İÇME SULARININ DEZENFEKSİYONUNDA TEMEL PRENSİPLER

Prof.Dr. Ömer Akgiray
Marmara Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Bölümü
Göztepe, İstanbul
omer.akgiray@marmara.edu.tr

TESİSAT DERGİSİ

Kasım 2003

İÇME SULARININ DEZENFEKSİYONUNDA TEMEL PRENSİPLER

(Basic Principles in the Disinfection of Potable Waters)

Prof.Dr. Ömer Akgiray
Marmara Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Bölümü
Göztepe, İstanbul
omer.akgiray@marmara.edu.tr

ÖZET

Bu yazıda içme sularının dezenfeksiyonunda geçerli olan temel prensipler izah edilmektedir. Dezenfeksiyon açısından su kaynakları iki kısımda ele alınmaktadır: (1) Yüzey suları ve yüzey sularının doğrudan etkisi altında olan yeraltı suları. (2) Yüzey suları ile doğrudan irtibatı olmayan ve kirletilmemiş yeraltı suları. Yüzey sularında hastalık yapabilen bakteriler ve virüslere ilaveten, klor gibi dezenfektanlara dayanıklı Giardia ve Crypto gibi mikroorganizmalar da mevcut olabilir. Yüzey sularının arıtılmasında bir filtrasyon metodu mutlaka uygulanmalıdır. Temiz ve berrak yeraltı suları sadece dezenfeksiyona tabi tutularak kullanılabilir.

ABSTRACT

This article explains the basic principles of drinking water disinfection. Water sources are divided into two categories for this purpose: (1) Surface waters and ground waters under the direct influence of surface waters. (2) Unpolluted ground waters without any direct influence of nearby surface waters. In addition to pathogenic bacteria and viruses, surface waters may contain organisms like Giardia and Crypto that are resistant to chlorine. Surface waters must be filtered using a proven filtration technology. Clear and unpolluted ground waters can be utilized after disinfection without any filtration.

1. GİRİŞ

Bir suyun arıtılmasında kullanılan dezenfeksiyon metodu bahis konusu suyun özelliklerine ve kaynağına göre değişir. Yüzey sularının ve yüzey sularının doğrudan etkisi altındaki yeraltı sularının dezenfeksiyonu için, sırasıyla, yumaklaştırma, çöktürme, filtrasyon ve klorlama işlemleri tatbik edilir. Bulanıklık ve renk parametreleri düşük olan yüzey sularının arıtılmasında direkt filtrasyon kullanılır. Direkt filtrasyonda çöktürme işlemi yoktur; yumaklaştırıcı eklenen su çöktürme işlemine tabi tutulmadan direkt olarak filtrelerden geçirilir. Yüzey sularının etkisi altında olmayan temiz ve berrak yeraltı suları filtre de edilmeyip sadece klorlama işlemi veya benzeri bir metod ile dezenfekte edilebilir.

Su tasfiyesinde kullanılan temel işlemler (yumaklaştırma, filtrasyon, vb.) "İçme Suyu Arıtma Teknolojileri" başlıklı yazımızda anlatıldığı için burada tekrar izah edilmeyecektir (bkz. Tesisat Dergisi, no.90). Dezenfeksiyon işlemi genel olarak "sudaki zararlı mikroorganizmaların giderilmesi işlemi" olarak tarif edilebilir. Su etkili bir şekilde yumaklaştırılırsa, çöktürme ve hızlı filtrasyon işlemleri ile mikroorganizmaların yüzde 99'u veya daha fazlası giderilebilir. Bundan dolayı, çöktürme ve filtrasyon gibi işlemler birer dezenfeksiyon işlemi sayılabilir veya arıtma tesisinin tümü bir dezenfeksiyon işlemi gibi görülebilir (yukarıda dezenfeksiyon kelimesini bu manada kullanmıştık). Öte yandan, dezenfeksiyon tabiri daha ziyade doğrudan mikroorganizmaları öldürmek maksadıyla tatbik

edilen klorlama ve ozonlama gibi işlemler için kullanılmaktadır. Dezenfeksiyon kelimesi yazımızın kalan kısmında bu manası ile kullanılacaktır.

Su ve atıksuların dezenfeksiyonunda en yaygın olarak kullanılan kimyevi maddeler şunlardır:

- Serbest klor (HOCl ve OCl^-)
- Ozon (O_3)
- Klor dioksit (ClO_2)
- Bağlı klor (kloraminler: NH_2Cl ve $NHCl_2$)

Ayrıca, çok nadir de olsa, potasyum permanganat da ($KMnO_4$) dezenfeksiyon maksadıyla kullanılmaktadır. Bazı durumlarda da (mesela, küçük arıtma tesislerinde) UV (ultraviyole) lambaları kullanılması ekonomik ve teknik açıdan uygun görülmektedir. İçme sularının dezenfeksiyonu için Türkiye'de ve bütün dünyada en yaygın olarak tatbik edilen metod serbest klor ile dezenfeksiyondur. Bunun için bu yazıda serbest klor ile dezenfeksiyon üzerinde durulacaktır. Ancak burada anlatılan bilgilerin çoğu diğer dezenfektanlardan birinin kullanıldığı durumlarda da geçerlidir. (Klorlama kimyası için bkz. Tesisat Dergisi, no. 93).

Yukarıda da belirtildiği gibi, bir suyun içilebilir hale getirilmesi için kullanılması gereken arıtma usülleri suyun kaynağına ve özelliklerine göre değişir. Dezenfeksiyon açısından içme suyu kaynakları iki kısma ayrılırlar. (1) Yüzey suları ve yüzey sularının doğrudan etkisi altında bulunan yeraltı suları. (2) Yüzey suları ile doğrudan irtibatı olmayan temiz ve berrak yeraltı suları. Bir yeraltı su kaynağı büyük organizmalar, böcekler, yosun ve alglar, organik parçacıklar veya Giardia mikrobu gibi büyük patojenler ihtiva ediyorsa, ya da bahis konusu yeraltı suyunun bulanıklığı, sıcaklığı, elektriksel iletkenliği, pH vb. özelliklerinde meydana gelen büyük ve hızlı değişikliklerin yakın çevredeki bir yüzey suyunun özelliklerindeki değişikliklerle veya hava şartları ile bağlantılı olduğu görülürse, o yeraltı suyunun "bir yüzey suyunun doğrudan etkisi altında" olduğu kabul edilir. Giardia sistleri 7 ile 12 μm boyutlarındadır (1 μm = 0,001 mm).

Dezenfeksiyon literatüründe "log giderim" ölçüsü yaygın olarak kullanılmaktadır. Her 1.0-log miktarında giderim, %90 giderim demektir. Mesela, bir ünitenin girişindeki virüs konsantrasyonu N_0 ve çıkışındaki virüs konsantrasyonu N ise, etkin virüs konsantrasyonu %90 azalırsa $N = 0{,}1N_0$ eşitliğinden $\log(N_0/N) = \log(10) = 1{,}0$ bulunur. Giderim %99 ise, $\log(N_0/N) = \log(100) = 2{,}0$; giderim %99,9 ise, $\log(N_0/N) = \log(1000) = 3{,}0$ hesaplanır. 0,5-log giderim demek, $\log(N_0/N) = 0{,}5$ eşitliğinden $100(N_0-N)/N_0 = \%68{,}4$ giderim demektir.

Yüzey sularının ve yüzey sularının doğrudan etkisi altındaki yeraltı sularının arıtılmasında şu iki şart sağlanmalıdır:

(1) Giardia lamblia sistlerinin en az %99,9 oranında (3,0-log miktarında) giderilmesi veya dezenfekte edilmesi.
(2) Bağırsak kaynaklı virüslerin en az % 99,99 oranında (4,0-log miktarında) giderilmesi veya zararsız hale getirilmesi.

Virüs giderimi için gerekli dezenfektan miktarı ve temas sürelerinin (CT değerlerinin) tespiti için kullanılan standartlar Hepatit A virüsü ile yapılan deneylere dayanmaktadır (CT faktörü aşağıda izah edilmiştir). Dezenfeksiyon standartlarında bu iki tür mikroorganizmanın seçilmesinin sebebi, her ikisinin de dezenfeksiyona karşı dirençli olmasıdır. Yani bu iki mikroorganizma türünü gideren veya zararsız hale getiren arıtma usüllerinin, diğer zararlı mikroorganizmaları da başarı ile gidereceği kabul edilmiştir.

Dezenfeksiyon için serbest klor veya ozon kullanılıyorsa, 3,0-log Giardia giderilmesi şartı sağlandığı zaman 4,0-log virüs giderimi de gerçekleşmiş olur ve bu şartı ayrıca kontrol etmeye gerek yoktur. Ancak, kloraminler veya klor dioksit kullanıldığı zaman her iki şart ayrı ayrı kontrol edilmelidir. (Bazı şartlarda 4,0-log virüs giderimi için gerekli CT değeri 3,0-log Giardia giderilmesi için gerekli CT değerinden daha yüksek olabilir.) Ozon ile dezenfeksiyon ile sadece 1,0-log veya daha az Giardia giderilmesi gerektiği durumlarda da gerekli virüs

gideriminin gerçekleştiği ayrıca teyid edilmelidir. Mesela, klasik yüzey suyu arıtmasını (yumaklaştırma, çöktürme ve hızlı filtrasyon işlemlerini) müteakip dezenfeksiyon ile sadece 0,5-log Giardia ve 2,0-log virüs giderimleri gereklidir (bu husus aşağıda anlatılmıştır).

Yukarıdaki belirtilen iki şarta ilaveten, yüzey suları ve yüzey sularının doğrudan etkisi altındaki yeraltı suları, etkinliği ispat edilmiş bir filtrasyon metodu ile arıtılmalıdır. Kullanılabilecek filtrasyon teknolojileri şunlardır: (1) Yumaklaştırma ve çöktürmeyi takiben hızlı filtrasyon (buna metoda burada *klasik arıtma* diyeceğiz), (2) Yumaklaştırma ve direkt (çöktürmesiz, hızlı) filtrasyon (3) Yavaş kum filtrasyonu, (4) Diatom (diatomaceous earth) filtrasyonu. Çeşitli filtrasyon teknolojileri ile sağlanabilecek Giardia, virüs ve toplam koliform giderimleri Tablo-1'de özetlenmiştir.

Temiz ve berrak yeraltı suları filtre edilmeden ve sadece klor gibi bir dezenfektan kullanılarak arıtılabilir. Bu durumda kullanılacak klor miktarı ve klor temas tankı tasarımı 4,0-log virüs giderimini sağlayacak şekilde seçilmelidir. Bu gibi su kaynaklarında Giardia bulunmayacağı için 3,0-log Giardia giderim şartı tatbik edilmez.

Yüzey sularının arıtılmasında sadece dezenfeksiyonun yeterli olmayıp bir filtrasyon metodunun şart görülmesi şu üç temel sebebe dayanmaktadır: (1) Sudaki çeşitli katı parçacıklar mikroorganizmaları dezenfektan maddeye karşı koruyan kalkan işlevi görürler. Dezenfeksiyon işleminden önce katı parçacıklar (bulanıklık) filtrasyon ile giderilirse dezenfeksiyon işlemi daha etkili olacaktır. (2) Protozoa sistleri serbest klora karşı dirençli oldukları için bunların büyük oranda filtrasyon ile tutulması istenir. Filtrasyonla tutulamayan az miktarda sist ve diğer mikroplar dezenfeksiyon ile zararsız hale getirilirler. (3) Modern su arıtma mühendisliğinde mikroorganizmaları gidermek için birden fazla engel (bariyer) kullanılması felsefesi hakimdir. Çöktürme işlemi ile mühim miktarda miokroorganizma sudan ayrılmış olur. Filtrasyon ile mikroorganizmaların tesisten geçmesine karşı ikinci bir engel yerleştirilmiş olur. Son bariyer ise dezenfeksiyon/klorlama işlemidir.

Yüzey sularının doğrudan etkisi altıda olmayan yeraltı suları filtre edilmeden, sadece dezenfeksiyon ile arıtılabilir. Yeraltı suları yüzeydeki topraktan geçerken ve yeraltında hareket ederken tabii olarak filtrasyon gerçekleşir. Crypto ve Giardia gibi büyük mikroorganizmalar süzülerek tutulurlar. Çok daha küçük olan virüslerin aynı şekilde tutulamayacağı düşüncesi bir endişe kaynağı olmakla beraber, kirletilmiş yüzey sularının doğrudan etkisi altında olmayan yeraltı sularında çok miktarda virüs bulunma ihtimali olmadığı kabul edilmektedir.

Filtrasyon Metodu	Giardia sistleri	Virüsler	Toplam koliform
Klasik arıtma	2-3	1-3	>4
Direkt filtrasyon	2-3	1-2	1-3
Yavaş kum filtrasyonu	2-3	1-3	1-2
Diatom filtrasyonu	2-3	1-2	1-3

Tablo-1: Filtrasyon metoduna göre mikroorganizma giderim miktarları.
(Kaynak: Guidance Manual, 1990)

Tablo-1'de adı geçen fitre sistemleri doğru tasarlanır ve iyi işletilirlerse tabloda verilen aralıkların üst sınırlarında giderimler elde edilebilir. Mesela, yavaş kum filtrasyonu ile 3,0-log veya daha fazla Giardia ve virüs giderimleri mümkündür. Kural olarak şu rakamlar tatbik edilir: Klasik arıtmanın (yumaklaştırma, çöktürme ve hızlı filtrasyon kombinasyonunun) 2,5-log Giardia giderimi ve 2,0-log virüs giderimi sağladığı kabul edilir. Böyle bir arıtma tesisinde dezenfeksiyon safhasında sadece 0,5-log Giardia ve 2,0-log virüs giderimi yeterlidir. Netice olarak tüm tesiste 3,0-log Giardia ve 4,0-log virüs giderimi sağlanmış olur. Direkt filtrasyon metodunda 2,0-log Giardia ve 1,0-log virüs giderildiği kabul edilir. Dezenfeksiyon

aşamasında ayrıca 1,0-log Giardia ve 3,0-log virüs giderecek şekilde CT değerleri kullanılması gerekecektir.

Bu yazıda kartuş filtrelerin veya membran teknolojilerinin kullanımından fazla bahsetmeyeceğiz. Fakat kısaca şunları söyleyebiliriz. Kartuş filtreler genellikle bulanıklığı düşük (mesela 2 NTU'dan az) sular ve küçük tesisler için uygundur. 1 µm veya daha küçük aralıklı kartuşlar Giardia ve Crypto gibi büyük mikroorganizmaları başarı ile (3,0-log miktarında veya daha fazla) tutabilirler. Ancak kartuş filtrelerle virüs gideriminin etkinliği şüphelidir. Kartuş filtrasyonunu müteakip ayrıca serbest klor veya başka bir metod ile dezenfeksiyon gereklidir. Ters osmoz, nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon gibi membran teknolojileri ise her türlü mikroorganizmayı gidermekte çok etkili olabilmektedir. Bu tür arıtma tesislerinde de son işlem olarak serbest klor veya başka bir metod ile dezenfeksiyon yapılmalıdır. Membran teknolojileri bir çok ülkede içme suyu arıtılmasında gittikçe daha yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Türkiye'de henüz büyük arıtma tesislerinde kullanımları yaygın değildir; tuzlu sulardan içme suyu temininde veya endüstriyel su ihtiyaçları için kullanılmaktadır.

2. DEZENFEKSİYON VERİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Belli bir tür mikroorganizmanın bir dezenfektan tarafından öldürülme veya etkisiz hale getirilme oranı iki temel faktöre bağlıdır: (1) C: Dezenfektan konsantrasyonu, mg/L olarak ölçülür. (2) T: Dezenfektan ile organizmanın temas süresi, dakika olarak ifade edilir. C ne kadar yüksekse, mikroorganizmaların etkisiz hale getirilme oranı da o kadar yüksek olacaktır. Aynı şekilde, temas süresi T artırılırsa, dezenfeksiyonun verimi (mikroorganizmaları öldürme oranı) artacaktır. Belli bir dezenfeksiyon verimi, düşük bir C ile yüksek bir T kullanılarak veya C'yi yüksek tutup küçük bir T değeri kullanılarak elde edilebilir. Bundan dolayı, dezenfeksiyon verimi genellikle CT faktörüne bağlı olarak ifade edilir. CT'nin birimi (mg·dakika/L)dır. CT değerlerinin kullanılmasının altında yatan temel fikir, belli bir tür mikroorganizma ve belli bir dezenfektan için dezenfeksiyon veriminin (yüzde olarak öldürme oranının) CT faktörünün bir fonksiyonu olarak hesaplanabileceğidir.

Ayrıca, CT faktörü dışında şu değişkenler de dezenfeksiyon verimine etki eder: (1) Mikroorganizma türü. Mesela, Giardia dezenfektanlara karşı diğer bir çok mikroorganizmaya göre daha dirençlidir. (2) Kullanılan dezenfektanın türü. Mesela ozon diğer dezenfektanlara göre daha güçlüdür. (3) Suyun sıcaklığı. Her 10 ^{o}C'lık sıcaklık artışı dezenfeksiyon verimini 2-3 misli artırır. Buna göre, soğuk bir suyun dezenfeksiyonu daha zordur. Ancak, UV ile dezenfeksiyon sıcaklıktan fazla etkilenmez. (4) Serbest klor için pH önemli bir değişkendir. HOCl ve OCl^- dağılımı pH'a göre değişir (bkz. Tesisat Dergisi, no.93). HOCl daha kuvvetli bir dezenfektan olduğu için dezenfeksiyon verimi pH ile değişir. Ozon, klor dioksit ve kloraminlerin dezenfeksiyon verimi pH = 6-9 aralığında fazla değişmez. UV ile dezenfeksiyon veriminin de pH ile değişmediği kabul edilmektedir. (5) Suyun bulanıklığı: Katı parçacıkların içindeki mikroplar dezenfektanın etkisinden korunurlar. Dezenfeksiyon sırasında bulanıklık 5 NTU'dan az olmalıdır; 1 NTU'yu aşmaması tavsiye edilir.

Tablo-2'de serbest klor ile dezenfeksiyon için 3,0-log (%99,9) Giardia lamblia giderimini sağlayan CT değerleri verilmiştir. Bu tabloda da görüldüğü gibi, serbest klor ile belli bir dezenfeksiyon verimini elde etmek için gerekli CT değeri aynı zamanda C değerine de bağlıdır. Tablo-3'de de 0,5-log (%68,4) ve 1,0-log (%90) giderim için gerekli CT değerleri verilmiştir. Tablo-4'de ise virüs giderimi için gerekli CT değerleri özetlenmiştir.

Tablo-2'deki değerler sadece 3,0-log Giardia giderimi ve serbest klor için geçerlidir. Tablo-3 ve Tablo-4'deki değerler ise sadece 1,0 mg/L serbest klor bakiyesi için geçerlidir. Daha teferruatlı tablolar, değişik giderim oranları ve başka dezenfektanların CT değerleri için Kaynaklar'da verilmiş olan Guidance Manual isimli esere danışılmalıdır. (Bu kaynaktaki CT tablolarının hepsini burada vermek yer açısından mümkün değildir.)

Serbest klor Bakiyesi, mg/L	pH	CT değerleri (mg·dakika/L)			
		0,5 ^{o}C	5 ^{o}C	10 ^{o}C	20 ^{o}C
≤0,4	6,5	163	117	88	44
≤0,4	7,0	195	139	104	52
≤0,4	7,5	237	166	125	62
≤0,4	8,0	277	198	149	74
1,0	6,5	176	125	94	47
1,0	7,0	210	149	112	56
1,0	7,5	253	179	134	67
1,0	8,0	304	216	162	81
2,0	6,5	197	138	104	52
2,0	7,0	236	165	124	62
2,0	7,5	286	200	150	75
2,0	8,0	346	243	182	91
3,0	6,5	217	151	113	57
3,0	7,0	261	182	137	68
3,0	7,5	316	221	166	83
3,0	8,0	382	268	201	101

Tablo-2: Serbest klor ile 3,0-log (%99,9) Giardia lamblia giderimi için gerekli CT değerleri. (Kaynak: Hammer & Hammer, 1996)

log giderim	pH	CT değerleri (mg·dakika/L)			
		0,5 ^{o}C	5 ^{o}C	10 ^{o}C	20 ^{o}C
0,5	6	25	18	13	7
1,0	6	49	35	26	13
0,5	7	35	25	19	9
1,0	7	70	50	37	18
0,5	8	51	36	27	14
1,0	8	101	72	54	27

Tablo-3: Serbest klor (C=1,0 mg/L) ile 0,5-log ve 1,0-log Giardia lamblia giderimi için gerekli CT değerleri. (Kaynak: Hammer & Hammer, 1996)

log giderim	CT değerleri (mg·dakika/L)			
	0,5 ^{o}C	5 ^{o}C	10 ^{o}C	20 ^{o}C
2	6	4	3	1
3	9	6	4	2
4	12	8	6	3

Tablo-4: Serbest klor (C=1,0 mg/L; pH = 6-9) ile virüs giderimi için gerekli CT değerleri. (Kaynak: Hammer & Hammer, 1996)

3. TEMAS SÜRESİ VE CT HESAPLARI

Dezenfeksiyon temas tanklarının tasarımı için ve mevcut birimlerin (tankların, rezervuarların, vs.) dezenfeksiyon açısından performanslarının değerlendirilmesi için hesaplanan CT faktöründeki kullanılması gereken temas süresi, suyun %10'unun bahis konusu birimden çıktığı süredir. Bu süre T_{10} olarak yazılır ve dakika olarak ifade edilir. Buna göre CT yerine CT_{10} yazılması daha tutarlı olacaktır; ancak yerleşmiş olan kullanıma göre biz de CT şeklinde yazacağız. CT'nin içindeki T'nin T_{10} olduğu unutulmamalıdır.

Tatbikatta T_{10} süresinin tespiti için yapılan deneyler ve deney neticelerinin nasıl kullanıldığı aşağıda anlatılacaktır. Ancak ince uzun kanallardaki ve borulardaki T_{10} süresinin tespiti için deney yapılmasına gerek yoktur; boru içindeki akımın -reaktör tasarımındaki tabiri ile- piston-akışlı (plug-flow) olduğu farzedilir ve $T_{10} = T = V/Q = L/u$ ifadesi ile temas süresi hesaplanır. Burada V borunun toplam iç hacmi (m^3), L borunun uzunluğu (m), Q suyun debisi (m^3/dak), u ise suyun akış hızıdır (m/dak). Bu yaklaşımda bütün su moleküllerinin boruda aynı hızda ilerlediği ve boru içinde aynı süreyi geçirdiği kabul edilmiş olmaktadır.

Dezenfektan temas tankları mümkün olduğu kadar piston-akışlıya yakın hidrolik özelliklerle tasarlanmalıdır. Ancak tatbikatta tam piston-akışlı hidrolik şartlar gerçekleşmez; bu durumda T_{10} süresi teorik bekleme süresinden (T = V/Q) az olacaktır. Diğer bir deyişle, T_{10}/T oranı 1,0'den az olacaktır. Su moleküllerinin bir kısmı bahis konusu ünitenin içinde T'den daha kısa süre kalır, bir kısmı da daha uzun süre ünitenin içinde kalır. Su moleküllerinin (ve mikroorganizmaların) %10'u T_{10} süresinden önce üniteden çıkarlar; diğer bir bakış açısı ile, suyun %90'ı T_{10}'dan daha uzun süre ünite içinde kalır.

CT hesaplarında kullanılan C terimi dezenfektan maddenin suda kalan konsantrasyonudur (bakiyesidir). Bu konsantrasyon genel olarak suya eklenen miktardan (dozajdan) daha az olacaktır. Klor ve ozon gibi oksitleyiciler suda mevcut bir çok madde ile reaksiyona girerek tükenirler. Bundan dolayı C değeri temas tankı boyunca ve boru hatlarında sabit kalmaz. Dezenfeksiyon maksadı ile kullanılan (içinde dezenfektan bakiyesi mevcut tutulan) tanklar, diğer üniteler ve borular için CT değerleri hesaplanırken, çıkıştaki C değerleri kullanılır. Çıkıştaki C değeri bahis konusu ünite veya boru içindeki en düşük C değeri olduğu için, bu yaklaşım temkinli bir dezenfektan dozu kullanılmasını sağlar.

4. T_{10} SÜRESİNİN DENEY İLE BULUNMASI

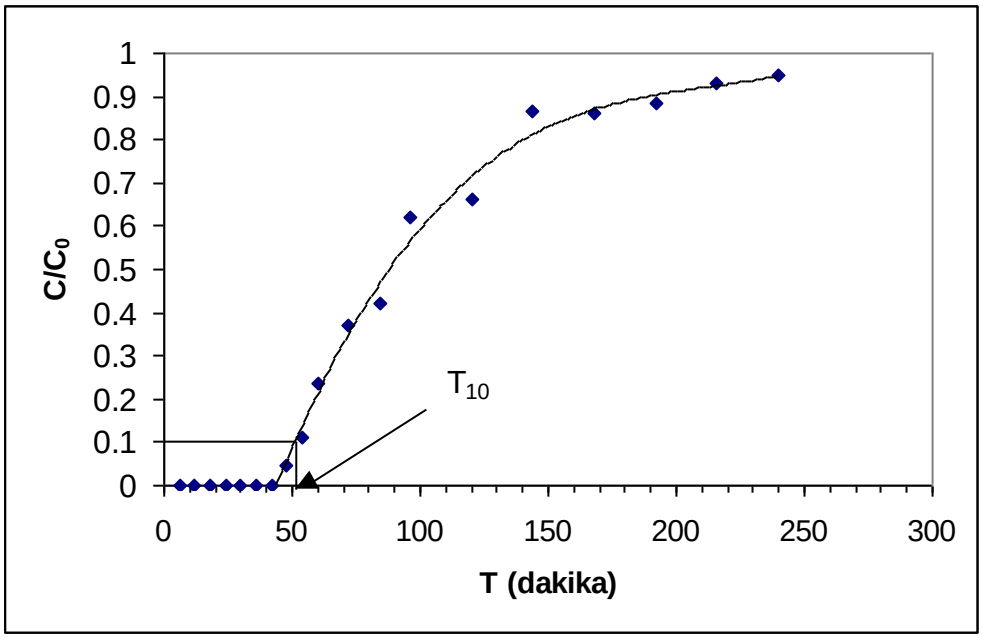
T_{10} süresi bir iz element kullanılarak ölçülür. Bunun için en kolay metod basamak-dozu metodudur. İlgili ünitenin girişine sabit debi ile (mesela, bir dozaj pompası kullanarak) iz element eklenmeye başlanır (iz elementin giriş konsantrasyonu bir basamak şeklinde artırılır) ve ünitenin çıkışındaki iz element konsantrasyonu zamana göre takip edilir ve kaydedilir. Çıkıştaki iz element konsantrasyonu C sabitlendiği (giriş konsantrasyonu C_0'a eşitlendiği) zaman deneye son verilir. C/C_0 değerleri hesaplanarak zamana karşı çizilir. Bu çizimde $C/C_0 = 0,1$ değerine tekabül eden zaman T_{10}'dur. Eğer üniteye gelen suda zaten bir miktar iz element varsa, iz elementin bu zaten mevcut olan konsantrasyonu ünitenin giriş ve çıkışında ölçülen toplam konsantrasyonlardan çıkarıldıktan sonra C/C_0 değerleri hesaplanır. Bu işlemlerin nasıl yapıldığı Örnek-1'de detaylı olarak anlatılmıştır.

Örnek-1: Bir arıtma tesisinde yeni bir su deposu inşa edilmiştir. Filtre edilen su şebekeye pompalanmadan önce bu depodan geçmektedir. Tesisin debisi 25.000 m^3/gün ve depodaki su hacmi 2.500 m^3 olarak kabul edilecektir. Florür iyonu iz element olarak kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde florür çözeltisi bir dozaj pompası ile depo giriş borusuna enjekte edilerek suya 2.0 mg/L florür eklenmiştir. Filtrelerden gelen suda 0.2 mg/L florür olduğu tespit edilmiş, depo çıkışında da aşağıdaki tabloda verilen konsantrasyonlar ölçülmüştür. Bu depo için 25.000 m^3/gün debisine tekabül eden T_{10} değeri nedir?

Zaman	C (mg/L)	İz element C (mg/L)	C/C_0
6	0.2	0	0
12	0.2	0	0
18	0.2	0	0
24	0.2	0	0
30	0.2	0	0
36	0.2	0	0
42	0.2	0	0
48	0.29	0.09	0.045
54	0.42	0.22	0.11
60	0.67	0.47	0.235
72	0.94	0.74	0.37
84	1.04	0.84	0.42
96	1.44	1.24	0.62
120	1.52	1.32	0.66
144	1.93	1.73	0.865
168	1.92	1.72	0.86
192	1.97	1.77	0.885
216	2.06	1.86	0.93
240	2.1	1.9	0.95

Bu tablodaki en soldaki iki sütun deneyde ölçülen verileri göstermektedir. Üçüncü sütundaki değerler çıkış suyunda ölçülen florür konsantrasyonundan geri planda zaten mevcut olan 0.2 mg/L florür konsantrasyonunu çıkararak hesaplanmış, en sağdaki sütun ise üçüncü sütundaki değerleri 2.0 mg/L ($=C_0$) değerine bölerek bulunmuştur. Hesaplanan C/C_0 değerleri zamana bağlı olarak Şekil-1'deki noktalarla gösterilmiştir. Noktaların içinden geçen eğri el ile ("göz ayarı" ile) çizilebilir. Şekilde gösterilen eğri Microsoft Excel'de mevcut "Trendline" komutunu kullanarak C/C_0 değeri sıfırdan büyük noktalara en iyi uyan üçüncü derece polinom bulunarak çizilmiştir.

T_{10} değerini bulmak için $C/C_0 = 0,1$ değerinden yatay bir çizgi çekilerek eğriyi kesen nokta bulunur ve bu noktadan yatay ekseni kesen dik bir çizgi çekilerek T_{10} değeri okunur. Bu örnekte yaklaşık olarak $T_{10} = 52$ dakika bulunmaktadır.



Şekil-1: Çıkış suyundaki iz elementi konsantrasyonundan T_{10} değerinin bulunması.

Herhangi bir proses ünitesinin T_{10} süresinin tespiti için en az dört ayrı debide deney yapılması tavsiye edilir. Dört debi kullanılacaksa, ortalama debiden büyük iki ayrı debi, ortalamaya yakın bir debi ve ortalamadan küçük bir debi seçilir. Bu deneylerde kullanılan en büyük debi, bahis konusu üniteden geçebilecek en büyük debinin en az %91'i kadar büyük olmalıdır. Bu şekilde T_{10} dikey eksende, debi (Q) yatay eksende olmak üzere dört nokta yerleştirilir ve noktaların üzerinden uygun bir eğri geçirilir. Bu eğri ihtiyaç olduğu zaman herhangi bir debideki T_{10} değerinin bulunması için kullanılır.

Çok sayıda değişik debide deney yaparak T_{10} değerlerini debiye bağlı olarak ölçmek mümkün olmazsa, sadece bir debi ile ölçüm yapılır. Bahis konusu üniteden geçebilecek en büyük debinin en az %91'i kadar büyük bir debi seçilir. Bu şekilde bulunan T_{10} değeri, daha küçük debiler için de kullanılırsa temkinli (konservatif) CT değerleri hesaplanmış olur: Daha düşük debilerdeki gerçek T_{10} değerleri daha büyük olacağı için, gerçek CT değerleri de hesaplanandan büyük olacaktır. Bunun neticesi olarak düşük debilerde daha etkili dezenfeksiyon gerçekleşmiş olur. Ancak yüksek miktarda organik madde ihtiva eden ve THM (trihalometan) oluşma potansiyeli yüksek sularda bu yaklaşım düşük debilerde gereğinden fazla THM ve klorlanmış organik madde teşekkülüne yol açabilir.

Örnek-2: Bir kuyudan elde edilen su dezenfekte edilerek kullanılacaktır. Suyun temiz ve berrak olduğu ve herhangi bir yüzey suyunun doğrudan etkisi altında olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumda suyun filtre edilmeden, sadece 4,0-log (%99,99) virüs giderimi için serbest klor ile dezenfekte edilerek tüketicilere ulaştırılmasına karar verilmiştir. Klor ekleme noktasından ilk tüketiciye kadar boru hattının uzunluğu 3 km, suyun borudaki azami hızı 1 m/sn, en düşük su sıcaklığı 5 ^{o}C ve pH değeri 7,5 olacaktır. Bu durumda tatbik edilen dezenfeksiyon yeterli olacak mıdır?

Tablo-4'de, 5 ^{o}C sıcaklık ve 4,0-log virüs giderimi için gerekli CT değeri 8 mg·dakika/L olarak verilmiştir. Ayrıca bir klor temas tankı bulunmadığı için dezenfeksiyon boruda gerçekleşecektir, yani klor eklenen noktadan ilk tüketiciye kadar uzanan 3 km boru dezenfeksiyon "temas tankı" vazifesini görecektir. Borular için T_{10}/T = 1,0 alınabilir. Bu durumda CT hesabında kullanılacak T_{10} = T = V/Q = L/u = (3000 m)/(1 m/sn) = 50 dakika

olarak hesaplanır. CT = 8 denkliğinden C = 8/50 = 0,16 mg/L bulunur. Yani ilk tüketim noktasında (3 km borunun sonunda) 0,16 mg/L serbest klor bakiyesi temin etmek yeterli olacaktır. Genel olarak, su şebekelerinde en az 0,20 mg/L serbest klor bakiyesi bulundurmak tavsiye edilmektedir. Eğer 0,2 mg/L klor konsantrasyonu sağlanırsa, CT değeri 0,20x50 = 10 olacaktır. 4,0-log (%99,99) virüs giderimi için gerekli olan CT değerinden de fazladır. Ayrıca, daha yüksek sıcaklıklarda gereken CT değerleri daha küçük olduğu için ve hesaplarda beklenen azami su hızı (ve asgari temas süresi) kullanıldığı için, 0,16 ile 0,20 mg/L arasında bir klor bakiyesi bu sistem için her şart altında yeterli olacaktır.

5. TEMAS SÜRESİNİN DENEYSİZ TESPİTİ

Herhangi bir ünitenin içindeki su hacmi V (m^3), üniteden geçen suyun debisi Q (m^3/dak) ise, o ünitedeki teorik bekleme süresi T = V/Q olarak hesaplanır. Yeni bir tesis tasarlandığı zaman suyun dezenfektan ile teması için kullanılacak olan dezenfeksiyon temas tankı T_{10}/T oranını mümkün olduğu kadar 1,0'e yakın yapacak şekilde tasarlanmalıdır. Halen mevcut bir tesistedeki bir ünitenin T_{10}/T değeri yukarıda anlatıldığı şekilde iz elementi deneyleri yapılarak tespit edilmelidir. Ancak tatbikatta bu deneyleri yapmaya her zaman imkan veya vakit olmamaktadır. Bu gibi durumlarda mevcut üniteyi Şekil-2'deki örneklerle mukayese ederek T_{10}/T değeri takribi olarak tahmin edilebilir.

Bir ünitenin dezenfeksiyon açısından hidrolik özelliklerini iyileştirmek için (T_{10}/T oranını yüksek tutmak için) perdeler kullanılır. Perdelemenin maksadları şunlardır: (1) Ünite içinde "ölü hacim" tabir edilen durgun alanları asgariye indirmek, (2) Üniteden geçen suyun muhtemelen rüzgarın veya yoğunluk farklılıklarının da etkisiyle kısa devre yaparak T = V/Q süresinden çok daha kısa bir sürede ünite dışına çıkmasına mani olmak, (3) Suyun mümkün olduğu kadar "piston-akışlı" biçimde akmasını sağlamak ve üniteye sonra giren suyun önce girenle karışmasına mani olmak. Bütün bu hedefler birbiriyle alakalıdır ve belli bazı tasarım prensiplerine uyulduğu takdirde gerçekleştirilebilir.

Dezenfeksiyon temas tankları veya çeşitli arıtma üniteleri (karıştırıcılar, çöktürme tankları, filtreler) dezenfeksiyon açısından beş şekilde tasnif edilebilir: (1) Tam karışmalı ve perdesiz akım, (2) Zayıf perdeleme, (3) Vasat perdeleme, (4) İyi perdeleme, ve (5) Mükemmel perdeleme veya piston-akışlı tasarım. Bu tasnife göre yaklaşık T_{10}/T değerleri Tablo-5'de verilmiştir. Bu tablodaki U/G oranı ünitenin uzunluğunun genişliğine oranıdır.

Perdeleme durumu	T_{10}/T	Açıklama
Perdesiz ve karışmalı	0,1	Giriş ve çıkışta yüksek hızlar, perdesiz, pervane vb. ile karıştırmalı, düşük U/G oranı
Zayıf	0,3	Giriş ve çıkış perdeleri yok, ünite-içi perde yok
Vasat	0,5	Sedece girişte veya sadece çıkışta perde var
İyi	0,7	Hem giriş hem çıkış perdelemesi mevcut, ünite-içi perdeleme var, U/G oranı yüksek
Mükemmel (piston-akışlı)	1,0	Çok yüksek U/G oranı (uzun boru veya kanal), mükemmel perdeleme

Table-5: Perdeleme metodlarının tasnifi (Kaynak: Guidance Manual, 1990)

Pervaneli veya türbinli hızlı ve yavaş karıştırma ünitelerinde perdeleme yoktur ve tam karışmaya yakın şartlar mevcuttur. (Tam karıştırmalı reaktörlerin T_{10}/T değeri teorik olarak 0,105'e eşittir.) Şekil-2.a'da kötü perdelemenin bir örneği görülmektedir. Üstteki plan çiziminde görüldüğü gibi, boru giriş ve çıkışları arasında ölü alanlar mevcuttur. Kesit çizimde ayrıca girişin üst kısmında ve çıkışın da altında ölü alanlar olduğu görülmektedir. Ayrıca yoğunluk farklılıklarından dolayı dikey yönde karışım mevcuttur.

Şekil-2.b'deki tasarım vasat perdelemeye bir örnektir. Burada suyu homojen olarak dağıtan delikli bir giriş perdesi ve suyun kısa devre yapmasına büyük ölçüde mani olan iki ünite-içi perde mevcuttur. Ancak çıkış perdesi olmadığı ve kısa bir savak çıkış için kullanıldığı için çıkışın altında ve yanlarında ölü alanlar mevcuttur.

Şekil-2.c'deki perdeleme oldukça daha iyidir. Giriş perdesi üniteye giren suyun hızını kesmekte ve homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Çıkış savağı bütün ünite genişliğini kapladığı için ölü alan miktarı Şekil-2.b'dekine göre daha azdır. Ancak çıkışın altında az miktarda ölü alan hala mevcuttur (bkz. alttaki kesit çizim).

Şekil-2.d'deki daire biçimindeki ünite zayıf perdelemeye bir örnektir. Tankın alt tarafında büyük hacimli bir ölü alan mevcuttur ve suyun mühim bir kısmı kısa devre ile tanktan hızla çıkmaktadır. Şekil-2.e'deki giriş perdesi kısa devreyi azalttığı için bu tasarım biraz daha iyidir ve vasat olarak tasnif edilebilir. Şekil-2.f'deki ünite-içi delikli perde suyun kısa devre yapmasını oldukça azaltmakta ve ölü alanları da büyük oranda ortadan kaldırmaktadır. Bu tip perdeleme de iyi olarak tasnif edilmektedir.

Perdelemenin önemini anlamak için şu hususlar düşünülmelidir. Mükemmel perdeleme (piston-akışlı tasarım) durumunda $T_{10}/T = 1$ olduğu için, T_{10} teorik bekleme süresine (= V/Q) eşittir. Diğer bir deyişle, bu durumda belli bir hacim (V) ve belli bir debi (Q) için mümkün olan en büyük T_{10} değeri elde edilmiş olur. Buna göre, gerekli olan CT değerini sağlayacak asgari miktarda dezenfektan kullanımı gerçekleşecektir. Az miktarda dezenfektan kullanılması hem masrafları azaltır, hem de –muhtemelen- THM'ler gibi yan ürünlerin miktarını azaltacaktır. Diğer bir durumda, yine $T_{10}/T = 1$ ise ve eğer dezenfektan bakiyesi (C) ve debi (Q) belli ise, istenen CT değerini sağlamak için gerekli hacim (V) asgari büyüklükte olacaktır.

Perdelemenin iyi olduğu oranda T_{10}/T oranı da yüksek olacaktır ve ideal (piston-akışlı) şartlara yaklaşmak mümkün olacaktır. Piston-akışlı hidrolik elde etmek için dezenfektan temas tanklarının uzunluk/genişlik (U/G) oranları en az 20/1 olmalıdır. Bu oranın 40/1 olması tavsiye edilir. Ayrıca rehber (yönlendirici) duvarlar ve perdeler kullanılarak ölü alanlar ve kısa-devre ihtimali asgariye indirilmelidir (bkz. Metcalf & Eddy, 2003; sayfalar 1270-1275).

6. DAHA FAZLA BİLGİ İÇİN

Bu yazıda özetlemeye ve izah etmeye çalıştığımız bilgiler (tablolar, çizimler ve tasarım prensipleri) büyük oranda Guidance Manual isimli eserden alınmıştır (bkz. Kaynaklar). ABD'de EPA (Environmental Protection Agency) için hazırlanmış olan bu kılavuz kitap içme suyu dezenfeksiyonu ile ilgili en önde gelen referanstır ve bütün dünyada içme suyu tesislerini tasarlayan mühendisler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Konuyla ilgilenen okuyucuların bu kaynağa danışmaları önemle tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

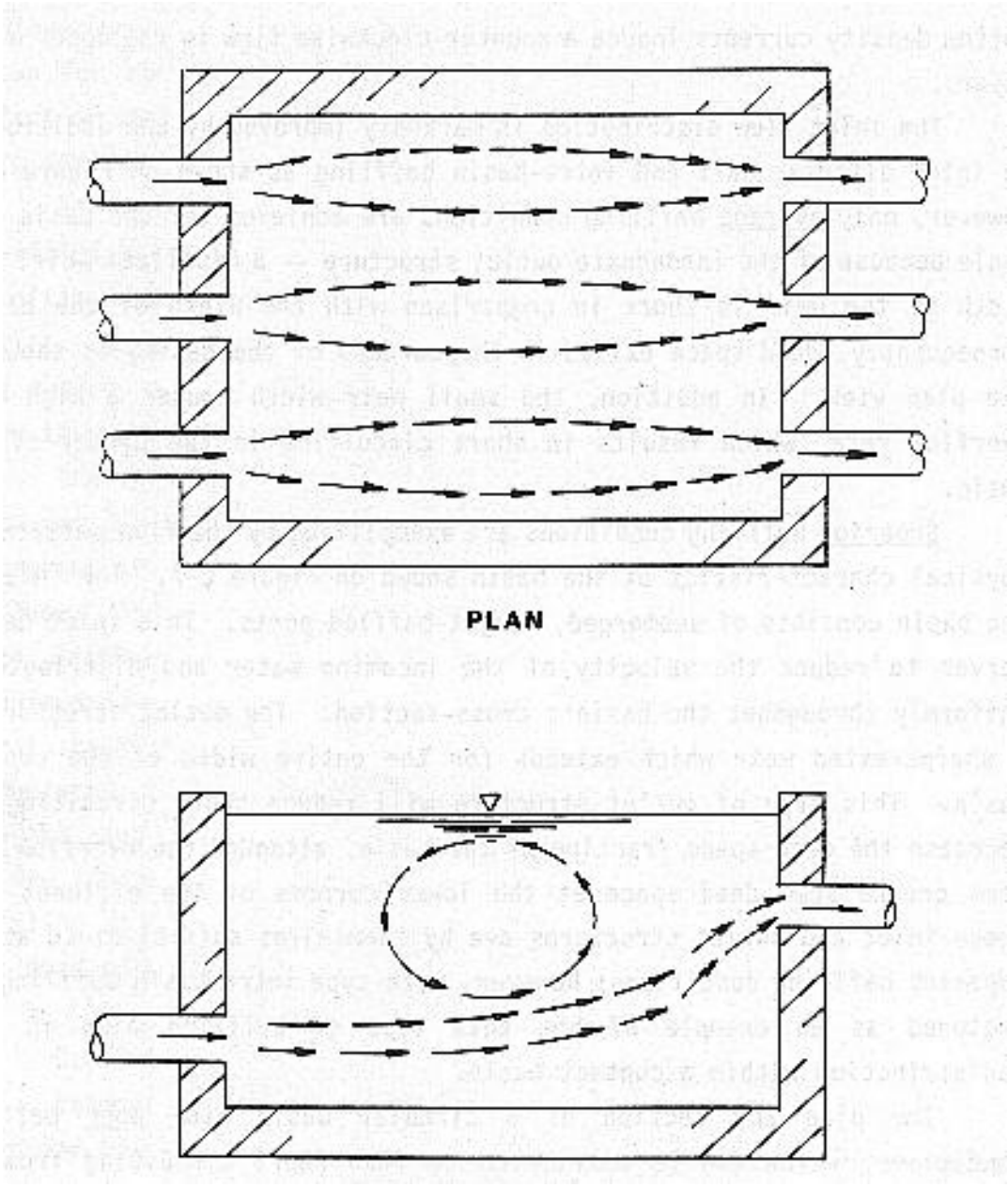
1) AWWA (1999). *Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies.* 5th Ed., American Water Works Association, McGraw-Hill, New York.

2) Hammer, M.J. and Hammer, M.J. Jr. (1996). *Water and Wastewater Technology*. Third Ed., Prentice Hall, New Jersey.

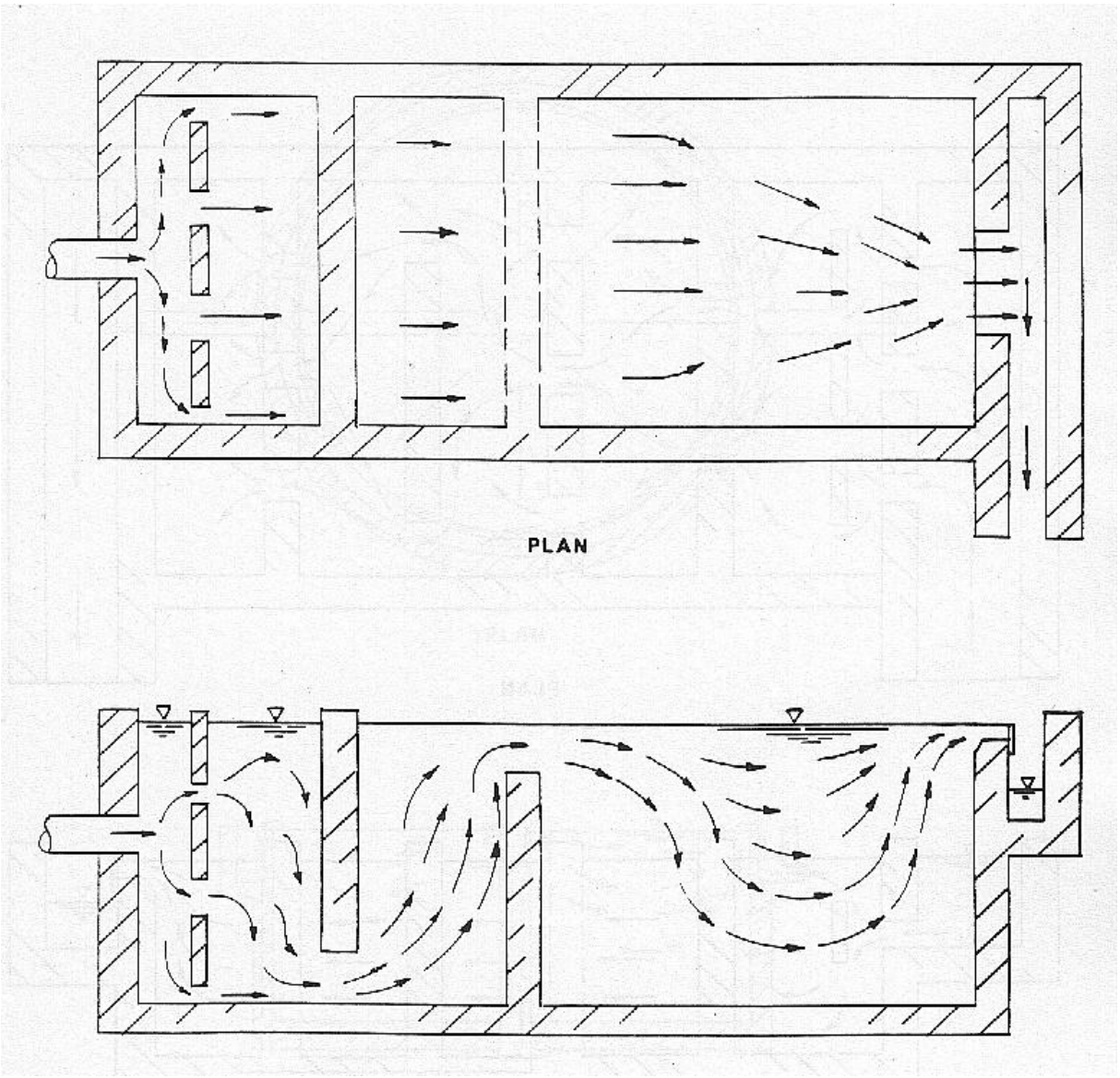
3) Malcolm Pirnie, Inc. and HDR Engineering (1990). *Guidance Manual for Compliance With the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources*. USEPA, Washington DC.

4) Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, New York.

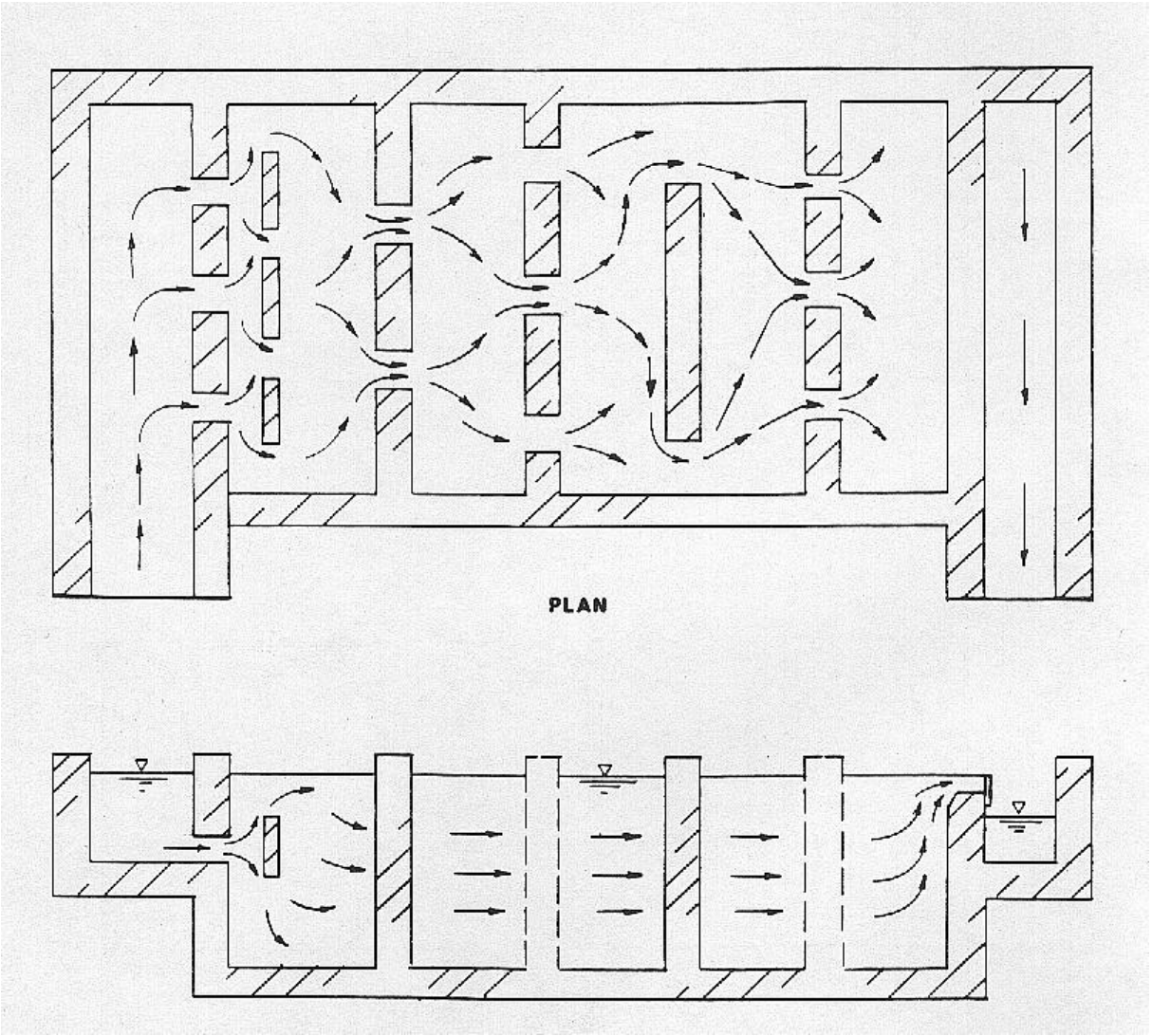
5) White, G. C. (1992). *The Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*. 3rd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.



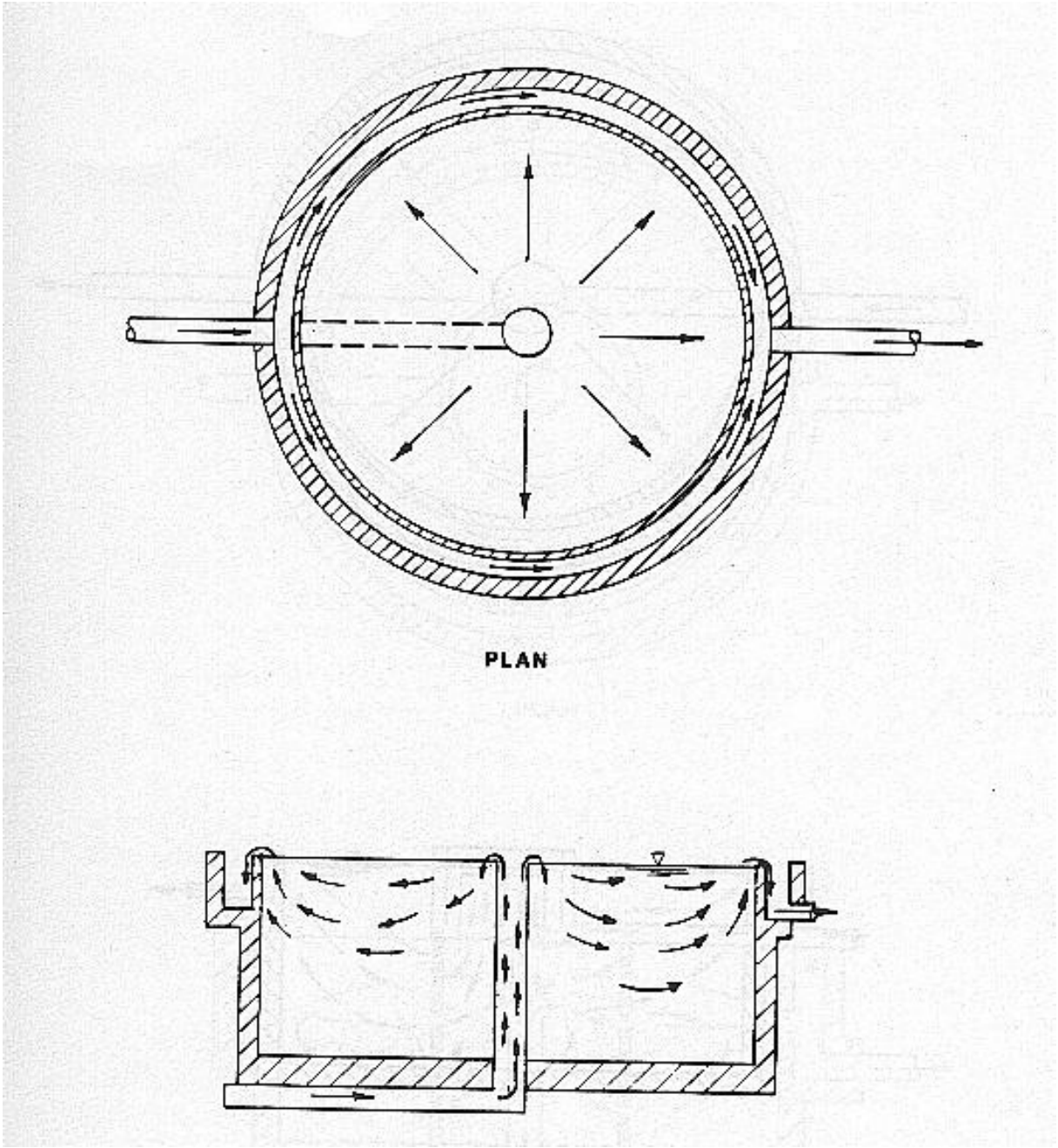
Şekil 2.a: Zayıf perdeleme örneği (diktörtgen temas tankı).



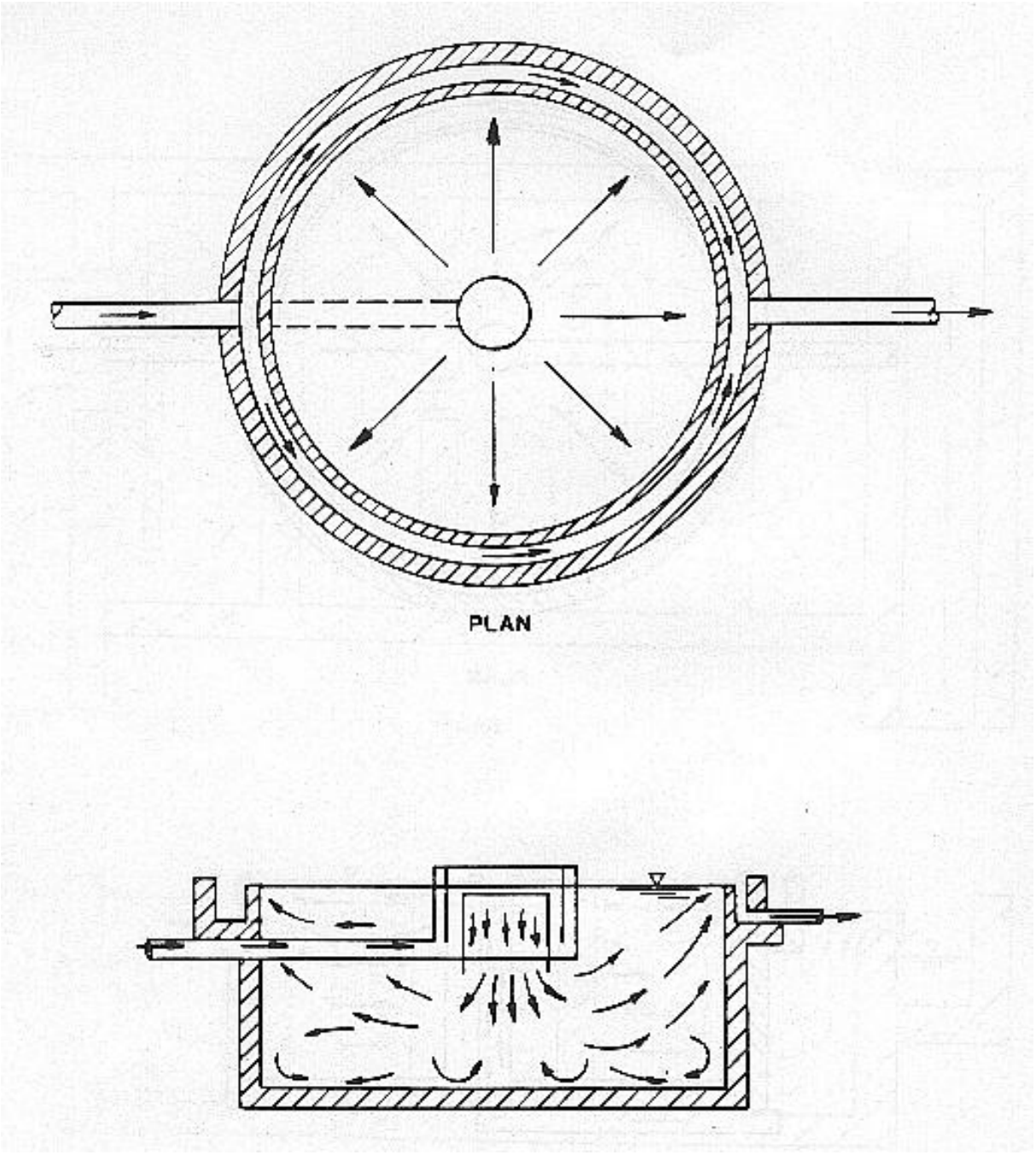
Şekil 2.b: Vasat perdeleme örneği (diktörtgen temas tankı).



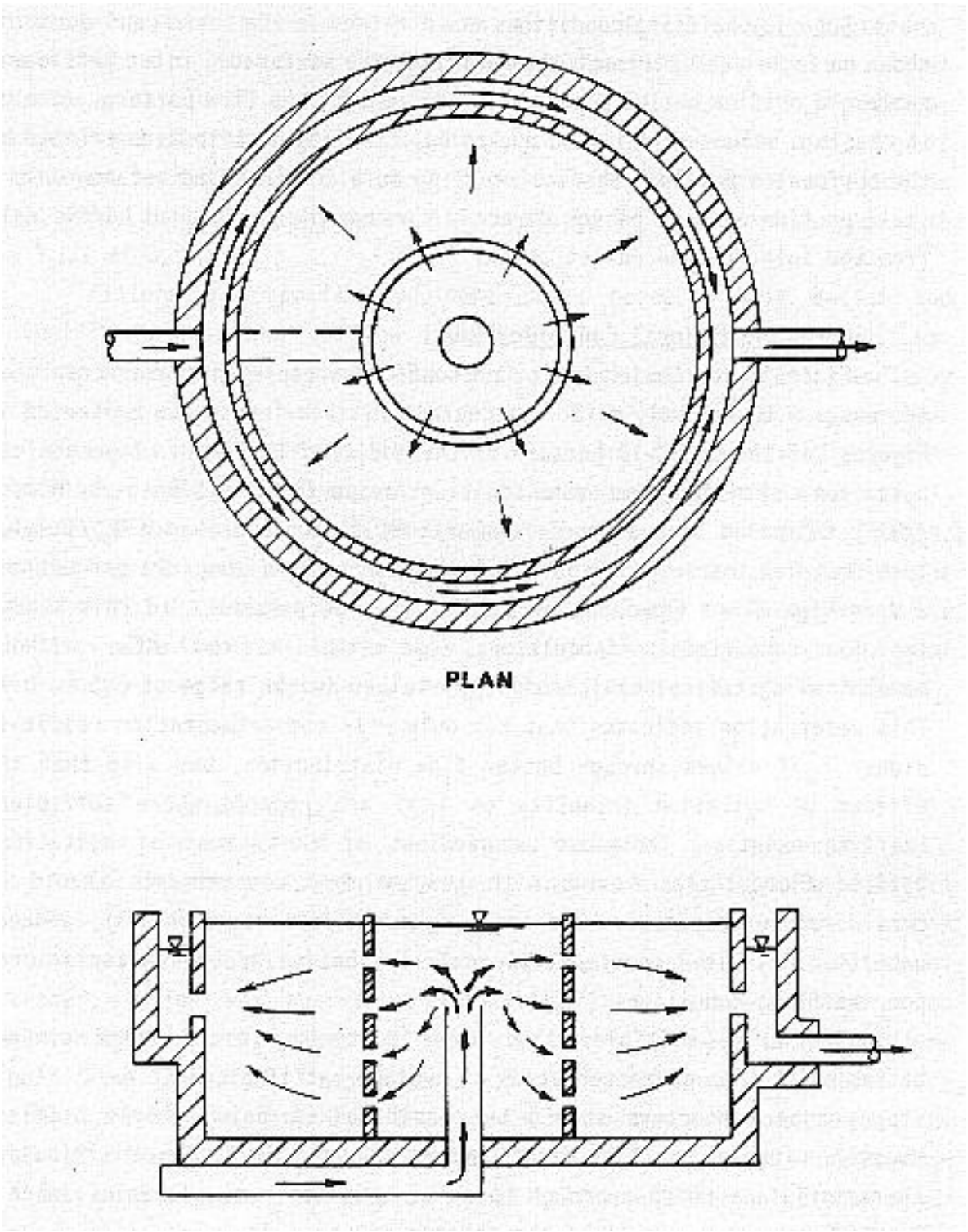
Şekil 2.c: İyi perdeleme örneği (diktörtgen temas tankı).



Şekil 2.d: Zayıf perdeleme örneği (daire biçiminde temas tankı).



Şekil 2.e: Vasat perdeleme örneği (daire biçiminde temas tankı).



Şekil 2.f: İyi perdeleme örneği (daire biçiminde temas tankı).