

**FARKLI KIRIKLI-ÇATLAKLI AKİFER SİSTEMLERİNDE
KİRLETİCİ TAŞINIM PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

**ESTIMATION OF TRANSPORT PARAMETERS AT
DIFFERENT FRACTURED AQUIFER SYSTEMS**

KÜBRA ÖZDEMİR ÇALLI

YRD. DOÇ. DR. LEVENT TEZCAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

KÜBRA ÖZDEMİR ÇALLI'nın hazırladığı “Farklı Kırıklı-Çatlaklı Akifer Sistemlerinde Kirletici Taşınım Parametrelerinin Belirlenmesi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda** **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

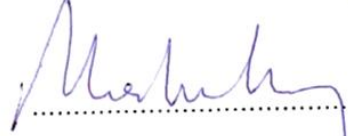
Prof. Dr. Mehmet ÇELİK
Başkan



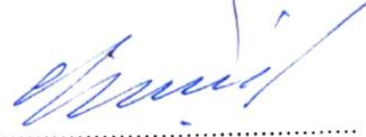
Yard. Doç. Dr. Levent TEZCAN
Danışman



Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ
Üye



Prof. Dr. Şakir ŞİMŞEK
Üye



Yard. Doç. Dr. Türker KURTTAŞ
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe Gümüşdereliolu
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)


- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

15 / 02 / 2017


(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Kübra Özdemir GALLI

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

15/02/2017

Kübra ÖZDEMİR ÇALLI

ÖZET

FARKLI KIRIKLI-ÇATLAKLI AKİFER SİSTEMLERİNDE KİRLETİCİ TAŞINIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Kübra ÖZDEMİR ÇALLI

Yüksek Lisans, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Levent TEZCAN

Ocak 2017, 103 sayfa

Kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinin ileri derecede heterojen özellikleri, sistemdeki akım ve kirletici taşınım parametrelerinin belirlenmesini büyük oranda kısıtlamaktadır. Bununla birlikte, bu tür akifer sistemlerinin kirlilik problemlerine karşı oldukça hassas yeraltısu ortamlarını oluşturması dolayısı ile de sistemdeki taşınım süreçlerinin analizi ve parametre tahmini oldukça önemlidir. Bu temel çerçevede gerçekleştirilen tez çalışmasının amacı, kırıklı-çatlaklı akiferlerde kirletici taşınım parametrelerinin belirlenmesidir. Bu amaçla, farklı kırıklı-çatlaklı akifer ortamlarında gerçekleştirilen dört örnek karakterizasyon çalışması sunulmuş ve kırıklı-çatlaklı akiferlerin klasik gözenekli ortamlardan ayrılan yönleri, sistem çözüm yaklaşımları temelinde yorumlanmıştır.

Örnek Çalışma-1’de kırıklı-çatlaklı bazalt bir akifer sisteminden tek kuyu enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyi ile elde edilen iki-pikli (bimodal) ilerleme eğrisi, ikili gözeneklilik modeli ve eşdeğer gözenekli malzeme modeli yaklaşımları ile analiz edilmiştir. Bu iki modelleme yaklaşımı sırasıyla Gauss olasılık dağılım ve Lorentz olasılık dağılım fonksiyonları bimodal ilerleme eğrisi ile uyumlaştırılmış ve taşınım parametre tahmini gerçekleştirilmiştir. Böylece hesaplanan hidrodinamik dispersiyon katsayıları ile her iki modelleme yaklaşımı karşılaştırılmış ve kırıklı-çatlaklı bazalt akiferin taşınım parametrelerinin tahmini için uygun modelleme yaklaşımının ikili gözeneklilik modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada ayrıca, ilerleme eğrisi üzerinde kırıklı-çatlaklı akifer

sistemindeki taşınım süreçlerinin olası zamansal geçişi (erken, orta ve geç zaman) değerlendirilmiş; orta ve geç zaman taşınım mekanizmasını karakterize eden ilerleme eğrisinin çekilme kısmı üzerinde akifer bileşenlerinin taşınım mekanizmasındaki etkinliği yorumlanmıştır.

Örnek Çalışma-2 kapsamında, kırıklı-çatlaklı dolomitik bir kireçtaşı akiferinde iki kuyu enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyi çalışması ile elde edilen Rodamin WT izleyicisine ait çok-pikli (multimodal) ilerleme eğrisi yorumlanmıştır. Akifer sistemi, eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı temelinde Gauss olasılık dağılımı aracılığıyla analiz edilmiş ve taşınım parametreleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte, multimodal ilerleme eğrisini oluşturan üç yerel pikin oluşumu, akifer sistemindeki yerel advectif taşınım kanalları ile ilişkilendirilmiş ve her biri için etkin kanal akım hızı (θ_{ec}) parametresi tanımlanmıştır.

Örnek Çalışma-3'de kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akiferinin üç farklı noktasındaki kuyuda gerçekleştirilen akifer testleri, düşüm türevi verilerini içeren diagnostik grafikler aracılığıyla analiz edilmiştir. Akifer hidrolik parametreleri, ikili gözeneklilik modeli yaklaşımı ile parametre tahmini yapan Moench, 1984 ve Barker, 1988 çözüm yaklaşımları ile tanımlanmıştır. Buna göre, süreksizlik ve matriks bileşenleri için sırasıyla hidrolik iletkenlik (K_f ve K_m) ve depolama (S_f ve S_m) katsayıları belirlenmiştir. Çalışmada, iki gözenekli akifer sistemini en iyi karakterize eden kuyuya ait türev grafiği; serbest akifer, basınçlı akifer ve tekli kırıklı-çatlaklı sistem modelleri ile analiz edilmiş ve iletkenlik katsayısı (T) temelinde bu modeller karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, türev grafikleri aracılığıyla kırıklı-çatlaklı akiferde kuyuya doğru akım rejimleri irdelenmiş; böylece sistemdeki erken (lineer akım), orta (bileneer akım) ve geç (radyal akım) zaman periyodunda gözlenmesi muhtemel akım karakteristikleri belirlenerek ve taşınım mekanizması ile ilişkilendirilmiştir.

Örnek Çalışma-4'de kırıklı-çatlaklı akifer ortamından alınan farklı tür matriks malzemeler için, dağılım katsayısı (K_{dm}) parametresi, laboratuvar çalışmalarını içeren statik batch deneylerinden elde edilen denge izotermi modelleri aracılığıyla tanımlanmış ve retardasyon faktörü (R_{dm}) hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kırıklı-Çatlaklı Akiferler, Kirletici Taşınımı, İlerleme Eğrisi, Matriks Difüzyonu, Retardasyon.

ABSTRACT

ESTIMATION OF TRANSPORT PARAMETERS AT DIFFERENT FRACTURED AQUIFER SYSTEMS

Kübra ÖZDEMİR ÇALLI

Master of Science, Department of Geology (Hydrogeology) Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Levent TEZCAN

January 2017, 103 pages

The high degree of heterogeneity in fractured aquifers is a major challenge to quantify flow and contaminant transport parameters. It is, however, extremely important to characterize contaminant transport processes and estimate the transport parameters in these aquifer systems, due to their vulnerability to pollution problem. Within this framework, in this study it is mainly aimed to estimate the contaminant transport parameters in fractured aquifers. Additionally, it is targeted to demonstrate how fractured aquifers differ from porous media aquifers in terms of parameter estimation on the basis of conceptual modelling approaches. To achieve this, four case study were conducted in different fractured aquifer systems to quantify the main transport parameters.

The first case study consisted of the Single Well Injection-Withdrawal Test (SWIW)-tracer test, experimented in fractured basalt aquifer with using Uranine tracer dye. Bimodal breakthrough curve (BTC) was obtained from the tracer test. To estimate the transport parameters, bimodal BTC was fitted by Gaussian and Lorenzian (Cauchy) probability distribution function, being conceptualized by Dual Porosity Model (DPM) and Equivalent Porous Media (EPM) modelling approaches, respectively. Therefore, it was concluded that the appropriate modelling approach for fractured basalt aquifer to quantify transport parameters was DPM, because of permitting the evaluation of double porosity based transport mechanism. Furthermore, the origin of bimodal breakthrough curve (BTC) was

evaluated in terms of its shape and size to understand transport mechanism in the fractured aquifer. With the help of BTC's early time, transition time and late time, the transport mechanism of aquifer was defined upon BTC.

In the second case study, two-well tracer test was applied in fractured dolomitic limestone aquifer to quantify the transport parameters. The BTC of Rhodamine WT exhibited multi-peaked shape. The regional transport parameters were fundamentally characterized by Gaussian distribution function, based on EPM modelling approach. It is also noted that three distinct local peaks in multi-peaked BTC were evaluated to be as secondary flow pathways mainly permitting contaminant transport, therefore the local advective velocity of each path was calculated.

Within the third case study, in order to estimate aquifer hydraulic parameters, drawdown results of three wells drilled into fractured limestone aquifer were assessed with diagnostic plots. Moench, 1984 and Barker, 1988 model solutions were selected to characterize double porous aquifer. Thereby, the hydraulic conductivity and storativity parameters of fracture and matrix for each well were calculated. Moreover, the derivative graph of PK2 well was analyzed by unconfined, confined, and single fractured aquifer types based on the estimation of transmissivity parameter to demonstrate the importance of aquifer type selection in drawdown curve analysis. With derivative analysis, the possible flow regimes of dual porous aquifer were demonstrated in the vicinity of pumping well. Therefore, the early time, transition time, and late time behaviors were described with demonstration of possible transport process in these time periods.

In the last case, the distribution coefficient (K_{dm}) of different matrix materials were determined by laboratory static batch tests. The retardation factors (R_{dm}) of matrix materials were calculated by using determined K_{dm} values and their bulk densities.

Keywords: Fractured Aquifer Systems, Contaminant Transport, Breakthrough Curve (BTC), Matrix Diffusion, Retardation.

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince bana çeşitli şekillerde destek olan ve çalışmamın tamamlanmasında katkıları olan kişilere teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana araştırma fırsatı tanıyan ve çalışmamın nihayeyi ulaşmasında önemli yere sahip tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Levent TEZCAN'a çalışmamda yol gösterici olduğu için çok teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarım süresince bilgisi ve deneyimini benimle paylaşan, çalışmamın yönlendirilmesinde katkısı olan değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Türker KURTTAŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmamın değerlendirilmesinde yapıcı eleştirileri ve katkıları için değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ'ye, Prof. Dr. Şakir ŞİMŞEK'e ve Prof. Dr. Mehmet ÇELİK'e çok teşekkür ederim.

Farklı zamanlarda her birinden öğrendiğim pek çok şey olan değerli hocalarım; Prof. Dr. Serdar BAYARI'a ve Prof. Dr. N. Nur ÖZYURT'a teşekkür ederim. Ayrıca bana her zaman destek olan sevgili ve değerli hocalarım Dr. Pınar AVCI ve Dr. Gizem ERKAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Maddi ve manevi destekleri, özellikle de sonsuz anlayışları için Sevgili Babam Mustafa ÖZDEMİR ve Annem Emine ÖZDEMİR'e çok teşekkür ederim. Ayrıca kardeşlerim Büşra ÖZDEMİR ve Emin ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Son olarak, Eşim Süleyman Selim ÇALLI'a manevi desteği için sonsuz sevgilerimi sunar ve çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KIRIKLI-ÇATLAKLI AKİFERLERDE KİRLETİCİ TAŞINIMI SÜREÇLERİ ..	5
2.1 Kırıklı-Çatlaklı Akiferlerde Kirletici Taşınım Süreçleri	5
2.2 Tekli Kırık-Çatlak Sistemi İçin Kirletici Taşınım Denklemleri	6
3. KİRLETİCİ TAŞINIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	9
3.1 İzleme Testleri ve İlerleme Eğrileri	9
3.2 Advektif ve Dispersif Taşınım Parametrelerinin Karakterizasyonu-Örnek Çalışmalar	13
3.2.1 Örnek Çalışma-1: Tek Kuyu İzleyici Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyi.....	13
3.2.1.1 Tek Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi	13
3.2.1.2 Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Bir Akifer Sisteminde TKEÇ Testi-İzleme Deneyi Uygulaması.....	15
3.2.1.3 Taşınım Parametrelerinin Tahmini Temelinde Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sistemi İçin Tercih Edilen Modelleme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması.....	24
3.2.1.4 Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sisteminin Hidrodinamiği Temelinde Taşınım Süreçlerinin Yorumlanması.....	25
3.2.2 Örnek Çalışma-2: Çoklu (İki) Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi ile İzleme Deneyi	29
3.2.2.1 İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi	29
3.2.2.2 Kırıklı-Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı Akiferinde İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyi Uygulaması	29
3.2.2.3 Kırıklı-Çatlaklı Akifer Ortamının Fiziksel ve Hidrodinamik Açından Yorumlanması	33
3.2.3 Örnek Çalışma-3: Akifer Testleri ile Kırıklı-Çatlaklı Kireçtaşı Akiferinde Hidrolik Parametre Karakterizasyonu.....	35
3.2.3.1 Kırıklı-Çatlaklı Akiferlerde Akifer Testleri ve Düşüm Türevi Grafikleri.....	36

3.2.3.2 Kırıklı-Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı Akiferinin Hidrolik Parametrelerin Belirlenmesi	41
3.2.3.3 Kırıklı-Çatlaklı Akifer Sisteminde Kuyuya Etki Eden Akım Karakteristiklerinin Yorumlanması	43
3.2.3.4 Farklı Analitik Çözüm Yaklaşımlarının Hidrolik Parametre Tahmini Temelinde Karşılaştırılması.....	46
3.3 Reaktif Taşınım Parametrelerinin Karakterizasyonu- Dağılım (Paylaşım) Katsayısı (K_d) ve Retardasyon Faktörünün (R_d) Tahmini.....	48
3.3.1 Örnek Çalışma-4: Statik Batch Tutulma Deneyi	48
3.3.2 Batch Tutulma Deneyi Veri Analizi ve Dağılım Katsayısı (K_d)	51
3.3.3 Batch Deneyi Sonuçları ve Denge İzotermi Modelleri	53
3.3.4 Batch Tutulma Deneyi Sonuçlarının Yorumlanması.....	55
4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR	57
EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Tek Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyine Ait Bilgiler.....	16
Çizelge 3.2 İzleyici İlerleme Eğrisi ile Doğrudan Elde Edilen Parametreler.....	17
Çizelge 3.3 İki-Pikli İlerleme Eğrisi ve Akım Mekanizması Temelinde Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sisteminde Taşınım Süreçlerinin Yorumlanması.....	27
Çizelge 3.4 Kuyular Arası İzleyici Enjeksiyon-Çekim Testine Ait Bilgiler.....	30
Çizelge 3.5 Tek-Pikli (Unimodal) İlerleme Eğrisinden GOD ile Hesaplanan Taşınım Parametreleri.....	33
Çizelge 3.6 Çok-Pikli (Multimodal) İlerleme Eğrisi Üzerindeki Yerel Pik İçin Hesaplanan Etkin Kanal Akım Hızları.....	33
Çizelge 3.7 Akifer Testlerine Ait Temel Bilgiler.....	35
Çizelge 3.8 PK1, PK2 ve PK3 Kuyuları için Hesaplanan Hidrolik Parametreler.....	43
Çizelge 3.9 PK2 Kuyusu Düşüm-Zaman Verilerinin Farklı Analitik Çözümler ile Hesaplanan İletimlilik Katsayısı Değerleri.....	46
Çizelge 3.10 Batch Deneylerinde Kullanılan Matriks Türleri ve Özellikleri.....	49
Çizelge 3.11 Batch Tutulma Deneyi Grupları ve Hazırlanan Çözelti Konsantrasyonları...	51
Çizelge 3.12 İzoterm Modellerinde Kullanılan Matematiksel Eşitlikler ve Doğrusallaştırılma Teknikleri.....	53
Çizelge 3.13 Batch Deneyleri ile Matriks Malzemeleri için Hesaplanan Parametreler.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Kırıklı-Çatlaklı Bir Akifer Sisteminin Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli ve Eşdeğer Gözenekli Malzeme Modelleme Yaklaşımı, 2b: Süreksizlik Açıklığı ve K_e : Eşdeğer Hidrolik İletkenlik Katsayısı	4
Şekil 1.2 Kırıklı-Çatlaklı Bir Akifer Sisteminin Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli ve İkili Gözeneklilik Model Yaklaşımı, K_m : Matriks Hidrolik İletkenlik Katsayısı ve K_f : Süreksizlik Hidrolik İletkenlik Katsayısı	4
Şekil 2.1 Tekli Bir Süreksizlik Yapısı Aracılığıyla Sisteme Giren Bir Kirleticinin Taşınım Mekanizmasının Kavramsallaştırılması	5
Şekil 2.2 Tekli Bir Süreksizlik Yapısı ile Çevre Gözenekli Matrikste Kirletici Taşınım Sürecinin Basitleştirilmiş Modeli	7
Şekil 3.1 Ani Enjeksiyon Yolu ile Akifer Sistemine Bırakılan Bir İzleyici İçin İlerleme Eğrisi ve Temel Özellikleri. T_1 : İzleyicinin İlk Geliş Zamanı, T_p : İzleyici Pik (Maksimum) Konsantrasyon Zamanı, T_m : İzleyicinin Ortalama Geçiş Zamanı, $T(R/2)$: Sistemden Kurtulan İzleyicinin Yarısının Örnekleme T_m : Noktasından Geçiş Zamanı	10
Şekil 3.2 Basitleştirilmiş Bir TKEÇ Testi Uygulaması [A]: Enjeksiyon Aşaması, [B]: Çekim Aşaması	14
Şekil 3.3 TKEÇ Testi İzleme Deneyi ve Ana Bir Süreksizlik Yapısı ile Çevre Kırıklı-Çatlaklı Matriks Tarafından Oluşan Akifer Ortamının Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli	16
Şekil 3.4 TKEÇ İzleme Testi ile Elde Edilen İlerleme Eğrisi ve İzleyici Kurtulma Eğrisi. 17	
Şekil 3.5 [A]: Uranin İzleyicisi Bimodal İlerleme Eğrisi ve Gauss Olasılık Dağılımı Kümülatif Eğrisi [B]: İkili Gözeneklilik Model Yaklaşımı ile GOD Fonksiyonuna Uydurulan Birincil ve İkincil İlerleme Eğrileri.	19
Şekil 3.6 Etkin Gözeneklilik Parametresine Bağlı Dispersivite Hesabı [A]: Birincil İlerleme Eğrisi İçin Dispersivite Tahmini [B]: İkincil İlerleme Eğrisi İçin Dispersivite Tahmini... 21	
Şekil 3.7 [A]: TKEÇ Testi-İzleme Deneyi ile Elde Edilen İki-Pikli (Bimodal) İlerleme Eğrisi. [B]: Multi-Pik Lorentz Dağılım Fonksiyonu ile Hesaplanan Değerler.....	23
Şekil 3.8 İkinci Varsayıma Göre Dispersivite Parametrelerinin Tahmini	24
Şekil 3.9 Uranin İzleyicisi İlerleme Eğrisine göre Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sisteminin Erken Zamanı [1], Matriks Konsantrasyon Tepkisi [2], Orta Zaman [3] ve Geç Zaman [4] Konsantrasyon Tepkileri.....	28
Şekil 3.10 İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi Uygulamasının Kavramsallaştırılması ve Sistemde İzleyici Konsantrasyonu Dağılımı	29
Şekil 3.11 Kırıklı-Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı Akifer Sistemi İzleyici İlerleme Eğrisi. ...	31
Şekil 3.12 Akifer Sistemi Bölgesel Taşınım Parametrelerinin Gauss Olasılık Dağılımı ile Analizi.	32

Şekil 3.13 [A]: Çatallı Bir Akarsu Sisteminin Yapısı. [B]: İzleyici İlerleme Eğrileri ile Yorumlanan Kırıklı-Çatlaklı Akifer Sisteminin Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli.....	34
Şekil 3.14 [A]: Düşüm Türevi Verileri ile Kuyuya Etki Eden Sınır Koşullarının Yorumlanması. [B]: Sistemdeki Farklı Akım Davranışı Bölgelerini Gösterir Diagnostik Grafikler.....	37
Şekil 3.15 Pompaj Kuyusu Etki Alanında Gelişen Muhtemel Akım Karakteristiklerinin Oluşum Periyotları.....	38
Şekil 3.16 [A]: İkili Gözeneklilik Model Yaklaşımı. [B]: İki Gözenekli Akifer Tipleri: [a]: Düzlemsel Süreksizlik Yapıları ve Matriks Blokları [b]: Küresel Matriks Blokları ve [c]: Kübik Matriks Blokları.....	39
Şekil 3.17 PK1 Kuyusu Düşüm ve Düşüm Türevi Grafiklerinin Moench, 1984 ve Barker, 1988 Çözüm Yaklaşımları ile Uyumlaştırılması. [A]: Moench, 1984 Düzlemsel Matriks Bloğu, [B]: Barker, 1988 Düzlemsel Matriks Bloğu.....	42
Şekil 3.18 PK2 Kuyusu Düşüm ve Düşüm Türevi Grafiği ile Pompaj Esnasında Kuyuya Doğru Gerçekleşen Muhtemel Akım Karakteristikleri	44
Şekil 3.19 PK1 ve PK3 Kuyularının Moench, 1984 Düzlemsel Blok Şekli Çözümüne Göre Analiz Edilmiş Diagnostik Grafikleri.....	45
Şekil 3.20 PK2 Kuyusu Düşüm Verilerinin Farklı Analitik Çözümleme Yaklaşımları ile Uyumlaştırılması. [A]: Barker, 1988- İkili Gözenek Modeli, [B]: Gringarten-Ramey, 1974- Tekli Düzlemsel Süreksizlik Modeli, [C]: Hantush, 1960- Sızıntılı Akifer Modeli ve [D]: Moench, 2007-Serbest Akifer Modeli.....	47
Şekil 3.21 Solda: Batch Tutulma Deneyi Prosedürü. Sağda: Deney Aşamaları [A]: Havada Kurutulan Matriks Malzemeleri, [B]: Seyreltik Stronsiyum Çözeltilisi, [C]: Su Banyosu, [D]: Deney Numuneleri.....	50
Şekil 3.22 Denge İzotermi Model Tipleri [A]: Langmuir İzotermi [B],[C]: Freundlich İzotermi [D]: Henry (Doğrusal) İzoterm	52
Şekil 3.23 [A]: F1 Örneğine ait Denge İzoterm Modeli-Langmuir İzotermi [B]: Langmuir İzotermi Doğrusallaştırılması.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Simge	Açıklama	Birim
K	Hidrolik İletkenlik Katsayısı	$[LT^{-1}]$
K_m	Matriks Hidrolik İletkenlik Katsayısı	$[LT^{-1}]$
K_f	Kırık-Çatlak Hidrolik İletkenlik Katsayısı	$[LT^{-1}]$
R_d	Retardasyon Faktörü	-
R_f	Kırık-Çatlak Yüzeysel Retardasyon Faktörü	-
R_m	Matriks Retardasyon Faktörü	-
K_d	Dağılım (Paylaşım) Katsayısı	$[L^3M^{-1}]$
K_{dm}	Matriks Dağılım (Paylaşım) Katsayısı	$[L^3M^{-1}]$
K_{df}	Kırık-Çatlak Dağılım (Paylaşım) Katsayısı	$[L^3M^{-1}]$
C	Madde (İzleyici) Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
C_f	Kırık-Çatlak Bileşeninde Madde Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
C_m	Matriks Bileşeninde Madde Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
θ_m	Matriks Gözenekliliği	-
D_m	Matriks Difüzyon Katsayısı	$[L^2T^{-1}]$
D_L	Boyuna Hidrodinamik Dispersiyon Katsayısı	$[L^2T^{-1}]$
α_L	Boyuna Dispersivite	[L]
b	Süreksizlik Yarı Açıklığı	[L]
φ	Difüzyon Kütle Akısı	$[L^2T^{-1}]$
λ	Bozunma Sabiti	$[T^{-1}]$
ρ_b	Matriksin Kuru Birim Ağırlığı	$[ML^{-3}]$
x	Kırık-Çatlak Bileşenindeki Akım Yönü	[L]
γ	Özgül Yüzeysel Alanı	$[L^2M^{-1}]$
T₁	İzleyicinin İlk Geliş Zamanı	[T]
T_p	İzleyicinin Maksimum Konsantrasyon Zamanı	[T]
T_m	İzleyicinin Ortalama Geçiş Zamanı	[T]
M_R	Sistemden Kurtulan İzleyici Miktarı	[M]
Q	Pompaj (Çekim) Miktarı	$[L^3T^{-1}]$
C_{max}	Maksimum Madde (İzleyici) Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$

σ_L^2	Konumsal Varyans	-
q	Ortalama Akım Hızı	$[LT^{-1}]$
r_w	Kuyu Yarıçapı	$[L]$
n_e	Etkin Gözeneklilik	-
B	Akifer Kalınlığı	$[L]$
D_F	Kırık-Çatlak Hidrodinamik Dispersiyon Katsayısı	$[L^2T^{-1}]$
D_m	Matriks Hidrodinamik Dispersiyon Katsayısı	$[L^2T^{-1}]$
D_e	Eşdeğer Hidrodinamik Dispersiyon Katsayısı	$[L^2T^{-1}]$
ϑ_e	Etkin Hız-Advektif Hız	$[L^2T^{-1}]$
t_p	Yerel Pik Oluşma Süresi	$[T]$
x_L	Akım Yolu Uzunluğu	$[L]$
S_s	Özgül Depolama	$[L^{-1}]$
h	Hidrolik Yük	$[L]$
r	Pompaj Kuyusundan Radyal Uzaklık	$[L]$
n	Akım Boyutu	-
A	Akım Alanı Kesiti	$[L^2]$
Γ	Gama Fonksiyonu	-
S_f	Süreksizlik Depolama Katsayısı	-
S_m	Matriks Depolama Katsayısı	-
T	İletimlilik Katsayısı	$[L^2T^{-1}]$
Sr	Stronsiyum	-
ρ_s	Katı Matriks Yoğunluğu	$[ML^{-3}]$
V_1	Stok Çözelti Hacmi	$[L^3]$
V_2	Hazırlanacak Çözelti Hacmi	$[L^3]$
C_1	Stok Çözelti Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
C_2	Standart Çözelti Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
R_s	Katı:Çözelti Oranı	$[ML^{-3}]$
q_e	Katı Matrikse Tutunan Konsantrasyon Miktarı	$[MM^{-1}]$
C_e	Denge Çözelti Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
C_0	Çözeltinin Başlangıç Konsantrasyonu	$[ML^{-3}]$
V	Çözelti Hacmi	$[L^3]$

M	Matriksin Havada Kurutulmuş Ağırlığı	[M]
N ve K_F	Freundlich Sabitleri	-
q_m ve β	Langmuir Sabitleri	-

Kısaltmalar

Kısaltma Açıklama

ADM	Advektif-Dispersif Taşınım Mekanizması
DDM	Dispersif-Difüzyif Taşınım Mekanizması
RTM	Reaktif Taşınım Mekanizması
ADE	Advektif-Dispersif Taşınım Eşitliği
TKEÇ	Tek Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi
GOD	Gauss Olasılık Dağılımı
LOD	Lorenz (Cauchy) Olasılık Dağılımı
SDRA	Sonsuz Davranışlı Radyal Akım
GRF	Genelleştirilmiş Radyal Akım
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i> - Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
vs.	<i>versus</i> - karşılık
ppt	<i>parts per thousand</i> - binde bir
ppm	<i>parts per billion</i> - milyonda bir
1B	Bir Boyutlu

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının amacı, kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinde kirlenici taşınım süreçleri parametrelerinin belirlenmesine yönelik saha ve laboratuvar testlerinin değerlendirilmesidir. Bu amaçla, iki farklı kırıklı-çatlaklı akifer ortamında akım ve taşınım parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen dört örnek karakterizasyon çalışması sunulmuş ve hidrolik ve taşınım parametrelerinin tahmini gerçekleştirilmiştir.

Su kaynakları içerisinde önemli yer tutan akifer sistemlerinde akım ve kirlenici taşınım süreçlerinin karakterizasyonu; mevcut sistemlerden etkin bir şekilde yararlanılması, kirliliğin giderilmesi, kaynağın korunması ve sürdürülebilir yönetimi çalışmalarında önemli bir aşamadır. Kirlenici taşınımı süreçlerinin tanımlanmasının temel basamağını ise, hidrojeolojik sistemin statüğünün ve dinamiğinin anlaşılması ile sistemi en iyi şekilde açıklayacak kavramsal ve matematiksel modelinin geliştirilmesi çalışmaları oluşturmaktadır.

Akifer sistemindeki akım ve taşınım süreçlerinin matematiksel modeller (analitik, stokastik ya da nümerik model) ile açıklanabilmesi için hidrojeolojik kavramsal model oluşumu temel adımdır. Kavramsal model, akifer sisteminin çalışma prensibinin tanımlanmasına yönelik bir hipotez olup, sistemi oluşturan fiziksel yapının (yayılım, kalınlık, derinlik vb.) ve bu yapıya ait bileşenlerin belirlenmesi ile sistemin çevresel ilişkilerinin fiziksel ve dinamik olarak açıklanabilmesidir. Matematiksel modellerin gereksinim duyduğu her bir parametrenin belirlenmesi sistem karakterizasyonu çalışmaları ile mümkündür. Akifer parametrelerinin zamansal ve konumsal ölçekte oldukça değişken olduğu heterojen sistemlerde, homojen ortam varsayımı ile gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları, sistemi oluşturan bileşenlerin tamamını tanımlamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle bu çalışmalar, sistemin yapısal karmaşıklığına, parametrelerinin konumsal ve zamansal değişkenliğine bağlı olarak farklı teknikleri ya da yaklaşımları gerektirmektedir.

Jeolojik yapının (matriks) gözeneklilik ve geçirimsizlik özellikleri; matriks üzerinde etkili olan yapısal evrim ve dinamik süreçler ile birlikte değerlendirildiğinde; akifer sistemlerini klasik gözenekli ortam akiferleri (taneli akifer) ve kırıklı-çatlaklı akiferler olarak iki temel türde sınıflandırmak mümkündür. Kırıklı-çatlaklı akiferler, aynı fiziksel etki alanı içerisinde birbirinden farklı hidrolik, hidromekanik ve hidrodinamik özelliklerine sahip iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden ilki, sistemin temel yapısını oluşturan jeolojik malzeme (matriks), diğeri ise süreksizlik (kırık, çatlak, eklem, kanal, fay gibi) yapılarıdır.

Her iki tür akifer sisteminde kirletici taşınımı; adveksiyon, mekanik dispersiyon, difüzyon ve retardasyon (gecikme-geciktirme) süreçleri tarafından kontrol edilmektedir. Ancak kırıklı-çatlaklı akiferlerde taşınım mekanizmasının matematiksel modellenabilirliği, aynı süreçlerin etkili olduğu diğer akifer ortamlarına göre daha karmaşık bir hal almaktadır. Kırıklı-çatlaklı akiferlerde kirletici taşınım mekanizmasının tanımlanması, sistemi oluşturan matriks ve süreksizlik yapılarının hem ayrı ayrı hem de birbiri ile olan fiziksel, (hidro)dinamik ve (jeo)kimyasal ilişkilerinin açıklanması ile mümkündür.

Kırıklı-çatlaklı akiferlerde yer alan süreksizlik yapıları, görece yüksek hidrolik iletkenlik özelliği dolayısı ile sistemdeki akım mekanizmasının ve advektif-dispersif taşınım süreçlerinin baskın olarak geliştiği bölgeleri oluşturmaktadır. Buna karşılık matriks, görece düşük hidrolik iletkenlik özelliği dolayısı ile sistemdeki kirletici kütle merkezinin saçılımını ve yayılımını açıklayan dispersif-difüzif taşınım süreçlerinin etkin olduğu sistem bileşenidir. Matriks bileşeni ayrıca, yüksek depolama özelliği ile akifer ortamına yayılan kirleticinin çeşitli nedenler ile (tutulma (sorpsiyon), değişim-dönüşüm ve oksidasyon-redüksiyon gibi) sistemdeki gecikme nedenlerini temsil eden retardasyon sürecinin esas olarak gerçekleştiği yapıdır.

Kırıklı-çatlaklı akiferlerde taşınım süreçlerinin tanımlanmasında karşılaşılan temel zorluk, sistemin ileri derecede heterojen özelliği dolayısıyla sayısal model gelişimi için gerekli verilerin ya da veri setlerinin tamamının –ya da bir bölümünün- yeterli ölçüde ve ölçekte tanımlanamaması ile sistemin tamamını kavramsallaştırmada yetersiz kalmasıdır. Bu nedenle bu tür akiferlerde taşınım parametreleri karakterizasyonu sistemin fiziksel ve matematiksel olarak nasıl kavramsallaştırıldığına, çalışma amacına ve ölçeğine göre büyük ölçüde değişiklik göstermektedir.

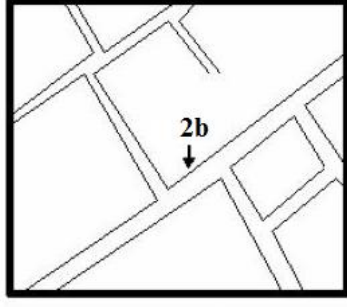
Kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinde akım ve taşınım mekanizmasının kavramsallaştırılması amaçlı geliştirilen yaklaşımların temelini, sistemin süreksizlik ve matriks bileşenlerinin gözeneklilik ve geçirimsizlik özelliklerinin tanımlanması oluşturmaktadır. Literatürde kırıklı-çatlaklı sistemlerin heterojenlik derecesine bağlı olarak, sistem ve sistemdeki akım davranışının analizi amaçlı çok sayıda araştırmacı tarafından geliştirilmiş modelleme yaklaşımları bulunmaktadır. Bu yaklaşımlarda esas amaç, sistemdeki akım heterojenitesinin açıklanması, dolayısı ile kirleticinin sistemdeki dağılımını etkileyen önemli bir parametrenin analizinin kolaylaştırılmasıdır. Böylece ilgilenilen kırıklı-çatlaklı sistemde akım ve taşınım parametrelerinin tahmininin güçlendirilmesi sağlanmaktadır.

Berkowitz, 2002 [1]'e göre, kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinde modelleme yaklaşımlarını Sürekli Modeller ve Ayrık Kırık-Çatlak Modelleri olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. **Sürekli Modeller** (Eşdeğer Gözenekli Malzeme ve İkili Gözeneklilik Modeli gibi) kırıklı-çatlaklı akifer sistemini, temsil edici birim hacimde sürekli bir ortam olarak görmektedir. **Ayrık Kırık-Çatlak Modelleri** (Paralel Plaka Modeli ve Ayrık Kırık-Çatlak Ağı Modeli gibi) ise, sistemdeki akım ve taşınım parametrelerinin sürekli modeller ile yeterli ölçüde tanımlanamadığı durumlarda tercih edilmektedir. Ayrık Kırık-Çatlak Modelleri için süreksizliklerin bağlantılı yapısı oldukça önemlidir. Bu nedenle bu yaklaşımda süreksizlik özelliklerinin, geometrisinin ve ağının tanımlanması gerekmektedir.

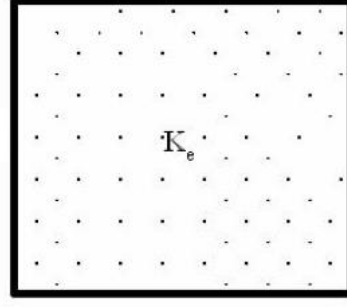
Bu iki temel modelleme yaklaşımı dışında, sürekli model ve ayrık kırık-çatlak modeli yaklaşımlarını birlikte değerlendiren Hibrit Modeller ile karstik akiferler gibi daha büyük süreksizlik yapılarının (erime boşluk ve kanalları gibi) geliştiği akifer ortamlarında süreksizliklerin üçüncü bir akifer bileşeni olarak değerlendirildiği Üçlü Gözeneklilik Modeli (örneğin Liu vd., 2001 [2]) yaklaşımları da bulunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında sunulan saha çalışmalarının gerçekleştirildiği kırıklı-çatlaklı akifer sistemleri, eşdeğer gözenekli malzeme ve ikili gözeneklilik model yaklaşımları ile kavramsallaştırılmış ve taşınım parametre tahmini bu iki modelleme yaklaşımı çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Her iki kavramsal model yaklaşımının temel esasları ise kısaca şöyledir:

Eşdeğer Gözenekli Malzeme Modeli: Eşdeğer süreklilik modeli olarak da bilinen bu yaklaşım, kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinde hidrolik ve taşınım parametrelerini, klasik gözenekli ortamlar gibi istatistiksel homojenlik temelinde ortalama değerler ile açıklamaktadır [Şekil 1.1]. Dolayısı ile bu yaklaşımda kırıklı-çatlaklı malzeme, temsil edici birim hacimde ortalama hidrolik karakteristikler (eşdeğer hidrolik parametreler) aracılığıyla açıklanabilen homojen ve sürekli bir ortam olarak görülmektedir. Berkowitz, 2002 [1]'e göre bu yaklaşım, özellikle büyük ölçekli problemlerin hidrojeolojik ya da mekanik çözümünü gerektiren durumlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Dolayısı ile eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı, büyük ölçekli hidrojeolojik çalışmalarda ortalama parametreler ile sistemin tümünün temsil edilebilirliği durumunda uygun bir yaklaşımdır.



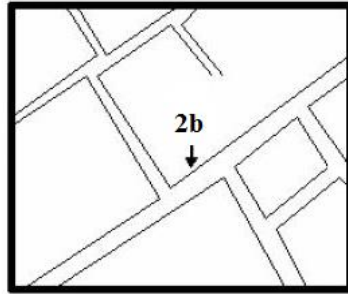
Kırıklı-Çatlaklı Akifer Ortamı



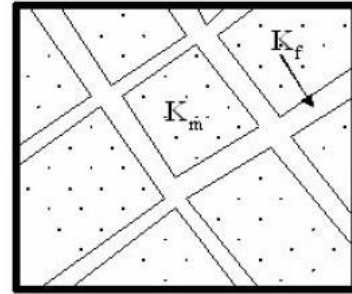
Eşdeğer Gözenekli Malzeme

Şekil 1.1 Kırıklı-Çatlaklı Bir Akifer Sisteminin Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli ve Eşdeğer Gözenekli Malzeme Modelleme Yaklaşımı, $2b$: Süreksizlik Açıklığı ve K_e : Eşdeğer Hidrolik İletkenlik Katsayısı ([3]'den değiştirilerek kullanılmıştır).

İkili Gözeneklilik Modeli: İkili gözeneklilik kavramı, kırıklı-çatlaklı akiferde süreksizlik ve matris bileşenlerinin iki farklı gözenekli (ya da geçirimli) yapısından kaynaklanan ikili bir sistem yaklaşımını gerekli görmektedir [Şekil 1.2]. Bu modelleme yaklaşımında, süreksizlikler görece yüksek iletkenlik özelliği dolayısıyla akıma olanak sağlayan sistem bileşenini; temel matris malzeme ise, düşük iletkenlik ve yüksek depolama özelliği ile süreksizliklere akım kaynağı oluşturan bileşen olarak değerlendirilmektedir.



Kırıklı-Çatlaklı Akifer Ortamı



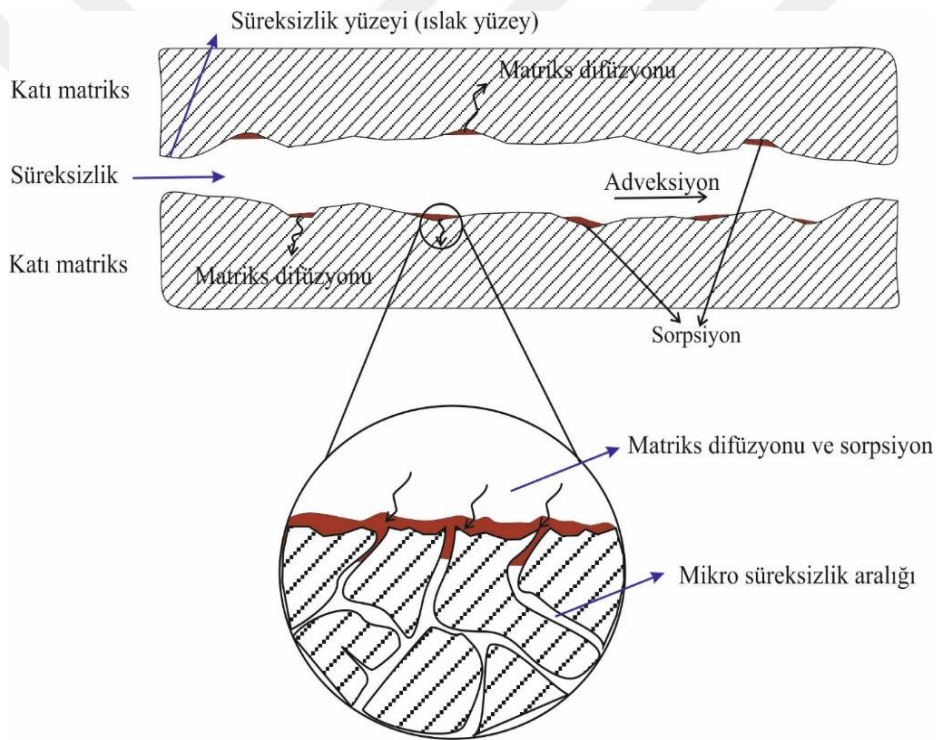
İkili Gözeneklilik Modeli

Şekil 1.2 Kırıklı-Çatlaklı Bir Akifer Sisteminin Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli ve İkili Gözeneklilik Model Yaklaşımı, K_m : Matris Hidrolik İletkenlik Katsayısı ve K_f : Süreksizlik Hidrolik İletkenlik Katsayısı ([3]'den değiştirilerek kullanılmıştır).

2. KIRIKLI-ÇATLAKLI AKİFERLERDE KİRLİTİCİ TAŞINIMI SÜREÇLERİ

2.1 Kırıklı-Çatlaklı Akiferlerde Kirletici Taşınım Süreçleri

Kırıklı-çatlaklı bir akifer sisteminde kirletici taşınım süreçlerinin tanımlanması için başlangıç noktası, tekli bir süreksizlik (kırık, çatlak, eklem, tabaka düzlemi, fay gibi) yapısındaki kirletici taşınımı mekanizmasının anlaşılması ve matematiksel olarak tanımlanmasıdır. Buna göre, tekli bir süreksizlik (kırık-çatlak) açıklığında herhangi bir akışkan (sıvı ya da gaz) aracılığıyla gerçekleşen kirletici taşınımı; kırık-çatlak yapısı boyunca advektif-dispersif taşınım, kırık-çatlaktan matrikse doğru kirletici yayılma sürecini açıklayan difüzyon, kırık-çatlak yüzeyi ve matrikste gerçekleşen retardasyon süreçlerini içermektedir [Şekil 2.1].



Şekil 2.1 Tekli Bir Süreksizlik Yapısı Aracılığıyla Sisteme Giren Bir Kirleticinin Taşınım Mekanizmasının Kavramsallaştırılması ([4] ve [5]'den yararlanılarak çizilmiştir).

Akifer sisteminde kirleticinin reaktif taşınımını açıklayan retardasyon süreci, kirleticinin türüne ve bulunduğu ortama bağlı olarak, akiferde taşınımı sırasında çözünme, çökeltme, radyoaktif bozunma, tutulma (sorpسیyon), redoks tepkimeleri, kolloidal taşınım, uçuculuk, biyobozunma gibi pek çok farklı kimyasal ya da biyokimyasal süreçler ile geciktirilmesini ifade etmektedir. Kırıklı-çatlaklı akiferlerde retardasyona neden olan iki temel süreç; kırık-çatlak yüzeyleri ile matriks yapı arasında gerçekleşen sorpsiyon süreci ve kırık-çatlaklardan matrikse doğru gerçekleşen matriks difüzyonudur. Sorpsiyon, bir kirleticinin fiziksel ya da

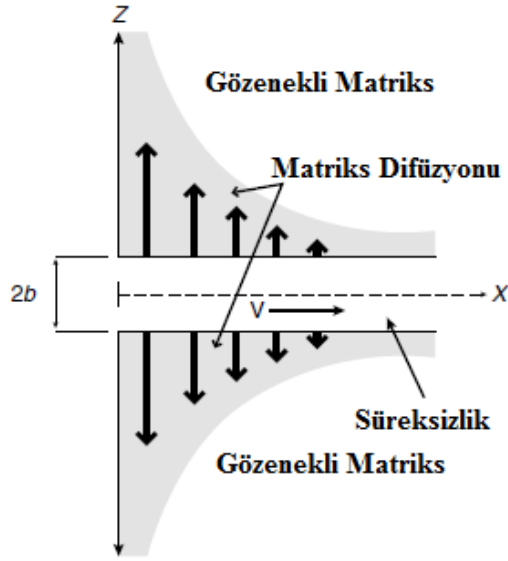
kimyasal süreçler aracılığıyla matriks malzeme üzerine tutunmasını ifade etmektedir. Matriks difüzyonu ise, kirleticinin yeraltısuyu akım hızından ve yönünden bağımsız olarak, yalnızca konsantrasyon gradyanına ve maddenin kinetik (ya da termodinamik) aktivitesine bağlı olarak sistem içine yayılma sürecini açıklamaktadır.

2.2 Tekli Kırık-Çatlak Sistemi İçin Kirletici Taşınım Denklemleri

Tekli bir kırık-çatlak sisteminde bir boyutlu (1B) kirletici taşınımının açıklanması için Neretnieks, 1980 [6], Tang vd., 1981 [7] ve Grisak ve Pickens, 1981 [8] tarafından analitik çözümler geliştirilmiş; sabit açıklıklı paralel süreksizlik sistemlerini kapsayan çözümleri ise, Tang vd., 1981 [7] ve Sudicky ve Frind, 1982 [9] tarafından gerçekleştirilmiştir. Malozewski ve Zuber, 1985 [10], 1990 [11] ve 1993 [12] kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinde gerçekleştirdikleri izleme testleri aracılığıyla, tekli kırık-çatlak sistemi için eşdeğer çözümü içeren Tekli Kırık-Çatlak Dispersiyon Modelini tanımlanmıştır. Maloszewski, 1994 [13] ise, bu model içinde tanımlanmış varsayımlar dâhilinde ve süreksizlik yapısındaki dispersiyon sürecinin ihmal edilmesi ile Tekli Kırık-Çatlak Piston Akım Modeli için analitik çözümünü üretmiştir.

Tekli kırık-çatlak ve çevre gözenekli matriksten oluşan bir sistemde taşınım mekanizmasının açıklanması için geliştirilen analitik çözümler içerisinde Tang vd., 1981 [7] çözümü; süreksizlik sistemindeki advectif taşınımı, süreksizlik sistemi boyunca boyuna mekanik dispersiyonu, süreksizlikteki moleküler difüzyonu, süreksizlikten matrikse doğru gerçekleşen difüzyonu, süreksizlik yüzeyindeki ve matriks bileşenindeki sorpsiyon sürecini ve radyoaktif bozunmayı içermesi dolayısı ile en kapsamlı analitik çözümü oluşturmaktadır. Reismus, 2003 [14]'e göre, bu sistemde kirletici taşınım mekanizması 1B'lu Advectif-Dispersif Taşınım Eşitliği (ADE) ve kırık-çatlaklardan akım yönüne dik çevre matrikse doğru gerçekleşen 1B'lu difüzyon süreci ile modellenmektedir.

Tekli kırık-çatlak ve çevre gözenekli matriksten oluşan iki gözenekli sistemin basitleştirilmiş fiziksel ve dinamik modeli Şekil 2.2'de verilmiştir. Buradan hareketle, sistemdeki akım dinamiğine bağlı gelişen tekli kırık-çatlak bileşeni ve çevre gözenekli matriks için kirletici taşınım denklemi, Tang vd., 1981 [7] analitik çözümüne dayalı olarak açıklanmıştır. Bu çözüme göre, tekli bir kırık-çatlak ve matriks için; advectif taşınım, boyuna dispersiyon, süreksizlikten matrikse doğru moleküler difüzyon, matriks yüzeyinde sorpsiyon, matriks içerisindeki sorpsiyon ve radyoaktif bozunma ile birlikte yazıldığında; Eşitlik [2.1]'de verilen denklem ortaya çıkmaktadır [15].



Şekil 2.2 Tekli Bir Süreksizlik Yapısı ile Çevre Gözenekli Matrikste Kirletici Taşınım Sürecinin Basitleştirilmiş Modeli ([15]'den değiştirilerek kullanılmıştır).

$$2b \left[\underbrace{R_f \frac{\partial C_f}{\partial t}}_{\text{Retardasyon}} + \underbrace{\vartheta \frac{\partial C_f}{\partial x}}_{\text{Adveksiyon}} - \underbrace{D_L \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2}}_{\text{Dispersiyon}} + \underbrace{\lambda R_f C_f}_{\text{Bozunma}} \right] + \underbrace{2\varphi}_{\text{Difüzyon}} = 0 \quad ; \quad 0 \leq x \leq \infty$$

Eşitlik [2.1]

Burada, x : süreksizlik eksenini doğrultusunu ve akım yönü, $2b$: süreksizlik açıklığı (L), C_f : süreksizlikteki madde (kirletici) konsantrasyonu (ML^{-3}), ϑ : x yönünde advectif hız (LT^{-1}), D_L : boyuna hidrodinamik dispersiyon (L^2T^{-1}), λ : radyoaktif bozunma gibi birinci derece reaksiyon kinetiği (T^{-1}), R_f : süreksizlik yüzeyindeki retardasyon faktörü ve φ : süreksizlik eksenine dik difüzyon kütlesi akısını (L^2T^{-1}) ifade etmektedir. Eşitlik [2.1]'de verilen süreksizlik yüzeyindeki retardasyon faktörü (R_f) doğrusal izoterm için,

$$R_f = 1 + \frac{K_{df}}{b} \quad ; \quad K_d = \gamma K_{df}$$

Eşitlik [2.2]

olarak ifade edilmektedir. Burada, K_{df} : kırık-çatlak duvarı (yüzeyi) için dağılım (paylaşım) katsayısını tanımlamaktadır. Yüzey dağılım katsayısı (K_{df} , L^3M^{-1}), gözenekli kaya malzemesi için akışkanın temasta olduğu gözenek duvarlarının özgül yüzeyi alanından, γ , (L^2M^{-1}) yararlanarak Eşitlik [2.2]'deki gibi hacimsel dağılım katsayısı (K_d , L^3M^{-1}) olarak da ifade edilebilmektedir.

Eşitlik [2.1]'de verilen (boyuna) hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_L , L^2T^{-1}) ise gözenekli malzemeler için Eşitlik [2.3]'de tanımlanmıştır:

$$D_L = \alpha_L \vartheta + D_m \quad \text{Eşitlik [2.3]}$$

Eşitlik [2.3]'de, α_L : süreksizlik eksenini doğrultusunda boyuna dispersivite (L) parametresini ve D_m : matriks gözenek hacmindeki akım yollarının geometrik etkisini içeren etkin difüzyon katsayısını (L^2T^{-1}) ifade etmektedir [15]. Buna göre, Tang vd., 1981 [7] tarafından matriks bileşeni için türetilen taşınım denklemi Eşitlik [2.4]'de gibi verilmektedir .

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} - \frac{D_m}{R_m} D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} + \lambda C_m = 0 \quad ; \quad b \leq z \leq \infty \quad \text{Eşitlik [2.4]}$$

Eşitlikte C_m : matriks bileşendeki madde konsantrasyonu (ML^{-3}), D_m : matriks difüzyon katsayısı (L^2T^{-1}), R_m : matriks retardasyon faktörü ve λ : radyoaktif bozunma gibi birinci dereceden reaksiyon sabitini (T^{-1}) açıklamaktadır [15]. Eşitlikteki matriks retardasyon faktörü ise;

$$R_m = 1 + \frac{\rho_b}{\theta_m} K_{dm} \quad \text{Eşitlik [2.5]}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, ρ_b : matriksin kuru birim ağırlığını (ML^{-3}), θ_m : matriks gözenekliliğini ve K_{dm} : matriks malzemenin dağılım katsayısını (L^3M^{-1}) ifade etmektedir.

Eşitlik [2.1]'de verilen kırık-çatlak ve matriks ara yüzeyindeki difüzyon sürecini açıklayan difüzyon kütle akısı (φ), Fick'in birinci yasası ile birlikte açıklandığında;

$$\varphi = \theta_m D_m \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{z=b} \quad \text{Eşitlik [2.6]}$$

halini almaktadır. Böylece Eşitlik [2.6] yardımıyla, tekli bir kırık-çatlak ve çevre gözenekli matriksten oluşan bir sistem için kirletici taşınım denklemi Eşitlik [2.7]'deki gibi tanımlanmaktadır [15].

$$2b \left[\underbrace{R_f \frac{\partial C_m}{\partial t}}_{\text{Retardasyon}} + \underbrace{\vartheta \frac{\partial C_m}{\partial x}}_{\text{Adveksiyon}} - \underbrace{D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2}}_{\text{Dispersiyon}} + \underbrace{\lambda R_f C_m}_{\text{Bozunma}} \right] - \underbrace{2\theta_m D_m \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{z=b}}_{\text{Difüzyon}} = 0 ; \quad 0 \leq x \leq \infty \quad \text{Eşitlik [2.7]}$$

3. KIRLETİCİ TAŞINIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Tez çalışması kapsamında iki farklı kırıklı-çatlaklı akifer sisteminde advectif-dispersif taşınım parametrelerinin tanımlanması amaçlı gerçekleştirilen saha testleri ile reaktif taşınım süreçlerini temsil eden retardasyon faktörünü belirlemeye yönelik laboratuvar testleri değerlendirilmiştir.

Advectif-dispersif taşınımında temel taşınım parametrelerinin tahmini için sunulan ilk uygulama, kırıklı-çatlaklı bir bazalt akifer sisteminde tek kuyu enjeksiyon-çekim-izleme deneyi çalışmasıdır. Bu çalışma, Sinop Yarımadası'nın Karadeniz kıyı şeridi boyunca yüzeylenen Üst Kretase yaşlı Hamsaros formasyonda gerçekleştirilmiştir. Hamsaros formasyonu, yastık lav şeklinde bazaltik lav akıntıları, dayklar, piroklastik ve volkanoklastik çökellerden oluşan ve sütunsal yapılar sunan lav akıntıları ile dayklarda gelişen soğuma çatlaklarına sahiptir. Bu formasyonda gelişen ikincil gözeneklilik, kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminin oluşumunu sağlamıştır.

Advectif-dispersif taşınım parametrelerin tahmini için sunulan ikinci uygulama, kırıklı-çatlaklı ve karstik bir dolomitik kireçtaşı akiferinde iki kuyu enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyi çalışmasını içermektedir. İzleme deneyi, kumtaşı ardalanmalı dolomit, dolomitik kireçtaşı ve breşik kireçtaşı birimlerinden oluşan Büyükeceli formasyonunda gerçekleştirilmiştir. Bu birimde kırık-çatlak yapıları sıklıkla görülmekte olup, bu yapılarda kil ve kalsit dolgululu damarlar bulunmaktadır.

Kırıklı-çatlaklı akiferlerde hidrolik parametrelerin belirlenmesine yönelik üçüncü uygulama, yine Büyükeceli formasyonunda gerçekleştirilen akifer testlerinin değerlendirilmesini içermektedir.

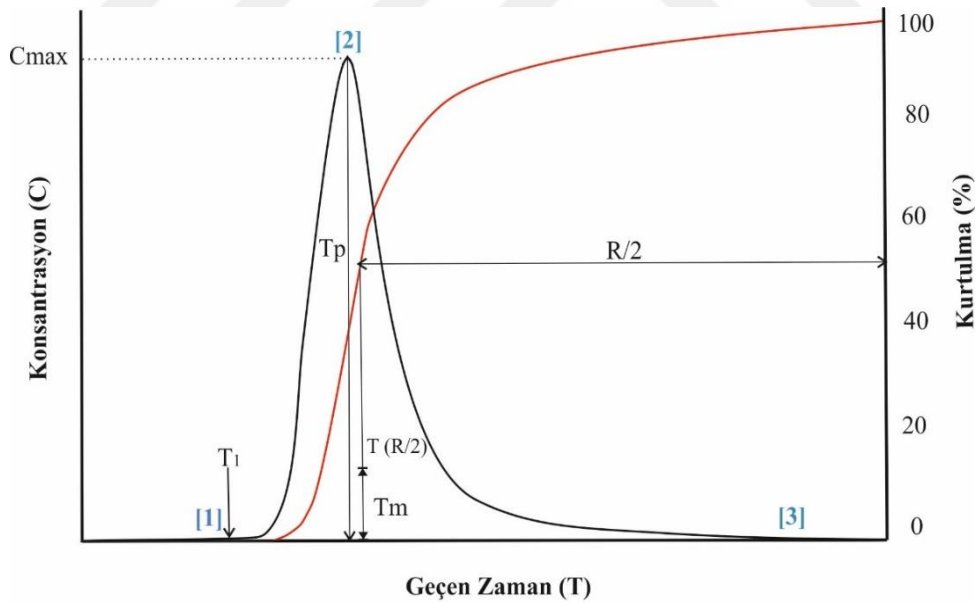
Reaktif taşınım parametrelerinin tanımlanması amaçlı sunulan son uygulamada ise, Büyükeceli formasyonundan örneklenen farklı tür matriks malzemelerin dağılım katsayısının (K_{dm}) laboratuvarında karakterizasyonunu amaçlayan statik batch tutulma deneyi çalışması sunulmuştur.

3.1 İzleme Testleri ve İlerleme Eğrileri

Kırıklı-çatlaklı akiferlerde taşınım süreçlerinin açıklanmasında iki temel belirsizlik vardır: **(I)** Kırık-çatlak yapısının açıklığı, pürüzlülüğü, içerdiği dolgu malzemesi ile yeri ve geometrisini tanımlayan bağlantılı yapısı gibi geometrik özelliklerinin belirlenmesindeki kısıtlamalar; **(II)** Akım ve taşınım parametrelerini belirleyen fiziksel süreçlerin

açıklanmasındaki belirsizliklerdir [16]. Bu temel belirsizlikler, yaygın olarak sistem yapısının anlaşılmasını ve sistemin kirleticiye olan tepkisinin analizini sağlayan izleyici (ya da izleme) testleri ile aşılmaya çalışılmaktadır. İzleme testi çalışmaları, akifer sistemindeki kirletici taşınımını kontrol eden fiziksel ve jeokimyasal parametrelerin yerel ve bölgesel ölçekte tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

İzleme testleri ile zamana ya da konuma bağlı izleyici konsantrasyonu değişimini gösterir ilerleme eğrileri elde edilmektedir [Şekil 3.1]. Böylece ilerleme eğrileri izleyici konsantrasyonunun konumsal ve zamansal dağılımının tanımlanmasına olanak sağlamakta; taşınım süreçlerinin analizinde ve parametre tahmininde kullanılmaktadır. NRC, 1996 [17]'e göre, ilerleme eğrileri aracılığıyla izleyici kütlesinin, hızının ve dispersiyonunun doğrudan tanımlanması mümkündür. Daha detaylı olarak bu eğriler, sistemdeki akım hızı ve büyüklüğünün belirlenebilmesi, izleyici akım yolu hidrolik özelliklerinin (bağlantılı yapısı) ve içsel yapısının tahmini ile dispersiyon ve karışım süreçlerinin analizinde kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de verilen izleyici ilerleme eğrisi ayrıca, akifer sistemlerinde olası bir kirlilik probleminde, sistemin kirlilik duyarlılık analizinin yapılması ve koruma alanlarının belirlenmesinde temel bilgileri sağlamaktadır.



- Konsantrasyon
— Kurtulma
- [1] Kirlilik problemi ne zaman başlar?
[2] Maksimum kirletici konsantrasyonu nedir?
[3] Sistemde kirletici ne kadar süre kalır?

Şekil 3.1 Ani Enjeksiyon Yolu ile Akifer Sistemine Bırakılan Bir İzleyici İçin İlerleme Eğrisi ve Temel Özellikleri. T_1 : İzleyicinin İlk Geliş Zamanı, T_p : İzleyici Pik (Maksimum) Konsantrasyon Zamanı, T_m : İzleyicinin Ortalama Geçiş Zamanı, $T(R/2)$: Sistemden Kurtulan İzleyicinin Yarısının Örnekleme T_m Noktasından Geçiş Zamanı ([18]ve [19]'dan yararlanarak çizilmiştir).

Şekil 3.1'deki verilen ilerleme eğrisi üzerinde gösterilen kurtulma eğrisi, akifer sistemine giren izleyicinin (ya da kirleticinin) sistemden kurtulma miktarını (M_R) göstermektedir. İzleyici kurtulma eğrisi, akifer sistemine bırakılan bir izleyicinin örnekleme noktasında kütle miktarı olarak ne kadarının toplandığını ifade etmektedir. Bu miktar, izleme testinin güvenilirliğinin artırılması açısından da önemli bir göstergedir.

Goldscheider vd., 2008 [20], izleyici kurtulma miktarının açıklanması amaçlı genel eşitliği Eşitlik [3.1]'deki gibi tanımlamıştır:

$$M_R = \int_{t=0}^{\infty} (QC) dt$$

Eşitlik [3.1]

Eşitlikte, M_R : izleyicinin akifer sisteminden kurtulma miktarını (M), Q: pompaj (çekim) miktarını (L^3T^{-1}) ve C: izleyici konsantrasyonunu (ML^{-3}) ifade etmektedir.

Akifer sisteminin hidrojeolojik yapısına ve sistemin kirleticiye karşı tepkisine özgü gelişen izleyici ilerleme eğrileri, tek-pikli (unimodal), iki-pikli (bimodal) ya da çok-pikli (multimodal) gibi çeşitli yapılarda ve büyüklüklerde gözlenebilir. Johnson vd, 2005 [21]'e göre, arazi izleme testleri ile elde edilen ve farklı akifer ortamı karakteristiklerini gösterir ilerleme eğrileri genel olarak dört grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar; Gauss tipli ilerleme eğrisi, geriye kuyruklu ilerleme eğrisi, iki-pikli ilerleme eğrisi ve çok-pikli ilerleme eğrisidir.

Klasik gözenekli ortamlarda akım ve taşınım parametrelerini büyük ölçüde karakterize eden Gauss tipli ilerleme eğrileri, korunumlu bir izleyicinin ideal konsantrasyon-konum dağılımını açıklayan ve Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonu – (ya da normal dağılım fonksiyonu) ile açıklanabilen ve advektif-dispersif taşınım eşitliği (ADE) ile karakterize edilebilen eğriler olup, tek-pikli bir yapı göstermektedir. Gauss tipli ilerleme eğrilerinin dışında kalanlar ise; daha çok heterojen akifer ortamlarını karakterize eden, uzun çekilme kuyruklu, iki-pikli ya da çok-pikli ilerleme eğrileridir (örneğin [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]). İzleyici ilerleme eğrilerinin yapısında görülen bu farklılıklar; izleyici karakteri, pompaj miktarı, örnekleme sıklığı ve alet duyarlılığı gibi deneysel faktörler dışında; esas olarak akifer sistemlerinin hidrodinamik, hidrokimyasal ve biyokimyasal (ya da mikrobiyolojik) özelliklerine bağlı olarak gelişmektedir. Bu nedenle ilerleme eğrilerinin yapısı, akifer sisteminin hidrolik ve taşınım parametrelerinin tanımlanmasında oldukça önemlidir.

Kırıklı-çatlaklı akiferlerden izleme deneyleri ile elde edilen ilerleme eğrilerinin Gauss olasılık dağılım fonksiyonu ile uyumlaştırılması sonucu taşınım parametre tahmini gerçekleştirilebilir olsa da; temelde bu tür heterojen akiferlerde süreçlerin işleyişinin anlaşılması ve birbirinden ayrılması açısından yetersiz kalmaktadır. Öte yandan taşınım parametrelerinin karakterizasyonu, özellikle kırıklı-çatlaklı akiferler için çevresel kirlilik risklerinin doğru değerlendirilmesinde oldukça önemli olup; güncel çalışmalar zamana ve konuma bağımlı akifer parametrelerin detaylı açıklanmasının zorunlu olduğunu göstermektedir (örneğin [29], [30], [31], [32], [28]). Bu nedenle heterojen sistemlerde ilerleme eğrilerinin analizinde alternatif fiziksel ve matematiksel yaklaşımların ihtiyacı gündeme gelmektedir.

İzleme testlerinden elde edilen izleyici ilerleme eğrilerinin analizi amaçlı sınırlı sayıda sınır koşulu için geliştirilmiş, analitik eşitliklere dayanan TRAC (Gutierrez, 2013) [33]; TRACI95 (Käss, 2004) [34]; CXTFIT (Toride vd., 1999) [35]; QTRACER2 (Field, 1999) [36] ve TRACI (Werner, 1998) [37] gibi farklı yazılım araçları bulunmaktadır. Buna karşılık ilerleme eğrilerindeki bimodal ve multimodal yapının temelde analizi; sistemde izleyici dispersiyonuna ve retardasyonuna neden olan karmaşık bağlantılı akım yollarının bulunması, dispersiyon esnasındaki akım dönüşümlerinin ve kanal akım alanı içerisindeki değişkenliklerin olması [38]; aralıklı depolamanın görülmesi ve hidrolik olarak durgun zonların kabarması [39] ile içsel bağlantılı düşük ve yüksek kırık-çatlak geçirimsizliğinin gerçekleşmesi [40] gibi zamana ve konuma bağımlı değişkenlerin tanımlanmasındaki güçlükler nedeniyle oldukça zordur [41]. Bu nedenle kırıklı-çatlaklı akiferlerde ilerleme eğrilerinin analizi ölçek bağımlı ADE modelleme yaklaşımı dışında da, akım alanındaki akışkanın hareketini tanımlayan Hareketli-Hareketsiz Model (örneğin [42]) ve Gauss dağılımına uymayan istatistiksel dağılım modellerini içeren Fraksiyonel Advectif-Dispersif Denklem (örneğin [43]) yaklaşımları ile günümüzde genişletilmeye çalışılmaktadır.

Literatürde iki-pikli ve çok-pikli ilerleme eğrilerinin analitik ve nümerik analizi için yaygın olarak tercih edilen çözüm yaklaşımı çoklu dispersiyon modelidir. Maloszewski vd., 1992 [44] tarafından geliştirilen bu model, enjeksiyon noktasından akifere bırakılan bir izleyicinin örnekleme noktasında birleşen farklı akım kanalları aracılığıyla taşındığını varsaymaktadır. Çoklu dispersiyon modeline göre, her bir akım yolu tek bir advectif akım ve dispersiyon ile karakterize edilmektedir. Böylece örnekleme noktasında bireysel izleyici ilerleme eğrileri multimodal ilerleme eğrilerini oluşturmak için üst üste çakıştırılmaktadır [45].

3.2 Advektif ve Dispersif Taşınım Parametrelerinin Karakterizasyonu-Örnek Çalışmalar

Advektif-dispersif taşınım mekanizmasının (ADM) tanımlanmasında hidrodinamik dispersiyon katsayısı, dispersivite, etkin gözeneklilik ve etkin hız parametrelerinin belirlenmesi önemlidir. Tez kapsamında bu amaçla, farklı kırıklı-çatlaklı akifer ortamlarında gerçekleştirilen izleme deneyi ve akifer testi çalışmaları ile akifer sistemlerinin temel taşınım ve hidrolik parametreleri tanımlanmıştır.

Buna göre, Örnek Çalışma-1'de kırıklı-çatlaklı bazalt bir akiferde korunumlu izleyici ile gerçekleştirilen Tek Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi (TKEÇ)-izleme deneyi çalışması sunulmuş ve akifer sisteminin hidrodinamik dispersiyon, etkin gözeneklilik ve dispersivite parametreleri hesaplanmıştır. Örnek Çalışma-2'de, kırıklı-çatlaklı dolomitik bir kireçtaşı akiferinde korunumlu izleyici ile gerçekleştirilen iki kuyu enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyi çalışmasına yer verilmiş ve sistem taşınım parametreleri belirlenmiştir. Örnek Çalışma-3'de ise, kırıklı-çatlaklı bir dolomitik kireçtaşı akiferinde hidrolik parametrelerinin (hidrolik iletkenlik, iletimlilik ve depolama katsayısı) tahmini için gerçekleştirilen akifer testi çalışmaları sunulmuştur.

3.2.1 Örnek Çalışma-1: Tek Kuyu İzleyici Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyi

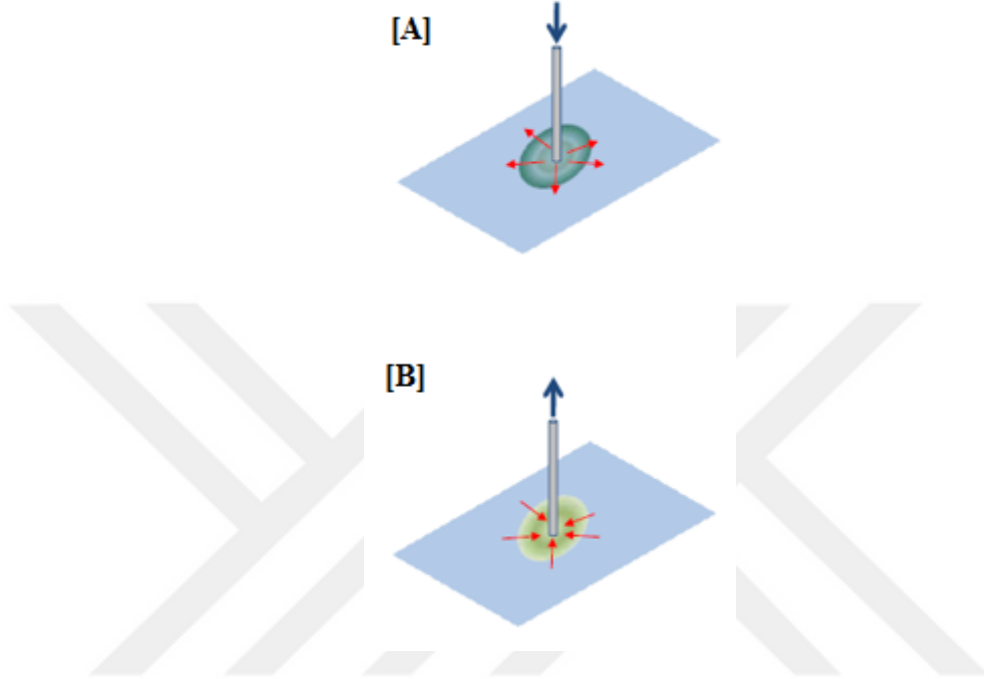
Akifer sistemlerinde izleme deneyi çalışmaları, sistemin doğal hidrolik koşulları altında ya da sistemde farklı akım koşullarının yaratılması ile gerçekleştirilmektedir. Doğal hidrolik koşullar altında gerçekleştirilen izleme deneyi, akifer sisteminin gerçek hidrolik gradyan koşullarında gerçekleştirilen çalışmalar olup; deneyden elde edilecek akım ve taşınım parametrelerinin (etkin hız ve dispersivite gibi) güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Ancak, kırıklı-çatlaklı sistemler gibi heterojen sistemlerde doğal koşullar altında deney süresinin uzaması ve izleyici kayıplarının sıklıkla görülmesi nedenleri ile izleme deneyleri çoğunlukla akiferde zorlanmış hidrolik gradyan koşullarında gerçekleştirilmektedir. Bu koşullar, çekim esnasında farklı akım alanlarının yaratılmasına izin vermektedir.

Örnek Çalışma-1 kapsamında sunulan izleme deneyi, kırıklı-çatlaklı bazalt bir akifer sistemindeki kirlenici taşınımı davranışının yorumlanması ve taşınım parametrelerinin tahmini amaçlı zorlanmış hidrolik gradyan altında gerçekleştirilen tek kuyu enjeksiyon-çekim testi çalışmasıdır.

3.2.1.1 Tek Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi

Tek kuyu enjeksiyon-çekim (TKEÇ) testi, bir ya da daha fazla izleyici ile belirli konsantrasyon miktarında hazırlanan bir çözeltinin, anlık ya da sürekli enjeksiyon yoluyla

bir kuyudan sisteme basılmasının ardından akifer ortamına karışan izleyici(ler)nin aynı kuyudan pompajla çekilmesi esasına dayanmaktadır. Bu temelde gerçekleştirilen TKEÇ testinde izleyici(ler)nin kuyunun silindirik yüzeyi boyunca radyal akımla akifer sistemine sızması sağlanmakta; belirli bir bekleme süresinin ardından, izleyici enjeksiyon kuyusundan belirlenen zaman aralıklarında ve sabit çekim altında toplanmaktadır [Şekil 3.2].



Şekil 3.2 Basitleştirilmiş Bir TKEÇ Testi Uygulaması [A]: Enjeksiyon Aşaması, [B]: Çekim Aşaması ([46]'dan alınmıştır).

TKEÇ testinde taşınım parametrelerinin (dispersiyon katsayısı, dispersivite ve gözeneklilik) tahmininde, izleyici enjeksiyonu ve çekimi aşamasında akifer sisteminde aynı akım koşullarının geliştiği varsayımı yapılmaktadır. Bu tekniğin temel avantajları, iki kuyu enjeksiyon-çekim testine göre daha az izleyici miktarı gerektirmesi, izleyicinin sistemden büyük oranda geri toplanmasına ve yerel ölçekte sistem taşınım parametrelerinin etkin olarak tanımlanmasına olanak sağlamasıdır. Ayrıca TKEÇ testinde yeraltısuyu akım yönünün kesin olarak tanımlanmış olması gerekmemektedir.

TKEÇ testi, akifer sisteminin fiziksel, kimyasal ya da biyolojik karakteristiklerinin (hidrolik iletkenlik, dispersivite, etkin gözeneklilik, matriks difüzyonu, sorpsiyon, reaksiyon oranı gibi) tanımlanmasında kullanılmaktadır (örneğin [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53]). Bununla birlikte, matriks difüzyonu ve sorpsiyon mekanizmasını içeren retardasyon süreçlerinin tanımlanmasında etkili bir yöntem olması dolayısıyla da yaygın olarak tercih edilmektedir.

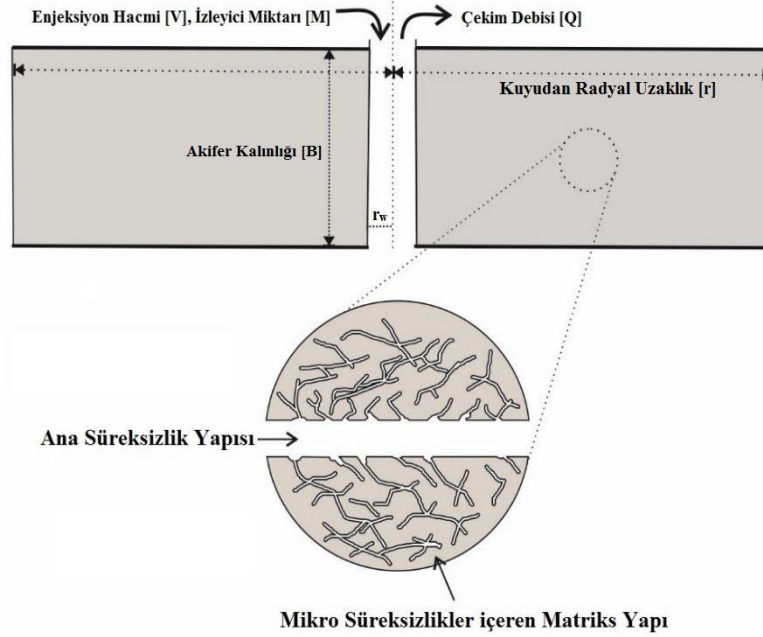
TKEÇ deneylerinde kullanılan izleyici türü, ilerleme eğrilerinin doğru yorumlanmasında önemlidir. Buna göre, korunumlu izleyiciler akifer sisteminin statikğine ve dinamiğine bağlı süreçlerin (adveksiyon, mekanik dispersiyon ve difüzyon) tahmininde; paylaşımlı ya da reaktif izleyiciler ise, sistemdeki kimyasal taşınım süreçlerinin (mikrobiyal aktivite, jeokimyasal değişim-dönüşümler, reaksiyon kinetiği gibi) analizinde kullanılmaktadır. Ayrıca izleme deneyinde her iki izleyici türünün birlikte kullanılması, sistem taşınım mekanizmasının bütüncül olarak yorumlanmasına ve parametrelerinin güçlü tahminine izin vermektedir.

3.2.1.2 Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Bir Akifer Sisteminde TKEÇ Testi-İzleme Deneyi Uygulaması

Örnek Çalışma-1 kapsamında sunulan izleme deneyi, bazalt, bazaltik andezit ve andezit bileşimindeki dayk ve piroklastitlerden oluşan volkanik bir sahada gerçekleştirilmiştir. Deney sahası, eklem ve çatlak sistemlerinin yoğun bir biçimde geliştiği bir saha olup, ikincil gözenekliliği yüksek bir akifer ortamının gelişimine izin vermiştir. İzleme deneyinin gerçekleştirildiği Hamsaros formasyonu, derinlikleri 50 m ile 85 m arasında değişen dar çaplı sondaj kuyularından elde edilen bilgilere göre, üstte Pliyo-Kuvaterner yaşı ince kum ve siltli killi seviyeler içeren Sarıkum formasyonu ile sınırlandırılmıştır. Hamsaros formasyonunun üst seviyeleri ise, ileri düzeyde bozunmuş olup, kilce zengin bu malzemenin toplam kalınlığı 10 metreyi aşmamaktadır. Kilce zengin bu zon Hamsaros formasyonu üzerinde geçirimsiz bir örtü oluşturmuştur. Buna göre, deneyinin gerçekleştirildiği akifer sisteminin, ana bir süreksizlik yapısı ile bu yapıyı çevreleyen ve mikro kırık-çatlak yapıları içeren gözenekli bir matriks tarafından oluştuğu tahmin edilmektedir. Şekil 3.3'de TKEÇ testinin gerçekleştirildiği kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminin basitleştirilmiş kavramsal modeli verilmiştir. TKEÇ testinde korunumlu Uranin izleyicisi anlık enjeksiyon yolu ile sisteme bırakılmış ve aynı kuyudan sabit debi ile sistemden çekilmiştir. İzleme deneyine ait temel bilgiler Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Buna göre, deneyde 200 gram Uranin izleyicisi ve 26 litre su ile hazırlanan 7692.3 mg/l (ppm) konsantrasyonlu çözelti, enjeksiyon kuyusundan yeraltısuyuna 3 dakika içerisinde basılmış ve izleyici enjeksiyonu sonrası yaklaşık 9 gün (214 saat) beklenmiştir. Daha sonra 5.4 l/s sabit debi ile enjeksiyon kuyusundan çekime başlanmıştır. Çekim yaklaşık 8 gün (188 saat) devam etmiş ve izleyici miktarının tamamına yakını sistemden toplanmıştır. Böylece izleme testi sonuçları, akifer sisteminin hidrodinamik yapısının yorumlanması ve taşınım parametrelerinin tahmini amaçlı değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.1 Tek Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyine Ait Bilgiler.

İzleyici Türü	Pompaj Derinliği (m)	Kuyu Derinliği (m)	Filtre Boyu (m)	Kuyu Çapı	İzleyici Miktarı		Pompaj Debisi (Q, l/s)
					Enjeksiyon miktarı (mg/l)	Toplanan miktar (g)	
Uranin	21	105	75 m	8"	7692.3	200	5.4

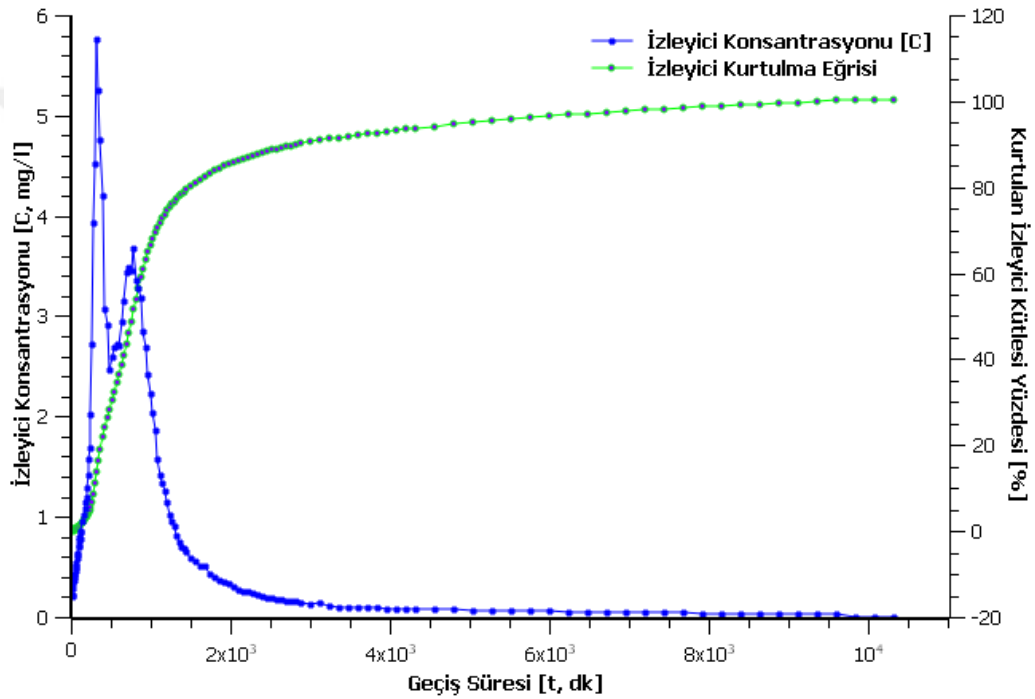


Şekil 3.3 TKEÇ Testi İzleme Deneyi ve Ana Bir Süreksizlik Yapısı ile Çevre Kırıklı-Çatlaklı Matriks Tarafından Oluşan Akifer Ortamının Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli.

TKEÇ testi ile elde edilen Uranin izleyicisine ait ilerleme eğrisi Şekil 3.4’de verilmiştir. Buna göre, akifer sisteminin heterojen yapısına bağlı olarak, ilerleme eğrisi asimetric ve iki-pikli (bimodal) bir dağılım göstermiştir. Bu dağılım iki mod (tepe değer) değeri içeren bir eğri ile ifade edilen bir dağılımdır. Akifer sisteminin kırıklı-çatlaklı yapısı göz önüne alındığında, ilk piki oluşturan eğri izleyicinin görece daha hızlı taşındığı ana süreksizlik sistemi akım hidrodinamiğini temsil etmektedir. Dolayısıyla bu bölgeyi baskın advectif taşınım kanalı olarak görmek mümkündür. Öte yandan, ikinci pikin temsil ettiği ikincil eğri ise, uzun salınımlı, geniş ve pozitif bir çarpıklık göstermektedir. Buna göre, ikincil eğri sisteme bırakılan izleyicinin, mikro süreksizlikler içeren temel matriks hidrodinamiği ve hidro(jeo)kimyası etkisinde kaldığı bölge mekanizmasını tanımlamaktadır. Ayrıca bu eğrinin uzun kuyruklu çekilme kısmı ise, heterojen sistemdeki dispersif-difüzyon baskın taşınım mekanizmayı karakterize etmektedir. Dolayısıyla çekilme eğrisinin tanımladığı bu bölgeyi, sisteme karışan kirleticinin büyük oranda depolanabileceği bölge ya da kütle

(kirletici) transferinin gerçekleştiği matriks difüzyon alanı olarak da değerlendirmek mümkündür.

Şekil 3.4’de ilerleme eğrisi üzerinde görülen ikincil pikin, birincil pik sönümlenmeden geliştiği görülmektedir. Bu sönümlenmenin sistem tarafından kesintiye uğratılması, çevre gözenekli matriksin ana süreksizlik sistemine zaman ölçeğinde konsantrasyon tepkisi olarak görülebilir. Bu nedenle bu süreyi, iki akifer bileşeni arasındaki izleyici değişimi (takası) ya da izleyicinin matriks yapısına sızması için geçen süre olarak da değerlendirmek mümkündür. Diğer anlamda bu süre, süreksizlik yapısına komşu çevre matriksin kirleticiye karşı tepki süresidir.



Şekil 3.4 TKEÇ İzleme Testi ile Elde Edilen İlerleme Eğrisi ve İzleyici Kurtulma Eğrisi.

Şekil 3.4’de verilen Uranin izleyicisi ilerleme eğrisinden doğrudan elde edilen temel parametreler; izleyici pik konsantrasyonu (C_{max}), izleyicinin ilk varış zamanı (T_1) ve konsantrasyon pik zamanı (T_p) Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 İzleyici İlerleme Eğrisi ile Doğrudan Elde Edilen Parametreler.

Parametreler	1. Pik	2. Pik
İzleyici Pik Konsantrasyon Zamanı (T_p , dk)	320	780
İzleyici Pik Konsantrasyonu (C_{max} , ppm)	5.75	3.67
Toplanan İzleyici Kütleleri (M_R , gr)	27.8	200.3
Enjekte Edilen İzleyicinin Kurtulma Yüzdesi (M_R , %)	13.9	~100.1

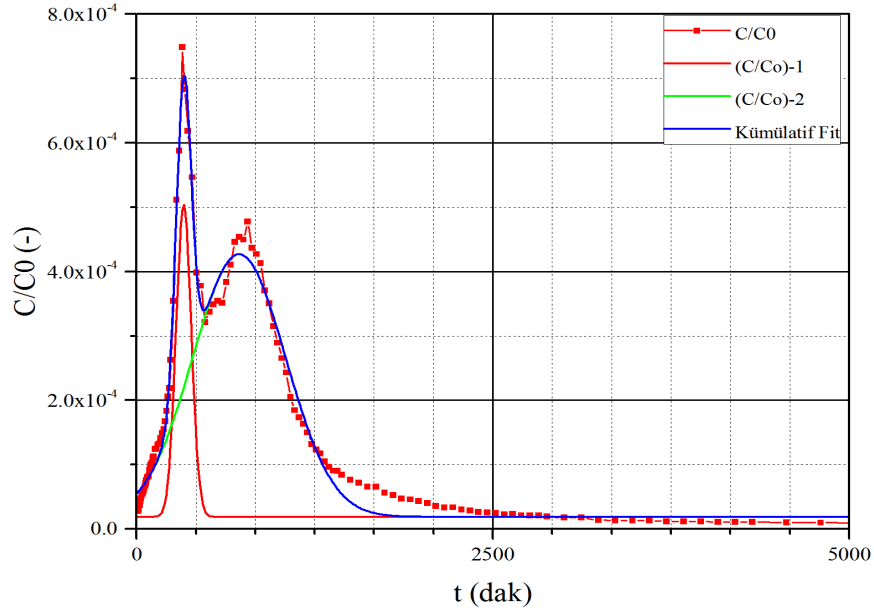
Çalışma kapsamında Şekil 3.4’de verilen ilerleme eğrisi aracılığıyla, kavramsallaştırılan akiferdeki taşınım süreçlerinin analizi ve parametre tahmini için iki farklı varsayım yapılmıştır: *İlki*, kırıklı-çatlaklı sistem ve matriks yapı arasında madde alış-verişinin olmadığı (ya da ihmal edildiği) varsayımdır. Böylece sistemde madde taşınımı, sistem bileşenlerinin kendine özgü hidrodinamik ve hidrojeokimyasal özellikleri ile ayrı olarak gerçekleşmektedir. *İkincisi* ise, sisteme bırakılan izleyicinin sistem bileşenleri arasında dağılımı için yeterince süre olduğu, dolayısıyla da kirleticinin sistemde tam karışıma uğradığıdır.

➤ **Birinci Varsayımın Göre Akifer Sisteminin Yorumlanması ve Parametre Tahmini:**

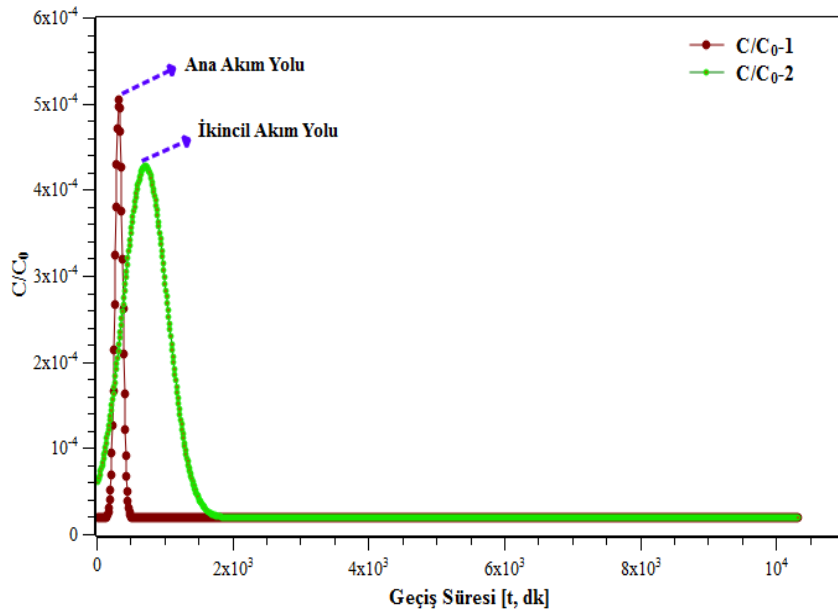
İlk varsayım için sistemin hidrodinamik davranışının analizinde ikili gözeneklilik model yaklaşımı (örneğin Barenblatt vd., 1960 [54]; Warren ve Root, 1963 [55]; Kazemi, 1969 [56]; Sudicky, 1990 [57] ve Toride vd.,1999 [35]) tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, birbirine bağlı gözenek boşluklarını ya da birbirine bağlı süreksizlik yapılarını tanımlayan akifer sisteminin; matriks yapı ve süreksizlik bileşenlerinin farklı hidrolik ve hidromekanik özelliklere sahip olduğunu varsaymaktadır. İkili gözeneklilik modeli yaklaşımı sürekli ortam hidroliğine uygun olup, süreksizlik sisteminde laminar akım koşullarının varlığını kabul etmektedir. Dolayısıyla çalışma kapsamında iki farklı bileşen için ayrı ayrı analiz edilen sistem taşınım parametreleri, bu temel yaklaşım çerçevesinde incelenmiştir. Böylece her iki yapıda gerçekleşen akım ve taşınım süreçlerinin ayrı ayrı matematiksel modellenabilirliği esas alınmıştır.

Birinci varsayımın göre, Şekil 3.4’de verilen iki-piklik izleyici ilerleme eğrisinin karakterize ettiği ana süreksizlik yapısı ve matriks malzeme, kendi içerisinde sürekli ortam hidroliğine uygun davranış göstermektedir, dolayısıyla da her iki bileşende gerçekleşen advectif-dispersif taşınım mekanizması Gauss olasılık dağılımı (GOD) fonksiyonu ile açıklanabilir. Bu noktada ana süreksizlik yapısı için temel varsayım; süreksizlik yüzeyinin dolgu malzemesi içermediği ya da altere olmadığı ile yüzeyinin pürüzsüz ve düz olduğudur. Dolayısı ile sistemdeki süreksizlik bileşeninde laminar akım koşulları geçerlidir. Buna göre, birinci varsayım çerçevesinde akifer sistemindeki ana akım yolunu (ya da taşınım kanalını) temsil eden birincil pik eğrisi ve ikincil akım yolunu oluşturan ve mikro kırıklı-çatlaklı yapılardan oluşan temel matriks malzemenin temsil ettiği ikincil pik eğrisi için GOD analizi gerçekleştirilmiştir [Şekil 3.5[A]]. Böylece her iki eğrinin oluşumunu sağlayan akım ortamları, dolayısı ile de izleyici taşınım bölgeleri için ayrı ayrı taşınım parametreleri

hesaplanmıştır. Buna göre Şekil 3.5[B]'de verilen ve iki farklı akım yolunu karakterize eden birincil ve ikincil ilerleme eğrileri, kırıklı-çatlaklı akifer sistemdeki iki farklı advectif-dispersif taşınım mekanizmasını tanımlamaktadır. Buradan hareketle, her iki piki oluşturan eğrinin Gauss olasılık dağılım fonksiyonu ile uyumlaştırılması sonucu ana akım yolunu tanımlayan birincil pik eğrisi için hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_f) ve ikincil akım yolunu tanımlayan ikincil pik eğrisi için hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_m) hesaplanmıştır.



[A]



[B]

Şekil 3.5 [A]: Uranin İzleyicisi Bimodal İlerleme Eğrisi ve Gauss Olasılık Dağılımı Kümülatif Eğrisi
 [B]: İkili Gözeneklilik Model Yaklaşımı ile GOD Fonksiyonuna Uydurulan Birincil ve İkincil İlerleme Eğrileri.

Birinci varsayım temelinde parametre tahmini, Domenico ve Schwartz, 1990 [58] ve Fetter, 1999 [59]'e göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre, konuma bağlı ilerleme eğrilerinden boyuna hidrodinamik dispersiyon parametresi (D_L), ortalama ve varyans ile tanımlanan Gauss dağılımının ilerleme eğrisi ile uyumlaştırılması aracılığıyla açıklanmaktadır [Eşitlik [3.2]]. Gauss dağılımında ortalama, yeraltısuyu akımdan kaynaklanan yer değiştirmeyi, varyans ise ortalama etrafında saçılmayı dolayısı ile dispersiyonu ifade etmektedir.

$$D_L = \frac{\sigma_L^2}{2t}$$

Eşitlik [3.2]

Burada D_L : boyuna hidrodinamik dispersiyon katsayısını (D_L, L^2T^{-1}), σ_t^2 : Gauss dağılımında konumsal varyansı ve t : süreyi ifade etmektedir [58]. Sistemdeki akım hızının (ϑ) sabit olması durumunda izleyici ilerleme eğrisi ile akım yönünde hidrodinamik dispersiyon parametresi (D_L, L^2T^{-1});

$$D_L = \frac{\vartheta \sigma_L^2}{2x} = \vartheta^2 \frac{\sigma_t^2}{2t}$$

Eşitlik [3.3]

halini almaktadır [58]. Burada x : kirletici kütle merkezinin kaynaktan uzaklığı ve σ_t^2 : GDO fonksiyonundan elde edilen zamansal varyansı açıklamaktadır.

Tek kuyu enjeksiyon çekim (TKEÇ) testinden, akifer sistemindeki ortalama akım hızı (q , LT^{-1});

$$q = \frac{Q}{2\pi r_w B}$$

Eşitlik [3.4]

eşitliğinden tanımlanmıştır. Dolayısı ile akifer sistemindeki boyuna hidrodinamik dispersiyon (D_L) parametresini;

$$D_L = \left(\frac{q}{n_e}\right)^2 \frac{\sigma_t^2}{2t}$$

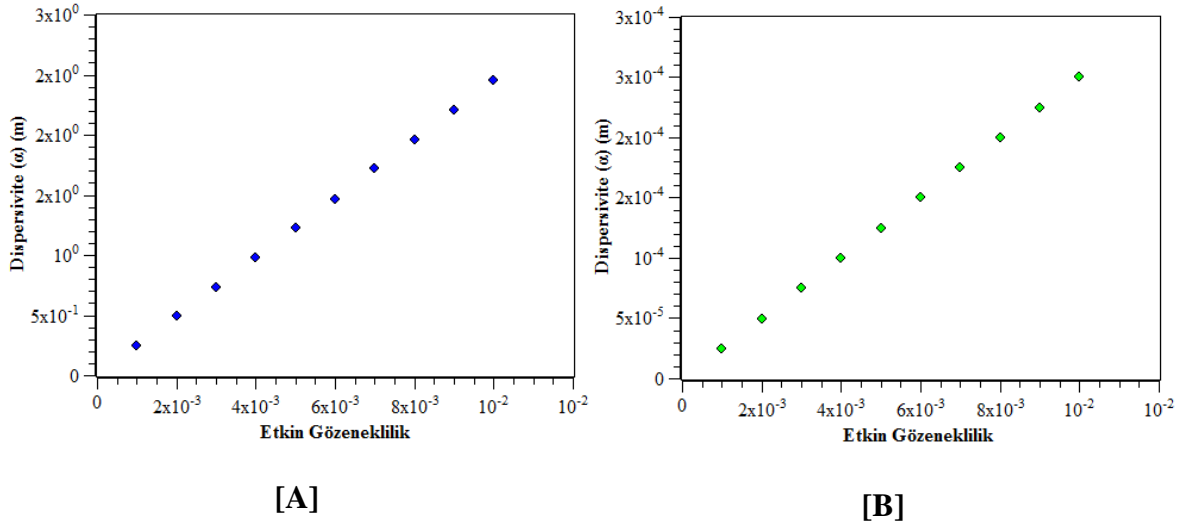
Eşitlik [3.5]

olarak ifade etmek mümkündür. Eşitliklerde, Q : kuyudan çekilen su miktarını (L^3T^{-1}), B : akifer kalınlığını (L) ve r_w : kuyu yarıçapını (L) ifade etmektedir.

Buna göre, birinci varsayım dâhilinde ve verilen eşitlikler yardımıyla, kırıklı-çatlaklı akifer sistemindeki ortalama akım hızı (q) 8.06×10^{-5} m/s olarak hesaplanmıştır. Böylece birincil pik eğrisini oluşturan kırık-çatlak yapısı için hidrodinamik dispersiyon (D_F) 1.98×10^{-2} m²/s;

ikincil pik eğrisini oluşturan katı matriks için ise hidrodinamik dispersiyon (D_m) 2.01×10^{-6} m²/s olarak belirlenmiştir.

Öte yandan, kırıklı-çatlaklı bazalt akiferine ani enjeksiyon yolu ile bırakılan Uranin izleyicisinin silindirik kuyu yüzeyinden itibaren konumsal ölçekte dağılımını açıklayan uzaklık değişkeninin (x , (L)), TKEÇ testinden tahmin edilmemesi dolayısı ile akifer sisteminin etkin gözeneklilik (n_e) parametresinin doğrudan tanımlanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle, Şekil 3.6'da verilen (boyuna) dispersivite (α_L) ve etkin gözeneklilik (n_e) arasındaki ilişkiden yararlanılarak, etkin gözenekliliğin 0.001-0.01 arasında değişen varsayımsal değerlerine karşılık gelen dispersivite (α_L) parametreleri, ana süreksizlik ve mikro kırık-çatlaklı katı matriks bileşenleri için hesaplanmıştır. Böylece Şekil 3.6'da süreksizlik yapısına ve matriks malzemeye ait ilerleme eğrileri için etkin gözenekliliğe bağlı dispersivite değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.6 Etkin Gözeneklilik Parametresine Bağlı Dispersivite Hesabı [A]: Birincil İlerleme Eğrisi İçin Dispersivite Tahmini [B]: İkincil İlerleme Eğrisi İçin Dispersivite Tahmini.

➤ **İkinci Varsayıma Göre Akifer Sisteminin Yorumlanması ve Parametre Tahmini:**

İkinci varsayım, matriks ve süreksizlik yapısı arasında izleyici dağılımı açısından yeterince süre olduğu, dolayısıyla da madde alış-verişinin büyük ölçüde iki sistem bileşeni arasında tamamlandığıdır. Bu durumda taşınım parametresi karakterizasyonu, birbiri ile tam etkileşimli olan ana bir süreksizlik yapısı ile çevre matriks tarafından üretilen izleyici ilerleme eğrisinin bütüncül analizini gerektirmektedir. Dolayısıyla bu eğriyi oluşturan iki-pikli yapının, birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu noktada, akifer sistemini eşdeğer gözenekli malzeme modeli ile kavramsallaştırmak

mümkündür. Eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı ile büyük ölçekli izleme testlerinde kırıklı-çatlaklı akifer hidrodinamiğini, klasik gözenekli ortam hidrodinamiği temelinde eşdeğer sürekli ortam olarak tanımlamak olasıdır (örneğin Freeze ve Cherry, 1979 [60], Berkowitz vd., 1988 [61]). Böylece hidrolik parametreler ve taşınım parametreleri temsil edici birim hacimde ortalama değerler ile ifade edilebilir.

Tez kapsamında eşdeğer gözenekli ortam olarak kavramsallaştırılan akifer sisteminde parametre analizi için; klasik gözenekli ortamlarda homojen-izotrop kabulü ile ilerleme eğrisi pik modellenmesinde kullanılan GOD yerine, heterojen sürekli sistemler için daha uygun olduğu düşünülen ve özellikle ilerleme eğrisinin uzun kuyruklu çekilme kısmının açıklanmasında yardımcı olan Lorentz (Cauchy) Olasılık Dağılımı (LOD) Fonksiyonu tercih edilmiştir. Bu dağılım fonksiyonu, α -duraylı olasılık dağılım fonksiyonu olup; Gauss dağılımından tek farkı, daha uzun kuyruklu dağılım eğrilerinin uç değerlerinin analizinde kullanılabilmesidir. Dolayısı ile uzun kuyruklu ilerleme eğrilerini daha iyi karakterize etmeye olanak sağlayacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda taşınım parametre tahmini amaçlı kullanılan olasılık yoğunluk analizleri için SCIDAVIS programından yararlanılmıştır. Buna göre, Uranin izleyici ilerleme eğrisinin multi-pik LOD ile analizi Şekil 3.7[A]'da gösterilmiştir. Şekil 3.7[B]'de ise Lorenz olasılık yoğunluk fonksiyonu ile hesaplanan C/C_0 değerleri için izleyici ilerleme eğrisi verilmiştir.

Çalışmada taşınım parametre tahmininde kullanılan iki-pikli ilerleme eğrisi ile uyumlaştırılan LOD fonksiyonu Eşitlik [3.6]'da verilmiştir:

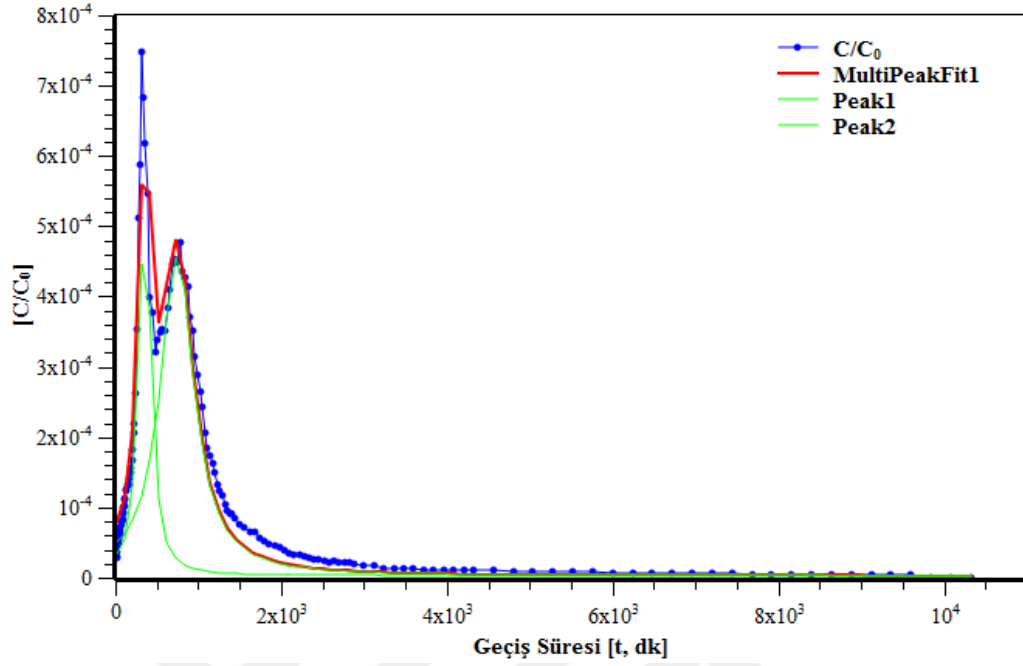
$$y = y_0 + \frac{2 A/\pi w}{4(x - x_c)^2 + w^2}$$

Eşitlik [3.6]

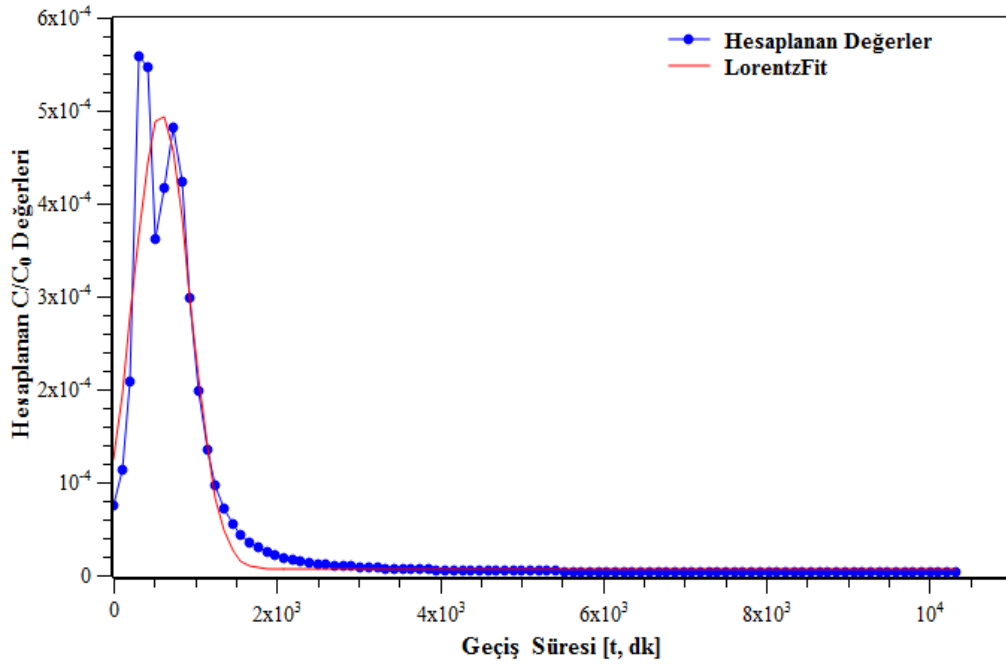
Burada, y : izleyicinin C/C_0 değerleri, x : zaman, w : zamansal varyans, A ve y_0 eşitlik sabitlerini ifade etmektedir.

Tek kuyu enjeksiyon-çekim testinden hesaplanan ortalama akım hızı (q) 8.06×10^{-5} m/s'dir. İkinci varsayıma göre, eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı ile kavramsallaştırılan kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sistemi için eşdeğer hidrodinamik dispersiyon parametresi (D_e) ise, Eşitlik [3.3] aracılığıyla 7.09×10^{-6} m²/s olarak belirlenmiştir. Eşdeğer hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_e) parametresi, iki gözenekli akifer sisteminin eşdeğer gözenekli malzeme modelleme yaklaşımı ile analizi sonucu hesaplanan ortalama bir parametreyi ifade etmektedir. Bununla birlikte, birinci varsayımdaki benzer parametre tahmin yaklaşımı ile akifer sistemi için etkin gözeneklilik değerlerine karşılık gelen eşdeğer dispersivite değerleri

tanımlanmış ve Şekil 3.8’de grafiği verilmiştir. Buna göre, örneğin 0.01 gözenekli bir kırıklı-çatlaklı bazalt akifer ortamı için eşdeğer dispersivite (α_e) 8.08×10^{-5} m olarak hesaplanmıştır.

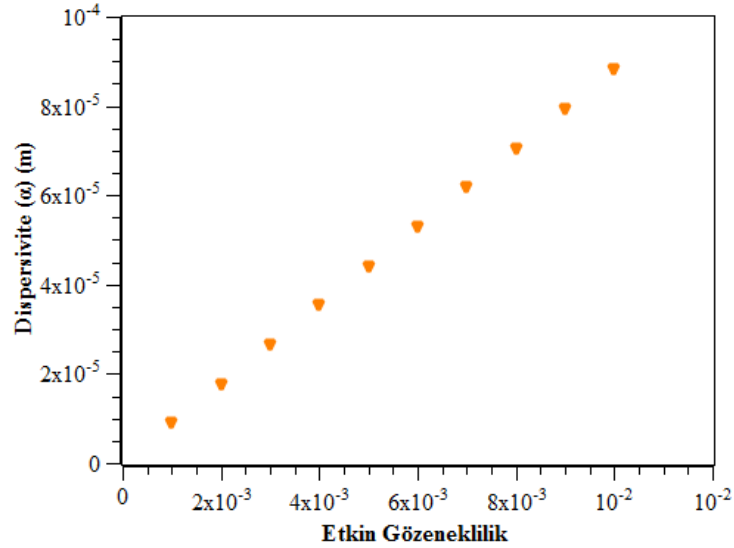


[A]



[B]

Şekil 3.7 [A]: TKEÇ Testi-İzleme Deneyi ile Elde Edilen İki-Pikli (Bimodal) İlerleme Eğrisi. [B]: Multi-Pik Lorentz Dağılım Fonksiyonu ile Hesaplanan Değerler.



Şekil 3.8 İkinci Varsayıma Göre Dispersivite Parametrelerinin Tahmini.

3.2.1.3 Taşınım Parametrelerinin Tahmini Temelinde Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sistemi İçin Tercih Edilen Modelleme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

Kırıklı-çatlaklı bazalt bir akifer sisteminde tek kuyu enjeksiyon-çekim (TKEÇ) testi-izleme deneyi çalışmasından elde edilen ilerleme eğrisi, akifer sisteminin heterojen yapısı dolayısı ile iki-pikli (bimodal) bir dağılım göstermiştir. Buna göre, bimodal ilerleme eğrisini oluşturan birincil pik eğrisi, kısa oluşum süreli ve dar yapılı; ikincil pik eğrisi geniş yayımlı ve uzun kuyrukludur. Karakteristik bir heterojen ortam belirteci olan bu bimodal eğri, çalışma kapsamında iki temel varsayım altında yorumlanmış ve akifer sistemi bu varsayımlar esasında, ikili gözeneklilik ve eşdeğer gözenekli malzeme modelleme yaklaşımı ile kavramsallaştırılarak taşınım parametre tahmini gerçekleştirilmiştir.

Birinci varsayım dahilinde ikili gözeneklilik model yaklaşımı ile analiz edilen kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminin süreksizlik ve matriks bileşenleri için hesaplanan hidrodinamik dispersiyon katsayıları sırasıyla (D_f) $1.98 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ve (D_m) $2.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir. İkinci varsayıma göre ve eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı ile hesaplanan eşdeğer hidrodinamik dispersiyon parametresi (D_e) ise, $7.09 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir. Buna göre, advektif-dispersif taşınımında önemli bir parametre olan hidrodinamik dispersiyon katsayısının, kırıklı-çatlaklı bir akifer sistemi için, kavramsal model yaklaşımlarına bağlı olarak farklı değerler aldığı görülmektedir. Dolayısı ile her iki modelleme yaklaşımının, hidrodinamik dispersiyon parametresi tahmini temelinde karşılaştırılması mümkündür. Buna göre, akifer sistemi için iki farklı hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_f ve D_m) tahminine olanak sağlayan ikili gözeneklilik model yaklaşımı, olası bir kirlilik probleminde kirleticinin sistemdeki kısa ya da uzun süreli davranışının analizi için her iki sistem bileşeni dikkate alması gerekçesi ile

önemlidir. Buna karşın, iki gözenekli bir akifer sistemi için eşdeğer hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_e) tahminine izin veren eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı ise bu noktada yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte, ikili gözeneklilik model yaklaşımı ile matriks bileşeni için hesaplanan hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_m , $2.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) ile eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı temelinde hesaplanan eşdeğer hidrodinamik dispersiyon parametresi (D_e , $7.09 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle eşdeğer gözenekli malzeme modelinin, kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminde süreksizlik bileşeni hidrodinamiğini, dolayısı ile de bu bileşendeki taşınım mekanizmasını dikkate almadığını söylemek mümkündür. Bu noktada, kırıklı-çatlaklı akiferlerde süreksizlik yapılarının esas akım bölgelerini oluşturması ve sistemdeki dispersif taşınım süreçleri gelişimine doğrudan katkı sağlaması dolayısı ile ikili gözeneklilik modelinin daha etkili bir modelleme yaklaşımı olduğunu göstermektedir.

Tüm bunlara ek olarak, eşdeğer gözenekli malzeme modelinin süreksizlik yapılarının çok yoğun bir şekilde geliştiği, diğer bir ifade ile sistem hidrolik koşullarının taneli akiferler gibi tanımlanabildiği kırıklı-çatlaklı akifer ortamlarında ve büyük ölçekli çalışmalarda oldukça önemli bir yaklaşım olduğu bilinmektedir. Buna karşın, tek kuyu enjeksiyon-çekim testi gibi daha çok yerel ölçekli sistem davranışının analizine olanak sağlayan karakterizasyon çalışmalarında, ikili gözeneklilik modelinin daha uygun bir yaklaşımı olduğu düşünülmektedir.

3.2.1.4 Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sisteminin Hidrodinamiği Temelinde Taşınım Süreçlerinin Yorumlanması

Akifer sistemi için tasarlanan fiziksel model ve hidrodinamik işleyiş taşınım süreçlerinin analizi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminden elde edilen iki-piklikli ilerleme eğrisi, sistem hidrodinamiği temelinde taşınım süreçleri açısından yorumlanmıştır. Buna göre, Şekil 3.9'da verilen iki-piklikli ilerleme eğrisi üzerinde birincil pik eğrisini oluşturan ana süreksizlik yapısı, akifer sisteminin erken zaman konsantrasyon tepkisini; ikincil pik eğrisini oluşturan ve mikro süreksizlik yapılarından oluşan matriks malzeme ise, sırasıyla sistemin orta zaman ve geç zaman konsantrasyon tepkilerini açıklamaktadır. Bu temelde, akifer ortamından izleyici toplanması esnasında kuyuya ulaşan ilk izleyici, sistemdeki adveksiyon baskın taşınımı dolayısı ile de sistemin erken zaman konsantrasyon tepkisini açıklamaktadır. Orta zaman ölçeğinde kuyuya gelen izleyici ise, sistemde devam eden advektif taşınım mekanizmasına ek olarak, akiferde gelişen dispersif-difüzyif baskın taşınımı karakterize etmektedir. Dolayısı ile kırıklı-çatlaklı

akifer sisteminin orta zaman konsantrasyon tepkisi, sistem bileşenleri arasında (matriks ve süreksizlik) kütle transferine izin veren matriks difüzyonu etkinliğinin arttığı bölgeyi tanımlamaktadır. Bu bölge, bir diğer anlamda geçiş bölgesi taşınım mekanizmasını ifade etmektedir. İki gözenekli akifer sisteminden toplanan son izleyici ise, sistemin geç zaman konsantrasyon tepkisini açıklamaktadır. Bununla birlikte, akifer ortamlarında taşınım süreçlerinin yalnızca görelî olarak birbirinden ayrılabilmesi mümkündür. Dolayısı ile bu analizde temel yaklaşım, iki-pikli ilerleme eğrisi üzerinde süreksizlik hidrodinamiği temelinde gerçekleşen advectif taşınım ile matriks malzemede gelişen matriks difüzyon süreci arasındaki taşınım mekanizmalarının bir diğeri üzerindeki baskın etkinlik geçişinin yorumlanmasıdır.

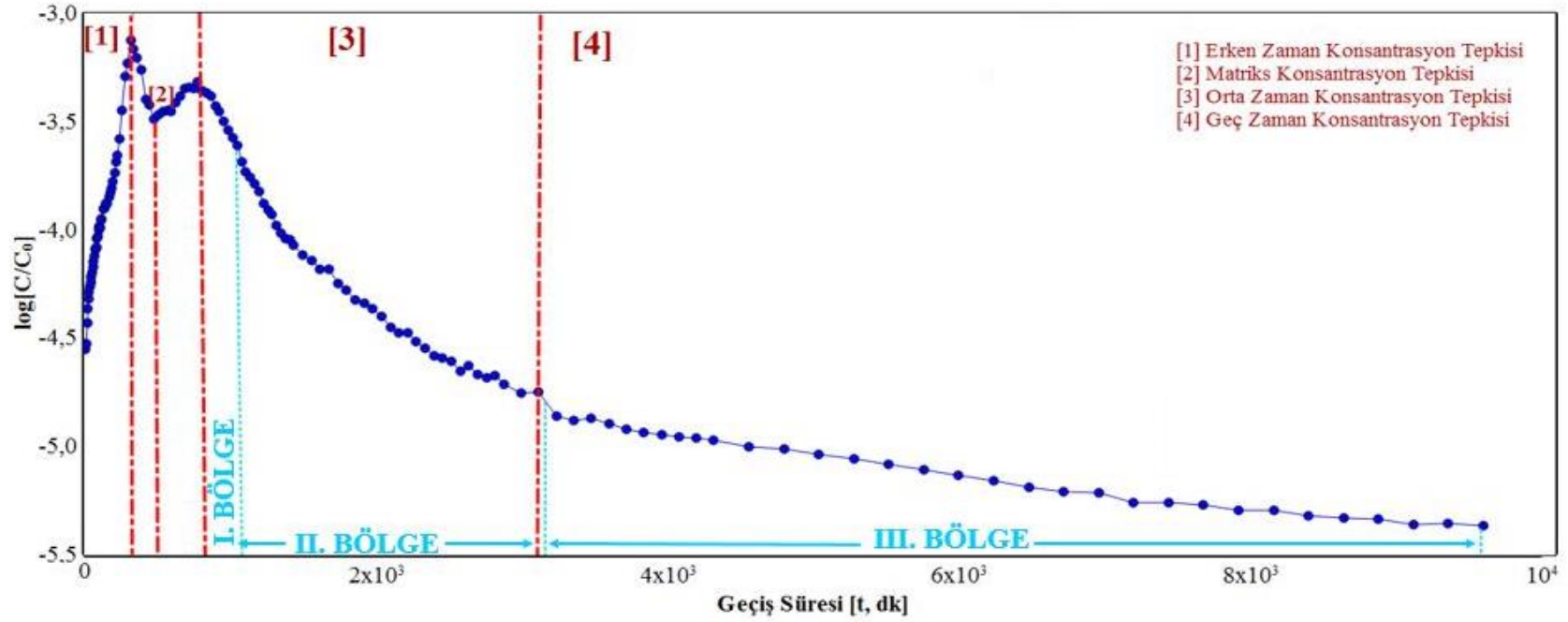
Kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sistemine ait Şekil 3.9'da verilen ilerleme eğrisinin uzun kuyruklu çekilme eğrisi, bu eğriyi yaratan ortam koşullarını ve karakterize ettiği taşınım mekanizmasının yorumlanması açısından önemli görülmüştür. Bu amaçla, matriks bileşeninin hidrojeolojik-hidrokimyasal etkinliğinde gelişen ve kırıklı-çatlaklı sistemin orta ve geç zaman konsantrasyon tepkisini açıklayan çekilme eğrisi analiz edilmiştir.

Haggerty vd., 1999 [62]'e göre, ilerleme eğrisinin çekilme kısmının uzunluğu; akım alanı, difüzyon ve retardasyon süreçleri tarafından kontrol edilmektedir. Bununla birlikte, çekilme eğrisinin gelişimini sağlayan etken parametrelerin birbirinden ayrılabilmesi, dispersiyon ve difüzyon süreçlerin eğri üzerinde benzer etkiler yaratması nedeni ile güçleşmektedir. Dolayısı ile çalışma kapsamında çekilme eğrisi analizinde, eğrinin oluşumunu sağlayan baskın taşınım mekanizması yorumlanmıştır. Bu analizde temel gözlem parametresi, düşük akım koşullarında difüzyon sürecinin daha belirgin gözlemlenebileceğidir. Buna göre, ikincil ilerleme eğrisinin çekilme kısmının baskın taşınım mekanizmasının tanımlanması temelinde bileşenlerine ayrılması Şekil 3.9'da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Burada temel varsayım, orta ve geç zaman ölçeğinde sistemdeki advectif taşınımın ihmal edilebilir olduğu ve kirletici taşınımının esas olarak dispersif-difüzif süreçler yoluyla gerçekleştiğidir. Böylece sistemdeki kirleticinin uzun süreli davranışının yorumlanmasında önemli olan ve Zhou vd., 2007 [63]'e göre, kırık-çatlaklar ile matriks yapı arasında difüzif kütle transferinin açıklanmasında anahtar parametre olan matriks difüzyonu etkinliği irdelenmiştir.

Tüm bu analizler ve yorumlamalar çerçevesinde, kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminde gerçekleşen taşınım süreçleri, sistem hidrodinamiği esasında değerlendirilmiş ve Çizelge 3.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3 İki-Pikli İlerleme Eğrisi ve Akım Mekanizması Temelinde Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sisteminde Taşınım Süreçlerinin Yorumlanması.

Sınıflandırma	İzleyici Yolu	Baskın Taşınım Mekanizması	İlerleme Eğrisinin Tanımı ve Taşınım Süreçlerinin Yorumlanması
Erken Zaman	Ana süreksizlik yapısı (ana akım yolu) +Mikro Süreksizlikler + Matriks	Advektif-Dispersif Taşınım Mekanizması (ADM)	<i>Kısa sürede gözlenen, dar yapılı konsantrasyon piki(leri).</i> Hızlı akım dinamiği-hızlı sistem tepkisi, Sistemdeki kirleticinin kısa süreli davranışının tahmini.
Orta Zaman (Geçiş Bölgesi)	Mikro Süreksizlikler+ Matriks	Dispersif-Difüzyif Taşınım Mekanizması (DDM)	<i>Tam sönmelenmeyen birincil pik eğrisi ve ardından oluşan ikincil pik(ler).</i> Gecikmeli sistem tepkisi. Kirleticinin dispersif-difüzyif dağılımı ve Matriks difüzyon etkinliğinin artışı. Kirleticinin süreksizlik yüzeylerinden matrikse sızması.
Geç Zaman	Temel Matriks Malzeme	Matriks Difüzyonu ve Reaktif Taşınım Mekanizması (RTM)	<i>Uzun kuyruklu (salınımlı) ve genellikle sağa (pozitif) çarpık çekilme eğrisi.</i> Sistemdeki akış dinamiğinin kısmen durduğu bölge. Matriks difüzyonu ile kirletici tutulma, depolanma, değişim-dönüşüm gibi süreçlerinin gerçekleştiği bölüm. Kirleticinin uzun süreli davranışının tahmini.



I. BÖLGE : Dispersif-Difüzyif Taşımm Mekanizması
II. BÖLGE : Dispersif-Difüzyif Taşımmda Matriks Difüzyonu Etkisi
III. BÖLGE : Matriks Difüzyonu

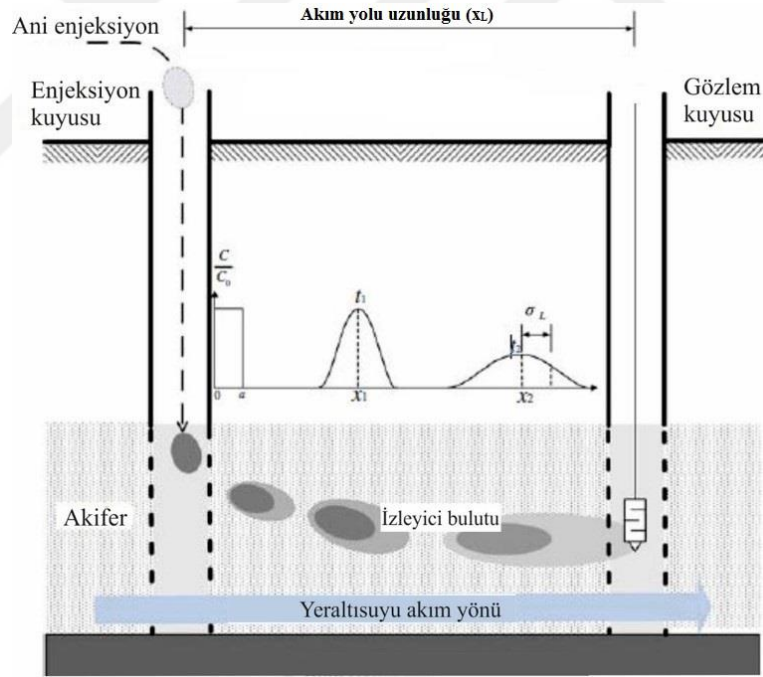
Şekil 3.9 Uranin İzleyicisi İlerleme Eğrisine göre Kırıklı-Çatlaklı Bazalt Akifer Sisteminin Erken Zamanı [1], Matriks Konsantrasyon Tepkisi [2], Orta Zaman [3] ve Geç Zaman [4] Konsantrasyon Tepkileri.

3.2.2 Örnek Çalışma-2: Çoklu (İki) Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi ile İzleme Deneyi
 Örnek Çalışma-2 kapsamında kırıklı-çatlaklı dolomitik bir kireçtaşı akifer sisteminin etkin gözeneklilik (n_e), etkin hız (θ_e), hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_L) ve dispersivite (α_L) parametrelerinin tanımlanması amaçlı, iki kuyu izleyici enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyi çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1 İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi

İki kuyu enjeksiyon-çekim testi, enjeksiyon kuyusundan anlık ya da sürekli enjeksiyon yolu ile akifer sistemine bırakılan bir izleyicinin, çekim kuyusundan toplanması esasına dayanmaktadır [Şekil 3.10]. Bu deneyde, izleyici enjeksiyonu öncesi sistemde kararlı akım koşullarının yaratılması oldukça önemlidir.

İki kuyu enjeksiyon-çekim testi, TKEÇ testine göre daha fazla miktarda izleyiciye ihtiyaç duymasına karşın; taşınım parametrelerinin daha geniş ölçekte tanımlanmasına izin vermektedir. Bu testte, dispersivitenin konuma bağlı değişimlerinin de ölçülebilmesi amaçlı, yeraltısuyu akım yönüne dik noktalarda izleyici konsantrasyonu ölçümü yapılabilmektedir.



Şekil 3.10 İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi Uygulamasının Kavramsallaştırılması ve Sistemde İzleyici Konsantrasyonu Dağılımı ([64]'den değiştirilerek kullanılmıştır).

3.2.2.2 Kırıklı-Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı Akiferinde İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyi Uygulaması

Örnek Çalışma-2 kapsamında izleyici enjeksiyon-çekim testi gerçekleştirilen saha, kırık, çatlak, eklem gibi süreksizlik sistemlerinin yoğun bir biçimde geliştiği ve çözünme açıklıklarının bulunduğu bir saha olup; iyi gelişmiş bir ikincil gözeneklilik ağına sahiptir.

Enjeksiyon ve çekim kuyularına ait [EK-1.1] ve [EK-1.2]'de sunulan kuyu litolojisi bilgileri, akifer sisteminin hidrojeolojik özelliklerinin tanımlanması ve izleme deneyi sonuçlarının yorumlanması amaçlı kullanılmıştır. Buna göre testin gerçekleştirildiği akifer ortamı, kırık-çatlak gibi süreksizlik yapılarının yoğun olduğu, dolomitik kireçtaşı hakim jeolojik birimden oluşmuştur. Bu birimdeki çatlak yapılarında kil, kalsit ve demir oksit dolguları ile yer yer kalsit damarlarına rastlanmaktadır. Ayrıca dolomitik kireçtaşı biriminde kalınlığı birkaç metreyi geçmeyecek yüksek alterasyona uğramış killi kireçtaşı seviyeleri de görülmektedir.

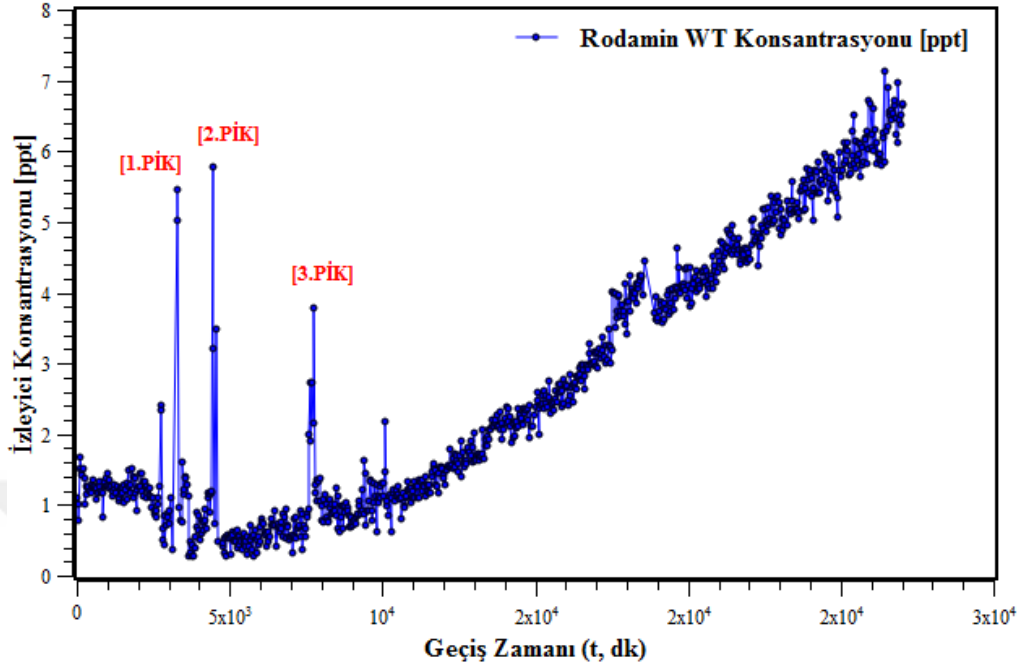
Kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akifer sisteminde izleme deneyi çalışması, pompaj kuyusunda radyal konverjant akım alanı yaratılarak gerçekleştirilmiş ve korunumlu Rodamin WT izleyici olarak kullanılmıştır. Deneye ait bilgiler Çizelge 3.4'de özetlenmiştir. Deneyde pompajla su çekimi, kuyular arasında kararlı akım koşullarının yaratılması amaçlı iki gün önce başlatılmış; kararlı akım koşullarının oluşturulmasının ardından izleyici enjeksiyon kuyusundan anlık olarak (20 dakikadan daha kısa bir sürede) sisteme bırakılmıştır. İzleyici enjeksiyonun hemen ardından kuyuya, enjekte edilen çözeltilerin üç kat hacminde su basılmış, böylece izleyicinin akifere tam olarak sızması hedeflenmiştir. İzleyici konsantrasyonu, pompaj kuyusunda yerinde arazi tipi Turner C3 Submersible Fluorometer (www.turnerdesigns.com) ile ölçülmüş ve otomatik olarak kaydedilmiştir. Deneyden önce florimetre göreceli yoğunlukları okumak yerine gerçek konsantrasyon değerlerinin okunması için kalibre edilmiştir.

Çizelge 3.4 Kuyular Arası İzleyici Enjeksiyon-Çekim Testine Ait Bilgiler.

İzleyici Türü	Enjeksiyon Kuyusu	Pompaj Kuyusu	Kuyular Arası Uzaklık (m)	İzleyici Miktarı (gr)		Pompaj Debisi (Q, l/s)
				Enjeksiyon miktarı	Toplanan miktar	
Rodamin WT	A	B	25	1250	1026	2.3

İzleyici testi ile akifer sisteminden elde edilen ilerleme eğrisi çok-pikli (multimodal) bir yapı göstermiştir [Şekil 3.11]. Multimodal eğriyi oluşturan dağılım verileri, bu eğri üzerinde ikiden fazla pikin varlığını açıklamaktadır. Dolayısıyla her bir piki karakterize eden bireysel eğriler, farklı veri popülasyonlarını temsil eden ve kendi içerisinde homojen olarak nitelendirebileceğimiz bir alt sistemi tanımlamaktadır. Bu muhtemel alt sistemleri, heterojen bir sistemin birer parçası olarak da değerlendirmek mümkündür. Bu temel yorumlama çerçevesinde Rodamin WT izleyicisine ait Şekil 3.11'de verilen çok-pikli ilerleme eğrisi incelendiğinde, enjeksiyon sonrası hızla değişen izleyici konsantrasyonu artışları ve

azalışları görülmektedir. Ancak bu hızlı ve keskin konsantrasyon dalgalanmaları, deney süresinin devamı ile azalmış ve genel bir artma eğilimine dönmüştür.

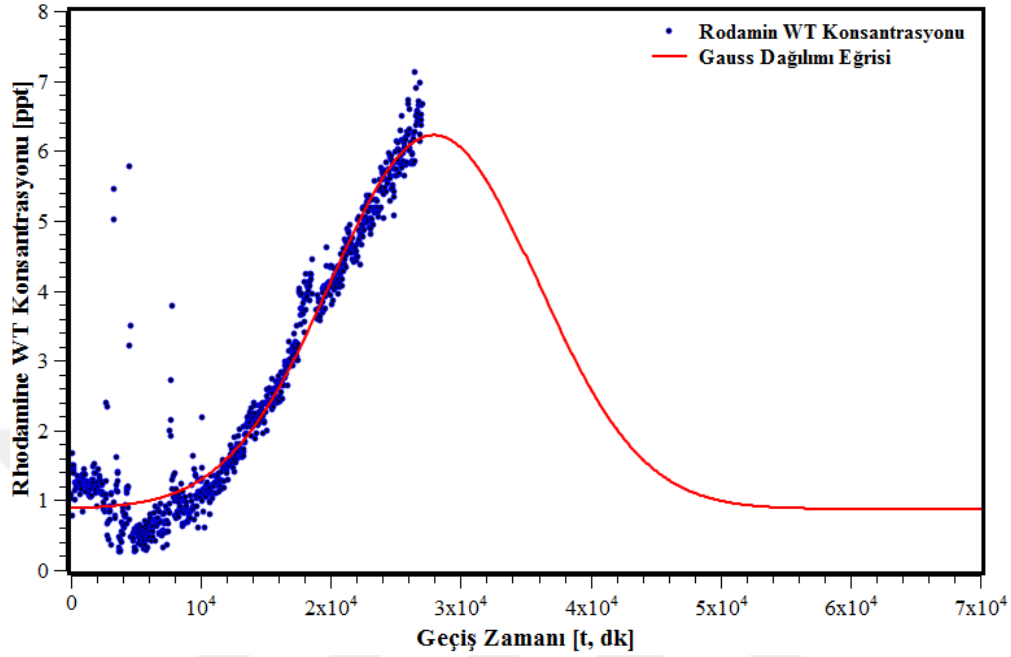


Şekil 3.11 Kırıklı-Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı Akifer Sistemi İzleyici İlerleme Eğrisi.

Şekil 3.11'deki Rodamin WT izleyicisine ait multimodal ilerleme eğrisi üzerinde birbirinden ayrılabilen ve enjeksiyon sonrası 116, 132 ve 192 saatlerde gelişmiş üç farklı pik yapısı ayırt edilmektedir. Bu yerel üç pikin akifer sistemindeki muhtemel süreksizlik bileşenleri hidrodinamiği dolayısıyla geliştiği tahmin edilmekte ve kırıklı-çatlaklı akiferdeki alt sistem ortamlarını (yerel süreksizlik bileşenlerini) karakterize ettiği düşünülmektedir. Öte yandan akifer sistemine bırakılan korunumlu izleyicinin tamamının enjeksiyon sonrası kurtarılamaması nedeniyle, ilerleme eğrisi üzerinde maksimum izleyici konsantrasyonu (C_{max}) belirsizliği bulunmaktadır. Bu nedenle sistemde uzun zaman aralığında ölçülen ve sistemdeki en yüksek konsantrasyonu temsil eden esas pik konsantrasyonu değeri Şekil 3.11'de gösterilen üç pik konsantrasyonuna dâhil edilmemiştir. Dolayısı ile ilerleme eğrisi bu kısıtlamalar altında değerlendirilmiştir.

Çalışmada akifer sisteminin taşınım parametrelerinin tahmini için, sistemdeki kirletici taşınımının hakim hidrodinamik davranışı esas alınmıştır. Buna göre, akifer sisteminin etkin gözeneklilik (n_e) ve boyuna hidrodinamik dispersiyon (D_L) katsayıları, sistemi uzun zaman ölçeğinde daha iyi karakterize ettiği düşünülen ve sistemde gözlenen en yüksek konsantrasyon değerini açıklayan pik değeri aracılığıyla yorumlanmıştır. Buna göre, Rodamin WT izleyicisi ilerleme eğrisi tek-pikli (unimodal) olarak değerlendirilmiş ve akifer

ortamında kirleticinin uzun zaman ve geniş ölçekteki davranışını karakterize eden taşınım parametreleri, eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı temelinde Gauss olasılık dağılımı (GOD) ile karakterize edilmiştir [Şekil 3.12].



Şekil 3.12 Akifer Sistemi Bölgesel Taşınım Parametrelerinin Gauss Olasılık Dağılımı ile Analizi.

Şekil 3.12’de verilen Rodamin WT izleyicisi ilerleme eğrisinin GOD ile uyumlaştırılan eşitliği, Eşitlik [3.7]’de verilmiştir.

$$y = y_0 + \frac{A \sqrt{\frac{2}{\pi}}}{w} \exp\left(\frac{-2(x - x_c)^2}{w^2}\right)$$

Eşitlik [3.7]

Eşitlikte, w^2 : GOD’da zamansal varyans değeri, x_c : konsantrasyon pik zamanı değerini, A ve y_0 parametreleri ise denklem sabitlerini ifade etmektedir.

Eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı temelinde GOD fonksiyonu ile taşınım parametrelerinin tahmini için, Bölüm 3.2.1.2’de sunulan Eşitlik [3.4] ve Eşitlik [3.5]’den yararlanılmıştır. Akifer sistemindeki etkin hız (advectif hız) parametresi ise, iki kuyu enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyinden etkin hız (ϑ_e), $\vartheta_e(x_L)=x_L/t$ eşitliği yardımıyla akım yolu uzunluğunun (x_L) bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Buna göre, hesaplanan taşınım parametreleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Tek-Pikli (Unimodal) İlerleme Eğrisinden GOD ile Hesaplanan Taşınım Parametreleri.

Taşınım Parametreleri	Hesaplanan Değerler
Hidrodinamik Dispersiyon Katsayısı (D_L , m^2/s)	1.67×10^{-8}
Dispersivite (α_L , m)	0.0011
Etkin Hız (ϑ_e , m/s)	1.49×10^{-5}
Etkin Gözeneklilik (n_e)	0.009

Örnek Çalışma-2 kapsamında gerçekleştirilen kırıklı-çatlaklı kireçtaşı akifer sistemindeki taşınımı süreçlerinin analizi ve parametre tahmininde, Şekil 3.11’de verilen ilerleme eğrisi üzerinde gelişen üç yerel pikin, taşınım süreçleri üzerindeki etkisini göz ardı etmek mümkün değildir. Bu üç yerel pik, kırık, çatlak, eklem gibi yerel süreksizlik yapılarının etkinliğinde gelişmekte, dolayısı ile de akifer sisteminin kirleticiye karşı hızlı tepkisinin analizinde oldukça önemli olmaktadır. Bu nedenle kirletici taşınımı sırasında ani ve kısa süreli konsantrasyon değişiklerini karakterize eden üç yerel pik, bu piklerin gelişimini hazırlayan akifer fiziksel koşulları ile birlikte değerlendirilmiş ve piklerinin gelişimini denetleyen yerel süreksizlikler, bir diğer anlamda sistemdeki ikincil taşınım yolları, sistemdeki yerel advectif taşınım mekanizması ile ilişkilendirilmiştir. Böylece multimodal ilerleme eğrisi üzerinde gözlenen pikler, etkin kanal akım hızı (ϑ_{ec}) parametresi ile açıklanmıştır.

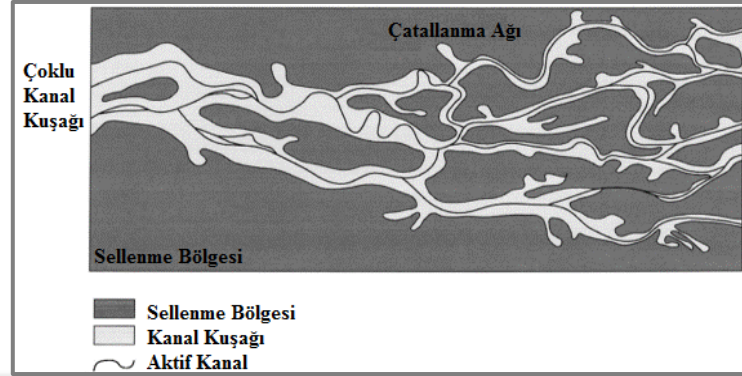
Etkin kanal akım hızı (ϑ_{ec} , L^2T^{-1}) parametresi, yerel piklerin oluşma süreleri (t_p , T) ve akım yolu uzunluğunu ifade eden kuyular arası mesafeden (x_L , L) yararlanarak, $\vartheta_{ec} = x_L/t_p$ eşitliği ile hesaplanmıştır. Buna göre, her üç piki karakterize eden ve sistemdeki ikincil taşınım yollarını oluşturan etkin kanallar için hesaplanan akım hızları Çizelge 3.6’da verilmiştir. Böylece, kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akiferinde olası bir kirlilik riski durumunda, sistemin hâkim hidrodinamik yapısı ile belirlenen advectif-dispersif taşınım parametrelerine ek olarak, sistemde kirleticinin hızla yayılımına neden olan üç farklı etkin kanal akım hızı (ϑ_{ec}) parametresi tanımlanmıştır.

Çizelge 3.6 Çok-Pikli (Multimodal) İlerleme Eğrisi Üzerindeki Yerel Pik İçin Hesaplanan Etkin Kanal Akım Hızları.

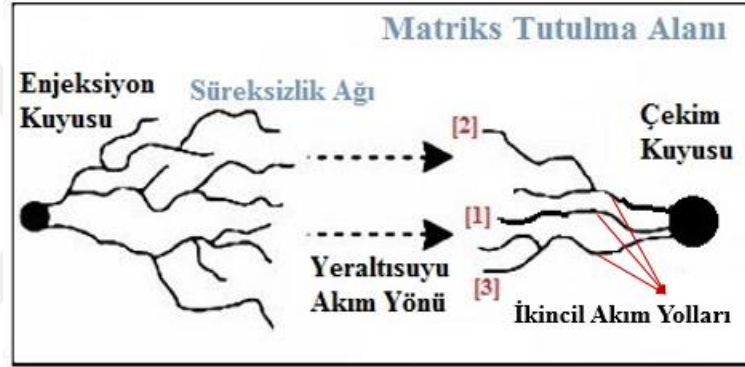
İzleyicinin İkincil Taşınım Yolu	Pik Oluşum Zamanı (t_p , s)	Etkin Kanal Akım Hızı- (ϑ_{ec} , m/s)
Birincil Pik	41760	5.99×10^{-4}
İkincil Pik	47520	5.26×10^{-4}
Üçüncül Pik	69120	3.62×10^{-4}

3.2.2.3 Kırıklı-Çatlaklı Akifer Ortamının Fiziksel ve Hidrodinamik Açından Yorumlanması
 Örnek Çalışma-2 kapsamında taşınım parametreleri tahmininin gerçekleştirildiği kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akifer sistemini, Makaske, 2001 [65]’de bahsedilen örgülü (ya

da çatallı) akarsu sistemleri ile benzeştirmek mümkündür [Şekil 3.13[A]]. Böylece bu tür heterojen akiferlerden izleme testleri ile elde edilen ilerleme eğrilerini, örgülü akarsu sistemlerinden elde edilen ilerleme eğrileri ile denestirmek ve yorumlamak olasıdır (örneğin [66] ve [67]).



[A]



[B]

Şekil 3.13 [A]: Çatallı Bir Akarsu Sisteminin Yapısı ([65]'den değiştirilerek kullanılmıştır). [B]: İzleyici İlerleme Eğrileri ile Yorumlanan Kırıklı-Çatlaklı Akifer Sisteminin Basitleştirilmiş Kavramsal Modeli ([68]'den yararlanarak çizilmiştir).

Örgülü akarsularda gözlenen multimodal ilerleme eğrisi yapıları, ana kol sisteminde izleyici dağılımına neden olan süreçlere, dolayısı ile de sistem fiziksel yapısına ve dinamiğine bağlıdır. Örgülü bir akarsu sisteminde izleyici dağılımına neden olan fiziksel yapı, akarsu sistemi ana kolu, bu kola bağlı yan kollar ve yan kollar üzerindeki durgun ya da ölü su noktalarıdır. Dolayısı ile örgülü akarsu ağındaki yan kolların (akım kanallarının) sayısı, karmaşıklığı ve birbirleri ile olan ilişkileri, sisteme giren izleyicinin konsantrasyon dağılımını büyük ölçüde etkilemektedir. Benzer durumun kırıklı-çatlaklı akifer sistemleri gibi heterojen sistemlerde gerçekleşmesi olasıdır. Dolayısı ile kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akiferinin fiziksel ve hidrodinamik yapısını, örgülü akarsu sistemleri temelinde daha detaylı yeraltı hidrolik ve taşınım parametreleri ile açıklamak mümkündür. Bu temel çerçevede, karakterize edilen akifer sisteminde ana izleyici taşınım kanalı dışında farklı ve karmaşık bağlantılı içsel taşınım yollarına sahip olduğu ve bu bağlantılı yapılar arasında

kalan bazı su noktalarının (ölü boşluklar ya da bağlantısız yapılar) bulunduğu düşünülmektedir [Şekil 3.13[B]]. Böylece sistemden tamamı kurtulamayan izleyicinin farklı akım kanalları ile halen taşındığını ya da ölü su noktalarında depolandığını söylemek mümkündür. Bununla birlikte, bu temel benzeşim yaklaşımı ile akifer sistemindeki matriks difüzyonu etkinliğinin, matriks yapıyı çevreleyen süreksizlik sistemlerinde gözlenen advectif-dispersif baskın taşınım mekanizması nedeni ile yeterince gelişmediği düşünülmektedir.

3.2.3 Örnek Çalışma-3: Akifer Testleri ile Kırıklı-Çatlaklı Kireçtaşı Akiferinde Hidrolik Parametre Karakterizasyonu

Akifer sisteminin hidrolik iletkenlik, depolama ve iletimlilik katsayılarının belirlenmesi, kirleticinin taşınım mekanizmasının tanımlanmasında önemlidir. Bu kapsamda sunulan Örnek Çalışma-3, kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akiferinin hidrolik parametrelerin karakterizasyonu amaçlı gerçekleştirilen akifer testi çalışmalarını içermektedir. Çalışmanın gerçekleştirildiği kırıklı-çatlaklı akifer sisteminin farklı noktasında bulunan PK1, PK2 ve PK3 kuyularına ait kuyu testleri için temel bilgiler Çizelge 3.7’de verilmiştir. Pompaj kuyularına ait kuyu litolojisi bilgileri ise [EK-2.1] ve [EK-2.2]’de sunulmuştur. Buna göre, testlerin gerçekleştirildiği sahada hakim jeolojik birim dolomitik kireçtaşıdır. Akifer sistemi gelişimine izin veren bu hidrojeolojik birim yer yer breş ve siltli killi kireçtaşı birimleri ile ardalama göstermektedir. Dolomitik kireçtaşı biriminde kırık-çatlak yapıları sıklıkla görülmekte olup, bu yapılarda kil ve kalsit dolgulu damarlar bulunmaktadır.

Çizelge 3.7 Akifer Testlerine Ait Temel Bilgiler.

Kuyu Adı	Debi (Q, l/s)	Süre (t, sa)	Pompa Derinliği (m)	Penetrasyon
PK1	1.646	24	37.5	Tam
PK2	1.650	24	79.5	Tam
PK3	7.265	27.5	19.5	Kısmi

Örnek Çalışma-3’de, pompaj kuyularından dakikada bir otomatik olarak kayıt altına alınan düşüm verileri, düşüm türevi (derivative) analizlerini içeren diagnostik grafikler aracılığıyla yorumlanmıştır. Akifer sistemi hidrolik parametre tahmini, ikili gözeneklilik modeli için çözüm metotlarını içeren AQTESOLV Pro V 4.5 [69] yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ayrıca hidrolik parametre tahmininde sistem kavramsallaştırmasının önemini anlaşılması ile kavramsal modele uygun çözüm yaklaşımlarının ve metotlarının belirlenebilmesi amaçlı, iletimlilik katsayısı (T) temelinde farklı modelleme yaklaşımları (tekli kırık-çatlak sistem modeli, sızıntılı ve serbest akifer modelleri) ile sınıanmıştır.

3.2.3.1 Kırıklı-Çatlaklı Akiferlerde Akifer Testleri ve Düşüm Türevi Grafikleri

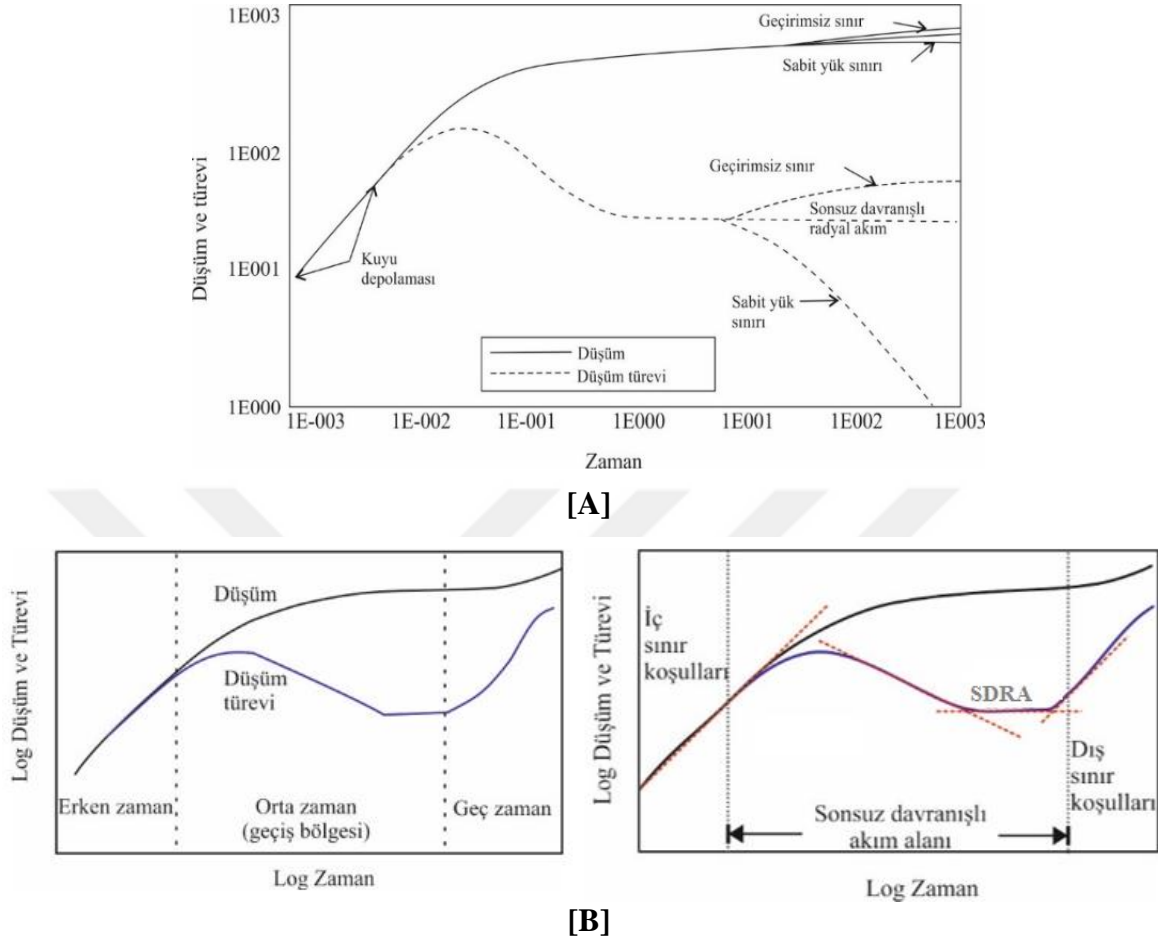
Klasik gözenekli ortamlarda akifer testleri ile hidrolik parametreleri karakterizasyonu, homojen, izotrop ve basınçlı akiferlerde iki boyutlu radyal akım çözümü için Theis, 1935 [70] tarafından geliştirilen analitik çözüm temelli (örneğin Cooper-Jacob, 1946 [71]) yaklaşımları içermektedir. Bu çözüm yaklaşımları, eşdeğer gözenekli malzeme model yaklaşımını esas alan ve eşdeğer hidrolik parametre tahmini yapan analitik yaklaşımlardır. Eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı temelli çözümler, iki gözenekli akiferlerde parametre tahmini açısından değerlendirildiğinde, sistemdeki akım değişkeninin matris ve süreksizlik bileşenleri için ayrı ayrı açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte, literatürde kırık-çatlakların birbirine çok yakın konumlandığı ve bağlantılı olduğu sahalarda eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı temelinde olan serbest ya da yarı basınçlı (sızıntılı) akifer modeli kabulü ile akifer testleri analizinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak bu tür çözümler metotlarının, üniform dağılımlı süreksizliklerin oluşturduğu akifer ortamlarında, sistemdeki eşdeğer hidrolik parametreler ile sistem davranışının açıklanabilirliği durumunda temsil edici olduğu düşünülmektedir.

➤ **Düşüm Türevi Grafikleri ve Sistem Akım Karakteristiğinin Yorumlanması:**

Akifer testleri ile hidrolik parametre karakterizasyonu, zamana ya da konuma karşılık gelen hidrolik düşüm (ya da basınç) değerlerinin çift logaritmik (log-log) ya da yarı logaritmik grafikler aracılığıyla tanımlanması ve çeşitli teorik modeller ile karşılaştırılarak sistem davranışı tahminini içermektedir. Ancak bu klasik metodun heterojen sistemlerin hidrodinamik davranışını bütüncül yorumlamada eksik kalması dolayısı ile çalışma kapsamında düşüm verileri, düşüm türevi ($d \lg(\Delta s)/d \lg t$) analizlerini içeren diagnostik grafikler ile yorumlanmıştır. Bu grafikler, düşüm verileri ile düşüm türevi verilerinin oluşturduğu eğrilerin eş zamanlı olarak log-log ölçekte yorumlanmasıdır [Şekil 3.14].

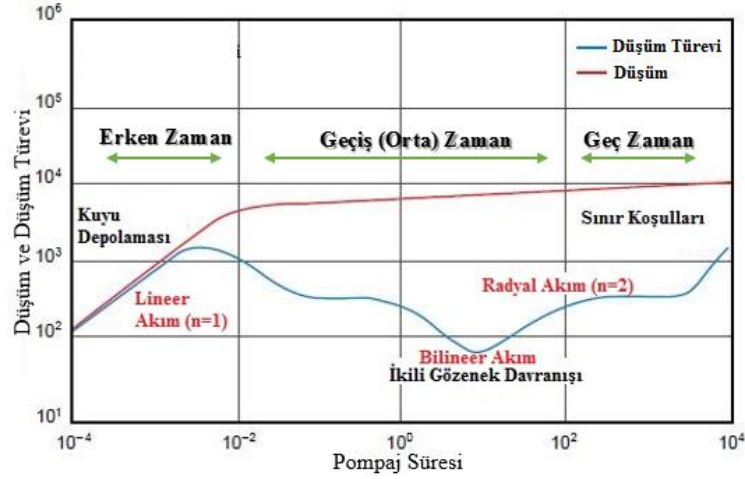
Renard vd., 2009 [72]'e göre, kuyu testlerinde türev analizi tekniğinin kullanılması fikri Chow, 1952 [73]'e ait olsa da, pompaj kuyusu çevresinde akımın klasik modelleri için logaritmik türev verilerinin davranışının detaylı analizi Bourdet vd., 1983 [74] tarafından gerçekleştirilmiştir. Petrol rezervuarları için geliştirilen bu çözüm yaklaşımının akifer hidrolik parametreleri karakterizasyonunda kullanımı ise Karasaki vd., 1988 [75]; Spane, 1993 [76] ve Spane ve Wurstner, 1992 [77] ile gerçekleşmiştir. Böylece türev grafikleri, özellikle iki gözenekli akifer sistemlerinde sisteme özgü akım karakteristiklerinin yorumlanmasına izin vermesi dolayısı ile de sistem tanımı ve parametre tahmininde etkin bir rol oynamaktadır (örneğin McConnell, 1993 [78]; Van Tonder vd., 2000 [79]; Renard,

2005 [80]; Kurtzman vd., 2005 [81]; Samani vd., 2006 [82]; Renard vd., 2009 [72], Kim, vd., 2010 [83]; Hammond ve Field, 2014 [84]).



Şekil 3.14 [A]: Düşüm Türevi Verileri ile Kuyuya Etki Eden Sınır Koşullarının Yorumlanması ([85]'den değiştirilerek kullanılmıştır). [B]: Sistemdeki Farklı Akım Davranışı Bölgelerini Gösterir Diagnostik Grafikler ([86]'dan değiştirilerek kullanılmıştır).

Kırıklı-çatlaklı akiferlerde sistem hidrodinamik davranışının düşüm-zaman verileri ile yorumlanmasının en ideal yollarından biri, akım geometrisi ile hidrolik parametre karakterizasyonunun eş zamanlı analizidir. Düşüm türevi grafikleri, kuyu etki alanına giren akım karakteristiklerinin (rejimlerinin) hidrolik açıdan yorumlanmasına izin vermekte; böylece ilgili akım bölgelerinde parametre tahminini sağlamaktadır. Akifer sistemlerinde kuyuya etki eden akım rejimleri temel olarak, lineer (doğrusal), bilineer (iki gözenekli), radyal (silindirik) ya da küresel karakteristikte görülmektedir [Şekil 3.15]. Ancak akifer sistemlerinde alt sistem ortamlarını karakterize eden ve tam boyutlu olmayan sistem akımlarını (fraktal akım) da görmek mümkündür.



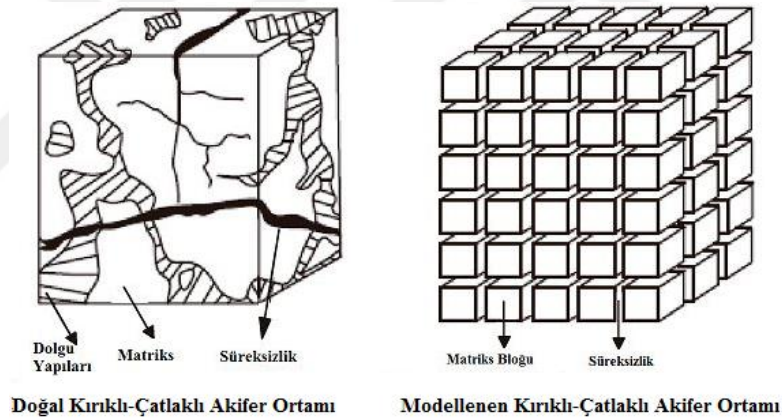
Şekil 3.15 Pompaj Kuyusu Etki Alanında Gelişen Muhtemel Akım Karakteristiklerinin Oluşum Periyotları ([85] ve [87]'den yararlanarak çizilmiştir).

İki gözenekli sistemlerde akım karakteristikleri, kuyu üzerinde erken, orta ve geç zaman periyotlarında gözlenen sistem davranışlarının analizi ile ilişkilendirilmektedir [Şekil 3.15]. Şekil 3.15'e göre, erken zaman düşüm tepkileri sistemdeki içsel sınır koşullarını açıklamakta dolayısıyla kuyu ve kuyu yakın çevresi etkilerini yansıtmaktadır. Bu içsel etkiler arasında kuyu depolaması, kuyu yüzeyi etkisi, formasyon tahribatı ve kısmi penetrasyon faktörleri önemlidir. Bununla birlikte, iki gözenekli sistemlerde erken periyotta süreksizliklerin depolama karakteristiklerinin etkisini gözlemlemek mümkündür. Özellikle karstik akiferler gibi süreksizlik depolamasının, kuyu depolamasından daha fazla olma ihtimali bulunan sistemlerde erken zamanda süreksizlik depolaması etkilerini gözlemlemek olasıdır. Dolayısı ile erken zaman bölgesinde kırıklı-çatlaklı akiferlerde çoğunlukla doğrusal akım koşulları gelişmektedir denilebilir. Türev grafiğinin orta zaman (geçiş bölgesi) periyodu, matriks hidrodinamik etkinliğinin kuyu üzerinde hissedildiği bölümdür. Bu bölgede süreksizlikler aracılığıyla kuyuya doğru gerçekleşen baskın akım, matriksten gelen akım ile etkileşime girmekte ve bir geçiş bölgesi akım dinamiğini oluşturmaktadır. Burada düşüm türevi verileri sonsuz davranışlı hareket göstermektedir. Dolayısı ile geçiş bölgesinde farklı zaman aralıklarında farklı akım karakteristiklerini gözlemlemek olasıdır. Ancak bu sonsuz davranışlı hareket geç zaman periyodundan önce, büyük oranda sonsuz davranışlı radyal akıma (SDRA) evrilmektedir. SDRA davranışı, Theis, 1935 [70] varsayımlarının geçerli olduğu ve radyal akım koşulları altında akımın düşey bileşenin olmadığı homojen-izotrop akifer ortamı koşullarını açıklamaktadır. Böylece SDRA davranışı bölgesinde hidrolik parametrelerinin karakterizasyonu gerçekleştirilebilir. Geç zaman periyodunda ise, kuyu üzerinde akifer sınır koşulları etkinliğini gözlemlemek mümkündür. Burada geçirimli zon ya da beslenme bölgeleri gibi farklı sınır koşulları, sistemdeki düşüm türevi değişimlerinden

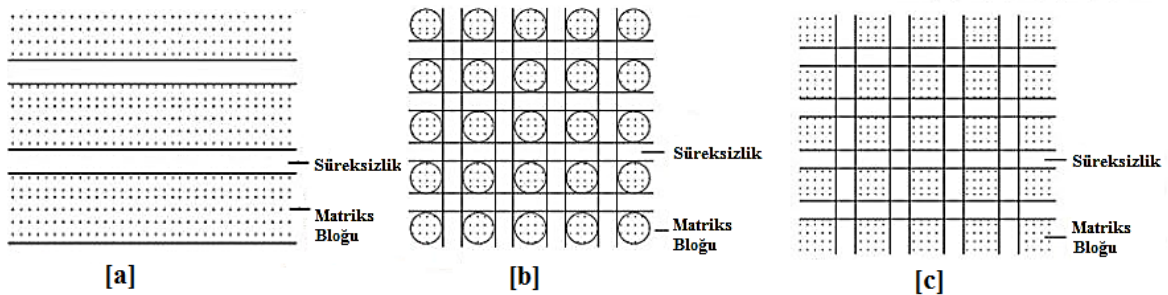
ön görülebilir. Sistemin pratik olarak geç zaman periyodunda sabit dış sınır koşullarına ulaştığı, dolayısı ile de kararlı akım koşullarına yaklaştığı düşünülebilir ([85], [87], [88], [89], [90] ve [91]'den yararlanarak).

➤ **İkili Gözeneklilik Modeli ve Hidrolik Parametre Tahmini:**

İkili gözeneklilik modeli, ilk kez Branbelatt vd., 1960 [54] tarafından geliştirilmiş ve daha sonra detaylı olarak Warren ve Root, 1963 [55]; Kazemi, 1969 [56]; de Swaan, 1976 [92]; Streltsova-Adams, 1978 [93]; van Golf-Racht, 1982 [94]; Gringarten, 1982 [95] ve Pruess ve Narasimhan, 1985 [96] tarafından akifer testleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Şekil 3.16[A]'da verilen bu modelleme yaklaşımı, hidrolik ve hidromekanik özellikleri açısından farklı bileşenin varlığını kabul etmekte ve böylece akımın iki farklı kısmi diferansiyel denklem ile tanımlanmasını sağlamaktadır. İkili gözeneklilik modelinde, matriks bileşeni Şekil 3.16[B]'de verildiği gibi düzlemsel, küresel ve küp tipi olarak kavramsallaştırılmaktadır. Ancak bu sistematik kavramsallaştırmalar süreksizlik sistemlerinin birbiri ile bağlantılı olduğu sistemler ile kısıtlıdır.



[A]



[B]

Şekil 3.16 [A]: İkili Gözeneklilik Model Yaklaşımı ([54]'den değiştirilerek kullanılmıştır). [B]: İki Gözenekli Akifer Tipleri: [a]: Düzlemsel Süreksizlik Yapıları ve Matriks Blokları [b]: Küresel Matriks Blokları ve [c]: Kübik Matriks Blokları ([97]'den değiştirilerek kullanılmıştır).

Örnek Çalışma-3 kapsamında kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akiferinin hidrolik parametrelerin karakterizasyonu amaçlı, iki gözenekli sistemlerde her iki bileşendeki akım faktörünü dikkate alan ve akım dinamiğinde kırık-çatlak yüzeyi etkisi ile sistemdeki akım boyutunun yorumlanmasına izin veren Moench, 1984 [98] ve Barker, 1988 [99] çözümleri tercih edilmiştir.

Moench, 1984 [98] Modeli, süreksizlik yapıları ile matriks arasındaki akım ve madde değişiminin kırık-çatlak yüzeyi nedeniyle kesintiye uğraması dolayısı ile süreksizlik yüzeyi için bir “yüzey etkisi” parametresi tanımlamaktadır. Böylece Moench, 1984 çözümü hidrolik parametre tahmininde matriks ve kırık-çatlak iletimliliği, kırık-çatlak ve matriks depolaması, kuyu içi ve kırık-çatlak yüzeyi etkisi parametrelerini dikkate almaktadır. Bu çözüm yaklaşımı şu varsayımları içermektedir [100]:

- Akifer anizotropik ve homojendir.
- Yatay genişlikte ve sonsuzdur.
- Akifer sabit kalınlıktadır.
- Yukarıdan ve aşağıdan geçirimsiz birimler ile sınırlandırılmıştır.
- Darcy yasası matriks ve süreksizliklerde geçerlidir.
- Kuyuya su girişi yalnızca süreksizlikler aracılığıyla gerçekleşmektedir.
- Gözlem kuyusu temsil edici birim hacimde süreksizliklerdeki hidrolik yük düşümünü yansıtmaktadır.
- Matriks bloklarındaki akım, süreksizlik blokları ara yüzeyine diktir.
- Pompaj kuyusu ve gözlem kuyusu tam penetrasyonludur.

Barker, 1988 [99] Modeli ise, Theis, 1935 [70] varsayımlarının geçerli olduğu basınçlı akifer sisteminde genelleştirilmiş radyal akım (GRF) yaklaşımı ile sistemdeki akım kesiti ve akım kaynağı arasındaki ilişkiyi yorumlamıştır. Buna göre, GRF modelinde akım boyutu (n) doğrusal (n=1), silindirik (n=2) ve küresel (n=3) olarak tanımlanmıştır.

Barker, 1988 bir boyutlu genelleştirilmiş radyal akım modelini;

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial}{\partial r} \right)$$

Eşitlik [3. 8]

olarak tanımlamıştır. Burada, S_s : özgül depolama (L^{-1}), h : hidrolik yük (L), t : pompaj süresi (T), K : hidrolik iletkenlik katsayısı (LT^{-1}), r : kuyudan radyal uzaklık (L) ve n : akım boyutunu ifade etmektedir. Barker, 1988 kuyudan uzaklığa karşılık A : akım alanı kesiti (L^2) arasında Eşitlik [3.9]'da verilen ilişkiyi kurmuştur:

$$A(r) = B^{3-n} \frac{2\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right) r^{n-1}}$$

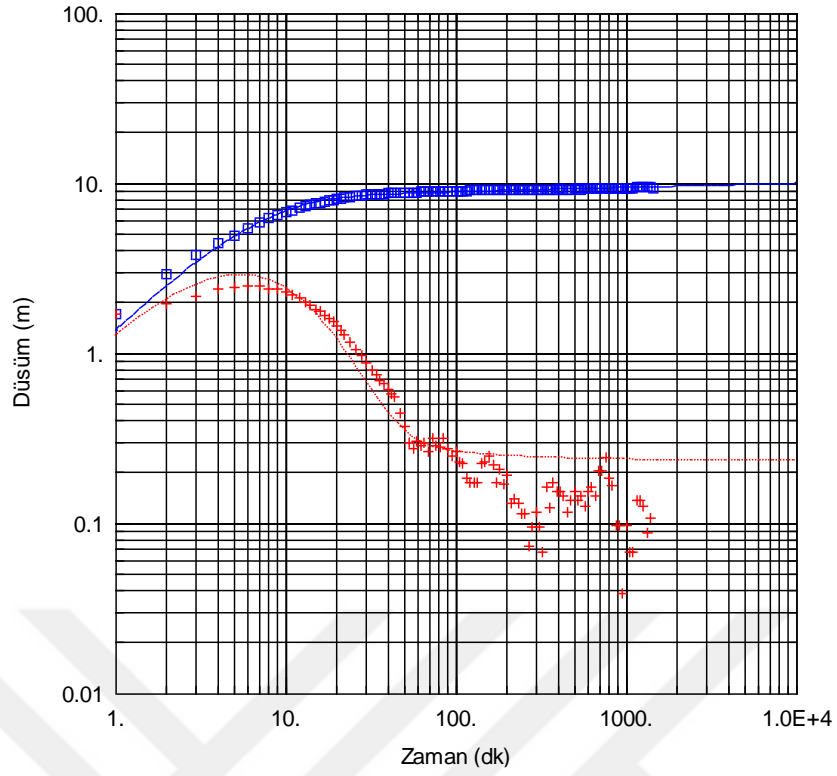
Eşitlik [3.9]

Burada, B: akifer kalınlığı (L) ve Γ gama fonksiyonudur [101]. Barker, 1988 GRF modeli şu varsayımları içermektedir:

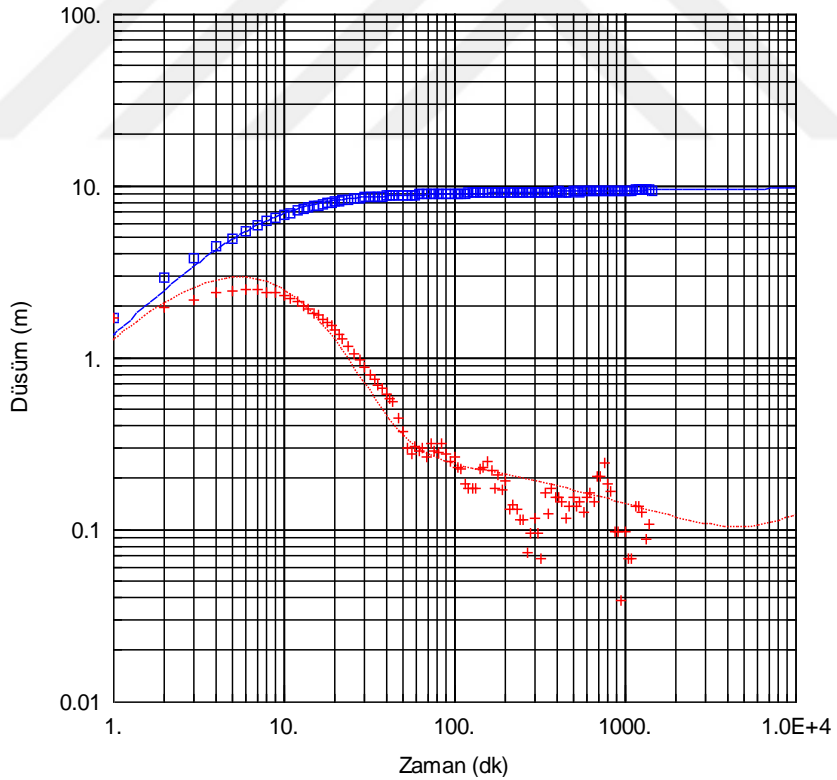
- Sistem boyunca akım radyaldır ve Darcy yasasına uymaktadır.
- Kaynak (kuyu) r_w radyal uzaklıkta ve S_w depolama katsayısı ile “n” boyutlu küreseldir.
- Kaynak (kuyu) S_f yüzey faktörü ile karakterize edilen sonsuz küçük yüzeye sahiptir; kaynak yüzeyi boyunca yük düşümü S_f ve yüzey boyunca akım oranı ile orantılıdır.
- Kırıklı-çatlaklı sistemdeki herhangi bir piyezometre ihmal edilebilir boyut ve depolama kapasitesindedir [99].

3.2.3.2 Kırıklı-Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı Akiferinin Hidrolik Parametrelerin Belirlenmesi
PK1, PK2 ve PK3 kuyularından elde edilen düşüm verileri ile hidrolik parametre tahmini amaçlı, diagnostik grafikler Moench, 1984 ve Barker, 1988 çözümlene metotları ile analiz edilmiştir. Her iki çözüm yaklaşımında parametre tahmini, matriks bileşeninin düzlemsel ve küresel blok şekilli olarak kavramsallaştırılması ile de gerçekleştirilmiştir. Böylece Moench ve Barker çözümleri hidrolik parametre tahmini temelinde karşılaştırılmış ve matriks blok şekillerinin bu tahminde etkisi yorumlanmıştır.

Moench, 1984 ve Barker, 1988 analitik çözümlenmeleri ile uyumlaştırılan PK1, PK2 ve PK3 kuyularına ait diagnostik grafikler [EK-3]’de sunulmuş; PK1 kuyusu için Moench, 1984 ve Barker, 1988 çözümlerini içerir örnek grafik ise Şekil 3.17’de verilmiştir. Her iki çözüm yaklaşımında düzlemsel ve küresel matriks blokları için hidrolik parametre tahmini ise Çizelge 3.8’de sunulmuştur. PK1 kuyusuna ait diagnostik grafik incelendiğinde düşüm türevi verilerinin, Barker, 1988 çözümü ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer durumun [EK-3]’de sunulan PK2 ve PK3 kuyuları için de geçerli olduğunu söylemek mümkündür. Buna göre Barker, 1988 çözüm yaklaşımının iki gözenekli akifer ortamlarında akım boyutunu parametresini dikkate alması, düşüm türevindeki olası değişiklikleri karakterize etmeye olanak sağladığını göstermektedir.



[A]



[B]

Şekil 3.17 PK1 Kuyusu Düşüm ve Düşüm Türevi Grafiklerinin Moench, 1984 ve Barker, 1988 Çözüm Yaklaşımları ile Uyumlaştırılması. [A]: Moench, 1984 Düzlemsel Matris Bloğu, [B]: Barker, 1988 Düzlemsel Matris Bloğu. *Mavi renk düşüm verilerini, kırmızı renk düşüm türevi verilerini ifade etmektedir.

PK1, PK2 ve PK3 kuyuları için Barker, 1988 ve Moench, 1984 çözümlerine göre hesaplanan hidrolik parametreler Çizelge 3.8’de verilmiştir. Buna göre, her iki analitik çözümleme metodunda süreksizlik (K_f) ve matriks (K_m) bileşenleri için hidrolik iletkenlik katsayısı tahmininin benzer olduğu görülmektedir. Matriks depolama katsayısı (S_m) tahmininin ise değişkenliğine karşın, süreksizlik bileşeni için depolama katsayısı (S_f) değerlerinin kısmen yakın olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, her iki çözüm yaklaşımında düzlemsel ve küresel blok şekline göre uyumlaştırılan türev grafiklerinin, düzlemsel matriks blok modelleri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür [EK-3]. Dolayısı ile düzlemsel ve küresel matriks şekilli olarak uyumlaştırılan türev grafikleri ve hesaplanan hidrolik parametreler birlikte değerlendirildiğinde, süreksizlik sistemi için hidrolik parametre tahmininde matriks blok şeklinin etkili olmadığını söylemek mümkündür. Öte yandan, matriks hidrolik iletkenliğinin belirlenmesinde blok şeklinin etkin bir rolü olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.8 PK1, PK2 ve PK3 Kuyuları için Hesaplanan Hidrolik Parametreler.

Kuyu	Çözüm Metodu	Matriks Bloğu	İletimlilik Katsayısı ($T, m^2/gün$)	Süreksizlik Yapısı		Matriks Bloğu	
				K_f (m/gün)	S_f	K_m (m/gün)	S_m
PK1	Barker, 1988	Düzlemsel	45.97	1.666	2.24×10^{-4}	3.54×10^{-6}	0.001
		Küresel	45.81	1.623	2.65×10^{-4}	6.37×10^{-6}	0.001
	Moench, 1984	Düzlemsel	33.27	1.214	1.05×10^{-4}	1.59×10^{-5}	0.001
		Küresel	48.41	1.767	3.49×10^{-7}	1.59×10^{-4}	1.0×10^{-10}
PK2	Barker, 1988	Düzlemsel	12.94	0.518	3.78×10^{-5}	2.32×10^{-7}	1.32×10^{-8}
		Küresel	12.74	0.232	1.82×10^{-5}	1.21×10^{-5}	8.37×10^{-6}
	Moench, 1984	Düzlemsel	11.72	0.274	2.34×10^{-5}	5.56×10^{-4}	2.30×10^{-5}
PK3	Barker, 1988	Düzlemsel	114.1	2.852	2.05×10^{-5}	8.56×10^{-4}	1.46×10^{-6}
		Küresel	118.1	2.954	1.67×10^{-5}	1.44×10^{-7}	1.0×10^{-10}
	Moench, 1984	Düzlemsel	113.6	2.841	1.96×10^{-5}	1.44×10^{-7}	5.11×10^{-8}
		Küresel	118.6	2.007	4.21×10^{-5}	1.44×10^{-7}	1.0×10^{-10}

3.2.3.3 Kırıklı-Çatlaklı Akifer Sisteminde Kuyuya Etki Eden Akım Karakteristiklerinin Yorumlanması

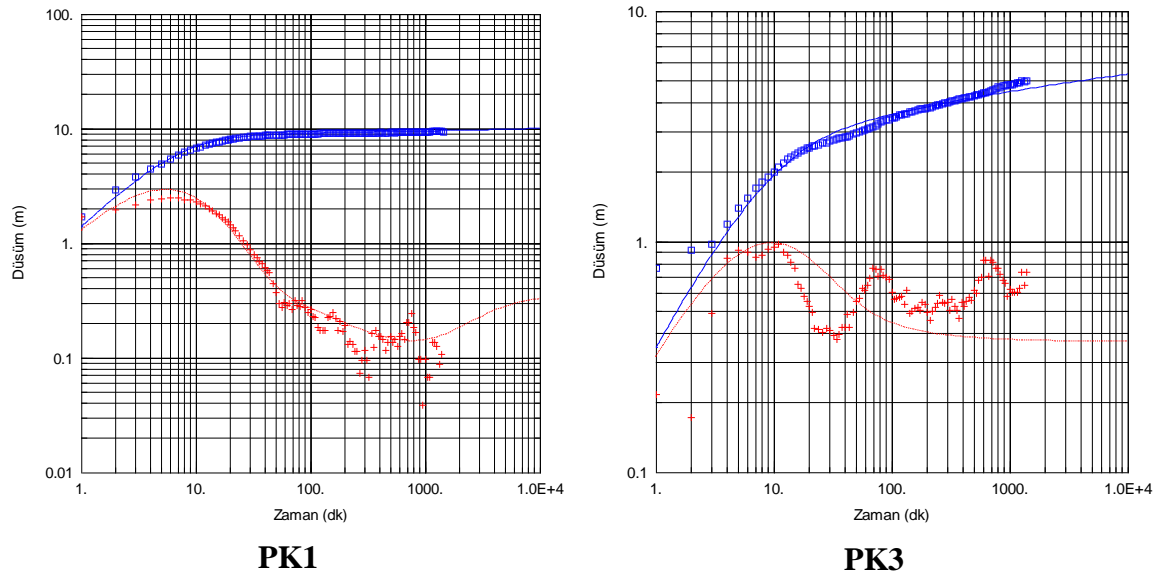
Çalışma kapsamında PK2 kuyusuna ait türev grafiğinin, iki gözenekli sistemde kuyuya doğru akım esnasında gözlenmesi muhtemel akım karakteristiklerini büyük oranda yansıtmaması nedeniyle bu kuyu üzerinde akım rejimleri yorumlanmıştır. Böylece Şekil 3.18’de verilen PK2 kuyusunda erken, orta (geçiş) ve geç zaman periyotlarında görülen olası akım karakteristikleri, kirlenici taşınım mekanizması açısından değerlendirilmiştir.

bölgesi, sistemdeki baskın dispersif-difüzyon taşıma süreçlerinin görüldüğü zaman periyodu olup, kirlenimin uzun süreli davranışı büyük oranda bu bölgedeki akım mekanizmasının anlaşılmasına bağlıdır. Şekil 3.18’de gösterilen geç zaman periyodu ise, kuyuya uzak ya da çok uzak alanlardaki etkilerin, kuyu üzerinde etkisinin gözlemlendiği zaman dilimidir. Sınır koşullarına yaklaştığı düşünülen PK2 sisteminde, akım sonsuz davranışlı radyal akım (SDRA) koşullarına girmiştir.

Öte yandan Şekil 3.19’da örneği verilen PK1 ve PK3 kuyularının türev grafikleri incelendiğinde, her iki kuyu için kuyuya doğru akım davranışının PK2 kuyusundan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Buna göre, PK1 ve PK3 kuyularının etki alanına giren sistemlerdeki akım karakteristiklerinin yorumlanması ve tahmini amaçlı, kuyularda gerçekleştirilen akifer testleri için iki temel tahmin yapılmıştır. Buna göre:

- **I:** Sistemin sınır koşullarına ulaşip ulaşmadığı hakkında yorum yapmak zordur. Pompaj süresi, sistemdeki bütüncül hidrodinamik davranışın tanımlanması dolayısıyla ile de kuyuya akım karakteristiklerinin tümünün yorumlanması için yetersiz kalmıştır.
- **II:** Sistem sınır koşullarına ulaşmıştır ve sınır koşullarının karmaşıklığına rağmen sınırlar ile ilgili yorum yapmak mümkündür.

Bu iki temel tahmin çerçevesinde türev grafikleri değerlendirildiğinde, düşüm verilerinin zaman içerisinde görece sabit değerlere ulaştığı PK1 kuyusunun I. tahmine; PK3 kuyusunun ise I. tahmine uygun davranış gösterdiği düşünülmektedir. Buna göre, II. tahmin sistemdeki akım karakteristiklerini doğrudan tanımlamaya izin vermektedir.



Şekil 3.19 PK1 ve PK3 Kuyularının Moench, 1984 Düzlemsel Blok Şekli Çözümüne Göre Analiz Edilmiş Diagnostik Grafikleri.

PK1 kuyusu türev grafiği incelendiğinde, orta zaman ölçeğinde türev verilerinin hızlı düşümünün ardından türev eğrisi hızlı bir dengesizlik durumuna girmektedir. Bu da pompaj esnasında gelişen ikili gözenek akımının (bilineer akım) pompaj süresi boyunca sonsuz davranışlı radyal akım (SDRA) koşullarına yaklaşmadığını düşündürmektedir. Bu durum, sistem fiziksel koşulları göz önünde tutularak değerlendirildiğinde, matriks ve süreksizlikler arasındaki akım etkileşimi sürekli olarak farklı akım kanalları ile kesintiye uğratılmaktadır. Bu noktada, kuyu etki alanına giren akifer ortamında, çok yoğun olmayan ancak karmaşık ve birbirleri ile geniş ölçekte yakın ilişkide olan farklı akım alanlarının bulunduğunu söylemek mümkündür. Kirletici taşınımı açısından bu tür akifer ortamları, advectif-dispersif taşınım ile dispersif-difüzyon taşınım süreçlerinin oldukça karmaşık olarak geliştiği, dolayısı ile de tahminin zor olduğu sistemler olarak değerlendirilebilir.

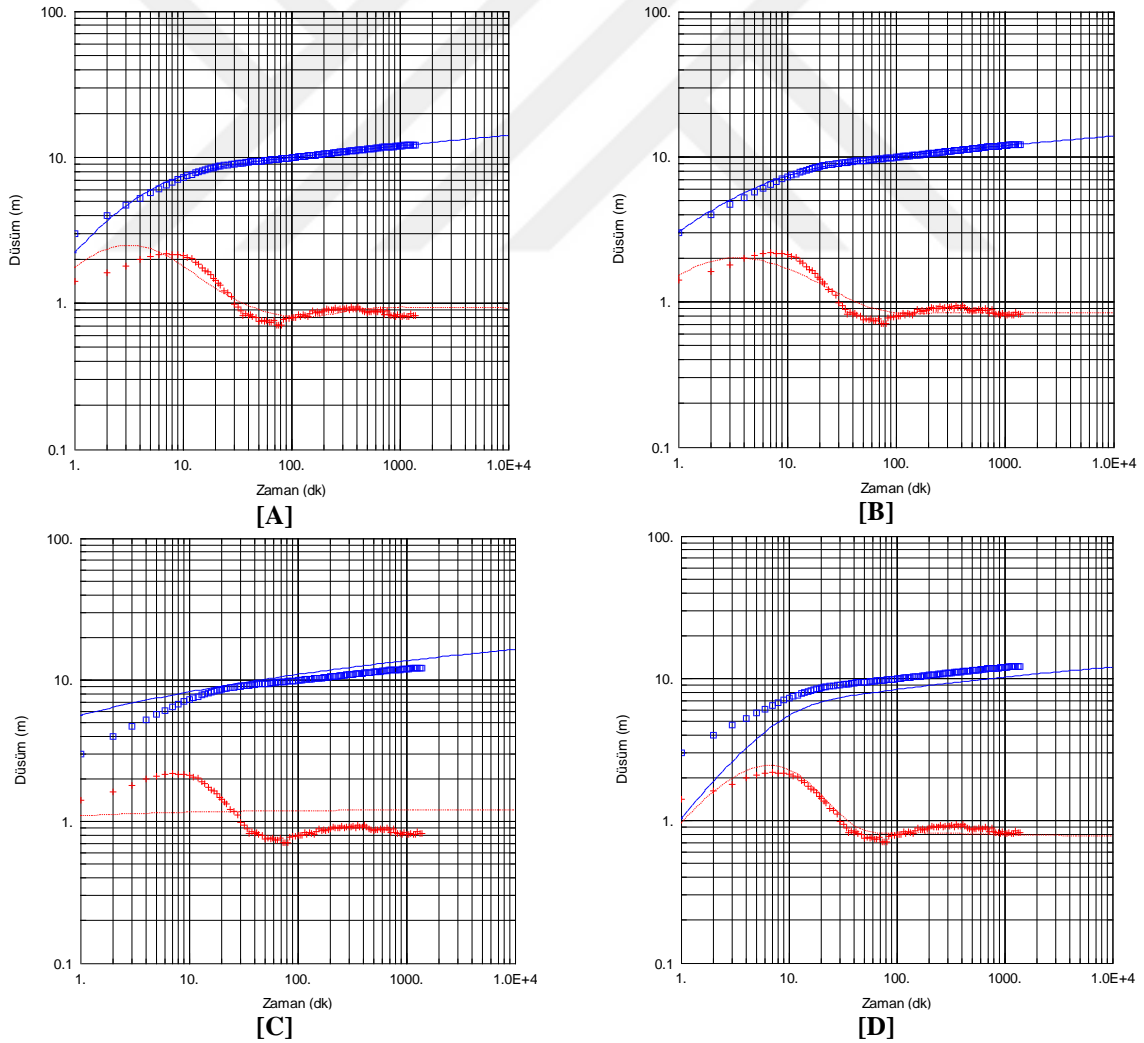
3.2.3.4 Farklı Analitik Çözüm Yaklaşımlarının Hidrolik Parametre Tahmini Temelinde Karşılaştırılması

Kırıklı-çatlaklı akiferler için hidrolik parametre tahmininde, ikili gözeneklilik modeli kavramsallaştırmasının klasik gözenekli ortamlardan nasıl ayrıldığına analizi amaçlı, PK2 kuyusu düşüm-zaman verileri; tekli-kırık çatlak modeli, sızıntılı akifer ve serbest akifer modelleri için geliştirilen analitik çözümler ile uyumlaştırılmıştır. Buna göre elde edilen diagnostik grafikler, karşılaştırmalı olarak Şekil 3.20’de, detaylı olarak ise [EK-4]’de sunulmuştur. İlgili çözüm yaklaşımları, akifer sisteminde akımı yaratan en önemli parametre olması dolayısı ile iletimlilik katsayısı tahmini temelinde karşılaştırılmış; sonuçlar Çizelge 3.9’da verilmiştir. Şekil 3.20’de sunulan diagnostik grafikler ile Çizelge 3.9’da hesaplanan iletimlilik katsayıları birlikte yorumlanmıştır.

Çizelge 3.9 PK2 Kuyusu Düşüm-Zaman Verilerinin Farklı Analitik Çözümler ile Hesaplanan İletimlilik Katsayısı Değerleri.

Analiz Metodu		Hidrolik Parametre
Model Türü	Model Çözüm Yaklaşımı	İletimlilik Katsayısı (T, m ² /gün)
İkili Gözeneklilik Modeli	Barker, 1988 [99]	11.99
Tekli Kırık-Çatlak Modeli	Gringarten-Ramey, 1974-Yatay Süreksizlik [103]	13.54
	Gringarten-Witherspoon, 1972-Düşey Süreksizlik [104]	11.99
Sızıntılı Akifer Modeli	Hantush, 1960 [105]	5.23
	Neuman-Witherspoon, 1969 [106]	5.15
Serbest Akifer Modeli	Moench, 2007 [107]	12.02
	Tartakovsky-Neuman, 2007 [108]	13.45

Şekil 3.20’de verilen PK2 kuyusuna ait düşüm ve düşüm türevi grafikleri incelendiğinde, tekli düzlemsel kırık-çatlak modelinin ikili gözeneklilik modeli ile oldukça uyumlu olduğu; bunun aksine sızıntılı akifer modeli ile uyumsuz olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu durum Çizelge 3.9’da verilen iletimlilik katsayısı tahminlerine de yansımıştır. Öte yandan, Çizelge 3.9’da serbest akifer çözüm modeli ile hesaplanan iletimlilik katsayısının, Barker, 1988 çözümü ile hesaplanan değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.20[D]’de sızıntılı akifer modeli için uyumlaştırılan düşüm türevi grafiğinin, iki gözenekli akiferin düşüm verileri ile uyumlu olmasına karşın, düşüm grafiği verileri ile uyumlu olmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, akifer sistemi hidrolik parametre tahmininin yalnızca tip eğrisi uyumlaştırma olmadığını ve sistem davranışının analizi temelli olması gerekliliği görülmektedir. Özellikle kırıklı-çatlaklı akiferler gibi heterojen sistemlerde sisteme özgü pek çok farklı eğri tipinin bulunması dolayısıyla bu tür akiferlerde hidrolik düşüm-zaman grafikleri, tip eğrisi uyumlaştırmanın dışında kalmaktadır.



Şekil 3.20 PK2 Kuyusu Düşüm Verilerinin Farklı Analitik Çözümleme Yaklaşımları ile Uyumlaştırılması. [A]: Barker, 1988- İkili Gözenek Modeli, [B]: Gringarten-Ramey, 1974-Tekli Düzlemsel Süreksizlik Modeli, [C]: Hantush, 1960- Sızıntılı Akifer Modeli ve [D]: Moench, 2007-Serbest Akifer Modeli.

3.3 Reaktif Taşınım Parametrelerinin Karakterizasyonu- Dağılım (Paylaşım) Katsayısı (K_d) ve Retardasyon Faktörünün (R_d) Tahmini

Kırıklı-çatlaklı akifer sistemlerinde reaktif taşınım süreçlerinin karakterizasyonu için retardasyon faktörünün (R_d) tahmini önemlidir. Bu amaçla, Örnek Çalışma-4 kapsamında, retardasyon faktörünün tahmininde önemli bir parametre olan paylaşım katsayısının (K_d) karakterizasyonu için laboratuvarında statik batch tutulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Örnek Çalışma-4: Statik Batch Tutulma Deneyi

Çalışmada, sisteme karışan paylaşımlı (korunumsuz) bir izleyici aracılığıyla dağılım (paylaşım) katsayısının (K_d) tanımlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda bir kirleticinin, sıvı hareketli fazdan (yeraltısuyu) katı statik ortama (matriks) geçişi derecesinin dolayısıyla da katı matriksin sorpsiyon (tutulma) kapasitesinin değerlendirilmesi amaçlı laboratuvarında statik batch deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ASTM D4319-93 [109] ve ASTM D4646-03 [110] standartları, K_d parametresinin tahmin edilmesinde kullanılmış; [111], [112], [113] ve [114] çalışmalarından ise deneyler süresince yararlanılmıştır.

Örnek Çalışma-4 kapsamında yürütülen batch deneyleri, tek tür kimyasal maddenin tutulma derecesinin tahmini için tasarlanmış ve Stronsiyumun duraylı izotopu olan Stronsiyum-86 (^{86}Sr) deneylerde izleyici olarak kullanılmıştır. ^{86}Sr izleyicisinin paylaşımlı bir izleyici olması nedeni ile bu izleyicinin sabit sıcaklık altında katı matriks malzeme ve çözelti arasındaki dağılım oranından yararlanarak; matriks malzemenin dağılım katsayısı (K_{dm}) tahmini gerçekleştirilmiştir.

Batch deneyleri öncesi, Çizelge 3.10'da özellikleri verilen ve akifer sisteminin belirli lokasyon ve derinliklerinden alınan matriks numunelerine kırma/parçalama -ya da toz haline getirme- işlemleri uygulanmıştır. 4 mm tane boyundan küçük malzemeler, tanecikler üzerindeki 100 μm den küçük kil boyu malzemenin uzaklaştırılması amacıyla ile yıkanmış ve oda sıcaklığında (20-25°C) güneş ışığı ve kimyasal maddelere maruz kalmamak üzere kurutulmuştur. Böylece malzemelerin ortam nem içeriğiyle dengeye gelmesi sağlanmıştır.

Deneyde yerel denge koşullarının oluşturulması, denge süresinin ve uygun katı:çözelti oranının tahmini ile veri kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla deneme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneme testlerinde katı:çözelti (R_s) oranları başlangıçta 1:5 ve 1:10 olarak belirlenmiş ve Kumlu Kireçtaşı-C3 matriks malzemesi için aşağıda verilen katı:çözelti oranlarında karışımlar hazırlanmıştır:

- 10 gr matriks, 50 ml stronsiyum çözeltisi (R_s : 1:5)
- 5 gr matriks, 50 ml stronsiyum çözeltisi (R_s : 1:10)

Çizelge 3.10 Batch Deneylelerinde Kullanılan Matriks Türleri ve Özellikleri.

Matriks Adı		Matriks Türü	Katı Matriks Yoğunluğu ($\rho_s, \text{g/cm}^3$)	Matriks Gözenekliliği ($\theta_m, \%$)
A	A1	Kireçli Çamurtaşı	2.65	9.30
	A2	Kireçli Çamurtaşı	2.60	4.11
	A3	Kireçli Çamurtaşı	2.49	5.35
B	B1	Dolomitik Kireçtaşı	2.72	1.12
	B2	Dolomitik Kireçtaşı	2.89	1.12
	B3	Dolomitik Kireçtaşı	2.76	3.15
C	C2	Kumlu Kireçtaşı	3.02	1.35
	C3	Kumlu-Kireçtaşı	2.80	1.17
D	D1	Killi Kireçtaşı	2.81	1.71
	D2	Killi Kireçtaşı	2.76	4.48
E	E1	Breş	2.77	2.15
	E3	Breş	2.79	2.13
F	F1	Kumlu, Killi, Çakıllı Malzeme	2.40	14.76
	F3	Çakıllı Kumlu Kil	2.71	6.10

Batch deneyleri için deney gruplarında stronsiyumklörürün (SrCl_2) 1000, 2000 ve 2500 ppm (mg/l)'lik stok çözeltileri hazırlanmış ve bu çözeltiler 0.15 ppm stronsiyum konsantrasyonlu yerel yeraltısuyu ile seyreltilerek kullanılmıştır [Eşitlik [3.10]]. Deney gruplarındaki seyreltik çözelti serileri, aynı stok çözeltinin aynı yeraltısuyu ile seyreltilmesi sonucu hazırlanarak deneylerde çözülden kaynaklı jeokimyasal değişimlerin oluşma ihtimali kısıtlanmıştır.

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

Eşitlik [3.10]

V_1 = stok çözelti hacmi (L^3)

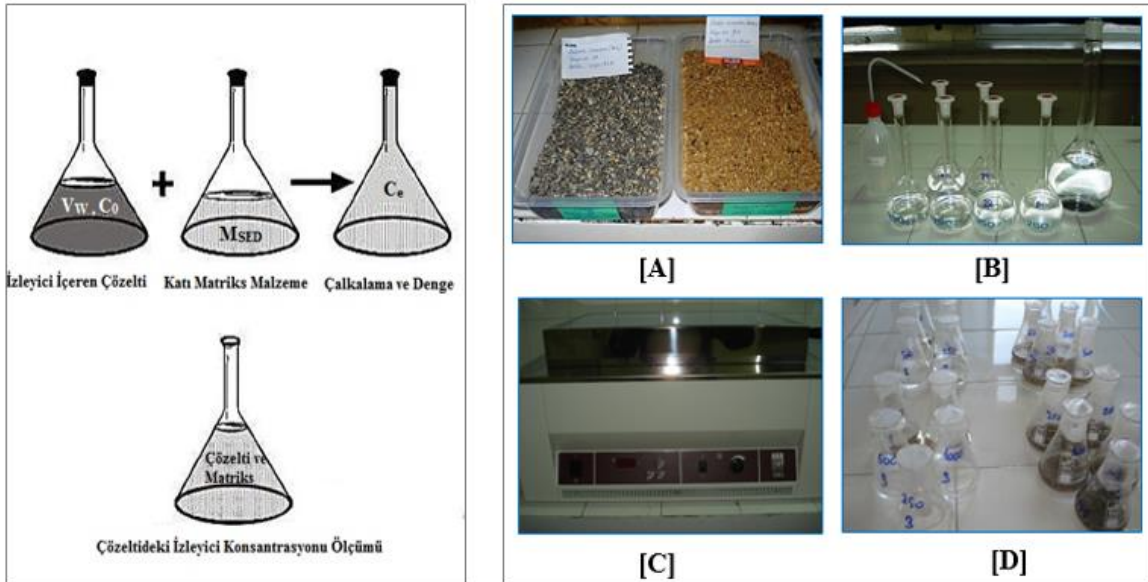
C_1 = stok çözelti konsantrasyonu (ML^{-3})

V_2 = hazırlanacak çözelti hacmi (L^3)

C_2 = standart çözelti konsantrasyonu (ML^{-3}) açıklamaktadır.

Test (deneme) grubu deneylerinde kullanılmak üzere matriks malzemeler arasından Kumlu Kireçtaşı-C3 malzemesi seçilmiş ve 1000 ppm'lik stok çözülden seyreltme yoluyla 1, 10, 25, 50, 75, 100, 250 ve 500 ppm'lik çözelti serisi oluşturulmuştur. 50 ml hacminde hazırlanan her bir seyreltik çözelti ile C3 numunesinin 10'ar gramlık örnekleri cam beherlerde karıştırılmıştır. Test deneyleri sonucu 1, 10 ve 75 ppm çözeltiler deneylerden elde edilen veri kalitesinin düşük olması dolayısıyla dikkate alınmamıştır. Bu deneyler sonucu Rs 1:10 olarak seçilmiştir.

Birinci ve ikinci deney grupları olarak yürütülen testler için; 1000 ppm'lik stok çözeltilerden seyreltme yoluyla 25, 50, 100, 250 ve 500 ppm'lik çözelti serisi oluşturulmuştur. Her bir matriks türünün beşer adet 0.01 hassaslıklı terazi ile 5 gr olarak hazırlanan örnekleri ile 25, 50, 100, 250, 500 ppm'lik çözelti serisinin her birinden 50 ml hacminde hazırlanan örnekleri ile cam tüplerde süspansiyon karışımları oluşturulmuştur. Karışım işleminin ardından ağzları parafinlenen cam tüpler, yaklaşık $25\pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıklı su banyolarına yerleştirilmiştir. Su banyolarında 7-14 gün arasında değişen zaman aralıklarında bekletilen karışımların termodinamiksel dengeye ulaşması beklenmiştir. Karışımlar, su banyolarında bekleme süresi boyunca belli zaman aralıklarında karıştırılmış; böylece tüm matriks tanecik yüzeylerinin çözelti ile teması artırılmış ve karışımın dengeye gelme süresi hızlandırılmıştır. Dengeye ulaşan karışımların su banyolarından çıkarılmalarının ardından, karışım çözeltileri 0,45 μm filtre ve bir enjektör aracılığıyla cam tüplerden ayrılmıştır [Şekil 3.21]. Denge süresi sonrası başka bir cam tüpe aktarılan çözeltinin konsantrasyon miktarı Thermo-Duo ICP ile ölçülmüştür. Üçüncü ve son aşamadaki deney grubu için 2500 ppm'lik stok çözeltilerden seyreltme yoluyla 250, 500, 1000, 2000, 2500 ppm'lik çözeltiler hazırlanmış ve her bir matriks türü örneği için diğer test gruplarında yapılan işlemler uygulanarak deneyler sonlandırılmıştır. Deneylerin gerçekleştirilme aşaması Çizelge 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.21 **Solda:** Batch Tutulma Deneyi Prosedürü ([112]'den değiştirilerek kullanılmıştır). **Sağda:** Deney Aşamaları [A]: Havada Kurutulmuş Matriks Malzemeleri, [B]: Seyreltik Stronsiyum Çözeltisi, [C]: Su Banyosu, [D]: Deney Numuneleri.

Çizelge 3.11 Batch Tutulma Deneyi Grupları ve Hazırlanan Çözelti Konsantrasyonları.

Deney Grubu	Matriks ağırlığı (g)	Çözelti Hacmi (ml)	Rs (g/ml)	Çözelti Konsantrasyonu (ppm)												
				Stok Çözelti	1	10	25	50	75	100	250	500	1000	2000	2500	
Test_0	5	50	1:5	1000												
Test_1	5	50	1:10	1000												
Test_2	5	50	1:10	2500												
Test_3	5	50	1:10	2500												

3.3.2 Batch Tutulma Deneyi Veri Analizi ve Dağılım Katsayısı (K_d)

Matriks malzemeleri için retardasyon faktörünün tahmini, yaygın olarak dağılım (paylaşım) katsayısının (K_d) –ya da dağılım oranı- tanımlanması ile gerçekleştirilmektedir. K_d katsayısı yaklaşımı, bir karışım çözeltisindeki katı ve sıvı faz arasında kimyasal dengenin kurulduğu varsayımı ile çözülden katı matrikse tutunan miktarının (q_e) dengedeki çözelti konsantrasyonuna (C_e) oranını açıklayan matematiksel bir ifadedir.

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \quad ; \quad q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{M}$$

Eşitlik [3.11]

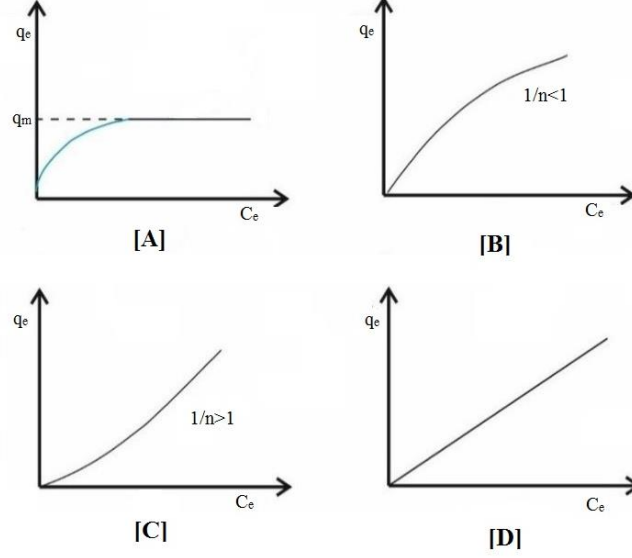
Burada C_0 : çözeltinin başlangıç konsantrasyonu (ML^{-3}), C_e : denge konsantrasyonu (ML^{-3}), V : çözelti hacmi (L^3), M : matriks malzemenin havada kurutulmuş ağırlığını (M) ifade etmektedir.

K_d parametresi, sabit sıcaklık altında elde edilen uygun sorpsiyon izotermi modellerinin belirlenmesi ile sayısallaştırılmaktadır. Sorpsiyon izotermi, sabit sıcaklıkta katı ve sıvı faz arasındaki tutunan madde konsantrasyonu ilişkisini açıklamaktadır. Literatürde tutulma deneyleri sonucu karşılaşılan çok sayıda teorik ve deneysel izoterm modeli (kinetik ya da termodinamik) bulunmasına karşılık, en sık rastlanılan izoterm modelleri Şekil 3.22’de verilen doğrusal (Henry) izotermi ile doğrusal olmayan Freundlich izotermi ve Langmuir izotermi modelleridir.

Doğrusal izoterm modeli, çözülden katı matrikse tutunan izleyici kütlesi ile çözülide kalan izleyici konsantrasyonu (denge konsantrasyonu, C_e) arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsaymaktadır.

$$q_e = K_d \times C_e$$

Eşitlik [3.12]



Şekil 3.22 Denge İzotermi Model Tipleri [A]: Langmuir İzotermi [B],[C]: Freundlich İzotermi [D]: Henry (Doğrusal) İzoterm ([115]'den yararlanarak çizilmiştir).

Freundlich sorpsiyon izotermi, q_e ve C_e değişkenleri arasında doğrusal olmayan bir ilişkiyi tanımlamaktadır.

$$q_e = K_F \times C_e^{1/N}$$

Eşitlik [3.13]

Eşitlik [3.13]'de, K_F : katı matriksin tutma kapasitesini açıklayan Freundlich sabiti (L^3M^{-1}) olup, izotermi doğrusallığına bağlıdır ve 0 ile 1 arasında değişmektedir. $1/N$: belirli bir kimyasal katsayıyı ifade eden sorpsiyon gücünün bir fonksiyonudur. Her iki değişken de izoterm modeli ile ilişkili deneysel parametreler olup, sonuçların $\log q_e - \log C_e$ ölçekte çizilmesi ile tanımlanmaktadır.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{N} \log C_e$$

Eşitlik [3.14]

Eşitlik [3.14]'de, $1/N$ değişkeni $\log q_e - \log C_e$ ölçekteki deneysel sonuçlara en iyi çakışan eğrinin eğimini ifade etmektedir.

Langmuir izotermi, çözeltildeki bu iki değişken arasında hiperbolik bir ilişkinin varlığını kabul etmektedir:

$$q_e = \frac{q_m \beta C_e}{1 + \beta C_e}$$

Eşitlik [3.15]

Eşitlik [3.15]'de, β : Langmuir sabitini (L^3M^{-1}) ve q_m : maksimum malzemenin sorpsiyon kapasitesini (MM^{-1}) ifade etmektedir. q_m ve β değerleri lineer (doğrusal) grafik yardımıyla bulunmaktadır.

Langmuir izotermi Çizelge 3.12'de verilen dört farklı tip regresyon eşitliği ile doğrusallaştırılmaktadır. Örnek Çalışma-4 kapsamında katı matriks malzemeler ve stronsiyum izleyicisi arasında kullanılan regresyon eşitliği, Lineweaver-Burke regresyonudur. Buna göre, $1/q_m$ değeri $1/C_e - 1/q_e$ grafiğinin eğimini; $1/q_m\beta$ değeri ise, bu grafiğin y eksenini kestiği noktayı açıklamaktadır.

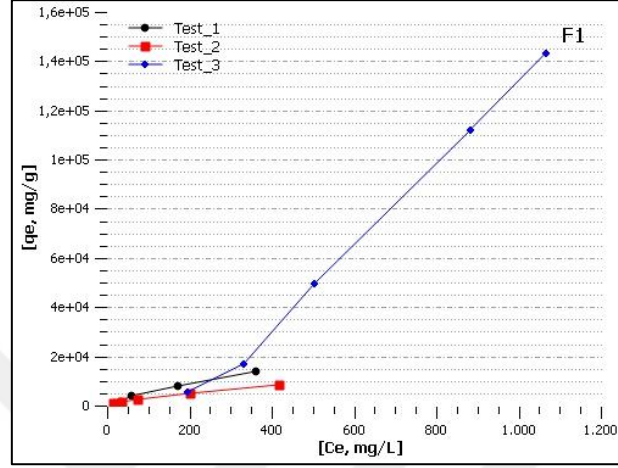
Çizelge 3.12 İzoterm Modellerinde Kullanılan Matematiksel Eşitlikler ve Doğrusallaştırılma Teknikleri ([116] ve [117]'den yararlanılarak hazırlanmıştır).

İzoterm Modeli	Eşitlik	Doğrusallaştırma	Grafik Metodu	Kısıtlama
Langmuir Tip 1	$q_e = \frac{q_m\beta C_e}{1 + \beta C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{\beta q_m}$ Hanes–Woolf Regresyonu	$\frac{C_e}{q_e}$ vs. C_e	x (C_e) ve y (C_e/q_e) bağımsız değişimlerdir. x ve y arasında korelasyon katsayısı oldukça yüksek çıkmaktadır.
Langmuir Tip 2		$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{\beta q_m C_e} - \frac{1}{q_m}$ Lineweaver-Burke Regresyonu	$\frac{1}{q_e}$ vs. $\frac{1}{C_e}$	Dönüşümler orijin yakınlarında kümelenmelere yol açmaktadır. Değerlerinin düşük olmasına karşı oldukça duyarlıdır.
Langmuir Tip 3		$q_e = q_m - \frac{q_e}{\beta C_e}$ Eadie-Hofstee Regresyonu	q_e vs. $\frac{q_e}{C_e}$	x (q_e/C_e) ve y (q_e) bağımsız değişimlerdir. x ve y arasında korelasyon az hesaplanmaktadır.
Langmuir Tip 4		$\frac{q_e}{C_e} = \beta q_m - \beta q_e$ Scathord Regresyonu	$\frac{q_e}{C_e}$ vs. q_e	x (q_e) ve y (q_e/C_e) bağımsız değişimlerdir. x ve y arasındaki korelasyon az hesaplanmaktadır.
Freundlich	$q_e = K_F \times C_e^{1/N}$	$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{N} \log C_e$	$\log q_e$ vs. $\log C_e$	

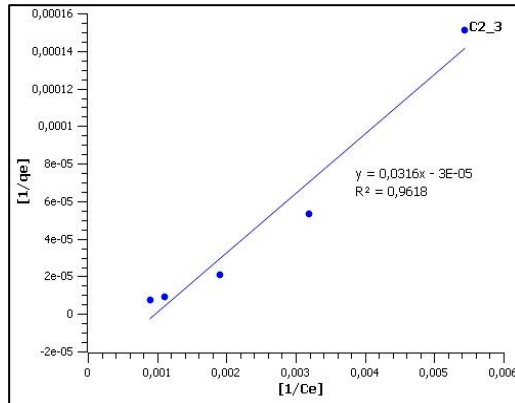
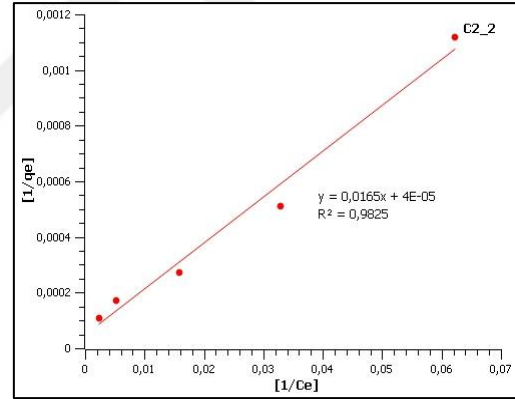
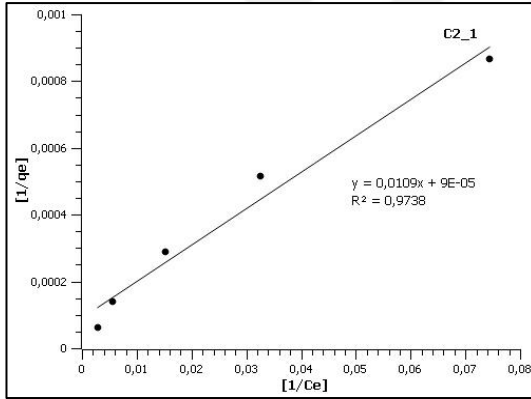
3.3.3 Batch Deneyi Sonuçları ve Denge İzotermi Modelleri

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin analizinde interaktif uygulama olan SciDAVis (<http://scidavis.sourceforge.net/>) kullanılmıştır. Bu kapsamda madde tutulma miktarına (q_e) karşılık gelen denge konsantrasyonu (C_e) grafikleri çizilmiş, elde edilen grafikler ile uygun izoterm modelleri karşılaştırılarak, matriks örneklerinin izoterm modelleri belirlenmiştir.

Buna göre, F1 örneğine ait Langmuir denge izotermi modeli ve parametre tahmini için doğrusallaştırma grafikleri Şekil 3.23'de verilmiştir. Örneklerin tümüne ait izoterm modelleri ile doğrusallaştırma grafikleri sırasıyla [EK-5] ve [EK-6]'de sunulmuştur. Buna göre, hesaplanan matriks dağılım katsayısı (K_{dm}) değerleri ile matriks retardasyon faktörleri (R_m) Çizelge 3.13'de verilmiştir.



[A]



[B]

Şekil 3.23 [A]: F1 Örneğine ait Denge İzoterm Modeli-Langmuir İzotermi [B]: Langmuir İzotermi'nin Doğrusallaştırılması.

Çizelge 3.13 Batch Deneyleri ile Matriks Malzemeleri için Hesaplanan Parametreler.

Matriks Adı	İzoterm Tipi	Doğrusal İzoterm Modeli	Langmuir İzoterm Modeli		Freundlich İzoterm Modeli		Matriks Retardasyon Faktörü (R_m)	
		K_{dm}	β	q_m	1/N	K_F		
		(l/mg)	(l/mg)	(mg/g)	(boyutsuz)	(l/mg)		
A	A1	F				0.9976	160.73	46.80
	A2	F,L		757.14	188.68	0.8945	62.26	40.39
	A3	L		315.99	158.73			74.88
B	B1	F				1.8398	0.39	1.95
	B2	L,F		1858.74	10.76	1.1039	22.03	57.84
	B3	F				1.5350	0.91	1.80
C	C2	L		412.50	60.60			136.56
	C3	L,F		52.40	6.36	1.2067	10.29	25.63
D	D1	L,F		147.99	135.14	0.9580	95.32	157.64
	D2	L,F		154.00	129.87	0.8013	190.94	118.63
E	E1	D	93.49					121.45
	E3	L,F		1727.77	6.43	0.8282	95.52	126.12
F	F1	D	162.54					27.43
	F3	F				1.6575	2.4	2.06

3.3.4 Batch Tutulma Deneyi Sonuçlarının Yorumlanması

Örnek Çalışma-4 kapsamında batch tutulma deneyleri ile matriks malzemeler için belirlenen dağılım katsayısı (K_{dm}), sorpsiyon termodinamiği ile açıklanmış ve sorpsiyon kinetiği göz ardı edilmiştir. Deneyler boyunca temel varsayım, her bir deney grubundaki matriks malzemesi için izleyici paylaşımının aynı sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleştiği ve tutulma denge süresinin tamamlandığıdır. Cam beherler içerisinde kapalı bir karışım sistemi oluşturularak yürütülen tutulma deneylerinde, sistemdeki matriks ve izleyici arasında gerçekleşen (-ya da gerçekleşebilecek-) olası iyon değişimi, redoks olayları ve tür oluşumu gibi süreçlerin ayrımı yapılmamış ve sistemdeki pH değişimi dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla sistemdeki sorpsiyon türü (fiziksel, kimyasal ya da iyon değişimi) ile ilgilenilmemiş, dengedeki sistem içerisinde izleyici konsantrasyonunun matriks ve çözelti arasındaki miktarsal dağılımı analiz edilmiştir. Bu bağlamda, parametre tahmininde termodinamik sürece etki eden sıcaklık parametresi ve matriks tanecik büyüklükleri esas alınmıştır. Ayrıca malzemelerin havada kurutulmuş ağırlıkları değerlendirilmede kriter olarak kullanılmış ve matriks malzemelerin yüzey alanları dikkate alınmamıştır. Isıl dengedeki

sistemde, izleyicinin matrikse tek bir katman boyunca tutulduğu varsayılmış, dolayısıyla tek tabakalı denge izotermi modelleri ile dağılım katsayısı tahmini gerçekleştirilmiştir.

Kırıklı çatlaklı akiferler açısından sorpsiyon (tutulma) mekanizması değerlendirildiğinde, tutulma süreçlerinin matriks bileşenine ek olarak, kırık-çatlak açıklığı boyunca kırık-çatlak duvarlarında (ya da yüzeyinde) gerçekleştiği bilinmektedir. Dolayısı ile kırıklı-çatlaklı bir akifer sisteminde süreksizlik duvarları boyunca gerçekleşen tutulma süreçlerinin açıklanmasında süreksizlik yüzeyi dağılım katsayısının (K_{df}) tahmini önemli görülmektedir. Bununla birlikte, matriks bileşeninin oluşturduğu bu süreksizlik duvarları, ikincil mineral oluşumlarının gerçekleştiği yüzeyler olabilmektedir. Bu nedenle süreksizlik yüzey dağılım katsayısı (K_{df}) tahmini, süreksizlik yüzey alanı parametresine ek olarak süreksizlik duvarları boyunca mineral dolgularının ve oluşumlarının analizini de içermektedir. Dolayısı ile kırık-çatlak yüzeyi boyunca gerçekleşen yüzey sorpsiyon sürecinin analizi oldukça detaylı bir süreksizlik karakterizasyonu çalışmasını gerektirmektedir.

Örnek Çalışma-4 kapsamında tanımlanan matriks dağılım katsayısı K_{dm} değerlerini açıklayan matriks sorpsiyonu, kırıklı-çatlaklı bir akifer sisteminin hacimsel sorpsiyon kapasitesini açıklamaktadır. Bu bağlamda, tahmini gerçekleştirilen hacimsel sorpsiyon katsayısı (K_{dm}), süreksizlik yüzey dağılım katsayısı (K_{df}) ile açıklanan yüzey sorpsiyon sürecini tam olarak karşılamamaktadır. Buna karşın matriks bileşeni, yüksek depolama özelliği ile kırıklı-çatlaklı bir akifer ortamında tutulma süreçlerinin esas olarak gerçekleştiği bölgeyi oluşturmaktadır. Dolayısı ile matriks sorpsiyon sürecinin, süreksizlik yüzeyi sorpsiyon süreci ile kıyaslanması mümkündür. Bu nedenle, çalışmada kırıklı-çatlaklı bir akifer ortamında yüzey sorpsiyon süreci, hacimsel sorpsiyon karşısında ihmal edilmiş ve kırıklı-çatlaklı bir akifer sistemi için yüzey sorpsiyonunu ifade eden yüzey dağılım katsayısı (K_{df}) yerine, hacimsel sorpsiyon mekanizmasını açıklayan matriks dağılım katsayısı (K_{dm}) tanımlanmıştır.

Bununla birlikte, iki gözenekli akifer ortamlarında her iki bileşen için ayrı ayrı tanımlanmış reaktif taşınım parametreleri, sistemde gerçekleşmesi olası bir kirlilik durumunda, kirleticinin uzun süreli davranışının bütüncül tahmininde oldukça önemli görülmektedir. Dolayısı ile bu sistemlerdeki sorpsiyon süreçlerinin detaylı analizi, süreksizlik yapılarının konumsal ve geometrik özelliklerinin tanımlanmasına ek olarak, süreksizlik yüzey alanları, süreksizlik yüzeyinde gerçekleşen farklı mineral oluşumları ya da çökelimleri ile yüzey dolgu malzemesi türü ve kalınlığı gibi karakteristik özelliklerinin karakterizasyonunu gerektirmektedir.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında, farklı kırıklı-çatlaklı akifer ortamlarına kirletici taşınım parametrelerinin tanımlanması amaçlı gerçekleştirilen dört örnek karakterizasyon çalışması sunulmuştur. Her bir karakterizasyon çalışmasından beklenti, çalışmacının sistemi nasıl ve ne detayda tanımlayabildiği dolayısıyla da nasıl kavramsallaştırdığı ile kirlilik problemin türü ve etkisine yönelik getirdiği çözüm önerisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Burada esas olan, çalışmanın içeriğine ve beklentisine uygun olarak seçilen karakterizasyon tekniğinin, kırıklı-çatlaklı akifer sisteminde gerçekleşen taşınım mekanizmasının yeterli ölçüde tanımlanmasına olanak sağlamasıdır. Ancak bu noktada, özellikle bu tür akifer sistemlerinde taşınım parametreleri tahmininde göz önünde bulundurulması gereken, sistemin fiziksel ve dinamik açıdan mümkün olduğunca detaylı tanımlanabilmesidir.

Çalışma kapsamında kırıklı-çatlaklı akiferlerde taşınım süreçlerinin karakterizasyonu ve parametre tahmini, sistem bileşenlerinde (süreksizlikler ve temel matriks malzeme) gerçekleşen farklı taşınım koşullarının kavramsallaştırılması ilkesine dayandırılmıştır. Bu temel yaklaşım ile sistemdeki bir kirleticinin kısa ya da uzun süreli davranışının karakterizasyonu, sistem bileşenlerinde görülen baskın taşınım mekanizmasının kirletici üzerindeki etkinliği göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Buna göre, akifer ortamındaki bir kirleticinin kısa süreli davranışı kırık-çatlak (süreksizlik) hidrodinamiği ile ilişkilendirilmiş ve sistemdeki advektif taşınım mekanizması karakterize edilmiştir. Kirleticinin sistemdeki uzun süreli davranışı ise, matriks bileşenin taşınım süreçlerindeki etkisi göz önüne alınarak dispersif-difüzyon mekanizması ve reaktif taşınım mekanizması ile ilişkilendirilmiştir. Bu genel çerçevede sunulan dört örnek çalışma ile ulaşılan sonuçlar kısaca özetlenmiştir:

Örnek Çalışma-1 kapsamında, ana bir süreksizlik sistemi ve bu sistemi çevreleyen gözenekli bir matriks malzeme tarafından oluşan kırıklı-çatlaklı bazalt akifer sisteminde taşınım parametrelerinin tahmini, tek kuyu enjeksiyon-çekim (TKEÇ) testi-izleme deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyde Uranin izleyicisine ait ilerleme eğrisi iki-pikli (bimodal) bir yapı göstermiştir. Heterojen akifer sistemlerinde sık rastlanılan bu tür ilerleme eğrileri, çalışmada akifer sistemini oluşturan iki farklı hidrodinamik özellikteki matriks ve ana süreksizlik bileşeni ile ilişkilendirilmiştir. Taşınım parametre tahmini, akifer sisteminin ikili gözeneklilik modeli ve eşdeğer gözenekli malzeme model yaklaşımları temelinde yorumlanması ve iki-pikli ilerleme eğrisinin sırasıyla Gauss ve Lorentz (Cauchy) olasılık dağılımları ile uyumlaştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, iki gözenekli bazalt akifer

sistemi için taşınım parametre tahmininde uygun modelleme yaklaşımının ikili gözeneklilik modeli olduğu ve eşdeğer gözenekli malzeme modelinin ise sistemdeki kirleticinin bütüncül davranışının analizinde yetersiz kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, bimodal ilerleme eğrisini oluşturan birincil pik ve ikincil pik eğrileri analiz edilmiş ve sistemin kirleticiye erken, orta ve geç zaman ölçeğinde etki eden taşınım mekanizması yorumlanmıştır. Buna göre, erken zaman sistemdeki ana süreksizlik bileşeninde gerçekleşen advectif taşınım ile, orta ve geç zaman ise çevre gözenekli matrikste gözlenen dispersif-difüzyif taşınım ile karakterize edilmiştir. Ayrıca çevre gözenekli matriksin kirletici davranışı üzerinde etkinliğinin yorumlanması amaçlı, bimodal ilerleme eğrisinin çekilme kısmı analiz edilmiş ve sistemdeki matriks difüzyonu etkinliği irdelenmiştir. Bu analiz yaklaşımı, akım hidrograflarının bileşenlerine ayrılması gibi düşünüldüğünde, matriks difüzyonunu akım hidrografındaki baz akıma benzetmek olasıdır.

Örnek Çalışma-2 kapsamında kırıklı-çatlaklı dolomitik bir kireçtaşı akiferinde akım ve taşınım parametrelerinin karakterizasyonu amaçlayan iki kuyu enjeksiyon-çekim testi-izleme deneyi çalışması sunulmuştur. İzleme deneyinde ilerleme eğrisi çok-pikli (multimodal) bir dağılım göstermiştir. Bununla birlikte, deneyde korunumlu Rodamin WT izleyicisinin tümünün sistemden kurtarılamaması ve izleyici testinin teorik olarak tamamlanamamış olması, ilerleme eğrisi ile gerçekleştirilecek taşınım parametre tahmini için sistemin bütüncül olarak tanımlanmasını kısıtlamıştır.

Kırıklı-çatlaklı dolomitik kireçtaşı akifer sistemi, eşdeğer gözenekli malzeme yaklaşımı ile tek-pikli (unimodal) olarak değerlendirilmiş ve ilerleme eğrisinin Gauss olasılık dağılım fonksiyon ile uyumlaştırılması sonucu, hidrodinamik dispersiyon katsayısı (D_L) 1.67×10^{-8} m²/s, dispersivite (α_L) 0.0011 m, etkin hız (θ_e) 1.49×10^{-5} m/s ve etkin gözeneklilik (n_e) 0.009 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, çok-pikli ilerleme eğrisi üzerinde özellikle ilk zaman aralığında hızlı ve keskin konsantrasyon geçişlerini açıklayan üç yerel pik, sistemdeki yerel süreksizlik sistemlerinin hidrodinamiği ile ilişkilendirilmiş ve piklerin gelişimini hazırlayan süreksizlikler, akifer sisteminin yerel ölçekte önemli hidrolik karakteristikleri olarak değerlendirilmiştir. Buna göre, kırıklı-çatlaklı akifer sisteminde taşınım süreçleri açısından kirleticinin hızlı yayılımına neden olan bu hidrolik karakteristikler, yerel advectif taşınım kanalları olarak değerlendirilmiştir. Böylece her üç pik için etkin kanal akım hızları (θ_{ec}) tanımlanmış ve (θ_{ec1}) 5.99×10^{-4} m/s, (θ_{ec}) 5.26×10^{-4} m/s ve (θ_{ec}) 3.62×10^{-4} m/s olarak belirlenmiştir.

Örnek Çalışma-3 kapsamında kırıklı-çatlaklı dolomitik bir kireçtaşı akifer sisteminin üç farklı noktasındaki kuyularda gerçekleştirilen akifer testleri; düşüm türevi analizlerini içeren diagnostik grafikler aracılığıyla yorumlanmıştır. Hidrolik parametrelerinin tahmini, ikili gözeneklilik modelini esas alan Moench, 1988 ve Barker, 1988 çözümleri gerçekleştirilmiş; matriks ve kırık-çatlak bileşenleri için hidrolik iletkenlik katsayısı (K_f ve K_m) ve depolama katsayısı (S_f ve S_m) hesaplanmıştır. Buna göre, pompaj kuyularına ait düşüm türevi grafikleri incelendiğinde, akım boyutu parametresini dikkate alan Barker, 1988 çözümünün türev grafikleri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada, ayrıca türev analizleri ile akifer sistemi davranışı tahmin edilmiş ve kuyu çevresinde muhtemel akım karakteristikleri belirlenmiştir. Akım karakteristikleri yalnızca hidrolik parametrelerin belirlenmesinde değil; özellikle kırıklı-çatlaklı akiferlerdeki kirletici hareketinin anlaşılması açısından oldukça önemli görülmektedir.

Örnek Çalışma-4 kapsamında ^{86}Sr izleyicisi kullanılarak matriks ve kirletici arasında gerçekleşen sorpsiyon sürecinin analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kırıklı-çatlaklı akiferler açısından yorumlanmıştır. Laboratuvar statik batch testleri aracılığıyla gerçekleştirilen bu çalışma, uygulanmasının kolay ve hızlı olması yanında elde edilen verilerin kalite kontrolünün denetlenebilirliği açısından oldukça önemlidir. Batch tutulma deneyleri ile matriks malzemeler için izleyici dağılım oranı ile ilişkilendirilen deneysel sorpsiyon süreci ile denge izotermi modelleri üretilmiş ve bu modeller aracılığıyla matriks malzemeler için dağılım katsayısı (K_{dm}) ve retardasyon faktörü (R_{dm}) hesaplanmıştır.

Denge izotermi modelleri, matriks malzemenin kimyasal heterojenitesinin tanımlanması ve açıklanabilmesi açısından oldukça önemli görülmektedir. Ancak laboratuvar batch deneyinin büyük oranda sıcaklık, denge süresi, katı:çözelti oranı ve katı tanecik özellikleri gibi deneysel koşullara bağlılığı dolayısıyla bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Buna göre, sistemdeki denge süresi, sistemin denge durumuna kadar geçirdiği süreyi dolayısı ile sistem bileşenlerinin sabit olduğu kontrollü ve ideal bir zamanı tanımlamaktadır. Dolayısıyla denge izotermi modeli, sistemde kimyasal değişimin olmadığı varsayımı ile ideal durumu karakterize etmektedir. Batch deneyleri için belirlenen katı:çözelti oranı, tutulma sürecinin doğru tahmin edilmesinde oldukça etkili bir parametredir. Buna göre, bu oran düşükse, örneğin fazla miktarda katı ya da az miktarda çözelti hazırlanmış ise, kimyasal türün büyük oranda katı tarafından tutulduğu dolayısı ile de çözeltinin başlangıç konsantrasyonunun hızla azaldığı görülebilir. Tersisi durumda ise, başlangıç konsantrasyonu değişiminin daha az olduğu gözlemlenebilir.

Süreksizlik yapıları içeren kaya ortamlarından alınan matriks örneklerinin laboratuvar ortamında analizi, numunenin fiziksel parametrelerinin (yüzey alanı, tanecik yapısı gibi) değişimine neden olmaktadır. Bununla birlikte, bazı kayaçların örneklenmesinin hemen ardından havada kurutulması malzemenin kimyasal ya da biyolojik özelliklerinin değişimine neden olmaktadır. Dolayısıyla maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı deneyler matriks malzemelerin özelliklerinin ne kadar değiştiğinin analizini de gerektirmektedir. Bu da mevcut jeokimyasal süreçlerinin tümünün birden analizi ile mümkün olmaktadır. Dolayısı ile kırıklı-çatlaklı matriks malzemelerinin laboratuvarında kırılarak-parçalanarak deneylere tabi tutulmasında, reaktif taşınım parametrelerin hesaplanmasındaki kısıtlamaları göz önünde bulundurulmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] Berkowitz, B., Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in Water Resources*, 25(8): p. 861-884, **2002**.
- [2] Wu, Y.-S., Liu, H., Bodvarsson, G., A triple-continuum approach for modeling flow and transport processes in fractured rock. *Journal of Contaminant Hydrology*, 73(1): p. 145-179, **2004**.
- [3] Bordas, J.M., *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport in Fractured Aquifers.*, DTIC Document, **2005**.
- [4] Bear, J., Tsang, C.-F., De Marsily, G., *Flow and contaminant transport in fractured rock.*, Academic Press, **2012**.
- [5] Spiessl, S., Mayer, K., MacQuarrie, K., *Reactive transport modelling in fractured rock–redox stability study*. Nuclear Waste Management Organization Report NWMO TR-2009-04. Toronto, Canada, **2009**.
- [6] Neretnieks, I., Diffusion in the rock matrix: an important factor in radionuclide retardation? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B8): p. 4379-4397, **1980**.
- [7] Tang, D., Frind, E., Sudicky, E.A., Contaminant Transport in Fractured Porous Media: Analytical Solution for a Single Fracture. *Water Resources Research*, 17(3): p. 555-564, **1981**.
- [8] Grisak, G., Pickens, J., An analytical solution for solute transport through fractured media with matrix diffusion. *Journal of Hydrology*, 52(1-2): p. 47-57, **1981**.
- [9] Sudicky, E., Frind, E., Contaminant transport in fractured porous media: analytical solutions for a system of parallel fractures. *Water Resources Research*, 18(6): p. 1634-1642, **1982**.
- [10] Małozzewski, P., Zuber, A., On the theory of tracer experiments in fissured rocks with a porous matrix. *Journal of Hydrology*, 79(3-4): p. 333-358, **1985**.
- [11] Malozzewski, P., Zuber, A., Mathematical modeling of tracer behavior in short-term experiments in fissured rocks. *Water Resources Research*, 26(7): p. 1517-1528, **1990**.
- [12] Malozzewski, P., Zuber, A., Tracer experiments in fractured rocks: matrix diffusion and the validity of models. *Water Resources Research*, 29(8): p. 2723-2735, **1993**.
- [13] Malozzewski, P., Mathematical modelling of tracer experiments in fissured aquifers. *Professur f. Hydrologie*, **1994**.
- [14] Reimus, P., Pohll, G., Mihevc, T., Chapman, J., Haga, M., Lyles, B., Sanders, P., Testing and parameterizing a conceptual model for solute transport in a fractured granite using multiple tracers in a forced-gradient test. *Water Resources Research*, 39(12), **2003**.
- [15] Delleur, J.W., *The handbook of groundwater engineering*. CRC press, **2006**.
- [16] Kang, P. K., Le Borgne, T., Dentz, M., Bour, O., Juanes, R., Impact of velocity correlation and distribution on transport in fractured media: Field evidence and theoretical model. *Water Resources Research*, 51(2): p. 940-959, **2015**.

- [17] NRC, *Rock Fractures And Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*, National Academies Press, **1996**.
- [18] Göppert, N., Goldscheider, N., Solute and Colloid Transport in Karst Conduits under Low-and High-Flow Conditions. *Ground water*, 46(1): p. 61-68, **2008**.
- [19] Brouyère, S., Jeannin, P. Y., Dassargues, A., Goldscheider, N., Popescu, I. C., Sauter, M., Zwahlen, F., Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach. *Sciences et techniques de l'environnement. Mémoire hors-série*, p. 67-72, **2001**.
- [20] Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., & Smart, C., Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37(1): p.3, **2008**.
- [21] Johnston, P. B., Atkinson, T. C., Odling, N. E., Barker, J. A., Models of tracer breakthrough and permeability in simple fractured porous media. Geological Society, London, Special Publications, 249(1): p. 91-102, **2005**.
- [22] Palmer, C.D., The effect of monitoring well storage on the shape of breakthrough curves—A theoretical study. *Journal of Hydrology*, 97(1): p. 45-57, **1988**.
- [23] Moreno, L., Tsang, C.F., Multiple-peak response to tracer injection tests in single fractures: a numerical study. *Water Resources Research* 27(8): p. 2143-2150., **1991**.
- [24] Brouyère, S., Rentier, C., About the influence of the injection mode on tracer test results. *Tracer Hydrology*, 97: p. 11-17, **1997**.
- [25] Werner, A., Hoetzel, H., Maloszewski, P., Kaess, W., *Interpretation of tracer tests in karst systems with unsteady flow conditions*. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 247: p. 15-26, **1998**.
- [26] Massei, N., Wang, H. Q., Field, M. S., Dupont, J. P., Bakalowicz, M., & Rodet, J. , Interpreting tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer. *Hydrogeology Journal*, 14(6): p. 849-858, **2006**.
- [27] Field, M.S., Leij, F.J., Solute transport in solution conduits exhibiting multi-peaked breakthrough curves. *Journal of Hydrology*, 440-441: p. 26-35, **2012**.
- [28] Siirila-Woodburn, E.R., Sanchez-Vila, X., Fernández-Garcia, D., On the formation of multiple local peaks in breakthrough curves. *Water Resources Research*, 51(4): p. 2128-2152, **2015**.
- [29] Siirila, E.R., Maxwell, R.M., Evaluating effective reaction rates of kinetically driven solutes in large-scale, statistically anisotropic media: Human health risk implications. *Water Resources Research*, 48(4), **2012**.
- [30] Siirila, E.R., Maxwell, R.M., A new perspective on human health risk assessment: Development of a time dependent methodology and the effect of varying exposure durations. *Science of the Total Environment*, 431: p. 221-232, **2012**.
- [31] Kumar, V., de Barros, F. P., Schuhmacher, M., Fernández-Garcia, D., Sanchez-Vila, X., Dynamic interactions between hydrogeological and exposure parameters in daily dose prediction under uncertainty and temporal variability. *Journal of Hazardous Materials*, 263: p. 197-206, **2013**.

- [32] Rodak, C., Silliman, S.E., Bolster, D., Time-Dependent Health Risk from Contaminated Groundwater Including Use of Reliability, Resilience, and Vulnerability as Measures, *Journal of the American Water Resources Association*, 50(1): p. 14-28, **2014**.
- [33] Gutierrez, A., Klinka, T., Thiéry, D., Buscarlet, E., Binet, S., Jozja, N., Elsass, J., TRAC, a collaborative computer tool for tracer-test interpretation. in EPJ Web of Conferences. *EDP Sciences*, **2013**.
- [34] Käss, W., *Geohydrologische Markierungstechnik [Textbook of geohydrological marking and tracing techniques]*. Borntraeger, Stuttgart, **2004**.
- [35] Toride, N., Leij, F., Van Genuchten, M.T., The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. US Salinity Laboratory Riverside, **1995**.
- [36] Field, M.S., The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems. National Center for Environmental Assessment--Washington Office, Office of Research and Development, *US Environmental Protection Agency*, **2002**.
- [37] Kass, W., Behrens, H., *Tracing technique in geohydrology*. Balkema, **1998**.
- [38] Hauns, M., Jeannin, P.-Y., Atteia, O., Dispersion, retardation and scale effect in tracer breakthrough curves in karst conduits. *Journal of Hydrology*, 241(3): p. 177-193, **2001**.
- [39] Smart, C. C., Zabo, L., Alexander, E. C., & Worthington, S. R. H., Some advances in fluorometric techniques for water tracing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 53(2): p. 305-320, **1998**.
- [40] Shapiro, A.M., Effective matrix diffusion in kilometer-scale transport in fractured crystalline rock. *Water Resources Research*, 37(3): p. 507-522, **2001**.
- [41] Rosenberry, D. O., LaBaugh, J. W., Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water. in US Geological Survey Techniques and Methods 4-D2, **2008**.
- [42] Van Genuchten, M. T., Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments, **1981**.
- [43] Benson, D.A., *The Fractional Advection-Dispersion Equation: Development and Application*. University of Nevada Reno, **1998**.
- [44] Maloszewski, P., Harum, T., Benischke, R., Mathematical modelling of tracer experiments in the karst of Lurbach system. *Beitr. z. Hydrogeologie*, 43: p. 116-136, **1992**.
- [45] Goldscheider, N., Drew, D., *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*, 26. CRC Press, **2007**.
- [46] *Fractured Bedrock Field Methods and Analytical Tools Volume II*, Golder Associates, <http://www.sabcs.chem.uvic.ca/May%2024%20Final%20%20SABC%20Fract%20BR%20Appendices-Vol2.pdf>, **2010**.
- [47] Pickens, J. F., Jackson, R. E., Inch, K. J., Merritt, W. F., Measurement of distribution coefficients using a radial injection dual-tracer test. *Water Resources Research*, 17(3): p. 529-544, **1981**.

- [48] Istok, J. D., Field, J. A., Schroth, M. H., Sawyer, T. E., Humphrey, M. D., Laboratory and field investigation of surfactant sorption using single-well, “push-pull” tests. *Ground Water*, 37(4): p. 589-598, **1999**.
- [49] Schroth, M., Istok, J., Haggerty, R., In situ evaluation of solute retardation using single-well push-pull tests. *Advances in Water Resources*, 24(1): p. 105-117, **2000**.
- [50] Davis, B., Istok, J., Semprini, L., Push-pull partitioning tracer tests using radon-222 to quantify non-aqueous phase liquid contamination. *Journal of Contaminant Hydrology*, 58(1): p. 129-146, **2002**.
- [51] Cassiani, G., Burbery, L.F., Giustiniani, M., A note on in situ estimates of sorption using push-pull tests. *Water Resources Research*, 41(3), **2005**.
- [52] Neretnieks, I., Single well injection withdrawal tests (SWIW) in fractured rock. Some aspects on interpretation, **2007**.
- [53] Istok, J.D., *Push-pull tests for site characterization*. Vol. 144. Springer Science & Business Media, **2012**.
- [54] Barenblatt, G., Zheltov, I.P., Kochina, I., Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 24(5): p. 1286-1303, **1960**.
- [55] Warren, J., Root, P.J., The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(03): p. 245-255, **1963**.
- [56] Kazemi, H., Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 9(04): p. 451-462, **1969**.
- [57] Sudicky, E., The Laplace transform Galerkin technique for efficient time-continuous solution of solute transport in double-porosity media. *Geoderma*, 46(1): p. 209-232, **1990**.
- [58] Domenico, P., Schwartz, F.W., *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley & Sons, New York, **1990**.
- [59] Fetter, C.W., Fetter, C., *Contaminant Hydrogeology*. Vol. 500., Prentice hall New Jersey, **1999**.
- [60] Freeze, R.A., Cherry, J.A., *Groundwater*, **1979**.
- [61] Berkowitz, B., J. Bear, and C. Braester, Continuum models for contaminant transport in fractured porous formations. *Water Resources Research*, 24(8): p. 1225-1236, **1988**.
- [62] Haggerty, R., McKenna, S., Meigs, L., Tracer Tests in a Fractured Dolomite: 4. Double Porosity, Multiple-Rate Mass Transfer Processes in Two-Well Convergent Flow Tests., Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, and Livermore, CA, **1999**.
- [63] Zhou, Q., Liu, H. H., Molz, F. J., Zhang, Y., Bodvarsson, G. S., Field-scale effective matrix diffusion coefficient for fractured rock: Results from literature survey. *Journal of Contaminant Hydrology*, 93(1): p. 161-187, **2007**.
- [64] Shih, D. C. F., Chen, Y. G., Lin, G. F., Wu, Y. M., Uncertainty propagation of hydrodispersive transfer in an aquifer: an illustration of one-dimensional

- contaminant transport with slug injection. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(5): p. 613-620, **2009**.
- [65] Makaske, B., Anastomosing rivers: A Review Of Their Classification, Origin And Sedimentary Products. *Earth-Science Reviews*, 53(3): p. 149-196, **2001**.
- [66] Rowiński, P., Napiórkowski, J., *Tracer test in the anastomosing-type river.*, **2002**.
- [67] Launay, M., Le Coz, J., Camenen, B., Walter, C., Angot, H., Dramais, G., Coquery, M., Calibrating pollutant dispersion in 1-D hydraulic models of river networks. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(1): p. 120-132, **2015**.
- [68] Maurice, L., Atkinson, T. C., Barker, J. A., Williams, A. T., Farrant, A., Gallagher, A., Tracer investigations of the nature and structure of subsurface voids in mildly karstic aquifers: an example from the English Chalk, in *Advances in Research in Karst Media.*, Springer. p. 137-142, **2010**.
- [69] Duffield, G., Aqtesolv Pro 4.5. Aquifer Test Analysis Software. HydroSOLVE Inc, **2007**.
- [70] Theis, C.V., The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2): p. 519-524, **1935**.
- [71] Cooper, H.H., Jacob, C., A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(4): p. 526-534, **1946**.
- [72] Renard, P., Glenz, D., Mejias, M., Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, 17(3): p. 589-600, **2009**.
- [73] Chow, V.T., On the determination of transmissibility and storage coefficients from pumping test data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 33(3): p. 397-404, **1952**.
- [74] Bourdet, D., Whittle, T. M., Douglas, A. A., Pirard, Y. M., A new set of type curves simplifies well test analysis., *World Oil*, 196(6): p. 95-106, **1983**.
- [75] Karasaki, K., Long, J., Witherspoon, P., Analytical models of slug tests. *Water Resources Research*, 24(1): p. 115-126, **1988**.
- [76] Spane Jr, F., Selected hydraulic test analysis techniques for constant-rate discharge tests. Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, **1993**.
- [77] Spane Jr, F., Wurstner, S., DERIV: A program for calculating pressure derivatives for hydrologic test data., PNL-SA-21569, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, **1992**.
- [78] McConnell, C.L., Double porosity well testing in the fractured carbonate rocks of the Ozarks. *Ground Water-Worthington Then Dublin Ohio-*, 31: p. 75-75, **1993**.
- [79] van Tonder, G., Kunstmann, H., Xu, Y., Fourie, F., Estimation of the sustainable yield of a borehole including boundary information, drawdown derivatives and uncertainty propagation. *IAHS Publication*, p. 367-376, **2000**.
- [80] Renard, P., The future of hydraulic tests. *Hydrogeology Journal*, 13(1): p. 259-262, **2005**.

- [81] Kurtzman, D., Nativ, R., Adar, E.M., The conceptualization of a channel network through macroscopic analysis of pumping and tracer tests in fractured chalk., *Journal of hydrology*, 309(1): p. 241-257, **2005**.
- [82] Samani, N., Pasandi, M., Barry, D., Characterizing a heterogeneous aquifer by derivative analysis of pumping and recovery test data. *Geological Society of Iran Journal*, 1(Ecol-Article-2008-093): p. 29-41, **2006**.
- [83] Kim, B.S., Yang, D.C., Yeo, I.W., Estimation of hydraulic parameters of a fractured rock aquifer using derivative analysis. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 15(6): p. 46-52, **2010**.
- [84] Hammond, P.A., Field, M.S., A Reinterpretation of Historic Aquifer Tests of Two Hydraulically Fractured Wells by Application of Inverse Analysis, Derivative Analysis, and Diagnostic Plots. *Journal of Water Resource and Protection*, 2014. **2014**.
- [85] Walker, D.D., Roberts, R.M., Flow dimensions corresponding to hydrogeologic conditions. *Water Resources Research*, 39(12), **2003**.
- [86] Anonim, http://petrowiki.org/Diagnostic_plots (Kasim, **2016**)
- [87] Beauheim, R. L., Roberts, R. M., Avis, J. D., Well testing in fractured media: flow dimensions and diagnostic plots. *Journal of Hydraulic Research*, 42(S1), 69-76, **2004**.
- [88] Bourdarot, G., *Well testing: Interpretation methods.*, Paris: Editions Technip, **1998**.
- [89] Horne, R.N., *Modern well test analysis*. Petroway Inc, **1995**.
- [90] Bourdet, D., Ayoub, J., Pirard, Y., Use of pressure derivative in well test interpretation. *SPE Formation Evaluation*, 4(02): p. 293-302, **1989**.
- [91] Schlumberger, *Introduction to Well Testing*, Bath, England, **1998**.
- [92] de Swaan O, A., Analytic solutions for determining naturally fractured reservoir properties by well testing. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 16(03): p. 117-122, **1976**.
- [93] Streltsova-Adams, T., Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations. *Advances in Hydroscience*, 11: p. 357-423, **1978**.
- [94] van Golf-Racht, T.D., *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Vol. 12. Elsevier, **1982**.
- [95] Gringarten, A., Flow-test evaluation of fractured reservoirs. *Geological Society of America Special Papers*, 189: p. 237-264, **1982**.
- [96] Pruess, K., A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 25(01): p. 14-26, **1985**.
- [97] Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., *Applied hydrogeology of fractured rocks.*, Springer Science & Business Media, **2010**.
- [98] Moench, A.F., Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 20(7): p. 831-846, **1984**.
- [99] Barker, J., A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research*, 24(10): p. 1796-1804, **1988**.

- [100] Anonim, [http://www.waterloohydrogeologic.com/help/aquifertest/index.html? fracture_flow_double_porosit.htm](http://www.waterloohydrogeologic.com/help/aquifertest/index.html?fracture_flow_double_porosit.htm), (Kasım, **2016**)
- [101] Bowman II, D.O., Roberts, R.M., Estimation of Transmissivity using Non-radial Flow Dimensions., Sandia National Laboratories, **2007**.
- [102] Maréchal, J. C., Ladouche, B., Dewandel, B., Fleury, P., Dörfliger, N., Diagnostic plots applied to well-tests in karst systems, in *H2Karst Research in Limestone Hydrogeology*, Springer. p. 127-137, **2014**.
- [103] Gringarten, A. C., Ramey Jr, H. J., Raghavan, R., Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 14(04): p. 347-360, **1974**.
- [104] Gringarten, A.C., Witherspoon, P., A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. Percolation through fissured rock, *Deutsche Gesellschaft für Red and Grundbau*, Stuttgart, p. T3B1-T3B8, **1972**.
- [105] Hantush, M.S., Modification of the theory of leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 65(11): p. 3713-3725, **1960**.
- [106] Neuman, S.P., Witherspoon, P.A., Applicability of current theories of flow in leaky aquifers. *Water Resources Research*, 5(4): p. 817-829, **1969**.
- [107] Moench, A.F., Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer. *Water Resources Research*, 33(6): p. 1397-1407, **1997**.
- [108] Tartakovsky, G.D., Neuman, S.P., Three-dimensional saturated-unsaturated flow with axial symmetry to a partially penetrating well in a compressible unconfined aquifer. *Water Resources Research*, 43(1), **2007**.
- [109] ASTM, D 4319-93: Standard Test Method for Distribution Ratios by the Short-Term Batch Method, Philadelphia, PA., **2001**.
- [110] ASTM, D 4646-03: Standard test 24-h batch type measurement of containment sorption by soil and sediments, Philadelphia, PA., **2008**.
- [111] EPA, *Fate, Transport and Transformation Test Guidelines, Adsorption/Desorption (Batch Equilibrium)*, OPPTS 835.1230., **2008**.
- [112] EPA, *Understanding Variation in Partition Coefficient, Kd Values, Volume I: The Kd Model, Methods of Measurement, and Application of Chemical Reaction Codes*, Office of Environmental Restoration, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585, 212p, **1999**.
- [113] Selnert, E., Byegård, J., Widestrand, H., *Forsmark Site Investigation: Laboratory Measurements Within the Site Investigation Programme for the Transport Properties of the Rock: Final Report*. Svensk kärnbränslehantering (SKB), **2008**.
- [114] Um, W., Serne, R. J., Bjornstad, B. N., Schaef, H. T., Brown, C. F., LeGore, V. L., Vickerman, T. S., *Characterization of 200-UP-1 aquifer sediments and results of sorption-desorption tests using spiked uncontaminated groundwater.*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, **2005**.
- [115] Delle Site, A., Factors affecting sorption of organic compounds in natural sorbent/water systems and sorption coefficients for selected pollutants. A review. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 30(1): p. 187-439, **2001**.

- [116] Armagan, B., Toprak, F., Optimum isotherm parameters for reactive azo dye onto pistachio nut shells: comparison of linear and non-linear methods. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4): p. 1007, **2013**.
- [117] Bolster, C.H., Hornberger, G.M., On the use of linearized Langmuir equations. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6): p. 1796-1806, **2007**.



EKLER

- EK-1** İki Kuyu Enjeksiyon-Çekim Testi-İzleme Deneyi Kuyu Litolojisi Bilgileri
- EK-2** PK1 ve PK3 Kuyularına Ait Kuyu Litolojisi Bilgileri
- EK-3** PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler
- EK-4** PK-2 Kuyusunun Farklı Analitik Çözümleme Metotlarına Göre Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler
- EK-5** Batch Deneyi ile Elde Edilen Denge İzotermi Modelleri
- EK-6** Batch Deneyi Verileri ve Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırılması



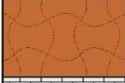
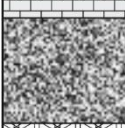
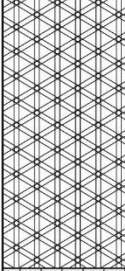
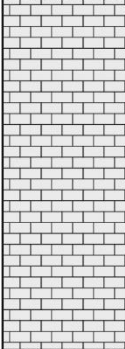
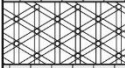
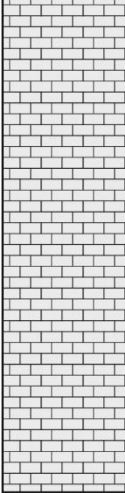
EK-1.1 Enjeksiyon Kuyusuna Ait Kuyu Litolojisi Bilgileri.

LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	DERİNLİK (m)	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	DERİNLİK (m)
	Üst Toprak Zon				
		1			20
	KİLLİ KİREÇTAŞI Pembe yeşilimsi sarımsı renkli Sıkça kırıklı çatlaklı, Çatlaklarda ikincil kalsit, kil ve demir oksit dolguları içerir	2		DOLOMİTİK KİREÇTAŞI (BREŞ SEVİYELİ) Kahverengimsi gri renkli, çok kırıklı çatlaklı, kil, kalsit ve demir oksit çimento dolgulu, Kırık çatlak yüzeylerinde demir oksit sıvanmış	21
		3			22
		4			23
		5		AYRIŞMIŞ KİLLİ KİREÇTAŞI Kahve renkli	24
		6			25
	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI Maviye çalan gri-koyu gri renkli Sıkça kırıklı çatlaklı Çatlaklarda kalsit, kil ve demir oksit dolgulu Az alterasyona uğramış	7			26
		8		BREŞ Kahveye yakın gri renkli, çok kırıklı çatlaklı, okside olmuş, kil, kalsit ve demir oksit dolgulu çatlak ve kırıklarda demir oksit mineralleri içerir	27
		9			28
	AYRIŞMIŞ KİLLİ KÇT. Pembeye çalan kahve renkli	10			29
		11			30
	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI Gri-koyu gri renkli, kil, kalsit ve demir oksit dolgulu, sıklıkla kalsit damarları içerir	12			31
		13			32
	AYRIŞMIŞ KİLLİ KİREÇTAŞI Pembeye çalan sarı kahve renkli	14			33
		15			34
	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI (BREŞ SEVİYELİ) Kahveye çalan gri renkli, çok çatlaklı, kil, kalsit ve demir oksit dolgulu	16		DOLOMİTİK KİREÇTAŞI gri- koyu gri renkli çok kırıklı çatlaklı, kil kalsit ve demir oksit dolgulu yüksek okside olmuş, sıklıkla kalsit damarları içerir breşleşme içerir	35
		17			36
		18			37
					38
					39

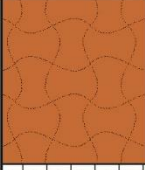
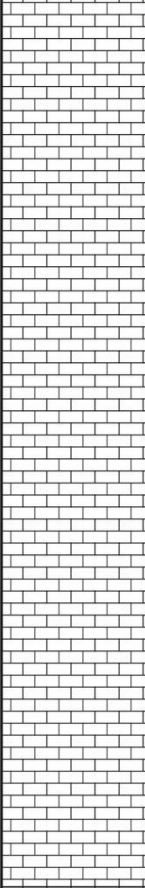
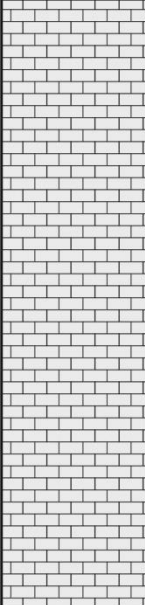
EK-1.2 Çekim Kuyusuna Ait Kuyu Litolojisi Bilgileri.

LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	DERİNLİK (m)	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
	DOLGU siltli kil kireçtaşı parçacıkları, kahve renkli	1		
		2		
		3		
		4		
	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI Gri-koyu gri renkli, sık kırıklı çatlaklı kalsit damarları içerir, kırık çatlak yüzeyleri oksit demir oksit mineralleri ile sıvanmış, kil, kalsit ve demir oksit dolgulu, breşleşme içerir	5		
		6		
		7		
		8		
		9		
		10		
		11		
		12		
		13		
		14		
	SİLTİLİ KİREÇTAŞI Sarıya çalan kahve renkli, kırıklı çatlaklı ve çatlaklar demir oksit tarafından sıvanmış yüksek silt ve kil dolgulu	15		
		16		
		17		
		18		
		19		
		20		
		21		
		22		
		23		
		24		
		25		
		26		
		27		
		28		
		29		
		30		
		31		
		32		
		33		
		34		
		35		
		36		
		37		
		38		
		39		
		40		
				DOLOMİTİK KİREÇTAŞI Gri-koyu gri renkli, sık kırıklı çatlaklı kalsit damarları içerir, kırık çatlak yüzeyleri oksit demir oksit mineralleri ile sıvanmış, kil, kalsit ve demir oksit dolgulu, breşleşme içerir

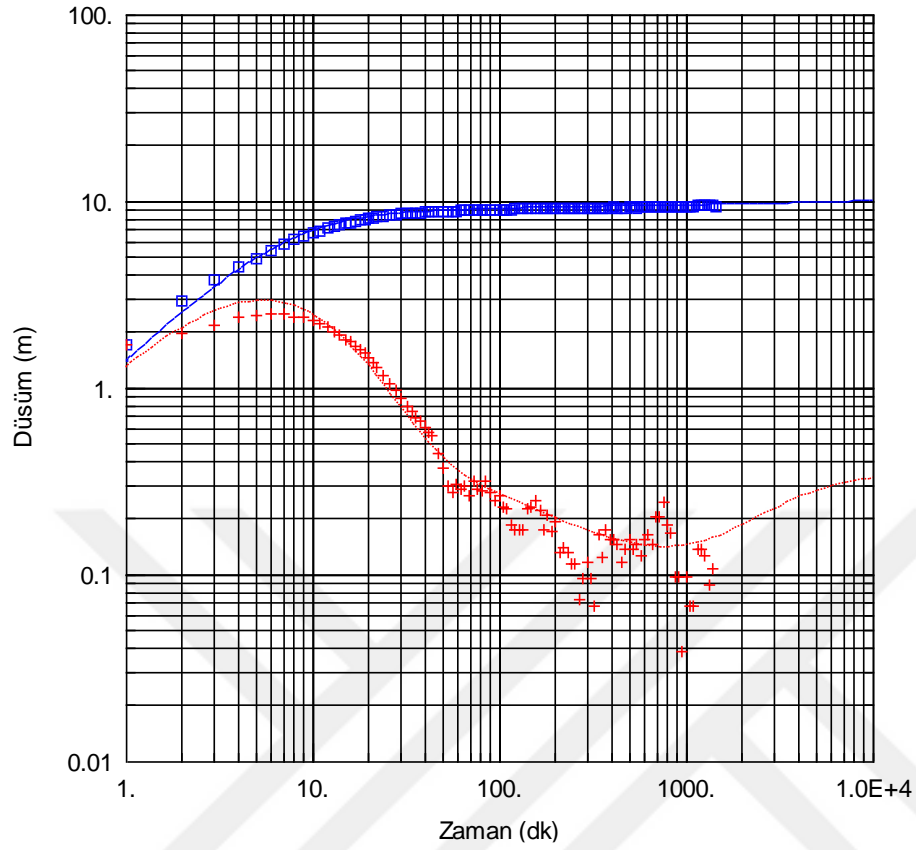
EK-2.1 PK1 Kuyusu Kuyu Litolojisi Bilgileri.

LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	DERİNLİK (m)	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
	KALINTI TOPRAK killi silt ve kireçtaşı parçacıkları	1	21	
	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI gri renkli, çatlaklarda kil, kalsit ve demir oksit dolguları içerir	2	22	
	ÇAKILLI SİLTİLİ KİL kahve renkli, siltli kil	3	23	
	BREŞ-DOLOMİTİK KİREÇTAŞI ARDALANMASI pembeye kahveye çalan gri renkli, kırıklı çatlaklı, kil kalsit ve demir oksit dolgulu, sıkça kalsit damarları içerir	4	24	
		5	25	
		6	26	
		7	27	
	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI gri-koyu gri renkli kırıklı çatlaklı, sıklıkla kalsit damarları içerir, kil kalsit ve demir oksit dolgulu	8	28	
		9	29	
		10	30	
		11	31	
		12	32	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI-SİLTİLİ KİLLİ KİREÇTAŞI ARDALANMASI soluk sarı ve kahveye çalan gri renkli, kırıklı çatlaklı, breşleşme içerir, kil, kalsit ve demir oksit dolgulu, kalsit damarları içerir
	BREŞ kahveye çalan gri renkli, kırıklı çatlaklı	13	33	
		14	34	
		15	35	
		16	36	
		17	37	
		18	38	
		19	39	
		20	40	

EK-2.2 PK3 Kuyusu Kuyu Litolojisi Bilgileri.

LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	DERİNLİK (m)		
	TOPRAK ZON siltli kil ve kireçtaşı parçacıkları	1		
		2		
	KİREÇTAŞI kahveye çalan gri-koyu gri renkli, kalsit damarları içerir, kalın breşleşme içerir, erime ve çözünme boşlukları içerir, çatlaklarda demir oksit sıvanmış, yer yer fosil içerir	3		
		4		
		5		
		6		
		7		
		8		
		9		
		10		
		11		
		12		
		13		
		14		
		15		
			DOLOMİTİK KİREÇTAŞI koyu gri-siyah renkli, ara sıra kalın kalsit damarları içerir, fosil içerir, yer yer breşleşme içerir, çatlaklarda demir oksit sıvanmış	16
				17
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				

EK-3 PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler

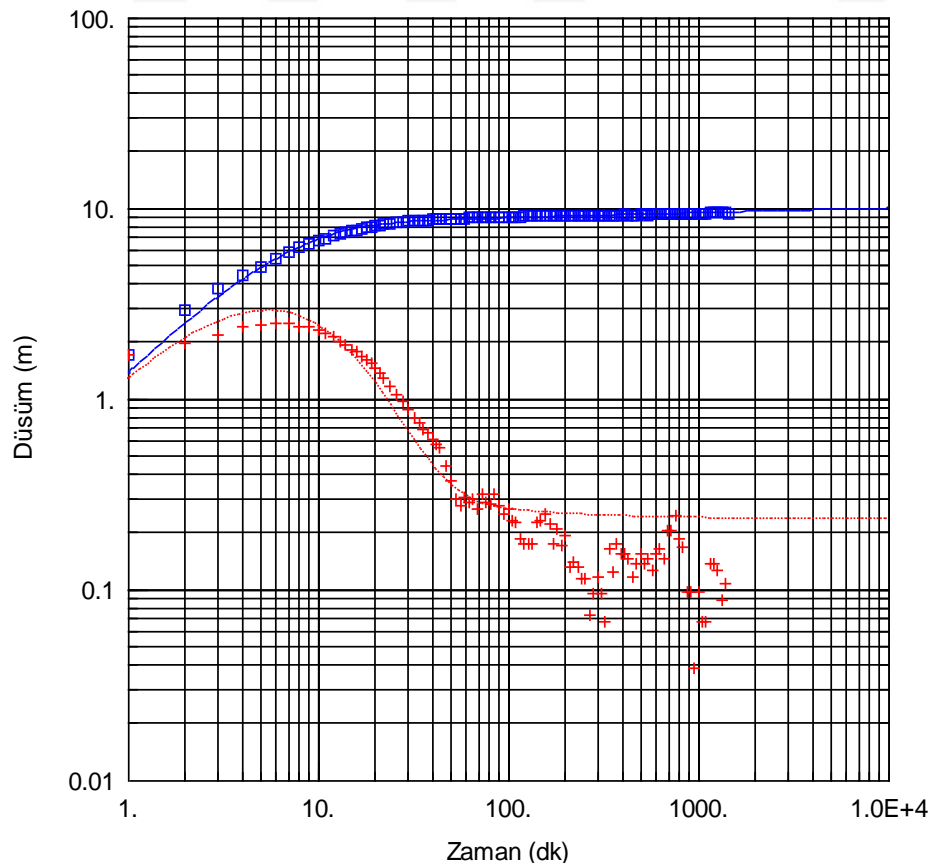


Obs. Wells
 □ PK1

Aquifer Model
 Fractured

Solution
 Moench w/slab blocks

Parameters
 $K = 1.214 \text{ m/day}$
 $S_s = 0.0001048 \text{ m}^{-1}$
 $K' = 1.587\text{E-}5 \text{ m/day}$
 $S_s' = 0.001 \text{ m}^{-1}$



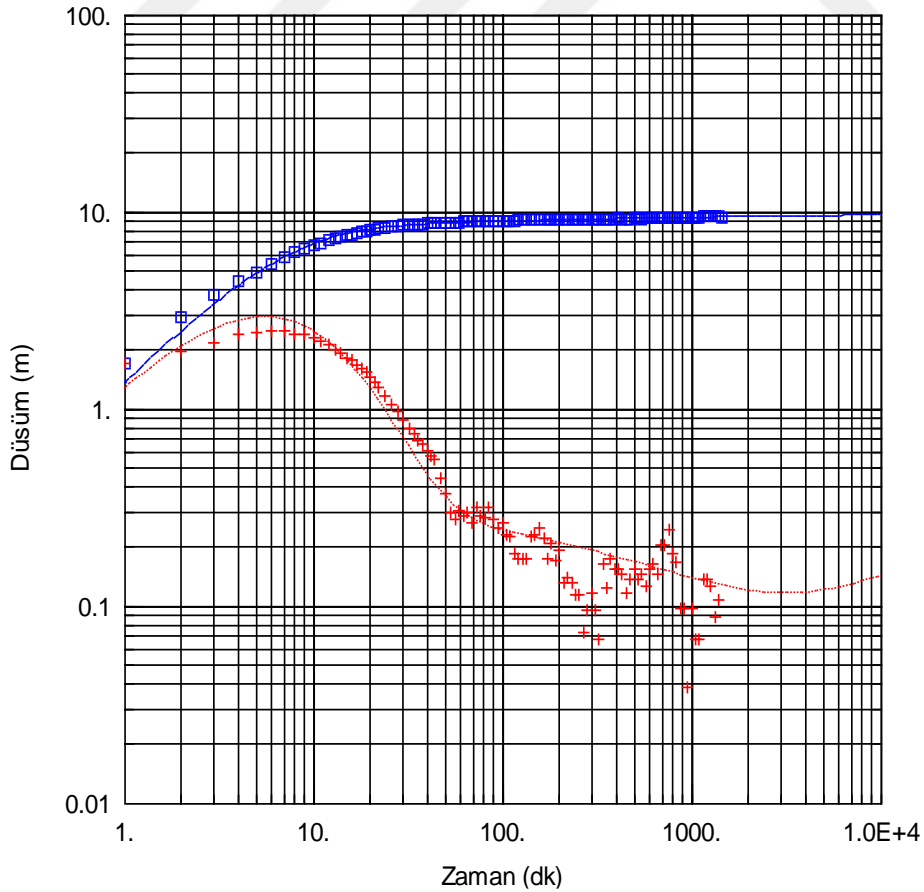
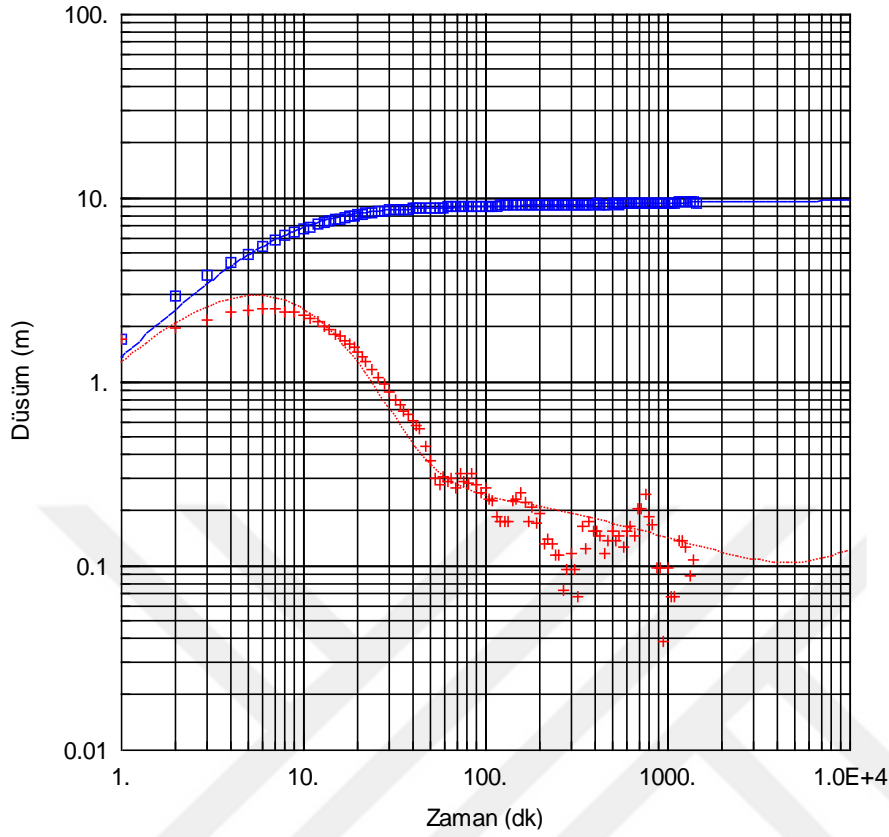
Obs. Wells
 □ PK1

Aquifer Model
 Fractured

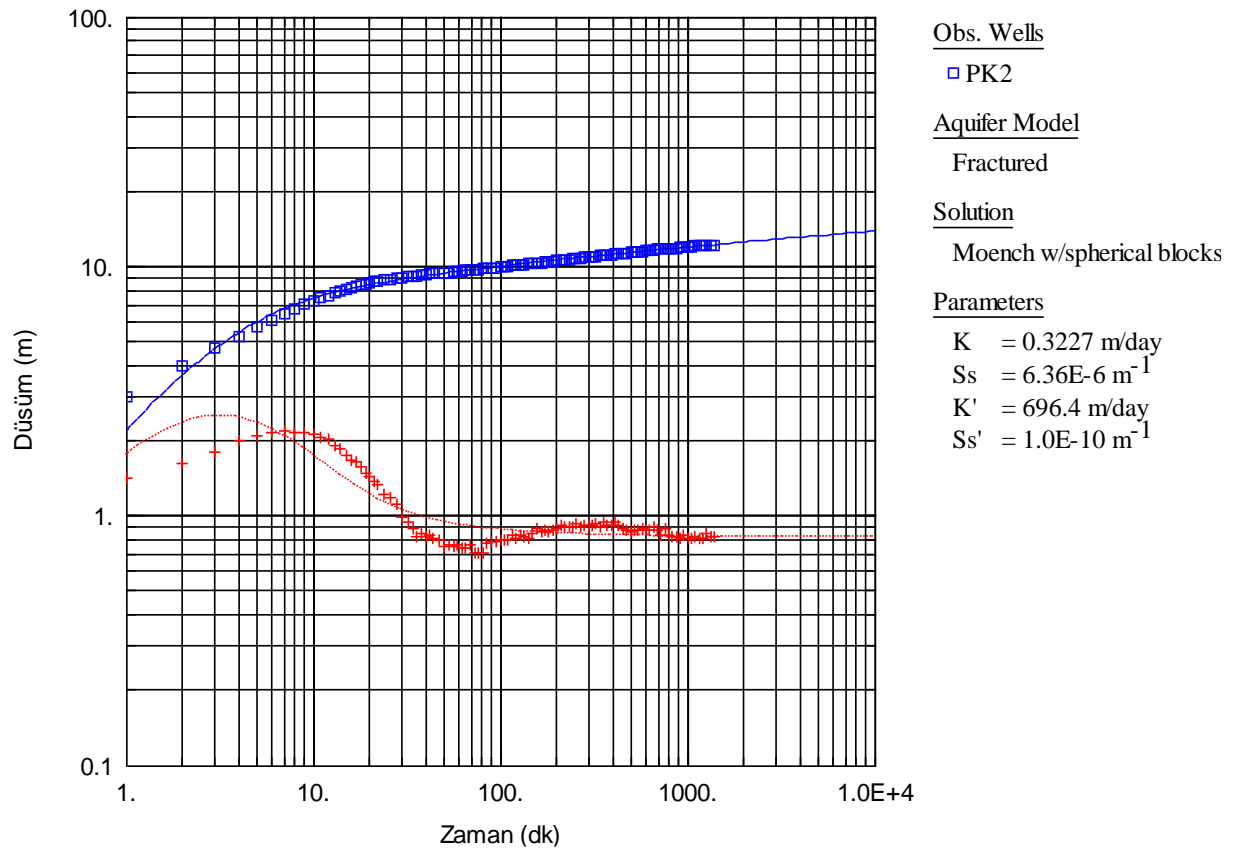
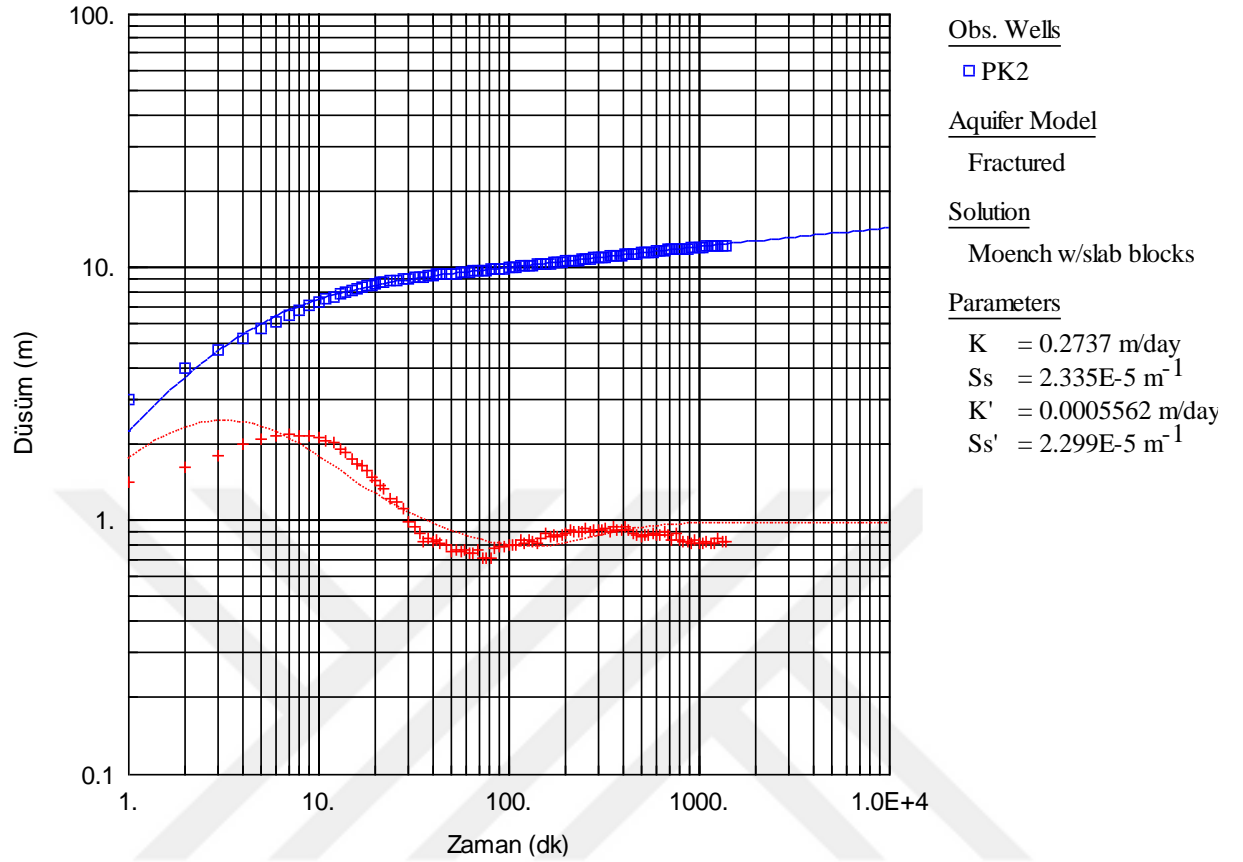
Solution
 Moench w/spherical blocks

Parameters
 $K = 1.766 \text{ m/day}$
 $S_s = 3.487\text{E-}7 \text{ m}^{-1}$
 $K' = 0.0001588 \text{ m/day}$
 $S_s' = 1.0\text{E-}10 \text{ m}^{-1}$

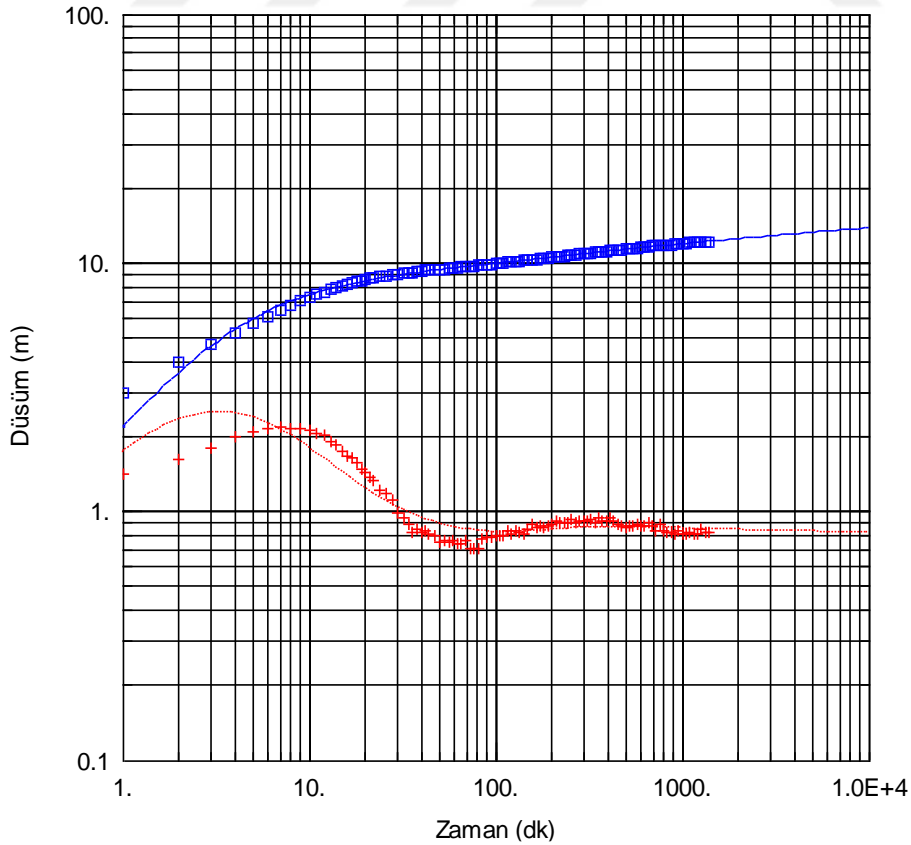
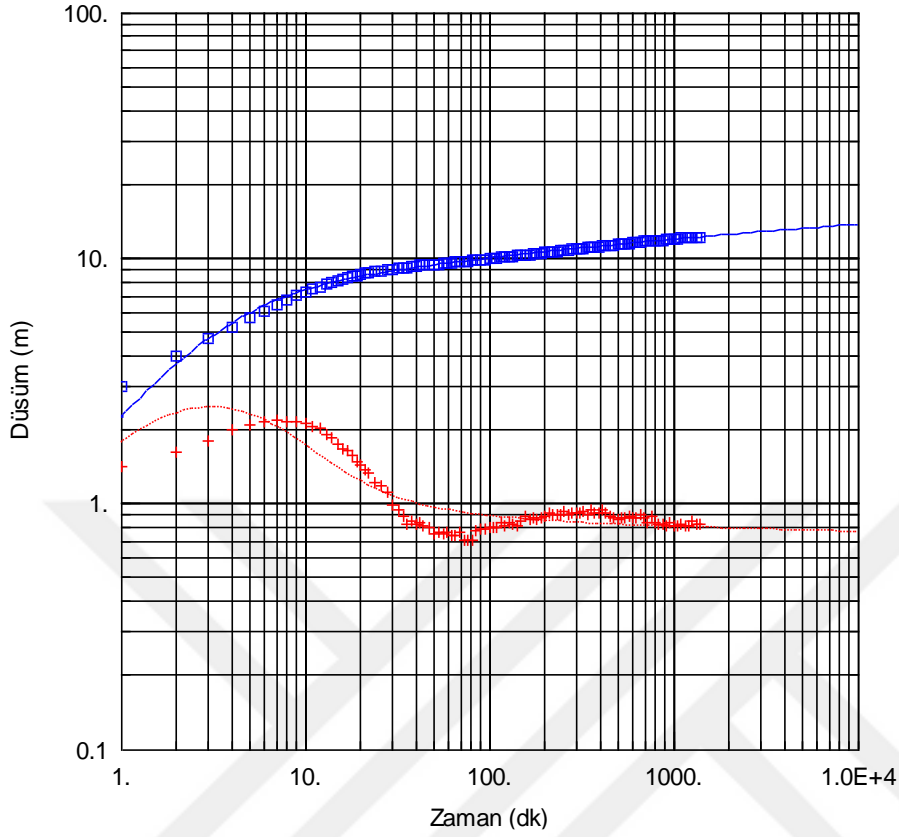
EK-3 PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler (devam ediyor).



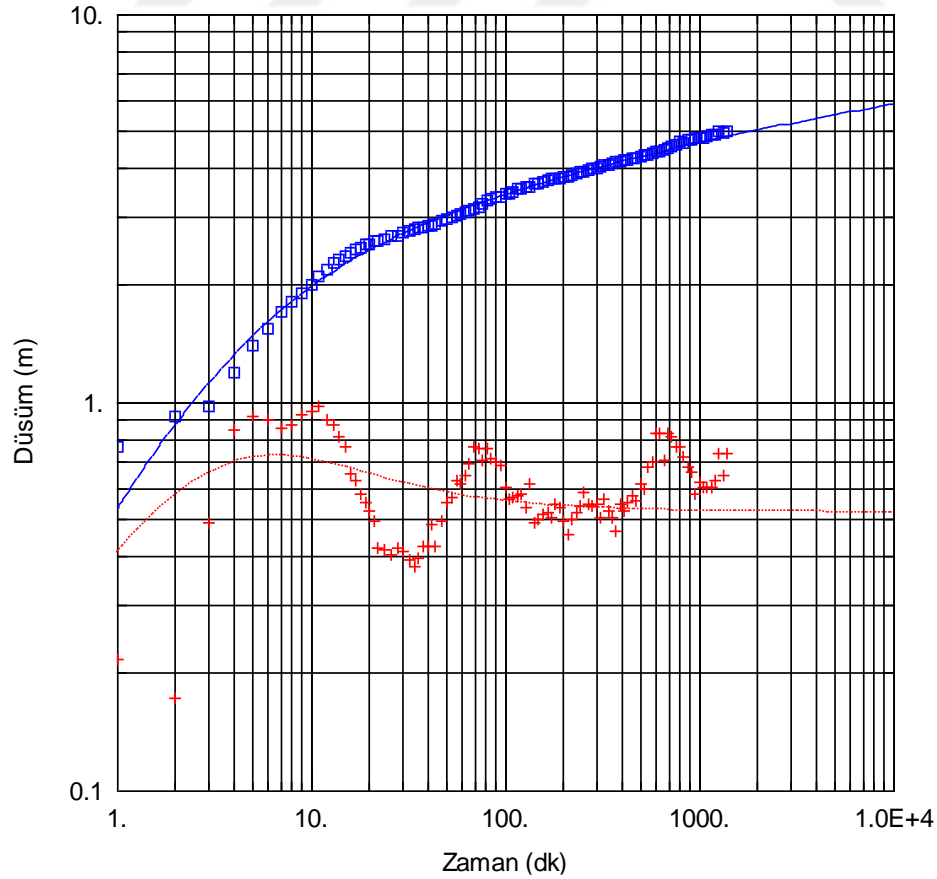
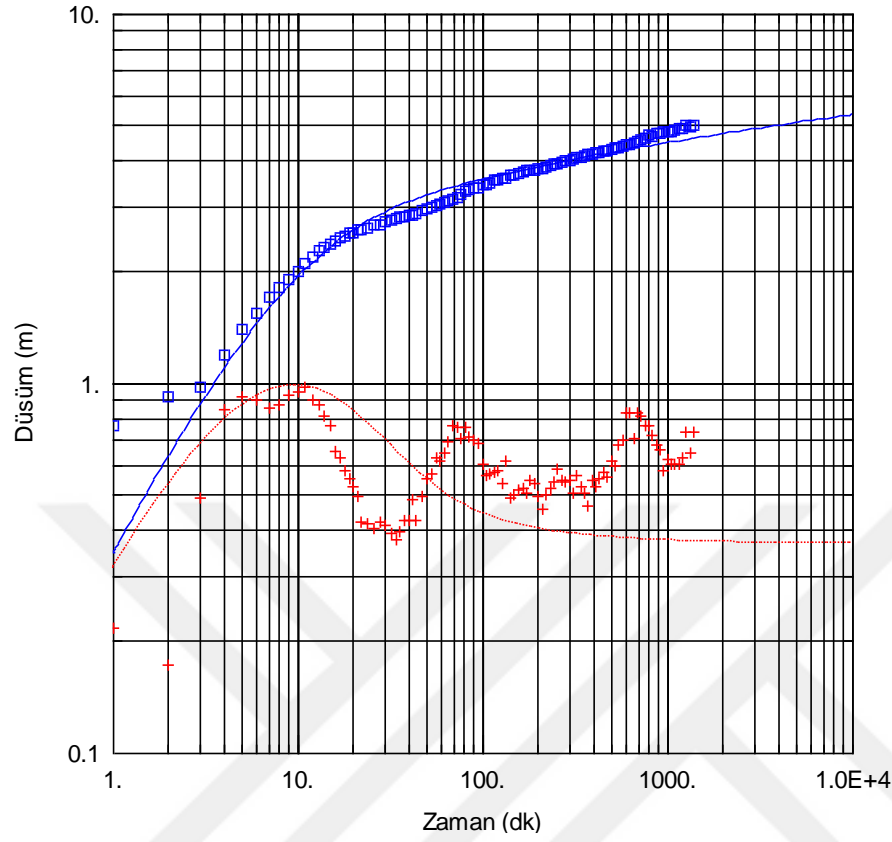
EK-3 PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler (devam ediyor).



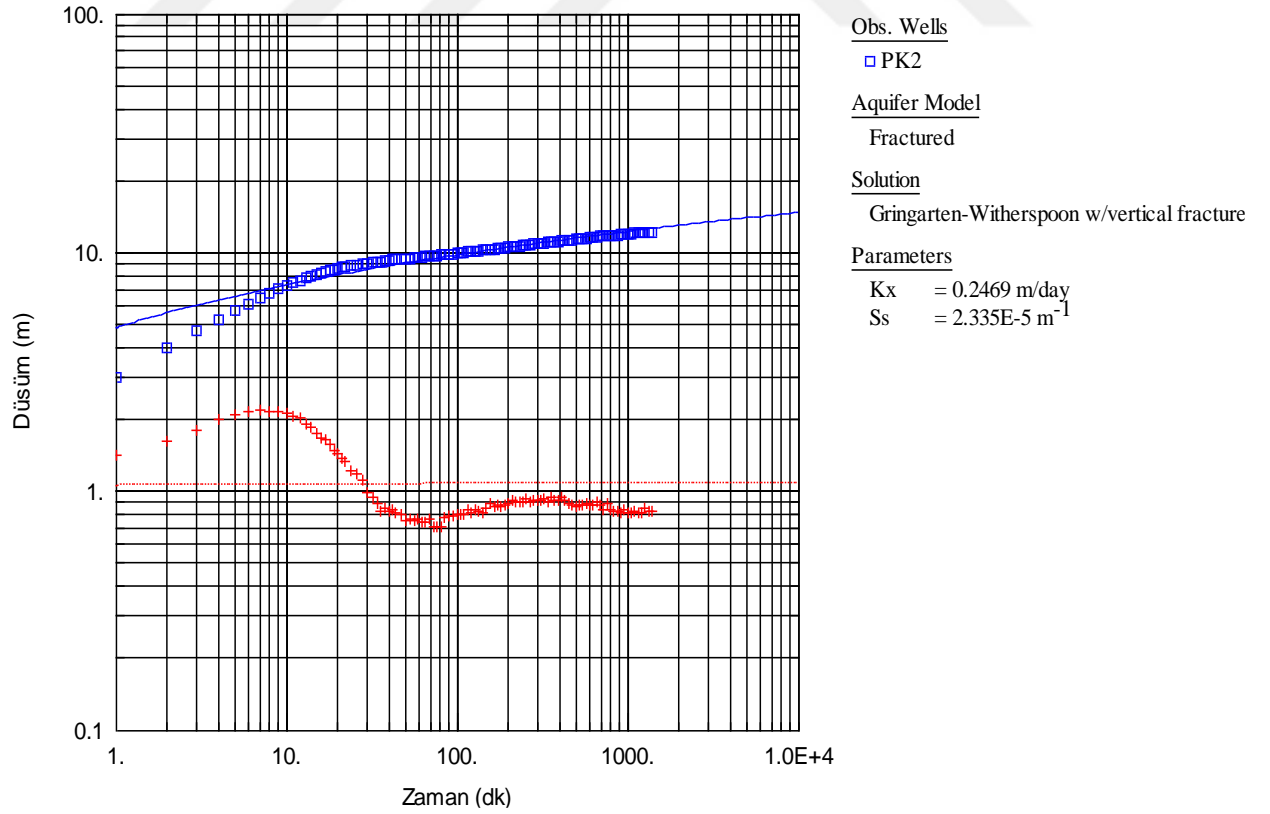
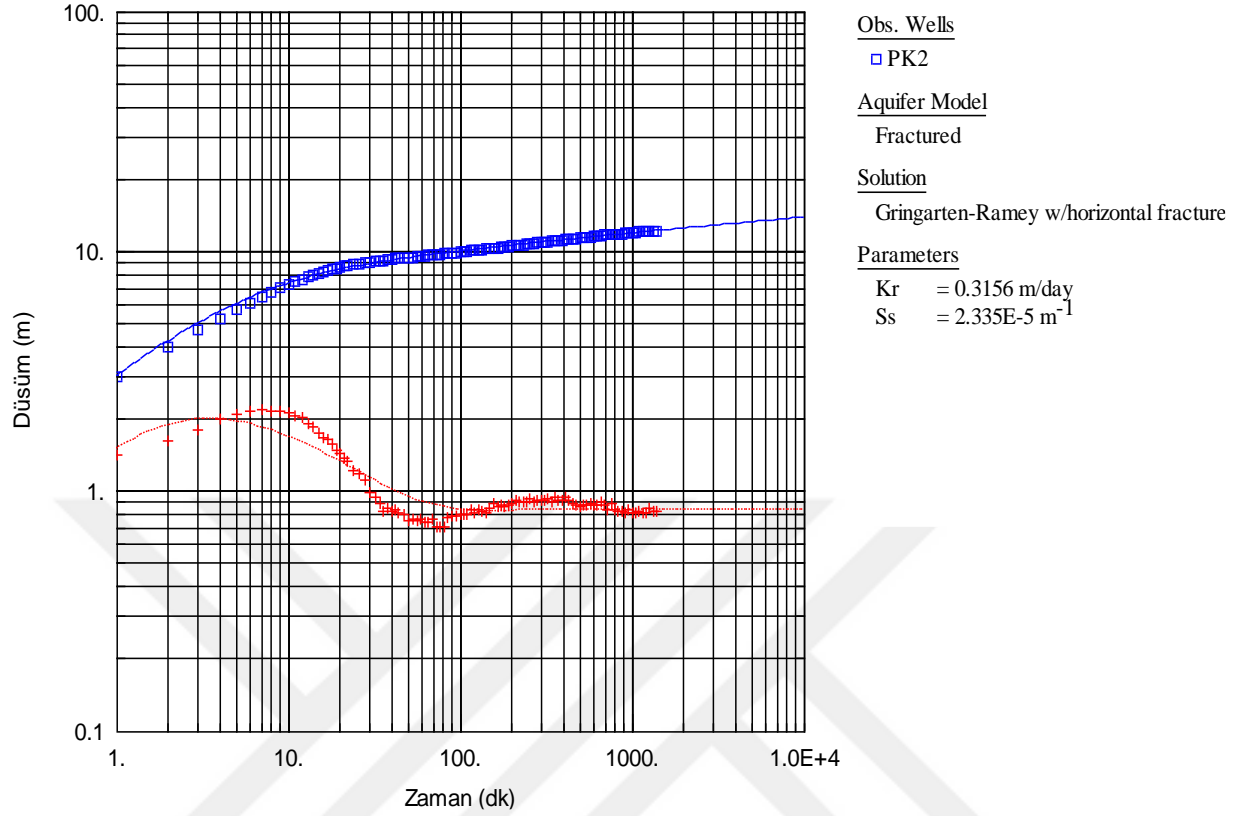
EK-3 PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler (devam ediyor).



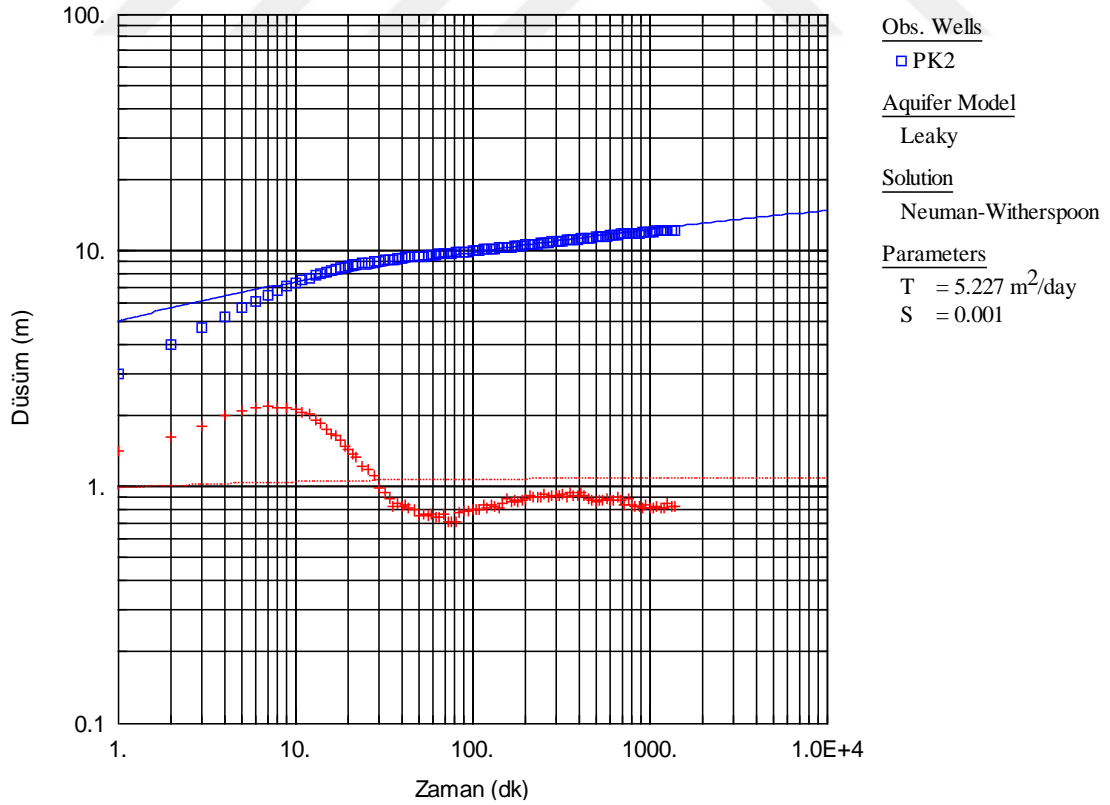
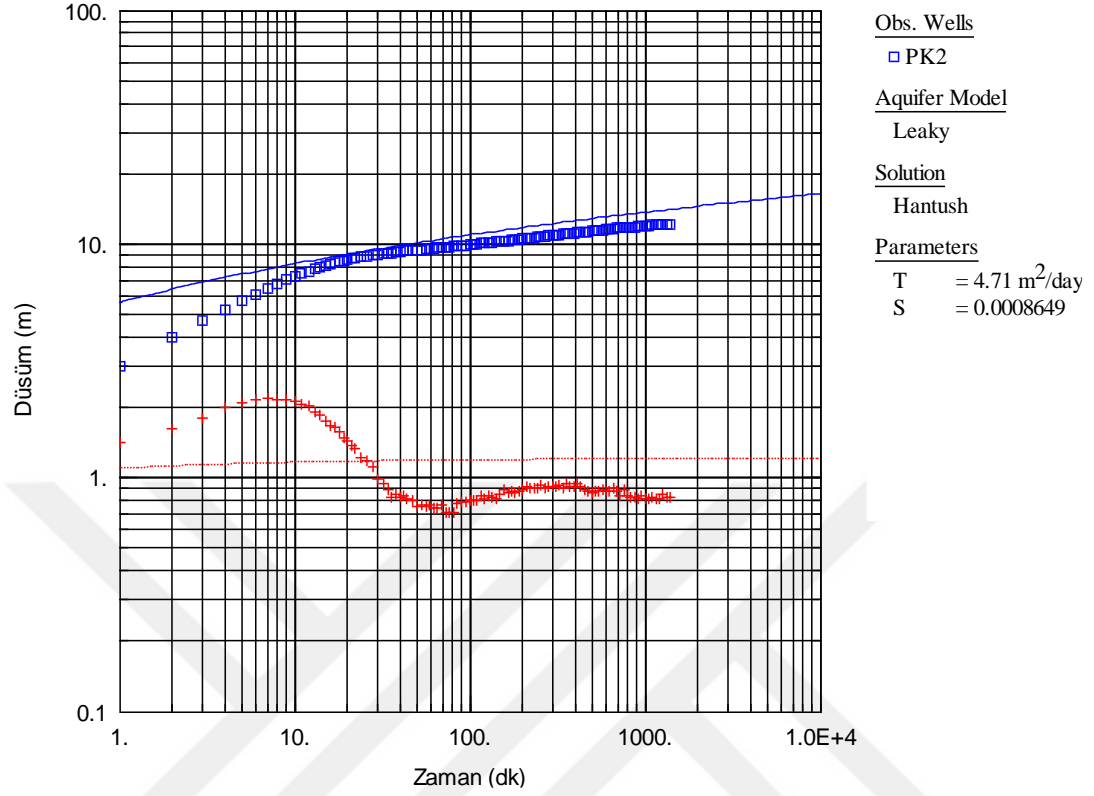
EK-3 PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler (devam ediyor).



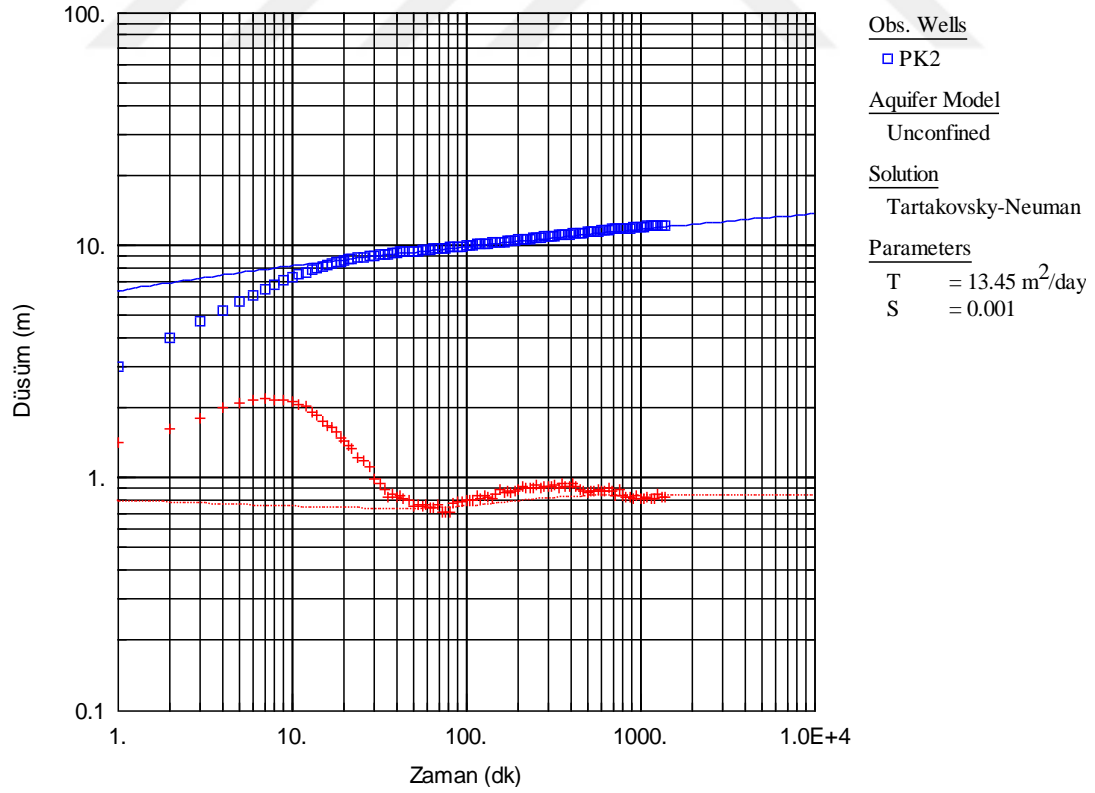
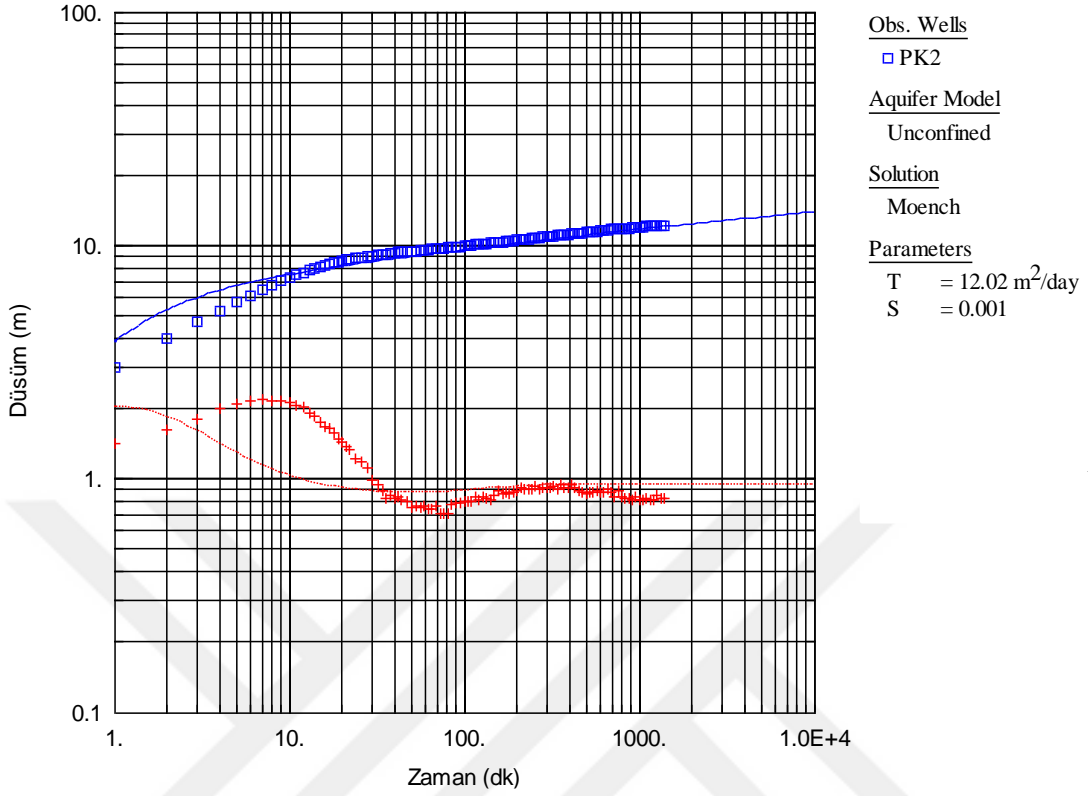
EK-3 PK1, PK2, PK3 Kuyularına Ait Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler (devam ediyor).



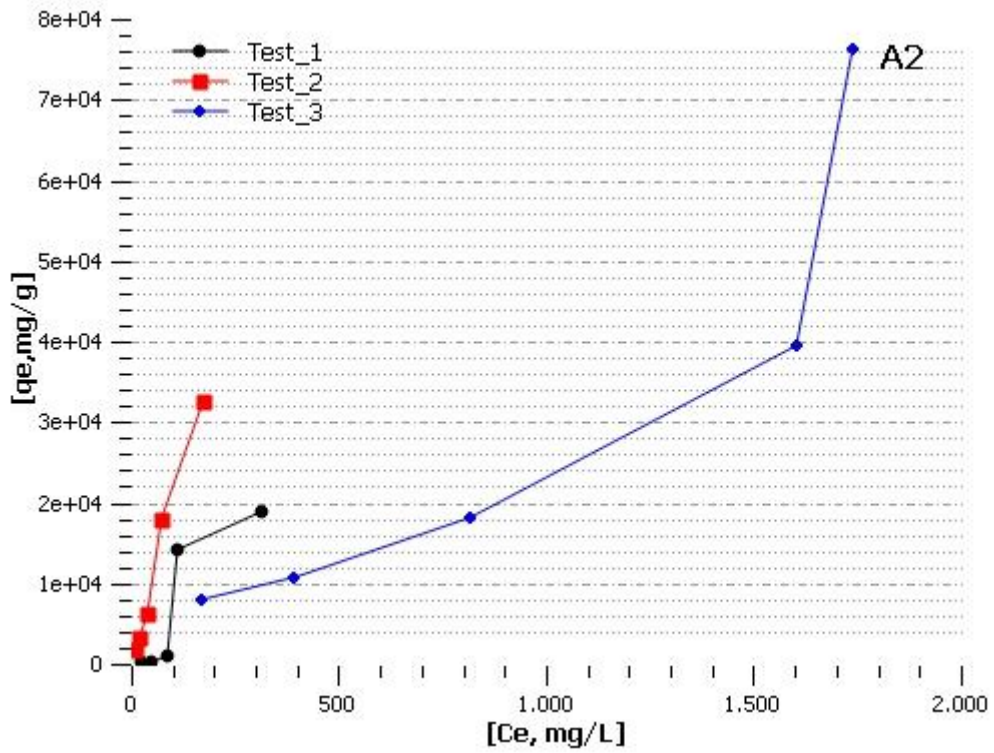
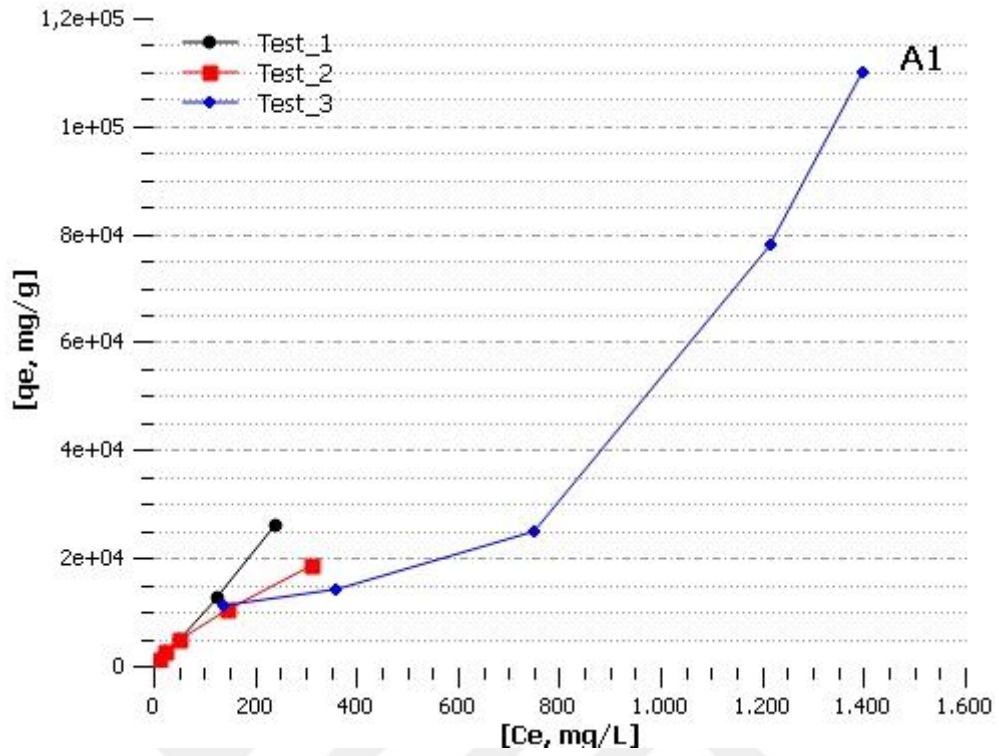
EK-4 PK2 Kuyusunun Farklı Analitik Çözümleme Metotlarına Göre Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler.



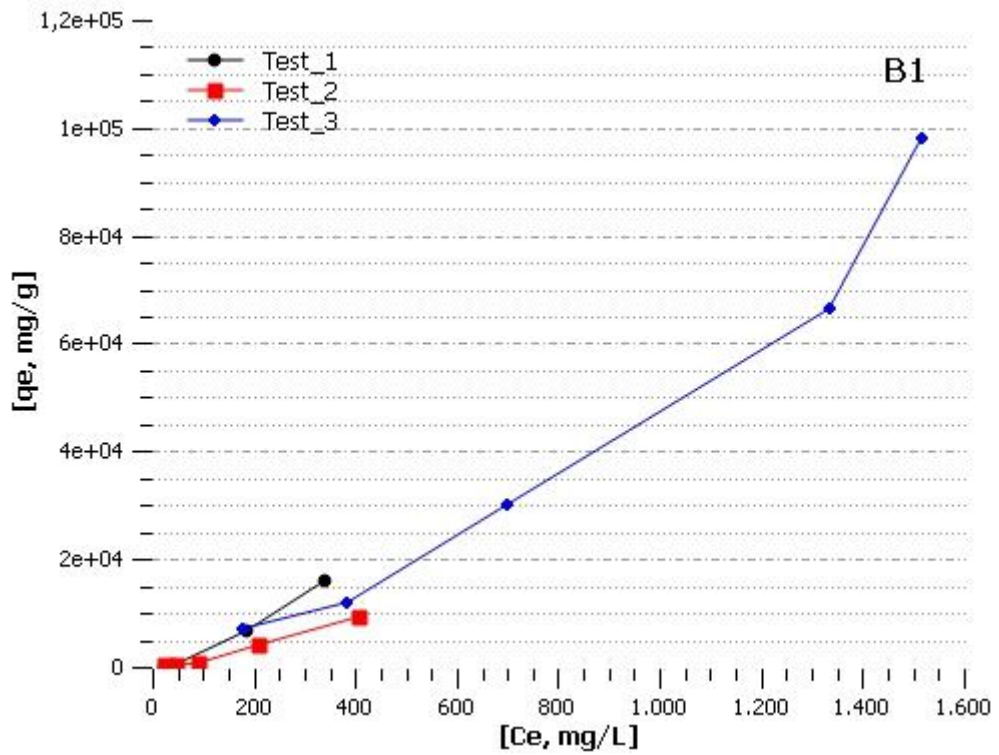
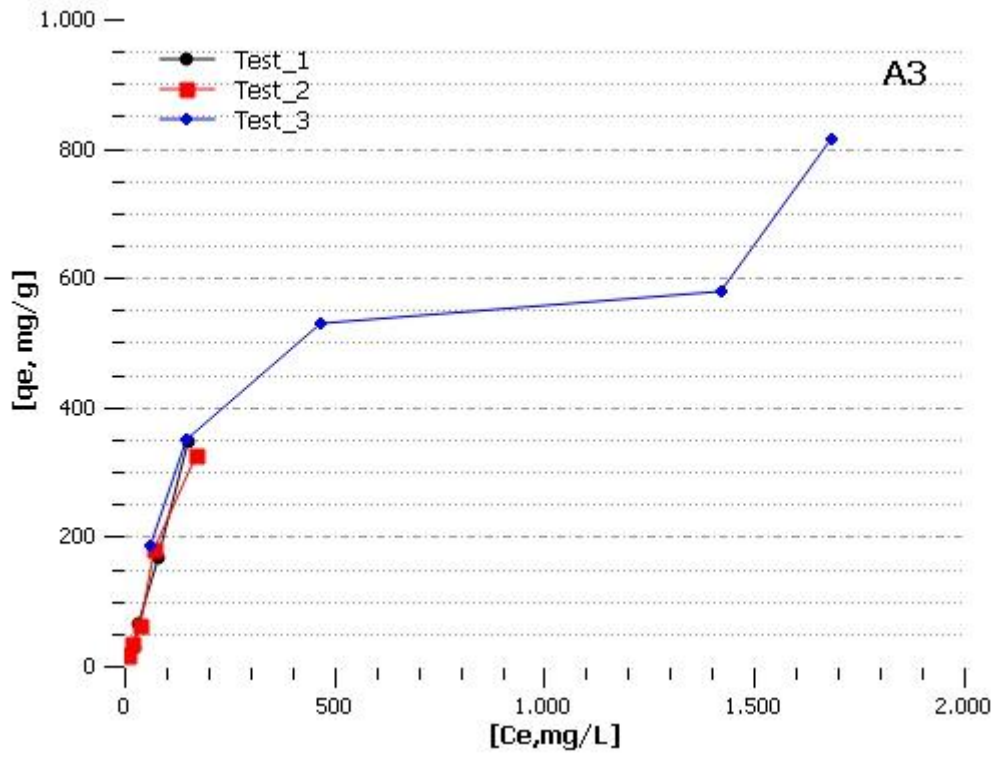
EK-4 PK2 Kuyusunun Farklı Analitik Çözümleme Metotlarına Göre Türev Grafikleri ve Hesaplanan Hidrolik Parametreler (devam ediyor).



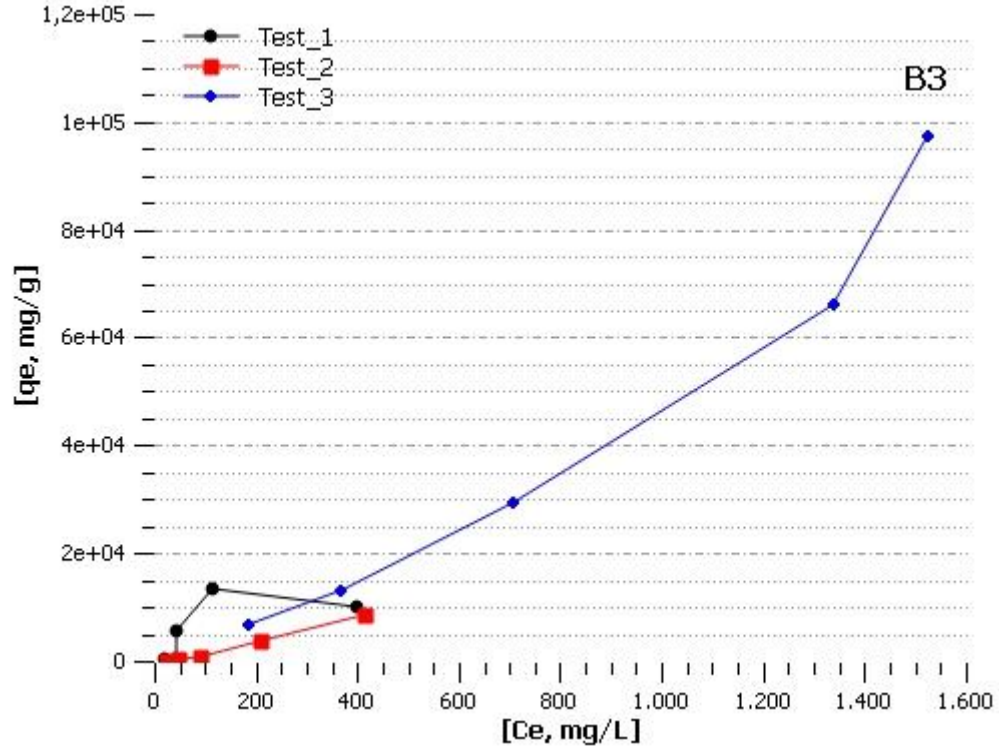
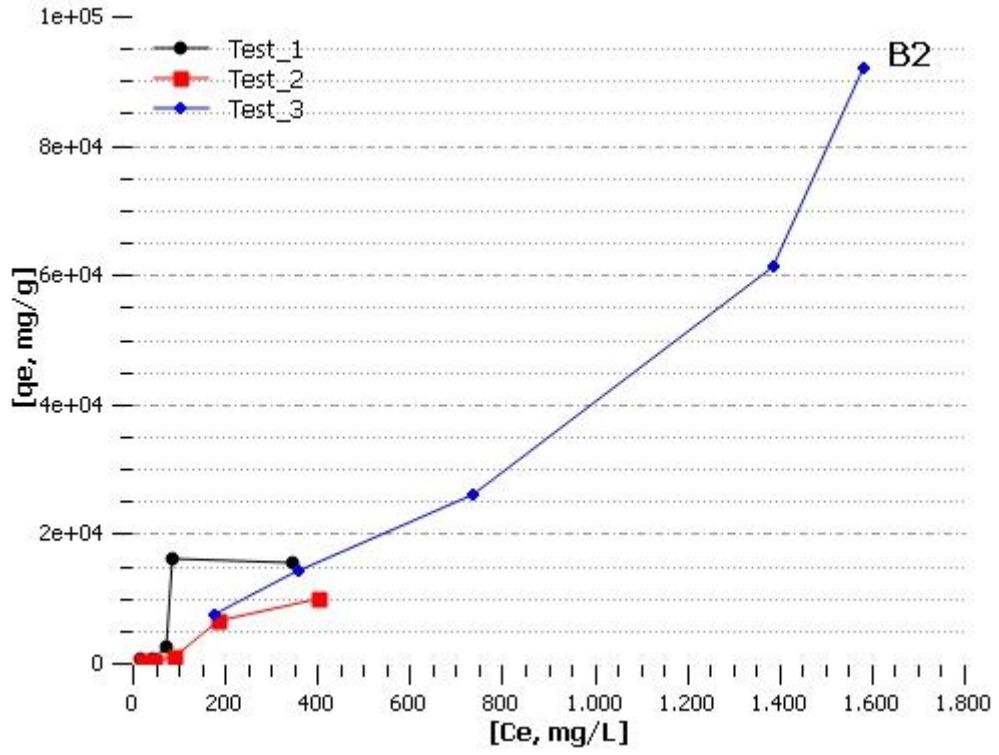
EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri.



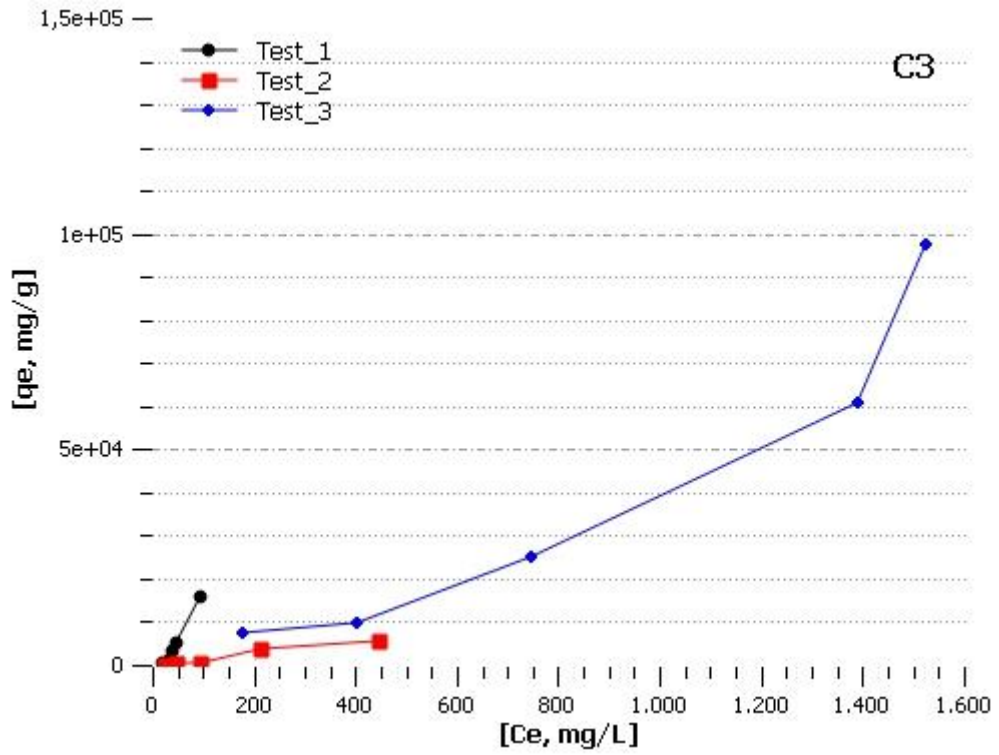
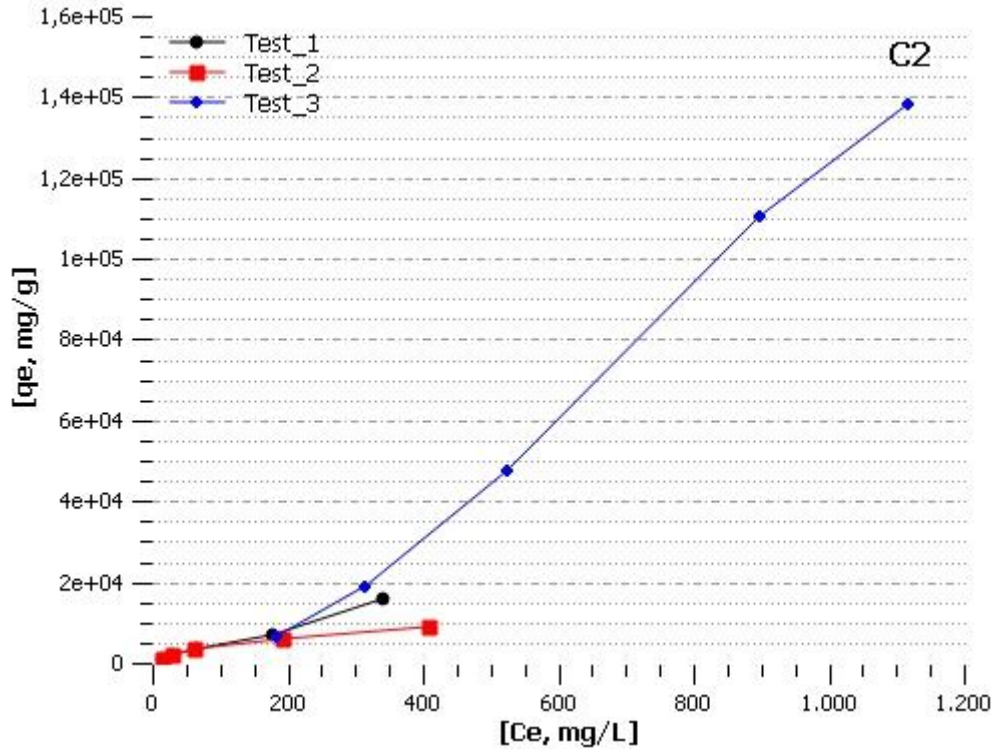
EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri (devam ediyor).



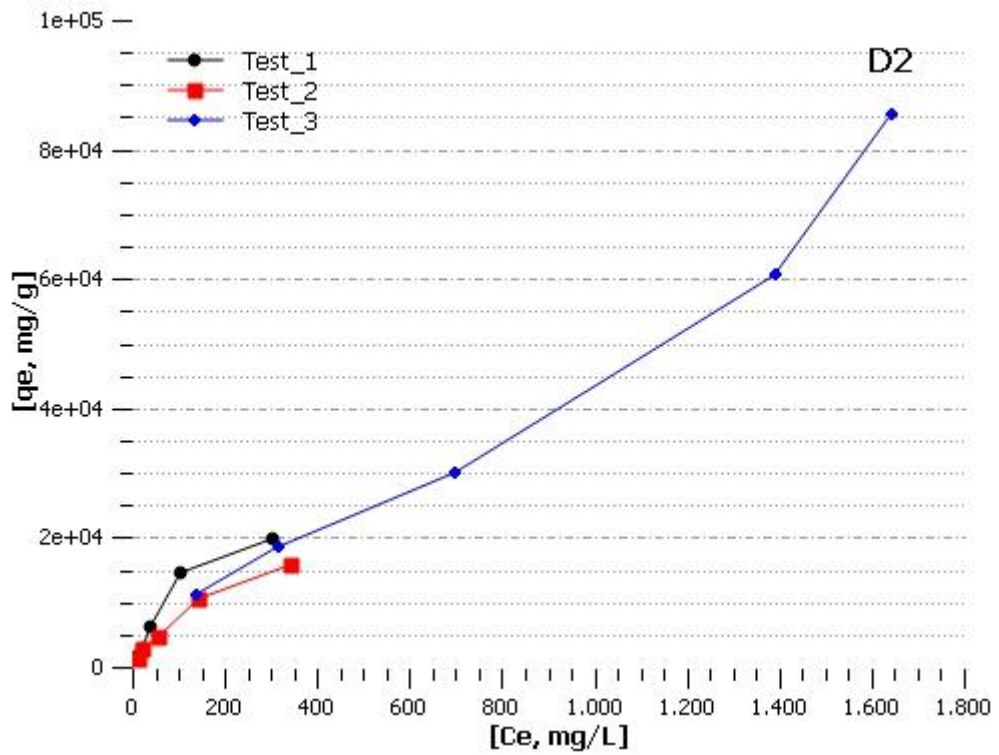
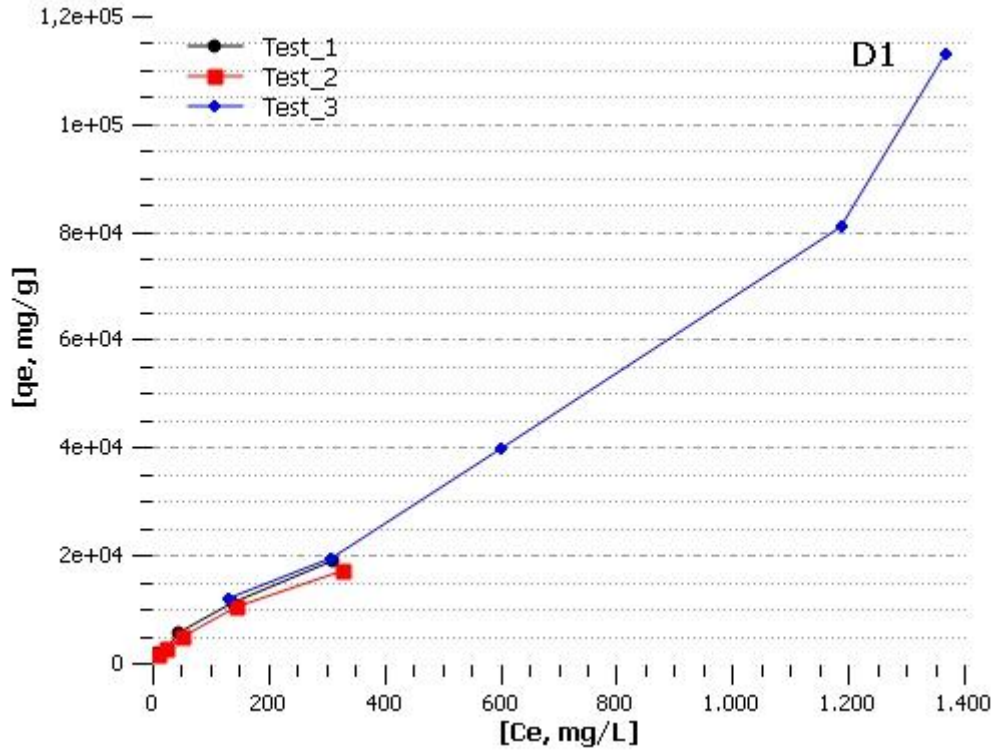
EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri (devam ediyor).



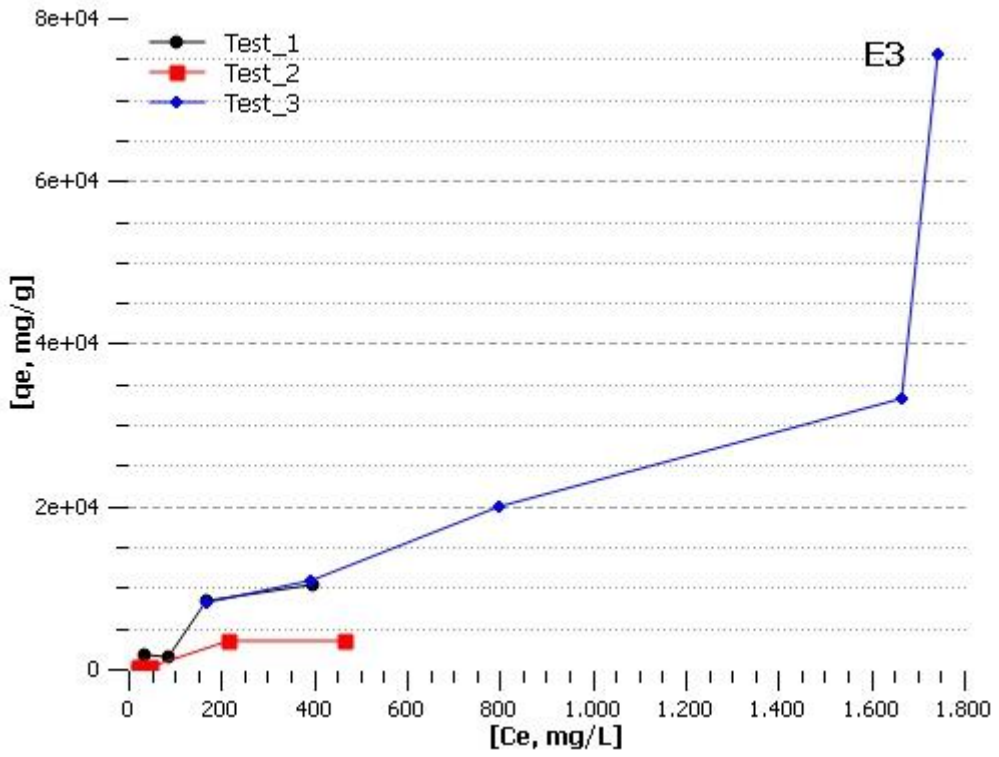
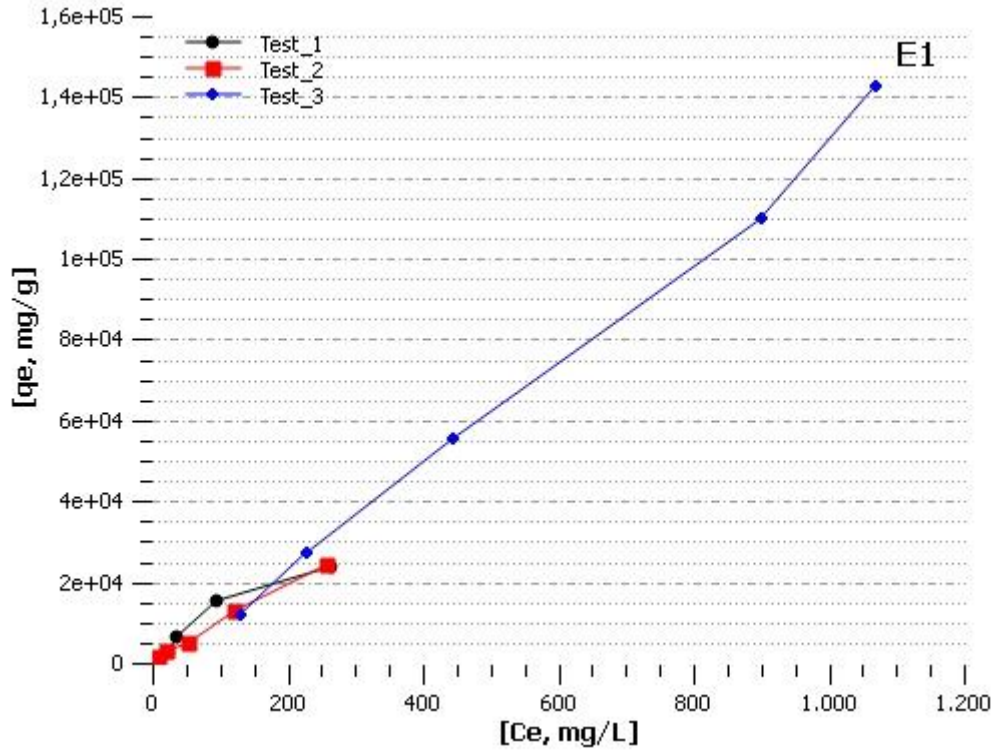
EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri (devam ediyor).



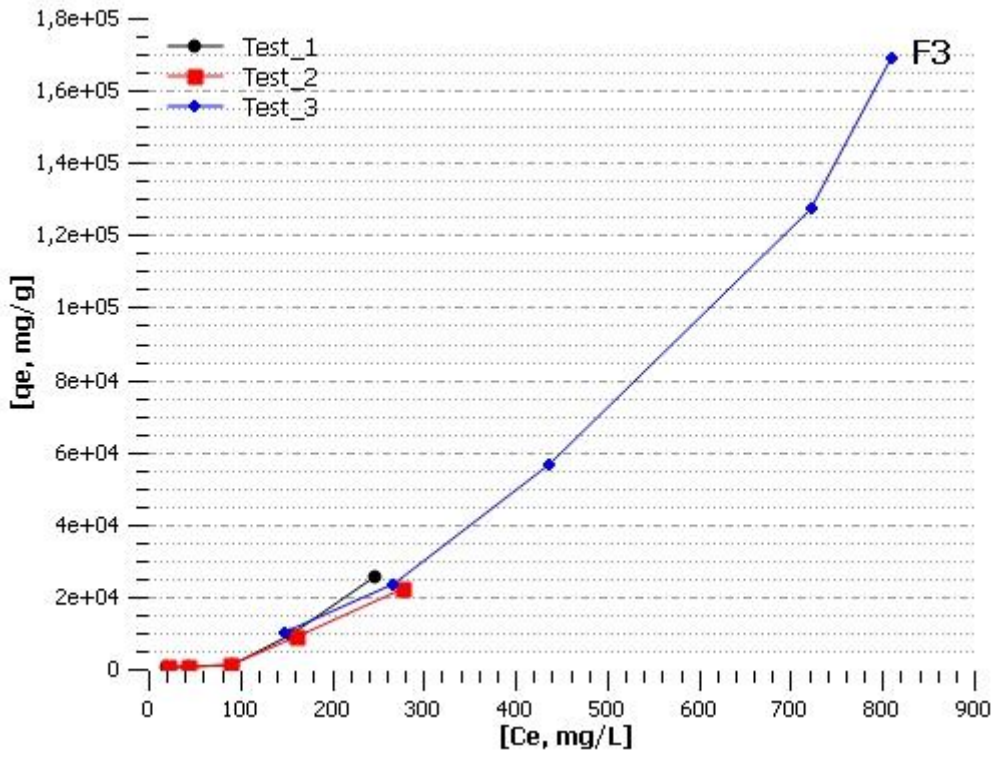
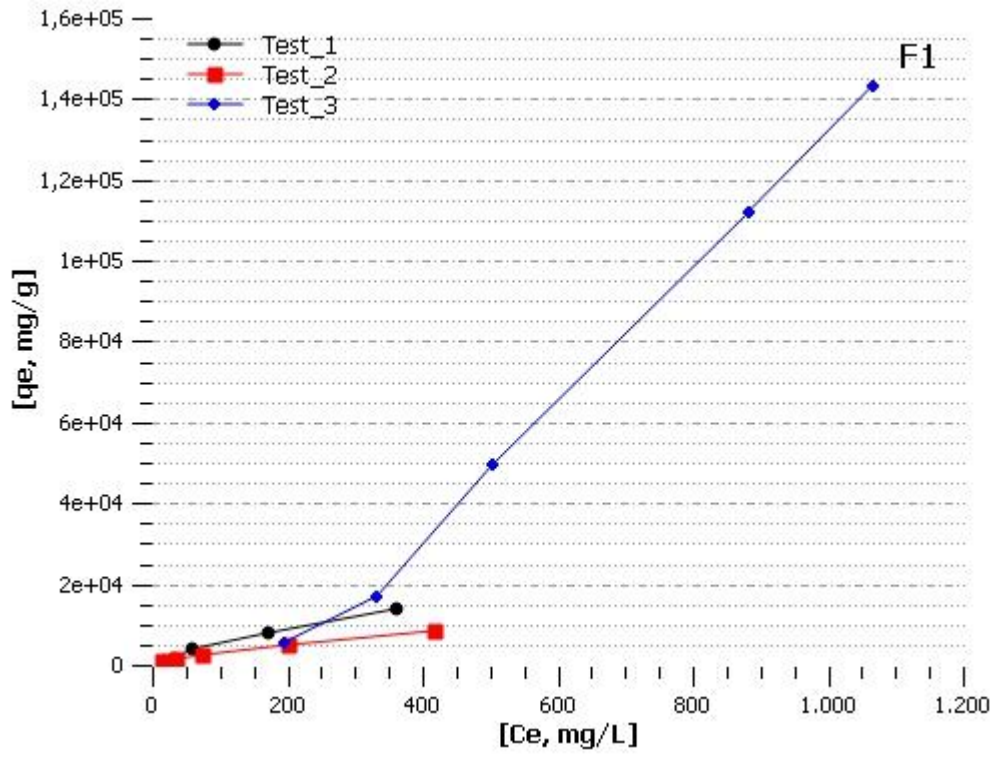
EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri (devam ediyor).



EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri (devam ediyor).

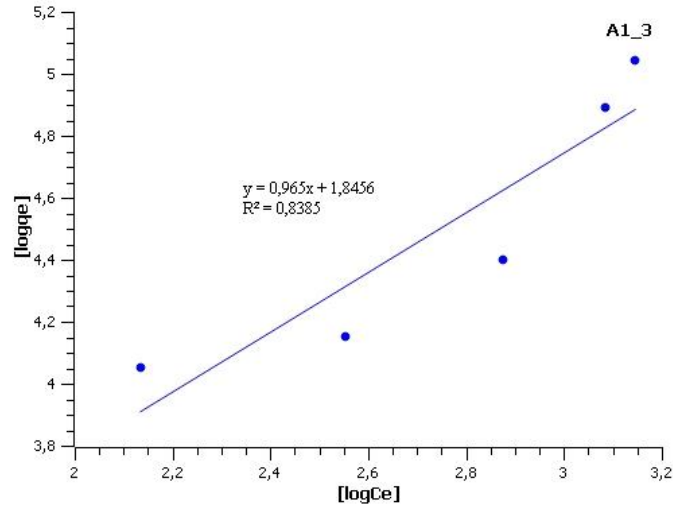
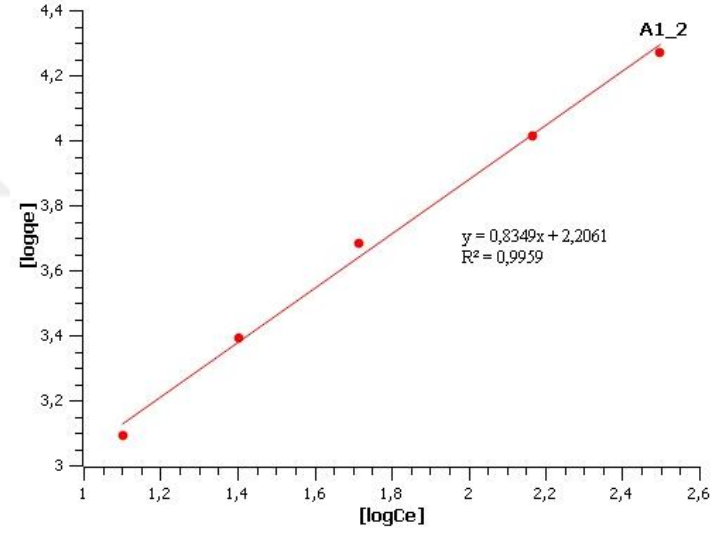
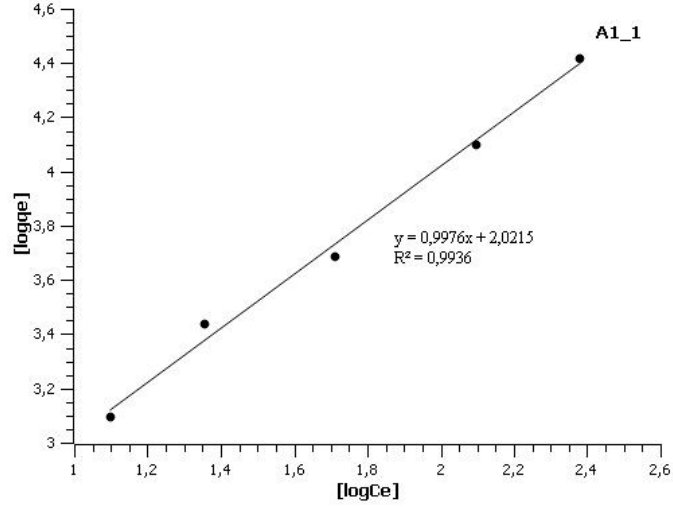


EK-5 Batch Deneyleri Sonucu Elde Edilen q_e karşılık C_e Grafikleri (devam ediyor).



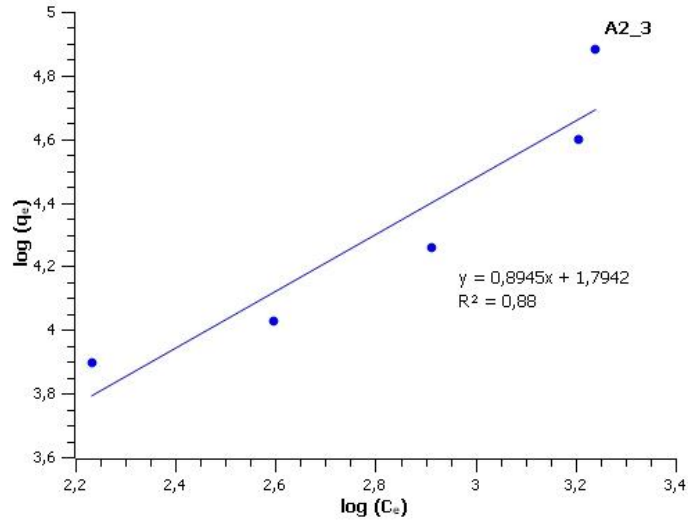
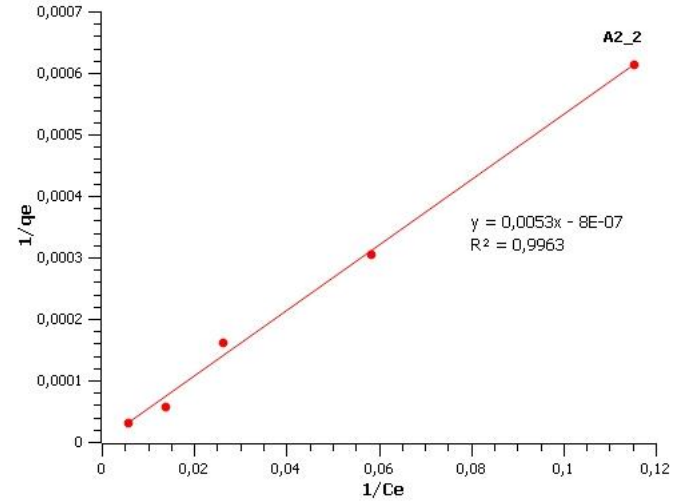
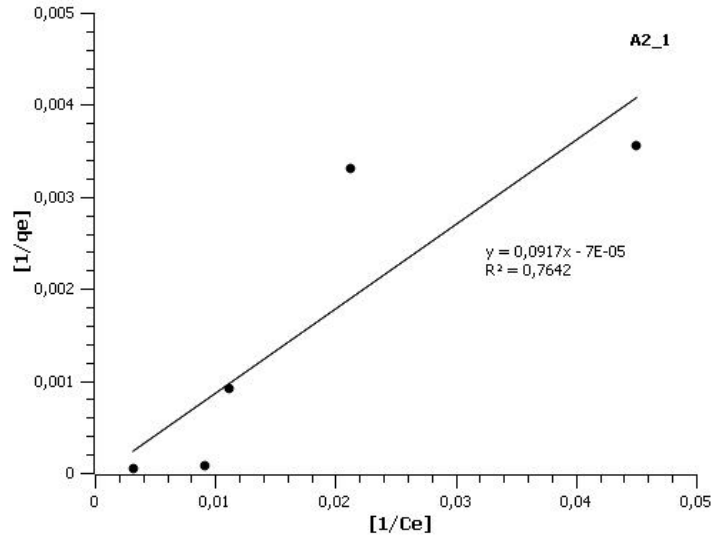
EK-6 Matriks Malzemelerine Ait Denge İzoterm Modelleri ve Deneysel K_{dm} Parametreleri.

A1 Malzemesi İçin Freundlich Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması.



	Freundlich İzotermi			
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	1/N (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
<i>Test-1</i>	0.9936	0.9976	2.0215	105.0751
<i>Test-2</i>	0.9959	0.8349	2.2061	160.7311
<i>Test-3</i>	0.8385	0.9650	1.8456	70.08095

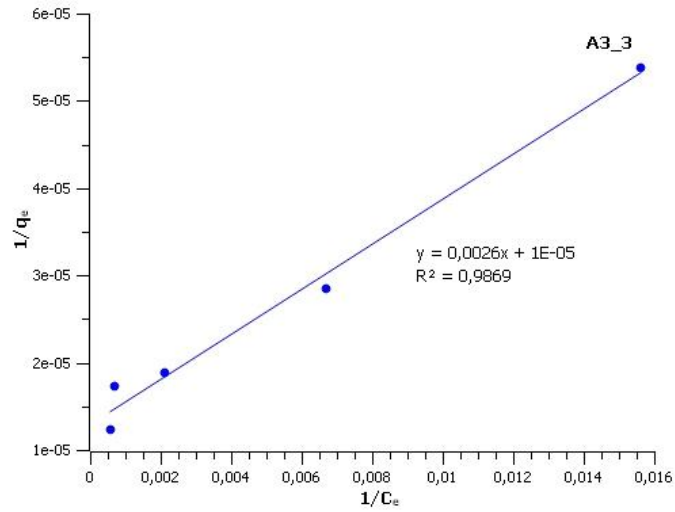
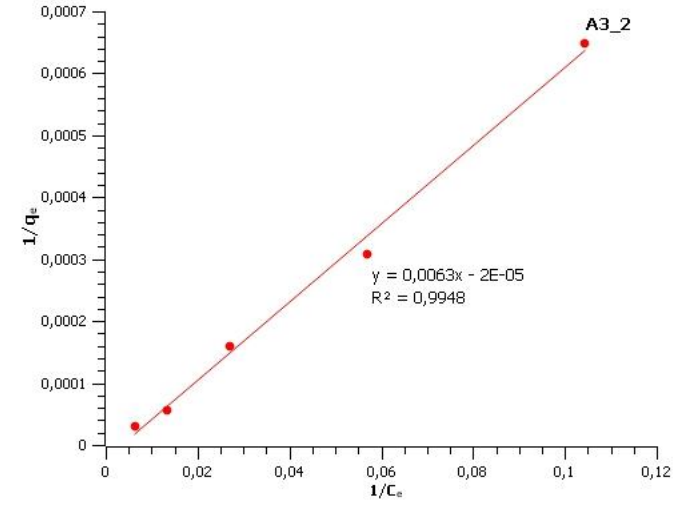
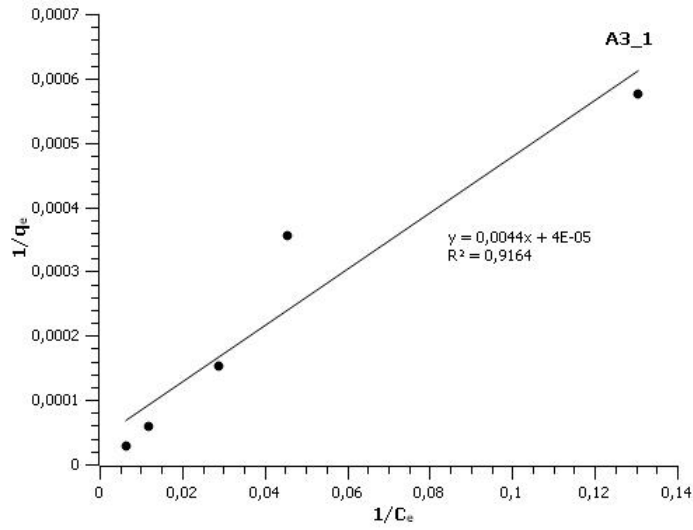
EK-6 A2 Malzemesi İçin Langmuir ve Freundlich (A2_3) Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



	Langmuir İzotermi		
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	$1/q_m$	$1/q_m\beta$
<i>Test-1</i>	0.7642	0.0917	-7×10^{-6}
<i>Test-2</i>	0.9963	0.0053	-8×10^{-7}

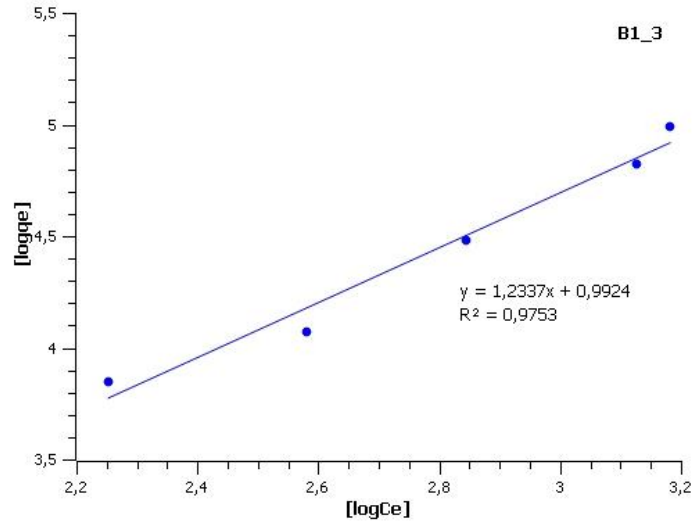
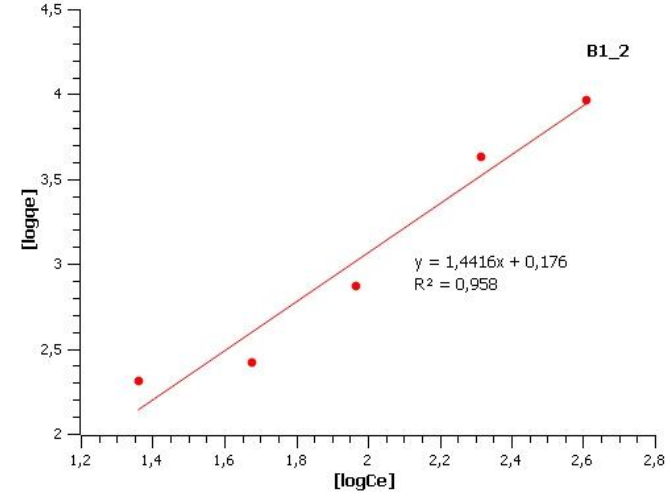
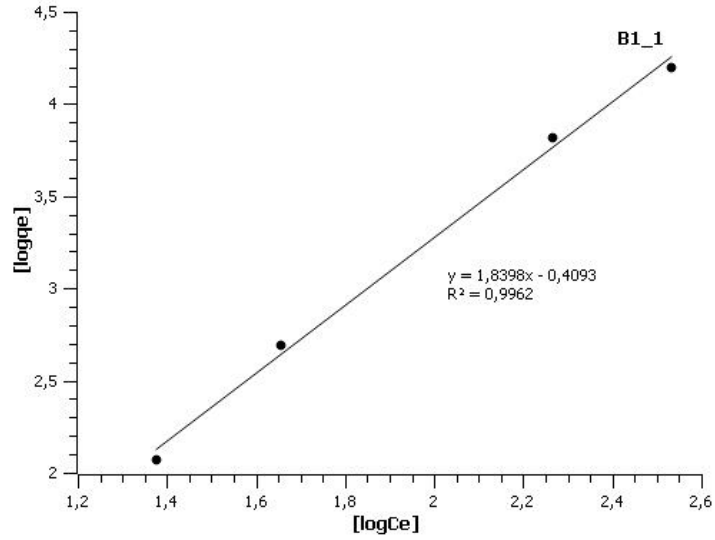
	Freundlich İzotermi		
	$1/N$ (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
<i>Test-3</i>	0.8800	1.7942	62.25869

EK-6 A3 Malzemesi İçin Langmuir Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



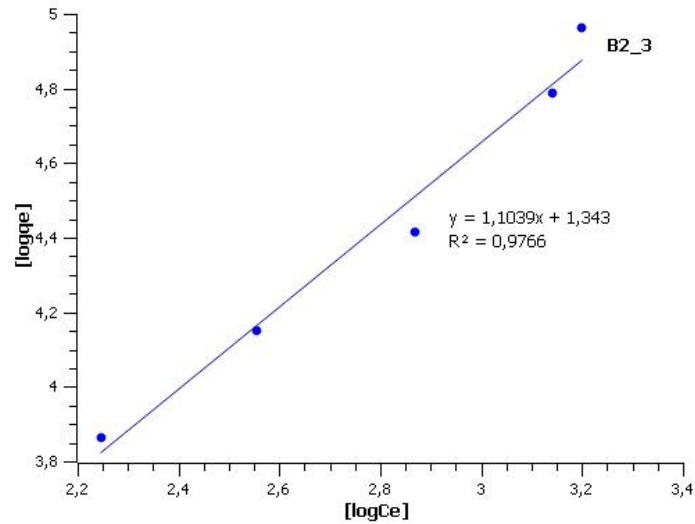
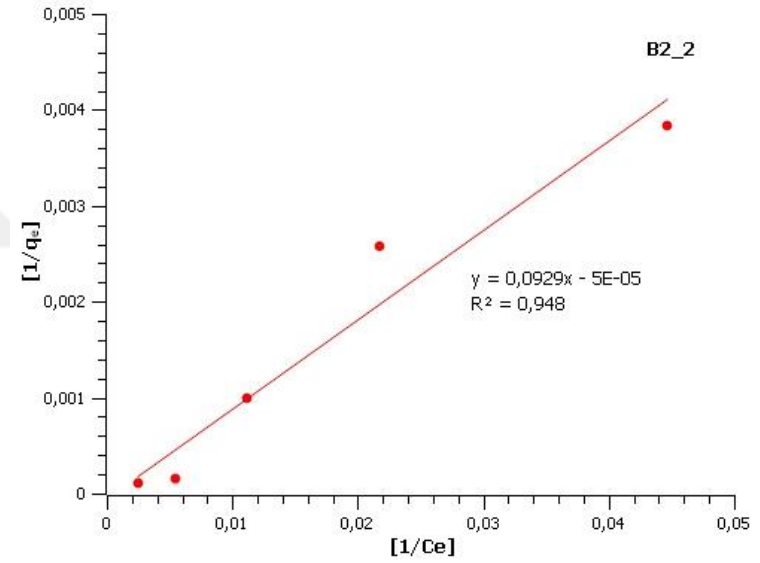
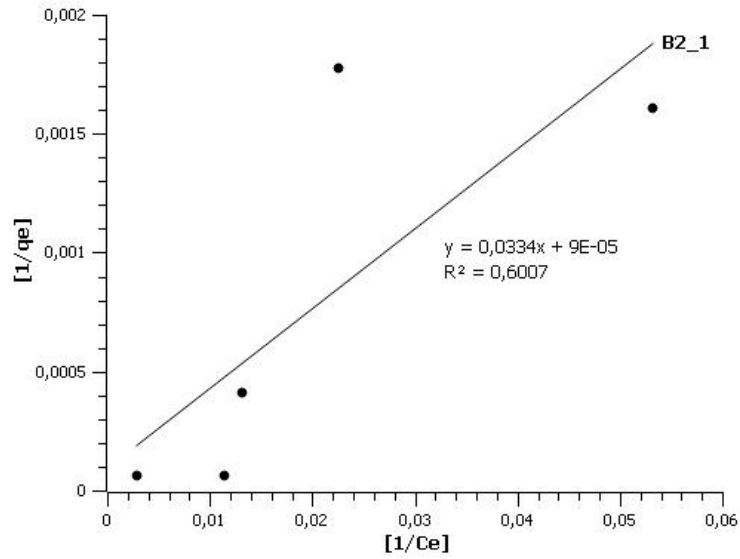
		Langmuir İzotermi	
		$1/q_m$	$1/q_m\beta$
Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]			
<i>Test-1</i>	0.9164	0.0044	4×10^{-5}
<i>Test-2</i>	0.9948	0.0063	-2×10^{-5}
<i>Test-3</i>	0.9869	0.0026	1×10^{-5}

EK-6 B1 Malzemesi İçin Freundlich Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



	Freundlich İzotermi			
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	1/N (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
Test-1	0.9962	1.8398	-0.4093	0.3898
Test-2	0.9580	1.4416	0.1760	1.4997
Test-3	0.9753	1.2337	0.9924	9.8265

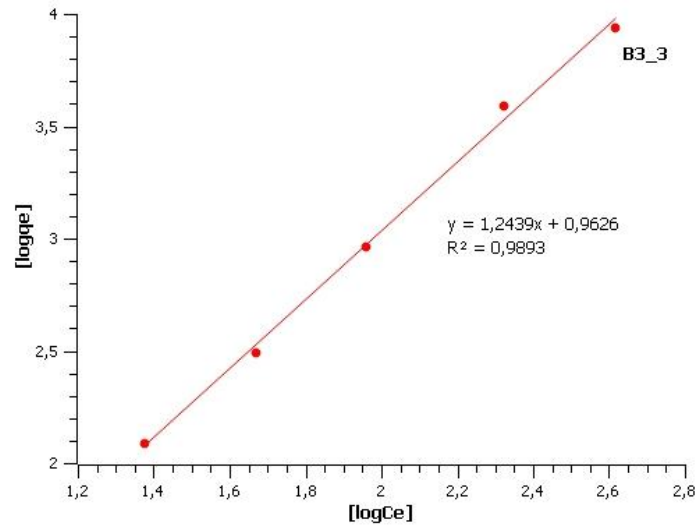
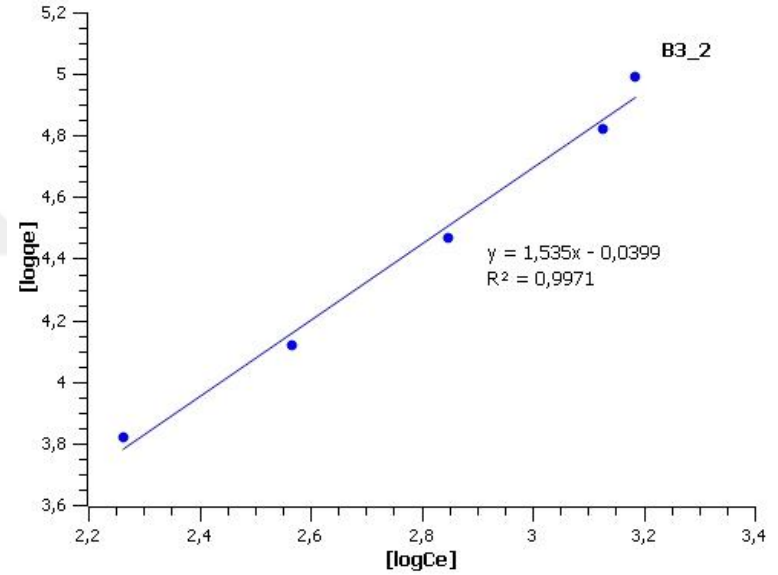
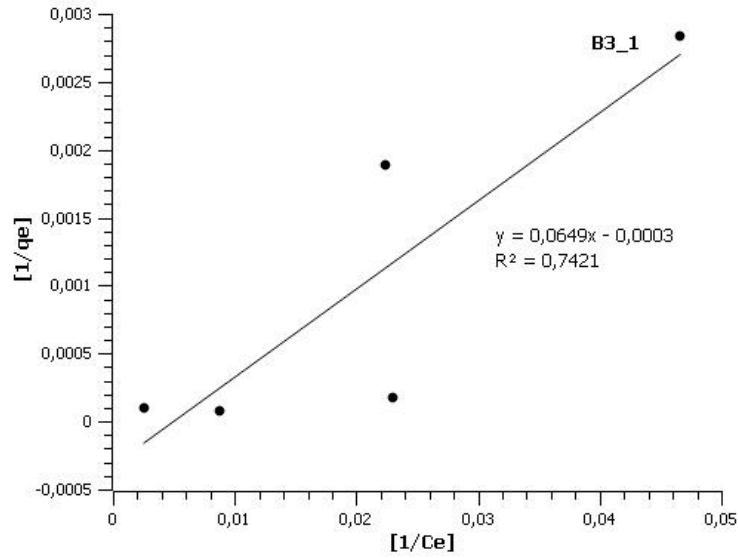
EK-6 B2 Malzemesi İçin Freundlich (B2_3) ve Langmuir Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



		Langmuir İzotermi	
		$1/q_m$	$1/q_m\beta$
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]		
<i>Test-1</i>	0.6007	0.0334	9×10^{-5}
<i>Test-2</i>	0.9480	0.0929	-5×10^{-5}

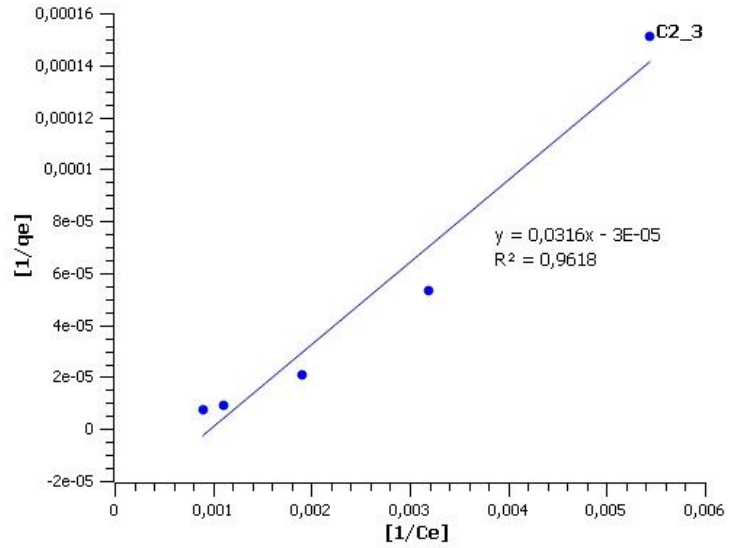
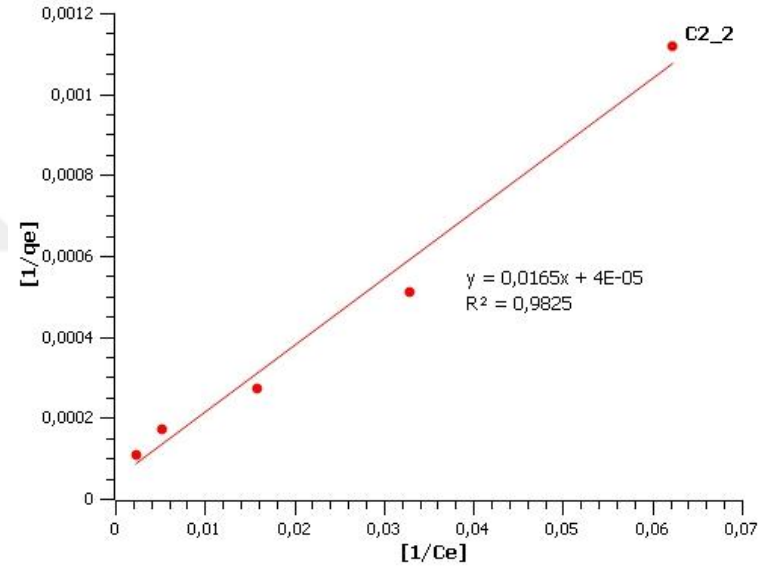
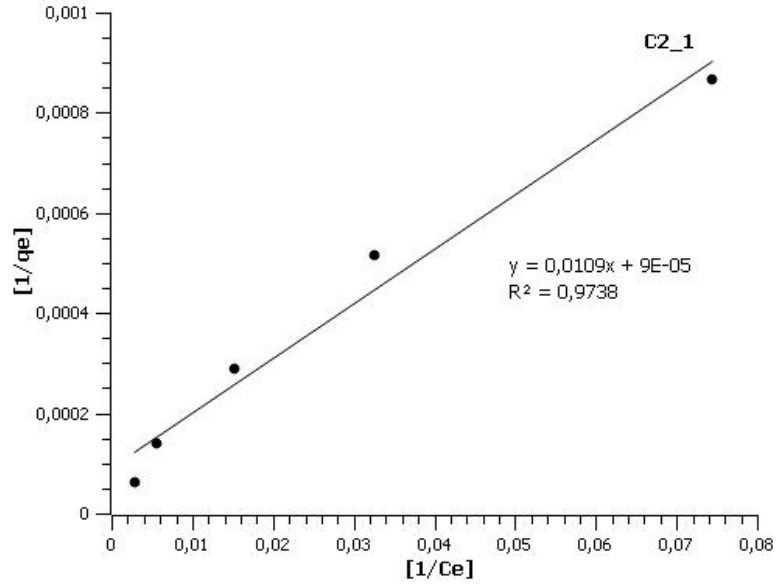
		Freundlich İzotermi		
		$1/N$ (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]			
<i>Test-3</i>	0.9766	1.1039	1.3430	22.0293

EK-6 B3 Malzemesi İçin Langmuir (Test_1) ve Freundlich Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



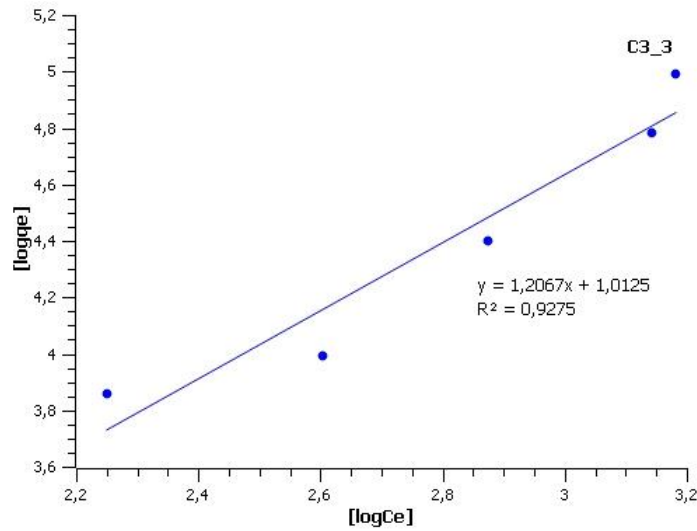
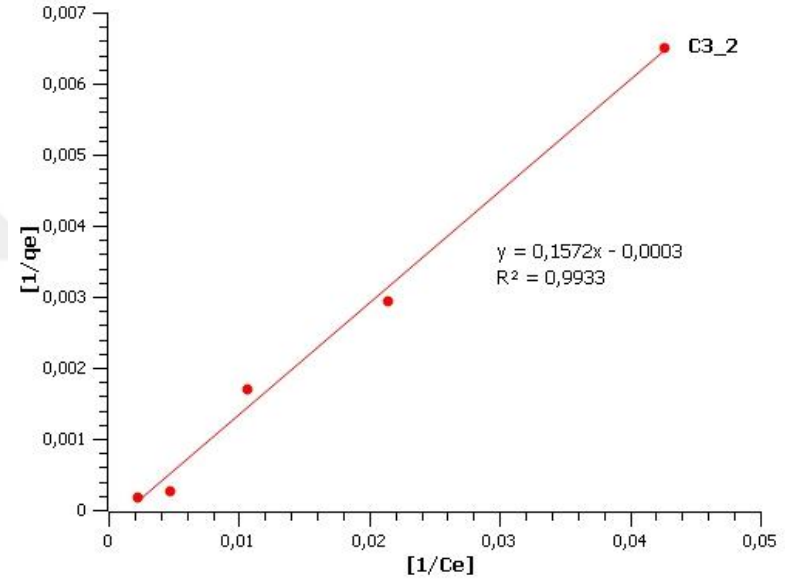
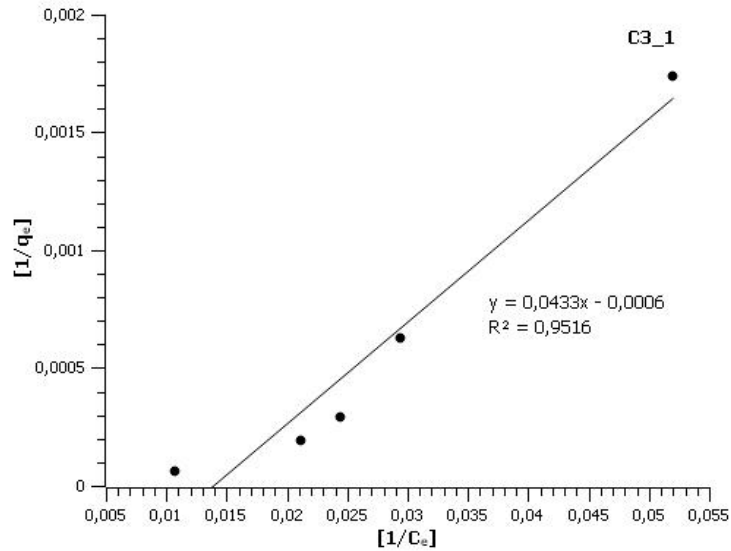
		Langmuir İzotermi		
		$1/q_m$	$1/q_m\beta$	
<i>Test-1</i>	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	0.0649	-0.0003	
		Freundlich İzotermi		
		$1/N$ (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
<i>Test-2</i>	0.9971	1.5350	-0.0399	0.9122
<i>Test-3</i>	0.9893	1.2390	0.9626	9.1749

EK-6 C2 Malzemesi İçin Langmuir Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



				Langmuir İzotermi	
		$1/q_m$			$1/q_m\beta$
Korelasyon Katsayısının Karesi [R²]					
<i>Test-1</i>	0.9738	0.0109			9×10^{-5}
<i>Test-2</i>	0.9825	0.0165			4×10^{-5}
<i>Test-3</i>	0.9618	0.9618			-3×10^{-5}

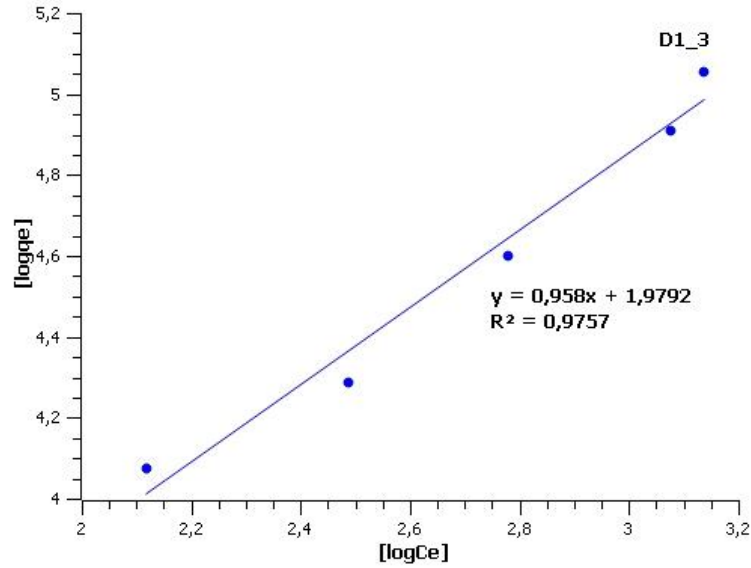
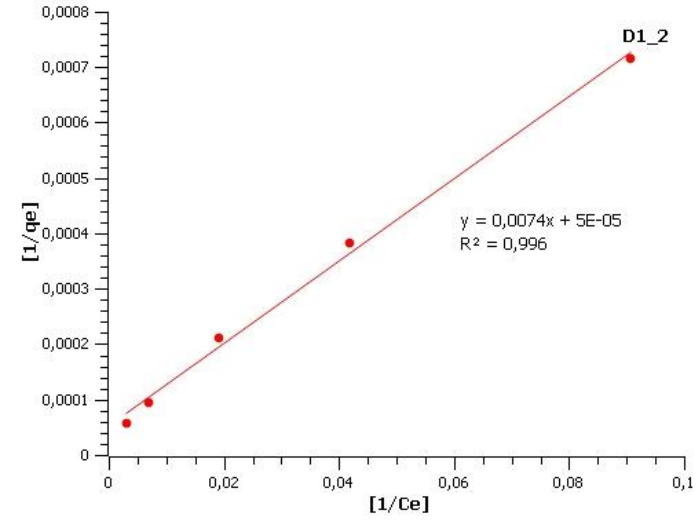
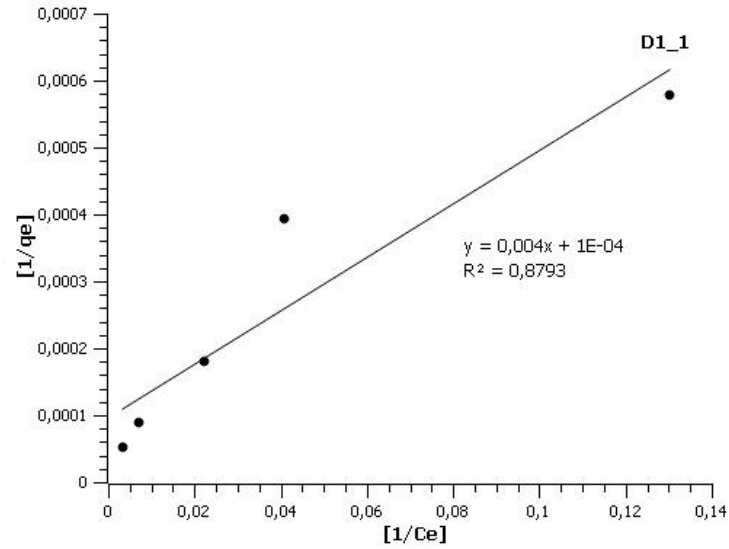
EK-6 C3 Malzemesi İçin Langmuir ve Freundlich (C3_3) Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



		Langmuir İzotermi	
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	$1/q_m$	$1/q_m\beta$
<i>Test-1</i>	0.9516	0.0433	-0.0006
<i>Test-2</i>	0.9933	0.1572	-0.0003

		Freundlich İzotermi		
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	$1/N$ (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
<i>Test-3</i>	0.9275	1.2067	1.0125	10.2920

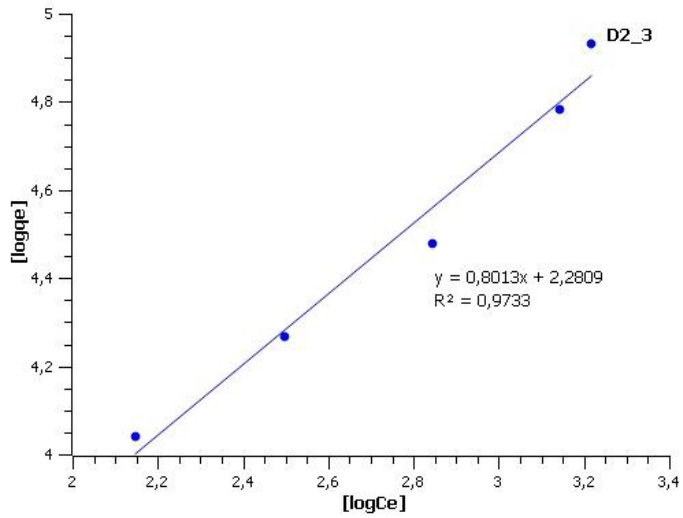
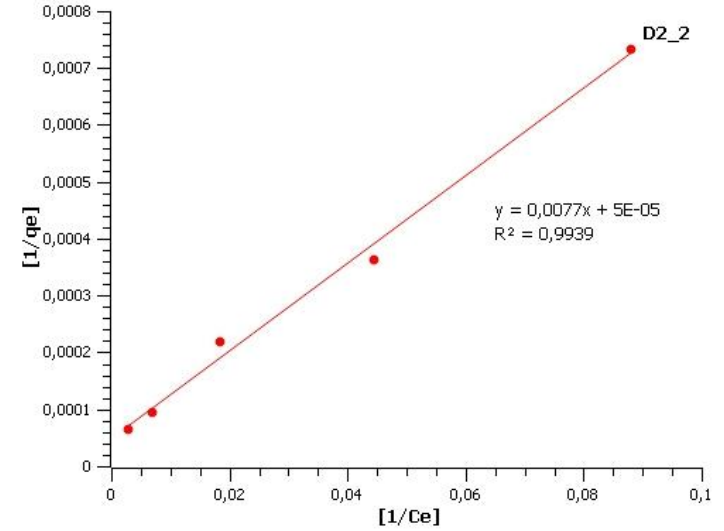
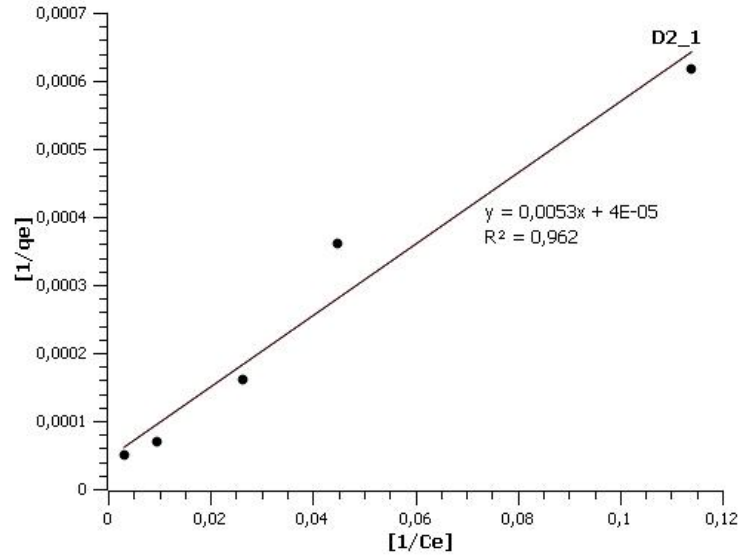
EK-6 D1 Malzemesi İçin Langmuir ve Freundlich (D1_3) Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



		Langmuir İzotermi	
		1/q _m	1/q _m β
Test-1	Korelasyon Katsayısının Karesi [R²]	0.0040	1×10 ⁻⁴
Test-2		0.0074	5×10 ⁻⁵

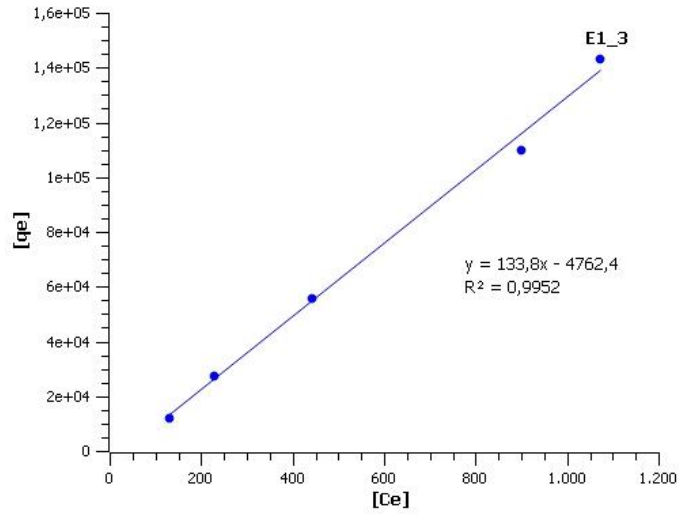
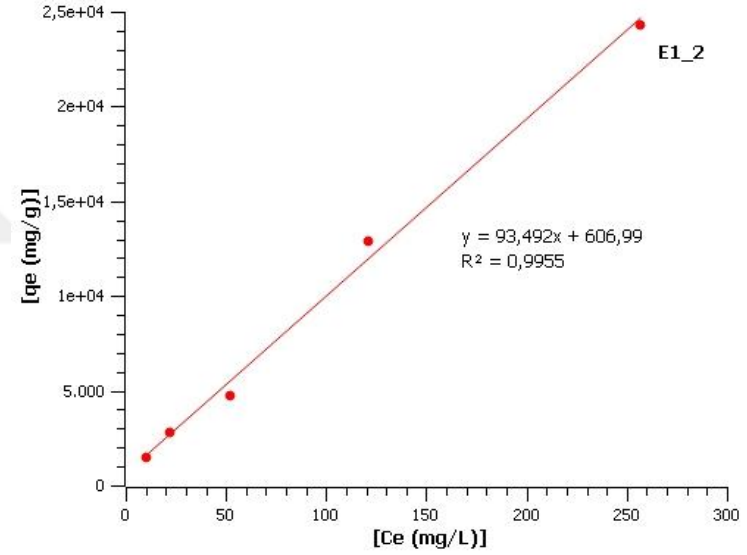
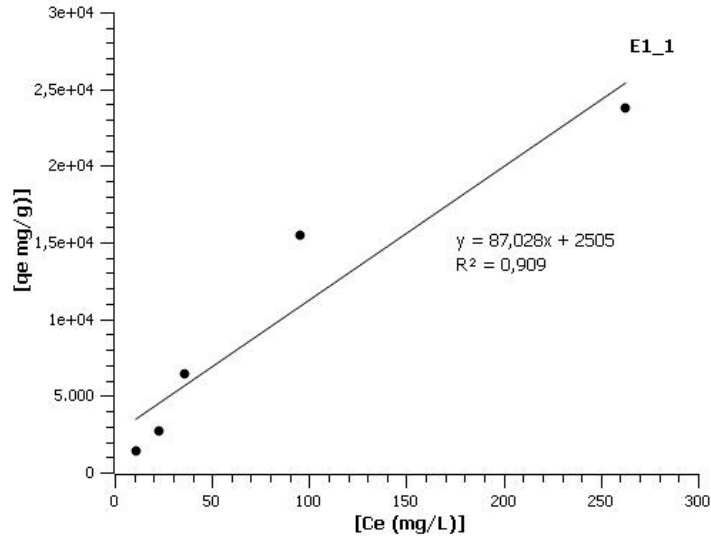
		Freundlich İzotermi		
		1/N (boyutsuz)	logK _F	K _F (l/mg)
Test-3	Korelasyon Katsayısının Karesi [R²]	0.9580	1.9792	95.3235

EK-6 D2 Malzemesi İçin Langmuir ve Freundlich (Test_3) Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



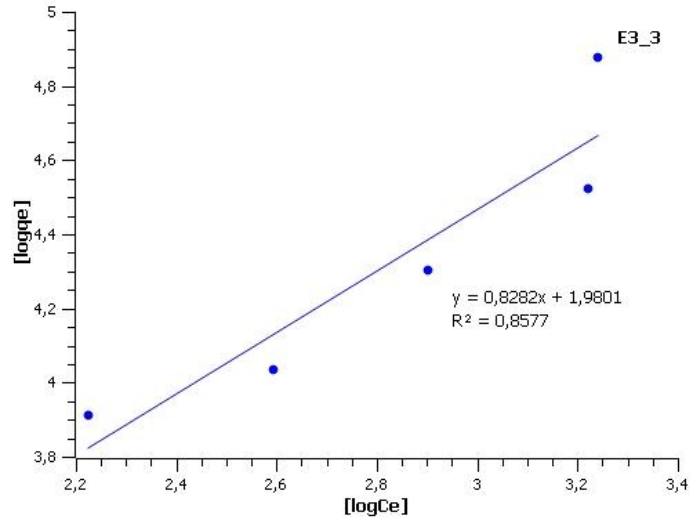
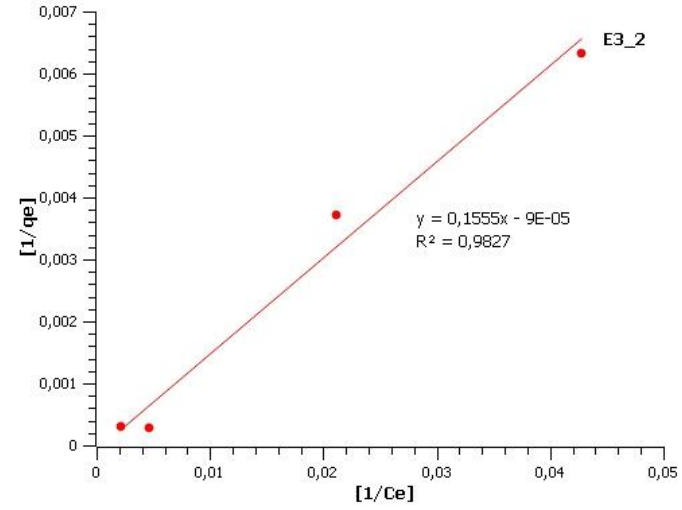
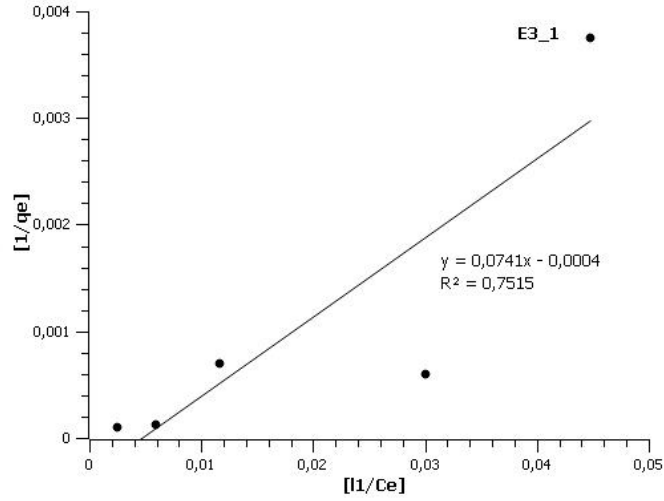
		Langmuir İzotermi		
		$1/q_m$	$1/q_m\beta$	
<i>Test-1</i>	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	0.0053	4×10^{-5}	
<i>Test-2</i>		0.0077	5×10^{-5}	
		Freundlich İzotermi		
		$1/N$ (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
<i>Test-3</i>		0.8013	2.2809	190.9414

EK-6 E1 Malzemesi İçin Doğrusal Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



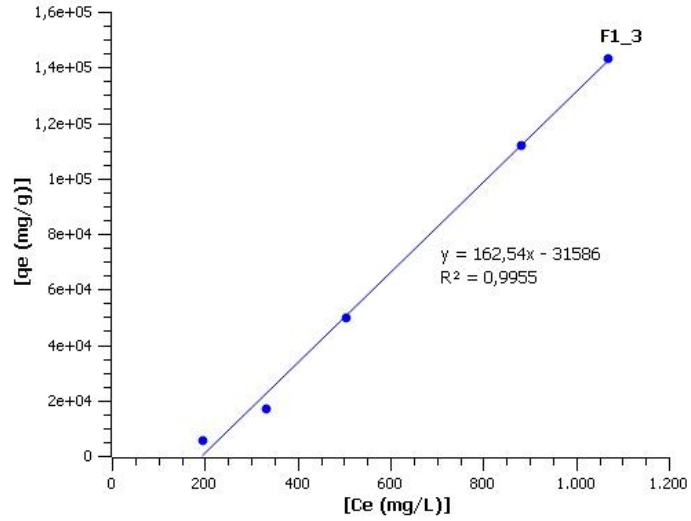
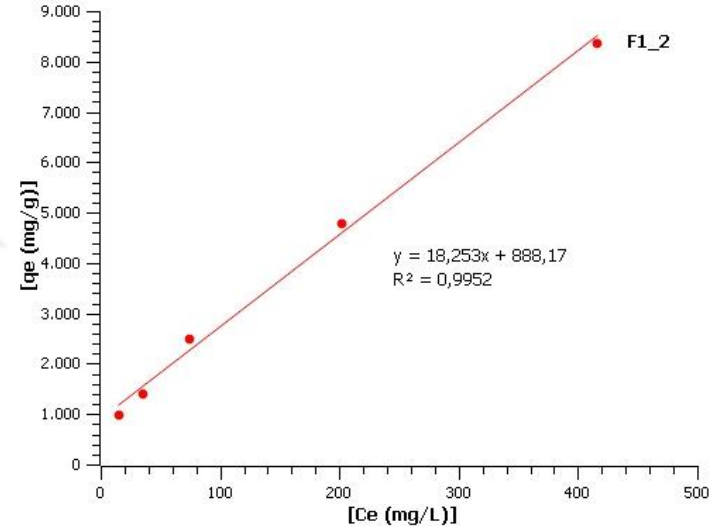
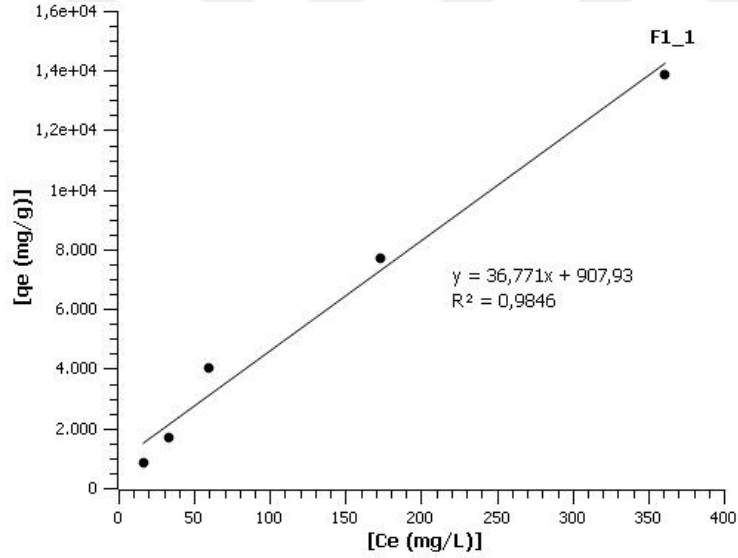
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R²]	Doğrusal İzoterm [K_{dm}, l/mg]
<i>Test 1</i>	0.9090	87.0280
<i>Test 2</i>	0.9955	93.4920
<i>Test 2</i>	0.9952	133.8000

EK-6 E3 Malzemesi İçin Langmuir ve Freundlich (Test_3) Denge İzotermlerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



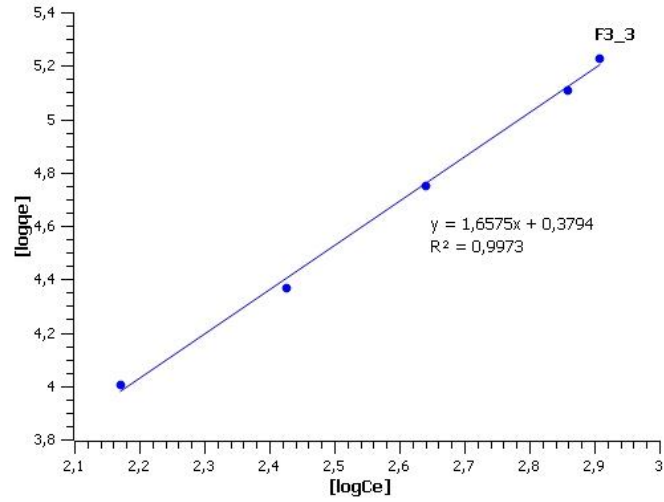
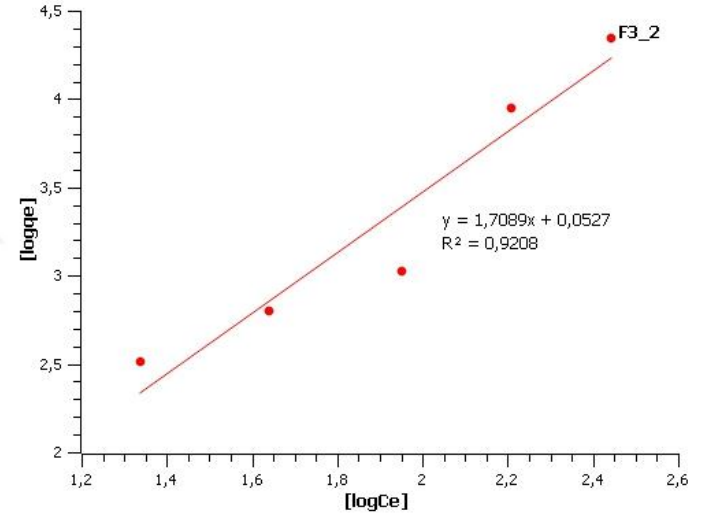
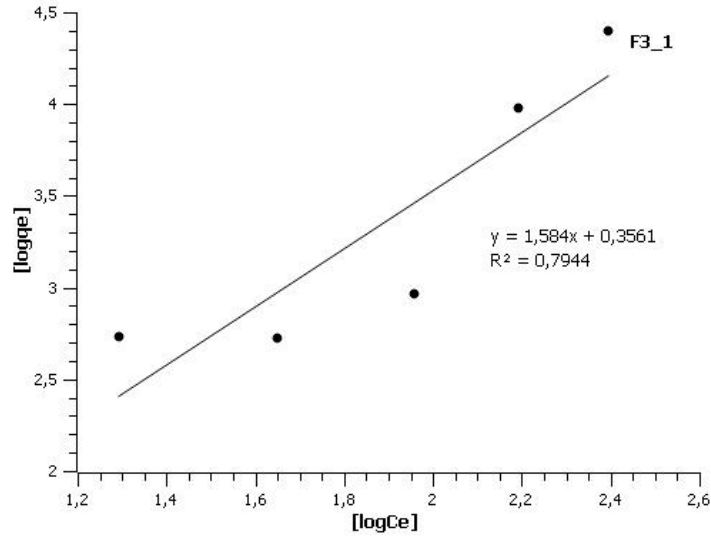
		Langmuir İzotermleri		
		$1/q_m$	$1/q_m\beta$	
Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]				
<i>Test-1</i>	0.7515	0.0741	-0.0004	
<i>Test-2</i>	0.9827	0.1555	-9×10^{-5}	
		Freundlich İzotermleri		
		$1/N$ (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
<i>Test-3</i>	0.8577	0.8282	1.9801	95.5213

EK-6 F1 Malzemesi İçin Doğrusal Denge İzotermi Modelleri ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



	Doğrusal İzoterm	
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	K_{dm} (l/mg)
Test-1	0.9846	36.771
Test-2	0.9952	18.253
Test-3	0.9955	162.54

EK-6 F3 Malzemesi İçin Freundlich Denge İzotermi Modellerinin Doğrusallaştırması ve K_{dm} Değerlerinin Hesaplanması (devam ediyor)



Freundlich İzotermi				
	Korelasyon Katsayısının Karesi [R^2]	1/N (boyutsuz)	$\log K_F$	K_F (l/mg)
Test-1	0.7944	1.5840	0.3561	2.2704
Test-2	0.9208	1.7089	0.0527	1.1290
Test-3	0.9973	1.6575	0.3794	2.3955

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Kübra ÖZDEMİR ÇALLI

Doğum Yeri: Sivrihisar/ESKİŞEHİR

Medeni Hali: Evli

E-posta: ozdmr.kbr@gmail.com

Adresi: Eymir Mahallesi, Yedigöller Caddesi, No: 6 I/6 Gölbaşı/ANKARA

Eğitim

Lise: Eskişehir Sivrihisar Eğitim Vakfı (SEV) Muzaffer Demir Anadolu Lisesi (2003-2007)

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü (2007-2011)

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği (2011-2017)

Doktora : -

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (B)

İş Deneyimi

2012- Hacettepe Üniversitesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü- Jeohidroloji Laboratuvarları, Proje Asistanı

2013- ENCON Çevre Danışmanlık, Proje Mühendisi

2015-Türkiye Su Enstitüsü (SUEN), Proje Uzmanı

2015-Milli Eğitim Bakanlığı Yurtdışı Yüksek Lisans Bursu, Bursiyer

Deneyim Alanları

Yeraltısuyu Kirliliği ve Kirlenici Taşınım Süreçleri, Karstik Akifer Hidrojeolojisi, Hidrolojik Modelleme, Sınır Aşan Yeraltısuları, Yeraltısuyu Güvenliği

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi -

Tezden Üretilmiş Yayınlar -

Tezden Üretilmiş Teblig ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar -



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:08/02/2017

Tez Başlığı / Konusu: Farklı Kırıklı-Çatlaklı Akifer Sistemlerinde Kirlenici Taşınım Parametrelerinin Belirlenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç ve e)Kaynakça kısımlarından oluşan toplam 68 sayfalık kısmına ilişkin, 08/02/2017 tarihinde şahsım/tez danışmam tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Kübra ÖZDEMİR ÇALLI

Öğrenci No: N10222012

Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği

Programı: Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

08/02/2017
K.Özdemir

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Yrd. Doç. Dr. Levent TEZCAN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)