyun kalma süreleri, tipik olarak çok daha uzundur, genellikle 100’lerce ile 1000’lerce yıl arasında; yani boşalım alanlarındaki su 100’lerce ile 1000’lerce yıl önce yağış olarak düşmüştür.

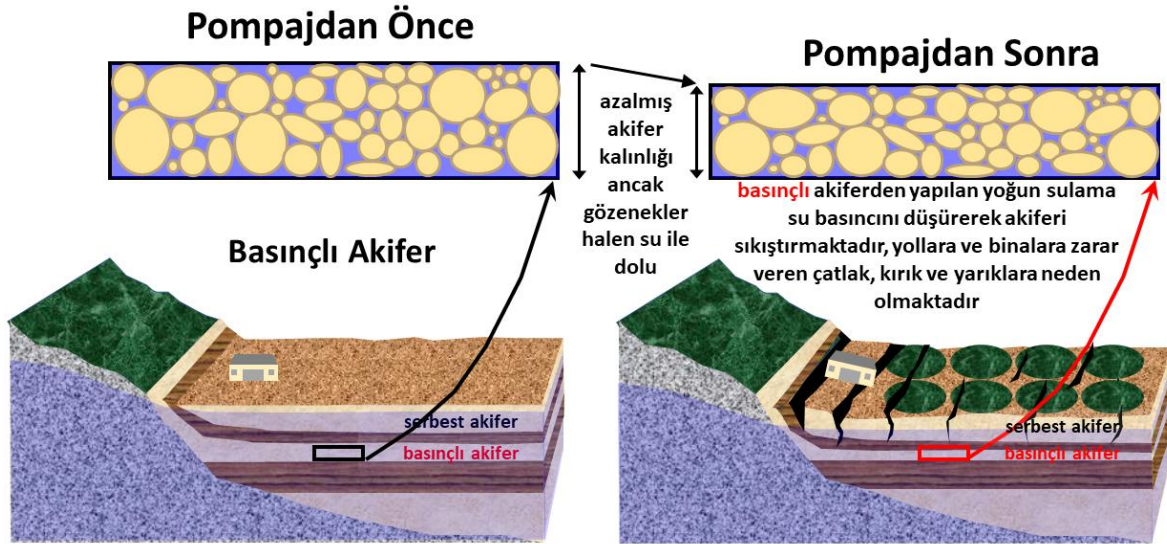
Akifer Depolama

Serbest ve basınçlı akiferler arasındaki bir diğer önemli ayrım, bunlardan su pompalandığında verdikleri tepkidir. Serbest bir akiferdeki bir kuyudan su pompalandığında, pompalanan su yerine, Şekil 32’nin öncesi ve sonrası görüntülerinde gösterildiği gibi, boşaltılan gözeneklere yukarıdan giren hava gelir. Diğer taraftan, basınçlı bir akiferden su pompalandığında, hava gözeneklere girmez, bunun yerine su basıncı

azalır ve jeolojik tabakalar sıkışır (özellikle akifer tabakaları içindeki veya arasındaki killi tabakalar). Bunun nedeni, yüksek su basıncının, üstteki jeolojik katmanların ve suyun ağırlığının bir kısmını taşıyarak tanecikleri desteklemesidir (Şekil 33).



Şekil 32 – Bir serbest akiferin yoğun pompalanmasından önce (solda) ve sonra (sağda) akifer koşullarındaki değişimi gösteren çizim (gözenekler boşalır) (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).



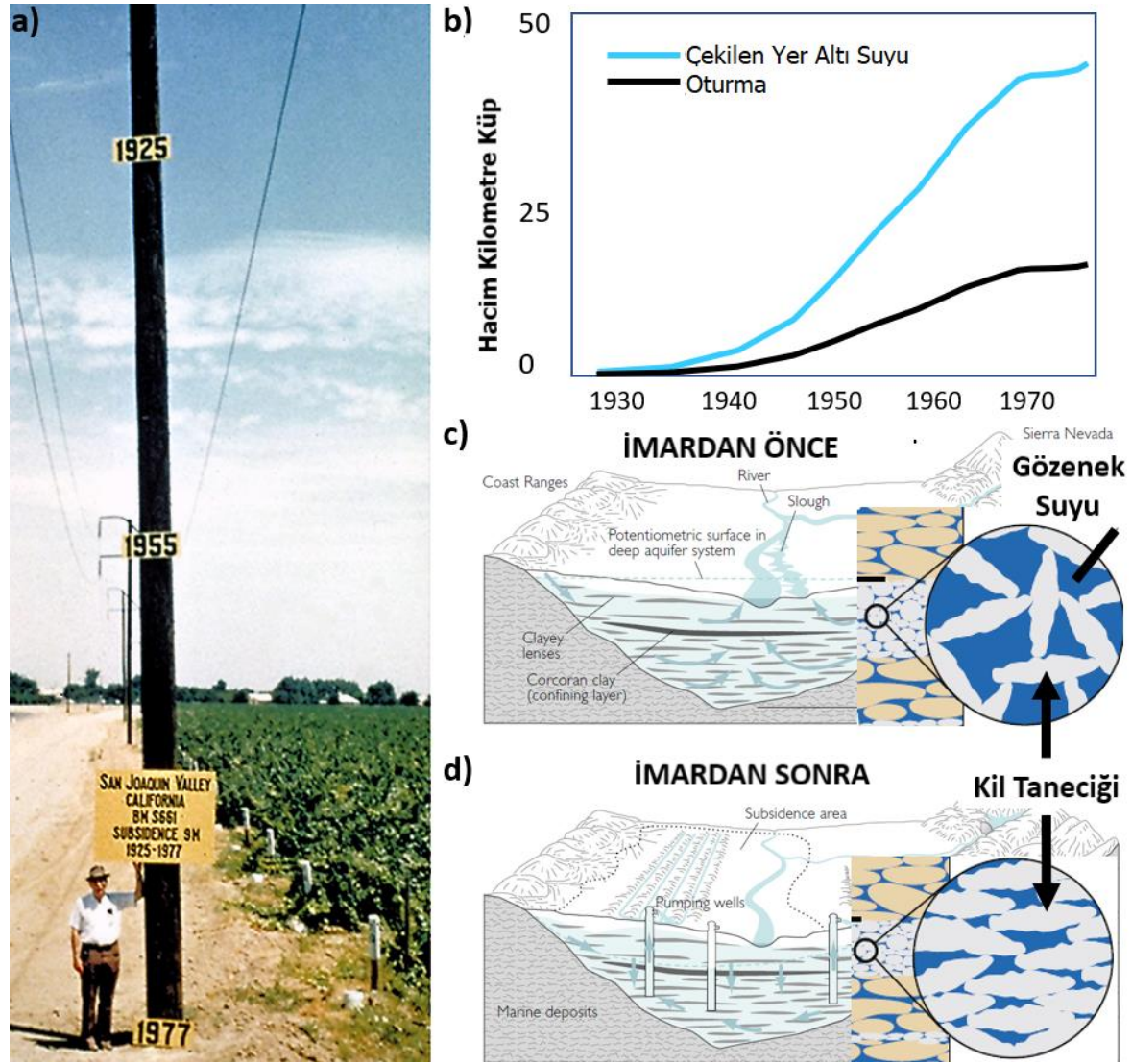
Şekil 33 – Basıncı bir akiferin yoğun pompalanmasından önce (solda) ve sonra (sağda) akifer koşullarındaki değişimi gösteren çizim (gözeneklerde basınç düşer ve jeolojik katmanlar sıkışır) (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Serbest akiferler pompalandığında gözenekler boşaldığı için ve basıncı akiferler pompalandığında gözeneklerdeki basınç düştüğü için pompaja verilen tepki, basıncı

akiferlerde serbest akiferlere kıyasla dışa doğru çok daha hızlı yayılır. **Basınçlı bir kuyudaki pompaja tepki olarak düşen su seviyeleri, kuyuya yakın yer altı suyunun sadece birkaç metre hareket etmiş olabilmesine rağmen, tipik olarak birkaç saat veya gün içinde (akifer özelliklerine bağlı olarak) 100'lerce metre ya da kilometrelerce ötedeki mesafelerde görülebilmektedir.** Bu olay, okyanustaki bir dalgaya biraz benzemektedir, dalga hızla hareket ederken su molekülleri esasen aynı yerde kalmaktadır çünkü dalga, moleküllerin yolculuğu değil, su molekülleri arasındaki enerjinin aktarımıdır.

Gözeneklerin basınçlı akiferlerde sıkıştırılmasına karşın serbest akiferlerde boşalmasının arasındaki farkın önemli bir sonucu, **su seviyelerin birbirine eşit olması durumunda serbest akiferin, basınçlı akifere göre çok daha fazla su verecek olmasıdır.** Tipik olarak, serbest bir akiferdeki bir birim su seviyesi düşüşü (örneğin 1 m), basınçlı bir akiferdeki aynı su seviyesi düşüşünden 1000 kat daha fazla su verecektir.

Basınçlı bir akiferden büyük hacimlerde yer altı suyunun pompalanmış olduğu dünyanın bazı bölgelerinde, genellikle yer yüzeyinin çökmesi olarak belli eden ve oturma adı verilen jeolojik formasyonlarda önemli ölçüde sıkışmalar meydana gelmiştir. Sıcak ve kurak yazlarda yoğun sulama gerektiren ekinleri sulamak için onlarca yıl boyunca yer altı suyunun pompalanmasının, vadi tabanının Şekil 34'te gösterildiği gibi 1925'ten 1977'ye 10 metre kadar batmasına neden olduğu California'nın Merkez Vadisi bir örnek olarak gösterilmiştir. Basınçlı akiferlerdeki yer altı suyu basıncının düşürülmesine bağlı arazi oturması yalnızca batı Amerika Birleşik Devletleri'nde değil, diğer yerlerde, özellikle Mexico City, Meksika; Jakarta, Endonezya; Venedik, İtalya ve Pekin, Çin'de de meydana gelmiştir. Oturma kıyıların yakınında meydana geldiğinde, kıyı akiferlerine yerel tuzlu su girişini hızlandırır. Pompaj hızı, akifer seviyelerini düşürmeyecek kadar azaltıldığında, arazi çökmesi durur. Ancak akifer su seviyelerinin yükselmesi için pompaj daha fazla azaltılırsa, çökme tam olarak tersine çevrilmez (yani, yer yüzeyi yükselmez) çünkü kil taneleri Şekil 34c ve d'de gösterildiği gibi önceki dizilişlerine geri dönemezler.



Şekil 34 - San Joaquin Vadisinin (California, ABD) oturması. a) 1925'ten 1977'ye yoğun sulamadan dolayı zemin yüzeyi batmasının fotoğrafı. (Poland, 1977); b) Yaklaşık 2000 kilometrekarelik alandaki çekilen suyun hacmi ve oturmanın hacmi. (Galloway ve diğ., 1999); c) Killi mercceklerdeki ince kıl taneciklerin dizilişini gösteren pompaj öncesi vadinin çizimi (Sneed ve diğ., 2018'ten uyarlanmış) ve d) Pompajdan dolayı su basıncının düşmesi sonrası killi mercceklerdeki taneciklerin sıkışmış istiflemesini gösteren uzun vade pompaj sonrası vadinin çizimi (Sneed ve diğ., 2018'den uyarlanmış).

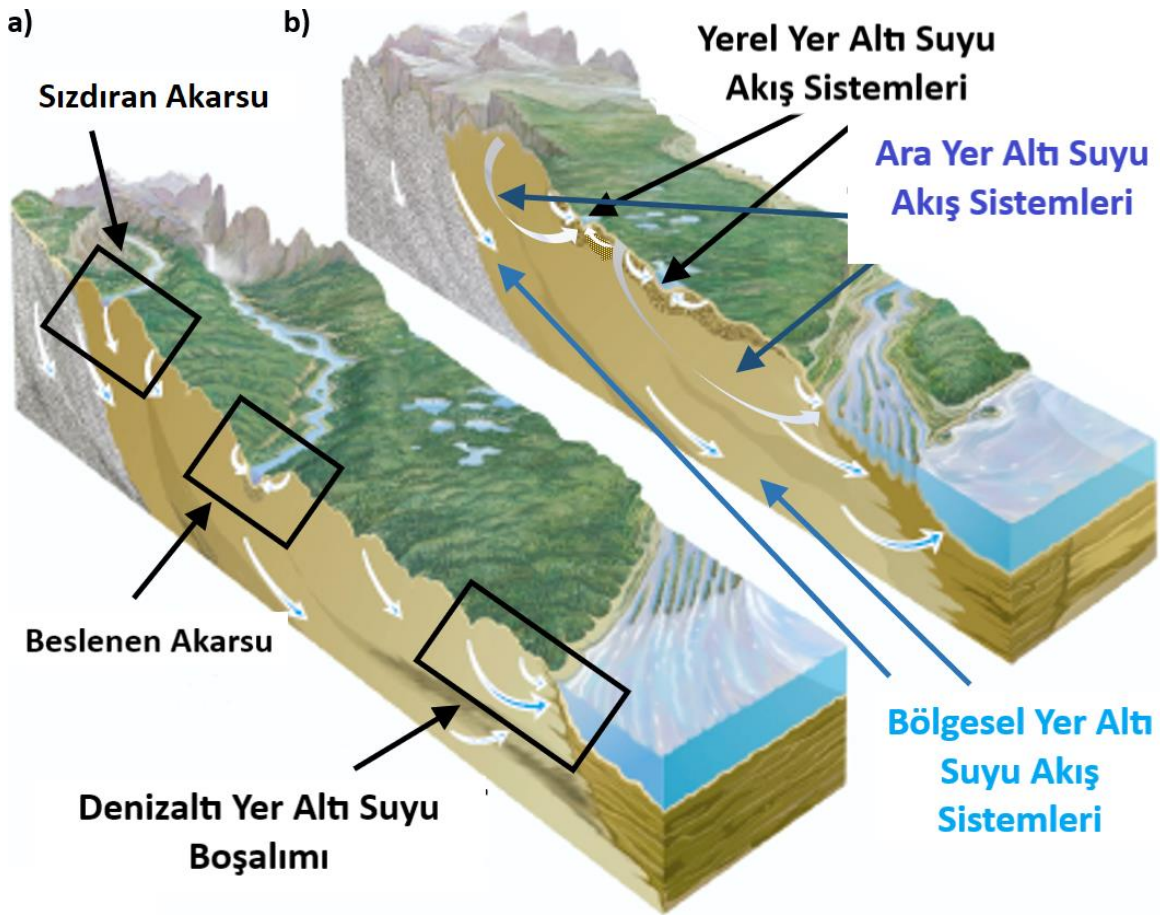
4.4 Kıtasal Ölçek Görünümü

Daha da uzaklaşmak, hidrolojik çevrimin yer altı suyuna ait kısmının kıtasal ayırım çizgisinden kıyasal okyanusa uzanan daha da büyük olan görünümü vermektedir (Şekil 35). Genel olarak kıtasal ölçek sisteminin iki son bileşeni vardır:

- Kıtasal ayırım çizgisi civarı dağlık bölgelerdeki kaynak suları ve
- Kıyı civarı düz bölgelerdeki alt havzalar.

Kaynak sularını ve alt havzaları birbirine iki büyük, kıtasal ölçekli, karasal su taşıma sistemleri ile bağlamaktadır: biri yer üstünde, diğeri yerin altında.

- Yer üstü sistemi, kolaylıkla görülebilir olan, (kanallar içinde) yoğunlaşmış ve büyük ölçüde (kara yüzeyini kucaklayarak) iki boyutlu olan akarsu ağıdır. Yüksek yerlerdeki küçük dereler, yüzey üzerinde basamaklı olarak dökülür ve akışaşağısında düzenli bir şekilde birleşirler.
- Akarsu ağına göre dağınık ve (kara yüzeyinin şeklini tam olarak takip etmeyen akış çizgileriyle) üç boyutlu olan (karstik arazi haricinde ne kanallarda ne de tünellerde bulunan, daha ziyade jeolojik malzemelerin gözenek ve çatlaklarında olan) yer altındaki sistem, yer altı suyu sistemidir. Yer altı suyu akış örüntüleri, akarsu ağına göre daha az düzenlidir çünkü yer altı suyu, karmaşık jeolojik yapılar tarafından kuvvetli bir şekilde saptırılan veya bükülen çok ölçekli hidrolik yük gradyanları tarafından yönlendirilir.

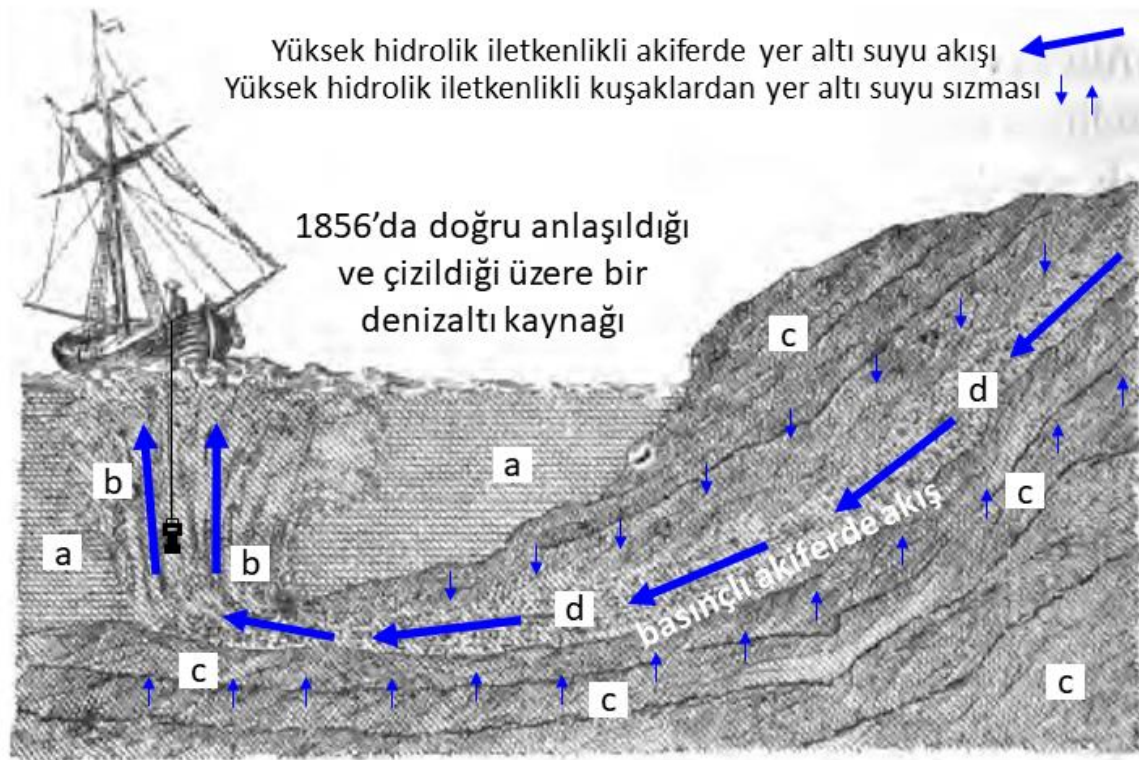


Şekil 35 – a) Hem sızdıran hem de beslenen akarsuların ve ayrıca denizaltı yer altı suyu boşalımının ve b) bölgesel akış sistemleriyle iç içe olan daha derin ara sistemlerin içine yerleştirilmiş çok ölçekli doğası olan sığ, yerel akış sistemlerin uzamsal bağlamını gösteren kıtasal görünüm. Bu şekil, akarsularla yer altı suları arasındaki alışverişin ve akarsuların ve yer altı sularının okyanusa boşalması yoluyla yüzey ve yer altı su sisteminin uzun mesafedeki hidrolojik bağlantısını göstermektedir (Winter ve diğ.,1998'ten uyarlanmıştır).

Beslenen ve sızdıran akarsularla ve denizaltı sızıntıları ile gösterildiği gibi yüzey ve yer altı arasında su alışverişi gerçekleşir (Şekil 35a) ve böylelikle yerel ve bölgesel yer altı suyu akış sistemleri gelişir (Şekil 35b). Yerel sistemler sığ ve kısa olma eğilimindedir ve kısa

sürekli yağmur olaylarına ve iklim koşullarındaki mevsimsel değişikliklere tepki verir. Bölgesel sistemler daha derin ve daha uzundur. Bölgesel sistemler, iklim koşullarını on yıllardan yüzyıllara ve bin yıllar öncesine kadar "kaydetme" eğilimindedir. Örneğin, bölgesel yer altı suyu akışıyla takviye edilen bir havzanın alt kesimlerindeki beslenen bir akarsu, uzun kuraklıklardan sonra bile asla kurumayabilir çünkü yer altı suyu, iklimin farklı olduğu binlerce veya on binlerce yıl önce yeniden doldurulmuştur.

Şekil 35'in büyük ölçekli kıtasal görünümünde gösterildiği gibi, yer altı suyu kıtanın sahili boyunca okyanusa doğrudan boşalabilmektedir. Buna denizaltı yer altı suyu boşalımı denir. Bu tür özellikler, Şekil 36'da gösterildiği gibi, uzun zaman önce tatlı su bulmak için denizcilikle uğraşan insanlar tarafından anlaşılmış ve kullanılmıştır. Denizaltı yer altı suyu boşalımının büyük bir kısmı, koy ve haliç gibi kıyıya yakın yerlerde gerçekleşmektedir.

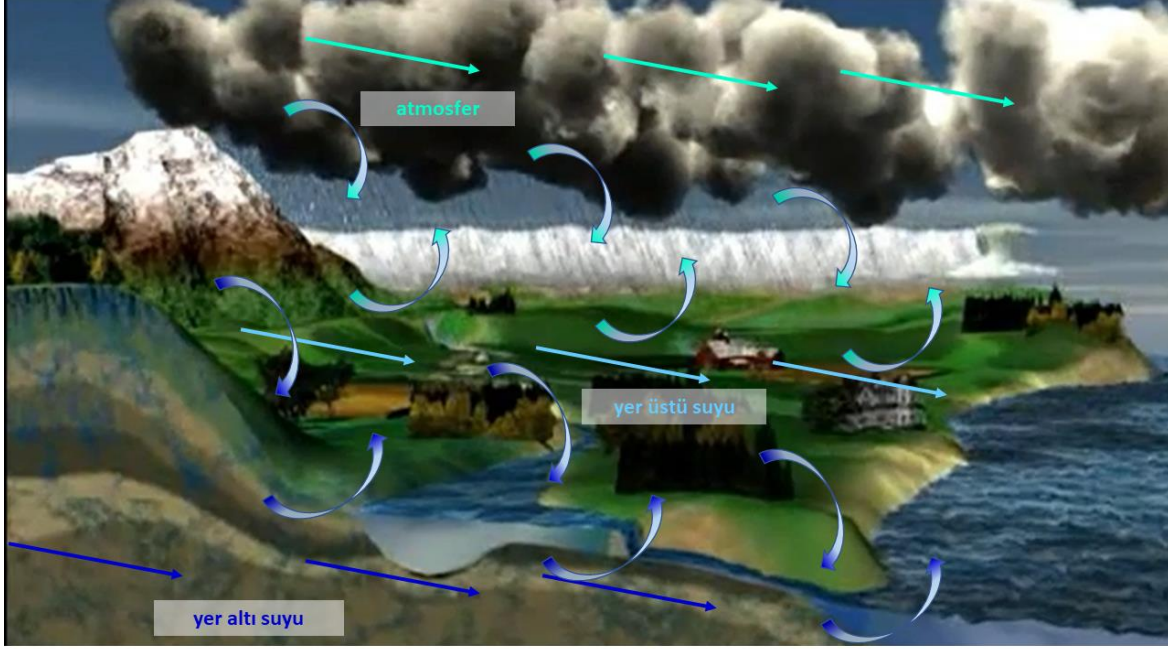


Şekil 36 – Denizaltı kaynakları, uzun zaman önce denizciler tarafından içme suyu olarak doğru bir şekilde anlaşılmış ve kullanılmıştır: a) tuzlu su; b) tatlı su; c) düşük geçirgenliğe sahip jeolojik katmanlar ve d) geçirgen jeolojik katman (1856'da Thrasher'in tercümesinde yayınlandığı gibi denizaltı kaynak resmini çizen Humboldt (1825)'e göre).

Özetle, **kıtasal-ölçekte üç su taşınımı sistemi** bulunmaktadır::

- 1) **Atmosfer,**
- 2) **Akarsu ağları ve**
- 3) **Yer altı suyu sistemleri.**

Bu kıtasal ölçekli sistemler izole değildir. Sadece paralel akış sistemleriyle kıtasal yağışları okyanusa geri göndermezler, bunun yerine birbirleriyle yakından bağlantılıdırlar ve yol boyunca birçok kez su alışverişinde bulunurlar (Şekil 37).



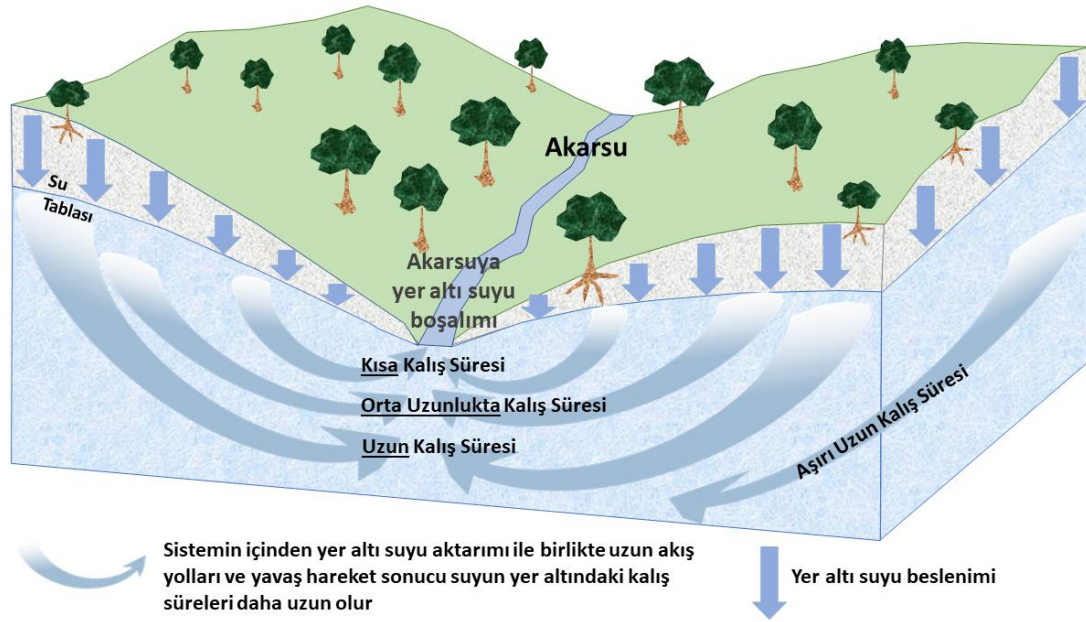
Şekil 37 - Kıta ölçeğinde üç su taşınım sistemi: atmosferdeki hava dolaşımı, yüzeydeki akarsu ağları ve yer altındaki yer altı suyu birbiriyle yakından bağlantılıdır ve yol boyunca birçok kez su alışverişini yaparlar. (NASA, 2020'den uyarlanmış).

Bu alışverişlerin mekanizmaları, atmosferden yüzeye ve yer altına ve tekrar yer altından yüzeye ve atmosfere su aktarımlarını kapsamaktadır; yağış, sızma, evapotranspirasyon ve yağış geri çevrimi vasıtasıyla ve ayrıca sızdıran ve beslenen akarsular yoluyla. Bu üç taşınım sistemi, belirli bir su damlasının kıtaya ilk düştüğü yerden okyanusa ulaştığı yere hangi sistemin taşıdığına bağlı olarak periyodik olarak "rol değiştirir". **Bu etkileşimler küresel su akış sistemine "güç" verir.**

5 Yer Altı Suyunun Kalış Süresi

Yer altı suyu, yüzey suyuna göre yavaş hareket için suyun hidrolojik çevrimin yer altı suyu kısmından geçmesi için geçen süreyi dikkate almakta fayda vardır (Şekil 38). Bir yer altı suyu akış sistemindeki akış çizgisi boyunca herhangi bir noktadaki bir su molekülünün, akış çizgisi boyunca başka bir konuma ulaşması için gereken süreye yer altı suyu hareket süresi denir. Bir beslenim alanında bulunan su tablasının üzerindeki bir su molekülünün yüzeye çıktığı yere (Şekil 38'deki akarsu) gitmesi için geçen süreye yer altı suyunun kalış süresi denir çünkü bu, su molekülünün hidrolojik çevrimin yer altı suyu kısmında "kaldığı" süredir. Şekil 38'deki kavisli oklar üzerindeki isimlendirmeler, daha

uzun, daha yavaş ve daha derin yollar boyunca akan yer altı suyunun yer altında daha fazla zaman geçirdiğini, dolayısıyla akarsuya ulaştığında daha uzun kalış süresine sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 38'de gösterildiği gibi su, geniş bir alan üzerinde birçok yerden bir yer altı suyu sistemine girmektedir, ancak genellikle akış çizgileri daha küçük bir alanda boşalmak olmak üzere birleşirler. Bu nedenle bir akarsuya boşalan yer altı suyunun, geniş aralıkta kalış sürelerinin olduğu görülecektir.

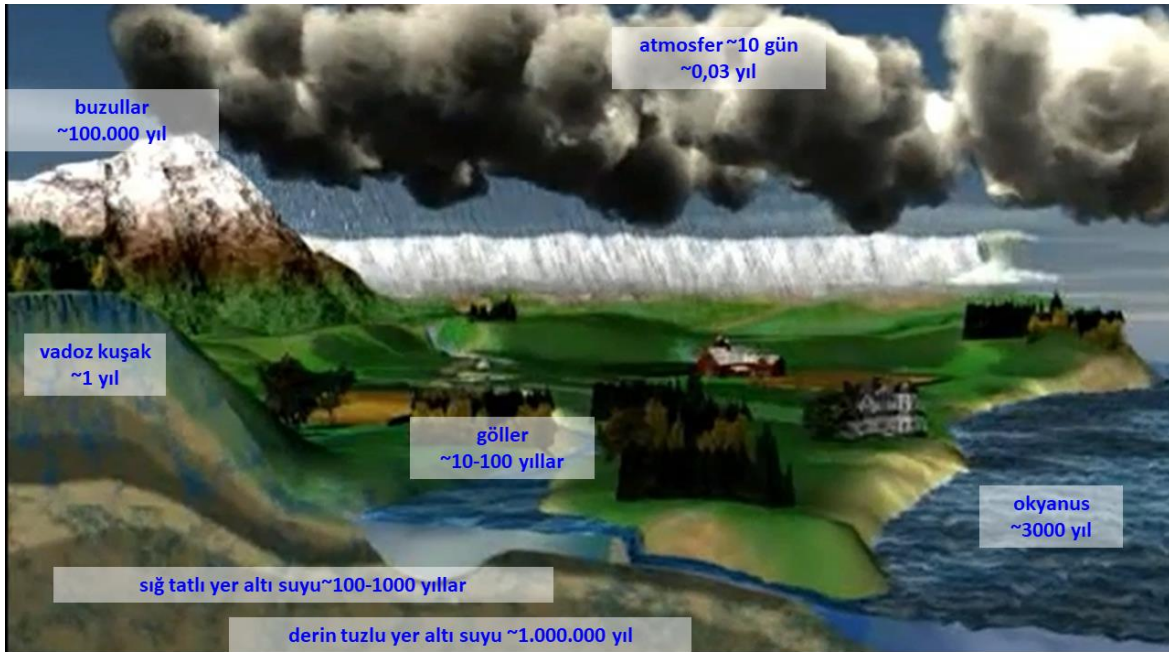


Şekil 38 – Daha uzun, daha yavaş ve daha derin yollardan akan yer altı suyu, yer altında daha fazla zaman geçirir, bu nedenle dereye ulaştığında daha uzun bir kalış süresine sahiptir. Su, geniş bir alandaki birçok noktadan yer altı suyu sistemine girer, ancak akış yolları daha küçük bir alanda boşalmak üzere birleşirler, öyle ki bir dereye boşalan suyun kalış süreleri geniş bir aralıktadır (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Jeolojik malzemenin cinsi, yer altı suyu akış hızını fazlasıyla etkiler ve dolayısıyla hareket ve kalış sürelerini de etkiler. Üç jeolojik malzemenin kaba sınıflandırmasındaki hızlar (taneli çökeller, çatlaklı kaya ve oyuk karst) genellikle birbirinden çok farklıdır. Hız, benzer jeolojik malzeme türlerinde bile büyük ölçüde farklı olabilmektedir çünkü hız, suyun malzemeden geçme kolaylığı ile su seviyesi farkının yarattığı itici gücün bir kombinasyonudur. Bu özellik dikkate alındığında, sığ derinliklerde tipik hızlar, taneli akiferlerde 0,01 ila 1 m/gün, çatlaklı kayalarda 0,5 ila 50 m/gün ve oyuk karstik malzemede 10 ila 500 m/gün arasındadır. Benzer şekilde, Şekil 38'de gösterilen akış sistemindeki yer altı suyunun kalış süresi dikkate alındığında, jeolojik malzeme kum ise, yer altı suyu kalış süreleri yıllar ila on yıllar arasında olabilir, ancak jeolojik malzeme kumdan çok daha az geçirgen olan silt ve/veya kil ise kalış süreleri, onlarca yıldan binlerce yıla kadar gibi çok daha uzun olacaktır.

Hidrolojik çevrimin yer altı suyu kısmındaki suyun kalış süresi, yüzey suyu kısmı veya atmosfer gibi hidrolojik çevrimin diğer kısımlarındakinden çok daha uzundur. Yer

altı suyu kuşağındaki suyun kalış süresi, sıvı yüzey sularını oluşturan sıvı moleküllerinden çok büyük buzulları oluşturan su moleküllerininkine benzemektedir. Hidrolojik çevrimin herhangi bir bölmesindeki kalış süresi, o bölmedeki su hacminin bölmeye giren ve çıkan ortalama su akısına bölünmesiyle tahmin edilir. Kesin değerler bilinmez ancak mertebeleri kolayca tahmin edilebilir. Örneğin, bir su molekülünün atmosferde ortalama kalış süresi 10 gün civarındayken, bir molekül vadoz kuşakta yaklaşık 1 yıl, göllerde yaklaşık on ila yüzlerce yıl, okyanuslarda yaklaşık birkaç bin yıl ve yüz ila bin yıllar mertebesinde buzullarda geçirir (Şekil 39). Buna karşılık, yer altı suyu kuşağının tatlı su kısmındaki suyun kalış süreleri yüzler ile binlerce yıl arasında değişirken, tatlı su bölgesi altındaki derin, tuzlu suyun kalış süreleri milyonlarca mertebesi ile çok daha uzundur. Bu derin suyun çoğu, on milyonlarca yıl mertebesindeki sıklıkta meydana gelen jeolojik kabarmalar dışında hidrolojik çevrim ile alışverişe girmez. Bu derin tuzlu suya olan derinlik, topografyaya ve hidrolik iletkenliğe bağlı olarak bölgeye göre değişir, ancak genellikle 200 ila 1000 metre derinlikte görülmektedir.



Şekil 39 – Hidrolojik çevrimin bölmelerinde bir su damlasının kaldığı görece süre (NASA, 2020'den uyarlanmış).

Su, yer altı malzemelerin gözeneklerinden geçerek akarken mineralleri de çözer, böylece genellikle su yer altı suyu sisteminde ne kadar uzun süre kalırsa, çözünmüş minerallerin konsantrasyonu da o kadar yüksek olur. Sonuç olarak, suyun akarsulara boşalımında potansiyel olarak geniş bir kalış süresi aralığı ve suyun içinden geçtiği yer altı materyallerinin değişen karakteri göz önüne alındığında, boşalan yer altı suyunun kimyasal bileşimleri çok çeşitli olabilir.

Hareket süreleri ve kalma süreleri, yer altı suyundaki kirletici maddelerin hareketi bakımından önemlidir. Kirleticiler beslenim alanlarına girerse ve jeolojik materyaller

tarafından kolayca özümrlenmezlerse ya da yer altındaki mikroplar tarafından parçalanmazlarsa, akarsuya ulaşması yıllar veya on yıllar alabilir (dolayısıyla bir insan ömrü içinde akarsuya tehdit oluşturabilir) veya asırlardan bin yıllara kadar sürebilir (bu nedenle akarsu için yalnızca uzun vadede bir tehdit haline gelir).

Yer altı suyunun uzun vade "hafızası" vardır, çünkü büyük bir hazneyi doldurmak ve boşaltmak uzun zaman alır, bu nedenle suyun yer altında kalma süresi uzundur. Aslında, bazı akiferlerimiz, on binlerce ila yüz binlerce yıla kadar geçmişte buzul-buzul arası çağlar çevrimler yoluyla Dünya tarihinin daha nemli ve daha soğuk dönemlerinde yeniden doldurulan suları içerir. Bu tür yer altı sularına, yer altından çıkardığımız fosil yakıtlar gibi yenilenmemeleri sebebiyle fosil yer altı suyu denir.

Yer altı suyu sistemlerine ilişkin şimdiye kadar sunulan irdelemeden sonra, okuyucunun Dünya çevresindeki yer altı sularına daha aşina olmasına yardımcı olmak için çeşitli ortamlardaki yer altı suyu örneklerini değerlendirmek faydalı olacaktır. Bu amaçla, sonraki bölümde dağlar, karstlar (yani mağaraların bulunduğu yerler) ve sürekli don (permafrost) ortamları gibi bazı kendine mahsus arazilerde yer altı suyunun nasıl oluştuğunu gösterilmektedir.

6 Yeryüzünün Tüm Arazilerinde Yer Altı Suyunun Bir Rolü Vardır

Yer altı suyu, yeryüzünün tüm arazilerinde bir rol oynar. Yer altı suyu koşullarının farklı arazilerdeki değişkenliğini göstermek için, bu alt bölüm bazı arazilerdeki yer altı suyu koşullarına bir bakış sunmaktadır: dağlar, karst ve permafrost.

6.1 Dağ Ortamlarında Yer Altı Suyu

Kaynaklar uzun zamandır dağlarda yaşayanlar için su kaynağı olmuştur. Güney Amerika'nın And Dağları'ndaki İnkalar gibi medeniyetleri yaşatan teras tarımı (Şekil 40) etrafında gelişen kültürler, dağ kaynakları ve kanalları etrafındaki yapılar ile suyu teraslanmış tarımsal alanların içinden ve kent sakinlerinin su alabileceği kentlerdeki çeşmelere kadar taşımışlar.

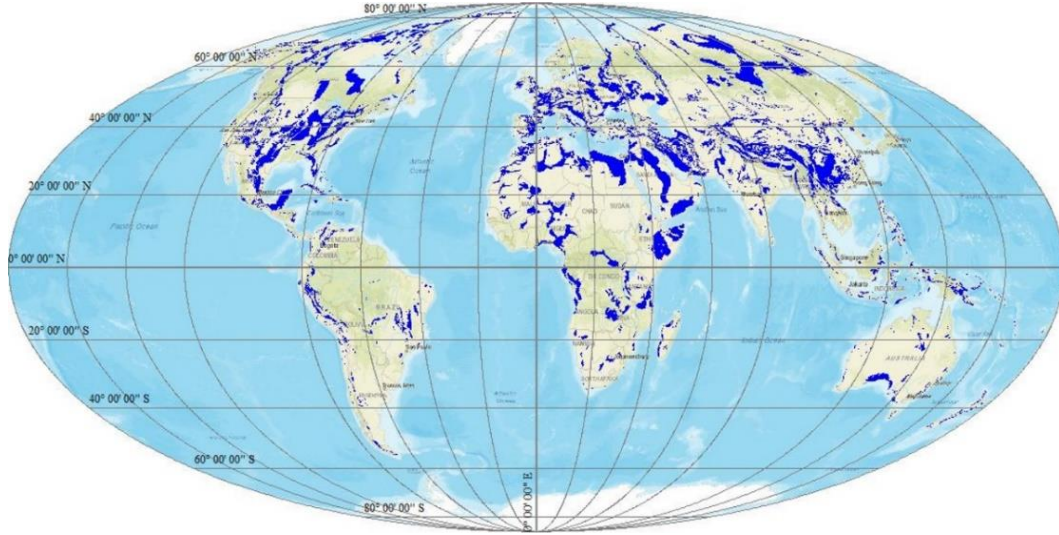


Şekil 40 – Tarihsel teras tarımı nedeniyle oluşan arazi (Graber, 2011).

Bugün dünya nüfusunun yaklaşık %12'si dağlık bölgelerde yaşıyor ve su kaynağı olarak büyük ölçüde yer altı suyuna bağlı. Dağların çoğunda sarp araziler görülmektedir ve su depolama kapasitesi asgari düzeyde olan kırık kayalardan oluşmaktadır. Sonuç olarak, yer altı suyu dolaşımı tipik olarak hızlıdır ve genellikle su tablasının yer yüzeyiyle kesiştiği dağ yamaçlarındaki kaynaklara veya dağ derelerine boşalır. Ormanlık dağlarda, hızlı fırtına akışlarını önleyen orman ekosisteminden oluşmuş topraklar bulunur, böylece yer altı suyu beslenimini ve akarsulara yavaş bırakmayla yer altı suyu kuşağında su depolanmasını teşvik eder. Ormansızlaşma bunu tersine çevirir ve dağlık arazinin kurumasını ve akarsu akışı ve ekolojinin desteklenmesi için daha az suyun mevcut olmasını teşvik eder. Dağ hidrolojisi, küresel nüfustaki bir milyardan fazla insan için önemli olmasına rağmen, dağlık arazide kuyu açma ile ilgili zorluklar nedeniyle yeterince çalışılmamıştır.

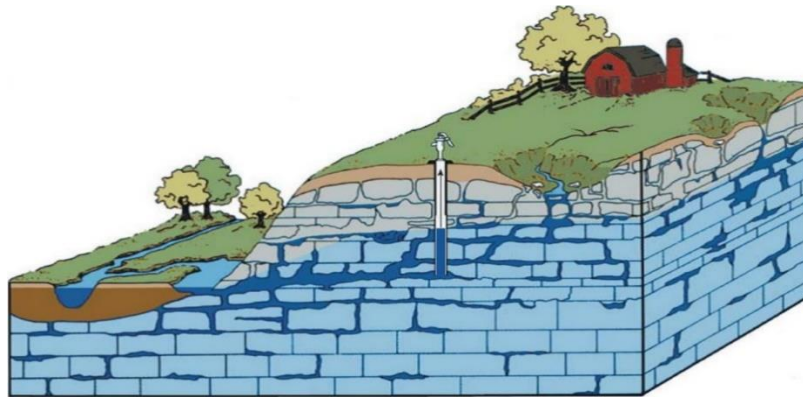
6.2 Karst Ortamlarda Yer Altı Suyu

Şekil 41'de gösterildiği gibi, yeryüzünün buzsuz olan yüzeyinin yaklaşık %15'ini oluşturan karbonat ana kayası ile birlikte, dünya nüfusunun %25'inden fazlası ya karst akiferlerin üzerinde yaşamaktadır ya da suyunu bunlardan temin etmektedir.



Şekil 41 – Dünyadaki karst akiferleri oluşturan karbonat ve evaporit kayaçların yüzeylenmeleri (Kuniansky, 2020, Chen ve diğ., 2017'nin Dünya Karst Akifer Haritası mekânsal veri setinden oluşturulmuş).

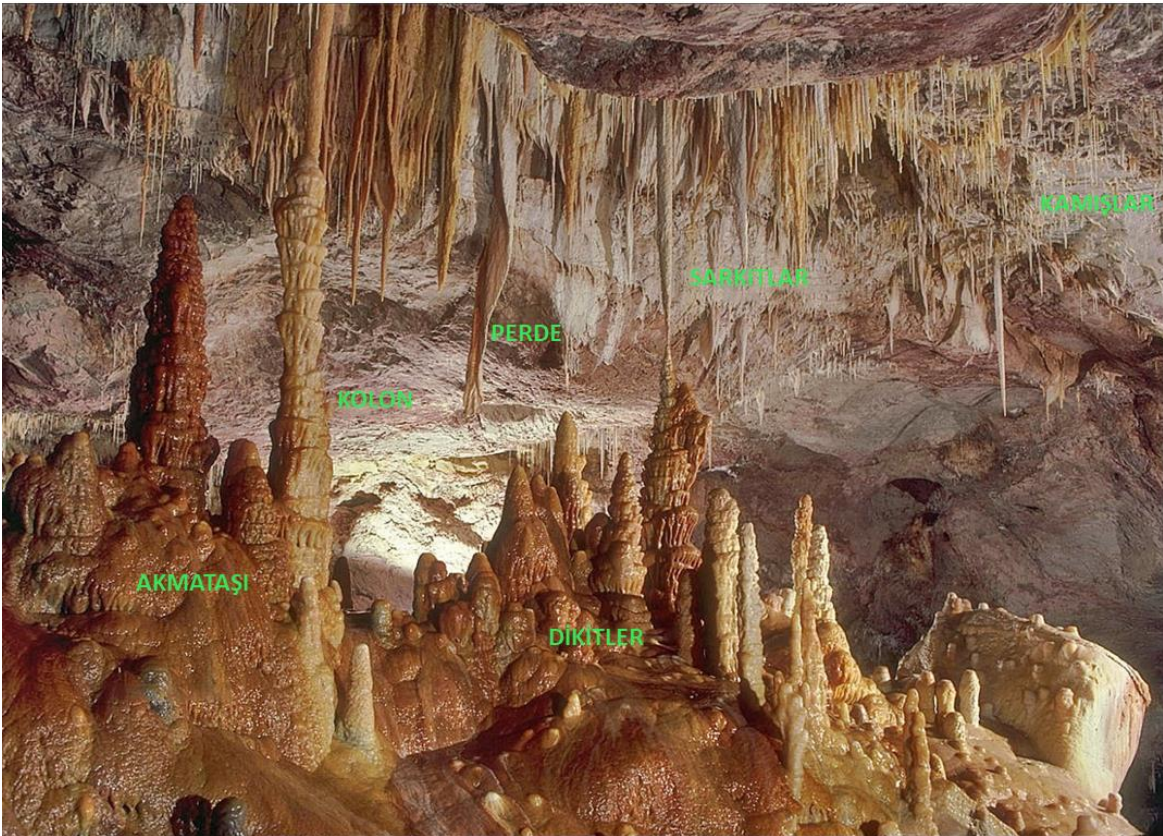
Karst akiferleri, Şekil 42'de gösterildiği gibi mağaralar ve obruklarla (bir mağarayı örten kara yüzeyinin mağaranın içine göçtüğü oluşumlar) birbirine bağlı yer altındaki büyük açıklıklardan oluşmaktadır. Kireçtaşı ve dolomit içindeki azımsanmayacak miktardaki minerallerin vadoz kuşaktaki asidik sular tarafından jeolojik zaman ölçekleri süresince çözünmesiyle meydana gelirler. Bu mineraller, yer altı suyu ile alıp götürülmektedir. Daha sonra, çözünmüş mineraller, suyun asitliğini nötrleştirdiğinden ve su, akış yollarını daha fazla genişletmek için kapasitesini yitirdiğinden yer altında açıklıkları oluşturma süreci durdurulur. Daha sonra, iklim daha kurak hale geldiğinde ve/veya deniz seviyesi düştüğünde, su tablası düşer ve asidik sızma suyu daha derin seviyelerde ek oyuklar oluşturur. Daha ıslak dönemlerde ve/veya deniz seviyesi yükseldiğinde, mağaralar suyla dolup doymuş bir karst akifer oluşur. Jeolojik zaman içinde dalgalanan su tablaları, dünyanın birçok yerinde derin karst akiferleri oluşturmuştur.



Şekil 42 – Karst içindeki büyük ve birbirine iyice bağlanmış açıklıklar, hızlı yer altı suyu akışı ve kısa yer altı suyu kalış süresine neden olarak kirlenmeye yatkın hale gelirler (Iowa Jeolojik Araştırma, 2020).

Beslenim suyu, diğer tortul akifer türlerine göre birleşik karstik açıklıklardan kaynak ve akarsulara boşalmak üzere daha hızlı akmaktadır. Karstın birbirine bağlı geniş açıklıkları göz önüne alındığında, buradaki yer altı suyu akışı, çökellerin veya çatlamış kayaların içinden akıştan çok akarsulardaki akışa benzer. Karstik arazilerde yeterli yerüstü su kaynağı bulmak genellikle zordur çünkü su hızla sızabilmektedir. Suyun karst akiferleri boyunca hızlı hareketi, onları aşırı kirlenmeye yatkın hale getirir.

Karst, insanların kuru, birleşik mağaralardan yürüyerek ya da su dolu mağaralarda tüplü su altı teçhizatı kullanarak yer altında uzun mesafeleri keşfedebilecekleri tek yerdir. Su temini için değerli olmalarının yanı sıra, yer altı suyunun taşıyabildiğinden daha fazla mineral içerdiği için minerallerin sudan ayrılarak çökmesiyle oluşan konili ve sütunlu mineral “takılarıyla” süslenmiş bu görkemli mağaralar, turizmi de destekler (Şekil 43).



Şekil 43 - Minerallerin yer altı sularından çökmesiyle oluşan bilindik yapıları gösteren yer altı mağarası fotoğrafı (Dave Bunnell, 2006. “[Dave Bunell'in en bilinen mağara taşlarını gösteren fotoğrafı](#)” [Dave Bunnell](#)'den [CC BY-SA 2.5](#) lisansı ile).

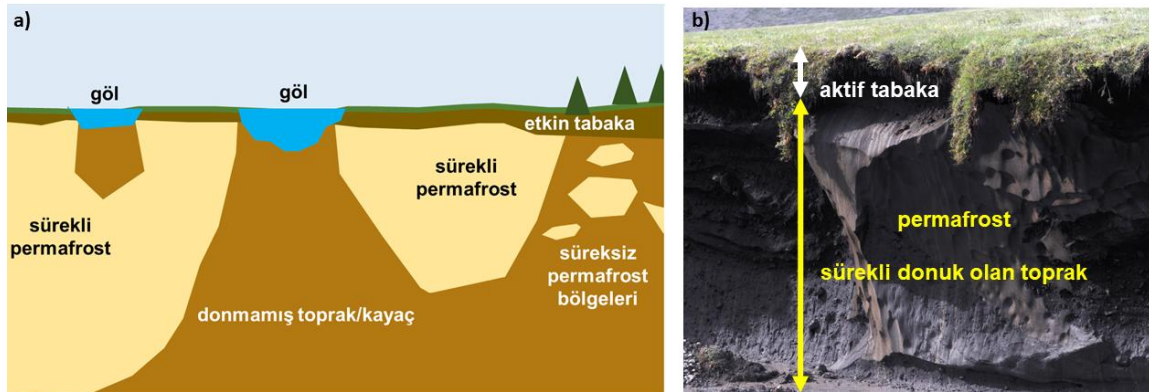
6.3 Sürekli Don Olan Ortamlarda Yer Altı Suyu

Yerkürenin soğuk uç noktalarında, yer altı suyu sistemlerinde sürekli don (permafrost) oluşur (Şekil 44). Permafrost, doymun veya doymun olmayan toprak, kaya veya çökel olabilir, ancak tanım gereği art arda iki yıldan fazla donmuş durumdadır.



Şekil 44 - Buzkürenin (yeryüzü sisteminin donmuş su kısmı) dünya haritası. Permafrost dağılımı mor tonlarda gösterilmiştir (Ahlenius, 2007).

Yüzeyin buzsuz olduğu yerlerde, her yıl donup çözülen toprak, kaya veya çökel olan etkin tabakanın altında permafrost oluşmaktadır. Etkin yer altı suyu akışı, esasen geçirimsiz olan permafrost tabakasının üstünde ve altında görülür. Aşağıya doğru drenajın önündeki bu engel, yüzeyin bataklık olmasına neden olur. Yer altı suyu sistemine önemli miktarda su aktığında, permafrost içinde donmamış zemin alanları oluşur (Şekil 45).



Şekil 45 - Permafrost, yer altının yer yüzüne yakın donmuş kısımlarıdır: a) yüzey suyunun yer altına sızdığı veya orman örtüsünün zemini yalıtıldığı daha az donmuş malzemeli donmamış ve donmuş malzemenin değişken dağılımının çizimi; b) Alaska'nın Kuzey Yamacındaki permafrostun üzerinde ince bir aktif tabakanın fotoğrafı (fotoğraf Kling, 2012).

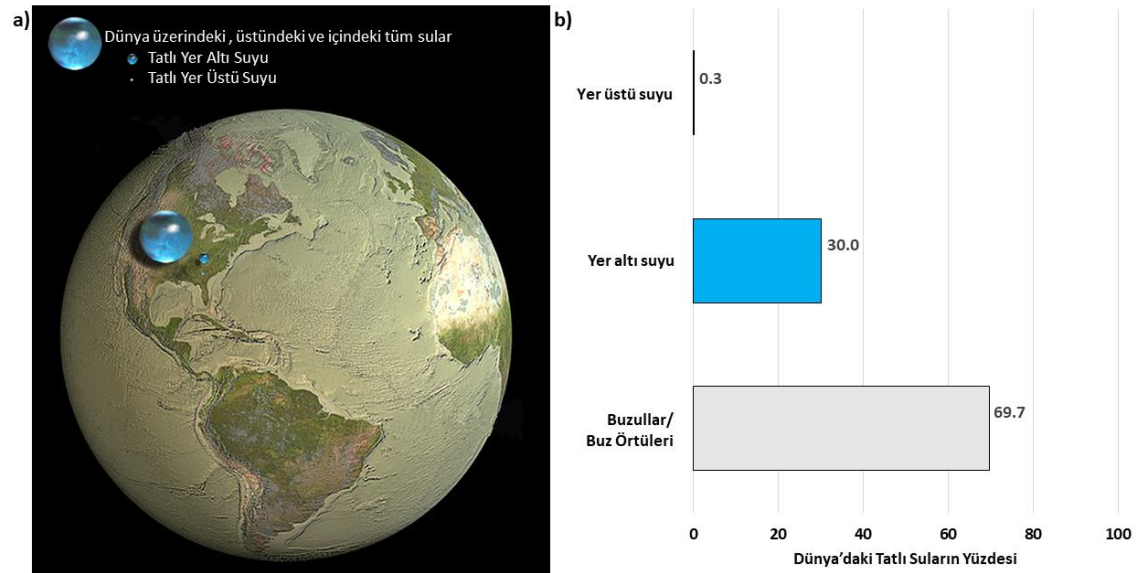
7 Yeryüzünün Hidrolojik Sisteminde Yer Altı Suyunun Benzersiz İşlevleri

Hidrolojik çevrimin yer altı suyu bölmesi, akış yolları üzerindeki jeolojik malzemelerle kimyasal olarak tepkimeye giren, nehirlerin ve atmosferin su taşıma sistemleriyle arayüz oluşturan, büyük, yavaş hareket eden bir tatlı su haznesidir (daha sığ olan bölgelerinde). Bu geniş yer altı suyu haznesi; 1) kıta yüzey sularının akışını kontrol ederek tatlı su hidrolojik çevriminin düzenleyicisi olarak; 2) yeryüzündeki malzemenin

işlemesine ve kıtalardan okyanuslara taşınmasını sağlayan bir kimyasal fabrikası ve taşıma bandı olarak; 3) bir atık deposu/işleme tesisi olarak ve 4) küresel bir yaşam destek sistemi olarak hizmet etmektedir.

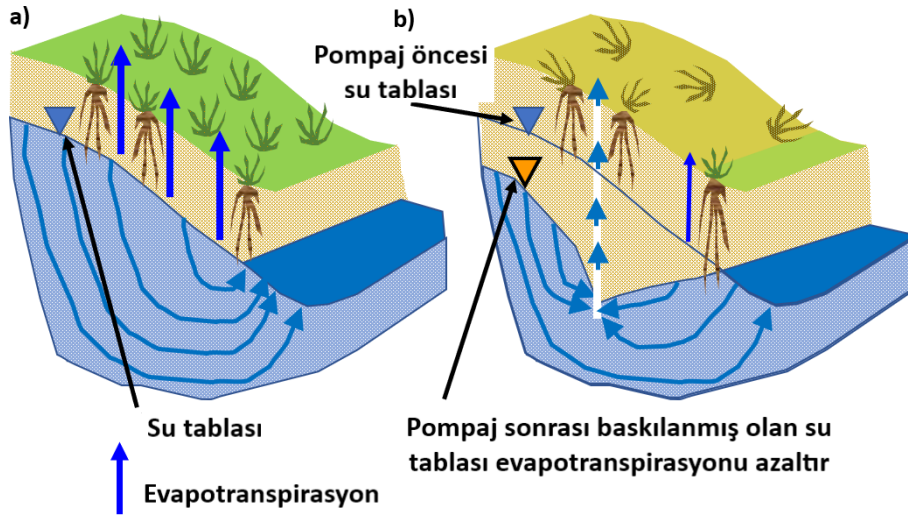
7.1 Hidrolojik Düzenleyici Olarak Yer Altı Suyu

Dünyadaki su haznelerin göreceli büyüklükleri Şekil 46'da gösterilmektedir. En büyük damla, yeryüzünün toplam boyutuna göre yüzeydeki, yüzeyin altındaki ve Dünya atmosferindeki tüm sıvı suyun hacmini göstermektedir (Şekil 46a). Bu suyun sadece % 2,5'i tatlıdır ve çoğu karasal yaşam bu tatlı suya bağlıdır. Dünyadaki toplam tatlı suyun yaklaşık % 70'i, karasal yaşamın erişemeyeceği kutup buzullarında sınırlanmıştır (Şekil 46b). Yer altı suyunun yüzey sularına 99:1 görece büyüklüğü çok önem arz etmektedir. Daha önce sunulan banka benzetmesinden yola çıkarak, hazır nakit akışı (yüzey suyu) banka bakiyesinin yalnızca %1'i kadardır. Hidrolojik "finansal" güvenlik için bu iyi bir haberdir çünkü akarsuların, göllerin, sulak alanların ve bunlara bağlı olan tüm yaşamın yer altı suyu haznesinde yedek akçeleri bulunmaktadır. Yani yağmur bir süreliğine dursa bile yüzey suları kurumaz çünkü geniş yer altı suyu haznesinden baz akış şeklinde su boşalmaya devam eder. Bu anlamda, tatlı yer altı suyu haznesi, büyük hacmiyle, hava ve iklim değişiklikleri süresince nehirleri ve sulak alanları korumak için bir tampon görevi görür. Ancak araziye, okyanuslara daha fazla su akmasına ve daha az yer altı suyunun takviye olmasına izin verecek şekilde değiştirdiğimizde (örneğin ormansızlaşma, şehirleşme veya yoğun sulanan tarım ile), tatlı su çevrimini destekleyecek daha az yer altı suyu olur.



Şekil 46 – a) Yeryüzündeki suyun orantılı hacimleri (USGS, 2019c'den uyarlanmış) ve b) Dünyanın buz, yer altı suyu ve yüzey suyu olarak depolanan tatlı su yüzdeleri. (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org, Shiklomanov, 1993'ün değerlerine dayanmaktadır).

Daha önce tartışıldığı gibi, yer altı suyu seviyeleri yalnızca hava ve iklimdeki değişikliklerden değil, aynı zamanda kuyulardan su pompalayan insanlardan da etkilenir. Üstelik yer altı suyu haznesinin geniş büyüklüğü ve suyu depolama kapasitesi, kuyuların pompalanmasıyla su seviyeleri düşürüldüğünde bir tampon görevi görür. Çünkü su, kuyuya akarken su tablasının alçalması nedeniyle ve pompaj akarsulara yer altı suyu akışını azaltmadan ya da akarsulardan suyu çekmeden önce ilk olarak yer altı suyu haznesinden çekilir. Ayrıca bazı bölgelerde, alçaltılmış su tablası evapotranspirasyon miktarını azaltır (Şekil 47), böylece yer altı suyunun kuyulara ve baz akışı şeklinde akarsulara boşalımı desteklenerek beslenme artırılmış olur. Bu durum, yer altı suyu sisteminin yüzey suyu akışlarını tamponlamasının başka bir yoludur. Tabii ki, yeni su yaratılmaz, bu nedenle evapotranspirasyona bağlı bu bitki örtüsü ölür ve daha az su gerektiren bitkilerle yer değiştirir ve alçaltılmış su tablası alanındaki yüzey su kütleleri boyut olarak küçülebilir veya kuruyabilir. Aslında su, hidrolojik çevrimin diğer kısımlarından "çalınmış" olur.

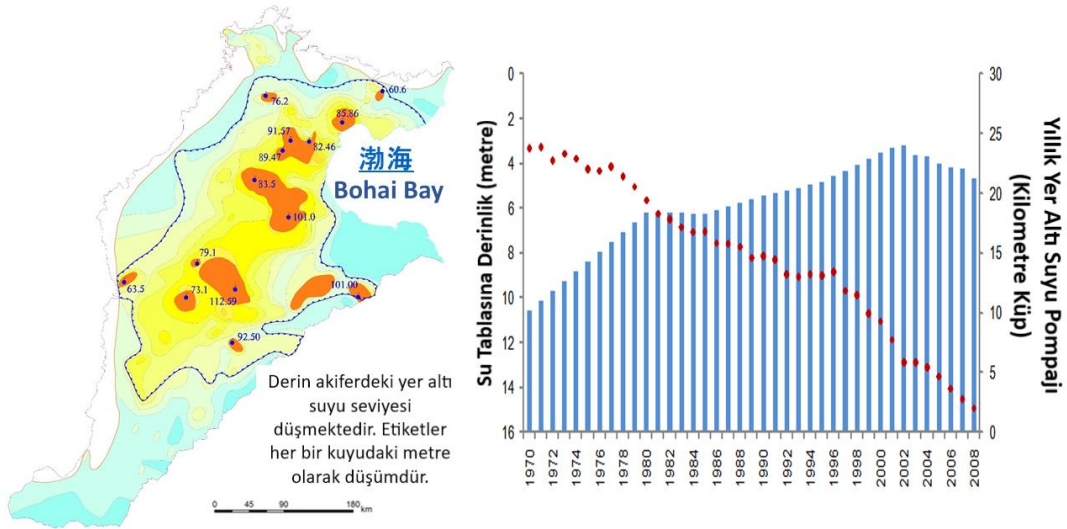


Şekil 47 – Pompaj kuyusu etrafındaki düşüm, su tablasını düşürebilir ve evapotranspirasyonu azaltabilir. Böylece beslenme artar ve su tablası daha fazla baskılanmadan kuyulara yer altı suyunun boşalımı ve akarsulara baz akışı desteklenmiş olur. Su tablasının düşmesi nedeniyle azalan evapotranspirasyon, bitki örtüsünün ölmesine neden olabilir (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Dünya genelinde yer altı suyu seviyelerinin sürekli olarak düşmesi, pompajla yer altı suyunun çekiminin beslenimden daha hızlı olduğunu gösteriyor. Yer altı suyu eksilmesinin yılda 283 kilometre küp (km^3) mertebesinde, artı veya eksi yaklaşık 40 km^3 (Wada, 2016) olduğu tahmin edilmektedir ve bunun küresel etkileri vardır. Yer altı suyunun çıkarılması, doğal beslenimden daha büyük olduğunda yer altındaki su hacmi azalırken Dünya yüzeyindeki su hacmi artar. Aşırı pompalamanın bir sonucu olarak bu artan yüzey suyu hacmi, okyanusun yükselmesine yaklaşık $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/yıl}$ katkıda bulunarak deniz seviyesinin yükselmesine önemli bir katkıda bulunmuştur, bu da

okyanuslardaki mevcut 3,1 mm/yıl artışının yaklaşık %25'ine karşılık gelmektedir (Wood ve Hyndman, 2018).

Aşırı yer altı suyu düşüşünün bir örneği, yaklaşık 40.000 km²'lik bir alan olan Kuzey Çin Ovası'nda (Zheng ve diğ., 2010) görülmektedir; burada yer altı suyu seviyeleri, sürdürülemez yer altı suyu pompalamasının bir sonucu olarak 1950'lerden bu yana uzamsal ortalama olarak 15 metrelik bir düşüşle birlikte bazı kuyularda 90 metrenin üzerinde düşmüştür (Şekil 48). Baskılanan su seviyeleri, kuru akarsulara ve arazi çökmelerine neden olmuştur.



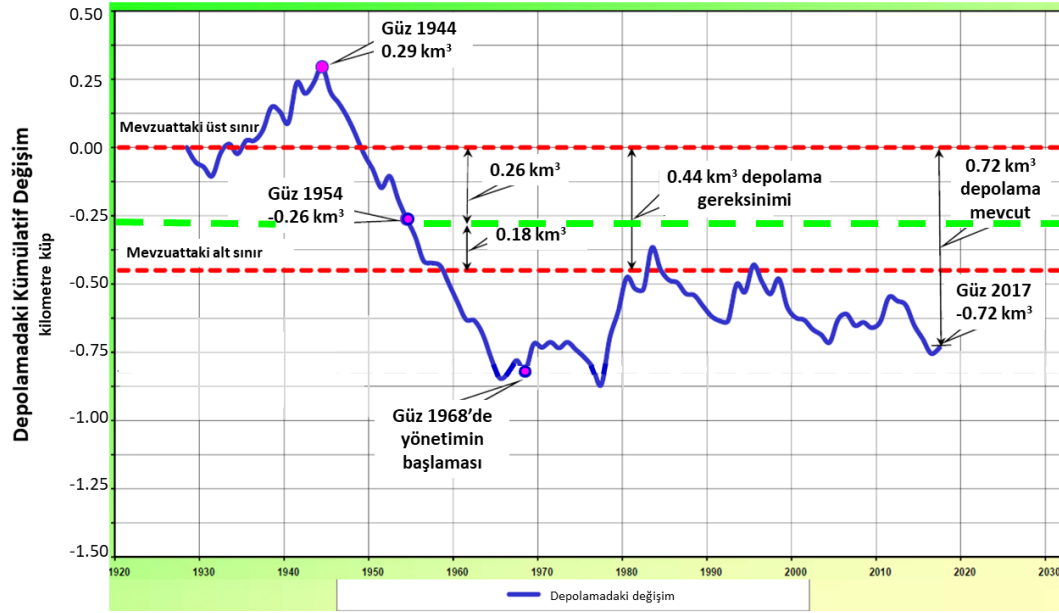
Şekil 48 - Kuzey Çin Ovası'nda, çoğunlukla tarım için olmak üzere sürdürülemez yer altı suyu pompalaması nedeniyle büyük bir yer altı suyu çöküntü konisi vardır: a) 1950'lerden bu yana su seviyelerinin metre cinsinden düşüşü, ayrı kuyularda en büyük düşüş 90 metre civarında ve uzamsal olarak ortalama düşüş 15 metre (Zheng ve diğ., 2010) ve b) uzamsal ortalananmış yer altı suyu derinliği ve 1970'den 2008'e yıllık pompaj hacmi (Zheng, 2020).

Dünya genelinde akifer boşaltımın, nehir baz akışlarını azalttığı ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olduğu göz önüne alındığında, bazı havzalarda su tablası yükseltmelerini yöneterek bu olumsuz etkileri tersine çevirmek amacıyla hidrolojik çevrimine jeo-mühendislik müdahaleleri hayata geçirilmektedir. Yönetim, daha az pompalama, daha fazla yer altı suyu beslenimi veya her ikisini birden gerektirmektedir. Uzun yıllar boyunca daha yüksek bir ortalama beslenme elde etmek için, akifer havzasından sığ yüzey akışı olarak daha az yağış kaçışır olurken, daha fazla yağış su tablasına ulaşmalıdır. Beslenimi artırmaya özgü yordam yerine göre değişmektedir fakat şunları kapsayabilir: yüzey akışını engellemek ve tutmak için peyzaj mühendisliği; arıtılmış atıksuyun, tasarlanmış sulak alanlardan veya geçirgen tabanlı yayıcı havzalardan sızdırılması ve/veya kuyuların, yağmur suyunun veya arıtılmış atıksuyun akiferlere enjekte edilmek üzere kullanılması. Yönetimli akifer beslenim programları, akifer boşaltımın azaltılması için daha yaygın hale geliyor çünkü diğer seçenek olan daha az yer altı suyu çekimini, artan nüfusun yanında tarımsal ve endüstriyel büyümenin de olduğu bir dünyada başarmak çok zordur. Bununla

birlikte, bu tür programlar mevcut akifer depolama kapasitesine dayanmaktadır ve eklenen suyun doymun olmayan gözenek boşluğunu doldurduğu serbest akiferler sadece çok depolama kapasitesi sunmaktadır.

Yer altı suyu seviyeleri (ve dolayısıyla yer altı suyu depolaması) yıldan yıla büyük ölçüde dalgalanabilir, ancak sürdürülebilir bir yer altı suyu kaynağı sağlamak için ortalaması uzun vadede sabit olmalıdır. Yağışlı yıllarda, yer altı suyu haznesine daha fazla beslenim gerçekleşir, bu nedenle depolaması yenilenir. Eğer pompalama hızının uzun vadeli ortalaması, uzun vadeli kuraklık döngüsüne uyum sağlamak için yıllar (veya on yıllar) boyunca düzgün bir şekilde yönetilirse, kurak yıllarda depolamadan su eksilmesini dengeleyebilir.

Bu tür bir yönetimin bir örneği, 1968'de Amerika Birleşik Devletleri'nin California'daki Los Angeles şehri için içme suyu sağlayan San Fernando Havzasındaki aşırı yer altı suyu çekimini durdurmak amacıyla uygulanmıştır. Su seviyeleri 1929'dan beri ölçülmekteydi ve havzadaki akiferlerde depolanan su miktarını tahmin etmek için kullanılmaktaydı (Şekil 49). Kalkınma, 1945'ten 1960'lara kadar su tablası seviyelerin düşmesine neden oldu ve yer altı suyu depolamasından bu büyük eksilme, bir yönetim planına yol açmıştır. Bu plana göre, akiferde yaklaşık 0,44 km³'lük yer altı suyunun depolanması gerekmektedir (Şekil 49'daki yeşil kesikli doğru). Islak ve kurak dönemleri hesaba katmak amacıyla, yağışlı yıllarda akifere su eklemesine depolama hacmi sağlamak için minimum depolamanın gerekli depolamadan (Şekil 49'daki alt kırmızı kesikli doğru) 0,18 km³ kadar daha az olabileceği belirlenmiştir. Yer altı suyunun bitişik yer altı suyu havzalarına boşalım yoluyla kaybolacağı yere kadar seviyelerin yükselmesini önleyebilmek amacıyla maksimum depolama, gerekli depolamadan (Şekil 49'daki üst kırmızı kesikli doğru) 0,26 km³ daha fazla olabilecekti. Şekil 49'da gösterildiği üzere, yalnızca birkaç kısa süreli istisna dışında, depolama miktarı nadiren hedeflenen aralığa denk gelmiştir. Bununla birlikte, eksilme durmuştur ve bölge halkı, sisteme eklenebilecek su miktarını artırmak için beslenim tesisleri geliştirmeye devam etmektedir.



Şekil 49 – ABD'nin California'daki Los Angeles şehrine kuyulardan içme suyu sağlayan San Fernando Havzası akiferindeki yer altı suyu depolamasının kümülatif değişimi. Kalın düz mavi çizgi, 1929'dan 2016'ya kadar yer altı suyu depolamasındaki değişimi gösterir. 1929'da depolamadaki hacim, depolamadaki sıfır değişiklik olarak referans alınmıştır. Yönetim planının amacı, üst ve alt kırmızı, kesikli doğrular arasında kabul edilebilir bir değişimle akiferdeki yaklaşık 0,44 km³ yer altı suyunu (kalın, uzun kesikli, yeşil doğru) korumak için sızma havuzlarından su aktarırken aynı zamanda kullanımı kontrol etmektir (ULARA Watermaster, 2018'den değiştirilmiştir).

Depolanan yer altı suyu, oldukça uzun bir süre boyunca doğa tarafından “bankaya” yatırılan “tasarrufları” temsil eder. Ancak, fosil yakıtlarda olduğu gibi, bu uzun vadeli tasarrufları, suyu depolamak için gereken süreye kıyasla çok kısa bir süre içinde “çekiyoruz” ve “harcıyoruz”. Dünyanın pek çok tarım bölgesinde on binlerce yıldır akiferlerde bulunan su, son yarım yüzyılda tükenmiştir. İster on binlerce yıl önce yer altına giren eski yer altı suları, ister yüz milyonlarca yıl önce gömülü antik bitkiler tarafından oluşturulan kömür yatakları ve petrol hazneleri olsun, uzun vadeli rezervlerin bu şekilde “harcanması”, bu kaynaklardan gelecek nesillere sürekli olarak daha az bıraktığımız anlamına gelir.

7.2 Yer Altı Suyu bir Jeokimyasal Fabrika ve Taşıma Bandıdır

Tüm tatlı yer altı suları çözünmüş bileşenler içerir ve tüm tatlı yer altı suları, çözünmüş yükünü akış sistemi üzerinden boşalım alanlarına taşımak için hareket halindedir. Bu süreç jeolojik zaman boyunca devam etmektedir. Bu çözünmüş bileşenlerin türü ve miktarı, yer altı suyunu içme, tarım ve endüstriyel süreçler için yararlı olup olmadığını belirler. Bugünkü haliyle Dünya yüzeyinin temel özellikleri, milyonlarca ila milyarlarca yıl önce, yer kabuğunun derinliklerindeki kuvvetler dağları meydana getirerek, çökeltilerin erozyonu ve birikmesi ile vadiler ve ovalar oluşarak, geçmişteki jeolojik olaylar ile şekil almıştır. Kuzeyde ve uzak güneyde, buzullar araziye oyarak bugünün sığ jeolojik katmanlarını oluşturmak için karanın üzerine jeolojik malzeme karışımları sürdüler.

Hidrolojik çevrim, iklim ve arazi ile uzun zaman önce eşzamanlı olarak oluşmuş ve jeolojik zaman içinde birlikte gelişmiştir.

Dünya yüzeyinde akan su, erozyon ve birikme yoluyla arazinin evrimini kontrol eden ana unsurdur. Leopold ve diğ. (1964), nehir sistemleri tarafından okyanusa taşınan çökel kütlelerine atıfta bulunarak, "Nehirler, kıtaların kalıntılarını akıtan oluklardır" diye yazmıştır. Bu özlü ifade, yer altı suları tarafından okyanusa boşaltılan çözünmüş madde kütlelerine atıfta bulunularak, "Yer altı suyu, kayaların parçalanmasının içinden aktığı esrarengiz ağıdır" şeklinde uyarlanabilir.

Akan yer altı suyu, hem ıslak hem de kurak dönemlerde yüzey suyu sistemine sürekli su temin eden ve bazen kurak alanlarda tuz düzlüklerinin gelişmesi ve karstik alanlarda bunlara bağlı obruklarla mağaraların oluşması yoluyla araziye değiştiren temel unsurdur. Nehirlerde akan suyun yaklaşık yarısı, yer altı suyu sisteminin kalıcı olarak doygun kısmından geçerek nehre boşalan uzun vadeli akıştan ve yarısı da yağış sonucu yüzey akışından kaynaklanmaktadır. Bir miktar yüzey akışı, yer yüzeyi üzerinde meydana gelir, ancak çoğu, genellikle vadoz bölgesindeki kılcal saçaklar yoluyla veya düşük geçirgenlikli katmanlara tünemiş geçici doygun bölgelerden başlatılmak üzere sığ yer altından geçerek akar.

Yer Altı Suyundaki Doğal Kimyasal Unsurlar

Doğal sularda, toplu olarak Toplam Çözünmüş Katılar (TÇK) olarak bilinen çözünmüş unsurlar bulunur ve bunların neredeyse tamamı doğal inorganik tuzlardır. Litrede 1000 miligramdan (mg/L) daha az TÇK içeren su, tatlı olarak kabul edilirken, daha fazla TÇK (> 4000 mg/L) olan su acı olarak sınıflandırılır, daha yüksek TÇK (> 10.000 mg/L) olan su ise tuzludur (deniz suyu ~ 35.000 mg/L) ve salamura (> 35.000 mg/L) son derece tuzludur. Tablo 1, suyun TÇK seviyelerini tanımlamak için kullanılan terimleri özetlemektedir. Dünyanın hemen hemen herhangi bir yerinde bir kuyu açıldığında, sığ yer altı suyunun TÇK'si düşüktür ("tatlı") ve insan faaliyetlerinden kaynaklanan kimyasallardan aşırı derecede etkilenmemişse içmeye uygundur. Daha derinlerde, su acı olur, ancak daha da derinlerde tuzludur ve bu derinliklerin altında su, tipik olarak salamura sudur. Derinlikle birlikte tatlı sudan acı suya, tuzlu sudan salamura suya bu değişim, neredeyse evrenselidir, ancak tüm yer altı suyun tuzlu olduğu ve hiçbir derinlikte tatlı veya acı su bulunmayan birkaç yer istisnadır.

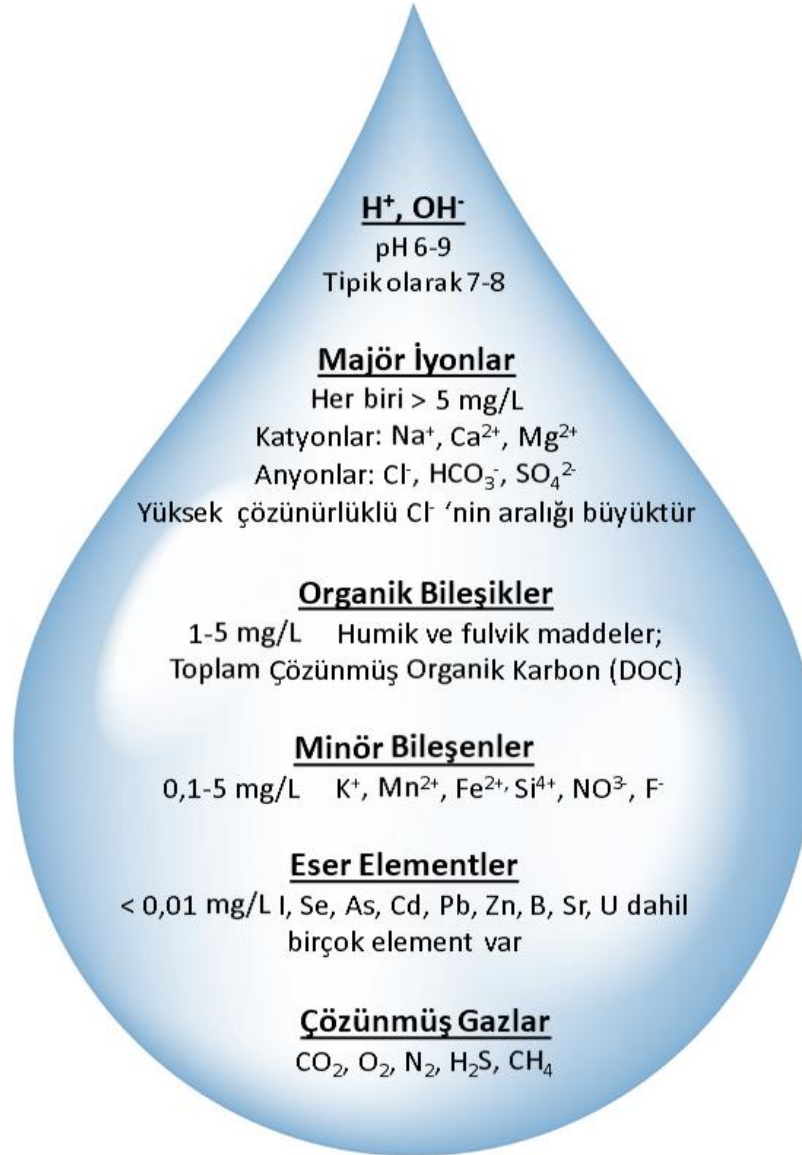
Tablo 1 – Sudaki çözünmüş katılardaki değişen dereceler için terimler.

Toplam Çözünmüş Katılar (miligram/litre)	Suyun Tanımlaması
< 1.000	tatlı
1.000 – 4.000	Alt sınırdaki içmeye uygun olabilir
> 4.000 - < 10.000	acı
> 10.000 - < 35.000	tuzlu
35000	deniz suyu
> 35.000	salamura

Doğal tatlı yer altı suyu, üç kategoride çözünmüş unsurlar içerir: ana bileşenler, küçük bileşenler ve iz bileşenleri. Yer altı suyundaki majör, minör ve eser elementlerin miktarları, beslenim alanlarındaki iklime, vadoz bölgesinin kimyasal koşullarına ve suyun içinden aktığı yer altı suyu sisteminin jeolojisine bağlıdır. Yer altı suyunda bulunabilecek element tiplerini bilmekte yarar var çünkü periyodik cetvelindeki her elementin bir su örneğinde ölçülmesi yapılabilir değildir. Tipik olarak, yer altı suyundaki çözünmüş katı kütlesinin %95'inden fazlası sadece 8 veya 9 elementten oluşmaktadır. Ortam ne olursa olsun, bazı elementler o kadar yaygındır ki daima temel bir yer altı suyu kimyasal analizin bir parçası olurlar.

Yer altı suyundaki TÇK, çoğunlukla iyonik formdadır (yani pozitif ve negatif yüklü iyonlar). H^+ ve OH^- iyonları, H_2O su molekülleri H^+ ve OH^- iyonlarına ayrıştığından suda her zaman bulunurlar. Görünüşte basit olan bu olay, aslında büyüleyici ve karmaşıktır, ancak burada sadece bazı temel kavramlar ve terminoloji anlatılmaktadır. Belirli bir su örneğindeki H^+ iyonlarının miktarı, genellikle pH ile ifade edilmektedir. Bildiğiniz gibi, saf sudaki 7 değerindeki pH'ye nötr denilmektedir, ki bu durumda H^+ ve OH^- iyonları dengededir. Doğal yer altı suyunun pH'si değişir. pH'deki değişkenlik, 7 ile 8 aralığı daha tipik olmakla birlikte Şekil 50'de 6 ile 9 olarak listelenmektedir. Saf suda pH 7 için 0,0001 mg/L H^+ iyonu bulunur. Diğer türlere kıyasla çok düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen, H^+ ve OH^- , alterasyon, çözünme, çökme ve mikrobiyolojik ve abiyotik dönüşümler dahil olmak üzere yer altı sularında meydana gelen çok sayıda reaksiyon bakımından çok önemlidir.

Birçok kimyasal bileşen, Şekil 50'de gösterildiği gibi yer altı suyunda çözünmüştür. Yer altı suyunda tipik olarak en yüksek konsantrasyonlarda bulunan altı bileşen, majör iyonlar olarak bilinir: katyon adı verilen pozitif yüklü iyonlar (sodyum, Na^+ ; kalsiyum, Ca^{2+} ; magnezyum, Mg^{2+}) ve anyon adı verilen negatif yüklü iyonlar (bikarbonat, HCO_3^- ; sülfat, SO_4^{2-} ; klorür, Cl^-) olmak üzere. Bunlar genellikle ölçülen TÇK değerindeki neredeyse tüm kütleyi oluşturur. Mevcut olabilecek minör bileşenler şunları kapsar: potasyum, K^+ ; mangan, Mn^{2+} ; demir, Fe^{2+} ; silikon, Si^{4+} ; nitrat, NO_3^- ; florür, F^- ve çözünmüş organik karbon, DOC. Bu minör bileşenlerin konsantrasyonları genellikle 0,1 ile 5 mg/L aralığındadır. Çoğu eser element, daha düşük konsantrasyonlarda bulunur, bazen de yaygın olarak kullanılan analiz yöntemleriyle tespit edebilme kabiliyetimizin altında bulunur.



Şekil 50 - Doğal tatlı yer altı sularında, organik bileşikler ve çözünmüş gazların yanı sıra majör iyonlar, minör bileşenler ve iz elementler olarak bilinen birçok çözünmüş kimyasal bileşen bulunmaktadır. Çözünmüş kimyasalların çoğu, pozitif veya negatif yüklü iyonlar şeklindedir. (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Bu majör, minör ve eser kategorilerdeki bileşenlerin miktarları ve türleri, suya doğal "kalitesinin" kimyasal kısmını temsil eder. Su kalitesinin diğer bileşenleri sıcaklık, renk, koku, bulanıklık ve mikrobiyal içeriktir. Yer altı suyundaki bazı doğal bileşenler daha yüksek konsantrasyonlarda zararlı olabilir, ancak düşük konsantrasyonlarda (örneğin iyot, florür ve selenyum) sağlığa katkıda bulunur.

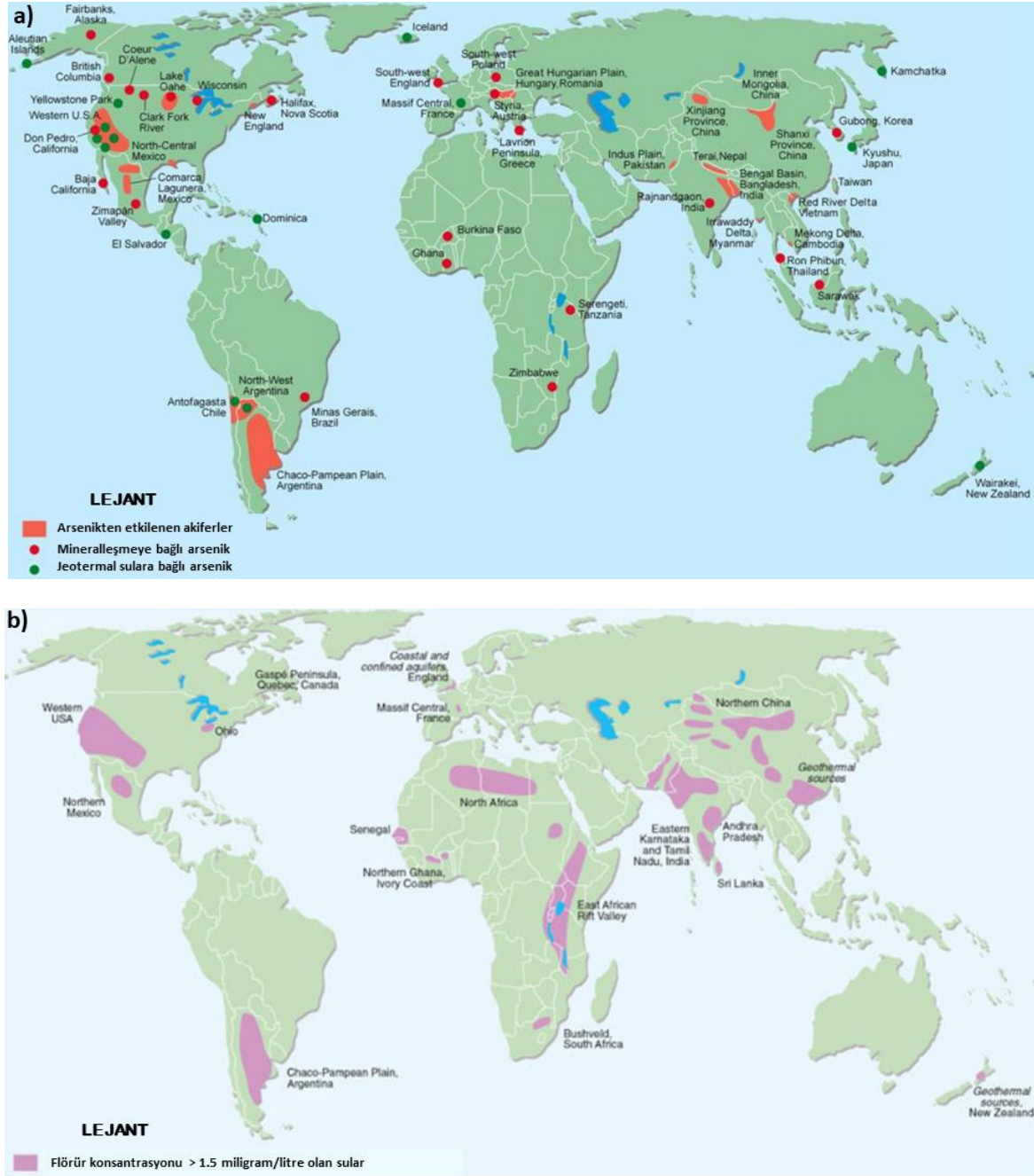
İnsan faaliyetleri kaynaklı önemli bir kirliliği olmayan hemen hemen tüm tatlı yer altı sularının içilmesi güvenlidir, ancak önemli istisnalar vardır, özellikle de doğal yer altı sularının aşırı miktarda arsenik veya florür içerdiği durumlar veya Karst sistemlerindeki yer altı suları. Aşırı arsenikli su içmek kanser dahil pek çok sağlık sorununa neden olur.

Arsenik, 60'tan fazla ülkedeki yer altı sularında zararlı seviyelerde doğal olarak bulunmaktadır ve 150 milyondan fazla insanı etkiler. Düşük florür seviyelerinin (1 ila 2 mg/L düzeyinde) diş çürüklerinin oluşumunu azalttığı gösterilmişken, aşırı florür diş florozuna veya daha kötüsü sakatlayıcı iskelet florozuna neden olur. Çin, Hindistan, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Afrika'nın bazı bölgeleri ve Güney Amerika'daki insanlar olmak üzere 200 milyondan fazla insanın yüksek florür konsantrasyonlu su tükettiği tahmin edilmektedir.

Kadmiyum, cıva, kurşun ve gümüş gibi doğal olarak oluşan diğer birçok element için güvenli seviyeler belirlenmiş olsa da, bunlar doğal yer altı sularında nadiren zararlı konsantrasyonlarda bulunur. Zararlı arsenik ve florür seviyelerinin oluşumu, iki etkenin birleşiminden kaynaklanır: jeolojik malzemelerdeki arsenik veya florür bakımından zengin minerallerin varlığı ve bunların çözünmesini ve yer altı suyuna salınmasını kolaylaştıran kimyasal koşullar.

Bangladeş gibi arz için büyük ölçüde yerel kuyulara bel bağlayan ülkelerde arsenik zarar verebilir. Arsenik içeren minerallerin bulunduğu ve oksijenin bulunmadığı jeolojik bir oluşumda bir kuyu açılırsa, çıkarılan yer altı suyunda çözünmüş arsenik ve demir bulunacaktır. Sığ kuyulardaki suyun, tipik olarak yeterince çözünmüş oksijeni olduğundan demir minerallerinin çökmesi ile arsenik sudan uzaklaşmış olur. Ancak, yüzey akışından kaynaklanan bakteriyel bulaşma gibi diğer sağlık tehlikeleri elle kazılan sığ ve kötü yapılmış sondaj kuyuları için endişe verici olabilir.

Yer altı suyundaki arsenik ve florür, yoksulluğun kaçınmaya engel olduğu birçok kırsal alanda ciddi sağlık etkilerine neden olmuştur ve neden olmaya devam ediyor. Ancak milyonlarca özel evsel kuyu sahibinin farkında olmadan arsenik veya florür bakımından zengin yer altı sularını tüketildiği daha varlıklı bölgelerde de sağlık tehdit altındadır çünkü özel kuyular, hükümet denetimine ve düzenlemelerine tabi değildir. Aşırı miktarlarda doğal oluşumlu arsenik ve florürün bulunduğu bilinen yerler Şekil 51a ve b'de gösterilmektedir.

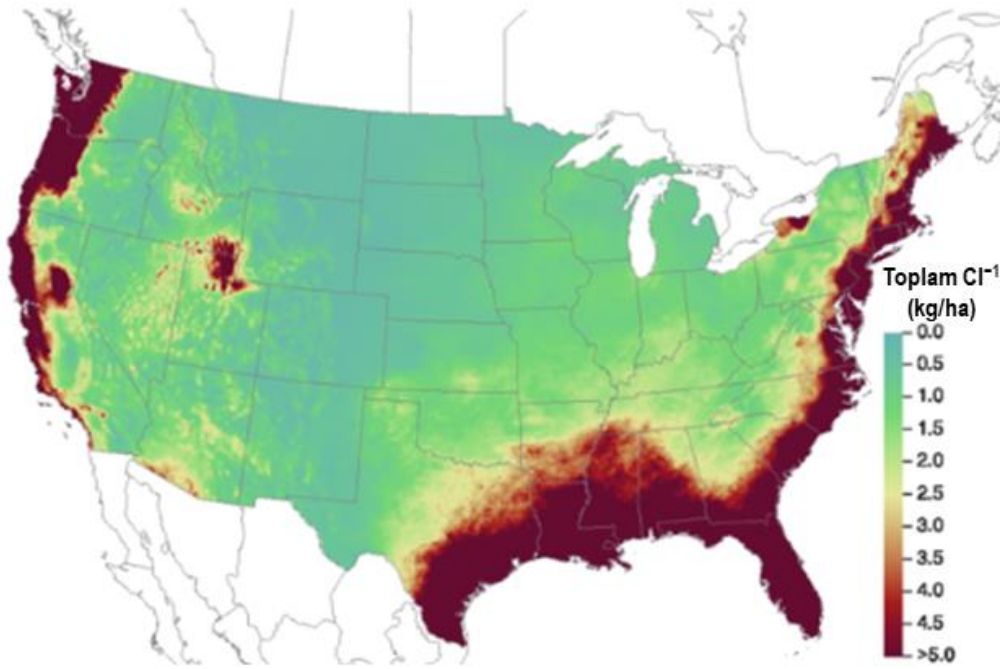


Şekil 51 - Aşırı miktarda arsenik veya florürün doğal oluşumu, insan faaliyetleri kaynaklı önemli bir kirlilik olmasa bile yer altı suyunun içilmesinin neden güvenli olmayabileceğinin birer örnekleridir: a) yer altı suyu arsenikle ilgili ve madencilik ve jeotermal faaliyetle bağlantılı olarak belgelenmiş sorunların dağılımı (> 50 µg/L) (BGS, 2020a); b) belgelenmiş yüksek florürlü yer altı suyu (> 1,5 mg/L) vakalarının yerleri (BGS, 2020b).

Yer Altı Suyundaki Çözünmüş Bileşenlerin Kökeni

Yer altı suyunun çözünmüş kimyasal yükü, yalnızca içinden geçtiği jeolojik malzemelerle olan etkileşimden değil, aynı zamanda beslenme suyunun sızmadan önce maruz kaldığı atmosferdeki bileşenlerden de kaynaklanmaktadır. Yer altı suyu beslenimini meydana getirmek üzere vadoz kuşağından sızan yağış suyu, atmosferin kıtalar üzerinde taşıdığı ıslak ve kuru aerosoller barındırır. Bu aerosoller, okyanus spreyinden, dumandan, volkanlardan, kıtasal tozlardan ve yıldırımlardan ve ayrıca fosil yakıtların yakılması ve

tarımsal herbisit ve pestisitlerin uygulanması sonucu insan faaliyetleri kaynaklı kimyasallardan gelmektedir. Küçük mikron altı boyutlarından ve atmosferdeki karbondioksit (CO_2) varlığı nedeniyle yağmurun asidik doğasından dolayı, kuru aerosoller yağış suyunda çözünmektedir. Bu çözünmüş malzeme, periyodik tablodaki birçok elementi çok düşük konsantrasyonlarda içerir. Atmosferdeki her elementin konsantrasyonu, kaynağından uzaklığına göre değişir. Örneğin, Şekil 52'de gösterilen Amerika Birleşik Devletleri üzerinde çökelen klorürün dağılımı, su kütlelerinden püsküren aerosollerin bir sonucu olarak kıyıların ve Büyük Tuz Gölü'nün yakınında daha yüksek miktarlarda klorür olduğunu göstermektedir.

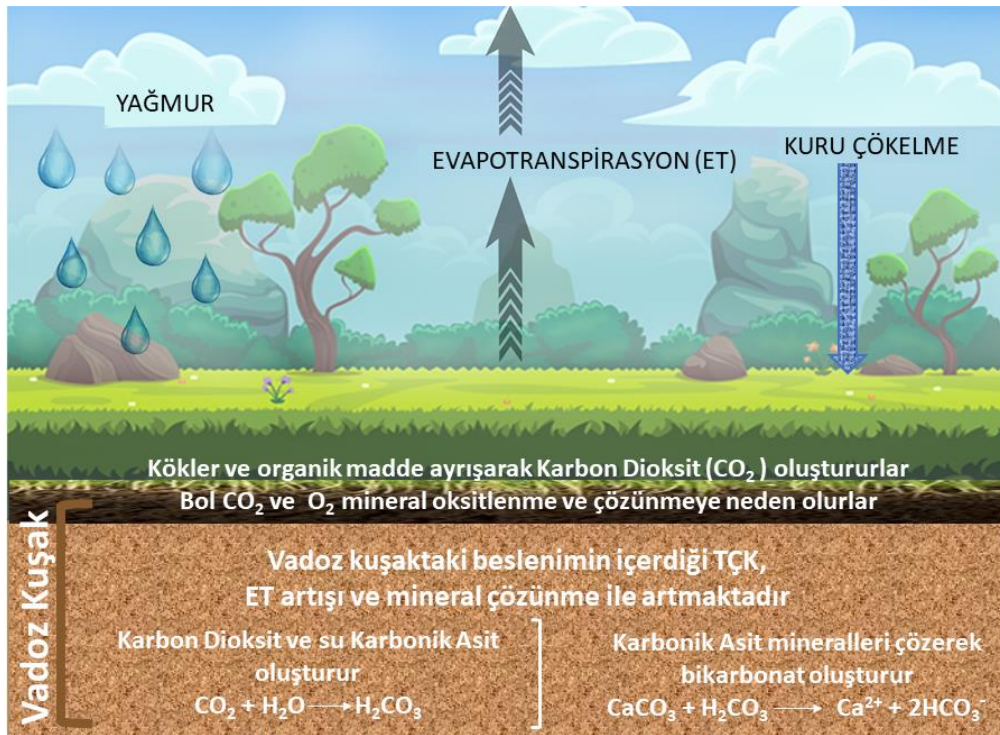


Şekil 52 – 2016 yılında kıtasal Amerika Birleşik Devletleri üzerinde atmosferden çökelmiş klorür ıslak akı parçacıklarının haritası (kilogram/hektar/yıl), düşük konsantrasyonlar yeşil ve yüksekler kırmızı renkte (NADP, 2019).

Doğal yer altı suyunun kimyası, atmosferdeki çözünmüş bileşenlerin katkısıyla oluşmaya başlamasına rağmen, Şekil 53'te şematik olarak gösterildiği gibi, su vadoz kuşağı boyunca süzülürken neredeyse tüm yer altı suları, ek çözünmüş bileşen kütlesi alır. Sızan suyun kimyası vadoz kuşakta iki şekilde değişim göstermektedir: evapotranspirasyona bağlı olarak artırma ve jeokimyasal tepkimeler (Şekil 53). Vadoz kuşak, beslenim suyuna hiçbir kimyasal kütle eklemeyecek şekilde kimyasal ve mikrobiyal olarak inert olsa bile, sızan sudaki kimyasal konsantrasyonlar, evapotranspirasyonun artırma etkisi nedeniyle önemli ölçüde artacaktır (TÇK'yi arttıracaktır).

Evapotranspirasyon vadoz kuşağı suyunun çoğunu atmosfere aktarır (küresel ortalama yaklaşık %70'dir), ancak bu suda çözünmüş maddeler toprak suyunda geride kalır, bu nedenle geride kalan sudaki çözünmüş madde konsantrasyonları yağışta olanlara

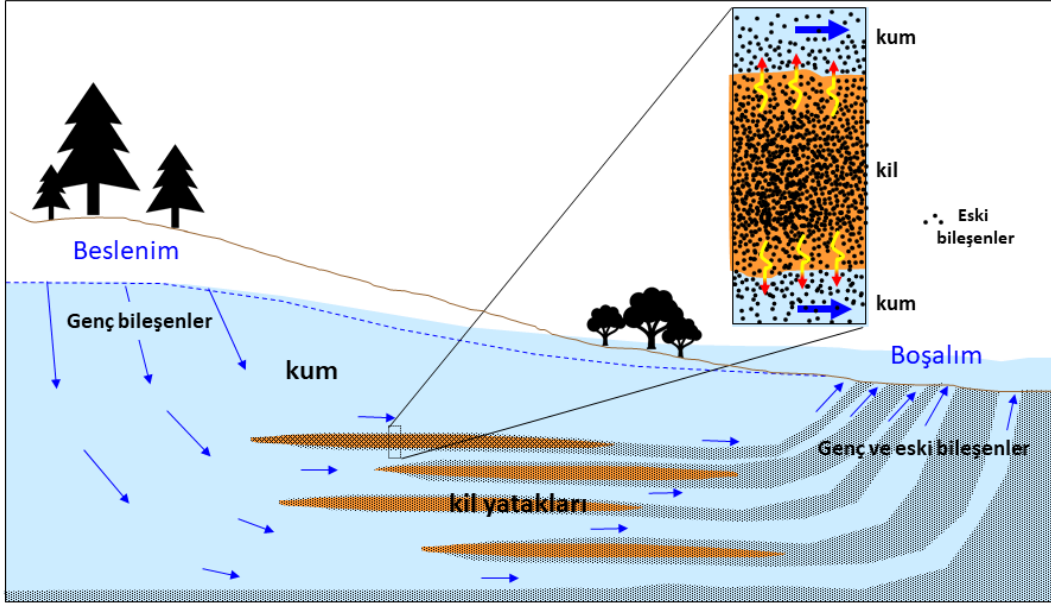
göre artmaktadır. Kurak ve yarı kurak alanlarda, çözünmüş maddelerin çoğu yağışlardan kaynaklanır. Ancak, vadoz kuşağı inert değildir; kimyasal olarak reaktiftir, çünkü oksijen atmosferden girmektedir ve vadoz kuşağı içinde, topraktaki organik maddenin mikrobiyal çürütmesi ve bitki köklerinin solunumundan dolayı karbondioksit (CO_2) üretilir. Bu tepkimelerin ve evapotranspirasyonun artırma etkisinin kombinasyonu, vadoz kuşağındaki (CO_2) gaz içeriğinin, daha kuru iklim bölgelerinde dünya atmosferininkinden 10 ila 100 kat daha yüksek ve daha ıslak iklimlerde iki ila beş kat daha yüksek olmasına neden olur. Bu (CO_2) suda çözünerek karbonik asit oluşturur ve asidik toprak suyu mineralleri çözer. Birçok bölgede vadoz kuşağında, pirit benzeri demir içeren mineraller gibi sülfür içeren mineraller bulunur ve bu mineraller, oksijen gazı varlığında sülfürik asit üretmek üzere oksitlenirler, böylece toprak suyunun asitliği ve mineralleri çözme kabiliyeti daha da artmış olur. Vadoz kuşağında bu mineral çözünme süreci, arazi alterasyonun (kayanın dağılması) önemli bir parçasıdır. Vadoz kuşağında oksijenin ve karbondioksitin varlığı, vadoz kuşağını jeokimyasal olarak özellikle reaktif hale getirir.



Şekil 53 – Mineral çözünmeyi artıran karbonik asidin (H_2CO_3) oluşmasından dolayı vadoz kuşak jeokimyasal olarak özellikle aktiftir. Karbonik asidin oluşumu bikarbonat (HCO_3^-) üretimi ve kalsit ($CaCO_3$) gibi minerallerin çözünmesi ile sonuçlanır (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Neredeyse istisnasız olarak, yer altı suyunun TÇK'si, yer altı suyunun beslenimden boşalım alanlarına hareket etmesiyle akış yolu boyunca artar (Şekil 54). Bu artış, büyük ölçüde, yer altı suyunun neredeyse durgun olduğu düşük geçirgenlikli bölgelerdeki kalıntı tuzluluk salımından kaynaklanmaktadır. Kalıntı tuzluluk, jeolojik oluşumlarda deniz suyunun bulunduğu geçmiş jeolojik dönemlerden kalan çözünmüş maddeleri içerir. Bazı

küçük miktarlarda çözünmüş maddeler ek bir ayrışmadan kaynaklanabilir ancak çoğu, kalıntı tuzluluktan ve altındaki tuzlu sulardan gelmektedir.



Şekil 54 – Killi malzemelerden (turuncu/kahverengi bölgeler) oluşan düşük geçirgenliğe sahip yatakların, yer altı suyu akış sisteminin daha geçirgen kısımlarında etkin olan yer altı suyu akışına (mavi oklar) nasıl çözünmüş bileşen kattığını gösteren çizim. Hemen hemen hiç etkin akış olmayan düşük geçirgenliğe sahip jeolojik birimlerde (örneğin, kil yatakları), kildeki neredeyse durgun gözenek suyundan difüzyon ile (yakın planda kırmızı noktalı kıvrımlı sarı oklar) eski çözünmüş bileşenler, (örneğin, burada gri gölgeler/noktalar ile gösterilen kalıntı tuzluluk) yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerdeki etkin yer altı suyu akışı bölgelerine (örneğin, soluk mavi ile gösterilen genç bileşenli kumlar) bırakılabilir. Bu nedenle, boşalım alanlarındaki yer altı suyu çıkışı, genç ve yaşlı çözünmüş bileşenlerin bir karışımıdır. Burada, anlaşılır olması için sadece birkaç büyük kil yatağı gösterilmiştir, ancak tipik olarak, boşalan yer altı suyunda farklı yer altı suyu kalış süreleri olan farklı jeokimyasal tepkiselliğe sahip bölgelerden gelen sular görülecek şekilde birçok küçük yatak vardır (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Çözünebilir mineraller yer altı suyu akışıyla dışa atıldığından, eski jeolojik araziler jeolojik zaman içinde daha az jeokimyasal olarak daha az reaktif hale gelirler. Müstesna araziler bulunan nemli bölgelerde yer altı suyunun, uzun yer altı suyu kalış süreleri olan uzun akış yollarından geçtikten sonra bile TÇK'si nispeten düşüktür, çünkü çözünebilir bileşenlerin kaynakları, milyonlarca yıllık yer altı suyu yıkaması sonucu azalmıştır. Buna karşın, jeolojik olarak genç arazilerde yer altı suyundaki TÇK tipik olarak daha yüksektir çünkü çözünebilir bileşenleri jeolojik malzemelerden temizlemek için yeterli zaman geçmemiştir. Örneğin, Kanada, kuzey Amerika Birleşik Devletleri'nin bazı kısımları, kuzey Avrupa ve Rusya'nın çoğu gibi son birkaç yüz bin yılda buzullaşan bölgeler, buzulların oluşturduğu jeolojik olarak genç arazilerdir. Genel olarak, bu jeolojik malzemeler, en son buzulların orta enlemlerden çekilmesinden sonra yalnızca 10.000 ila 15.000 yıl boyunca yer altı suyuna maruz kalmış minerallerden ve kaya parçalarından oluşmaktadır. Sonuç olarak, başkalarının yanı sıra kalsit, dolomit ve pirit gibi kolayca çözülebilen önemli miktarlarda mineraller, sızan sular tarafından çözülmeye elverişlidir ve bu alanların bazılarında, kısa kalış süreli yer altı sularda bile yüksek TÇK'nin bulunmasıyla bunların

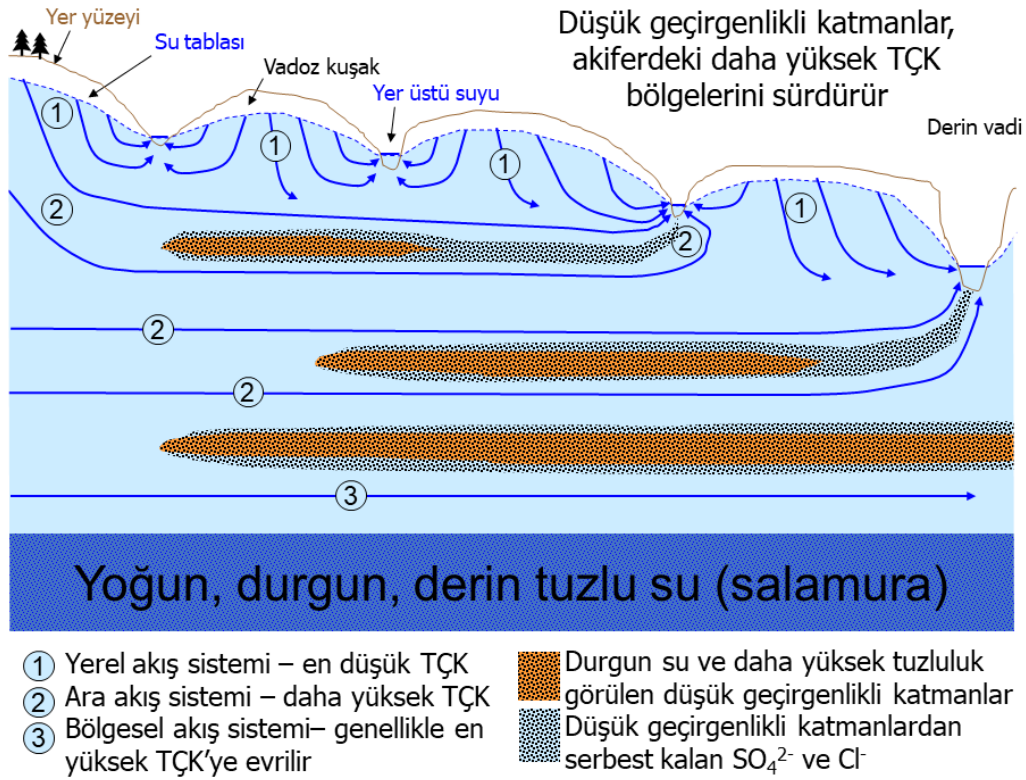
acı olmalarına neden olur. Yer altı suları derin bölgelerde daha yavaş hareket ettiğinden daha az yıkanarak atılma olmuştur, dolayısıyla genel olarak daha derindeki su daha tuzludur. Kurak bölgelerde yer altı suları, buharlaşma yoluyla yoğunlaşma nedeniyle daha fazla çözünmüş madde içermeye eğilimindedir.

Genel olarak, kısa süreli ve iyi yıkanmış akış yollarında, baskın anyon olarak bikarbonat (HCO_3^-) ve baskın katyon olarak genellikle kalsiyum (Ca^{2+}) bulunur (Şekil 55). Bu bileşim, esas olarak, Şekil 53'te gösterildiği gibi vadoz kuşağında meydana gelen süreçlerin sonucudur. Yukarıda ele alındığı gibi, vadoz kuşağı jeokimyasal olarak özellikle aktiftir çünkü kök solunumu ve mikrobiyal bozulma, karbonik asidi (H_2CO_3) üreten bol miktarda CO_2 meydana getirir ve karbonik asit mineral çözünmeyi artırarak bikarbonat (HCO_3^-) oluşumuna yol açar. Vadoz kuşakta reaktif mineraller olmasa bile, bu bölgede bir miktar (HCO_3^-) üretilir. Akarsulardaki ve nehirlerdeki taban akışının neredeyse tamamını oluşturan yer altı suyu, baskın anyonun (HCO_3^-) olduğu yerel yer altı suyu sistemlerinden gelir. Ara akış sistemlerinde daha tipik olarak görülen daha uzun akış yollarında, sülfat (SO_4^{2-}) baskın anyon olarak genellikle (HCO_3^-)'ı aşar (Şekil 55), ancak birçok istisna vardır. Bazı yer altı suyu sistemlerinde sülfat tüketen ve (HCO_3^-)'ta bir artışa ve pH'de bir azalmaya neden olan CO_2 üreten doğal mikrobiyolojik süreçler (sülfat indirgeme) nedeniyle (SO_4^{2-}) azalır. Bölgesel akış sistemleri (Şekil 55) genellikle baskın anyon olarak klorür (Cl^-) ve baskın katyon olarak sodyum (Na^+) görülür, çünkü daha uzun olan bu akış yolları, düşük geçirgenlikli kuşaklardan ve altında yatan oluşumlardan kaya tuzu (sodyum klorür) çözünmelerinin etkisi altında kalma fırsatı vermektedir. Ayrıca, genel klorür mineralleri, tüm ana mineraller arasında en yüksek çözünürlüğe sahiptir. (HCO_3^-) ve (SO_4^{2-}) üreten ana minerallerin düşük çözünürlükleri, bu iyonları düşük ila orta konsantrasyonlarda tutar.



Şekil 55 - En yüksek konsantrasyonlarda oluşan anyonlar, beslenim ve boşalım alanları arasındaki jeolojik koşullara bağlı olarak yer altı suyu akış yolları boyunca farklılık gösterir (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Klorür mineralleri o kadar çözünebilir ki, jeolojik zaman içinde klorür, büyük miktarlarda taze beslenme suyu ile yıkanan daha yüksek geçirgenlik bölgelerinden uzaklaşmış olur. Ancak klorür genellikle düşük geçirgenlikli kuşaklarda ve derin akış sistemlerinde "kalıntı klorür" olarak kalır (Şekil 56). Genel olarak, akış yolu ne kadar uzun olursa, yavaş yer altı suyu akan bölgelerinde kalıntı klorürün aktif akış bölgelerine bırakılma olasılığı daha yüksek olacaktır.

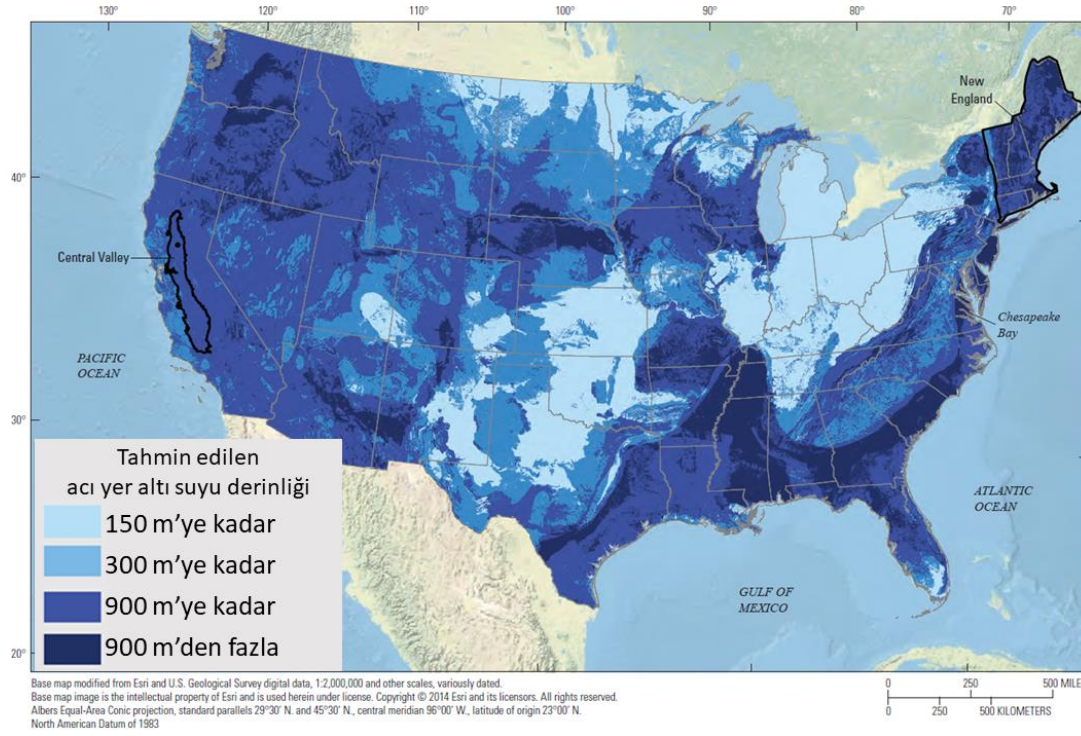


Şekil 56 – TÇK'nin yer altı suyu derinliği ile dağılımını özetleyen (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Tuzlu, Mineral Zengini Yer Altı Suyunun Oluşumu

Tuzlu yer altı suyu, tüm derin yer altı suyu kuşaklarında yaygındır. Tuzlu yer altı suyu kurak iklimlerin sığ bölgelerinde yaygın olmasına rağmen, tatlı yer altı suyu sığ bölgeler için bir normdur.

Uzun jeolojik zaman devirleri boyunca kalıntı klorürün yıkanmasından sonra, günümüzün sığ tatlı su bölgesi, üstzamanda yer altı suyunun yıkanmasının bir sonucu olarak dünya çapında kayda değer bir derinliğe kadar uzanmaktadır. Yer altı suyunun 500 metre veya daha fazla derinliğe kadar tatlı su olduğu birçok bölge vardır (Bierkens ve Wada, 2019). Bu derinliklerin altında, yer altı suyu büyük olasılıkla acı veya daha tuzludur. Tatlı su kuşağının dibinin derinliği (yani acı su kuşağının üstüne kadar) dünya çapında oldukça değişkendir. Bunu açıklamak için, kıtasal Amerika Birleşik Devletleri'ndeki acı suya olan tahmini derinlik Şekil 57'de gösterilmiştir.



Şekil 57 – Kıtasa Birleşik Devletler'de acı suyunun tahmini derinliği. En açık mavi alanlarda, acı su ile 150 m'den daha az derinlikte karşılaşılması muhtemeldir, diğer taraftan en koyu mavi alanlarda, sadece 900 m'den daha büyük derinliklerde acı suyla karşılaşılması muhtemeldir (Stanton ve diğ., 2017'den uyarlanmış).

Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzeydoğu kıyıları açıklarındaki okyanus tabanının altında tatlı su fosillerin beklenmedik varlıkları keşfedilmiştir. Bu, dünyanın bazı bölgelerinde yer altı suyunun kapsamı ve karakteri hakkında keşfedilecek çok şey olduğunu göstermektedir (Gustafson ve diğ., 2019).

Yer altı suyu akış sisteminin yüzeye boşaldığı yerde, kimyasal bileşenlerin yer altı suyu yolculukları sona erer ve hidrolojik çevrimin yer üstündeki kısmına girmiş olur. Nemli iklimi olan bölgelerde bu yolculuk, akarsulara, nehirlerle, sulak alanlara ve göllere sızma ile biterek, sonuçta okyanuslara ulaşır. Kurak ve yarı kurak bölgelerde yolculuk, ova düzlüklerine ve kuru vadilere sızma olarak sona erer. Bu tür alanlardan buharlaşma, sıg yer altı sularındaki çözünmüş maddeleri, yüzlerce ila binlerce kez yoğunlaştırarak bu alanları tarıma elverişsiz hale getirebilir. Kısacası, yer altı suyu boşalmanın kimyası, hem birçok yüzey suyun kimyasını hem de karada ve kurak bölgelerin topraklarında biriken tuzları belirler.

Kurak iklimlerde bitki örtüsü seyrek, beslenme minimum, su tablası genellikle daha derin, hidrolik eğimler düşük ve yer altı suyu kalış süreleri uzundur. Sonuç olarak, kurak alanların yer altı sularındaki çözünmüş bileşenler, nemli alanlarda yer altı suyunun beslediği ve jeolojik birimlerin yıkadığı yerlerden farklıdır ve konsantrasyonları da genellikle daha yüksektir. Kurak iklimlerde oluşan yer altı suyundaki bileşenlerin çoğu, buharlaşma ile yoğunlaşan ve nadir, büyük bir beslenme olayı onları su tablasına yıkayana

kadar yüzeyde biriken atmosferik aerosollerden kaynaklanır. Bitki örtüsünün olmaması, beslenme bölgesindeki karbondioksit miktarını azaltır; bu nedenle akifer malzemesinin karbonik asit tarafından kimyasal ayrışması daha yavaştır ve kimyasal ayrışma ile üretilen bileşenlerin konsantrasyonları daha düşüktür. Sonuç olarak, yer altı suyu nemli kuşaklardaki yer altı sularına göre daha fazla sodyum klorür, kalsiyum sülfat veya sodyum karbonat ve daha az kalsiyum karbonat içerir. Bu farklılıklara ek olarak, daha yavaş yer altı suyu akışı, kalıntı ve alttaki tuzlu akiferlerden gelen bileşenlerin sıkı yer altı suyu sistemine geçmesine ve tuzluluğun daha da artmasına yol açar.

Bazı kurak yerlerde, yer altı suları yüzeye boşaldığı halde açık su görünmez; bunun yerine su yüzeyde buharlaşır ve tuz birikintileri oluşur. Bu, yeryüzünün birçok yerinde meydana gelir. Abu Dabi tuz düzlükleri üzerinde yapılan bir çalışma, yüzeyle kesişen kılcal saçaktan buharlaşarak yaklaşık 36.000 km²'lik alanı olan bir tuz düzlüğü oluşturan suyu göstermektedir (Şekil 58). Çözünmüş kimyasal bileşenlerin çoğu, yüzeye sızan yer altı suyundan kaynaklanır ve deniz suyunun yaklaşık 10 katı bir konsantrasyon oluşturur. Kurak bölgelerdeki seyrek veya olmayan bitki örtüsü, rüzgârla taşıma süreçlerinin su tablasıyla birlikte hareket ederek sabkalar (Arapça, tuz düzlükleri) gibi benzersiz yer şekillerini oluşturmaya yol açar. Asgari bitki örtüsü sayesinde rüzgâr aktivitesi yüzeysel çökelleri derin bir şekilde aşındırır, ancak malzemeyi kılcal bölgenin altına taşıyamaz çünkü kılcal bölgenin altı tamamen doymun olduğu için rüzgâr tarafından kaldırılamaz. Böyle bir yerde yeryüzü, alttaki su tablasının şeklini ve eğimini yansıtır. Bu yüzeyler sonra buharlaşmanın tuzlu kabuklar oluşturan tuz birikimlerine neden olduğu geniş, düz, boşalım alanları haline gelir (Şekil 58).



Şekil 58 – Abu Dabi Emiriği, Birleşik Arap Emirlikleri'nde tuz düzlüğü (sabka). Bu fotoğraf düşük çözünürlüklü görünse de öyle değildir; görüntünün grenli izlenimi 65 °C'lik aşırı yüksek yüzey sıcaklığından kaynaklanmaktadır.

Koyu mavi renklerinden dolayı bazen "Mavi Havuzlar" olarak anılan alkali (yüksek pH) kaynaklar, yerkürenin mantosundan gelen yüksek sıcaklık minerallerinin yeryüzünün

tektonik aktivitesiyle yüzeye yaklaştırıldığı alanlarda bulunur (Şekil 59). Bu mineraller yüksek sıcaklık ve basınçta oluşmuştur ve yüzeye yakın ortamlarda kararsızdır, bu nedenle kolayca ayrışır. Ayrışma, ki bu durumda karbondioksitsiz olur, silisik asit (H_4SiO_4) ve hidroksit iyonları (OH^-) oluşturmak ve dolayısıyla alkaliniteyi artırmak (yani pH'nin yükselmesi) üzere hidrojen iyonunun (H^+) çıkarılarak su moleküllerinin bölünmesini kapsar. Su yüzeye boşaldığında, bu alkali sudaki kalsiyum iyonları atmosferdeki karbondioksit ile tepkimeye girer ve kalsit minerali ($CaCO_3$) çok ince tabakalar halinde su yüzeyinde çöker. Bu tabakalar daha sonra havuzun dibine batar ve yumuşak, kabarık-beyaz bir tortu oluşturur. Havuzlar mavidir çünkü su, ışık spektrumunun kırmızı kısmını soğurur ve ışık spektrumunun mavi kısmındaki renkleri gözlerimizin görmesi için bırakır ve bu etki beyaz kalsiyum karbonat tabanını üzerindeki sıg su sayesinde artar. Bunun gibi birçok havuzda yüzeye yükselen inorganik metan ve hidrojen gazı kabarcıkları gözlemlenebilir.



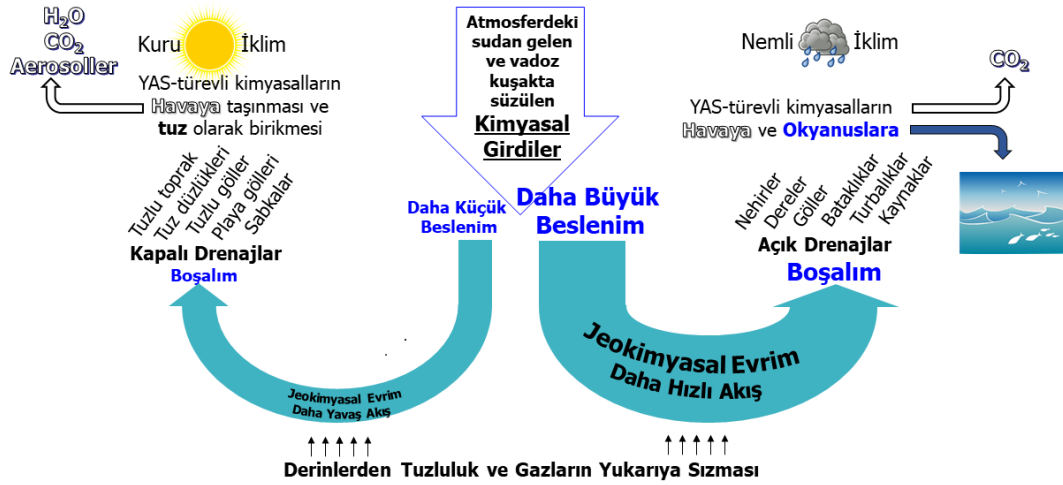
Şekil 59 – Kuzey Umman'da mavi bir havuz, yerkürenin mantosundan gelen minerallerin yüzeye ulaştığı ve ayrıştığı yerde oluşmuş ve böylece havuzun yüzeyinde ince beyaz kalsit tabakaları çökeltmek üzere atmosferle tepkimeye giren alkali su oluşmuş. Katmanlar havuzun dibine çökerek mavi rengi artıran yumuşak, kabarık-beyaz bir tortu oluşturur (fotoğraf Warren Wood, 1990'tan sağlanmıştır).

Kuru ve Sulak İklimlerde Jeokimyasal Fabrikalar ve Taşıma Bantları

Bazı istisnalar dışında yer altı suyu özetle, yağışların yeryüzüne düştüğü neredeyse saf bir durumdan (düşük konsantrasyonlu çözünmüş türler) su vadoz kuşağından geçtikçe çözünmüş türlerin konsantrasyonlarının arttığı duruma evrilir. Vadoz kuşakta köklerden gelen CO_2 gazının çözünmesi ile karbonik asit üretilerek, organik madde ve mikroplar çürür. Karbonik asit mineralleri çözerken vadoz kuşağındaki suda toplam çözünmüş katılar (TÇK) artar. Evapotranspirasyon, TÇK'yi daha da artırır çünkü su molekülleri atmosfere salınırken, tüm tuzlar alttaki yer altı suyu akış sistemini besleyen suda geride kalmış olur. Yerel yer altı suyu akış sistemlerinde sıklıkla olduğu gibi yer altı suyu kuşağındaki akış yolları boyunca hareket halindeyken, su yüzeye boşalmadan önce TÇK'de çok az artış görülebilir veya hiç artış görülmeyebilir ya da bölgesel akış sistemlerinde yaygın olduğu gibi çok daha yüksek TÇK kazanılabilir. **Hareket halindeki yer altı suyu, çözünmüş yükü beslenim alanlarından boşalım alanlarına taşıyarak çözünmüş bileşenler için taşıma bantları görevi görür.**

Taşıma bantları iki kategoriye ayrılır (Şekil 60). Birincisi, tuzların tuzlu topraklarda, tuz düzlüklerinde veya Kuzey Amerika'daki Büyük Tuz Gölü, Avustralya'daki Eyre Gölü, Güney Amerika'daki Titicaca Gölü ve Afrika'daki Çad Gölü gibi tuz göllerinde birikmek üzere geride bırakıldığı, tüm yer altı suyu boşalımın buharlaştığı veya terleme yoluyla buharlaştığı kuru iklimlerde çalışanlardır. Kuru iklimlerdeki yer altı suyu boşalım bölgesinin kimyasal yapısı, yüzey bitki örtüsü ve sucul sistemlerinin ekolojisi üzerinde etkilidir, belki de baskın etkidir. Buna karşılık, ikincisi, ıslak iklim taşıma bantları, kimyasal yüklerini kaynaklar, akarsular, nehirler ve bataklıklar gibi yüzey su kütlelerinin içine boşaltır ve bu suyun çoğu, sonunda okyanuslara boşalır.

Jeokimyasal Taşıma Bantları

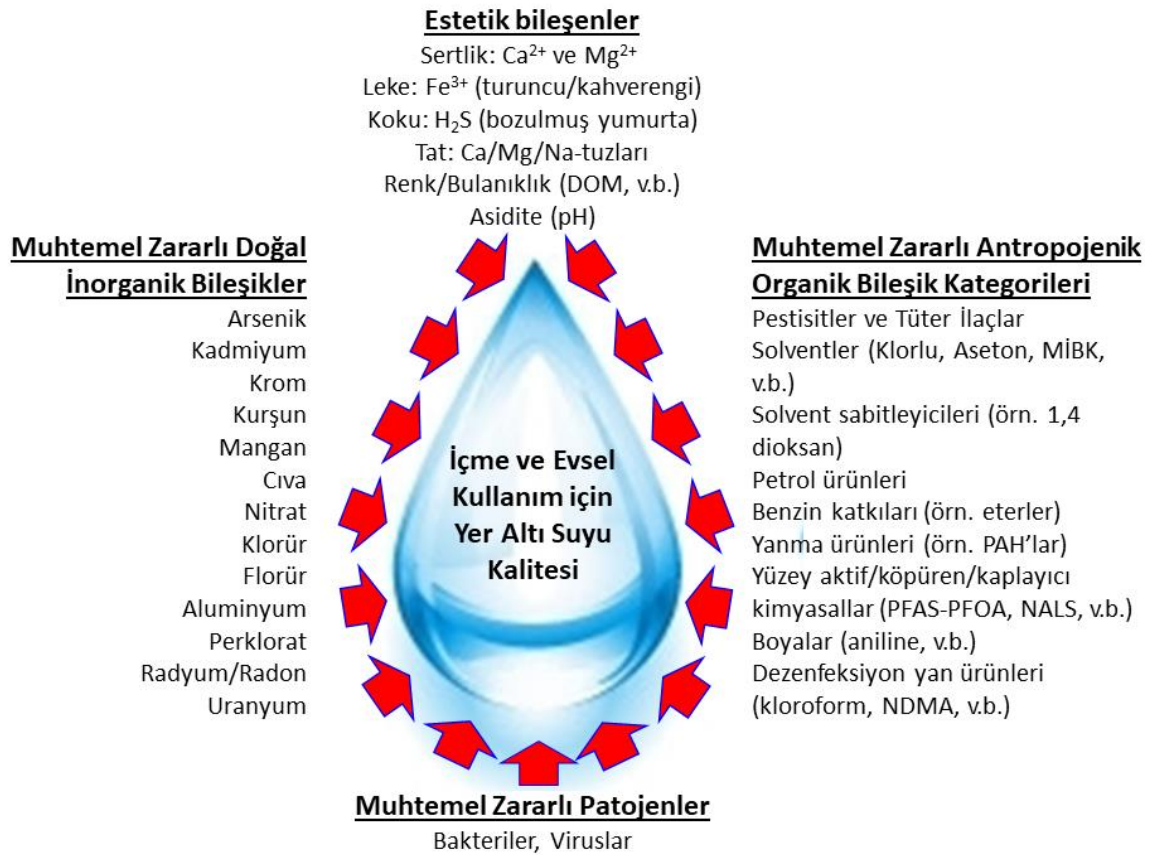


Şekil 60 – Beslenme alanlarında, aerosoller vadoz kuşağına sızan su ile girerler, vadoz kuşağında bikarbonat (HCO_3^-) oluşur ve çözünmüş bileşenler yer altı suyu kuşağına girer. Kuru iklimlerde, (HCO_3^-) iyonları bakımından zengin yer altı suyu kapalı drenajlara boşaldığında, (HCO_3^-) ve CO_2 açığa çıkar ve buharlaşma sırasında mineral birikintileri oluşur. Rüzgâr, mineral birikintileri aşındırarak atmosfere aerosollerini taşır. Nemli iklimlerde bikarbonat (HCO_3^-) iyonları bakımından zengin yer altı suyu yüzey su kütlelerine boşaldığında, atmosfere CO_2 salınır ve bir kısmı akarsu yatakları üzerinde biriken ve geri kalanı çözünmüş (HCO_3^-) ile birlikte ince askıda çökel olarak okyanuslara taşınan kalsit ($CaCO_3$) oluşur (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Akış hızları ve hidrolik yük dağılımı göz önüne alındığında, yer altı suyu sistemleri genel olarak günümüz peyzajında mevcut hidrolojik koşullarıyla denge içindedir. Başka bir deyişle, yer altı suyu kuşağındaki su basınçlarının dağılımı, aşırı yer altı suyu pompajın olduğu yerler dışında, günümüz ikliminin ortalama koşullarının belirlemiş olduğu neredeyse kararlı bir durumdadır. Ancak, hemen hemen hiçbir yerde kararlı durumda olmayan ve taşıma bantları boyunca yer altı suyunun karşılaştığı minerallerle genellikle jeokimyasal dengede olmayan yer altı suyunun kimyasal bileşimi için durum böyle değildir. Jeokimyasal dengeye gelmemiş yerlerde, jeokimyasal süreçler yer altı suyu akışıyla birleşerek sürekli olarak jeolojiden kimyasal kütle çıkararak yüzeyde boşalır. Buna karşın, on milyonlarca yıldır jeolojik olarak kararlı olan dünyanın bazı bölgelerinde, jeokimyasal fabrika ve taşıma bantları, esasen mevcut olan tüm çözünür malzemeleri çıkarmıştır. Bu yerlerde, yer altı suyu bir veya iki kilometre derinlere kadar bile tatlıdır. Esas olarak atmosferden gelen kimyasal yükten etkilenen bu tatlı yer altı suyunun TÇK'si son derece düşük olur.

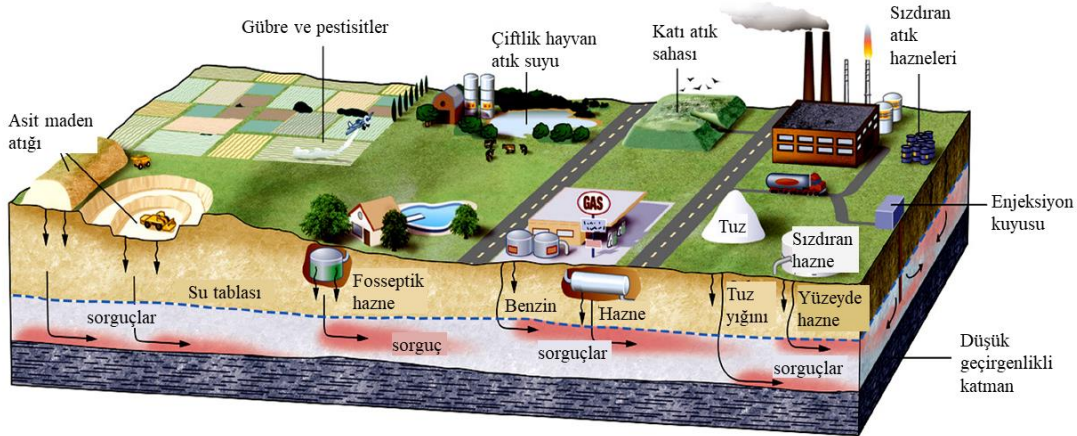
7.3 Atık Depolama Yeri Olarak Yer Altı Suyu (Gözden Irak, Gönülden de Irak)

Yeryüzünün büyük bir kısmında görülen herhangi bir şekildeki insan aktivitesinin ürettiği kimyasal bileşenler, yer altına girerek yer altı suyunun kimyasında değişikliklere neden olurlar. Dünya çapında milyonlarca farklı kimyasal bileşik üretildi ve her yıl daha birçoğu geliştirilmektedir. Sonuç olarak, geçen 100 yıllarda birçok farklı kimyasal bileşik yer altına sızmıştır, ancak bunlardan şimdilik yalnızca birkaç bininin tespit edilebilir yer altı suyu kirlenmesine neden olduğu bilinmektedir. Şekil 61, yer altı suyu kalitesinde bozulmaya neden olan kimyasal bileşen tiplerini göstermektedir. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan kimyasal bileşenler, onları yer altı suyundaki doğal elementlerden (jeojenik elementler) ayırmak için antropojenik bileşikler olarak bilinir. Yer altı suyu kimyasındaki değişikliklerin çoğu insanlara veya ekolojik sistemlere zarar vermez; ancak insan sağlığına ve çevreye zarar verebilecek olanlar, birçok bölgede muazzam sorunlara yol açtı. Yer altı suyu kirliliğinin birçok insan hastalığına ve ölümüne neden olabileceğine dair kaydedilen ilk keşif, 1854'te Londra, İngiltere'deki bir kolera salgınının çıkış nedeninin insan atıksuyu ile kirlenmiş bir su kuyusuna kadar izini süren bir doktor olan John Snow tarafından yapılmıştır. O zamandan beri yer altı suları daha çok korunmuş ve daha az salgına neden olmuş olsa da, yer altı suyu kirliliğine bağlı hastalık ve ölümler dünya çapında yaygındır.



Şekil 61 – Yer altı suyu kalitesinde bozulmaya neden olan kimyasal bileşik kategorileri (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Şekil 62, şehirlerde ve kırsal alanlarda yaygın olarak yer altı suyu kirliliğine neden olan birçok faaliyeti ve kimyasal kaynağı göstermektedir. Şekil 62'de gösterilen kirleticilere ek olarak, kentsel alanlarda bağlantı ve kırılma noktalarında genellikle sızıntı yapan kanalizasyon şebekeleri vardır. Banliyö ve kırsal alanlarda yer altı suyu kirliliğinde payı olan septik hazneler vardır. Şekil 62'de gösterilen kirlilik kategorilerinin her biri, kaynaktan yer altı suyunun akışı yönünde uzanan ve şekli nedeniyle sorguç (bulut) olarak bilinen bir yer altı suyu kirlenme bölgesine neden olur. Yer altı suyundaki doğal bileşenler gibi, antropojenik bileşikler de beslenme alanlarından boşalım alanlarına veya su kuyularına taşınır. Bazı sorguçlar boşalım alanlarına birkaç yıl veya on yıl içinde ulaşırken, diğerleri yer altı suyunun asırlarca veya daha fazla kalış süreleri ile çok daha uzun yollarda taşınır. Daha uzun ve daha derin olan bu akış yolları Şekil 35 ve Şekil 38'de gösterilmiştir. Doğal bozunma veya yer altı kimyasal ve/veya mikrobiyal süreçlerle özümleme veya seyrelme nedeniyle bazı sorguçlar yok olur. Bununla birlikte, başka sorguçlardaki kirleticiler uzaklaştırılamayabilir ya da kimyasal veya mikrobiyolojik süreçlerle, kalıcı olan ve boşalıncaya kadar akış yolu boyunca taşınmaya devam eden başka kirletici maddelere dönüştürülebilir.



Şekil 62 - Antropojenik faaliyetlerden kaynaklanan kimyasal bileşenler yer altına girerek yer altı suyunun kimyasını değiştirir ve yer altı sularında kirletici sorguçları oluşturur (Marshak, 2005'ten uyarlanmış).

İki yüzyıl önceki Sanayi Devrimi'nden önce, insan faaliyetleriyle yer altına giren kimyasal bileşenler, çoğunlukla doğal azot ve insanlardan gelen organik bileşikler ve hayvanlarının atıklarıydı. Bu kimyasallar, doğal süreçler tarafından kolayca özümleendiği veya bozundukları için nadiren zarar verdiler. Genel olarak, yer altının, modern endüstriyel toplumumuzda üretilen kimyasalların çoğundan koruma sağlayan birçok antropojenik kimyasalı özümsemesi (kendi kendini temizleme yeteneği) için büyük bir kapasitesi vardır. Ancak son zamanlarda, yer altı sisteminin bu bileşikler için özümleme kapasitesini aşan derecede aşırı yükleyecek kadar antropojenik kimyasalları saldı. Kömürden ve diğer jeolojik malzemelerden faydalı maddeleri çıkarma kabiliyeti ile on

dokuzuncu yüzyılın başlarındaki sanayi devrimi sırasından itibaren yer altı sularına, metaller ve kömür katranları dâhil olmak üzere, yeni bileşik türleri salındı. Düşük nüfus yoğunluğu, sınırlı yer altı suyu kullanımı ve seyrek endüstriyel faaliyetler nedeniyle bunlar o zamanlar sınırlı toplumsal kaygı yarattı.

1950'lerde Avrupa ve Kuzey Amerika'da kaygı yaratacak derecede yer altı suyu kirliliği:

- 1) artan endüstriyel üretim, tüketici toplumuna ve kimyasalların her yerde yer altına salınmasına neden olduğu;
- 2) belediyeler, atıksu çamurunu arazilere yaymaya, katı ve sıvı atıklar için daha sonra mühendislik ürünü düzenli atık depolamalara evrilen çöplükleri kullanmaya başladığı;
- 3) “yeşil devrimin”, kimyasal gübreler, otkıran ve böcek ilaçları ile makineye bağlı tarımın gelişmesine ve genişlemesine yol açtığı;
- 4) endüstriler, temizlik, yangından korunma, kişisel bakım ürünleri, ilaçlar ve diğer uygulamalarda bulunan, her yerde kullanılmaya başlanan, bazıları doğrudan çevreye salınan (örneğin yangınla mücadele sırasında) ve diğerleri genellikle kanalizasyonlardan sızan veya fosseptik sızıntı alanları üzerinden doğrudan yer altına sızan atıksuda bulunan karmaşık organik kimyasalları üretmeye başladığı;
- 5) kirlenmiş nehir ve göllerden gelen suyu kullanmaktan kaçınmak için yer altı suyu kullanımının artırıldığı

zaman başladı.

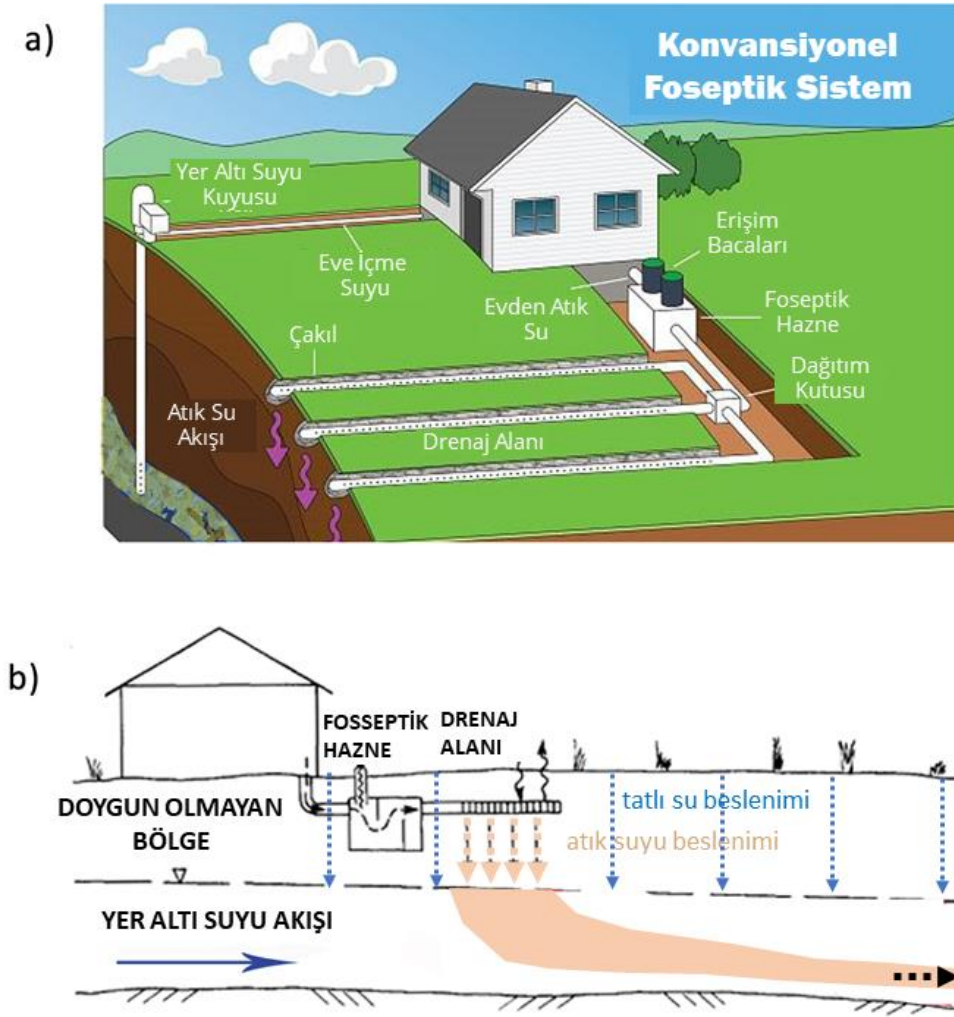
Üretilen milyonlarca organik kimyasalın çoğu ya mineral yüzeylere bağlandıkları için ya da doğal bakteriler tarafından hızla bozundukları için yer altı sularında hareketli değildir ve az etkilidirler. Ancak şu anda toplamda birkaç bin olduğu bilinen bazıları hareketlidir ve herhangi bir şekilde mümkün olsa bile yavaşça bozulurlar (direngenler) veya doğal süreçlerle daha zararlı olan başka kirleticilerle dönüştürülürler. Bu kirleticilerin çoğu yer altı suyu akışı ile taşınabilir ve birçok sanayileşmiş ülkedeki yer altı sularında hareketli direngen kirleticilerin 50 ila 70 yıllık taşınımı görülmüştür ve bu da uzun sorgucların (100 ila 1000 metre uzunluğunda) oluşumuna yol açmıştır.

1950'lerde ve 1960'ların başında yer üstü nükleer denemelerden atmosfere salınan ve sonra yer altı suyunu besleyen yağışta çözünen düşük seviye trityum konsantrasyonların (radyoaktif su molekülleri) olup olmadığını analiz ederek, o dönemde yer altına girmiş olan yer altı suyunun yerini belirleyebiliriz. Çoğu sanayileşmiş ülkede, neredeyse tüm önemli akiferlerde bugün atmosferik trityumun varlığı ve diğer antropojenik kimyasalların en azından eser konsantrasyonlarda bulunduğu görülmektedir. Genel olarak, yer altı sularında gittikçe daha fazla kimyasal bileşik türü bulunmaya devam etmektedir, ancak bu eğilimin uzun vadeli sonuçları, özellikle farklı kirleticiler türlerinin karışımlarının insan sağlığı üzerindeki etkileri ile ilgili olanları bilinmemektedir. Yoğun nüfuslu ve sanayileşmiş dünyamızda, nehirler, göller ve yer altı suları gibi çoğu tatlı su kaynağı, artan kimyasal kirleticiler çeşitliliğinin alıcılarıdır. Bu durum,

suyu içmek için güvenli hâle getirecek su arıtma gereksinimlerini belirlemedeki zorluğu artırmaktadır.

Yer altı sularını yüzey sularından ayıran özelliklerden biri yer altı suyu kirliliğinin kalış süresinin çok daha uzun süreli olmasıdır. "Tereyağdan kıl çeker gibi" yer altı suyuna gelecek kirletici madde girişlerini durdurmamız mümkün olabilseydi, yer altı suyunda hâlihazırda bulunan kirleticiler er geç yıkanarak temizlenir ya da tamamen özümленir çünkü çoğu sorguç, özümleme kapasitesi olan dinamik yer altı suyu akış sistemlerinin bir parçasıdır. Ancak birçok sorguç için, yıkanarak temizlenme veya özümleme için gereken süre yüzyıllar veya bin yıllar olacaktır. ABD'de tarım alanlarında kullanımı 1979'da yasaklanmış olan dibromokloropropan (DBCP) fumiganı bir örnektir, ancak DBCP'nin tarım alanlardaki kullanımının durdurulmasından 38 yıl sonra bile 2017'nin sonlarında California yer altı suyunda yine de yaygın olarak tespit edilebilmiştir. Buna karşın nehirlerde ve göllerde yıkanarak temizleme ve azalma, girdiler kesildikten sonra tipik olarak sadece haftalar veya aylar gerektirir. Bu nedenle, yer altı suyu kirliliğinin uzun süre kalabileceği düşünüldüğünde, kirleticilerin uzun bir yer altı suyu yolculuğuna başlamamaları için daha fazla kirliliğin yer altı suyuna girişini önlemek önemli bir hedeftir.

Yer altı suyunun bozulmasının en önemli sebeplerinden biri insanların genellikle bir "gözden uzak, gönülden ırak" bakış açısına sahip olmalarıdır. Bununla birlikte, yer altı suyu aklımızdayken bile, yer altı suyu ile ilgili kabullerimizde yanlışlıklar olduğu için atıklar yer altına salındığında ne olacağına dair gerçekçi olmayan beklentiler vardı. Örneğin, evsel atık suları bertaraf etmek için yerinde arıtma ve bertaraf sistemlerini (septik sistemler) düşünün. Septik sistemler, yer altına yerleştirilmiş atıksu arıtma kurulumlarıdır. Tipik olarak, bir septik sistemin bir haznesi ve vadoz kuşaktan yer altı suyuna atıksuyun sızması için yatay delikli boruları olan bir drenaj alanı vardır (Şekil 63). Septik sistemler, patojenleri (bakteri ve virüsleri) genellikle ortadan kaldırdıkları için hastalığın yayılmasına karşı ilk savunma hattını oluşturmalarına karşın azotu ve ev kimyasalları ve ilaçlardan türeyen diğer birçok kirletici türünü bertaraf etmek için tasarlanmamıştır. Şekil 63, bir septik sistemi ve septik sistemin kurulmasından kısa bir süre sonra yer altı suyundaki sorgucunu göstermektedir. Zamanla, refrakter bileşiklerin sorgucu, kuyu, nehir, göl veya okyanus halici gibi bir alıcıya ulaşana kadar uzadıkça uzar.



Şekil 63 - a) yakınında bir ev kuyusu bulunan tipik bir evsel septik sistemin ve b) sistem çalışmaya başladıktan sonra çok uzun süre geçmeden oluşan ilişkili sorgucun çizimleri (Wilhelm ve diğ., 1996'dan uyarlanmıştır).

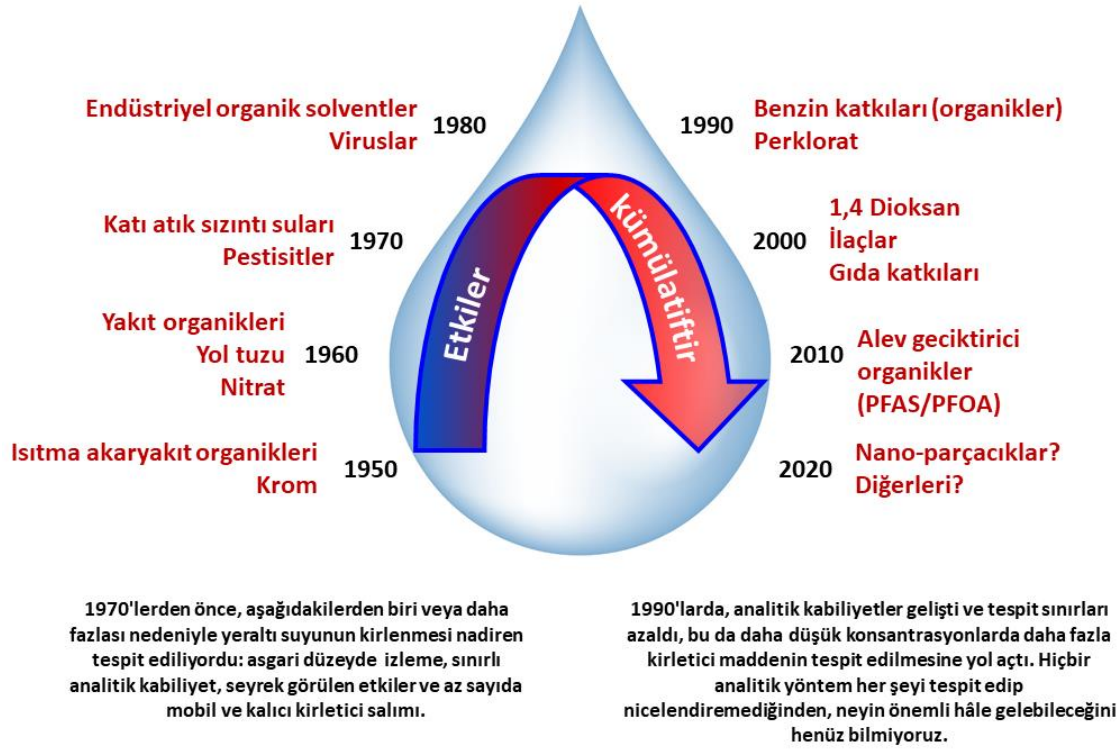
Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Avrupa Birliği'ndeki hanelerin yaklaşık beşte birinde (yerinde) septik sistemleri bulunur. Septik sorguçlar, nitrat ve fosforun yanı sıra ilaçlar, kişisel bakım ürünleri ve gıda katkı maddelerinden gelen kimyasallar içerir. Septik sistemler 1950'lerde, Amerika Birleşik Devletleri'nin hızla gelişen banliyö bölgelerinin birçok alanında standart bir ev aksamı haline gelmiştir. Bu, mühendislik analizine dayanıyordu, ancak analizde, yer altının güçlü özümleme kapasitesinin yüksek derecede sorguç zayıflaması meydana getirdiğini varsayılmıştı. Septik sorguçların her bir septik sistemden uzağa genişlemesi beklenmiyordu ve sorguçlarda kalıcı nitrat, fosfat, ilaç ve gıda katkı maddelerinin oluşması öngörülüyordu. Aslında septik sistemi olan çoğu hanenin mülkünde bir su kuyusu da vardır (Şekil 63) ve sıklıkla septik sızma alanından gelen sorguçtaki kimyasalların çekilmesini önleyecek kadar septik sistemlerden yeterince uzakta değildir. Genel olarak, yer altı sularındaki septik sistem kirleticilerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin büyüklüğü tam olarak anlaşılamamıştır, ancak burada tam olarak

anlaşılmamış olmayan, septik sistem kirliliğinin birçok göl, nehir, haliç ve körfezin su kalitesine ve ekolojisine zarar verdiğidir, çünkü bu su kütlelerine azot ve fosfor deşarjı, ötrofikasyona neden olur. Sızdıran şehir kanalizasyon sistemlerinden gelen sorguçlar da bu etkilere neden olur.

İnsan sağlığı için yer altı sularına giden insan ve hayvan atıksularından kaynaklanan temel sorun muhtemelen, örneğin bazı *Escherichia coli* (*E. coli*) bakteri ve virüs suşları gibi patojenlerin bulaşmasıdır. Bakteriler kum akiferlerinde genellikle hareketli değildir, çünkü kum tarafından filtrelenecek kadar büyüktürler, ancak çakıllı akiferlerde, karstik ve çatlaklı kaya akiferlerinde hareketli olabilirler ve virüsler çok daha küçük olduğundan akiferlerde bakterilerden daha hareketlidirler. Zararlı virüsler üç yıla kadar aktif kalabilirler ve yüksek geçirgenlikli akiferlerde kilometrelerce yol kat edebilirler. *E. coli*, su numunelerinde tespit edilmesi kolay bakterilerdir ve bunların varlığı, potansiyel virüs varlığının bir göstergesidir. Kuyu suyundaki virüslerin örneklenmesi ve analizi için artık etkili yöntemler olmasına rağmen, bu tür testler nadiren yapılmaktadır, bu nedenle yer altı sularındaki virüslere atfedilebilen hastalık sıklığı az bilinmemektedir. *E. coli* genellikle ev kuyularında bulunur.

Gıda üretimindeki sözde yeşil devrim, yeni bilimin nasıl büyük faydalar sağlayacağına, ancak bilmeyerek muazzam olumsuz yer altı suyu yan etkilerine neden olduğuna dair bir başka küresel örnektir. Devrim, 1940'larda mahsul genetiğinde (bitki melezleme) büyük değişikliklerle başladı, ancak devrimin bu yönü, tarımın son derece mekanize olması ve üretilmiş gübrelerle, herbisitlere ve böcek ilaçlarına bağımlı hale gelmesiyle kısa süre sonra sona erdi. Gübrede bulunan azotun önemli bir kısmı, insan sağlığına ve ekosistemlere zararlı olduğu bilinen nitrat (NO_3^-) olarak yer altı suyuna karışır. Kimyasal tarım ve atıksuların yer altı sularına sızmasının bir sonucu olarak, nitrat şu anda dünya çapında yer altı sularında en yaygın kirletici maddedir.

Son 70 yıldaki yer altı suyu kirliliği geçmişinin grafiği çıkarıldığında, yeni kimyasal ürünlerin geliştirilmesi ve üretilmesinin, yer altı suyu kalitesi üzerinde genellikle istenmeyen olumsuz sonuçlara yol açtığı görülmektedir (Şekil 64).

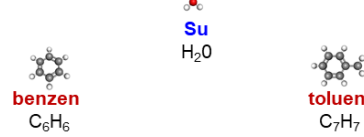


Şekil 64 - Son 100 yılda yer altı sularına giren kirlenici kaynaklarının gelişimi. Kirlenici maddelerden bazılarının örnekleri Şekil 65'te verilmiştir (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Yer altı suyu üzerinde olumsuz etkisi olan ve günlük yaşamı iyileştirmek için tasarlanan bilimsel ilerlemenin en son örneği, Şekil 65'te gösterildiği gibi topluca PFAS (per- ve polifloroalkil maddeler) olarak bilinen birkaç bin florlu organik kimyasalın geliştirilmesidir. Bunlar, Teflon, Gore-Tex, yangın söndürme köpükleri ve alev geciktirici giysi ve yatak takımları gibi modern ticari ürünleri üretmek için vazgeçilmezler. Dünyanın her yerinde, hareketli ve kalıcı oldukları yer altı sularında yaygındırlar. Biyolojik olarak birikirler (kendilerine maruz kalan organizmaların dokularında birikirler), bu nedenle şimdi birçok insan ve dünyadaki diğer birçok hayvanın kanlarında ve hücrelerinde PFAS vardır. İnsanlarda ve hayvanlarda PFAS birikimi, bağışıklık ve metabolik sistemlerin bozulması, nöro-gelişimdeki komplikasyonlar ve kanser gibi sorunlarla ilişkilendirilmiştir (Sunderland ve diğ., 2019).

Organik kirleticilere örnekler

a) Aromatik hidrokarbonlar



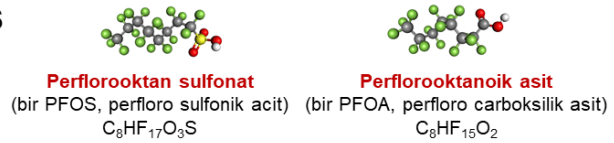
b) Pestisitler



c) Klorlu solventler



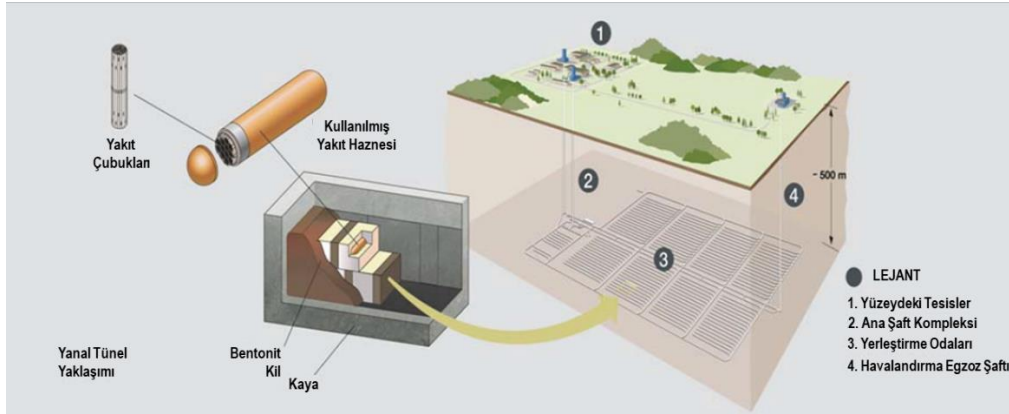
d) Yüzey aktif maddeler, PFAS (PFOS ve PFOA) gibi yangın söndürme köpükleri de dahil



Şekil 65 – Yer altı sularında tespit edilen organik kirletici sınıflarına birkaç örnek (her bir sınıf için sadece iki tane gösterilmiştir, ancak diğer GW-Project kitaplarında başka pek çoğu ele alınmıştır): a) benzin dökülmelerinden kaynaklanan aromatik hidrokarbonlar; b) pestisitler (bir herbisit ve fumigant); c) klorlu çözücüler ve d) yangınla mücadele köpükleri dahil olmak üzere yüzey aktif maddeler. Boyut ve yapısal karmaşıklığın karşılaştırılması için üstte bir su molekülü gösterilmektedir. PFAS örneklerinin, çok sayıda günlük kullanım ürünü için oluşturulmuş birkaç bin PFAS bileşiğinden yalnızca ikisi olduğunu dikkate alın (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Yer altı sularını olumsuz etkileyebilecek bir diğer bilimsel ilerleme, çizilmeye dayanıklı gözlükler, çatlamaya dayanıklı boyalar, duvarlar için anti-grafiti kaplamalar, saydam güneş kremleri, leke tutmayan kumaşlar, kendi kendini temizleyen pencereler ve güneş hücreleri için seramik kaplamalar gibi birçok ürünün imalatında kullanılan nanoparçacıkların geliştirilmesidir. Nanoparçacıklar atığımızda bulunur ve muhtemelen yer altı sularında bulunacak. Nanoparçacıkların yer altı sularında yaygın olduğu tespit edilirse, sonuçlarının ne olacağını bilmiyoruz.

Yer altı suyu kirliliğine ilişkin bu anlatımda sonuçların tümü olumsuz olmuştur, ancak olumlu sonuçlar hedefleyen yer altı suyu kuşağının bir atık deposu olarak kullanılmasına dair bir kavram da vardır. Bu kavram, yüksek seviyeli nükleer atık için derin jeolojik depoların (DJD) geliştirilmesidir. Bu atığın bir milyon yıl kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu nedenle amaç, radyoaktivitenin jeolojik zaman ölçeğinde tutulacağı derin kesimlere atıkları gömmektir. Başka bir deyişle, mevcut koşullar altında yer altı suyunun aktif hidrolojik döngünün parçası olmadığı yerlerde atıkları depolamak. Pek çok ülke DJD'leri çok düşük geçirgenlikte jeolojik tabakanın bulunduğu derinliklerde; yer yüzeyinin yaklaşık 450-600 metre altında yer altı suyunun tuzlu ve durgun olduğu ve milyonlarca yıldır bu tabakalarda bulunduğu dair kanıtların görüldüğü yerde tasarlıyor ve bazıları da işletiyor (Şekil 66). Radyoaktif olmayan ancak yavaşça bozulan kimyasallar içeren diğer birçok tehlikeli atık türü vardır ve DJD'ler bu atıkların bir kısmını çevreden izole etmek için de bir seçenektir.



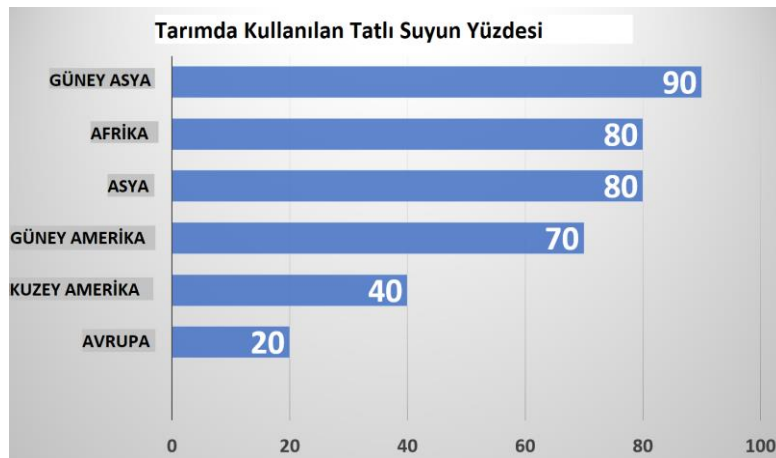
Şekil 66 - Katı nükleer atık için derin bir jeolojik depoda atık, son derece düşük geçirgenliğe sahip katı kayalarda kazılmış boşluklara gömülür (Faybishenko ve diğ., 2016).

7.4 Küresel Hayat Destek Sistemi Olarak Yer Altı Suyu

Sıvı tatlı suyun varlığı, yeryüzünde yaşamı mümkün kılmaktadır. Güneş sistemimiz ve ötesinde dünya dışı yaşam belirtilerinin arayışı, temelde sıvı su belirtilerinin aranmasıdır.

Tarım ve İçme Suyu için Yer Altı Suyu

2017'de Dünya Bankası, dünya çapında tatlı su yüzdesinin %70'inin yeryüzündeki insan nüfusunu besleyen tarımsal faaliyetler için kullanıldığını tahmin etti. Küresel Tarım Örgütü 2019 yılında, Şekil 67'de gösterildiği gibi dünyanın belli başlı bölgelerinde tarım için kullanılan tatlı su yüzdesini tahmin etmiş ve küresel tatlı su kullanımının yine %70'inin tarım için olduğunu tahmin etmiştir. Yer altı suyu, küresel nüfusun en fazla %50'sine kadar tamamen veya kısmen içme suyu sağlar ve sulama için kullanılan tüm suyun %43'ünü oluşturur (UNWWAP, 2015). Dünya çapında 2,5 milyar insan, temel günlük su ihtiyaçlarını karşılamak için yalnızca yer altı su kaynaklarına bağımlıdır (UNWWAP, 2015).

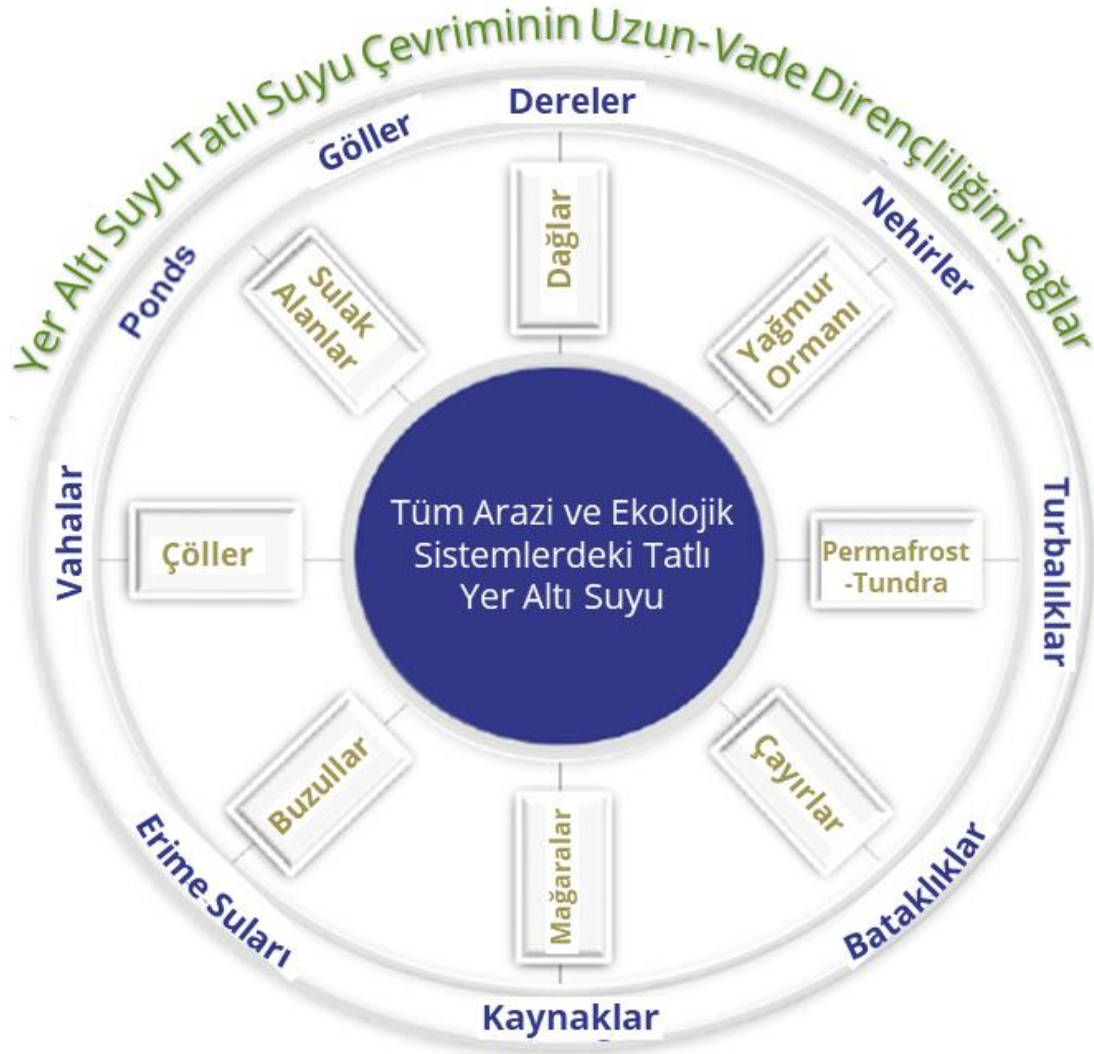


Şekil 67 – Dünya'nın belli başlı bölgelerinde tarıma ayrılmış tatlı su kullanım yüzdeleri (veri Global Agriculture, 2020'den).

Yer altı suyu, yeryüzündeki mevcut nüfusu beslemek amacıyla ihtiyaç duyulan gıda üretimi için kritik öneme sahiptir ve yüzyıllardır insanlığın epey işine yaramıştır, ancak şu anda büyük bir yük altındadır. Bugün, dünyadaki gıdanın %10 kadarı yer altı suyu sistemlerini bitirerek üretilmektedir ve beslenecek insan sayısı hızla artmaktadır. Sulu tarım, kuru arazi tarımından genellikle iki kat daha verimlidir, fakat henüz tahsis edilmemiş olan sınırlı miktarda erişilebilir su bulunmaktadır.

2020'de yaklaşık 8 milyar olan dünya nüfusunun 21. yüzyılın sonunda 11 milyara yakın olacağı öngörülmüyor. Birçok ülkenin gıda arzı tehdit altındadır. Yeşil Devrim'in getirdiği ilerlemeler sönümleniyor ve bazı bölgelerde toprak erozyonu ve tuzlanmaya bağlı olarak gıda üretim miktarında azalma var. Dünya nüfusunun %19'una (1,4 milyar insan) ancak ekilebilir arazinin yalnızca %7'sine sahip olan Çin, Kuzey Çin Ovası'ndaki onlarca yıllık yer altı suyu tükenmesini sona erdirmek için yakında dünyanın en büyük su derivasyon projesini tamamlayacak. Yahtzee Nehri'nden gelen su, suyun büyük bir kısmının geniş akiferleri takviye etmek için kullanılacağı 1.000 kilometre kuzeye çevrilecektir. Buna karşı 2024'te Çin'inkini aşacağı tahmin edilen bir nüfusa olan Hindistan'ın daha da fazla suya ihtiyacı var, ancak çözüm beklentileri çok daha az. Hindistan, ekinleri sulamak için kullanılan suyun %89'uyla Çin'in iki katı yer altı suyu kullanmaktadır. Hindistan'daki mevcut yer altı suyu kullanımının çoğu akiferleri tüketiyor, bu nedenle kullanım sürdürülebilir değildir. Hindistan'ın geniş bölgelerinde önemli miktarda yağış var, ancak yağışların büyük kısmı, gıda üretmek için kullanılmadan hızla okyanuslara yol almaktadır. İklim değişikliğinin, hâlihazırda su sıkıntısı ve su güvensizliği içinde olan birçok ülkeye daha da fazla zorluk getireceği öngörülmüyor.

Bu kitabın da açıkladığı gibi, her tür arazideki yüzey su kütleleri, yer altı suyunun sürekli olarak salınmasıyla varlıklarını devam ettirmekteler (Şekil 68). Bu olgu, günler hatta aylar yağmur olmamasına rağmen akarsularımızın kurumamasının başlıca nedenidir. Ayrıca yer altı suyu, değişken hava sıcaklığına rağmen hızlı bir şekilde ısınmaz veya soğumaz, bu nedenle akarsulara akışı, sucul bitkiler ve hayvanlar için istikrarlı bir yaşam alanı sağlar. Akarsuların ve göllerin kıyıları boyunca, alçak arazilerde ve kıyı ovalarında, ova suları ve yüksek karasal ortamlar arasında geçiş bölgesi olarak sulak alanlar (bataklıklar ve turbalıkları dâhil olmak üzere) adı verilen eşsiz ortamlar bulunur. Eşsiz su ve hava mevcudiyeti dinamikleri gösterirler, dolayısıyla asgari oksijenle sulak yerlerde “geçimini sağlamak” konusunda uzmanlaşmış yaşamı desteklerler.



Şekil 68 – Birçok farklı arazideki birçok tipteki yüzey su kütlesi, yer altı suyunun sürekli salınımı ile varlıklarını devam ettirirler (Poeter ve diğ., 2020, gw-project.org).

Sulak alanlar tüm dünyaya dağılmış durumda ve neredeyse Grönland büyüklüğündeki 12 milyon km²'den fazla bir alanı kaplıyor. Doğal sulak alanlar dünya genelinde uzun vadeli bir gerileme içindedir; 1970'den 2015'e alan olarak %35 oranında azalmış, ki bu oran orman kaybının yaklaşık üç katına denktir. Sulak alanlar, bulundukları yerde daha fazla yağmur aldıkları için değil, bitki köklerinin ulaşabileceği sıg bir su tablasının olduğu bir alanda bulundukları için var olurlar. Diğer bir deyişle, sulak alan yaşam alanlarını oluşturan ve idame ettiren sıg yer altı suyudur. Su tablasının daha derin olduğu ve bitki köklerinin soluyabildiği, ancak su tablasının derin köklü büyük bitkilerin ulaşabileceği kadar sıg olduğu daha yukarıdaki arazilerde yer altı suyu, sıg yer altı kurduğunda kurak mevsimlerde çok ihtiyaç duyulan suyu sağlar.

Yer altı suyunun, yüzey suyu akışını düzenleyerek, ekosistemleri destekleyerek ve insanlığa su sağlayarak birçok işlevi vardır. Kısacası yer altı suyu, yeryüzünün yaşam destek sistemidir. 2019 yılında van der Gun, yer altı suyu işlevlerini Şekil 69'da gösterildiği

gibi ekosistem işlevlerin Milenyum Ekosistem Değerlendirmesi sınıflandırmasına göre gruplandırmıştır.

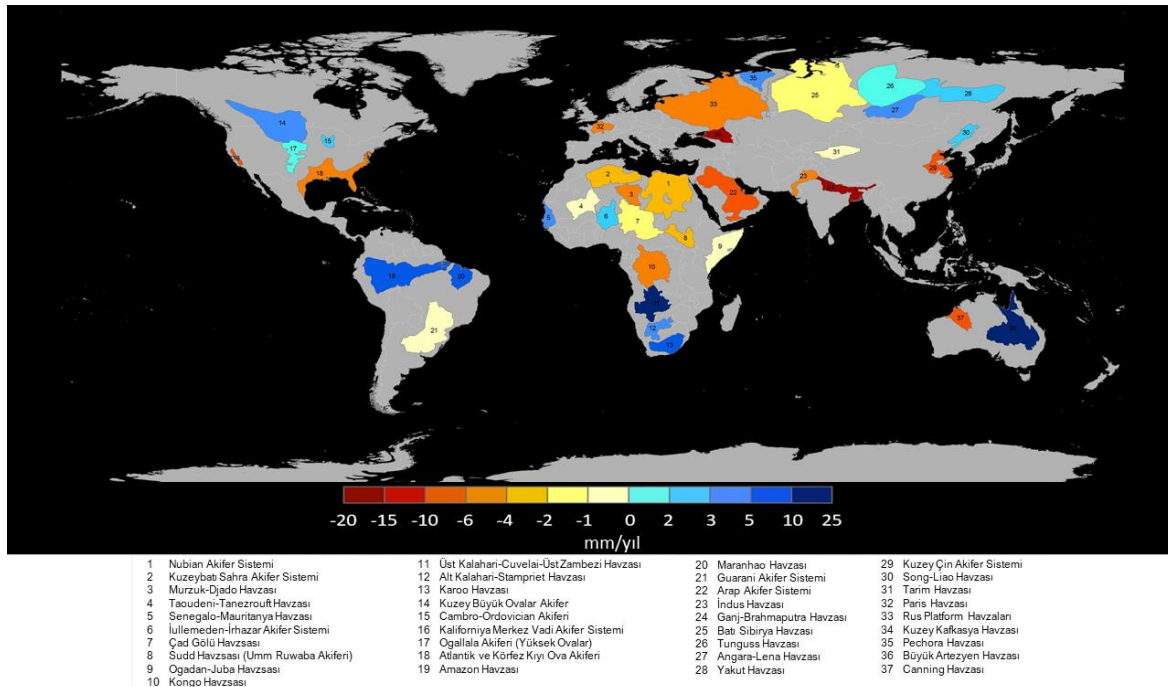


Şekil 69 - Ekosistem işlevlerin Milenyum Ekosistem Değerlendirmesi sınıflandırmasına göre gruplandırılan yer altı suyu sistemlerinin önemli işlevlerine genel bakış (van der Gun, 2019'dan uyarlanmış).

Özetle, yer altı suyu, insan toplumları için, doğrudan içme suyu için ve dolaylı olarak büyük ölçekli sulamayla gıda ve lif üretimi için hayati su arzları sağlar. Doğal ekosistemler gibi, insanlar da sürdürülebilir su kaynaklarına ihtiyaç duyar. Yer altı sularının uzun mesafeli yakınsaması ve kaynaklara boşalması, türümüze milyonlarca yıldır yaşam desteği sağlamıştır. Bugünkü fark, insanların büyük hacimlerde yer altı sularını çekme konusunda eşi görülmemiş bir güce sahip olmaları ve birçok yerde doğal hidrolojik çevrimin kabiliyetlerinin üstünde bu suyu uzun mesafeler boyunca taşıyabilecek güçte olmaları. Bu nedenle, modern insanlar çok daha fazla yer altı suyu kullanıyor ve doğanın yeniden doldurabileceğinden çok daha hızlı çekiyor, aynı zamanda antropojenik kimyasalları, doğanın onları çözümleyebileceğinden daha hızlı salıyor. Hayatımızın yer altı sularına bağlı olduğuna şüphe yok ve insan nüfusu arttıkça, bu geniş, ancak sınırlı kaynağa daha fazla talep olacaktır. Yer altı suyu sistemlerimizi anlama ve hidrolojik çevrimin kısıtlamaları dahilinde onları düşünceli bir şekilde yönetme ihtiyacı her zamankinden daha fazladır.

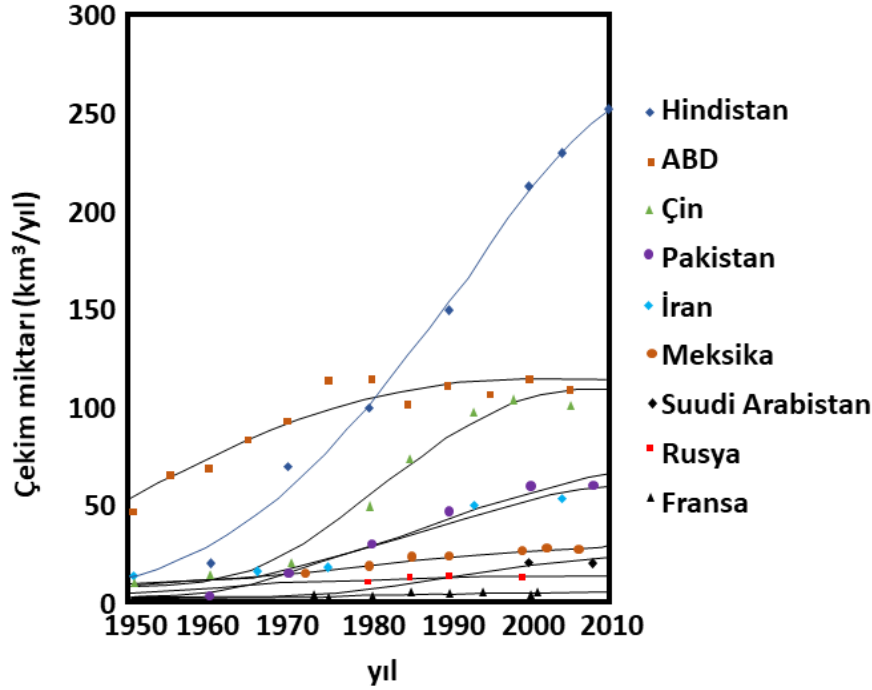
8 Kaybolan Yer Altı Suyu

Yeryüzünde binlerce akifer vardır, ancak yalnızca birkaç düzine akifer büyük olarak sınıflandırılır. Yerçekimi Geri Kazanımı ve İklim Deneyi (GRACE) adı verilen benzersiz bir NASA yeryüzü gözlem görevi tarafından toplanan on yıllık (2003-2013) uydu verileri sayesinde, şu anda birçok belli başlı akiferlerin tükenmesi hakkında çok şey bilinmektedir. Görsel görüntülere dayanan uydu görevlerinden farklı olarak GRACE, yeryüzünün yerçekimi alanındaki küçük uzay-zaman değişimlerini ölçerek büyük akiferlerin su kütlesindeki değişiklikleri bilfiil tartmıştır. Şekil 70, dünyanın en büyük 37 akiferi için GRACE verilerine dayalı olarak yıllık milimetre cinsinden yer altı suyu eksilmesini (-) veya takviyesini (+) göstermektedir.



Şekil 70 - 2003'ten 2013'e GRACE verilerine göre dünyanın en büyük 37 akiferinde yıllık milimetre cinsinden yer altı suyu eksilmesi (-) veya takviyesi (+) (NASA/JPL-Caltech, 2015'den uyarlanmıştır).

GRACE sonuçları, yer altı suyu çekiminin uzun vadeli tahminleriyle tutarlıdır. Hindistan'da 1950'den 2010'a kadar yer altı suyu çekiminin tahmini gelişimi, seçilen bir grup ülke için benzer zaman serileriyle birlikte Şekil 71'de gösterilmiştir. Hindistan'ın 2010 yılındaki yer altı suyu çekim hızı, küresel hızın dörtte birine denk gelen, yılda yaklaşık 251 km³tü. Hindistan, Çin, Nepal, Bangladeş ve Butan'ın kalabalıklarının da dahil olduğu ve toplu olarak gezegen nüfusunun yaklaşık yüzde 10'una ev sahipliği yapan Ganj-Brahmaputra havzası, akifer tükenmesi ve yer altı suyu kirliliği baskısından zarar görmektedir. Dünyadaki akiferlerin yüzde 50'ye yakını "devrilme noktasını geçmiş" olabilir, bu da doğal bir toparlanmanın yüzyıllar gerektireceği anlamına gelir.



Şekil 71 - 1950'den 2010'a kadar seçili ülkeler için tahmini ulusal yer altı suyu çekimi (Van Der Gun 2019'dan, Margat ve Van Der Gun, 2013 verisi ile uyarlanmış).

Dünyanın en büyük yenilenemeyen akifer, (fosil su) olan Nubian sistemi, Mısır, Libya, Sudan ve Çad'daki bazı bölgelerin altında bulunmaktadır. Çoğunlukla Mısır ve Libya'nın altında olan sistem, nüfus artışından güdümlü sürdürülemez çekim hızları nedeniyle yüksek stres altında kabul ediliyor. Libya, suyunun yaklaşık yüzde 95'i nedeniyle bu akifere bağımlıdır.

Nubian sistemi aynı zamanda birkaç sınır ötesi akifer anlaşmasından biri ile ön plana çıkmaktadır. Dünya çapında, belirli anlaşmalar yapılmış altı sınır ötesi akifer ve resmi olmayan anlaşmaları olan iki akifer bulunmaktadır. Cezayir'in yüzde 60'ının, Libya'nın neredeyse üçte birinin ve Tunus'un bir kısmının altında yatan Kuzeybatı Sahra akifer sistemi, yüksek su çekimi düzeyleri ile başka bir sınır ötesi akiferidir. Aynı zamanda bir işbirliği anlaşması kapsamındadır ve yenilenemeyen su olması bakımından Nubian sistemine benzerdir. Su, çoğunlukla tarımsal sulamada ve sanayide kullanılmaktadır.

Mevcut su kullanımına, beklenen nüfus artışına ve ekonomik büyüme senaryolarına dayalı projeksiyonlar, gelecek on yılda, egemen sınırları aşan yaklaşık 600 akifer dahil olmak üzere su mevcudiyetinde önemli yetersizlikler olacağını göstermektedir. Akiferlerin tükenmesi, gezegendeki iki yer altı suyu sorunundan en belirgin olanıdır, diğer sorun yer altı suyu kirliliğidir. Kirlilik, akifer tükendikten sonra kalan suyun yararlılığını azaltır. Yeryüzündeki yer altı su kaynaklarının yönetimindeki başarısızlık, insan toplumunun küresel istikrarına yönelik bir tehdittir.

9 Yer Altı Suyu Yönetiminde Zorluklar

GW-Project'e katmak üzere hazırlanan yüzlerce kitap, "gözden ırak" yer altı suyu bulmacasının nice parçasına ait bilgileri kazandırmayı amaçlamaktadır. Yer altı suyunun ekoloji ve insanlığı desteklemedeki temel rolüne uygun olarak hizmet edebilecek şekilde yer altı suyu sorunlarını çözmek için, yer altı suları hakkında derin bilimsel bilgiden daha fazlasına sahip olmamız gerekir; ortak malların trajedisini savuşturmak için yer altı suyu akışının doğası ve karmaşıklığı ile tutarlı bir yönetişim (yasalar, yönetmelikler, yönergeler) de olmalıdır.

Akıllı su yönetimine ulaşmak için en iyi yönetim biçimiyle ilgili sorunların çözümü, su ve havanın küresel olarak çevrimdeki akışkanların, hayat için gerekli olduğunu kabul ederek başlamalıdır. Hem su hem de hava miktar olarak sınırlıdır ve bu miktar zamanla değişmez. Yüz milyonlarca yıldır yeryüzündeki su miktarı aynıdır. Değişebilen ve yönetilmesi gereken şey, suyun hidrolojik çevrim içindeki hareket hızı ve yaşamı sürdürmek için suya ihtiyaç duyulan yerde ve zamanda bulunan suyun kimyasal/biyolojik kalitesidir.

Su ve hava küresel olarak dolaşan sıvılar olduğundan, insan faaliyetlerin bu sıvılar üzerindeki etkileri, faaliyetlerin gerçekleştiği meydana geldiği yerle sınırlı değildir, etkiler daha çok dünya çapında ardışık olarak görülür. "Küresel Düşün, Yerel Hareket Et" ifadesi su yönetimine özellikle uygundur.

Su yönetimi için "yerel" ifadesinin en yaygın olarak seçilen tanımı bir su havzasıdır (yani yerküre yüzeyinin, suyun nehir kolu üzerindeki belirli bir çıkış noktasına ulaşması için yüzeyde aşağıya doğru potansiyel olarak akabileceği kısmı). Su havzalarının yönetim birimleri olarak seçilmesi, karmaşık yer altı suyu sistemini dikkate alınmadan yüzey suyu koşulların ölçümünü basitleştirir.

Neyse ki, birçok durumda, özellikle 1000 km²'den büyük havzalarda, yer altı suyu akış sisteminde, havza yüzey çevresinin altındaki dikey sınırı geçen çok az net akış vardır ya da hiç yoktur. Bu durumlarda, altındaki yer altı suyunu yönetmek için bir yüzey havzası birimini kullanmak mantıklıdır. Ancak dünyanın en büyük ve en önemli akifer sistemlerinin çoğu, 100.000 km²'yi aşmakta ve birçok farklı yüzey havzasının altında bulunmaktadır. Bu tür büyük akiferlerin yönetimi, akiferin tüm alansal boyutunu kapsamalıdır.

Birçok su havzası ve akifer, yerel, bölgesel ve ulusal siyasi birimlerin sınırları ötesine geçer. Çoklu yargı alanlı su yönetimi, yer altı suyu yönetiminde büyük bir karmaşıklık yaratmaktadır ve şu anda etkili yönetimin önündeki en büyük engeldir. Çok uluslu havza yönetişiminin uzun vadede başarılı birkaç örneği vardır: 1) Ren Nehri'nin Korunmasına İlişkin Sözleşme, ve 2) Laurentian Büyük Göller için Büyük Göller Su Kalitesi Anlaşması başarı örnekleridir, ancak bu düzenlemeler ağırlıklı olarak yüzey suyu sorunları ile ilgilidir, yer altı suyu ile değil.

Sınır ötesi akiferlerin yönetimi için yasal mekanizmaların mevcut kısıtlılığı, Pateiro (2017) tarafından belgelenmiştir. Burchi (2018), uluslararası sınırları aşan altı akifer için yönetim anlaşmalarını listelemiştir. En eski anlaşma (1977), Cenevre akiferinin yönetimi için Fransa ve İsviçre arasındadır. Diğer beş anlaşma daha yenidir, çoğu 2007 sonrasındır ve çoğu tam olarak uygulanmamıştır.

Çoğu yer altı suyu sorununda ortak olan yönlerin tanınmamasından dolayı birçok ülkede yer altı suyu, kötü yönetimden zarar görmektedir.

- Yer altı suyu sorunlarında, nedenleri ile sorunların dikkat çekmesi için yeteri kadar ciddi bulunduğu zaman arasında tipik olarak uzun bir gecikme görülür. Olması gerekenden daha sık olarak neden ve sonuç ilişkileri, düzeltici eylemleri tetikleyecek kadar net değildir. Bu durum, nehir ve göllerdeki balık ölümleri gibi neden ve sonuç ilişkisinin genellikle net olduğu ve kısa bir süre içinde meydana gelmesi nedeniyle hızlı iyileştirme için düzeltici önlemlerin alınabildiği için nehir ve göllerdeki ortak sorunlardan farklıdır.
- Pek çok yer altı suyu sorunu ve özellikle kirlilik sorunları için, düzeltici faaliyetlerden fayda sağlamadan önce çok zaman (genellikle on yıllarca) gerekir, bu nedenle bizim nesil tarafından alınan düzeltici önlemlerden elde edilen önemli faydalar, çoğunlukla gelecek nesillerde birikmiş olacaktır. Bu durum, sürdürülebilirliğe yönelik geniş bir toplumsal taahhüt yoksa, düzeltici eylemleri engellemiş olur.
- Yer altı suyu sorunları, çok yaygın olmalarından ötürü küresel su krizinin büyük bir kısmını oluştursa da, neredeyse tüm yer altı suyu sorunları yereldir, çünkü her biri genellikle tek bir akifer, tek bir topluluk, tek bir kuyu veya tek bir aileyi ilgilendirir. Her sorun yerel olduğundan ve kendi sahasına özgü özellikleri olduğundan, sorun çözümlerine dâhil edilmesi gereken her sorunun kendi özellikleri vardır. Yer altı suyu yönetişimin yapısı, akifer çapında olanlardan tek tek kuyulara kadar olan tüm ölçeklerdeki sorunlara yanıt verecek kadar esnek olmalıdır.

Kayıtlar, yer altı suyu yönetişimine yönelik geleneksel yaklaşımların dünya genelinde kötü performans gösterdiğini gösteriyor. Bu, kısmen, sentez haline getirilmiş yer altı suyu bilgisinin eksikliğinden kaynaklanmaktadır, ancak esas olarak yönetişime yönelik yetersiz yaklaşımlardan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle GW-Project, yalnızca yer altı suyu bilimine ışık tutmayı değil, aynı zamanda yer altı suyunun iyi yönetişimini sınırlayan faktörleri ve dünya çapında en etkili olduğu kanıtlanmış yaklaşımları belirleyerek yer altı suyu yönetişimini incelemeyi de hedeflemektedir.

Su için etkili yönetim düzenlemelerinin oluşturulması, su ve havanın küresel olarak dolaşan ve tüm yaşam için hayati olan sıvılar olduklarının açıkça tanınması ile başlamalıdır. Bu tanınmanın sonucunda, su ve havanın, anayasal yetkisi olan herhangi bir hükümet düzeyine emanet edilen yönetimin mülkiyetine tabi olmayan ortak "mallar"

olarak yönetilmesi gerekir. Atmosferdeki havanın ortak bir mal olarak yönetimi sorgulanmamış, ancak suyun ortak bir mal olarak sınıflandırılması sorgulanmıştır.

Yer altı suyu, özellikle bazı yetki alanlarında pompalamanın çevredeki mülklerin altındaki su akışı üzerindeki ya da yüzeydeki ortama etkisine bakılmaksızın bir kuyudan dışarı atılarak pompalanabilen, petrol veya doğal gaz gibi "uçucu bir kaynak" olarak yorumlanmıştır. Yer altı suyunun yönetimi, ancak yer altı suları da dahil olmak üzere tüm suların mülkiyete tabi olmayan ortak bir mal olarak mevzuatta açıkça tanınması durumunda başarılı olabilir. Ayrıca suyun doğal sistemlerden çıkarılması, su doğal sisteme geri verilirken çıkarma hızının ve su kalitesinin denetlenmesine tabi olmak üzere bir intifa hakkı (zarar vermeden veya yok etmeden geçici bir kullanım hakkı) olarak tanınmalıdır.

Yer altı suyunun tükenmesi ve kirlenmesi gelecek nesillere bıraktığımız sorunlardır ve yer altı suyu yönetimi için daha iyi bir ahlaki çerçeveye ihtiyaç vardır (Abrunhosa ve diğ., 2018). Kuşaklar arası adalet ilkelerinden doğan ve yaygın olarak kabul gören ahlaki normlar, iyi yönetimde geçmiş veya mevcut başarısızlıkların bedelini gelecek nesillere ödetmememizi gerektirir. Bu ilke, Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinde de yer verildiği gibi, sürdürülebilir kalkınma kavramının tam da kalbinde yer alacak kadar temeldir.

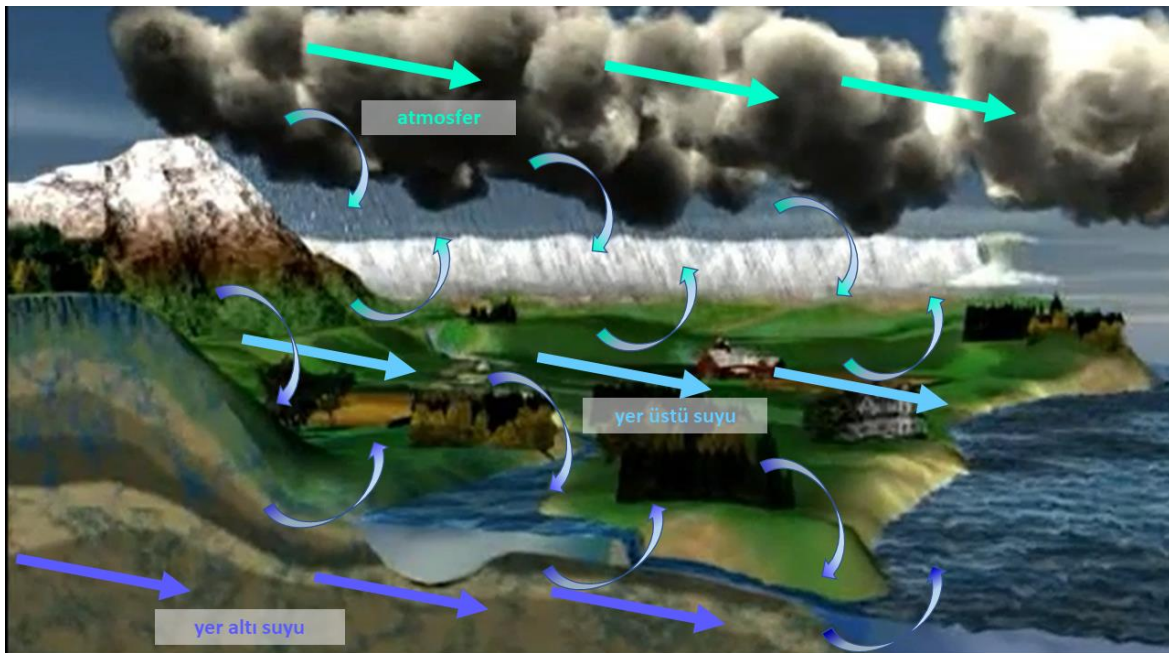
Bu ahlaki hedefe ulaşmanın merkezinde, İhtiyatlılık İlkesinin sadece sözde değil, eylemde yaygın olarak benimsenmesi olacaktır. Bu ilke, 1992'de Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Rio Bildirgesi'nin 15. ilkesi olarak uluslararası bir ilgi görmüştür: *"Çevreyi korumak amacıyla, ihtiyatlı yaklaşım, devletlerin kendi imkânlarına göre devletler tarafından yaygın bir şekilde uygulanmalıdır. Ciddi veya geri döndürülemez zarar tehditlerinin olması durumunda, tam bilimsel kesinlik eksikliği, çevresel bozulmayı önlemek için maliyet etkili önlemleri ertelemek için bir sebep olarak kullanılamaz"* (Bourguignon, 2015). Daha yakın zamanlarda, ilke, fiziksel ve biyofiziksel çevre, çevre koruma ve çevre yönetimi ile ilgili uluslararası hukukun büyük kısmında açık veya zımni olarak yer almıştır. Yerel olarak Birleşmiş Milletler'e üye devletlerinin federal, eyalet ve hatta belediye yasalarında uygulanmıştır. Üstelik çeşitli farklı biçimlerde de olsa, hem yerel hem de uluslararası çok sayıda politika ve yönergede referans alınmıştır (McCaffrey, 2007; Stirling, 2007; Eckstein, 2017 ve Jaeckel, 2017). Bu ilke, özellikle yer altı suyu çekimi ve beslenme oranlarının yönetimine ilişkin belirsizliklerle ilgili olduğu için yer altı suyu yönetim çevrelerinde iyi bilinmektedir (UNESCO, 2012; Foster ve Chilton, 2018 ve van der Gun, 2018). Antropojenik nedenlerden kaynaklanan yer altı suyu kirliliğinin bilimsel olarak tespitine ilişkin önlemin yönetimimize nasıl rehberlik edebileceğine daha az ilgi gösterilmiştir (Stewart ve diğ., 2020).

İleriye dönük olarak İhtiyatlılık İlkesi, bilim adamlarından politika teorisyenlerine, yerel su yöneticilerinden uluslararası hukuk mahkemelerine kadar tüm yer altı suyu topluluğundan, bilmediğimiz o kadar çok şey varken kendimizi ve gezegenimizi yönetirken karşılaştığımız zorluklarla ilgili alçakgönüllülük ve samimiyet; ancak yeterince

bildiğimizde derinden endişelenmemizi talep edecektir. Bu endişeyi akıllı eyleme dönüştürmeyi gelecek nesillere borçluyuz.

10 Sonsöz

Araziye sızarak ve sızdıran dere yataklarından "kaybolan" su, basit bir şekilde yok olmaz ve kaynaklardan ve sızıntılardan akan su basit bir şekilde ortaya çıkmaz. Suyun akışını belirleyen fizik (suyun birim ağırlığı başına enerjiyi temsil eden hidrolik yük ve kütle korunum ilkesine dayanarak), "noktaları birleştirir" böylece yavaş da olsa sürekli hareket eden yer altındaki görülemeyen yer altı suyu akışının küresel su çevriminin karasal kısmının ayrılmaz ve değişmez parçası olduğunu biliriz (Şekil 72).



Şekil 72 - Şekil 37'de gösterildiği gibi, kıtasal ölçekte üç su taşıma sistemi: atmosferdeki hava sirkülasyonu, yüzeydeki akarsu ağları ve yer altındaki yer altı suyu birbiriyle derinlemesine bağlıdır ve yol boyunca birçok kez su alışverişini yaparlar (NASA, 2020'den uyarlanmış).

2020'de yaklaşık 8 milyar olan Dünya nüfusunun 2100 yılına kadar 11 milyara ulaşması bekleniyor. İnsanların toprağı, suyu ve iklimi tahrip etmeden yeterli gıda üretmeyi öğrenmesi gerekecek. Bu, insanlığın karşılaştığı en büyük zorluk olarak anılmıştır (Bourne, 2015). Sürdürülebilir yer altı suyu yönetimi çözümün merkezinde yer almaktadır. Yer altı suyunun bilimsel olarak anlaşılması ve uygun şekilde yönetilmesi esastır çünkü yer altı suyu, daha iyi yönetim ile sorumlu kullanımı ve yenilenmesi için çabalarsak sorunu hafifletebilir.

11 Alıştırmalar

11.1 Yaşadığınız Bölgeyi Dikkate Alın:

1. İklimin türü nedir? ↓
2. Yıllık yağış miktarı ne kadar? ↓
3. Yıllık evapotranspirasyon miktarı ne kadar? ↓
4. Hangisi en yakın ana yüzey suyu drenajıdır? ↓
5. Bu drenajın ortalama debisi nedir? ↓
6. Akarsu sızdırıyor mu, besleniyor mu veya bazen sızdırıyor ve diğer zamanlarda besleniyor mu? ↓
7. Akarsu akışının büyüklüğü (büyük, orta, küçük) hakkındaki fikriniz nedir ve neden? ↓
8. İçme suyunuz nereden geliyor? ↓
9. Ne tür jeolojik oluşumlar mevcuttur? ↓
10. Yer altı suyunun tezahürlerini nerede görüyorsunuz? ↓
11. Yer altı suyu tablası ne kadar derindedir? ↓
12. Yer altı suyu beslenim alanları nerede? ↓
13. Yer altı suyu boşalım alanları nerede? ↓
14. Hem basınçlı hem de serbest akiferlerden kuyular ile su çekiliyor mu? ↓
15. Yer altı suyu sistemi sürdürülemez bir hızda mı pompalanmıştır? ↓
16. Fark edilebilir bir oturma olmuş mudur? ↓
17. Yer altı suyunda hangi doğal bileşenler bulunur? ↓
18. Yer altı suyu kirliliği var mıdır? ↓

11.2 Tüm Bölgelerdeki Genel Koşulları Dikkate Alın:

1. Yer altı suyu sistemlerin genel düzeni nasıldır? ↓
2. Tüm yağış olayları yer altı suyunu besler mi? ↓
3. Yer altında yer altı suyu nasıl meydana gelir? ↓
4. Bir yer altı suyu sisteminde kuyulardan su çekilirse ne olur? ↓
5. Yer altı suyu pompası beslenimi aşarsa ne olur? ↓
6. Basınçlı ve serbest akifer arasındaki fark nedir? ↓
7. Neden akarsu sıcaklığı hava sıcaklığından daha az değişir? ↓
8. Akarsular için kontrollü sıcaklık neden önemlidir? ↓
9. Neden vadoz kuşağıdaki su yağıştan daha asidiktir? ↓
10. Yağışa kıyasla tablayı besleyen suyun toplam çözünmüş katı madde (TÇK) artışından hangi mekanizmalar sorumludur? ↓
11. Yer altı sularında yaygın olan çözünmüş bileşenler nelerdir? ↓
12. Eski jeolojik arazilerdeki yer altı sularında neden daha az toplam çözünmüş katı bulunur? ↓
13. Genel olarak, yer altı suyu bileşenleri yerel, ara ve bölgesel sistemler arasında nasıl bir farklılık gösterir? ↓

14. Yer altı suyun akış yolları boyunca çözünmüş bileşenleri artıran iki birincil mekanizmalar nelerdir? ↴
15. Kuru ve sulak iklimlerdeki yer altı suyu taşıma bantları arasındaki temel farkı tarif edin. ↴
16. Yer altı suyunun küresel karbon çevrimindeki rolü nedir? ↴
17. Yer altı suyu kirliliğinin sıkça rastlanan kaynakları nelerdir? ↴
18. Yeryüzündeki en yaygın yer altı suyu kirleticisi hangisidir? ↴
19. Yer altı suyu sistemleri kirleticiler bakımından faydalı bir şekilde nasıl kullanılabilir? ↴
20. En çok insan su kullanımına karşılık gelen uğraş hangisidir? Ortalama olarak, insanlar tarafından kullanılan suyun yüzde kaçını bu amaçla kullanılıyor? ↴
21. Yüzey su kütlelerini ne sürdürür? ↴
22. Yer altı suyu yönetişimini bu kadar zorlaştıran nedir? ↴

12 Kaynaklar

- Abrunhosa M.J., S. Peppoloni, A. Chambel, 2018, Introducing geoethics in groundwater science, technology, and management. Özetler Kitabı içinde, Oturum T1.1 Socioeconomic Aspects of Groundwater Resources Management, 45. IAH Kongresi, Daejeon, Korea.
- Ahlenius, Hugo, 2007, United Nations Environment Programme, UNEP/GRID-Arendal, www.grida.no/resources/5279.
- Bailey, Samuel , 2009, [Tipik bir kehrizin bir en kesiti](#) [Samuel Bailey](#)'den [CC BY 3.0](#) lisansıyla
- Berry, George W., Paul J. Grimm, ve Joy A. Ikelman (1980). Thermal Springs List for the United States. National Oceanic and Atmospheric Administration Key to Geophysical Records Documentation No. 12. <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/data/publications/Kgrd-12.pdf>'den alınmış.
- BGS (British Geologic Survey), 2020a, Arsenic contamination of groundwater, map, <https://www2.bgs.ac.uk/groundwater/health/arsenic/home.html>.
- BGS (British Geologic Survey), 2020b, Fluoride in groundwater, map, <https://www2.bgs.ac.uk/groundwater/health/fluoride.html>.
- Bierkens, Marc F.P. ve Yoshihide Wada, 2019, Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review, Environmental Research Letters, cilt 14, no.6, doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f.
- Bourguignon D., 2015, The Precautionary Principle: definitions, applications and governance. European Parliament Research Services, Paris.
- Bourne, J. K., 2015, The end of plenty: the race to feed a crowded world. W.W. Norton & Company, New York, New York, USA, 408 sayfa.
- Bredehoeft, J. D., 1983, Regional flow in the Dakota aquifer, Geological Survey Water-Supply Paper 2237, <https://pubs.usgs.gov/wsp/2237/report.pdf>.
- Briggs, Martin A., Zachary C. Johnson, Craig D. Snyder, Nathaniel P. Hitt, Barret L. Kurylyk, Laura Lautz, Dylan J. Irvine, Stephen T. Hurley, John W. Lane, 2018, Inferring watershed hydraulics and cold-water habitat persistence using multi-year air and stream temperature signals, Science of The Total Environment, cilt 636, sayfa 1117-1127, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.344.
- Burchi, Stefano, 2018, Legal frameworks for the governance of international trans boundary aquifers: Pre- and post-ISARM experience, Journal of Hydrology: Regional Studies, sayfa 15-20, doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007.
- Bunnell, Dave, 2006, [Dave Bunell'in en bilinen mağara taşları gösteren fotoğrafı](#) [Dave Bunnell](#)'den [CC BY-SA 2.5](#) lisansıyla

- Charlton, John, 2018, Field photo, Kansas Geological Survey,
https://chasm.kgs.ku.edu/ords/pubcat.phd2.View_Photo?f_id=401.
- Chen, Z., N. Goldscheider, A. Auler, M. Bakalowicz, S. Broda, D. Drew, J. Hartmann, G. Jiang, N. Moosdorf, A. Richts, Z. Stevanovic, G. Veni, A. Dumont, A. Aureli, P. Clos, M. Krombholz, 2017, World Karst Aquifer Map (WHYMAP WOKAM). BGR, IAH, KIT, UNESCO, doi: 10.25928/b2.21_sfkq-r406.
- Dai, Aiguo ve K. E. Trenberth, 2002, Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations, Journal of Hydrometeorology, cilt 3, sayfa 660-687.
- Darton, N.H, 1900, United States Geological Survey internet sitesi fotoğrafı,
www.sciencebase.gov/catalog/item/51dc3bd1e4b0f81004b7a912.
- Elbein, P., 2019, Tree Planting Programs Can Do More Harm Than Good, National Geographic, 26 Nisan 2019 <https://pulitzercenter.org/reporting/tree-planting-programs-can-do-more-harm-good>.
- Eckstein, G., 2017, The international law of trans boundary groundwater resources. Routledge, New York.
- van der Ent, R. J., H. H. G. Savenije, B. Schaefli, ve S. C. Steele-Dunne, 2010, Origin and fate of atmospheric moisture over continents, Water Resources Research, cilt 46, W09525, doi:10.1029/2010WR009127.
- European Commission Joint Research Center, 2020, World Atlas of Desertification, <https://wad.jrc.ec.europa.eu/patternsaridity>.
- Faybishenko, Boris, Jens Birkholzer, David Sassani, ve Peter Swift, 2016, International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation Fifth Worldwide Review, United States Department of Energy, <https://eesa.lbl.gov/tag/doi-10-21721353043/>.
- Foster, S. ve J. Chilton, 2018, Groundwater management: policy principles and planning practices. Vilholth ve diğ. (Ed.), Advances in Groundwater Governance, CRC Press. Kindle baskısı, 549 sayfa.
- Gale, J.E. 1982. Assessing the permeability characteristics of fractured rock. Geological Society of America, Special Paper 189, sayfa 163-181.
- Galloway, Devin, David R. Jones, ve S.E. Ingebritsen (editörler), 1999, Land subsidence in the United States, U.S. Geological Survey Circular, 1182, <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/>.
- Global agriculture, 2020, Global agricultural water withdrawal, data from <https://www.globalagriculture.org/report-topics/water/water.html>.
- Graber, Cynthia, 2011, Farming Like the Incas, Smithsonian Magazine, www.smithsonianmag.com/history/farming-like-the-incas-70263217/.

- Gustafson, C., K. Key, ve R.L. Evans, 2019, Scientific Reports, Aquifer systems extending far offshore on the U.S. Atlantic margin, cilt 9, Makale 8709, doi.org/10.1038/s41598-019-44611-7.
- van der Gun, J., 2018, Data, information, knowledge and diagnostics on groundwater, In: Villholth et al. Eds. Sayfa 193–213, Certainty and Risk. United Nations World Water Development Programme (UNWWAP). Paris, France.
- van der Gun, Jac, 2019, The Global Groundwater Revolution, in: the Oxford Research Encyclopedia, Environmental Science, doi: [10.1093/acrefore/9780199389414.013.632](https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.632)
- Heath, Ralph C., 1983, Basic Ground-Water Hydrology, United States Geological Survey Water Supply Paper 2220, 86 sayfa, www.nrc.gov/docs/ML1423/ML14236A052.pdf.
- Hinton, M., 2014, Groundwater-Surface Water Interactions in Canada. In: Rivera [editor] Canada's Groundwater Resources, sayfa 151-186, Fitzhenry and Whiteside Limited, Markham, Ontario, Canada.
- Humboldt, Alexander von, 1825, "The Island of Cuba" olarak Fransızca yayınlanmış, sonra 1856'da John Sidney Thrasher tarafından denizaltı kaynaklarının anlatımını büyük ihtimalle etkilemeden politik kısımları değiştirilerek İngilizceye çevrilmiş.
- Iowa Geological Survey, 2020, www.iowadnr.gov/environmental-protection/water-quality/private-well-program/private-well-testing/contamination-in-karst.
- Jaeckel, A.L., 2017, The international seabed authority and the precautionary principle: balancing deep seabed mineral mining and marine environmental protection. Boston, Brill Nijhoff, 2017, 362 sayfa.
- Jiao, J., X. Zhang, ve X. Wang, 2015, Satellite-based estimates of groundwater depletion in the Badain Jaran Desert, China. Scientific Report 5, 8960. doi.org/10.1038/srep08960.
- Jiao, J.J., 2017, AIH News & Information Newsletter, Winter 2018, <https://iah.org/wp-content/uploads/2017/12/IAHwinter17final.pdf>.
- KGS (Kansas Geological Survey), 1998, Public Information Circular (PIC) 9, http://www.kgs.ku.edu/Publications/pic9/pic9_3.html.
- Khokhar, Tariq, 2017, Chart: Globally 70% of Freshwater is Used for Agriculture, Dünya Bankası blogu, blogs.worldbank.org/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture#:~:text=In%20most%20regions%20of%20the,percent%20increase%20in%20water%20withdrawals.
- Kling, George, 2012, Saha fotoğrafı, Öğretim üyesi, University of Michigan.
- Kuniansky, Eve L., 2020, Bilgisayar görüntüsü, Emekli yer altı suyu uzmanı, United States Geological Survey.
- Leitz, Robert, 2009, Saha fotoğrafı, Emekli öğretim üyesi, Metropolitan State University of Denver, Denver, Colorado.

- Leopold, L. B., M.G. Wolman, ve J.P. Miller, 1964, Fluvial Processes in Geomorphology, Freeman and Company, San Francisco, 531 sayfa.
- McCaffrey, S., 2007, The law of international watercourses. Oxford University Press, New York.
- Margat, J., ve J. van der Gun, 2013, Groundwater around the world: A geographic synopsis. Leiden, CRC Press/Balkema, Hollanda.
- Marshak, Stephen, 2005, Earth: Portrait of a Planet, İkinci Baskı, W. W. Norton, New York, New York, USA, 292 sayfa.
- Mellin, Robert, 2013, U.S. Air Force fotoğrafı, afcent.af.mil/News/Photos/igphoto/2000911939/.
- NADP, 2019, National (United States) Atmospheric Deposition Program, Total deposition maps, <http://nadp.slh.wisc.edu/committees/tdep/tdepmaps/>.
- Naeinsun, 2012, [Isfahan, Iran yakınlarında bir kehriz tüneli](#) Naeinsun'dan [CC BY-SA 3.0](#) lisansıyla.
- NASA, 2020, United States National Aeronautics and Space Administration internet sitesi, <https://pmm.nasa.gov/education/videos/water-cycle-animation>.
- NASA/JPL-Caltech, 2015, United States National Aeronautics and Space Administration / California Institute of Technology, www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4626.
- [Panoramastock.com](#), 2020, Saha fotoğrafı, 24 Haziran 2020'de satın alınmış, makbuz #5MC52374F6836415K.
- Pateiro, Laura Movilla, 2016, Ad hoc legal mechanisms governing transboundary aquifers: current status and future prospects, Water International, cilt 41, sayı 6: Legal mechanisms for water resources in practice: Select papers from the XV World Water Congress, www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02508060.2016.1201964.
- Poeter, ve diğ., 2020, Poeter, Eileen, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, ve Douglas Mackay, Orijinal şekiller.
- Poland, Joseph, 1977, United States Geological Survey internet sitesi, https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/land-subsidence?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
- Reitz, M., W.E. Sanford, G.B. Senay, ve J. Cazenaz, 2017, Annual estimates of recharge, quick-flow runoff, and evapotranspiration for the contiguous U.S. using empirical regression equations: Journal of the American Water Resources Association, cilt 53, no.4, sayfa 961-983.
- Rivera, Alfonso, 2014, Canada's Groundwater Resources, Geological Survey of Canada, Fitzhenry & Whiteside.

- Shiklomanov, L.A., 1993, World Freshwater Resources. Gleick, P.H. (Ed.), Water in Crisis: A Guide to World's Freshwater Resources, Oxford University Press, New York, sayfa13-24.
- Sneed, M., J.T. Brandt, ve M. Solt, 2018, Land subsidence along the California Aqueduct in west-central San Joaquin Valley, California, 2003–10: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5144, 67 sayfa, doi.org/10.3133/sir20185144.
- Stanton, J.S., D.W. Anning, C.J. Brown, R.B. Moore, V.L. McGuire, S.L. Qi, A.C. Harris, K.F. Dennehy, P.B. McMahon, J.R. Degnan, and J.K. Böhlke, 2017, Brackish groundwater in the United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1833, 185 sayfa, doi.org/10.3133/pp1833.
- Stewart, I., J. Cherry ve M. Harding, 2020, Groundwater contamination science and the Precautionary Principle. ASTI Series from Springer. M. Abrunhosa, A. Chambel, S. Peppoloni, H.I. Chaminé (Ed.) Advances in Geoethics and Groundwater Management: theory and practice for a sustainable development, Jeoetik ve Yer altı Suyu Yönetimi Kongresi (GEOETH&GWM'20) Bildirileri, Porto – Portekiz 2020. Springer, ASTI series, www.springer.com/series/15883.
- Stirling, A., 2007, Risk, precaution and science: towards a more constructive policy debate. EMBO Reports, cilt 8, sayı 4, sayfa 309-315.
- Sunderland, Elsie M., Xindi C. Hu, Clifton Dassuncao, Andrea K. Tokranov, Charlotte C. Wagner, ve Joseph G. Allen, 2018, A Review of the Pathways of Human Exposure to Poly- and Per- fluoroalkyl Substances (PFASs) and Present Understanding of Health Effects, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, cilt 29, no.2, sayfa 131–147, doi: 10.1038/s41370-018-0094-1.
- The Old Pueblo, 2014, [Riparian Forest along Sonoita Creek, southwest of Patagonia Lake, part of which can be seen in the center of the photo](#), The Old Pueblo'dan [CC BY-SA 4.0](#) lisansıyla.
- Thrasher, John Sidney, 1856, bu referans listesindeki Humboldt, Alexander von, 1825'ye bakınız.
- Tille, Andreas, 1996, [Yakından Stokkur'un püskürmesi](#), [Andreas Tille](#)'den [CC BY-SA 3.0](#) lisansıyla.
- ULARA (Upper Los Angeles River Area) Watermaster, 2018, 2016-2017 Yıllık Raporu, http://ularawatermaster.com/index.html?page_id=922.
- UNESCO, 2012, WWAP (World Water Assessment Programme), The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, <http://www.unesco.org/new/en/naturalsciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/>.
- UNWWAP, 2015, United Nations World Water Assessment Programme, Facts and Figures from the World Water Development Report, 2015,

www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_ENG_web.pdf↗.

UNWWAP, 2016, United Nations World Water Assessment Programme, The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs. Paris, UNESCO.

USEPA, 2012, United States Environmental Protection Agency, https://clu-in.org/download/citizens/a_citizens_guide_to_phytoremediation.pdf↗.

USGS, 2019a, United States Geological Survey, <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/thumbnails/image/wss-gw-how-groundwater-occurs-diagram.png>↗.

USGS, 2019b, United States Geological Survey, www.usgs.gov/media/images/northern-atlantic-coastal-plain-aquifer-system↗.

USGS, 2019c, United States Geological Survey, www.usgs.gov/media/images/all-earths-water-a-single-sphere↗.

USGS, 2020, United States Geological Survey, www.usgs.gov/media/images/water-cycle-natural-water-cycle↗.

USNCAR, 2020, United States National Center for Atmospheric Research www.youtube.com/watch?v=n0mupl4FZsQ.

USNOAA (United States National Oceanic and Atmospheric Administration), 2019, National Centers for Environmental Information (NCEI), https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/hot_springs/↗, veri ilk olarak Berry ve diğ., 1980' de yayınlandı.

USNWS (United States National Weather Service), 2012, Saha fotoğrafı, https://www.weather.gov/ict/event_dryrivers2012↗.

Wada, Y., 2016, Modeling groundwater depletion at regional and global scales: Present state and future prospects. Surveys in Geophysics, cilt 37, sayfa 419–451. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x>↗.

Wikimapia, 2020, [Pantanal Mato-Grossense Milli Park](#)↗, [Wikimapia](#)↗'dan [CC BY 4.0](#)↗.lisansıyla.

Wilhelm, Sheryl R., Sherry L. Schiff, William D. Robertson, 1996, Biogeochemical Evolution of Domestic Waste Water in Septic Systems: 2. Application of Conceptual Model in Sandy Aquifers, Groundwater, cilt 34, no.5, doi.org/10.1111/j.1745-6584.1996.tb02080.x↗.

Wilkinson, Sophie L., 2018, Taslak çizim, Doktora öğrencisi, McMaster University.

Winter, T. C., J.W. Harvey, O.L. Franke, ve W.A. Alley, 1998, Ground water and surface water: A single resource. United States Geological Survey Circular, 1139, 79 sayfa, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir1139>↗.

- Wood, W. W. ve Dave Hyndman, 2018, Sea level rise cut in half?; Groundwater, cilt 56, no.6, sayfa 845. doi.org/10.1111/gwat.12821.
- Wood, W. W., W.E. Sandford, ve A.R.S. Al Habschi, 2002, The source of solutes in the coastal sabkha of Abu Dhabi; Geological Society of America Bulletin, cilt 114, no.3, sayfa 259-268, doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<0259:SOSTTC>2.0.CO;2.
- Wood, Warren, 1990, Saha fotoğrafı, Emeki öğretim üyesi, Yer Bilimleri, Michigan State University
- Zheng, Chunmiao, 2020, kişisel iletişim.
- Zheng, C., Liu, J., Cao, G., Kendy, E., Wang, H. ve Jia, Y., 2010, Can China Cope with Its Water Crisis? Perspectives from the North China Plain. Groundwater, cilt 48: sayfa 350-354. doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00695_3.x.

13 Alıştırma Çözümleri

13.1 Yaşadığınız Bölgeyi Dikkate Alın:

Bölüm 11.1'deki tüm alıştırmalar okuyucunun yaşadığı bölgeye özeldir. Bu sorular bir dersin parçası olarak ödev olarak verilirse, eğitmen öğrencilerin cevap vermeye çalıştıktan sonra gözden geçirmeleri için konuma özgü cevaplar geliştirebilir. Bunu bağımsız bir çalışma olarak okuyorsanız, kitaptaki bilgilerin hatırlanması ve internette bilgi arama kombinasyonu ile bu sorular yanıtlanabilir. Nereye bakılacağına dair bazı öneriler aşağıda verilmiştir.

1. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: İklimin türü nedir?

Yaşadığınız yerdeki yağış miktarı hakkındaki gözlemlerinizi ve bu kitaptaki bilgileri göz önüne alarak, yerinizi nemli, orta, kurak, yarı kurak ya da aşırı kurak olarak mı sınıflandırırsınız?

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

2. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yıllık yağış miktarı ne kadar?

Yakınınızdaki bir yer için ortalama yıllık yağış için internette arama yapın.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

3. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yıllık evapotranspirasyon miktarı ne kadar?

Çeşitli iklim türlerinde evapotranspirasyon gerçekleşen yağış yüzdesinin tahminlerini hatırlayın ve bu yüzdeyi ortalama yıllık yağış miktarı ile birlikte kullanarak evapotranspirasyon miktarını tahminen hesaplayın.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

4. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Hangisi en yakın ana yüzey suyu drenajıdır?

Bölgenize ait haritalarda nehirleri/dereleri arayın.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

5. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Bu drenajın ortalama debisi nedir?

Zamanın bir fonksiyonu olarak hacimsel debiyi (örneğin saniyede metreküp) bildiren o drenajın (veya yakınlarda veya benzer iklimde ve arazide benzer büyüklükte bir drenajın) resmî bir akım gözlem istasyon verisini internette arayın.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

6. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Akarsu sızdırıyor mu, besleniyor mu veya bazen sızdırıyor ve diğer zamanlarda besleniyor mu?

Bunu belirlemeyebilmek için, akışaşağı konumdaki debinin daha mı yüksek veya daha mı düşük olup olmadığını görmek için nehirdeki akışın ölçüldüğü en az iki konum gerekmektedir. İstasyonlar arasında başka giren ve çıkan akışlar görülebilir, bu nedenle bunu yalnızca az miktarda veriyle belirlemek zordur. Beslenim veya sızdırma büyükse yalnızca görsel gözlemler ile durumu kestirmeniz mümkündür.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

7. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Akarsu akışının büyüklüğü (büyük, orta, küçük) hakkındaki fikriniz nedir ve neden?

Bu sadece bir görüştür, ancak bu akışı dünyanın diğer ünlü nehirleriyle karşılaştırabilirsiniz. Amazon nehrinin ortalama akışının ne olduğuna dair basit bir soruyu internete girmenin sonucunda karşımıza tipik bir çıkartacaktır (örneğin saniyede 209.000 metreküp gibi).

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

8. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: İçme suyunuz nereden geliyor?

Bu, evinize bağı bir kuyu olabilir ya da kuyulardan belki de bir nehirden veya baraj haznesinden gelen bir şehir su kaynağıyla ilişkili olabilir.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

9. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Ne tür jeolojik oluşumlar mevcuttur?

Bölgenizin jeolojik bir özetini veya jeolojik haritasını arayın

[alıştırmalara geri dön](#)↑

10. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyunun tezahürlerini nerede görüyorsunuz?

Pınarlar görebilirsiniz. Rutubetli nehir kıyıları görebilirsiniz. Ya da belki su tablasının bir yüzey su kütesine bağlandığı bir göl veya gölet olabilir.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

11. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyu tablası ne kadar derindedir?

Bölgenizdeki yer altı suları ile ilgili raporları veya su tablası haritalarını veya kuyulardaki su derinliği ile ilgili hükümet kayıtlarını arayın (bunlar genellikle kuyular açılırken kaydedilen kuyu kütükleri diye adlandırılan raporlarda bulunacaktır).

[alıştırmalara geri dön](#)↑

12. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyu beslenme alanları nerede?

Üst taraftaki alanlar olası bir yerdir. Bölgenizdeki yer altı suları hakkındaki raporlar muhtemelen beslenme alanlarını ele almışlardır.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

13. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyu boşalım alanları nerede?

Olası yerlerden biri alçak alanlardır. Bölgenizdeki yer altı suları hakkındaki raporlar muhtemelen boşalım alanlarını ele almışlardır.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

14. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Hem basınçlı hem de serbest akiferlerden kuyular ile su çekiliyor mu?

Bölgenizdeki yer altı suları ile ilgili raporlar muhtemelen bu bilgiyi sağlayacaktır. Ya da jeolojik bilgilerden ve kuyuların derinliğinden çıkarabilirsiniz.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

15. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyu sistemi sürdürülemez bir hızda mı pompalanmıştır?

Bölgenizdeki yer altı sularına ilişkin raporlar ve belki de haber makaleleri bu bilgiyi muhtemelen sağlayacaktır. Veya kuyulardaki su seviyesi kayıtlarını bulabilir ve uzun vadeli bir düşüş olduğunu fark edebilirsiniz.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

16. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Fark edilebilir bir oturma olmuş mudur?

Bölgenizdeki yer altı sularına ilişkin raporlar ve belki de haber makaleleri bu bilgiyi muhtemelen sağlayacaktır.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

17. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyunda hangi doğal bileşenler bulunur?

Bölgenizdeki yer altı sularına ilişkin raporlar ve belki de haber makaleleri bu bilgiyi muhtemelen sağlayacaktır.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

18. Yaşadığınız bölgeyi dikkate alarak: Yer altı suyu kirliliği var mıdır?

Bölgenizdeki yer altı sularına ilişkin raporlar ve belki de haber makaleleri bu bilgiyi muhtemelen sağlayacaktır.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

13.2 Tüm Bölgelerdeki Genel Koşulları Dikkate Alın:

1. Yer altı suyu sistemlerin genel düzeni nasıldır?

Yer altı suyu, daha yüksek hidrolik yükten daha düşük yüke doğru akar, tipik olarak bu genellikle yaylalardan ovalara ve tepelerin yamaçlarından derelere ve yüzey su kütlelerine doğru olur. Bazı güzergâhlar kısa ve yereldir, diğerleri ise daha derine iner, boşaltımdan önce birkaç drenajı geçer veya bölgedeki en alçak drenaja uzun bölgesel yolculuklar yapar.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

2. Tüm yağış olayları yer altı suyunu besler mi?

Hayır, genellikle sadece büyük ve/veya uzun süreli yağış olayları sızan suyun su tablasına ulaşması için yeterli sızma sağlar. Aksi durumda bitki örtüsü tarafından terleme için kullanılır.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

3. Yer altında yer altı suyu nasıl meydana gelir?

Yer altı suyu, katı parçacıklar arasından, ayrıca kayalar ve çökellerdeki çatlak ve oyuk boşlukların içinden akar.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

4. Bir yer altı suyu sisteminde kuyulardan su çekilirse ne olur?

Su seviyeleri dūşer.

[alıştırmalara geri dñn](#)↑

5. Yer altı suyu pompajı beslenimi aşarsa ne olur?

Su seviyeleri dengelenmeyecek ve sonunda akifer tükenecektir. Bu genellikle akarsu akışının kaybolmasına ve zemin yüzeyinin çökmesine neden olmaktadır.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

6. Basınçlı ve serbest akifer arasındaki fark nedir?

Kapalı bir akiferde su seviyesi akiferin üstündedir, serbest akiferde su seviyesi akiferin içerisinde bulunmaktadır. Serbest bir akiferde su seviyeleri düştüğünde, gözeneklerden ve çatlaklardan su tahliye olurken basınçlı bir akiferde gözenekler suyla dolu kalır ancak suyun basıncı düşmüş olur.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

7. Neden akarsu sıcaklığı hava sıcaklığından daha az değişir?

Su, ısıyı havadan daha iyi depolayabildiği için sıcaklıkları daha ılımlı olur. Bu özellik, yer altı suyunun akarsulara boşalması durumunda belirginleşir çünkü zemin yer altı suyunu yalıtır böylece sıcaklıklar havadan daha az değişken olur (yazın daha soğuk ve kışın daha sıcak) dolayısıyla akarsu havadan daha az değişir.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

8. Akarsular için kontrollü sıcaklık neden önemlidir?

Sucul yaşam, özellikle balık, başta üreme açısından işlevlerini sürdürebilmek için çoğunlukla dar bir sıcaklık aralığına gereksinim duyar.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

9. Neden vadoz kuşaktaki su yağıştan daha asidiktir?

Vadoz kuşakta organik maddenin mikrobiyal çürümesi ve bitki köklerin solunumu ile üretilen karbon dioksit, karbonik asit üretmek üzere su ile birleşir. ($CO_2 + H_2O = H_2CO_3$).

[alıştırmalara geri dön](#)↑

10. Yağışa kıyasla tablayı besleyen suyun toplam çözünmüş katı madde (TÇK) artışından hangi mekanizmalar sorumludur?

Karbonik asit, mineralleri çözer ve buharlaşma-terleme, tuzları geride bırakırken suyun vadoz bölgesinden eksilmesine neden olur.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

11. Yer altı sularında yaygın olan çözünmüş bileşenler nelerdir?

Sodyum, kalsiyum, magnezyum, demir, klorür, bikarbonat ve sülfat iyonları. Yer altı suyundaki diğer birçok madde daha düşük konsantrasyonlarda çözünmüştür.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

12. Eski jeolojik arazilerdeki yer altı sularında neden daha az toplam çözünmüş katı bulunur?

Yer altı suları, uzun jeolojik sürelerden sonra jeolojik tabakalardan çözünebilir mineralleri temizler.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

13. Genel olarak, yer altı suyu bileşenleri yerel, ara ve bölgesel sistemler arasında nasıl bir farklılık gösterir?

Yerel akış sistemleri daha az çözünmüş katıya sahip olma eğilimindedir ve genellikle kimyasına bikarbonat iyonları hâkimdir. Ara sistemlerde daha fazla çözünmüş katı ve tipik olarak daha fazla sülfat bulunur. Derin sistemler daha tuzlu olma eğilimindedir ve daha fazla sülfat ve klorür iyonunu vardır.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

14. Yer altı suyun akış yolları boyunca çözünmüş bileşenleri artıran iki birincil mekanizmalar nelerdir?

Düşük geçirgenlikli katmanlardan minerallerin çözünmesi ve kalıntı tuzların difüzyonu.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

15. Kuru ve sulak iklimlerdeki yer altı suyu taşıma bantları arasındaki temel farkı tarif edin.

Sulak iklimlerde yer altı suyu boşalımı yüzey drenajları yoluyla okyanuslara akarken, kurak iklimlerde yer altı suyu genellikle kapalı yüzey sistemlerine boşalarak buharlaşma sonucu tuz birikintileri oluşur.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

16. Yer altı suyunun küresel karbon çevrimindeki rolü nedir?

Jeolojik zaman içinde, beslenim alanlarında yer altı suyu sistemlerine giren karbon, boşalım alanlarında salınan karbon ile dengelenmiştir. Günümüzde yer altı suyunda net eksilmenin olmasından dolayı atmosferde net bir karbon kazanımı vardır, çünkü beslenimden daha çok yer altı suyu boşalımını vardır.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

17. Yer altı suyu kirliliğinin sıkça rastlanan kaynakları nelerdir?

Tarımsal herbisitlerin ve pestisitlerin uygulanması, katı atık sahalarından sızıntılar, madenler, sızdıran depolar, insan ve hayvan atıklarının bertarafı vb.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

18. Yeryüzündeki en yaygın yer altı suyu kirleticisi hangisidir?

Nitrat.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

19. Yer altı suyu sistemleri kirleticiler bakımından faydalı bir şekilde nasıl kullanılabilir?

Derin jeolojik depolamalar, atıkları çevreden uzun süre izole edebilir ve bu da atığın tehlikeli unsurlarının çürümesine imkân tanıyabilir.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

20. En çok insan su kullanımına karşılık gelen uğraş hangisidir? Ortalama olarak, insanlar tarafından kullanılan suyun yüzde kaçı bu amaçla kullanılıyor?

Gıda üretimi/tarımsal sulama. Ortalama %70.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

21. Yüzey su kütlelerini ne sürdürür?

Engin, yavaş akan yer altı suyu sistemlerinden boşalım.

[alıştırmalara geri dön](#)↑

22. Yer altı suyu yönetişimini bu kadar zorlaştıran nedir?

- 1) Yanlış yer altı suyu yönetimin etkileri, meydana geldikten uzun süre sonrasında kadar gözlenemez;
- 2) Sorun bir kere teşhis edildikten sonra çaresi uzun bir süre gerektirir;
- 3) Yer altı suyu sorunlarının tüm dünyada ortak yönleri olmasına rağmen, her sorun doğası gereği yereldir ve sahaya özgü çözümler gerektirir.

[alıştırmalara geri dön](#) ↑

14 Yazarlar Hakkında



Dr. Eileen Poeter, Colorado School of Mines'da yer altı suyu dersleri vermiş olduğu emekli bir Jeoloji Mühendisliği öğretim üyesidir ve onunla birlikte yer altı suyu sistem incelemeleri ve modelleme araştırma projelerinde çalışan 40'tan fazla lisansüstü öğrencisine danışmanlık yapmıştır. Aynı zamanda Entegre Yer altı Suyu Modelleme Merkezi'nin eski müdürü ve Poeter Mühendisliği'nin emekli başkanıdır. Yer altı suyu sistemlerini modelleme konusundaki 40 yıllık tecrübesiyle, hukukçulara, sanayi kuruluşlarına, mühendislik şirketlerine, devlet kurumlarına, araştırma laboratuvarlarına ve vatandaş gruplarına; akifer depolama ve geri kazanımı, geçirimsizlik duvarı performansı; planlanan nükleer santral tesislerinde drenaj; bölgesel yer altı suyu yönetimi, büyük ölçekli bölgesel pompaj, baraj sızıntısı, kirletici taşınımı, susuzlaştırmanın etkileri ve akarsu-akifer etkileşimi üzerine yer altı suyu modelleme projelerinde danışmanlık yapmıştır. Dr. Poeter, model duyarlılığının değerlendirilmesi, veri ihtiyaçlarının değerlendirilmesi, model kalibrasyonu, modellerin seçimi ve sıralanması ve öngörü belirsizliğinin değerlendirilmesi dahil olmak üzere yer altı suyu modelleme yazılım yazarıdır. 2006'da NGWA Darcy Konuşmacısıydı ve 2017'de M. King Hubbert ödülünü almıştır ve aynı zamanda bir NGWA Akademi Üyesi ve Hayat Boyu Üyesi olmuştur.

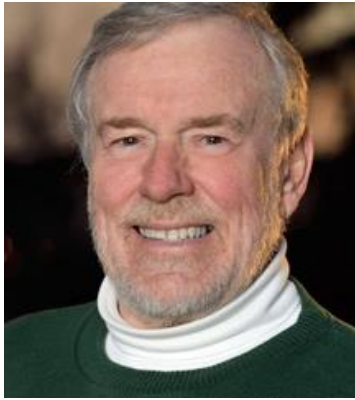


Dr. Ying Fan, Rutgers Üniversitesi - New Brunswick, Dünya ve Gezegen Bilimleri Bölümü'nde öğretim üyesidir. Araştırmaları, hidrolojik süreçlerin küresel su, enerji ve biyojeokimyasal çevrimlerini nasıl ayarladığı ve özellikle suyun bitki ekolojisini ve evrimini nasıl şekillendirdiği üzerine odaklanıyor. Ulusal Bilim Akademisinin (NAS) Gelecek Su Kaynak İhtiyacı Komitesinde, Hydrology and Earth System Sciences (HESS) dergisinin yayın kurulunda, CUAHSI (Consortium of Universities for Advancement of Hydrologic Sciences of Hydrologic Sciences, Inc.) Yönetim Kurulu'nda görev yapmıştır ve şu anda NASA Yeryüzü Bilim Danışma Komitesinde (ESAC), Hydrological Processes (HYP) dergisinin yayın kurulunda ve BM'nin yetkilendirdiği Amazon Bilim Panelinde (SPA) hizmet vermektedir.



Dr. John Cherry, ABD'de eğitim gördükten ve Fransa'da bir post-doc'dan sonra, 1971'de yer altı sularındaki kirleticilerin taşınımı ve akıbeti ve bunların ıslahı üzerine saha araştırması için Waterloo Üniversitesi'ne katıldı. R.A. Freeze ile birlikte "Groundwater" (1979) kitabını yazdı ve "Dense Chlorinated Solvents....in Groundwater" (1996) kitabında ortak editör/ ortak yazar olarak birkaç bölüm yazdı. Saha-Odaklı Yer altı Suyu Kirliliği Araştırmaları ile ilgili Üniversite Konsorsiyumunun kurucu müdürüdür. Guelph Üniversitesi,

G360 Yer Altı Suyu Araştırma Merkezi'nde, yer altı suyu izleme teknolojileri ve uzak arazilerdeki kırsalda yaşayan insanlar için güvenli kuyular oluşturmak üzerine araştırmalara katılmaktadır. Kaya Gazı Geliştirmenin Çevresel Etkileri üzerine çalışan Kanadalı Uzman Panelinin başkanıydı (2012-2014). ABD Mühendislik Akademisi'nin Yabancı Üyelerinden birisidir. 2016'da Lee Kwan Yew Su Ödülü'nü ve 2020'de Stockholm Su Ödülü'nü almıştır.



Dr. Warren Wood şu anda Michigan Eyalet Üniversitesi, Yeryüzü ve Çevre Bilimleri Bölümü'nde Misafir Hidrojeoloji Öğretim Üyesi ve resmen Christiansen Akademi Üyesi, St. Catherin's College, Oxford Üniversitesi, Birleşik Krallık ve ABD Jeolojik Araştırma kurumunda Araştırma Hidroloğu olarak görev yapmaktadır. Warren kurak alanların hidrojeolojisi üzerine 120'den fazla araştırma makalesi yayınladı ve Kuzey Amerika, Çin, Botswana, Japonya, Umman, BAE, Suudi Arabistan, İsrail, Ürdün, Katar, Birleşik

Krallık, Almanya, Fransa ve Meksika'daki 100'den fazla üniversitede konferanslar verdi. Warren, ABD İçişleri Bakanlığı tarafından Üstün Hizmet Ödülü'ne; Ulusal Yer altı Suyu Birliği tarafından M. King Hubbert Madalyası'na; Amerika Jeoloji Birliği tarafından Üstün Hizmet Ödülü'ne ve Seçilmiş Üyesine layık görüldü. Warren, Ground Water dergisinin baş editörlük görevini yaptı ve ABD kongresi önünde ifadesine başvuruldu, İçişleri Bakanı ve Nükleer Düzenleme Komisyonu Başkanı'na nükleer atık bertarafında hidrojeolojinin rolü hakkında bilgi vermiştir.



Dr. Douglas Mackay, California Üniversitesi, Davis'te Toprak, Hava ve Su Kaynakları Bölümü, Misafir Emekli Öğretim Üyesidir. Araştırmaları, yer altında kirletici madde taşınımının, dönüşümünün ve ıslahın saha denemesini ve modellemesini, saha davranışını kontrol eden süreçlerin laboratuvar çalışmalarını, yer altı suyu iyileştirme teknolojilerinin geliştirilmesini, yer altı suyundaki ya da vadoz kuşağındaki kirletici maddelerin toplam kütle deşarjını ve dolayısıyla bunların oluşturduğu riski tahmin etme

yöntemlerini ve çözünmüş maddelerin (iyileştirme için eklenenlerin, izleyicilerin) yer altı suyuna verilmesi için yöntemleri kapsamaktaydı. Araştırması, ham petrol, rafine edilmiş petrol ürünleri, etanol ile harmanlanmış benzini, benzin oksijenatları, böcek ilaçları, halojenli çözücüler ve diğer türler ve çözücüler ile karışmış gelen çok hidrofobik kimyasalların dahil olduğu çeşitli organik kirleticilere yönelikti. Organik Kirleticilerin Taşınımı ve Akıbeti, Doğal ve Tasarımlanmış Yer Altı Suyu İyileştirme başlıklı lisansüstü dersleri verdi, iki ABD Ulusal Araştırma Konseyi komitesinde görev yaptı, danışmanlık şirketleriyle pilot testleri içeren uygulamalı araştırmalar üzerinde işbirliği yaptı ve iki yer altı suyu iyileştirme patentinin ortak mucididir.

15 Çeviren Hakkında



Dr. Alper Elçi, lisans ve yüksek lisans derecelerini Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden almıştır. Doktora eğitimini YÖK burslusu olarak Clemson Üniversitesi (A.B.D.) Çevre Bilimleri ve Mühendisliği dalında tamamlayarak doktora unvanını 2003 yılında almıştır. Doktora eğitiminden sonra ABD'nin Maryland eyaletinde faaliyet gösteren bir yer altı suyu kaynakları danışmanlık şirketinde çalışmıştır. Türkiye'ye döndüğü 2004 yılından bu yana akademik ve profesyonel çalışmalarını DEÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde sürdürmektedir. Lisans ve lisansüstü seviyesinde çeşitli dersler vermektedir ve öğrencilerine tez çalışmalarında danışmanlık yapmaktadır. 2020 yılında Fulbright Akademik Araştırma programı kapsamında California Üniversitesi, Davis'te misafir öğretim üyesi olarak bulunmuştur. Yer altı ve yer üstü sularında akım ve kirlenici taşınımının matematiksel modellenmesi, yer altı su kaynaklarının karakterizasyonu, coğrafi bilgi sistemlerinin ve uzaktan algılamının çevre bilimleri ve hidrolojideki uygulamaları ve havza ölçeğinde simülasyon-optimizasyon konularında çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca su kaynakları sektörüne su kalitesi modelleme ve havza yönetimi ile ilgili projelerde danışmanlık hizmeti vermektedir.

Lütfen Groundwater Project e-posta listesine kaydolmayı düşünün ve yeni kitap sürümleri, etkinliklere ve Groundwater Project'e katılmanın yolları hakkında bilgi sahibi olun. E-posta listemize kaydolmanız, küresel bir yer altı suyu topluluğu oluşturmamıza yardımcı olur. [Kayıt](#).

