

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇÖP SIZINTI SULARININ
NANOFİLTRASYON İLE ARITILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çev. Müh. Metin Selman TOPACIK
(501011877)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Haziran 2006**

MAYIS 2006

ÖNSÖZ

Başta değerli danışman hocam Prof. Dr. Hasan Z. SARIKAYA olmak üzere, çalışmalarım esnasında yardımlarından ötürü, Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK, Prof. Dr. Lütfi AKÇA, Prof. Dr. Cumali KINACI ve ayrıca yardımları için Doç. Dr. İsmail KOYUNCU'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, hayatım boyunca her zaman desteklerini yanımda hissettiğim babam Prof. Dr. Dincer TOPACIK'a ve yardımlarından dolayı eşime ithaf ediyorum.

Mayıs, 2006

Metin Selman TOPACIK

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun Anlam ve Önemi	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Amacı	2
2. MEMBRAN İLE AYIRMA MEKANİZMASI VE MEMBRANLARIN YAPISI	3
2.1. Giriş	3
2.2. Membranların Yapısı	6
2.3. Membranların Karakteristikleri	8
2.4. Membran Tertip Tarzları	11
2.4.1. Spiral Sargılı Membranlar	11
2.4.2. Boşluklu Elyaf Membranlar	13
2.4.3. Tüp Şeklinde Membranlar	14
2.4.4. Plaka ve Çerçeve Membranlar	15
2.4.5. Kapiler Membranlar	16
2.4.6. Seramik Membranlar	17
3. MEMBRAN PROSESLER	18
3.1. Membran Prosesler	18
3.1.1. Mikrofiltrasyon (MF)	19
3.1.2. Ultrafiltrasyon (UF)	20
3.1.1. Nanofiltrasyon (NF)	21
3.1.1. Ters Osmoz (RO)	22
4. ÇÖP SIZINTI SULARINDA MEMBRAN UYGULAMALARI	27
4.1. Hollanda Wijster'de Nanofiltrasyon Uygulaması	27
4.2. Japonya Sasakura'da Nanofiltrasyon Uygulaması	30
4.3. İsviçre Spillepeng'de Nanofiltrasyon Uygulaması	33
4.4. Almanya Ihlenberg'de Ters Osmoz Uygulaması	34
4.5. Almanya Bassum'da Ters Osmoz Uygulaması	35
4.6. İtalya'da Ters Osmoz Uygulaması	36
4.7. Almanya Halle-Lochau'da NF İle Desteklenen Ters Osmoz Uygulaması	36
4.8. Almanya Breinermoor'da Ters Osmoz Uygulaması ...	37
4.9. Almanya Lamperttheimer'da Ters Osmoz Uygulaması	38
4.10. Fransa Arnouvilla'da Ters Osmoz Uygulaması	39
4.11. Hollanda West Friesland'da Ters Osmoz Uygulaması	40

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
5.1. Pilot Tesisin Tanıtımı ve Deneylerin Yapılışı	42
5.1.1. Pilot Tesisin Tanıtımı	42
5.1.2. Pilot Tesiste Kullanılan Membranlara ait Teknik Bilgiler	49
5.1.3. Pilot Tesiste Kullanılan Modüllere ait Teknik Bilgiler	51
5.1.4. Pilot Tesiste Kullanılan Kimyasallar	52
5.1.5. Pilot Tesisin Çalıştırılması	52
5.1.6. Deneylerin Yapılışı	54
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	55
6.1. Akı	55
6.2. Süzüntü	56
6.3. Akı-Süzüntü	57
6.4. Arıtılan Su Kalitesi	59
6.4.1. KOİ Giderimi	59
6.4.2. Toplam N Giderimi	60
6.4.3. NH ₄ Giderimi	60
6.4.3. İletkenlik Giderimi	62
6.5. Deşarj Standartları ile Karşılaştırma	63
6.6. Maliyetler	63
7. SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR	67
EK - 1	69
EK - 2	70
EK - 3	71
EK - 4	72
EK - 5	73
ÖZGEÇMİŞ	74

SEMBOL LİSTESİ

C_b : Besleme suyu konsantrasyonu
 C_k : Konsantre akımı konsantrasyonu
 C_{max} : Maksimum konsantrasyon
 C_s : Süzüntü akımı konsantrasyonu
 D : Difüzyon katsayısı
 ρ : Sınır tabakası kalınlığı
 ΔC : Konsantrasyon farkı
 ΔP : Basınç farkı
 $\Delta \pi$: Osmotik basınç farkı
 i : İyon sayısı
 j : Akı
 K_s : Çözünmüş maddelerin geçirimlik katsayısı
 μ : Akışkanın viskozitesi
 μ_1 : Süzüntünün viskozitesi
 MF : Mikrofiltrasyon
 $MWCO$: Moleküler ağırlık ekleme katsayısı
 NF : Nanofiltrasyon
 Q_b : Besleme suyu debisi
 Q_k : Konsantre debisi
 Q_s : Süzüntü debisi
 R : Geri dönüşüm oranı
 R_m : Membran direnci
 RO : Ters osmoz
 σ : Refleksiyon katsayısı
 SDI : Kil yoğunluk indeksi
 T : Sıcaklık
 UF : Ultrafiltrasyon
 v : hız
 V : Sınır tabakası üzerindeki hız
 y : Geri kazanım

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Bazı membranların tip ve yapıları.....	2
Tablo 2.2. Membran yüzey alanı / birim hacim oranları.....	14
Tablo 4.1. Pilot tesis sonuçları.....	29
Tablo 4.2. <u>NF çıkış suyu parametreleri</u>	31
Tablo 4.3. <u>Nanofiltrasyon tesisi işletme parametreleri</u>	32
Tablo 4.4. <u>Spillepeng düzenli depo alanında NF membranı ile ağır metal giderimi</u>	34
Tablo 4.5. <u>Ihlenberg düzenli depo alanı ters osmoz tesisi sonuçları</u>	34
Tablo 4.6. <u>Bassum düzenli depo alanı süzüntü suyu kalite parametreleri</u>	35
Tablo 4.7. <u>Triper ters osmoz sistemi ile A,B,C ve D düzenli depo alanlarında yapılmış deney sonuçları</u>	36
Tablo 4.8. <u>Halle-Lochau düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi</u>	37
Tablo 4.9. <u>Breiner Moor düzenli depo alanı süzüntü suyu kalite parametreleri</u>	38
Tablo 4.10. <u>Lampertheimer düzenli depo alanı sızıntı suyu kalite parametreleri</u>	39
Tablo 4.11. <u>Arnouvilla düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma sonuçları</u>	40
Tablo 4.12. <u>MBR’da arıtılan atıksu kaynakları ve karakteristikleri</u>	41
Tablo 4.13. <u>MBR ‘daki işletme değerleri ve arıtma verimleri</u>	41
Tablo 5.1. Ham çöp suyunun genel karakteristiği	47
Tablo 5.2. MBR ünitesinden çıkan çöp sızıntı suyunun karakteristiği	48
Tablo 5.3. Nanofiltrasyon ünitesinin giriş ve çıkış çöp sızıntı suyu karakteristiği	49
Tablo 5.4. Kullanılan Nanofiltrasyon membranı modülü ölçüleri	52
Tablo 6.1. Akı ile süzüntünün ters orantılı olduğunu açıklaya örnek veriler....	58
Tablo 6.2. Alıcı Ortam Dere Deşarj Limit Değerleri	63
Tablo 6.3. Alıcı Ortam Dere Deşarj Limit Değerleri ile karşılaştırma	63

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Times New Roman, 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Times New Roman, 12 nk

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Membran giriş ve çıkış akımları.....	4
Şekil 2.2 : Membran ve kesitlerinin şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.3 : Spiral sargılı membran.....	12
Şekil 2.4 : Spiral sargılı Membran kabı.....	12
Şekil 2.5 : Boşluklu elyaf membranlar.....	14
Şekil 2.6 : Tüp şeklinde membranlar.....	15
Şekil 2.7 : Plak ve çerçeve membranlar.....	16
Şekil 2.8 : Kapiler membranlar.....	16
Şekil 2.9 : Modül içinde kapiler Membran borucukları.....	16
Şekil 3.1 : Osmoz ve ters osmoz sistemlerinin şematik şekli.....	23
Şekil 4.1 : Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisi mevcut sistemi.....	27
Şekil 4.2 : Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde yapılması planlanan sistem.....	29
Şekil 4.3 : Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan nanofiltrasyon pilot tesisindeki membranlar.....	30
Şekil 4.4 : Nanofiltrasyon pilot tesisinde giriş ve çıkış numuneleri.....	31
Şekil 4.5 : <u>Sasakura çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan pilot nanofiltrasyon tesisi</u>	32
Şekil 4.6 : <u>Sasakura çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan nanofiltrasyon üniteleri</u>	33
Şekil 4.7 : <u>Ters osmoz modülleri arkada nanofiltrasyon modülleri</u>	35
Şekil 4.8 : <u>Bassum düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi şematik akım diyagramı</u>	37
Şekil 4.9 : <u>Halle-Lochau düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi</u>	38
Şekil 4.10 : <u>Breiner Moor düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi akış diyagramı</u>	39
Şekil 4.11 : <u>Lampertheimer düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi şematik akım diyagramı</u>	43
Şekil 5.1 : Mevcut çöp sızıntı suyu arıtma tesisinin üniteleri.....	43
Şekil 5.2 : Pilot tesisi ve genel görünüş.....	44
Şekil 5.3 : Pilot tesis önden görünüş.....	44
Şekil 5.4 : Pilot tesis yandan görünüş.....	45
Şekil 5.5 : Pilot tesis içi ve Nanofiltrasyon membranları.....	45
Şekil 5.6 : Süzüntü tankları ve bağlantıları	46
Şekil 5.7 : Pilot tesis kontrol ekranı.....	49
Şekil 5.8 : Kapiler membran boruları.....	51
Şekil 5.9 : Kullanılan membran modülü.....	51
Şekil 5.10 : Membran modülü ölçüleri.....	53
Şekil 5.11 : Nanofiltrasyon ünitesi akım şeması.....	56
Şekil 6.1 : NF membranında akı-zaman grafiği.....	57
Şekil 6.2 : NF membranında süzüntü-zaman grafiği.....	57
Şekil 6.3 : NF membranında akı-süzüntü-zaman grafiği.....	58
Şekil 6.4 : Konsantre hattındaki vananın akı ve süzüntüye etkisi.....	60
Şekil 6.5 : NF membranında KOİ Giderimi-süzüntü-zaman grafiği.....	

Bicimlendirilmiş: Yazı tipi: Times New Roman, 12 nk

Bicimlendirilmiş: Yazı tipi: Times New Roman, 12 nk

Şekil 6.6	: NF membranında Toplam-N Giderimi-süzüntü-zaman grafiği...	61
Şekil 6.7	: NF membranında NH ₄ Giderimi-süzüntü-zaman grafiği.....	61
Şekil 6.8	: NF membranında İletkenlik Giderimi-süzüntü-zaman grafiği.....	62

ÇÖP SIZINTI SULARININ NANOFİLTRASYON İLE ARITILMASI

ÖZET

Nanofiltrasyon membranları, çöp sızıntı sularının arıtılması için kullanılmıştır. Pilot tesis çalışması, her biri 3,6 m² membran alanına sahip olan üç adet ince film kompozit tip nanofiltrasyon membranları ile yürütülmüş, sistem, debi ölçer, manometre, kimyasal dozlama üniteleri, membran ünitesi ve pompalar ile donatılmıştır. Nanofiltrasyon için süzöntü oranı %80 civarında olmaktadır. Süzöntü akısı zamana bağlı olarak yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Süzöntü akısında aşağı ve yukarı oynamalar giren suyun karakterinin sabit olmamasından kaynaklanmaktadır. Süzöntü akısı ile süzöntü oranının birbirleri ile ters orantılı oldukları görülmüştür. Bunun nedeni, süzöntü oranını değiştirmek için konsantre hattındaki vana açılınca, membran içindeki suyun konsantresi azalmakta ve süzöntü debisi ile süzöntü akısı artmakta, bunu ile beraber konsantre debisi ile süzöntü debisi arttığından dolayı da giriş debisi artmaktadır. Giriş debisinin artış oranı, süzöntü debisinin artışına göre çok daha fazla olduğundan dolayı süzöntü akısı artarken süzöntü oranı azalmaktadır. KOİ giderimi %65 civarında olmaktadır. Toplam N giderimi %15, NH₄ giderimi %20 mertebesinde olmaktadır. Nanofiltrasyonda azotlu bileşiklerin giderim verimleri düşük olmaktadır. İletkenlik çöp sızıntı suyunda 30.000 mS/cm gibi çok yüksek bir düzeydedir. Nanofiltrasyon ile iletkenlik giderme ise ortalama olarak %6 civarındadır. Çöp sızıntı suyunda iletkenliğin ana kaynağı Na⁺ ve Cl⁻ iyonlarının çok fazla olup nanofiltrasyon membranından büyük bir oranda geçmelerinden kaynaklanmaktadır. Nanofiltrasyon iki değerlikli Ca⁺² ve Mg⁺² değerlikli iyonları büyük ölçüde tutuyor olsa bile iki değerlikli iyonların oranı, Na⁺ ve Cl⁻ gibi tek değerlikli iyonlara oranı çok düşük olduğundan iletkenlik giderimi de düşük olmaktadır. Alıcı ortam deşarj değerlerinde iletkenlik, Na⁺ ve Cl⁻ iyonları sınırlayıcı olmadığından ve alıcı ortamda yeterli seyrelme olduğunda problem oluşturmayacağı düşünülmektedir. Trans membran basıncı 5 barda çalışılmıştır. Sonuç olarak, çöp sızıntı suları nanofiltrasyon ile arıtılarak, alıcı ortam deşarj limitlerine yaklaşıldığı, çöp sızıntı suyunun maliyetli bir şekilde taşınarak, İSKİ'nin evsel Atıksu arıtma tesisleri'ne deşarj edilerek bu tesislerin yükünü artırmasına da gerek kalmadan, yerinde arıtılabileceği ortaya konulmuştur.

LEACHATE TREATMENT BY NANOFILTRATION

SUMMARY

Nanofiltration is used for leachate treatment. The membrane area is 3,6 m² per each of the three thin film capillary composite nanofiltration membrane used in pilot study. System consists of flowmeter, manometer, chemical dosing unit, membrane unit, and pumps. The permeate rate for the nanofiltration is about 80 %. Permeate flux is approximately stable related with time. Up and down curves at the permeate flux is due to the instable characteristics of the influent. It has been seen that the permeate flux to permeate rate is inverse proportion. The reason of this, when the valve on the concentrate line turns up for changing the permeate rate, the concentration of the waste water in the membrane decreases, permeate flow and permeate flux increases, beside this, influent flow increases due to increasing of concentrate flow and permeate flow. Permeate ratio decreases when the permeate flow increases due to increasing rate of the influent flow is more than the increasing of the permeate flow. COD removal is about 65 %. Total removal is about 15 %, NH₄ removal is about 20%. The removal rate of the N compounds is low. Conductivity at the leachate is at a high value as 30.000 mS/cm. Conductivity removal ratio by nanofiltration is about 6 %. The main reason of the high conductivity at the leachate is the content of too much Na⁺ ve Cl⁻ ions. The reason of the low conductivity removal is the mostly passing of the nanofiltration membranes of these monovalent ions. Even though, nanofiltration mainly prevent passing of the bivalent ions as Ca⁺² ve Mg⁺², these bivalent ions ratio is very low comparing to monovalent ions ratio so the conductivity removal is low. Due to there is no limitation for discharge for conductivity, Na⁺ and Cl⁻ ions, and if there will be enough dilution at the discharge point, it is thought that no problem will be occurred. TMP of the pilot is about 5 bar. In conclusion, it can be seen that the leachate can be treated by nanofiltration on site approaching the similar discharge limits, without needing to transfer the leachate to ISKI municipal waste water treatment plant and increasing the load of these units.

1 GİRİŞ

1.1 Konunun Anlam ve Önemi

Çöp sızıntı suyu kirlilik parametreleri çok yüksek olan bir atıksudur. Dünyada arıtılması en zor olan atıksuların başında gelmektedir. Ülkemizde de çöp sızıntı suları problem oluşturmaktadır. Türkiye'deki çöp sızıntı sularının Avrupa'daki çöp sızıntı suları ile karşılaştırıldığında kirlilik parametreleri açısından çok daha kirli bir atıksu olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çöpün ayrı ayrı toplanmaması, muhteviyatındaki organik madde, plastik vb. atıkların çözünerek çöp sızıntı suyuna karışmasıyla kirlilik parametrelerinin artmasına neden olmaktadır.

Şu anda çöp sızıntı suyu yeteri kadar arıtılamadığı için kamyonlarla taşınmakta ve bu çok maliyetli olmaktadır. Çok yüksek seviyede kirlilik içeren çöp sızıntı suyu doğrudan İSKİ 'nin evsel atıksu arıtma tesislerine gönderildiğinden dolayı bu tesislerin atıksu giriş parametrelerini yükseltmekte ve yükünü artırmaktadır. Taşıma maliyeti yaklaşık 6 Euro/m³ olup oldukça yüksek bir maliyete sahiptir.

Yukarıda saydığımız nedenlerden dolayı çöp sızıntı suyunun yerinde arıtılarak, alıcı ortama verilmesi daha uygun bir çözüm yöntemi olabilir. Bu nedenle İstanbul Anadolu yakası düzenli depolama sahasında genç çöp sızıntı suyunun nanofiltrasyon ile arıtılarak alıcı ortama deşarj edilip edilemeyeceği araştırılmıştır.

1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Çöp sızıntı sularında en önemli parametrelerin başında KOİ, BOİ, NH₄ ve toplam azot gelmektedir. İstanbul Anadolu yakası düzenli depolama sahasında genç çöp sızıntı suyunun, arazide kurulan, nanofiltrasyon membranı ile çalıştırılan pilot tesiste

arıtılması ile bu parametrelerin ne kadar giderildiği ve alıcı ortam deşarj standartlarını yakalayıp yakalamadığı araştırılmıştır. Bu pilot çalışma kapsamında nanofiltrasyon ünitesinin girişinden ve süzüntü çıkışından alınan numunelerde, KOİ, NH₄-N, toplam azot deneysel çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, iletkenlik, sıcaklık, pH, giriş basıncı, çıkış basıncı, TMB, giriş debisi, konsantre debisi ve arıtılmış su debisi ölçümleri yapılmıştır.

2 MEMBRAN İLE AYIRMA MEKANİZMASI VE MEMBRANLARIN YAPISI

2.1 Giriş

1950' li yılların sonlarına doğru geliştirilmeye başlayan membran prosesler, günümüzde çok önemli bir konuma gelmiştir. Membranlar ,ilk olarak , deniz suyundan içme suyu elde etmek amacıyla kullanmaya başlandı. Son 25 yılda farklı ayırma prensiplerine ve mekanizmalara sahip çok sayıda membran prosesi geliştirildi.

Membran su akımına bir engel teşkil ederek sudaki çözünmüş ve partiküler maddelerin ayrılmasını sağlayan, organik veya inorganik polimerlerden yapılan geçirgen veya yarı geçirgen bir malzemedir.

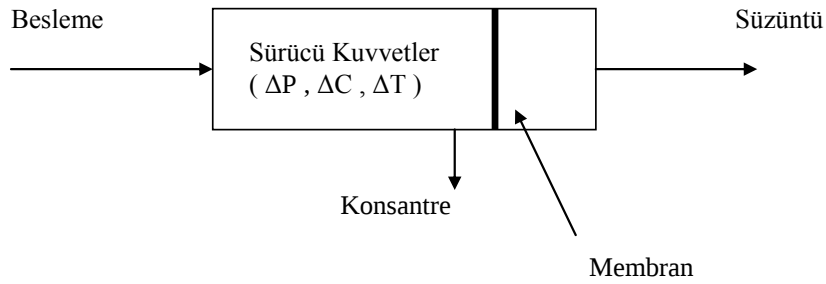
Membran ile ayırma olayı, membranın kimyasal ve fiziksel yapısına bağlıdır. Ayırma ve verimi çözeltide bulunan çözünmüş madde ve partiküler madde konsantrasyonlarına bağlıdır.

Membranlar genel olarak ;

- 1-Sıvılardan ve gazlardan mikron boyutundaki partiküllerin filtrasyonu,
- 2-Sadece iyonik türlerin ayırımı,
- 3-Sıvılardan kolloidlerin ve büyük ölçekli moleküllerin ayırımı,
- 4-Sıvılardan bütün askıda katı veya çözünmüş maddelerin ayırımı,

5-Konsatre çözelti elde etmek,
gibi amaçlar için kullanılmaktadır. (Bilstad 1997) .

Ayırma işleminde, besleme çözeltisi sürücü kuvvetlerin (ΔP , ΔC , ΔT) etkisiyle membran yüzeyinden süzülerek membranın diğer tarafına geçmektedir. Membrandan geçen akım süzüntü akımı, geçemeyen akım ise konsantre akımı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1 de bu akımların şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.1: Membran giriş ve çıkış akımları

Süzüntü suyu membran üzerindeki deliklerden geçerken içinde bulunan çözünmüş ve partiküler maddeleri membran yüzeyinde bırakır. Konsantre akım, membrandan geçemeyen maddeleri taşır ve membran yüzeyinden uzaklaştırır.

Konsantre akımın ve süzüntü akımının karakteristiği, membran tipine, membran malzemesine ve membran üretim amacına bağlıdır.

Membranların performansı, akı miktarına, membranların seçiciliğine veya alıkoyma özelliğine bağlıdır. Akı, birim zamanda membranın birim alanından geçen akım miktarıdır ve $m^3/m^2 \cdot \text{saat}$ birimleri ile ifade edilir. Membranın seçiciliği, membrandan geçenlerin ölçüsü, alıkoyma ise membrandan geçemeyen kısmın ölçüsüdür. İdeal bir membranda, akı miktarı ve seçicilik yüksektir.

Membran proseslerde, membran seçiciliği geri dönüş oranı (R) ile ifade edilmektedir.

$$R = 100 - \text{Membrandan geçen kısım yüzdesi} \quad (2.1)$$

olup

$$R (\%) = (C_b - C_s) / C_b = 1 - (C_s / C_b) \quad (2.2)$$

ile ifade edilir. Burada,

C_s : Süzüntü suyu akımı konsantrasyonu,

C_b : Besleme suyu konsantrasyonu,

dır. R birimsiz bir büyüklük olup 0 ila 1 arasında bir değer alır. R, “ 1 “ ise membrandan hiçbir madde geçememiştir, “ 0 “ ise bütün çözünmüş maddeler membrandan geçmiştir.

Gerçek geri dönüş oranı (R') ise

$$R' = 1 - (C_s / C_m) \quad (2.3)$$

bağlantısı ile ifade edilir. Burada,

C_m : Membran yüzeyi konsantrasyonu,

dur (Gekas 1988). Geri kazanım (y), besleme akımının süzüntü akımına dönüşen kısmının bir ölçüsüdür. Geri kazanım aşağıda verilen bağıntı ile gösterilir;

$$y (\%) = (Q_b - Q_k) / Q_k = Q_s / Q_b \quad (2.4)$$

Burada,

Q_b : Besleme suyu debisi,

Q_s : Süzüntü suyu debisi ,

Q_k : Konsantre kısmın debisi' dir.

Membran proseslerde, prosesin verimine etki eden faktörler; besleme suyu hızı, besleme suyunun çözünmüş ve partiküler madde konsantrasyonu, çözünmüş maddelerin cinsi, basınç (ΔP) ,sıcaklık (ΔT) ve pH.

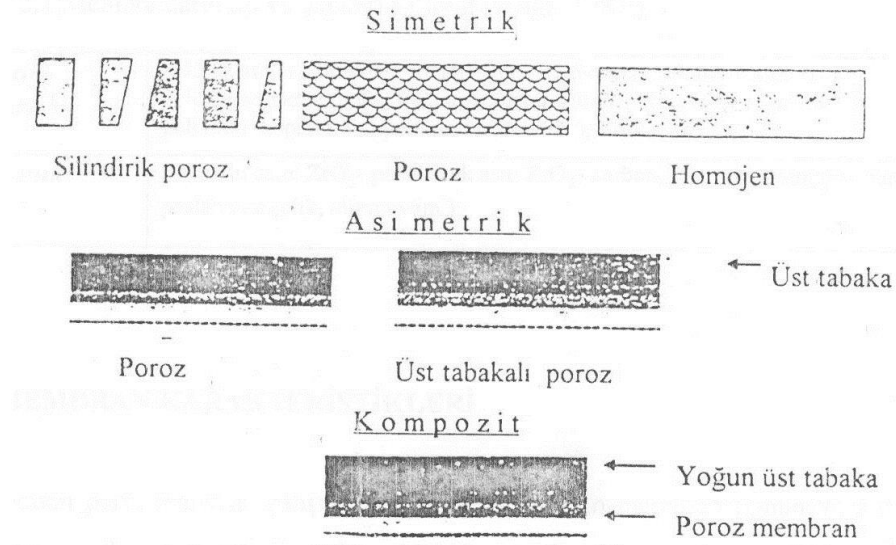
2.2 Membranların Yapısı

Membran proseslerde kullanılan membranlar, yapılarına göre doğal veya sentetik, organik veya inorganik, boşluklu veya boşluksuz, simetrik veya asimetrik membranlar olarak gruplandırılırlar.

Membran proseslerde, ayırma membranın fiziksel veya kimyasal yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Arıtılabilirlik, membran tipi veya sıvı özelliğine bağlıdır.

İlk asimetrik ve selüloz membranlar 1960 lı yıllarda geliştirilmiş ve daha sonraları geniş pH ve sıcaklık aralıklarına dayanıklı selüloz olmayan membranlar yapılmıştır (DOE, 1990).

Simetrik membranların (boşluklu veya boşluksuz) kalınlıkları 10-200 μm arasında değişmektedir. Asimetrik membranlar, üniform olmayan bir yapıya sahiptirler ve kalınlıkları 10-200 μm arasında değişmektedir. Bu membranların 0.1-0.5 μm kalınlığında oldukça yoğun bir üst tabaka ile 50-150 μm arasında değişen boşluklu bir alt tabakadan oluşur (Mulder 1991). Şekil 2.2 de membran kesitlerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2: Membran kesitlerinin şematik gösterimi (Mulder, 1991)

İdeal bir membran, kimyasal ve mikrobiyolojik etkilere karşı dirençli olmalı, uzun çalışma sürelerinde arıtma verimi mekanik karakteristikleri değişmemelidir (Williams ve dğr. 1990).

Membranların tıkanmaya karşı direnci ve tıkanmadan sonra kolay temizlenebilme özelliği membran seçiminde önemli bir faktördür (Mulder, 1991).

Organik maddelerin ana maddesi polimerlerdir. İnorganik membranlar kimyasal ve termal olarak organik membranlara göre daha dayanıklıdır.

Selüloz olmayan membranlar, organik maddelerin ayrılmasında ve akı miktarında selüloz membranlardan daha iyi bir performans gösterirler (Williams ve dğr. 1990).

Ters ozmos prosesinde yaygın olarak kullanılan membranlar asimetrik veya ince film kompozit yapıdadırlar. Bu membranlar Nanofiltrasyon prosesinde de kullanılmaktadır.

Tablo 2.1 de bazı membranların tip ve yapıları verilmiştir.

Tablo 2.1: Bazı membranların tip ve yapıları (Lloyd ve dğr. 1985)

Organik Polimerik	Selüloz asetat (Selüloz 2- asetat, selüloz2.5- asetat), Selüloz rejenerat, polisulphone, polieter sulfone, Poliamid (aromatik poliamid, kopoliamid, poliamid hidrazide)
İnorganik	Boşluklu cam, ZrO_2 – poliakrilik asit , ZrO_2 – karbon, metaller (kurşun, gümüş , paslanmaz çelik , alüminyum)

2.3 Membran Karakteristikleri

Membranın performansına, çalışma şartlarının, kullanılan membran tipinin ve sistem tasarımının çok büyük etkisi vardır. Maksimum akı elde etmek ve iyi bir arıtma gerçekleştirmek için sağlanması gereken birçok koşul vardır. Membranın çalışma şartlarına etki eden bazı faktörler; konsantrasyon polarizasyonu, partiküler ve bakteriyel kirlenme ve organik adsorpsiyondur (Scott, 1995).

Membran proses tasarımında aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

1- Çözeltildeki değişkenler:

- askıda katı maddeler
- çözünmemiş organik ve inorganik maddeler
- mikroorganizmalar
- organik çözücüler ve okside olmuş kimyasallar
- sıcaklık ve pH

2-Ön arıtma gereksinimi

3-Membrandaki değişkenler:

- membranın polimer tipi ve geometrik yapısı
- model düzenlemeleri
- istenen akı miktarı ve membrandan elde edilebilecek akı miktarı

- geri kazanılan sıvı miktarı ve konsantrasyonu
- akış hızı ve basınca dayanıklılığı
- temizlenme gereksinimi

4-Membranın, membran proseslerle etkileşimi

Karakterizasyonu iyi sıvılar için membran performansı, çalışma şartlarındaki değişkenlere bağlı olarak tahmin edilebilir. Membran performansını tahmin etmek için geliştirilmiş nümerik çözümler vardır. Tüm koşullar için analitik bir çözüm yoktur (Scott, 1995).

Membran proseslerde kullanılacak membran tipi belirlenirken göz önünde tutulması gereken birçok değişkenler vardır. Bunlar;

a - Sıcaklığa dayanıklılık:

Besleme suyundaki sıcaklık artışları membranın bozulmasına ve çabuk hidroliz olmasına sebep olur. Özellikle plastik malzemeden yapılmış membranlar sıcaklıktan çok etkilenirler. Ters ozmos prosesinde, sistemin verimi açısından genellikle 25 °C sıcaklıkta çalışır. Selüloz asetat membranlar 35- 40 °C sıcaklıklara dayanıklıdır. Seramik membranlara uygulanan sıcaklık 800 °C ye kadar çıkabilmektedir.

b - pH' ya dayanıklılık:

pH membranların gerek performansları gerekse ömürleri açısından önemlidir. Membranlar için pH aralığı 3-8 dir. Polyamid malzemeden yapılmış membranlar için pH çok önemlidir. Polyamid membranlar için tavsiye edilen pH aralığı 4-6 dır. Bu membranlar 4'den küçük 7'den büyük pH değerlerinde çok hızlı hidroliz olurlar. Asidik ve bazik koşullarda hidroliz hızı çok yüksektir (Scott, 1995).

c - Basınca dayanıklılık:

Membran proseslerinin işletilmesinde en önemli etken beslenme suyu basıncıdır. Sıvı akışı basınçla doğru orantılıdır. Basınç ters ozmos proseslerinde turbülanslı akım

oluşturmaktadır. Böylece membran üzerinde çökelti oluşması nlenerak membran veriminin düşmesi önlenmektedir.

Normalden yüksek basınç uygulamaları, membranın yapısını bozmaktadır. Her bir membran için ayrı basınçlar uygulanmaktadır. Mikrofiltrasyonda < 2 bar, ultrafiltrasyonda 1-8 bar, nanofiltrasyonda 10-30 bar, ters ozmos da 10-100 bar basınç uygulanmaktadır (Mulder, 1991).

d - Kimyasal dayanıklılık:

Membranın kimyasal yapısı çözeltiye uygun ve dayanıklı olmalıdır. Bazı znmş organik maddeler membranda bozulmalara sebep olur. Membranlarda kullanılan ğ polimerler pek çok organik bileşikte çözünebilirler.

Selüloz asetat membranlar klora dayanıksız olduklarından bu membranların besleme çözeltileri klor içermemelidir.

e - Mekanik kararlılık:

Membran yüzeyindeki tabaka kırılğan bir tabaka olduğundan yüksek basınçlardan etkilenmektedir. İyi bir membranın yüksek basınç altında mekanik dayanıklılığı yüksek olmalıdır. Besleme çözeltisindeki basınç değişmelerinden etkilenmemelidir. (Riley, 1989).

f - Ekonomik zellikler:

Genel olarak membranlar yüksek geçirgenlik, iyi bir seçicilik ve düşük maliyete sahip olmalıdır. Ekonomik zellik membran seçiminde önemlidir. Kullanılacak olan membranın, çalışma ömrünün uzun, maliyetinin düşük, alan ihtiyaının az ve nakliye kolay olması istenir.

2.4. Membran Tertip Tarzları

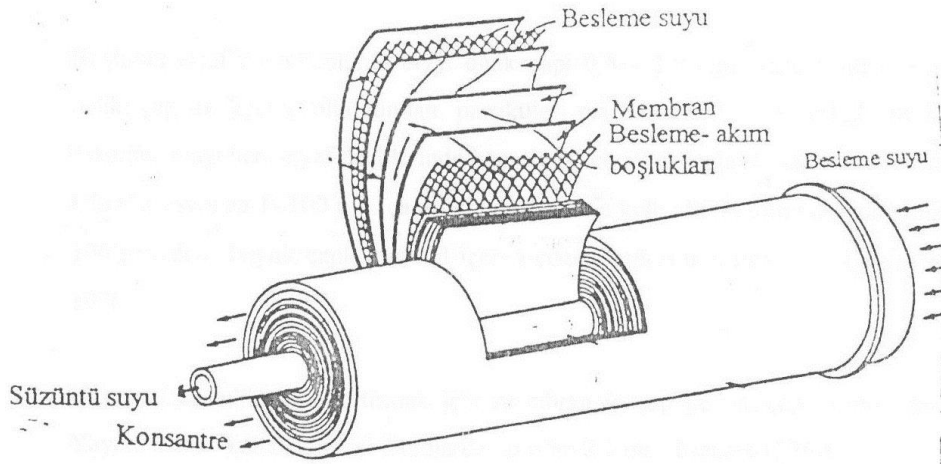
Genel olarak membranlar; Spiral sargılı membranlar, boşluklu elyaf membranlar, tüp şeklinde membranlar ve plak ve çerçeve membranlar olmak üzere sınıflandırılırlar.

2.4.1. Spiral sargılı membranlar

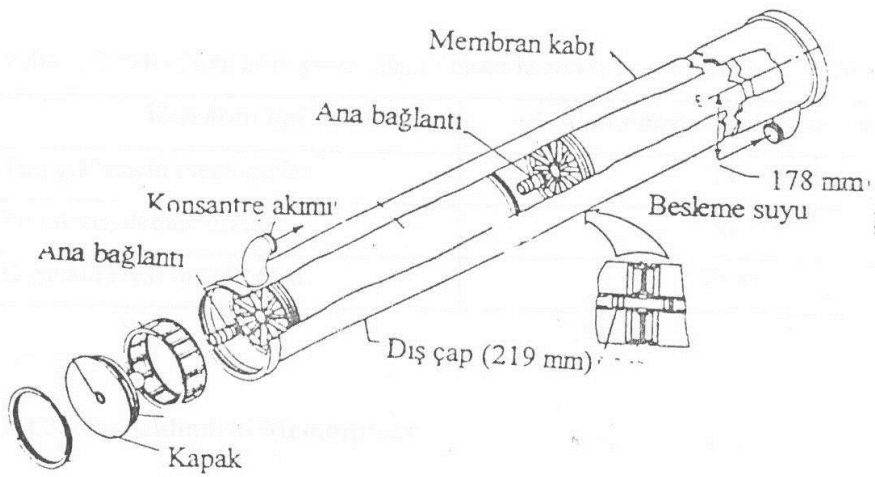
Membran malzemesi, süzüntü suyunun toplandığı bir tüp etrafına rulo halinde sarılmıştır. İki membran arasında gözenekli bir yapı vardır. Şekil 2.3 de spiral sargılı membranların düzenleme şekli verilmiştir.

Spiral sargılı membranlarda, besleme suyu membranın dış yüzeyinden merkeze doğru süzülür. Süzüntü suyu membran ortasındaki toplama tüpünde toplanarak uzaklaştırılır. İlk olarak 1960 ' lı yılların sonlarına doğru tek sargılı membran ortaya çıkmıştır. Tek sargılı membran, iki membran arasına tek katman gözenekli yapı konularak oluşturulur. Zamanla bu tip membranlar geliştirilerek sistem çok sayıda membran tabakasından yapılmaya başlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan spiral sargılı membranların çapı 203-279 mm, uzunluğu 1-1.5 m ve alanları 30-65 m² (Riley, 1989). Spiral sargılı membranlarda selüloz asetat ve kompozit membranlar kullanılır.

Membranlar bir membran kabı ile kullanılır. Bu kap, bir veya bir çok membranı içine alabilecek şekilde, paslanmaz çelik, PVC ve fiberglas malzemeden yapılabilir. Şekil 2.4 de spiral sargılı membran dış kabı gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Spiral sargılı membran (Schierach, 1988)



Şekil 2.4: Spiral sargılı membran kabı (Osmonics, 1988)

2.4.2. Boşluklu elyaf membranlar

Küçük bir alana çok miktarda elyaf lifinin sığdırılmasıyla oluşturulmuştur. Şekil 2.5 de boşluklu elyaf membran gösterilmiştir.

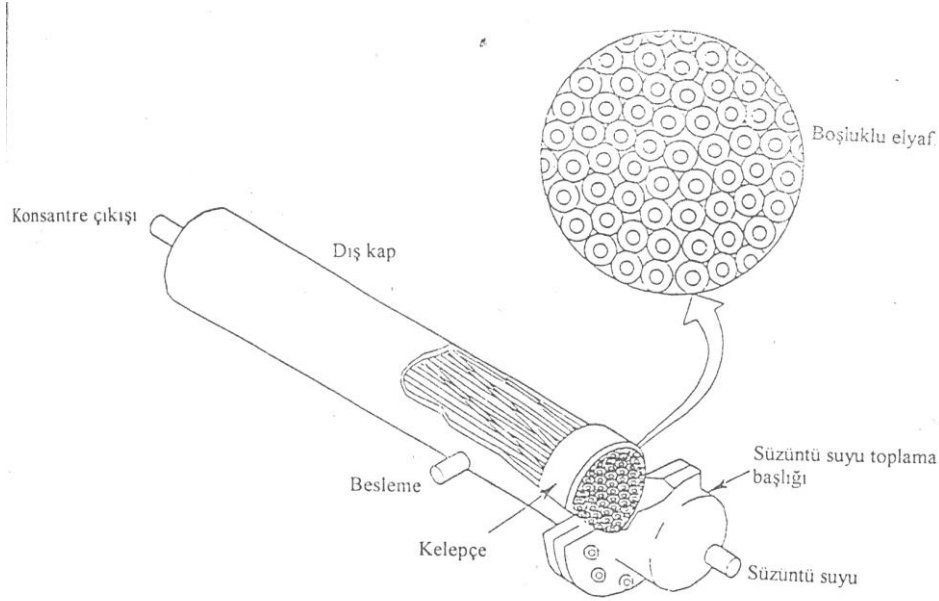
Membran bir dış kap içine yerleştirilir. Besleme suyu dış taraftan basınçlı bir şekilde kabın içine verilir. Süzüntü suyu iç bölmede toplanarak uzaklaştırılır.

Boşluklu elyaf membranlarda elyaf delik çapı 0.5- 2.5 mm arasında değişir. Elyaf delik çapları küçük olduğundan partiküler maddelerden çok çabuk tıkanır. Tıkanma olayı hem elyaf deliklerinde hemde iki elyaf arasında ki boşlukta olmaktadır. Ultrafiltrasyonda 1- 100 µm çaplı moleküllerin ve kolloidlerin tutulmasında kullanılır. 100 µm 'den büyük çaplı partikül içeren çözeltilerde ön arıtma gereklidir (Meares, 1976).

Duvar kalınlıkları yüksek olduğundan akı değeri ve verimleri düşüktür. Birim maliyetleri, üretilen süzüntü suyu başına diğer membran türlerine göre daha fazladır. Boşluklu elyaf membranların birim hacimdeki yüzey büyüktür(Meares, 1976). Tablo 2.2 de membran türlerinin yüzey alanı / birim hacim oranları gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Membran yüzey alanı / birim hacim oranları (Meares, 1976)

Membran tipi	Alan / birim hacim (m ² /m ³)
Tüp şeklindeki membranlar	30
Spiral sargılı membranlar	90
Boşluklu elyaf membranlarda	1500

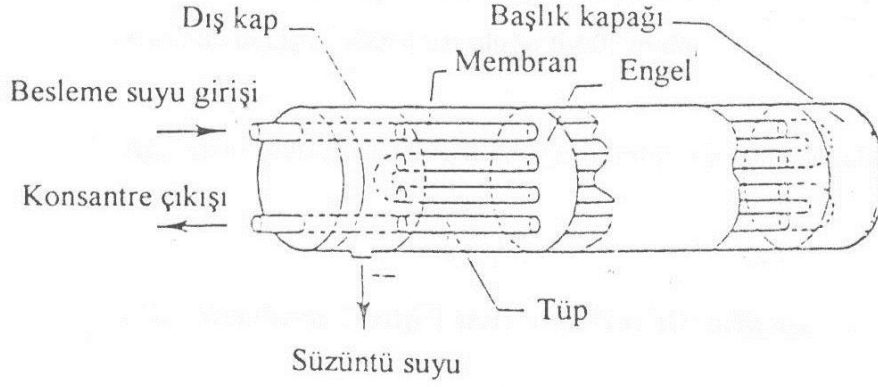


Şekil 2.5: Boşluklu elyaf membranlar (Riley, 1989).

2.4.3. Tüp şeklindeki membranlar

Tüp şeklindeki membranlar, çok sayıda ve yaklaşık 6 m uzunluğundaki küçük tüplerin büyük sağlam tüpler veya borular içine yerleştirilmesiyle teşkil edilmektedir. Besleme suyuna basınç uygulanması sonucu süzüntü suyu boru dışına çıkmakta ve dış kapta toplanarak uzaklaştırılmaktadır. Konsantre kısım tüp içinde toplanır. Şekil 2.6 da tüp şeklinde membran gösterilmektedir.

Tüp membranların üretimi pahalıdır. Alan ihtiyaçlarının büyük olması ve maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı kullanımları kısıtlıdır. Basınç düşük olduğu koşullarda bile membran üzerinde türbülanslı akım oluşturulabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı, yüksek konsantrasyonlu çözeltilerle tıkanmadan uzun süre çalıştırılabilir. Bu membranları temizlemek oldukça kolaydır. Membran üzerinde türbülanslı akım oluştuğu için tıkanma riski minimuma indirilebilmektedir (Riley, 1989).

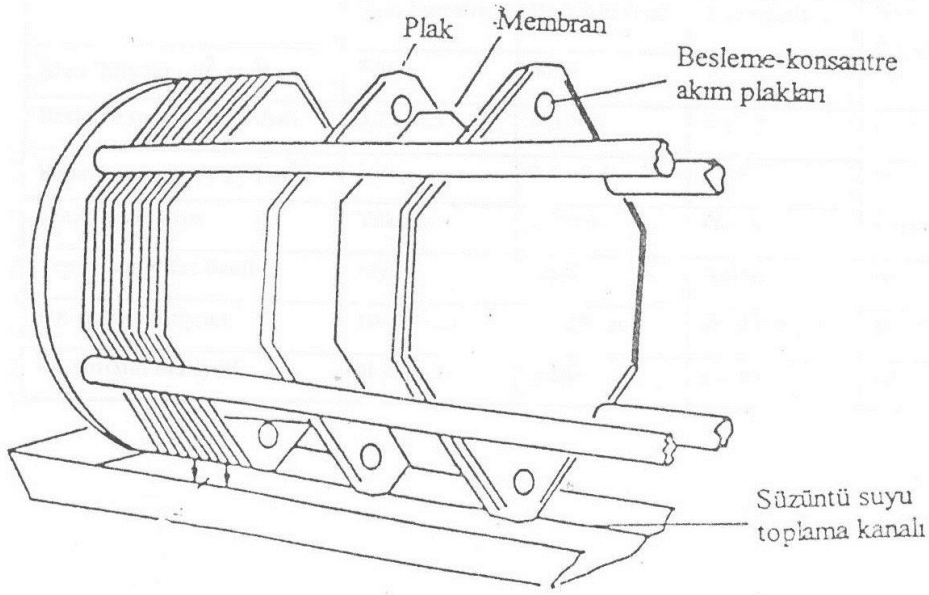


Şekil 2.6: Tüp şeklindeki membranlar (Riley, 1989).

2.4.4. Plak ve çerçeve membranlar

Membran büyük dairesel plakalar arasına yerleştirilerek teşkil edilir . Membran plakaları süzüntü suyu kanallarıyla desteklenir (Şekil 2.7). Plaka kalınlığı 0.5 -1 mm arasında değişir. Kanal uzunluğu 6.60 cm dir.

Ağır ve iri olduklarından işletilmeleri zordur ve kullanım alanları oldukça azdır.



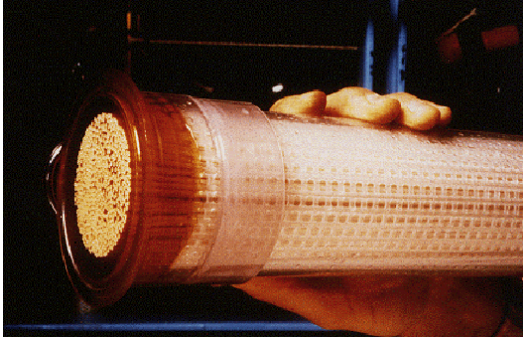
Şekil 2.7: Plak ve çerçeve membranlar (Schierach, 1988).

2.4.5. Kapiler membranlar

Küçük çaplı borucuklardan oluşmuşlardır. Çapları 5 mm. ile 30 mm arasındadır. Üretimleri zordur. Tıkanmaları daha azdır. Türbülans ile yıkanarak temiz kalırlar. Kullanımları yavaş yavaş artmaya başlamıştır. Şekil 2.8 ve 2.9 da kapiler membranları görülmektedir.



Şekil 2.8: Kapiler membranlar



Şekil 2.9: Modül içinde Kapiler Membran borucukları

2.4.6. Seramik Membranlar

Seramik membranlar bir çok polimer membranların tersine çok yüksek kimyasal, termal, mekanik ve fiziksel kararlılıkta, çok iyi seperasyon karakteristiği olan ve uzun zaman çalışabilme özelliği sahip membranlardır. Seramik membranlarda buhar ile sterilizasyon mümkündür, bakterilere dirençlidir ve temizlendikten sonra kuru olarak muhafaza edilebilirler. Seramik membranların dezavantajı ise ağırlıklarının fazla olması ve üretim maliyetlerinin yüksek olması olarak sayılabilir. Fakat servis ömrünün uzun olması sayesinde ilk yatırım maliyetini kompanse edebilmektedir. İlk zamanlarda seramik membranlar atıksu arıtımında kullanılır iken şu anda hemen hemen tüm endüstrilerde kullanılabilmektedir.

3 MEMBRAN PROSESLER

3.1 Membran Prosesler

Membran prosesler, yaklaşık 25 yıldır deniz suyu ve kuyu suyu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel alandaki hızlı gelişmelere paralel olarak membran tekniği de geliştirilmiştir. Kullanım amacına bağlı olarak akı miktarı yüksek, kimyasal etkilere, yüksek sıcaklıklara ve geniş pH aralıklarına dayanıklı membranlar yapılmıştır. Geleneksel deniz ve kuyu suyu arıtımının yanında membran prosesler, atık suların arıtılması, saf su ve yumuşak su üretimi, gıda ve ilaç sanayi prosesleri ayırma işlemlerinde, kağıt sanayi Atıksu arıtımında, petrokimya endüstrilerinde gaz arıtımında kullanılmaya başlamıştır (Bilstad, 1997).

Bu endüstrilerde, membran proseslerin kullanımı, distilasyon, iyon değiştirme, adsorbsiyon vb. ayırma yöntemlerine göre daha avantajlıdır. Enerji tüketimleri düşüktür ve kimyasal maddeye ihtiyaç göstermez. Membran proseslerde kullanılan ekipmanlar basittir ve işletilmeleri oldukça kolaydır.

Membranların performanslarının arttırılmasıyla kullanım alanları da artmıştır.

Membran proseslerin temel kullanım alanları;

- Katı partiküllerin ayrılması
- Çözeltilerin konsantre edilmesi
- Atıksu akımından bazı maddelerin geri kazanılması
- Çok kirli atıksuların arıtılması

olarak sıralanabilir (Bilstad, 1997).

Membranlarda arıtma işlemi sürücü kuvvetlerin etkisi ile gerçekleştirilir. Sürücü kuvvetler, akımın membranın bir tarafından diğer tarafına geçmesini sağlarlar. Ters

ozmos, nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyonda basınç en önemli sürücü kuvvettir.

Membran proseslerde sürücü kuvvetler basınç, sıcaklık ve konsantrasyon farklarıyla ilgilidir. Geri dönüş oranı yüksek olan membranlarda sürücü kuvvetlerin akı miktarına etkisi oldukça azdır. Membran sülfonik asit veya karboksilik asit gibi sabit yüklü iyonlardan oluşuyorsa yüksek tuzlu su arıtımı gerçekleşir (Pusch, 1986).

Membran prosesler dört gruba ayrılır. Bunlar;

- 1- Mikrofiltrasyon (MF)
- 2- Ultrafiltrasyon (UF)
- 3- Nanofiltrasyon (NF)
- 4- Ters ozmos (RO)

Tablo 3.1 de membran proseslerin fonksiyon dağılımı verilmiştir.

3.1.1 Mikrofiltrasyon (MF)

Mikrofiltrasyon makro moleküllerin membrandan geçmesine izin verirken 100 µm boyutundan büyük partiküllerin membrandan geçmesini engeller. Mikrofiltrasyonda akım membran yüzeyine paralel olarak uygulanır. Membrandan geçemeyen konsantrenin bir kısmı membran üzerinde birikir ve membran yüzeyinde direnç artar. Membranın filtrasyon verimi azaldığı zaman, membran temizlenmeli veya değiştirilmelidir. Mikrofiltrasyon membranlarını temizlemek güç, pahalı ve verimsiz olduğundan, genellikle değiştirilir.

Günümüzde çapraz akışlı mikrofiltrasyon membranları kullanılmaya başlanmıştır. Çapraz akışlı mikrofiltrasyon membranları tıkanmalara ve basınç kayıplarına karşı oldukça dayanıklıdır (Bilstad, 1997).

Mikrofiltrasyon, 2 bar'dan az basınçlarda çalışır.

Tablo 3.1: Membran proseslerde fonksiyon dağılımı (Koyuncu ,1997).

		Elektronik Mikroskopu		Optik mikroskop		Plak göz	
		iyon	molekül	Büyük parça	Küçük parça	Büyük parça	
Parça Büyüklükleri	(µm)	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100
1000							
Filtre Ölçüsü Ang. (1/1000000 m)		10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
10 ⁷							
Çeşitli maddelerin parça büyüklükleri		Çözülmüş tuz	K. Siyahı	Her türlü boya pigmenti	İnsan saçı		
		Metal iyonları	Virüsler	Bakteriler	Tez	Deniz kumu	
		Erimiş şeker	Sigara dumanı	Alyuvarlar	Polenler	Granül kömür	
		Protein	Öğütülmüş un	Kömür tozu			
Kullanılacak Arıtma Tekniği		Ters Osmoz	Ultrafiltrasyon	Standart Filtrasyon			
			Nanofiltrasyon	Mikrofiltrasyon			

3.1.2 Ultrafiltrasyon (UF)

Ultrafiltrasyon, membran proseslerin fonksiyon dağılımında mikrofiltrasyon ile ters ozmos arasında kalır. Ultrafiltrasyonun kullanım alanı bu iki prosesle çakışır. Ultrafiltrasyon da molekül ağırlığı yüksek olan maddeler tutulur. Membran delik çapı 0.05- 1 µm arasında değişir. Koloidal partiküller, polimerler, biomoleküller ve şeker iyonları membranda alıkonan maddelerden bazılarıdır.

Ultrafiltrasyon genel olarak;

-ters ozmos sistemlerinde, ters ozmos membranlarını korumak için ön işlem olarak

- kapalı devre sistemlerde suyun kalitesini korumak için ve
- besleme çözeltisini arıtmak

amacıyla kullanılır.

Ultrafiltrasyon membranlarında moleküler ağırlık engelleme sınırı (MWCO) önemlidir. Ters osmozda MWCO değeri 10 dan büyük olan maddeler tutulur. Nanofiltrasyonda ise MWCO değeri 100 dan büyük olan maddeler tutulur. Ultrafiltrasyonda ise MWCO değeri 100.000 dan büyük olan maddeler tutulur. MWCO, maddelerin iyonize olma seviyelerini ifade eder. Daha çok membran tarafında % 90 oranında geri iletilen küçük moleküler ağırlıklı maddeler için tanımlanır. Her membran için tanımlanan MWCO değeri, çalışma koşullarına, besleme çözeltisinin kimyasal içeriğine ve moleküller özelliğe bağlı olarak değişebilir. Ayırma işleminde membran ile çözelti arasındaki uyum önemlidir.

Ultrafiltrasyon ve ters ozmos proseslerinde membranlardan madde geçişini sağlayan sürücü kuvvet, basınç farkıdır. Ultrafiltrasyonda osmotik basınç farkı, ters ozmosa göre daha düşüktür. Ultrafiltrasyon membranları 2 – 10 bar gibi düşük basınçta çalıştırılırlar.

Membranda en büyük direnç, membranın üst tabakasında meydana gelir. Bu direnç ultrafiltrasyon prosesinin verimi için önemlidir. Membran yüzeyindeki kirlenme eğilimi azalan yönde olmalıdır. Membranın polimer yapısı akıyı arttıracak ve tıkanmayı azaltacak şekilde tasarlanmalıdır. Ultrafiltrasyon membranları, gıda endüstrilerinde, ilaç sanayinde su arıtımında, kimya, kağıt ve tekstil endüstrilerinde atıksu arıtımında kullanılmaktadır.

3.1.3 Nanofiltrasyon (NF)

Ters ozmos ile ultrafiltrasyon arasında bulunmaktadır. İnce film selüloz olmayan membranlardaki gelişmeler ile beraber kullanılmaya başlanmıştır. Nanofiltrasyon, ters osmozdan daha düşük basınçlarda (< 5 bar) çalıştırılmasına karşın ters osmozdan daha yüksek akıya sahiptir. Nanofiltrasyon membranları negatif yüklüdür.

Bu nedenle, tek değerlikli iyonların (Cl^- vb.) geri dönüş oranı çok değerlikli iyonların (SO_4^{2-} , vb.) geri dönüş oranından daha azdır. İyon konsantrasyonu fazla olan çözeltilerde tuzlu su geri dönüş oranı yüksektir.

Nanofiltrasyonun MWCO değeri 200 civarındadır. Düşük basınçta bile iyon yüklü yüksek ve molekül ağırlığı 200 den büyük olan organikleri içeren çözeltiler membran tarafından alıkonur. 5 bar basınç altında 2000 mg/lit civarındaki tuz çözeltisinin nanofiltrasyonu sonucunda, sodyum klorür geri dönüş oranı %60, kalsiyum bikarbonat geri dönüş oranı %80, magnezyum sülfat geri dönüş oranı %98 civarında olmuştur. (Koyuncu, 1997)

Nanofiltrasyon, tekstil (Simpson, Kerr ve Buckley 1987), kağıt sanayi (Bindoff ve dğr. 1987), elektro kaplama endüstrisi (Cadotte ve dğr. 1988), boya endüstrisi (Perry ve Linder 1989), gıda endüstrisi (İkedo ve dğr. , Cadotte ve dğr. 1988), atıksuların arıtımında kullanılmaktadır.

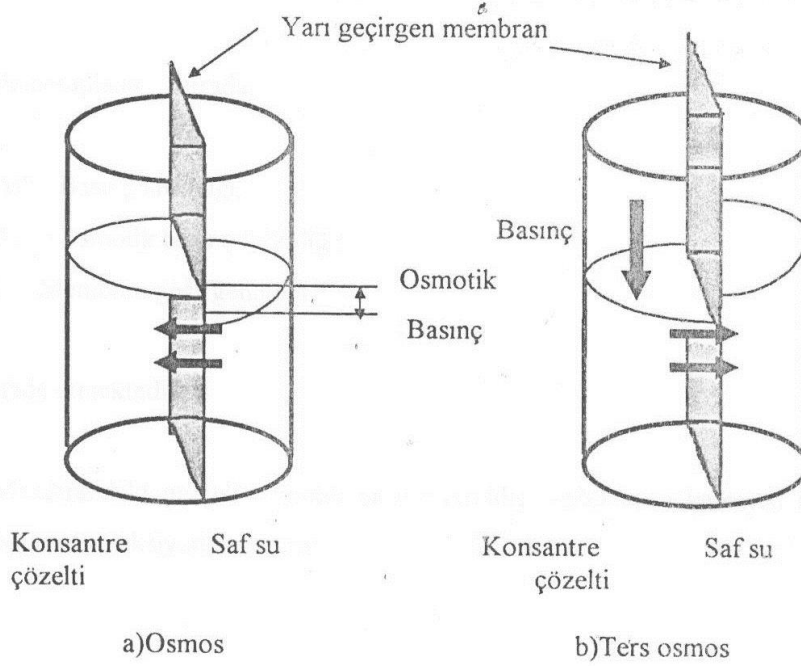
3.1.4 Ters Osmoz (RO)

Ters ozmos, molekül ağırlığı çok düşük olan maddelerin çözelti içinden alınması prosesidir. Ozmos, suyun yarı geçirgen bir membranın her iki tarafında osmotik denge sağlanıncaya kadar, saf su tarafından konsantre çözelti tarafına doğru akmasıdır.

Denge halinde membranın her iki tarafında osmotik basınç aynıdır. Suyun akış yönünü değiştirmek için sisteme osmotik basınçtan daha büyük bir basınç uygulanır. Bu durumda su, konsantre taraftan saf su tarafına doğru akar. Bu olaya ters ozmos denir. Ters ozmos hiperfiltrasyon olarak da tanımlanır.

Ters ozmos prosesi, inorganik maddelerin ve molekül ağırlığı çok düşük olan organik maddelerin yüksek oranda ayrılmasında kullanılır. Organik maddelerin geri dönüş oranı membran malzemesinin tipine, yapısına ve membran ile çözelti arasındaki uyuma bağlıdır. Ters ozmos prosesinde, çözünmüş madde konsantrasyonu

ve akış hızı, basınç , sıcaklık, pH ve askıda katı madde konsantrasyonu önemli değişkenlerdir.



Şekil 3.1: Osmoz ve ters ozmos sistemlerinin şematik şekli (Scott, 1995)

Ters ozmos prosesinde membrandan geçen akım süzüntü akımı, geçemeyen akım ise konsantre akım olarak tanımlanır. Membrandan geçen akı, membranın geçirgenliği, membrana uygulanan basınç (ΔP) ve membrandaki osmotik basınç farklığına bağlıdır. Ters ozmos da akı değeri ,

$$J_w = k \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (3.1)$$

İle hesaplanır. Burada,

ΔP : Basınç farklığını,

$\Delta \pi$: Osmotik Basınç farklığını,

k: Membran geçirgenliğini (katsayı)

ifade etmektedir.

Membrandaki gerçek osmotik basınç farklılığı refleksiyon kat sayısı (σ) ile tespit edilir. Refleksiyon katsayısı,

$$\sigma : \Delta P / \Delta \pi \quad (3.2)$$

formülü ile hesap edilir. Gerçek osmotik basınç farklılığı,

$$\Delta \pi = \sigma \cdot \Delta P \quad (3.3)$$

olur. Refleksiyon katsayısı 1 den küçüktür ve pozitif değerlidir (işaretlidir).

Membrana gelen akım, çözünmüş maddeleri de taşır. Bu çözünmüş maddelerin de akısı, membrandan geçen çözünmüş maddelerin konsantrasyon farklılıkları ile doğru orantılıdır. Membrandan geçen çözünmüş madde akısı,

$$J_s = K_s \cdot \Delta C_s \quad (3.4)$$

İfadesi ile verilmektedir. Burada;

ΔC_s : Konsantrasyon farkı

K_s : Çözünmüş maddelerin geçirimsilik katsayısı'dır.

K_s , 5×10^{-3} ile 10^{-4} arasında değişir. K_s 'nin en küçük değeri, en yüksek geri dönüş oranını (R) gösterir.

Ters osmoz prosesinde, membran malzemesinin seçimi önemlidir. Yaygın olarak kullanılan ters osmoz membranları, asimetrik veya konpozit yapıdadır. İdeal ters osmoz membranları, kimyasal ve biyolojik etkilere, ayırma ve mekanik karakteristikleri uzun çalışma sürelerine dayanıklı olmalıdır. Membran teknolojisindeki ilerlemeler sonucunda, yüksek sıcaklık, geniş pH aralıklarına ve yüksek klor değerlerine dayanıklı membranlar geliştirilmiştir.

Membran geri dönüş oranı ve akı değeri konsantrasyon , sıcaklık, basınç ve pH değişkenlerine bağlıdır. Akı değeri, basıncın artmasıyla artar. Konsantrasyonu yüksek çözeltilerin osmotik basıncı yüksek olduğundan, akı değeri azalır. Sıcaklıkla hem osmotik basınç hem de geçirgenlik katsayısı artar.

Ters osmozda ön arıtma ihtiyacı sistem tasarımında önemlidir. Tıkanmış bir membranı temizlemek oldukça güçtür. Membranın tıkanmasını önlemek için suda bulunan askıda katı ve koloidal maddelerin ayrılması gereklidir. Bunun için ön arıtma uygulanmalıdır.

Askıda katılar ve kolloidler için ön arıtma ihtiyacı, SDI (kil yoğunluk indeksi) 'den yararlanılarak belirlenir. SDI değerini tespit etmek için, filtre kağıdı filtre kabına yerleştirilir. Sabit basınç altında, su filtreden geçirilerek 100 ml hacmindeki kaba doldurulur. Kabın dolma süresi ($=t_0$) ölçülür. Daha sonra 15 dakika süre ile sistem çalıştırılır. Bu süre sonunda kabın dolma süresi ($=t_{15}$) belirlenir. Elde edilen değerlerle SDI değeri, denklem (3.5) ile hesaplanır.

$$SDI = ((1 - (t_0 / t_{15})) / 15) * 100 \quad (3.5)$$

Burada ,

t_0 : İlk okunan zaman değeri (sn)

t_{15} : 15 dakika sonra okunan zaman değeri (sn)

ifade eder.

Ters osmoz prosesleri, birim membran hacminden maksimum akı miktarı elde edilebilecek, konsantrasyon polarizasyonundan dolayı meydana gelen olumsuz etkileri azaltacak ve enerji maliyeti düşük olacak şekilde dizayn edilmelidir.

4. ÇÖP SIZINTI SULARINDA MEMBRAN UYGULAMALARI İKİ PARAMETRELİ ZEMİNLERİN DÜZLEM MODELLEMESİ

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Sekme durakları: 1,27 cm, Sola

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

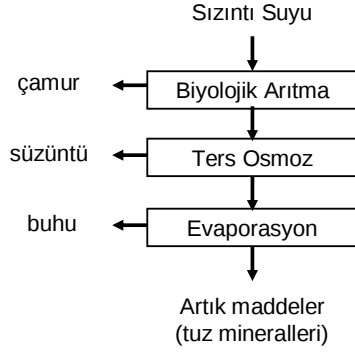
4.1 Hollanda Wijster'de Nanofiltrasyon Uygulaması

Hollanda'nın Wijster bölgesinde düzenli katı atık depolama sahası bulunmaktadır.
Wijster katı atık düzenli depolama tesisinde halihazırda mevcut olan bir çöp sızıntı
suyu arıtma tesisi bulunmaktadır.

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Bu çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde, biyolojik ön arıtma olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyondan oluşan aktif çamur sistemi, ters osmoz sistemi, ters osmoz konsantresinin artıtımı için çok kademeli ani buharlaştırmalı evaporasyon tesisi bulunmaktadır. Buharlaştırmadan geriye kalan tuz mineralleri de katılaşmış halde uzaklaştırılmaktadır. Şu anki sistem yetmemektedir ve (250,000 m³/yıl) büyütülmesi gerekmektedir. Fakat ters osmoz sisteminin çalıştırılması pahalı olmaktadır. Ters osmoz ile çalışan sistemde 1 m³ süzöntü suyu için €18 maliyet oluşmaktadır. Ters osmoz sistemi teknik olarak mükemmelliğini kaybetmiştir. Sistemde yüksek miktardaki artık madde (10,000 ton/yıl) sistemi sürdürülemez kılmaktadır...



Sekil 4.1: Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisi akım şeması

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 6 nk

Biçimlendirilmiş: Türkçe

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi rengi: Otomatik

Biçimlendirilmiş: Türkçe

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi rengi: Beyaz

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi rengi: Beyaz

Biçimlendirilmiş: Sola

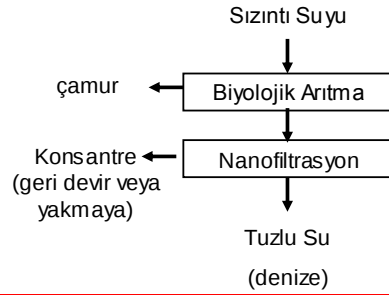
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk, Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Türkçe



Biçimlendirilmiş: Ortadan, Sonraki ile birlikte tut

Sekil 4.2: Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde yapılması düşünülen değişikliğin akım şeması

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde yapılması planlanan sistemde ise ters osmoz yerine nanofiltrasyon konulması planlanmaktadır. Nanofiltrasyonun amacı, tek değerlikli klor, sodyum ve potasyum gibi iyonları sızıntı suyundan ayırarak sızıntı suyundaki artık madde miktarını azaltmak, ağır metal, mikro-makro kirleticiler (PAH, EOX vs.) gibi organik bileşikler ile beraber konsantre etmek, nanofiltrasyonun konsantresini yakarak depolama sahası içinde bertaraf etmek veya depo sahasına geri devrettirmektir. Nanofiltrasyonun süzöntüsü denize deşarj edilebilir. Esas amaç sürdürülebilir bir teknoloji ile arıtma masraflarını azaltmaktır.

Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan pilot tesiste 1,5 mm çaplı kapiler nanofiltrasyon membranları kullanılmıştır. Membran modüllerinin boyu 1,5 m. 8 inç çapında ve membran alanı 20 m²'dir. Pilot tesiste, süzöntü akısı 20-25 l/m².sa, TMB 3.0 - 5.0 bar, kimyasal temizleme aralığı ise 4-7 günde bir kere şeklinde olmuştur.

Tablo 4.1 'de görüldüğü gibi nanofiltrasyon süzöntüsünde yapılan analiz sonucunda, gerçekten de önemli miktarda bivalent (iki/çok değerlikli) iyonların, ağır metallerin ve büyük miktarda KOİ gideriminin olduğu, ve çoğunlukla monovalent tek değerlikli iyonlardan oluştuğu görülmüştür.

Kurulması planlanan 30m³/saat sızıntı suyu kapasiteli nanofiltrasyon tesisi için ilk yatırım maliyeti 900.000 Euro ve işletme maliyeti 1,70 Euro/m³ olarak bulunmuştur.

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır, Madde işaretleri veya numaralandırma yok



Bölüm 3' de varyasyonel yöntemin iki boyutlu elastisite problemleri için çıkarılan genel ifadeler, elastik zemin problemlerindeki kabuller sonucu, daha sade bir forma dönüşmektedir. Eksenel yer değiştirmenin enine yer değiştirmesine kıyasla daha küçük olduğu durumlarda ihmal edilmesi, 3.7 diferansiyel denklem takımının kendiliğinden sağlaması sonucuna götürmektedir. Hacimsel yüklerin zemin yüzeyine etkiyen yükler gibi dış yük olarak alınmaması diğer kabulü ise, 3.7 ve 3.8 denklemlerindeki yük terimlerini y koordinatından bağımsız hale getirmektedir.

Şekil 4.3: Wijster çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan nanofiltrasyon pilot tesisindeki membranlar

Tablo 4.1: Pilot tesis sonuçları

Analiz	Giriş	CF = 2 (süzüntü 50%)		CF = 4 (süzüntü 75%)		CF = 10 (süzüntü 90%)	
		Süzüntü	Giderme verimi	Süzüntü	Giderme verimi	Süzüntü	Giderme verimi
Klor (mg/l)	2750	2900	-5.5	2890	-5.1	2910	-5.8
KOİ (mg O ₂ /l)	1090	67	93.9	84	92.3	124	88.6
Sertlik	5.5	3.7	32.7	3.8	30.9	4.2	23.6

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

(mmol/l)							
Sülfat (mg/l)	240	54	77.5	58	75.8	91	62.1
İletkenlik (mS/m)	1000	1050	-0,01				
NH4-N (mg/l)	1	1	0				
Fosfat	6.3	1.5	76.2	1.64	74.6	1.3	79.4
Krom (µg/l)	260	<50	>80	<25	>90	<5.0	>98

CF: Konsantrasyon faktörü

Tablo4.1’de nanofiltrasyonun tek değerli iyonları giderilemediği görülmektedir.



Şekil 4.4: Wijster’deki nanofiltrasyon pilot tesisinde giriş ve çıkış numuneleri

4.2 Japonya Sasakura’da Nanofiltrasyon Uygulaması

Japonya Sasakura’da bulunan çöp sızıntı suyu arıtılıp yüzeysel sulara deşarj edilmektedir. Fakat çöp sızıntı suyunun arıtmada istenen verime ulaşılması olduğundan deşarj parametreleri yüksek kalmaktadır. Bu neden ile mevcut arıtma geliştirilmelidir. Şu anda 15 m³/gün kapasiteli çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde biyodisk, koagülasyon – sedimentasyon, kum filtre, aktif karbon üniteleri mevcuttur.

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Ortadan
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Ortadan
Biçimlendirilmiş: Ortadan
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Ortadan
Biçimlendirilmiş: Ortadan
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Satır aralığı: tek, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 5 nk
Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Satır aralığı: tek, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: 0 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm
Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: 1,27 cm, Sola

Bu tesise ters osmoz ünitesi ilave edilmesi düşünülmektedir. Fakat tesisten çıkan suyun karakteristiği TO tesisine girmek için uygun değildir. Bu neden ile TO için bir ön arıtma gereklidir. TO ön arıtmasında askıda katı maddeler ve bir miktar çözünmüş maddeler tutulmalıdır. Dolayısıyla kapiler nanofiltrasyon en uygun çözümdür. Direk nanofiltrasyon ile mevcut arıtma çıkışında deşarj edilen çöp sızıntı suyundan KOİ, renk, sertlik ve iki değerlikli iyonlar giderilecektir. Bu sayede TO prosesinde negatif etki eden maddeler tutulmuş olacak, geri kazanım miktarı artacak ve temizleme ihtiyacı azalacaktır. NF ve TO'dan az bir konsantré akımı çıkacağından dolayı konsantré evaporatör veya kurutucu'ya verilmesi mümkün olacaktır

•



Şekil 4.5: Sasakura çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan pilot nanofiltrasyon tesisi

Bunun için Şekil 4.5 te görülen nanofiltrasyon pilot tesisi kurulmuştur. NF modülünde 3,6 m² yüzey alanlı membran bulunmaktadır. Proses yatay akışlı olarak çalışmaktadır. Nanofiltrasyonda iki değerlikli iyonlar çoğunlukla tutulduğundan TO ünitesinde tıkanma problemine pek rastlanılmayacağı düşünülmektedir. NF'den çıkan süzüntü suyu ile ilgili parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Satır aralığı: tek, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 5 nk

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Tablo 4.2: NF çıkış suyu parametreleri

İletkenlik	4500 mS/cm
KOİ	5 – 15 mg/l
TÇM	3500 mg/l
Ph	6 – 8
SO ₄ ⁻²	140 mg/l
Ca ⁺²	530 mg/l
Mg ⁺²	80 mg/l
Sıcaklık	20 – 32 °C

Bu alınan olumlu neticeler sunucunda 15 m³/gün kapasiteli tam ölçekli tesisin yapımına karar verilmiştir.



Şekil 4.6: Sasakura çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde kurulan nanofiltrasyon üniteleri

Sasakura’da tam ölçekli nanofiltrasyon tesisi Mayıs 2004’te bitirilmiştir. Tesisin dizaynında 3 adet nanofiltrasyon ünitesi kurulmuştur. Burada 1. ve 2. ünite 14’er adet modül, 3. ünite ise 12 adet modül, toplamda 40 adet modül kullanılmış olup toplam membran alanı 800 m²’dir. Bu tesisin tipik işletme parametreleri Tablo 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.7’de öndeki ters osmoz modüllerinin arkasında nanofiltrasyon modülleri görülmektedir.

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Satır aralığı: tek, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Satır aralığı: tek, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Tablo 4.3: Nanofiltrasyon tesisi işletme parametreleri

Toplam akı	20 l/m ² .st
Süzüntü debisi	13,8 m ³ /st
Temizleme aralığı (NaOH)	60 saat
Temizleme aralığı (Sitrik asit)	168 saat
Geri kazanım oranı	% 93
Toplam konsantre debisi	1,2 m ³ /st

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: tek

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 3 nk

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır



Şekil 4.7: Ters osmoz modülleri arkada nanofiltrasyon modülleri

Sonuç olarak Sasakura'da kurulan nanofiltrasyon tesisinde çöp sızıntı suyundan ters osmoza vermek için yüksek kalitede süzüntü elde edilmiştir. Nanofiltrasyonun konsantre akımı az olduğundan dolayı evaporasyon için kullanılacak enerji masrafı azalmaktadır. Ters osmozdan çıkan su proses suyu olarak tekrar kullanıma uygundur.

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil, Altı çizgisiz

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın, İtalik Değil, Altı çizgisiz

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil, Altı çizgisiz

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

4.3 İsviçre Spillepeng'de Nanofiltrasyon Uygulaması

Spillepeng (İsviçre), 1990 yılından beri devrede olan bir düzenli depo alanıdır. Burada, NF membranı ile özellikle ağır metal giderimi konusunda pilot ölçekli deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, iki değerlikli iyonların gideriminde, NF membranının etkili olduğu ve tek değerlikli iyonlar üzerinde ise, yeterli verimi vermediği görülmüştür (Tablo 4.4). NF membranında, RO membranına göre çok daha düşük basınç (3 - 10 bar) uygulandığı için enerji ihtiyacı çok düşük olmuştur. (Koyuncu, İ. ve Topacık D. 1999).

Tablo 4.4: Spillepeng düzenli depo alanında NF membranı ile ağır metal giderimi (Linde et al, 1995)

<u>Parametre</u>	<u>Ham Atıksu</u>	<u>Süzüntü (AFC30 NF)</u>	<u>Süzüntü (AFC40 NF)</u>
<u>Ca⁺² (mg/l)</u>	<u>12887</u>	<u>7918</u>	<u>9822</u>
<u>Cd (mg/l)</u>	<u>0.033</u>	<u>0.002</u>	<u>0.003</u>
<u>Cl⁻ (mg/l)</u>	<u>37054</u>	<u>27689</u>	<u>30.791</u>
<u>Cr (mg/l)</u>	<u>0.029</u>	<u>0.008</u>	<u><0.007</u>
<u>Cu (mg/l)</u>	<u>0.011</u>	<u><0.007</u>	<u><0.007</u>
<u>Fe⁺² (mg/l)</u>	<u>85.8</u>	<u>19.74</u>	<u>25.85</u>
<u>K⁺ (mg/l)</u>	<u>3940</u>	<u>4004</u>	<u>3813</u>
<u>Mg⁺² (mg/l)</u>	<u>243.5</u>	<u>87.6</u>	<u>117.9</u>
<u>Na⁺ (mg/l)</u>	<u>6400</u>	<u>6.068</u>	<u>5874</u>
<u>Ni (mg/l)</u>	<u>0.016</u>	<u><0.004</u>	<u><0.004</u>
<u>Pb (mg/l)</u>	<u>0.609</u>	<u><0.02</u>	<u>0.022</u>
<u>Zn (mg/l)</u>	<u>0.495</u>	<u>0.058</u>	<u>0.060</u>
<u>TOC (mg/l)</u>	<u>142</u>	<u>57</u>	<u>64</u>

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

4.4 Almanya Ihlenberg'de Ters Osmoz Uygulaması

15 Aralık 1989 tarihinde devreye giren, Ihlenberg düzenli depo alanı ters osmoz tesisinin kapasitesi 36 m³/saat'dır. Tesiste, iki kademeli ters osmoz membranları vardır. İkinci kademe sonunda elde edilen süzüntü suyu, standartların oldukça altındadır. Süzüntü suyu kalitesi Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5: Ihlenberg düzenli depo alanı ters osmoz tesisi sonuçları (Peters, 1997)

<u>Parametre</u>	<u>1.1.1.1.1.1. am atıksu</u>	<u>RO Süzüntü I</u>	<u>RO süzüntü II</u>	<u>Verim (%)</u>
<u>KOI (mg/l)</u>	<u>1797</u>	<u><15</u>	<u><15</u>	<u>99.9</u>
<u>NH₄-N (mg/l)</u>	<u>366</u>	<u>9.8</u>	<u>0.66</u>	<u>>99.2</u>

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk, Kalın

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Sola

Biçimlendirilmiş Tablo

Na ⁺ (mg/l)	4180	55.9	2.5	99.9
Ağır metaller (mg/l)	0.25	<0.005	<0.005	99.9
Cl ⁻ (mg/l)	2830	48.4	1.9	99.9
pH	7.7	6.8	6.6	-
İletkenlik (µS/cm)	17250	382	20	>98

Bu tesiste, membranlar 3 sene çalıştıktan sonra, 1992 yılında değiştirilmiştir. Tesiste enerji ihtiyacı, 14 kWst/m³ civarında olmaktadır. Daha yüksek basınçta çalışan ters osmoz membranlarının ilavesi ile kapasite, aralık 1993 yılında 48 m³/saat değerine çıkartılmıştır. Bu uygulama ile geri kazanım % 95 mertebelerine ulaşmıştır (Peters, 1997).

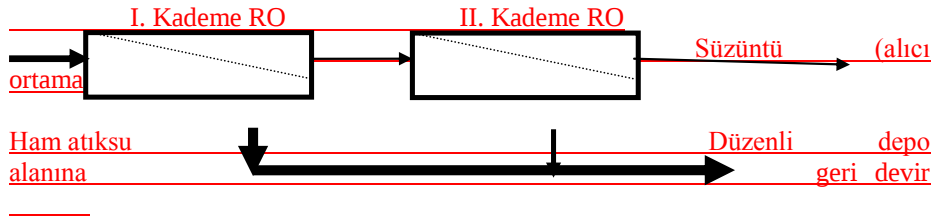
Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

4.5 Almanya Bassum'da Ters Osmoz Uygulaması

Bassum düzenli depo alanında oluşan sızıntı sularını arıtmak için, 60 m³/gün kapasiteli, taşınabilir bir ters osmoz tesisi teşkil edilmiştir. Tesis sadece bir operatör tarafından yönetilebilmekte ve kontrolü tamamen otomatik olarak yapılmaktadır. İki kademeli, ters osmoz membranları kullanılmaktadır (Şekil 4.8). Konsantrasyon faktörü, 4.5-5 arasındadır. Konsantre akımı, düzenli depo alanına geri devir ettirilmektedir. Elde edilen süzüntü suyunun kalitesi, limit değerlerin altında olup, Tablo 4.6'de verilmiştir.

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır



Şekil 4.8: Bassum düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi şematik akım diyagramı (Koyuncu, İ. ve Topacık D. 1999)

Tablo 4.6: Bassum düzenli depo alanı süzüntü suyu kalite parametreleri (HAASE,1993)

Parametre	Ham Atıksu	Süzüntü (2. Kademe sonu)
pH	7.56-8.68	3.72-4.63
İletkenlik (mS/cm)	7.84-17.13	15-33
KOI(mg/l)	1805-3926	<15
BOİ ₅ (mg/l)	96-1413	0.9-2.4
AOX(mg/l)	835-2150	<10-47
Tot. N(mg/l)	810-1729	1.6-3.8

Biçimlendirilmiş Tablo

NH ₄ -N(mg/l)	470-1066	0.68-1.3
Cl ⁻ (mg/l)	1200-2203	<1-1.8
Fe ⁺² (mg/l)	7-34	<0.005-0.05
Fe (total) (mg/l)	6.3-36	<0.001-0.07
Mg ⁺² (mg/l)	70-210	0.02-<0.01
Ca ⁺² (mg/l)	82-190	0.11-<0.5
Pb(mg/l)	0.013-0.098	<0.001-0.02
Cr ⁺³ (mg/l)	0.16-0.60	<0.001-0.017
Cu(mg/l)	0.002-0.079	<0.001-0.01
Zn(mg/l)	<0.01-0.41	<0.01-0.42
Cd(mg/l)	0.0008-0.0071	<0.0002
Hg(mg/l)	<0.0002-0.0003	<0.0002
Ni(mg/l)	0.11-0.27	<0.001-0.011

4.6 İtalya'da Ters Osmoz Uygulaması

İtalya'da, bazı düzenli depo alanlarında, sızıntı suyunu arıtmak için Triper adı verilen taşınabilir ters osmoz sistemi kullanılmaktadır. Genellikle, ani yeraltı suyu kirlenmesi durumunda ve zemin ıslahlarının yapıldığı alanlarda kullanılan bu tesis, sızıntı suyunu artıracak gerçek tesis devreye girene kadar, geçici bir süre için kullanılmaktadır. Bu sistem hava ile sıyırma, kimyasal oksidasyon, iki kademeli ters osmoz, evaporasyon ve aktif karbon ünitelerini içermektedir. Burada, birinci kademede tubular membranlar ile önarıtma yapılmaktadır. Daha sonra sızıntı suyunun, spiral wound membranlar ile ikinci kademe arıtması yapıp alıcı ortama verilebilecek seviyeye getirilmektedir (Beone et.al., 1997). Bu tesis ile dört ayrı sızıntı suyu üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen su kalite değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

1.1.1.1.1.2 Tablo 4.7: **Triper** ters osmoz sistemi ile A,B,C ve D düzenli depo alanlarında yapılmış deney sonuçları (Beone et.al., 1997)

1.1.1.1.1.2.1.1 arametre	A*		B*		C*		1.1.1.1.1.2.2 D *	
	Ham Atıksu	Süzüntü	Ham Atıksu	Süzüntü	Ham Atıksu	Süzüntü	Ham Atıksu	Süzüntü
1.1.1.1.1.3 pH	8.5	8.7	8.2	9.1	7.0	8.6	8.5	9.2
İletkenlik(µS/cm)	13200	1510	16700	2650	25500	2350	2620	580
TKM (mg/l)	5200	800	8700	-	21540	-	-	-
Alkalinite (mg/l)	6000	1150	8750	2400	500	-	-	-
KOI(mg/l)	1960	<20	4600	<20	21320	650	770	<20
NH ₄ -N (mg/l)	1920	366	2140	770	2520	460	360	210
SO ₄ ⁻² (mg/l)	50	1	90	1	500	-	24	<5
Cl ⁻ (mg/l)	1180	10	1560	53	1870	-	200	4
Ca ⁺² (mg/l)	140	-	20	<0.1	1100	-	-	-

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk
Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk, Kalın

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk, İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Ortadan

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

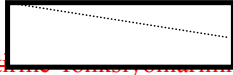
Biçimlendirilmiş: Ortadan

*) A,B ve C düzenli depo alanlarında yapılan deneylerde, basınç 40 – 45 bar arasında, sıcaklık ise, 45 °C civarında.

D düzenli depo alanında ise basınç, 21 bar, sıcaklık ise 35 °C olmuştur.

4.7 Almanya Halle-Lochau'da NF İle Desteklenen Ters Osmoz Uygulaması

Kapasitesi 17 m³/saat olan Halle-Lochau düzenli depo alanındaki ters osmoz tesisi, Şubat 1993'ten beri devrededir (Peters, 1997). Nanofiltrasyon, düşük basınçlı ters osmoz ve Yüksek basınçlı ters osmoz ünitelerinden meydana gelmektedir (Şekil 4.9). Bu şekilde verim % 97'ler seviyesine kadar çıkartılabilmektedir. Elde edilen süzuntu suyunun kalitesi Tablo 4.8'de verilmiştir.



~~Yer değiştirme fonksiyonlarının 3.3'deki terim sayısının sınırlı olarak alınması halinde sonuç, yaklaşık bir çözümü belirtmektedir. Denklemdaki terim sayısının artırılması elastik zemin modellemesinde, zeminin katman sayısının ve dolayısıyla katman yüzey yer değiştirme fonksiyon sayısının artmasını göstermektedir. Bu nedenle katman sayısının artması elde edilen verilerin kesin çözüme yaklaşmasına neden olmaktadır. Buna karşın zemin katmanlara bölmek, diferansiyel denklem takımının fazlaşmasına sebep olmaktadır. Deneysel veriler ile özenli teorik analiz sonucu dağılım fonksiyonlarının daha uygun olarak seçilmesi de, modelin doğruluk derecesini arttırmaktadır.~~

~~Dağılım fonksiyonlarının lineer seçilmesi, enine gerilme bileşeninin sabit olması sonucunu çıkarmaktadır. Bu sonuç katman kalınlığının sığ olduğu durumlar için kabul edilebilmesine karşın, derinliğin artması durumunda gerilme değişimini de dikkate alan dağılım fonksiyonları seçmek gerekir. Vlasov modelinde γ parametresine bağlı olarak hiperbolik dağılım fonksiyonları önerilmiştir.~~

4.1 Kirişsiz Zemin Problemleri

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın, İtalik Değil, Altı çizgisiz

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: 0 cm, Asılı: 0,63 cm, Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Numaralandırılmış anahat + Düzey: 2 + Numaralandırma Stili: 1, 2, 3, ... + Başlangıç: 2 + Hizalama: Soldan + Hizalandığı yer: 0 cm + Sekme başlangıcı: 1,16 cm + Girinti yeri: 1,16 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: 0,63 cm, Sola + Eskisi 1,16 cm

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: 0,63 cm, Sola

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

4.1.1 Tek Katmanlı zZeminler

Zeminin sıkışabilir ve H yüksekliğinde tek tabakadan oluşmakla birlikte, eksenel doğrultudaki $u(x,y)$ yer değiştirmesinin ihmal edilebildiği durumlarda, 3.3, 3.2 ve 3.9 ifadeleri sırasıyla aşağıdaki hale gelmektedir:

$$u(x,y)=0, \quad v(x,y)=V_1(x)\phi_1(y) \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{yy} &= V_1(x)\phi_1'(y) \\ \varepsilon_{xy} &= V_1'(x)\phi_1(y) \\ \varepsilon_{xx} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \frac{E_0}{(1-\nu_0^2)} V_1(x)\phi_1'(y) \\ \tau_{xy} &= \frac{E_0}{2(1+\nu_0)} V_1'(x)\phi_1(y) \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Düzlem şekil değiştirme durumunda, gerilme-şekil değiştirme bağıntılarında zemin karakteristikleri aşağıdaki şekilde alınmalıdır:

$$E_0 = \frac{E_s}{1-\nu_s^2}, \quad \nu_0 = \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \quad (4.4)$$

Burada E_s , ν_s sırasıyla zemin elastisite modülü ve poisson oranını göstermektedir.

4.3'deki gerilme bileşenleri 3.8'de yerlerine konulduğunda sistem diferansiyel denklemini tek bağımlı değişkene bağlı olarak elde edilebilir.

$$\frac{1-\nu_0}{2} r_{11} V_1' - s_{11} V_1 + \frac{1-\nu_0^2}{E_0} q_1 = 0 \quad (4.5)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 6 nk

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

4.5 denklemindeki serbest terim, zemin yüzeyi yayılı yükün, $q(x)$, yaptığı işi göstermektedir.

İfadedeki sabitler, sadece dağılım fonksiyonuna bağlıdır.

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= \int_0^H \phi_1^2(y) dF \\ s_{11} &= \int_0^H \phi_1'^2(y) dF \end{aligned} \right\}$$

(4.6)

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.6'deki bütün terimler $\frac{E_0}{(1-\nu_0^2)}$ ile çarpılırsa denklemin yeni hali

$$2tV_1'' - kV_1 + q_1 = 0$$

(4.7)

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alt simge

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

şeklinde olup bu ifadedeki yeni sabitlerin 4.6'daki sabitler cinsinden

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{E_0 s_{11}}{1 - \nu_0^2} \\ t &= \frac{E_0 r_{11}}{4(1 + \nu_0)} \end{aligned} \right\}$$

(4.8)

olarak gösterilebilir. 4.8 diferansiyel denklemi yardımıyla, Vlaszov ile Winkler modeli arasındaki farkın bu yükleme durumu için $2tV_1''$ terimi olduğu anlaşılr. Bu terim, zeminde kayma gerilmesinin oluşmasını, dolayısıyla yer değiştirmelerin gerilmenin etkilediği noktadan ortamın diğer kısımlarına doğru yayılmasını sağlamaktadır. İfadedeki k karakteri, elastik ortamın sıkışma şekil değiştirmesini göstermesi nedeniyle Winkler sabitine benzerdir. Diğer t karakteri ise zeminin kayma şekil değiştirmesini diğer bir deyişle yük dağılım kapasitesini göstermektedir.

4.7 diferansiyel denklemin çözümü için, sınır şartlarının genelleştirilmiş kuvvet cinsinden oluşturulması gerekir. 4.1 göz önüne alındığında genelleştirilmiş normal ve kesme kuvvetin integral formda ifadeleri aşağıda belirtildiği gibi olmaktadır.

$$T_j = \int \sigma_x \phi_j dF = 0$$

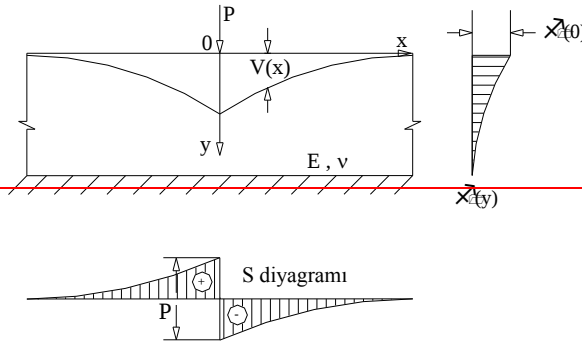
$$S_1 = \int \tau_{xy} \phi_1 dF = \frac{E_0 \delta}{2(1+\nu_0)} V_1' \int \phi_1 dy = 2tV_1'$$

(4.9)

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.1.1.1 Tekil y-Yük dDurumu



Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Şekil 4.1: Tekil Yükleme Durumu

Bu yükleme durumu için sistemin diferansiyel denklemi, 4.7 ifadesinde $q_1=0$ alınarak elde edilebilir.

$$2tV_1'' - k_1V_1 = 0$$

(4.10)

Yukarıdaki homojen diferansiyel denklemin çözümü;

$$V_1(x) = C_1 e^{-\alpha x} + C_2 e^{\alpha x}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}}$$

(4.11)

şeklinde olup, c_1 ve c_2 katsayıları sınır şartlarından bulunur. Simetri dolayısıyla problemin yarısı üzerinden işlemler yapılabilir. Yer değiştirme ekseninden birinci sınır şartı;

$$x \rightarrow \infty \text{ için } V_1(x) \rightarrow 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Genelleştirilmiş kuvvet einsinden yazılacak olan ikinci sınır şartı

$$S_1(0) = \frac{P}{2} \phi_1(0) \quad (4.13)$$

ise $x = 0$ noktasında kuvvetlerin yaptığı iş dengesini göstermektedir. Bu ifadede $S_1(0)$, $x = 0$ kesitindeki iç kuvvetlerin $v(x, y) = 1 \cdot \phi_1(y)$, $V_1(x) = 1$ yer değiştirme altında yaptıkları toplam işi göstermektedir. Problemin simetrik olması nedeniyle 4.13 denkleminin sağındaki ifadede $P/2$ yük değeri alınmıştır. Sözü edilen ifadedeki eksi işareti ise kuvvet ile yer değiştirmenin aynı yönlü olmaması nedeninden ileri gelmektedir. 4.9 ve 4.13 denklemlerinden

$$\left. \begin{aligned} 2\alpha C_1 &= \frac{P}{2} \phi_1(y=0) \\ C_1 &= \frac{P}{4} \frac{\phi_1(y=0)}{\alpha t} \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

ikinci sabit bulunmuş olmaktadır. 4.14, 4.11_'de yerine konulduğunda tekil yük etkisindeki sistemin yer değiştirme fonksiyonu

$$v(x, y) = \frac{P}{4\alpha t} e^{-\alpha x} \phi_1(y) \quad (4.15)$$

elde edilebilmektedir. Dağılım fonksiyonunun lineer seçilmesi halinde, 4.15_'deki sabitler açık formda yazıldığında bu özel duruma ait çökme ifadesi oluşturulabilir.

$$v(x, y) = \frac{3(1-\nu_0^2)}{\sqrt{6(1-\nu_0)}} \frac{P}{E_0 \delta} e^{-\alpha x} \frac{H-y}{H} \quad (4.16)$$

4.11_'de k ve t 'nin yerine konulması ile α sabiti,

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

$$\alpha = \frac{1}{H} \frac{\sqrt{6(1-\nu_0)}}{(1-\nu_0)}$$

(4.17)

zemin özelliklerine bağlı olarak gösterilebilir. 4.16 ifadesi dikkate alındığında, orijindeki çökme değerinin katman yüksekliğinden bağımsız olduğu görülmektedir.

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

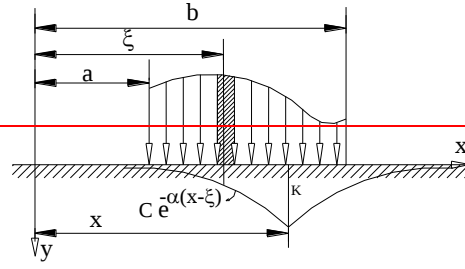
Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

4.1.1.2 Yayılı Yük Durumu



Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Şekil 4.2: Yayılı Yük Durumu

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Yayılı yük durumunun genel yer değiştirme fonksiyonu, 4.7 ifadesi ile çıkarılabilmekle birlikte, ikinci bir yol olarak, yayılı yükün sürekli tekil yüklerden oluştuğu mantığı gereği, tekil yük için çıkarılmış 4.16 denklemi kullanılarak da elde edilebilir. Aynı yaklaşım, yayılı yükün fonksiyon olarak ifade edilmesinin zor olduğu problemlerde tekil yüke çevildiği durumlarda da kullanılmaktadır. Tekil yükün birim değerleri için oluşturulan tesis çizgilerinin süper pozisyonu, istenilen noktanın yer değiştirmesini vermektedir. Eğer uygulanan $q(\xi)$ yayılı yük fonksiyonu, koordinat ekseninden ξ kadar uzaklıktaki değeri biliniyorsa, K noktasındaki yer değiştirme fonksiyonu (Şekil 4.2) 4.14'deki C_1 sabiti

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

$$C_1 = \frac{\phi(0)}{4\alpha t}$$

(4.18)

olmak üzere;

$a \leq x \leq b$ aralığında;

$$V_1(x) = C_1 \left[\int_a^x q(\xi) e^{-\alpha(x-\xi)} d\xi + \int_x^b q(\xi) e^{\alpha(x-\xi)} d\xi \right]$$

(4.19)

$x > b$ bölgesinde;

$$V_1(x) = C_1 \int_a^b q(\xi) e^{-\alpha(x-\xi)} d\xi$$

(4.20)

$x < a$ için;

$$V_1(x) = C_1 \int_a^b q(\xi) e^{\alpha(x-\xi)} d\xi$$

(4.21)

şeklinde elde edilir. Yayılı yük değerinin sabit olması özel durumunda 4.19 ifadesi

$a \leq x \leq b$ için;

$$V_1(x) = \frac{qC_1}{\alpha} [2 - e^{-\alpha(x-a)} - e^{\alpha(x-b)}]$$

(4.22)

şeklini almaktadır. Dağılım fonksiyonunu derinlikle lineer olarak azaldığı

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

$$\phi_1(y) = \frac{H-y}{H}$$

(4.23)

durum ile 4.8_'deki t değeri açık olarak yazılırsa 4.18 ifadesi

$$C_1 = \frac{3(1+\nu_0)}{\alpha E \delta H}$$

(4.24)

olarak bulunur. Bu sabit değer 4.22_'de yerine konulduğunda denklemin yeni formu;

$$k = \frac{E \delta}{H(1-\nu_0^2)}$$

(4.25)

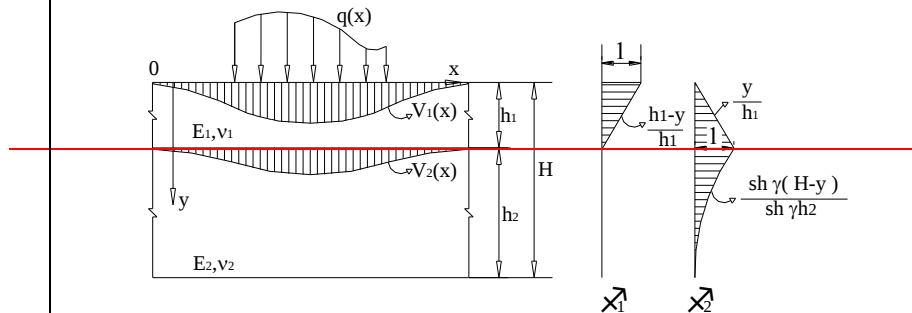
ölmek üzere

$$V_1(x) = \frac{q}{2k} [2 - e^{-\alpha(x-a)} - e^{\alpha(x-b)}]$$

(4.26)

şeklinde elde edilmektedir.

4.1.2 İki Katmanlı Sistemler



Şekil 4.3: İki Katmanlı Yayılı Yük Durumu

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 12 nk

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Yükseklikleri h_1 ve h_2 olan farklı elastisite ve poisson oranlarına sahip iki tabakadan oluşmuş düzlem sistemlerin yer değiştirme fonksiyonları,

$$\left. \begin{aligned} u(x, y) &= 0 \\ v(x, y) &= V_1(x)\phi_1(y) + V_2(x)\phi_2(y) \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

olarak alınabilir. Tabakalı sistemlerde dağılım fonksiyonları, tabaka kalınlığıyla bağlantılıdır. Tabaka kalınlığının az olması durumunda lineer dağılım fonksiyonları, derinliğin fazla olması hallerinde ise hiperbolik fonksiyonları probleme uygun düşmektedir. Bu nedenle üst tabakanın ince, alt tabakanın ise derin olduğu durumlarda dağılım fonksiyonları

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq y \leq h_1 \text{ için} \quad \phi_1 &= \frac{h_1 - y}{h_1}, \quad \phi_2 = \frac{y}{h_1} \\ h_1 \leq y \leq H(h_1 + h_2) \text{ için} \quad \phi_1 &= 0, \quad \phi_2 = \frac{\sinh\gamma(H - y)}{\sinh\gamma h_2} \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

şeklinde seçilebilir. Bu ifadedeki γ , yer değiştirmenin derinlikle değişimini belirleyen bir katsayıdır. Tabaka sayısının birden fazla olduğu bu durum için V_1, V_2 çökme değerlerinin tabaka yüzeylerindeki genelleştirilmiş yer değiştirmeleri göstermektedir. (Şekil 4.3). 4.28 ve 4.29 dikkate alındığında $n = 2$ için 3.8' den iki bilinmeyenli iki diferansiyel denkleme aşağıda gösterildiği şekilde elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1-\nu_1}{2} (r_{11} + r_{12}V_1'') - (s_{11}V_1 + s_{12}V_2) + \frac{1-\nu_1^2}{E_1} q &= 0 \\ \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} r_{12}V_1'' + \left[\frac{E_1}{2(1+\nu_1)} r_{22} + \frac{E_2}{2(1+\nu_2)} r_{22}' \right] V_2'' - \frac{E_1}{1-\nu_1^2} s_{12}V_1 - \left[\frac{E_1}{1-\nu_1^2} s_{22} - \frac{E_2}{1-\nu_2^2} s_{22}' \right] V_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

4.29'daki sabitlerin 4.28'deki dağılım fonksiyonlara bağlı açılımları aşağıda belirtildiği şekildedir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 20 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= \int_0^{h_1} \phi_1^2 dF = \frac{\delta h_1}{3} & s_{11} &= \int_0^{h_1} \phi_1'^2 dF = \frac{\delta}{h_1} \\ r_{12} &= \int_0^{h_1} \phi_1 \phi_2 dF = \frac{\delta h_1}{6} & s_{12} &= \int_0^{h_1} \phi_1' \phi_2' dF = -\frac{\delta}{h_1} \\ r_{22} &= \int_0^{h_1} \phi_2^2 dF = \frac{\delta h_1}{3} & s_{22} &= \int_0^{h_1} \phi_2'^2 dF = \frac{\delta}{h_1} \\ r_{22}' &= \int_{h_1}^H \phi_2'^2 dF = \frac{\delta h_2}{3} \phi_t & s_{22}' &= \int_{h_1}^H \phi_2'^2 dF = \frac{\delta}{h_2} \phi_k \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

4.30_ 'daki sabitlerin değerleri, 4.29_ 'da yerlerine konulduğunda zaman sistem diferansiyel denklemleri;

$$\left. \begin{aligned} 2t_1 V_1'' - k_1 V_1 + t_1 V_2'' + k_1 V_2 + q &= 0, \\ t_1 V_1' + k_1 V + 2(t_1 + t_2) V_2'' - (k_1 + k_2) V_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

olarak bulunur. İfadedeki katsayılar ise aşağıda belirtildiği gibi açık olarak gösterilebilir.

$$k_1 = \frac{E_1 \delta}{h_1 (1 - \nu_1^2)}, \quad t_1 = \frac{E_1 h_1 \delta}{12(1 - \nu_1)} \quad (4.32)$$

$$k_2 = \frac{E_2 \delta}{h_2 (1 - \nu_2^2)} \phi_k, \quad t_2 = \frac{E_2 h_2 \delta}{12(1 + \nu_2)} \phi_t \quad (4.33)$$

4.33_ 'de γ parametresine bağlı sabitler bulunmaktadır.

$$\left. \begin{aligned} \phi_k &= \frac{\gamma H}{2} \frac{\text{sh} \gamma H \text{ch} \gamma H + \gamma H}{\text{sh}^2 \gamma H} \\ \phi_t &= \frac{3}{2} \frac{1}{\gamma H} \frac{\text{sh} \gamma H \text{ch} \gamma H - \gamma H}{\text{sh}^2 \gamma H} \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

4.31_ 'deki k_1 ve k_2 alt indisler katman belirtmek üzere katmanların enine (ϵ_{yy}), t_1 ve t_2 ise kayma (ϵ_{xy}) şekil değiştirmesini belirleyen katsayılardır.

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 22 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

4.31_'deki iki diferansiyel denklemin çözümüne, denklem sayısını bire düşürülerek ulaşılabılır. Bu durumda V_1 ve V_2 yeni bir F fonksiyonu einsinden öyle ifade edilmeli ki, 4.31_'in ikinci denkleminde yerlerine konulduğunda eşitlik kendiliğinden sağlasın. Bu şartı gerçekleştirmek için V_1 ve V_2 , yeni bir F fonksiyonu einsinden aşağıdaki şekilde seçilebilir:

$$\left. \begin{aligned} V_1(x) &= (k_1 + k_2)F(x) - 2(t_1 + t_2)F''(x) \\ V_2(x) &= k_1F(x) + t_1F''(x) \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

4.35, 4.31_'de yerlerine konulduğunda sıfırdan farklı olan birinci denklem,

$$t_1(3t_1 + 4t_2)F^{IV} - 2(3t_1k_1 + t_1k_2 + t_2k_1)F'' + k_1k_2F = q(x) \quad (4.36)$$

şeklinde denklem sayısının azaltılması sonucu mertebesi ikiden dörde yükselmektedir. Bu diferansiyel denklemin çözümünde kullanılacak sınır şartlarının da F fonksiyonu einsinden ifade edilmesi gerekir. Kayma gerilmesi, birinci ve ikinci katmanda

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq y \leq h_1 \quad \tau_{xy} &= \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} \left(V_1' \frac{h_1 - y}{h_1} + V_2' \frac{y}{h_1} \right) \\ h_1 \leq y \leq H \quad \tau_{yx} &= \frac{E_2}{2(1+\nu_2)} V_2' \frac{sh\gamma(H - y)}{sh\gamma h_2} \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

olarak bulunabilir.

3.14_'deki genelleştirilmiş kesme kuvveti ifadesinin, genelleştirilmiş yer değiştirmelerin ayrı ayrı birim değerleri ve bu problemde $n = 2$ özel durumu için integral formda yazımı aşağıda gösterildiği gibi olmaktadır.

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \int_0^H \tau_{xy} \phi_1 dF \\ S_2 &= \int_0^H \tau_{xy} \phi_2 dF \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 20 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.38 ifadesi genelleştirilmiş yer değiştirme fonksiyonları cinsinden

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= t_1(2V_1' + V_2'), \\ S_2 &= t_1V_1' + 2(t_1 + t_2)V_2' \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu denklemle 4.35 birlikte düşünüldüğünde, genelleştirilmiş kesme kuvvetlerinin F fonksiyonu cinsinden elde edilebilir.

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= t_1[-(3t_1 + 4t_2)F''' + (3k_1 + 2k_2)F'] \\ S_2 &= (3t_1k_1 + t_1k_2 + 2t_2k_1)F' \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

Dört elastik karakteristikli iki katmanlı bu model, iki karakteristikli tek katmanlıya oranla daha doğru sonuç vermektedir. Farklı zemin durumlarına göre bu parametreler değişik şekilde irdelenebilir. Üst katmanın derinliğinin az ve elastisite modülünün değerinin de daha aşağıdaki tabakaya kıyasla daha az olması halinde, üst katman için 4.32'den

$$t_1 = 0, \quad k_1 = K \quad (4.41)$$

olarak alınabilir. Bu kabuller altında üst katman, winkler Winkler tipi sadece eksenel basınç şekil değiştirmesi yaparken, alt katman ise hem eksenel hem de kayma şekil değiştirmesi yapmaktadır. Bu özel durum için 4.35 ve 4.40 yeniden yazılabilir.

$$V_1 = (K + k_2)F - 2t_2F'', \quad V_2 = KF; \quad (4.42)$$

$$S_1 = 0, \quad S_2 = S = 2t_2V_2'' = 2Kt_2F' \quad (4.43)$$

İndirgenmiş 4.36 diferansiyel denklemi ise

$$-2t_2F'' + k_2F = \frac{q(x)}{K} \quad (4.44)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 6 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

şeklinde sadeleşir. Tekil yükleme durumu halinde 4.44, homojen diferansiyel denklem formunu alır.

$$-2t_2 F'' + k_2 F = 0 \quad (4.45)$$

Bu ifade 4.10 ile aynıdır. Bu durumda 4.15 ifadesinin y ekseninden bağımsız şekline eşit olan 4.45_'in çözümü $F(x)$ fonksiyonu,

$$F(x) = \frac{3(1-\nu_2^2)}{\sqrt{6(1-\nu_2)}} \frac{1}{\phi_t \phi_\alpha} \frac{P}{E_2 \delta K} e^{-\alpha_2 x} \quad (4.46)$$

şeklinde olup bu ifadedeki sabitlerin açılımı ise aşağıda belirtildiği gibidir.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \sqrt{\frac{k_2}{2t_2}} = \frac{1}{h_2} \frac{\sqrt{6(1-\nu_2)}}{(1-\nu_2)} \phi_\alpha \\ \phi_t &= \frac{3}{2} \frac{1}{\gamma H} \frac{sh \gamma H - ch \gamma H - \gamma H}{sh^2 \gamma H} \\ \phi_\alpha &= \gamma H \sqrt{\frac{1}{3} \frac{sh \gamma H ch \gamma H + \gamma H}{sh \gamma H ch \gamma H - \gamma H}} \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

4.46 , 4.42_'de yerine konulduğu zaman;

$$V_2 = \frac{3(1-\nu_2^2)}{\sqrt{6(1-\nu_2)}} \frac{1}{\phi_t \phi_\alpha} \frac{P}{E_2 \delta} e^{-\alpha_2 x} \quad (4.48)$$

ifadesi ile kuvvetin etkilediği nokta dışında;

$$V_+ = V_- \quad (4.49)$$

eşitliğinin sağladığı görülmektedir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 6 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Yaylı yük halinde, tekil yük için çıkarılmış F fonksiyonunda, $P = 1$ alınarak elde edilen teşir çizgileri aracılığıyla çözüme gitmek mümkün olmaktadır. Şekil 4.2_'nin iki katmanlı durumu için yardımcı F fonksiyonu

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq b \quad & \text{ için } F = \frac{q}{2Kk_2} \left[2 - e^{-\alpha_2 x} - e^{-\alpha_2 (x-b)} \right] \\ x > b \quad & \text{ için } F = \frac{q}{2Kk_2} \left[e^{-\alpha_2 (x-b)} - e^{-\alpha_2 x} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.50)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 37 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.42_'de yerlerine konulduğunda çökme değerlerine varılabilir.

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq b \quad & V_1 = \frac{q(K + k_2)}{Kk_2} - \frac{q}{Kk_2} (e^{-\alpha_2 x} + e^{\alpha_2 (x-b)}) \\ V_2 = \frac{q}{k_2} - \frac{q}{2k_2} (e^{-\alpha_2 x} + e^{\alpha_2 (x-b)}) \end{aligned} \right\} \quad (4.51)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$x > b \quad V_1 = V_2 = \frac{q}{2k_2} (e^{\alpha_2 (x-b)} - e^{-\alpha_2 x}) \quad (4.52)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

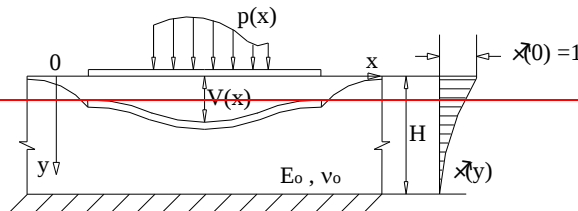
4.41_'deki kabullerin sonucu olarak elde edilen 4.52 ifadesi, üst katmanda yükleme bölgesi dışında şekil değiştirmenin oluşmadığını göstermektedir. 4.51 ve 4.52_'den V_1 'in yükün başlangıç ve bitiş kısımlarında süreksiz olduğu, V_2 'in ise her iki bölgede sürekli olduğu sonucuna varılabilir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

4.2 Kirişlerin Elastik Zeminlerdeki Eğilme Problemleri

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

4.2.1 Tek Tabakalı Kiriş Modellemesi



Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Şekil 4.4: Tek Tabakalı Kiriş Modeli

Zemin üzerindeki kiriş probleminin, kiriş ile zemin etkileşim yüzeyinde sürtünmenin ihmal edilmesi halinde diferansiyel denklemi, $p(x)$ kiriş üzerine etkiyen yayılı yükü, $q(x)$ zeminin kirişe olan tepkisini göstermek üzere (Şekil 4.4),

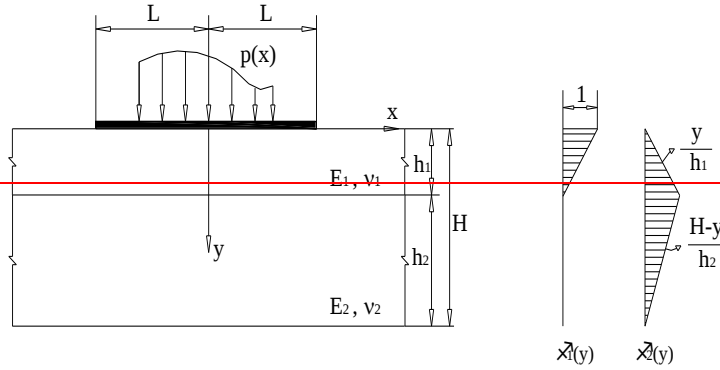
$$EJV^{IV}(x) = p(x) - q(x) \quad (4.53)$$

şeklinde yazılabilir. 4.53_’deki $V(x)$, zemin yüzeyi ile kiriş yer değiştirme fonksiyonunu göstermesi nedeni ile bu denklemden $q(x)$ çekilip 4.5_’de yerine konulduğunda

$$EJV^{IV}(x) - 2tV'' + kV = p(x) \quad (4.54)$$

kiriş etkisini göz önüne alan arttırılmış sistem diferansiyel denklemi elde edilmiş olur.

4.2.2 İki Tabakalı Kiriş Modellemesi



Şekil 4.5: İki Tabakalı Kiriş Modeli

4.53_’ün 4.31_’de yerine konulması ile iki tabakalı kirişli sistemin diferansiyel denklemleri oluşturulabilir.

$$\left. \begin{aligned} EJV_1^{IV}(x) - 2t_1V_1'' - t_1V_2'' + k_1V_1 - k_1V_2 - p(x) &= 0 \\ t_1V_1' + (2t_1 + 2t_2)V_2'' + k_1V_1 - (k_1 + k_2)V_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.55)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

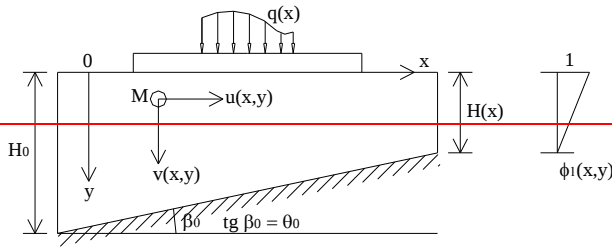
4.55_’ tdeki ikinci ifade 4.31_’ deki ile aynı olması nedeniyle 4.35 denklemini bu problem için de kullanılabilmektedir. Bu durumda indirgenmiş ama mertebesi artmış diferansiyel denklem

$$\left. \begin{aligned} F^{VI}(x)[-2EJ(t_1 + t_2)] + F^{IV}(x)[EJ(k_1 + k_2) + 3t_1^2 + 4t_1t_2] + \\ F''(x)[-6t_1k_1 - 2t_1k_2 - 2k_1t_2] + F(x)k_1k_2 + p(x) = 0 \end{aligned} \right\}$$

(4.56)

şeklinde değişir. Sabit katsayılı ve altıncı dereceden olan 4.56 diferansiyel denkleminin çözülmesi için genelleştirilmiş yer değiştirmeler ile kesme kuvvetlerinin yanında kiriş için yazılan statik denge şartları da $\sum M = 0$, $\sum T = 0$ sınır koşulları olarak kullanılmalıdır. Kiriş ile zemin yüzeyinin aynı çökme değeri yaptığı sonucuna dayanılarak oluşturulan bu denklemlerden anlaşılacağı üzere kirişli sistemler, sistemin mertebesini iki derece arttırmaktadır. Mertebenin artması sonucu alınması gereken ilave sınır şartları kiriş üzerinde yazılmalıdır. [5].

4.3 Eğik Tabanlı Zemin Modeli



Şekil 4.6: Eğik Tabanlı Zemin Örneği

İki boyutlu problemlerde, zemin ile rijit kaya tabakasının kesişimi eğik olması halinde katman derinliğinin x eksenini boyunca değişimi nedeni ile dağılım fonksiyonu, x koordinat eksenine de bağlı duruma gelmektedir. Zemin içindeki M noktasının yer değiştirmesi 4.1_’ den farklı olarak

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 23 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

$$u(x, y) = 0, \quad v(x, y) = V_1(x) \phi_1(x, y)$$

(4.57)

şeklinde gösterilmelidir.

Yer değiştirmenin sabit x değeri için y ekseninde doğrultusunda değişimini lineer olarak alınırsa,

$$\phi_1(x, y) = \frac{H - y}{H}$$

(4.58)

4.57'deki H ifadesi θ_0 , zemin eğimini göstermek üzere

$$H = H_0 - \theta_0 x$$

(4.59)

şeklinde tanımlanabilir. 4.57, 4.58, 4.59 dikkate alınıp 3.9'daki gerilme değerleri 3.9'da yerine konulduğunda

$$\frac{1 - \nu_0}{6} \delta H(x) V_1'' - \frac{1 - \nu_0}{6} \delta \theta_0 V_1' + \frac{\delta}{H(x)} \left[1 + \frac{\theta_0^2 (1 - \nu_0)}{6} \right] V_1 + \frac{1 - \nu_0^2}{E_0} q = 0 \quad (4.60)$$

diferansiyel denklemi elde edilmektedir. 4.60'da dağılım fonksiyon durumu altında kayma şekil değiştirme ve gerilmesinin genelleştirilmiş yer değiştirme fonksiyonunun birinci türevine bağlı olarak ifade edilmesi nedeniyle farklı dereceli türev içeren ifade sayısı artmıştır. Bu durum için kayma gerilmesi

$$\tau_{yx} = \frac{E_0}{2(1 + \nu_0)} \frac{dv}{dx} = \frac{E_0}{2(1 + \nu_0)} \left[V_1' \frac{H - y}{H} + \frac{\theta_0 y}{H^2} V_1 \right] \quad (4.61)$$

şeklinde, genelleştirilmiş kesme kuvveti ise aşağıda belirtildiği gibi ifade edilir.

$$S_1 = \frac{E_0}{12(1 + \nu_0)} \left[2H(x) V_1' - \theta_0 V_1 \right] \quad (4.62)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş ...

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Şekil 4.6_’da gösterildiği gibi zemin yüzeyinde kırıış olması durumunda 4.53_’den elde edilen $q(x)$ değerinin 4.60_’da yerine konmasıyla kırıışlı sistemin diferansiyel denklemi aşağıda belirtildiği gibi elde edilir. [1].

$$\frac{1-v_0^2}{E_0} EJV^{IV} + \frac{1-v_0}{6} \delta H(x) V'' + \frac{1-v_0}{6} \delta \theta_0 V' + \frac{\delta}{H(x)} \left[1 + \frac{\theta_0^2 (1-v_0)}{6} \right] V + \frac{1-v_0^2}{E_0} p(x) = 0 \quad (4.63)$$

4.4 Dağılım Fonksiyonları ve γ Parametresi

Yer değıştirme ve enine gerilme bileşeninin dağılımını belirleyen $\phi(y)$ dağılım fonksiyonlarının, dar katman için lineer, katman derinliğinin fazla olduğu durumlarda ise hiperbolik fonksiyonlar eindsinden seçilmesi gerektiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Buna karşın, farklı elastik özelliklere sahip katmanların oluşturduğu sonsuz düzlem problemlerinde ($H \rightarrow \infty$), lineer dağılım fonksiyonu kullanmak istendiğinde, zemini tek tabakalı, sabit derinlikli ve yeni zemin karakteristikleri ile modelleyebilmek gerekir. Bu idealleştirmede 4.7 ifadesinden yer değıştirme değeri ile gerçek yer değıştirmenin değerlendirilmesi sonucu eşdeğer derinlik bulunabilir. Belirtilen kabullerin uygun olmadığı, gerilme bileşeninin hızlı değışim gösterdiği problemlerde lineer fonksiyon yerine 4.28_’de gösterildiği gibi

$$\phi(y) = \frac{sh \gamma (H - y)}{sh \gamma H} \quad (4.64)$$

fonksiyonu kullanılabilir. Derinliğin sonsuza gittiği durumda 4.32_’deki k , t parametreleri sırasıyla sıfır ve sonsuza gitmesine karşın 4.64 koşulu altında aynı sabitler 4.33 ve 4.34_’’den sabit değerler almaktadır.

Belirtilen iki tip dağılım fonksiyonu olmasına karşın deneysel çalışmalar ve elastisite teorisi sonucu, problemin durumuna bağlı olarak farklı fonksiyonlar da seçilebilmektedir. Aşağıda belirtildiği gibi üstel fonksiyonlar da gerilme ve yer değıştirme dağılımını temsil edebilmektedir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

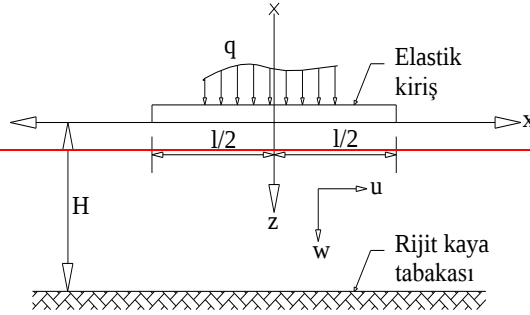
$$\phi(\gamma) = e^{-\gamma\gamma} \quad (4.65)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Vlasov modelinde zemin derinliğinin artması durumunda dağılım fonksiyonunun 4.64 ve 4.65'te belirtilen şekilde ifade etmenin çökme ve gerilme ekseninden gerçeğe daha uygun olacağını belirtilmesine karşılık, γ parametresinin de devreye girmesiyle problem üç parametreye bağlı olarak ifade edilir hale gelmiştir. Vlasov'da bu yeni parametreye tahmine dayanarak değer verilmesine karşılık Vallabhan [4] tarafından yapılan çalışmada kiriş, zemin ve yükleme durumlarını göz önüne alınarak oluşturulan boyutsuz parametreler sayesinde, ardışık yaklaşım metodu ile bu parametrenin değerinin bulunabileceği gösterilmiştir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın



Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Şekil 4.7: Vlasov Modelinde Kiriş Problemi

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Şekil 4.7'deki b kalınlıklı kiriş sisteminin potansiyel enerjisi

$$\pi = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{E_b I_b}{2} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx + \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^H \frac{b}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dz dx - \int_{-l/2}^{l/2} q(x) \bar{w} dx$$

$$\pi = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{E_b I_b}{2} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx + \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^H \frac{b}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dz dx - \int_{-l/2}^{l/2} q(x) \bar{w} dx \quad (4.66)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

ölmaktadır. Düzlem şekil değiştirme durumunda bünye denklemleri

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/1-\nu & 0 \\ \nu/1-\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu/2(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial w / \partial z \\ \partial u / \partial z + \partial w / \partial x \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/1-\nu & 0 \\ \nu/1-\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu/2(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial w / \partial z \\ \partial u / \partial z + \partial w / \partial x \end{Bmatrix}$$

(4.67)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

şeklinde toplu olarak yazılabilir. X doğrultusundaki yer değiştirme fonksiyonunun y doğrultusuna göre ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilebilir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$u(x, z) = 0, w(x, z) = \bar{w}(x)\phi(z)$$

(4.68)

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.67 ve 4.68, 4.66_'da gerilmelerin yerine konulduğunda potansiyel enerji denklemi genelleştirilmiş yer değiştirme ve dağılım fonksiyonu einsinden

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$\pi = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{E_b I_b}{2} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{Esb}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^H \left[\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \bar{w}^2 \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 + \frac{1}{2(1+\nu)} \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right)^2 \phi^2 \right] dz dx - \int_{-l/2}^{l/2} q(x) \bar{w} dx$$

$$\pi = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{E_b I_b}{2} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{Esb}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^H \left[\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \bar{w}^2 \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 + \frac{1}{2(1+\nu)} \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right)^2 \phi^2 \right] dz dx - \int_{-l/2}^{l/2} q(x) \bar{w} dx \quad (4.69)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü: 18 nk

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü: 17 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

elde edilmiştir. Üstteki ifadede $\bar{w}$ ve ϕ üzerinde varyasyonel kuralı uygulanırsa,

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$\delta \pi = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{d^2}{dx^2} \left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) \delta \bar{w} dx - \int_{-\infty}^{\infty} 2t \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \delta \bar{w} dx + \int_{-\infty}^{\infty} k \bar{w} \delta \bar{w} dx - \int_{-l/2}^{l/2} q(x) \delta \bar{w} dx +$$

$$\int_0^H \left\{ m \frac{d^2 \phi}{dz^2} + n \phi \right\} \delta \phi dz + \left[E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \delta \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right) \frac{d}{dx} \left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) \delta \bar{w} \right]_0^l +$$

$$m \left[\frac{d\phi}{dz} \delta \phi \right]_0^H + 2t \left[\frac{d\bar{w}}{dx} \delta \bar{w} \right]_{-\infty}^{\infty}$$

(4.69a)

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

denklemi elde edilir. 4.69a_'daki yeni sabitler açık olarak yazılabilir.

$$t = \int_0^H \frac{E_s b}{2(1+\nu)} \phi^2 dz$$

$$t = \int_0^H \frac{E_s b}{2(1+\nu)} \phi^2 dz$$

(4.69b)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$k = \int_0^H \frac{E_s b(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 dz$$

(4.69c)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$m = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E_s b(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \bar{w}^2 dx$$

(4.69d)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E_s b}{2(1+\nu)} \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right)^2 dx$$

(4.69e)

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 15 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.69a'dan $\delta \bar{w}$ terim ortak parantezine alındığında ;

* $-l/2 < x < l/2$ aralığındaki kiriş denklemi

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) - 2t \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} + k \bar{w} = q(x)$$

(4.70)

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 16 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

olarak yazılabilir. Moment ve kesme kuvvetlerinin $x = -l/2$ ve $l/2$ deki sınır şartları sırasıyla takip eden formlarda oluşturulabilir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$E_b I_b \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) \delta \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right) = 0$$

(4.71)

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$\left[\frac{d}{dx} \left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) - 2t \frac{d\bar{w}}{dx} \right] \delta \bar{w} = 0 \quad \left[\frac{d}{dx} \left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) - 2t \frac{d\bar{w}}{dx} \right] \delta \bar{w} = 0$$

(4.72)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

* $-\infty < x < -1/2$ ve $1/2 < x < \infty$ arasındaki yüksüz bölgenin diferansiyel denklemi

$$-2t \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} + k \bar{w} = 0$$

(4.73)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

ile, $x = -\infty, \infty, -1/2, 1/2$ deki genelleştirilmiş kesme kuvveti sınır şartı ise

$$2t \frac{d\bar{w}}{dx} \delta \bar{w} = 0$$

(4.74)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

şeklinde gösterilebilir:

* Aynı şekilde $\delta \phi$ ortak parantezine alındığı takdirde dağılım fonksiyonu

$$-m \frac{d^2 \phi}{dz^2} + n \phi = 0 \quad (4.75)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

diferansiyel denklemi bulunmuş olur. Bu aşamada yeni bir γ parametresi 4.76_'daki gibi tanımlanıp

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$\left(\frac{\gamma}{H} \right)^2 = \frac{n}{m} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right)^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{w}^2 dx} \quad (4.76)$$

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.75_'de yerine konulduğunda diferansiyel denklemin yeni durumu

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} - \left(\frac{\gamma}{H} \right)^2 \phi = 0$$

(4.77a)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

haline dönüşmektedir. Sınır değeri ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\left[\frac{d\phi}{dx} \delta\phi \right]_0^H = 0$$

(4.77b)

ϕ fonksiyonu için $\phi(y=0)=1$, $\phi(y=H)=0$ değerleri başlangıçtan tanımlandığından dolayı, değişkenlerin bilinen değerlerinde varyasyonunun sıfır olması gerektiği nedeni ile $\delta\phi$ varyasyon değeri, y 'nin bu değerleri için sıfır değerini sağlamaktadır. 4.77a_'nın 4.77b sınır şartı altında çözümü

$$\phi(z) = \frac{\sinh \gamma(1 - \frac{z}{H})}{\sinh \gamma}$$

(4.78)

şeklinde dir. 4.64 ile 4.78 incelendiğinde bu iki ifadede ki γ sabitinin boyutunu 4.67_'deki σ_y 'nin dağılım fonksiyonu einsinden ifadesinde boyut kontrolü yapılarak bulunabilir. Bu kontrolde 4.64_'teki Vlasov modelindeki γ parametresinin 1/uzunluk einsinden olduğu, 4.15 ifadesinde ise bu parametrenin boyutsuz olduğu görülür.

Şekil 4.7_'den görüldüğü gibi, üç bölgeden oluşan bu sistemde bölgelerin birleşim noktalarının diğer bir deyişle düğüm noktalarındaki denge denklemleri, aşağıdaki şekilde açıklanabilir; $l/2 < x < \infty$ için sistem diferansiyel denklemi 4.9_'un $w(x=\infty)=0$, sınır şartı altında çözümü;

$$\bar{w}(x) = \bar{w}(\frac{l}{2}) e^{-\sqrt{(k/2t)}(x-l/2)} \quad (4.79)$$

şeklinde ifade edildiğinde, üçüncü bölge için $x = l/2$ de oluşan genelleştirilmiş kesme kuvveti değeri $2t\bar{w}(x)$ ' ifadesinden

$$V_f|_{x=l/2} = \sqrt{2kt} \cdot \bar{w}(\frac{l}{2}) \quad (4.80)$$

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 15 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

olarak bulunur. P, M düğüm noktasına etkiyen tekil yük ve moment değerleri olmak üzere $x = l/2$ ’deki kesme ve moment kuvvetleri 4.81 ve 4.82’de belirtildiği gibi olmaktadır.

$$\left[\frac{d}{dx} \left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) - 2t \frac{d\bar{w}}{dx} \sqrt{2kt\bar{w} + 1} \right]_{x=l/2} = 0 \quad (4.81)$$

$$\left[\left(E_b I_b \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right) + M \right]_{x=l/2} = 0 \quad (4.82)$$

Aynı denge denklemleri $x = l/2$ için de aynı şekilde çıkarılabilmekle birlikte, üç bölge yerine sadece kirişin olduğu bölgenin hesaplanması istendiğinde, diğer kısımların bu bölgeye olan kesme ve moment sınır değerlerinin dış yük gibi dikkate alınması gerektiği sonucu çıkarılabilir.

Kiriş özelliğinin değişmediği kabulü altında aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanılarak;

$$X = \frac{x}{l} \quad (4.83)$$

$$W = \frac{\bar{w}}{l} \quad (4.84)$$

4.70 denklemi yeniden yazılabilir:

$$\frac{d^4 W}{dX^4} - 2T \frac{d^2 W}{dX^2} + KW = Q \quad (4.85)$$

Bu ifadedeki yeni terimlerin açılımları

$$2T = \frac{2tl^2}{E_b I_b} \quad (4.86)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 17 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 17 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$K = \frac{kl^4}{E_b I_b} \quad (4.87)$$

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 15 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$Q = \frac{ql^3}{E_b I_b} \quad (4.88)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

şeklinde olup 4.86 ve 4.87'nin $\phi(z)$ ekseninden açılımları ise

$$2T = \frac{E_s b l^2 H}{2(1+\nu)E_b I_b} \frac{1}{\gamma} \psi_t = \frac{6}{(1+\nu)} \left(\frac{E_s}{E_b} \right) \left(\frac{l}{d} \right)^3 \left(\frac{H}{l} \right) \left(\frac{1}{\gamma} \psi_t \right) \quad (4.89)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$K = \frac{12(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{E_s}{E_b} \right) \left(\frac{l}{d} \right)^3 \left(\frac{l}{H} \right) (\gamma \psi_k) \quad (4.90)$$

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 16 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.89 ve 4.90 ifadelerindeki sabitler ise aşağıda gösterilmektedir.

$$\psi_t = \frac{\sinh \gamma \cosh \gamma - \gamma}{2 \sinh^2 \gamma} \quad (4.91)$$

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 14 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

$$\psi_k = \frac{\sinh \gamma \cosh \gamma + \gamma}{2 \sinh^2 \gamma} \quad (4.92)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

4.85 diferansiyel denkleminin sonucunun 4.91 ve 4.92 dikkate alındığında γ parametresine bağlı olduğu görülür. Diğer taraftan 4.76 denkleminin bu probleme uyarlanması sonucu aşağıda belirtilen formda denklem elde edilmektedir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$\left(\frac{\gamma}{H}\right)^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)l^2} \frac{\int_{-l/2}^{l/2} \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 dx + \sqrt{\frac{K}{2T}} [w_{-l/2}^2 + w_{l/2}^2]}{\int_{-l/2}^{l/2} w^2 dx + \sqrt{\frac{2T}{K}} [w_{-l/2}^2 + w_{l/2}^2]}$$

$$\left(\frac{\gamma}{H}\right)^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)l^2} \frac{\int_{-l/2}^{l/2} \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 dx + \sqrt{\frac{K}{2T}} [w_{-l/2}^2 + w_{l/2}^2]}{\int_{-l/2}^{l/2} w^2 dx + \sqrt{\frac{2T}{K}} [w_{-l/2}^2 + w_{l/2}^2]} \quad (4.93)$$

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Burada kullanılan iterasyon ardışık yaklaşım tekniği şu şekilde açıklanabilir. 4.91 ve 4.92 denklemlerindeki γ parametresine başlangıçtan değer verilir. Bu değere bağlı olan 4.86 ve 4.87 aracılığıyla 4.85 diferansiyel denklemin çözümünden elde edilen W boyutsuz parametresi bulunur. 4.84 denkleminden çökme fonksiyonuna geçiş geçiş yapıp 4.93' de yerine konulur ve ilk verilen γ değeri ile yakınsaklığı irdelenir. Ardışık iki adımda bulunan γ değerleri farkının 0,001' in altında değer olması durumunda ardışık yaklaşıma son verilir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

$$\|\gamma_{i+1} - \gamma_i\| < .001 \quad (4.94)$$

Biçimlendirilmiş: İki Yana Yasla, Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Bu kısımda görüldüğü gibi, Vlasov tarafından Lagrange Virtüel İş Prensibine dayanılarak çıkarılan diferansiyel denklemlerin potansiyel enerjiden diğer bir yol olarak nasıl elde edilebileceği, γ parametresinin bulunması için geliştirilmiş bir yol ile birlikte incelenmiştir. Boyutsuz bu parametrelerin kullanılarak Winkler zemin katsayısı (k)'nı elde edilişi hakkında yapılan bir çalışma ise şu şekilde bir görüş sunmaktadır. Sabit bir poisson değerinde, plağın ortasında, köşesinde, kenar ortasında yüklenmesi halleri için plağın altındaki maksimum çökme değeri Vlasov modeline göre çözülür. 4.87'deki K parametresinden k elde edilir ve bu değer için Winkler modeline göre maksimum yer değiştirme bulunur. Yer değiştirmelerin oranı ile K değeri çarpılıp yeni yatak katsayısı bulunur. Çökme değerlerinin yeter derecede eşitliği sağlanıncaya kadar adıma devam edilir. Bu yolla bulunan winkler Winkler sabiti, yükleme ve boyut etkisini içermektedir. [9].

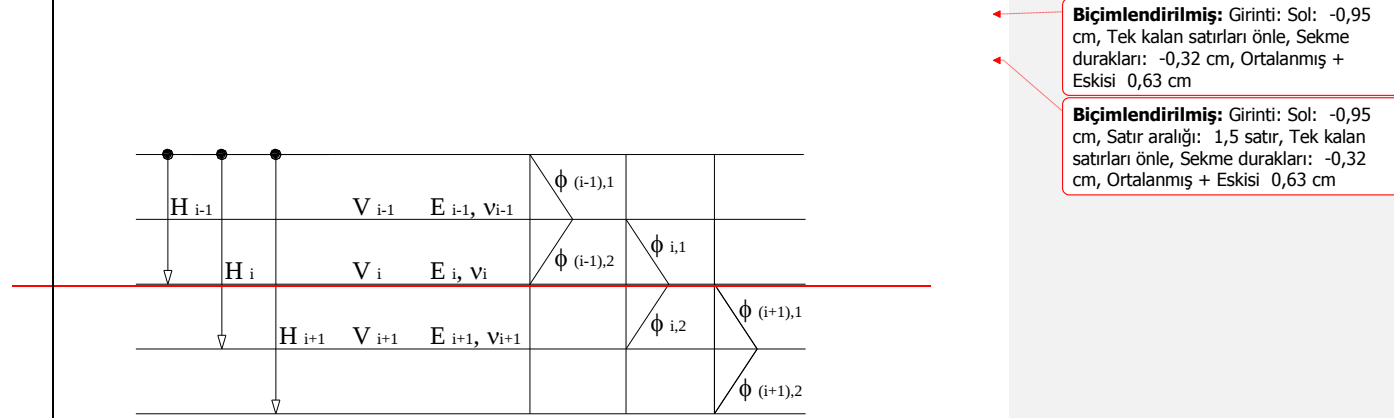
Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

1.1 4.5. Vlasov Modelinin Matris Formda Toplu Halde Gösterimi

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Önceki bölümlerde, en fazla iki katmanlı zeminlerin alt yüzeyinin eğik olmadığı durumlar için çıkarılan diferansiyel denklemler, katman sayısının fazla olduğu hallerde toplu olarak matris formda ifade edilebilir. Tek bir bölge için oluşturulan diferansiyel denklemlerin çözümü sonucu oluşan sabitler, bölgeler arası yer değiştirme ve kuvvet sınır şartları sonucu belirlenebilir.



Sekil 4.8: Katmanlı Vlasov Zemin Parçası

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Şekil 4.8 'de gösterilen katmanlı duruma ait Vlasov diferansiyel denklemler sabit katsayıdır. İlgili sabitler, zemin elastisite modülü, poisson oranı ile dağılım fonksiyonların çarpımlarının integrallerine bağlıdır. Katman numarası i olan yüzeye ait virtüel yer değiştirme durumunda, sadece $i-1$ ve $i+1$ numaralı komşu yüzey yer değiştirmeleri etkilenmektedir. Dolayısıyla oluşturulacak katsayılar matrisinin bant genişliği üç olmaktadır. Verilen farazi yer değiştirme durumu ile ilgili diferansiyel denklemler 3.9 'daki gerilme bağıntılarının 3.8 'de yerine konulması ile 4.95 'de belirtildiği gibi bulunabilir. Ara yüzeylerde yük durumunun olmaması nedeniyle verilen yüklerin etkisi ilk yüzey hariç denklemlerde sıfır olmaktadır.

$$\begin{aligned}
& V_{i-1}'' \left[\frac{E_{i-1}}{2(1+\nu_{i-1})} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \phi_{(i-1),2} \phi_{i,1} dy + V_i'' \left[\frac{E_{i-1}}{2(1+\nu_{i-1})} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \phi_{i,1} \phi_{i,1} dy + \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \phi_{i,2} \phi_{i,2} dy \right] \right. \\
& \left. V_{i+1}'' \frac{E_{i+1}}{2(1+\nu_{i+1})} \int_{H_i}^{H_{i+1}} \phi_{(i+1),1} \phi_{i,2} dy - V_{i-1} \frac{E_{i-1}}{1-\nu_{i-1}^2} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \phi_{(i-1),2} \phi_{i,1}' dy \right. \\
& \left. - V_i \left[\frac{E_{i-1}}{1-\nu_{i-1}^2} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \phi_{i,1}' \phi_{i,1}' dy + \frac{E_i}{1-\nu_i^2} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \phi_{i,2}' \phi_{i,2}' dy \right] - V_{i+1} \frac{E_{i+1}}{1-\nu_{i+1}^2} \int_{H_i}^{H_{i+1}} \phi_{(i+1),1}' \phi_{i,2}' dy = 0 \right.
\end{aligned}
\tag{4.95}$$

4.95 t'den yararlanılarak bBölge bazında diferansiyel denklemler toplu halde

$$[A][V]'' - [B][V] + [q] = 0 \tag{4.965}$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki x_i 'e bağlı alt indislerin katman yüzeyinin yer değiştirmesini gösteren bilinmeyen yer değiştirme vektörü

$$[V] = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \tag{4.976}$$

şeklinde, sadece zemin üst yüzeye etkiyen y koordinatından bağımsız dış yük vektörü ise

$$[q] = \begin{bmatrix} q_1(x) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.987}$$

katman ara yüzeylerinde dış yük olmaması nedeniyle tek elemanlıdır.

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Bant genişliği katman sayısının ikiden fazla olduğu durumlarda üç olan A, B matrisleri, dağılım fonksiyonları ve malzeme sabitlerine bağlı olarak oluşturulabilir.

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= \int_0^{H_1} \delta G_1 \phi_{1,2} \phi_{1,2} dy \\ A_{ii} &= G_{i-1} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \delta \phi_{i,1} \phi_{i,1} dy + G_i \int_{H_{i-1}}^{H_i} \delta \phi_{i,2} \phi_{i,2} dy \\ A_{i,(i+1)} &= G_i \int_{H_{i-1}}^{H_i} \delta \phi_{i+1,1} \phi_{i,2} dy \\ A_{i,(i-1)} &= G_{i-1} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \delta \phi_{i-1,2} \phi_{i,1} dy \end{aligned} \right\}$$

(4.998)

$$\left. \begin{aligned} B_{1,1} &= T_1 \int_0^{H_1} \delta \phi'_{1,2} \phi'_{1,2} dy \\ B_{ii} &= T_{i-1} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \delta \phi'_{i,1} \phi'_{i,1} dy + T_i \int_{H_{i-1}}^{H_i} \delta \phi'_{i,2} \phi'_{i,2} dy \\ B_{i,(i+1)} &= T_i \int_{H_{i-1}}^{H_i} \delta \phi'_{i+1,1} \phi'_{i,2} dy \\ B_{i,(i-1)} &= T_{i-1} \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} \delta \phi'_{i-1,2} \phi'_{i,1} dy \end{aligned} \right\}$$

(4.10099)

4.998 ve 4.10099'deki 'daki katman fiziksel özelliklerini içeren malzeme sabitleri, alt indis ilgili katmanı belirtmek üzere

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

$$\left. \begin{aligned} G_i &= \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \\ T_i &= \frac{E_i}{1-\nu_i^2} \end{aligned} \right\}$$

(4.1010)

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

şeklinde simgesel olarak gösterilebilir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Üst katman için bir, diğer katmanlar için iki kısımdan oluşan lineer dağılım fonksiyonları, katman yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu ifadelerdeki H katman yüksekliği, ilgili katmanın en derin noktasının değerini göstermektedir

$$\left. \begin{aligned} \phi_{12} &= 1 - \frac{y}{H_1} \\ \phi_{11} &= 0 \\ \phi_{12} &= 1 - \frac{y}{(H_i - H_{i-1})} \\ \phi_{11} &= \frac{y}{(H_{i-1} - H_{i-2})} \end{aligned} \right\}$$

(4.1021)

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

A, B matrislerinde i(i-1) alt indisli ifadelerinde i yerine i+1 yazıldığında elde edilen ifadelerin, i(i+1) alt indisli terimle aynı olduğu görülmektedir. Bu durumda A, B matrislerinin simetrik olduğu sonucuna varılabilir. Bu simetriğin nedeni, komşu yüzeylerin ara bölgelerinde alınan integrallerin aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Lineer dağılım fonksiyonu kullanılması halinde A, B sırasıyla matris formda 4.1032 ve 4.1043' de belirtildiği şekilde ifade edilebilir.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

$$[A] = \begin{bmatrix} 2a_1 & a_1 & & & \\ a_1 & 2(a_1 + a_2) & a_2 & & \\ & a_2 & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & a_{n-1} \\ & & & a_{n-1} & 2(a_{n-1} + a_n) \end{bmatrix} \quad (4.1032)$$

Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 52 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

$$[B] = \begin{bmatrix} b_1 & -b_1 & & & \\ -b_1 & (b_1 + b_2) & -b_2 & & \\ & -b_2 & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & -b_{n-1} \\ & & & -b_{n-1} & (b_{n-1} + b_n) \end{bmatrix} \quad (4.1043)$$

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Katmanların elastisite modülü, poisson oranı ve derinliklerinin aynı olması bir diğer özel durumunda ise 4.103 ve 4.104 'deki A, B matrislerindeki alt indislere gerek kalmamaktadır.

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm + 1,27 cm

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

4.965 'deki takım diferansiyel denklemlerinin çözümü sonucu oluşacak sabitlerin bulunmasında, aynı virtüel yer değiştirme altında ortak katman ve bitişik bölge ara yüzeylerde yazılan genelleştirilmiş kesme kuvveti ifadeleri ise 4.105 4' tde olduğu şekilde yazılabilir. Diğer sınır şartı ise, yer değiştirmenin sürekliliği gereğince, katmanların yan bölge bağlantı noktalarında ortak değer alması ile yazılabilir.

$$\left. \begin{aligned} Sh_1 &= \int_0^{H_1} G_1 [V_1' * \phi_{1,2} * \phi_{1,2} + V_2' \phi_{2,1} * \phi_{1,2}] dy \\ Sh_n &= \int_{H_{n-2}}^{H_{n-1}} G_{n-1} [V_{n-1}' * \phi_{n-1,2} * \phi_{n,1} + V_n' \phi_{n,1} * \phi_{n,1}] dy + \int_{H_{n-1}}^{H_n} G_n [V_n' * \phi_{n,2} * \phi_{n,2}] dy \\ Sh_i &= \int_{H_{i-2}}^{H_{i-1}} G_{i-1} [V_{i-1}' * \phi_{i-1,2} * \phi_{i,1} + V_i' \phi_{i,1} * \phi_{i,1}] dy + \int_{H_{i-1}}^{H_i} G_i [V_i' * \phi_{i,2} * \phi_{i,2} + V_{i+1}' * \phi_{i+1,1} * \phi_{i,2}] dy \end{aligned} \right\}$$

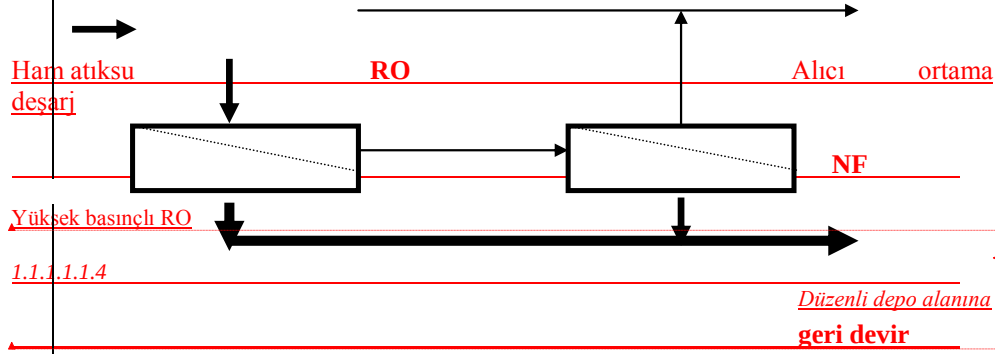
Biçimlendirilmiş: Alçaltma ölçütü 73 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: -0,95 cm, Satır aralığı: 1,5 satır, Tek kalan satırları önle, Sekme durakları: -0,32 cm, Ortalanmış + Eskisi 0,63 cm

(4.1054)

Zemin yüzeyinde kiriş olması durumunda, 4.965_'daki A matrisinin kolon sayısı ile V vektörünün satır sayısı bir artmaktadır. Kiriş etkisinin ilk terimlerde göz önüne alınması halinde ilave kısımlara, [A] matrisinde 1x1 terime EI, V vektöründe ise ilk terime V_1^{iv} gelmektedir. 4.1054 genelleştirilmiş kuvvet denklemlerinde kirişin etkisinin de göz önüne alınması gerekir. Kirişin üst yüzeyde olması nedeni ile genelleştirilmiş kesme kuvvetine kiriş etkisi, kiriş kesme kuvvetine eşittir.



Şekil 4.9 Halle-Lochau düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi (Peters, 1997)

Tablo 4.8: Halle-Lochau düzenli depo alanı ters osmoz tesisi sonuçları (Peters, 1997)

1.1.1.1.2 Par ametre	Ham atıksu	RO + NF süzöntü suyu	Verim (%)
BOİ ₅ (mg/l)	591.5	239.6	59.5
KOİ (mg/l)	6400	<15	99.9
NH ₄ -N (mg/l)	2260	0.66	>99.2
Na ⁺ (mg/l)	41000	2.5	99.9
Ca ⁺² (mg/l)	243	31	87.2
Mg ⁺² (mg/l)	952	133	86

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Cl ⁻ (mg/l)	29780	35629	19.6
pH	6.23	6.31	-
İletkenlik μS/cm)	120	20	>98

4.8 Almanya Breinermoor'da Ters Osmoz Uygulaması

Kurulu tesis, nitrifikasyon ve denitrifikasyon üniteleri ile tek kademeli ters osmoz ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 4.10). Günlük arıtılan atıksu miktarı 120-150 m³ civarındadır. Tesisin işletme basıncı 40-50 bar civarındadır. Konsantrasyon faktörü, 5-7 arasındadır. Elde edilen süzüntü suyunun kalitesi, limit değerlerin çok altında olmuştur. Bu şekilde, karakteristiği çok değişken olan sızıntı suyunda meydana gelebilecek herhangi bir kalite bozukluğu durumunda, limit değerleri yakalama konusunda herhangi bir risk kalmamış olmaktadır. Biyolojik ön arıtma ve daha sonra membran ile arıtma sonucunda, elde edilen suyun kalitesi Tablo 4.9 'da verilmiştir (HAASE, 1993).

Tablo 4.9: Breinermoor düzenli depo alanı süzüntü suyu kalite parametreleri(HAASE,1993)

Parametre	Ham atıksu	Biyolojik ön arıtma	RO süzüntü suyu	Standartlar
KOI (mg/l)	520-800	480-600	<15	200
BOI ₅ mg/l)	20-50	<15	Belirlenemedi	20
TKN (mg/l)	160-360	35-80	15-25	-
NH ₄ -N (mg/l)	80-250	0.1-40	0.015-1.4	50
NO ₃ -N (mg/l)	5-150	190-350	6-40	-
NO ₂ -N (mg/l)	0.04-1.0	0.1-2.5	0.015-0.7	-
Cl ⁻ (mg/l)	780-820	690-760	10-20	-
AOX (mg/l)	400-650	400-650	<10	500
pH	6.9-7.8	6.5-7.7	4.5-6.3	6-8.5
İletkenlik (mS/cm)	4.5-7.0	5.0-5.3	0.14-0.4	-
Balık zehirliliği	16	2.0-4.0	1-2	2

Ters osmoz membranları ile bütün parametrelerde, yüksek bir oranda giderme verimi söz konusudur. Denitrifikasyon bölmesinde, denitrifikasyon hızını artırmak için herhangi bir karbon kaynağı ilave etmeye gerek kalmadan, membranlar ile yüksek oranda nitrat gidermek mümkün olmaktadır.

Tesiste, RO'da oluşan konsantre akımını arıtmak için, evaporasyon ve yakma birimleri teşkil edilecektir. Bu tesisler yapılarına kadar, konsantre akımı düzenli depo alanına geri devir yaptırılmaktadır.

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın, İtalik Değil, Altı çizgisiz

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

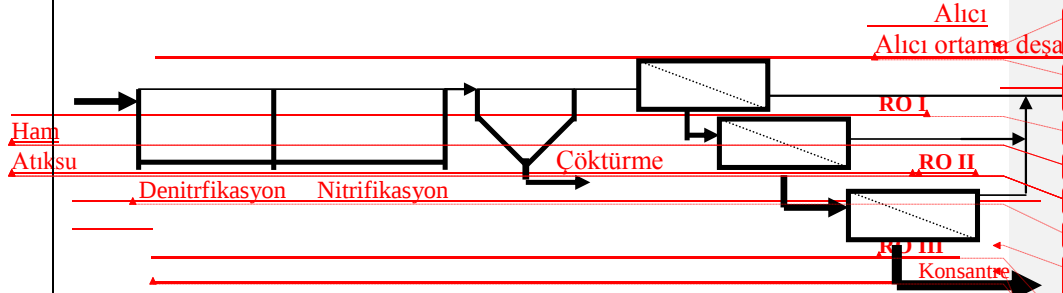
Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

<u>Pb(mg/l)</u>	<u>7-34</u>	<u><10</u>	<u><10</u>	<u><10</u>
<u>Zn(mg/l)</u>	<u>6.3-36</u>	<u><10</u>	<u><10</u>	<u><10</u>



1.1.1.1.2.4

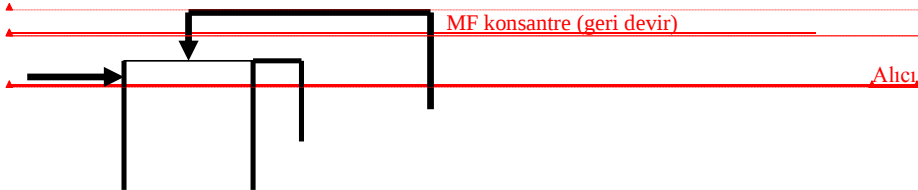
4.11: Lampertheimer düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi şematik akım diyagramı

4.10 Fransa Arnouvilla'da Ters Osmoz Uygulaması

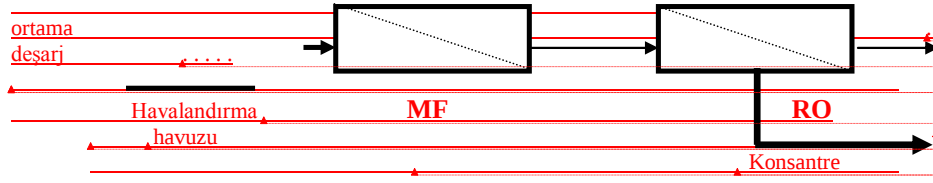
Arnouvilla (Fransa) Ters Osmoz Sistemi 10 m³/gün kapasiteli bir tesistir. 70 m³'lük havalandırma havuzu ve takiben 0.1 µm delik çaplı MF membranı kurulmuştur. Membran biyoreaktörden çıkan sular, RO membranları ile arıtılıp alıcı ortama verilmektedir (Şekil 4.11). Tesis, 1993 yılından beri devrededir. RO prosesi sonucunda elde edilen su kalitesi, standartların çok altındadır ve bu değerler Tablo 4.11'da görülmektedir. Giderme verimleri % 99'un üzerinde olmuştur. Aynı zamanda çıkan çamur miktarı da az olmuştur (Courant ve dğr., 1995).

Tablo 4.11: Arnouvilla düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma sonuçları (Courant ve dğr., 1995)

<u>Parametre</u>	<u>Ham Atıksu</u>		<u>MF süzöntü suyu</u>		<u>RO süzöntü suyu</u>	
	<u>ortalama</u>	<u>σ</u>	<u>ortalama</u>	<u>σ</u>	<u>ortalama</u>	<u>σ</u>
<u>KOI (mg/l)</u>	<u>1905</u>	<u>1193</u>	<u>565</u>		<u><10</u>	<u>-</u>
<u>TOC (mg/l)</u>	<u>578</u>	<u>351</u>	<u>190</u>		<u>1.23</u>	<u>-</u>
<u>AKM (mg/l)</u>	<u>230</u>	<u>-</u>	<u><1</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
<u>NO₃-N (mg/l)</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>370</u>	<u>115</u>	<u>34</u>	<u>-</u>
<u>NH₄-N (mg/l)</u>	<u>346</u>	<u>187</u>	<u>7</u>	<u>3</u>	<u>2.5</u>	<u>-</u>
<u>İletkenlik (µS/cm)</u>	<u>5790</u>	<u>1307</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>870</u>	<u>-</u>
<u>Toplam tuzluluk (mg/l)</u>	<u>3500</u>	<u>2500</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>138</u>	<u>-</u>
<u>Cl⁻ (mg/l)</u>	<u>1020</u>	<u>295</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>57</u>	<u>-</u>



- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: 12,5 cm, Sağ: -1,38 cm
- Biçimlendirilmiş: Sağa, Sağ: -1,38 cm
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi rengi: Beyaz
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın Değil
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: 1,25 cm, Sağ: -0,74 cm
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk, Kalın
- Biçimlendirilmiş: Normal, İki Yana Yasla, Girinti: Sol: 1,25 cm, Sağ: -1,38 cm
- Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş: Türkçe
- Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle
- Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın, İtalic Değil, Altı çizgisiz
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş Tablo
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 11 nk
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş
- Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk
- Biçimlendirilmiş



Şekil 4.11: Arnouvilla düzenli depo alanı sızıntı suyu arıtma tesisi şematik akım diyagramı

4.11 Hollanda West Friesland'da Ters Osmoz Uygulaması

West Friesland'da kurulan, tam ölçekli membran biyoreaktör (MBR) arıtma tesisi, kompost alanından gelen atıksuları ve düzenli depo alanından çıkan suları arıtan RO prosesinde oluşan konsantre akımını arıtmaktadır. RO 'dan çıkan süzüntü akımı alıcı ortama verilmektedir. MBR'da arıtılan atıksu kaynakları ve karakteristikleri Tablo 4.12'de verilmiştir. MBR 'daki işletme değerleri ve arıtma verimi ise Tablo 4.13'de sunulmuştur (Luning ve dğr., 1997).

Tablo 4.12: MBR'da arıtılan atıksu kaynakları ve karakteristikleri (Luning ve dğr., 1997)

Debiler	RO - konsantre (m ³ /st)	5.2	3.9
	Kompost atıksuyu (m ³ /st)	1.2	0.6
	Toplam (m ³ /st)	6.4	4.5
Atıksu Karakteristiği	NH ₄ -N (mg/l)	2900	2200
	KOI (mg/l)	16000	3600
	BOİ (mg/l)	7000	2600
	pH	7.8	7.3

Tablo 4.13: MBR 'daki işletme değerleri ve arıtma verimleri (Luning ve dğr., 1997)

Prosess koşulları	Sıcaklık	°C	30
	Basınc	Bar	3
	pH		6.8
Giderme	NH ₄ -N giderimi	%	> 99
	1.1.1.1.2.4.1.1.1 KOİ giderimi	%	> 93

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi rengi: Beyaz

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi rengi: Beyaz

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Girinti: Sol: 1,25 cm

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 10 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: Kalın, İtalik Değil, Altı çizgisiz

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

Biçimlendirilmiş: Satır aralığı: 1,5 satır

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Türkçe

Biçimlendirilmiş Tablo

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: İtalik Değil

Biçimlendirilmiş: Yazı tipi: 12 nk

Biçimlendirilmiş: Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk

Biçimlendirilmiş: Madde İşaretleri ve Numaralandırma

Biçimlendirilmiş: Sola

Verimleri	BOİ giderimi	%	> 99
	NO_x-N giderimi	%	> 80
İşletme koşulları	1.1.1.1.2.4.1.1.2 Akı	(lt/m².st)	> 110
	Enerji ihtiyacı (membran ünitesi için)	KWst/m³	8
	Membran ömrü	Yıl	5-7

- Biçimlendirilmiş:** Yazı tipi: İtalik Değil
- Biçimlendirilmiş:** Yazı tipi: İtalik Değil
- Biçimlendirilmiş:** Yazı tipi: 12 nk
- Biçimlendirilmiş:** Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk
- Biçimlendirilmiş:** Madde İşaretleri ve Numaralandırma
- Biçimlendirilmiş**
- Biçimlendirilmiş:** Yazı tipi: İtalik Değil
- Biçimlendirilmiş:** Yazı tipi: İtalik Değil
- Biçimlendirilmiş:** Aralık Önce: 0 nk, Sonra: 0 nk, Tek kalan satırları önle

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 PİLOT TESİSİN TANITIMI VE DENEYLERİN YAPILIŞI

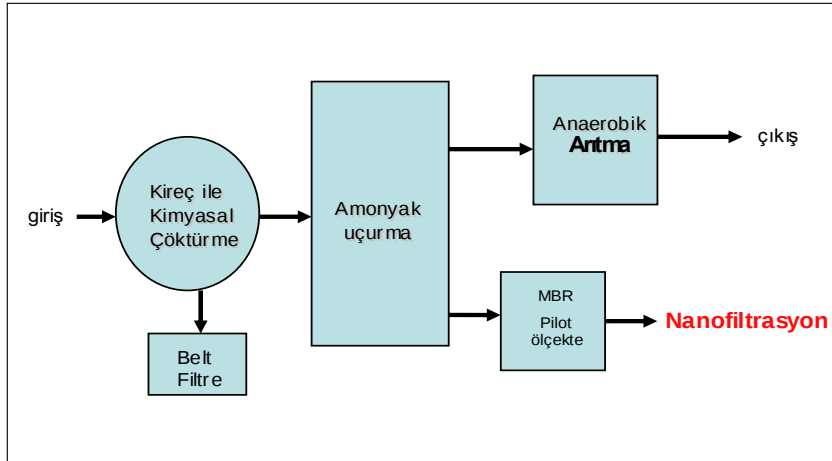
Pilot tesis çalışmaları, İstanbul Anadolu yakası genç depolama alanı çöp sızıntı suyunun nanofiltrasyon ile arıtılarak alıcı ortam deşarj standartlarına indirilebilme seviyesinin araştırılması için gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde genellikle KOİ, amonyak azotu ve toplam azot ölçülmüştür. Ayrıca iletkenlik, sıcaklık, pH, giriş basıncı, çıkış basıncı, TMB, giriş debisi, konsantre debisi ve süzöntü debisi değerleri de ölçülmüştür.

5.1.1 Pilot Tesisin Tanıtımı

Deneylerde kullanılan pilot tesis Vito Process Technology – Belçika firmasından temin edilmiştir. Membranların markası X-flow’dur.

İstanbul Anadolu yakası düzenli depolama sahasında genç çöp sızıntı suyunun arıtılması için mevcut bir çöp sızıntı suyu arıtma tesisi bulunmaktadır. Bu çöp sızıntı suyu arıtma tesisinin mevcut üniteleri Şekil 5.1’te de görüleceği üzere kısaca aşağıda anlatılmaktadır.

Ham çöp sızıntı suyu ilk önce kireç ile kimyasal çöktürmeye tabi tutulmakta daha sonra pH’sı yükseltilerek Amonyak sıyırma havuzunda amonyak uçurtulmaktadır. Anaerobik tank faaliyete henüz geçmediğinden dolayı Amonyak uçurma havuzundan çıkan sızıntı suyu pilot ölçekli MBR ünitesine ve buradan da Nanofiltrasyon pilot tesisi ünitesine geçmektedir.



Şekil 5.1: Mevcut çöp sızıntı arıtma tesisinin üniteleri



Şekil 5.2: Pilot tesis ve genel görünüş



Şekil 5.3: Pilot tesis önden görünüş



Şekil 5.4: Pilot tesis yandan görünüş

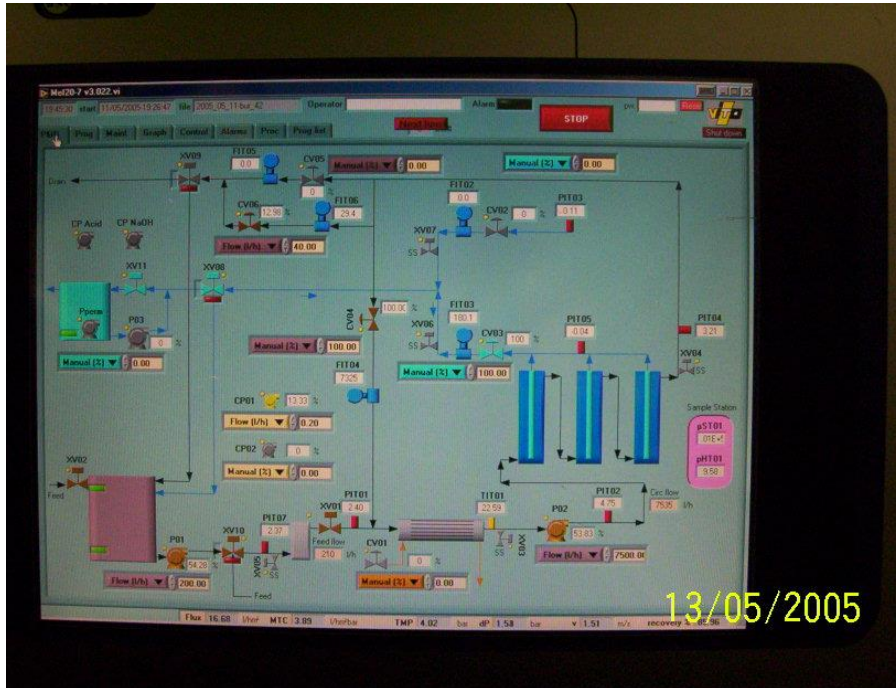


Şekil 5.5: Pilot nanofiltrasyon



tesis içi ve membranları

Şekil 5.6: Süzüntü tankları ve bağlantıları



Şekil 5.7: Pilot tesis kontrol ekranı

Ham çöp suyunun genel karakteristiği Tablo 5.1’de görülmektedir. İlgili Tabloda görüleceği üzere, bu çöp suyu çok kirli bir sudur. Özellikle KOİ, BOİ ve azot değerleri çok yüksektir. Bu değerler Avrupa’daki çöp sızıntı sularına göre de çok yüksektir. Bunun nedeni ülkemizde çöplerin ayrı ayrı toplanmaması, plastik gibi maddelerin çürüyerek çöp sızıntı suyuna karışmaları ve çöplerdeki organik madde miktarının yüksek oluşu, çöp sızıntı suyundaki parametreleri yükselten ana sebepler olarak düşünülebilir. Ayrıca çöp sızıntı suyunda iletkenlik çok yüksektir. Bunun birinci nedeni iyon miktarının çok olmasıdır. Özellikle tek değerlikli Na^+ ve Cl^- iyon konsantrasyonlarının yüksek oluşu iletkenliği artırmaktadır. Mg^{+2} ve Ca^{+2} gibi iki değerlikli iyonların konsantrasyonları bir değerlikli iyonlara göre çok daha az olduğundan iki değerlikli iyonların iletkenlik üzerinde etkileri az olmaktadır. İki değerlikli iyonlar daha çok suyun sertliğini etkilemektedirler.

Tablo 5.1: Ham çöp suyunun genel karakteristiği

Parametreler	Birim	Ham Çöp Sızıntı Suyu		Amonyak Uçurmadan Sonra	
		Min.	Maks.	Min.	Maks.
pH	-	5,5	6,5	7	8
KOİ	mg/l	10,000	20,000	9,000	18,000
BOİ	mg/l	5,500	12,500	5,000	11,500
Sıcaklık	°C	15	20		
P	mg/l	5	10		
Toplam-N	mg/l	2000	4,000	1,250	2,400
NH ₄ -N	mg/l	1,500	3,200	750	1,600
AKM	mg/l	500	1,000	300	600
SO ₄	mg/l	5	500	5	500
Cl ⁻	mg/l	2,000	4,000		
SiO ₂	mg/l	25	60		
HCO ₃	mg/l	7,500	15,000		
Pb	µg/l	10	25		
K ⁺	mg/l	1,500	2,500		
Ca ⁺²	mg/l	250	500		
Na ⁺¹	mg/l	3,000	5,000		
Mg ⁺²	mg/l	200	300		
Ba	µg/l	100	200		
Fe ⁺²	mg/l	25	50		
Toplam Sertlik	mg/lCaCO ₃	1,500	2,500	1,100	1,800
İletkenlik	µS/cm	30,000	40,000		
Toplam Alkalinite	mg/lCaCO ₃	8,000	13,000		

Arıtma tesisindeki mevcut olan pilot ölçekli MBR ünitesinden çıkan çöp sızıntı suyunun karakteristiği de Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: MBR ünitesinden çıkan çöp sızıntı suyunun karakteristiği

Parametreler	Birim	Ham Çöp Sızıntı Suyu		MBR Çıkışı	
		Min.	Maks.	Min.	Maks.
pH	-	5,5	6,5	8,1	9,1
KOİ	mg/l	10,000	20,000	823	942
BOİ	mg/l	5,500	12,500		
Sıcaklık	°C	15	20	25,9	36,3
P	mg/l	5	10		
Toplam-N	mg/l	2000	4,000	600	1115
NH4-N	mg/l	1,500	3,200	530	990
İletkenlik	µS/cm	30,000	40,000	9,400	25,100
Cl ⁻	mg/l	2,000	4,000		
Ca ⁺²	mg/l	250	500		
Na ⁺	mg/l	3,000	5,000		
Mg ⁺²	mg/l	200	300		

Çöp sızıntı suyu Arıtma tesisindeki mevcut pilot ölçekli MBR ünitesinden çıkan çöp sızıntı suyu nitrifikasyon-denitrifikasyon ünitelerinde verimli bir Şekilde KOİ ve azot giderimi oluşmuştur. Daha sonra MBR’ den çıkan süzüntü suyu Nanofiltrasyon pilot tesisine girmektedir.

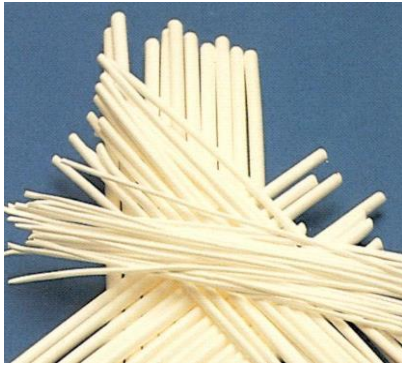
Tablo 5.3: Nanofiltrasyon ünitesinin giriş ve çıkış çöp sızıntı suyu karakteristikleri

Parametre	Birim	NF Girişi		NF Çıkışı	
		Min	Max	Min	Max
pH	-	6,1	9,1	6,4	9,2
KOİ	mg/l	823	942	254	350
Sıcaklık	°C	25,9	36,3	23,5	34,6
Toplam Azot	mg/l	600	1115	480	780
NH3-N	mg/l	530	990	430	750

5.1.2 Pilot Tesiste Kullanılan Membranlara ait Teknik Bilgiler

Pilot tesiste, çöp sızıntı suyu arıtımında ince film kapiler nanofiltrasyon membranları kullanılmıştır.

Şekil 5.8 ve Şekil 2.8’de pilot tesiste kullanılan kapiler nanofiltrasyon membranları görülmektedir. Pilot tesiste 1,5 mm çapında borucuklardan oluşan ince film kompozit kapiler nanofiltrasyon membranları kullanılmıştır. Bu tip membranlar genel olarak endüstriyel Atıksular, yüzeysel ve yeraltı sularından proses ve içme suyu üretimi için kullanılmaktadırlar.



Şekil 5.8: Kapiler membran boruları

Membranın esas malzemesi polyamid / polietersulfone' dir.

Nanofiltrasyon Membranın Performans Dataları aşağıdaki gibidir.

Temiz 25°C de su için akı miktarı ~16 l/m².h.100 kPa'dır. 25°C de %0,35 NaCl içeren su için başlangıç akısı ~13 l/m².h.100 kPa'dır. 25°C de %0,5 MgSO₄ içeren su için ilk başlangıç akısı ~12 l/m².h.100 kPa'dır. Maksimum TMB 700 kPa'dır. pH aralığı 25°C için 4 ile 10 arasındadır. Sıcaklık aralığı 1 – 40 °C arasındadır. Membranların temizlenme veya işletme sırasında pH, konsantrasyon, basınç veya sıcaklık gibi parametrelerin herhangi bir kombinasyonda maksimum limit sınırların üzerine olması membranların kullanım ömürlerini önemli oranda etkileyecektir.

Pilot tesiste nanofiltrasyonda her gün geri yıkama ve haftada bir gün kimyasal yıkama yapılmıştır. Kimyasal yıkama için pH değeri 11'den az olan NaOH, pH değeri 3'den çok olan HCl ve sitrik asit kullanılmıştır. Temizleme esnasında pH'nın 3 ile 11 aralığında olmasına ve sıcaklığın 40 °C 'yi aşmamasına dikkat edilmiştir. Çünkü pH'nın 3 ile 11 arasında olması ve sıcaklığın 40 °C 'yi aşmaması membranın zarar görmemesi ve ömrünün uzun olması için çok önemlidir.

Pilot tesiste kullanılan kapiler membran borucukların modül içinde dizilmiş hali ve modülün yandan görünüşü Şekil 5.9'te görülmektedir.

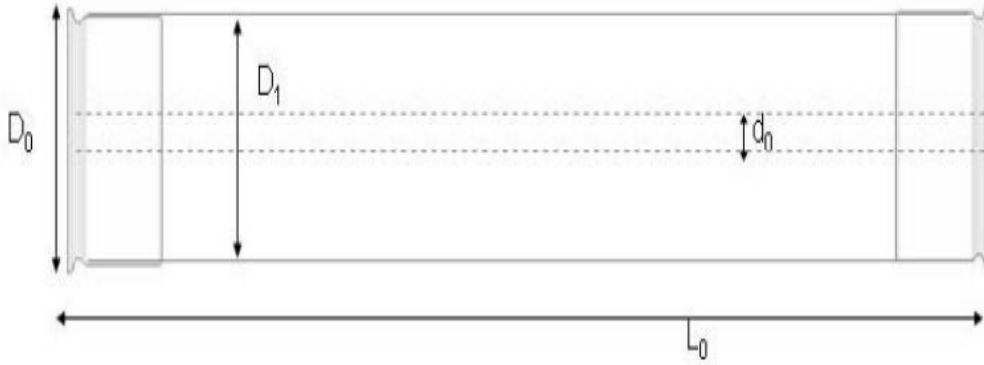
5.1.3 Pilot Tesiste Kullanılan Modüllere ait Teknik Bilgiler

Pilot tesiste kullanılan membran modülü Şekil 5.9'da görülmektedir. Bu membran modülü PSU malzemesinden yapılmıştır. Kelepçeler paslanmaz çelik olup montajı gayet kolay ve basittir.



Şekil 5.9: Kullanılan membran modülü

Pilot tesiste kullanılan modülün ölçüleri Şekil 5.10 ve Tablo 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.10: Membran modülü ölçüleri

Tablo 5.4: Kullanılan Nanofiltrasyon membranı modülü ölçüleri

Modül Tipi	Hidrolik Membran Çapı	Membr. Alanı	Uzunluğu L0	Süzüntü Toplama İç Çapı do	Besleme Bağlantısı Do	Modül Çapı D1
	[mm]	[m2]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
S-30	1,5	3,6	1047	16,3	119	100

5.1.4 Çalışmalarda Kullanılan Kimyasal Maddeler

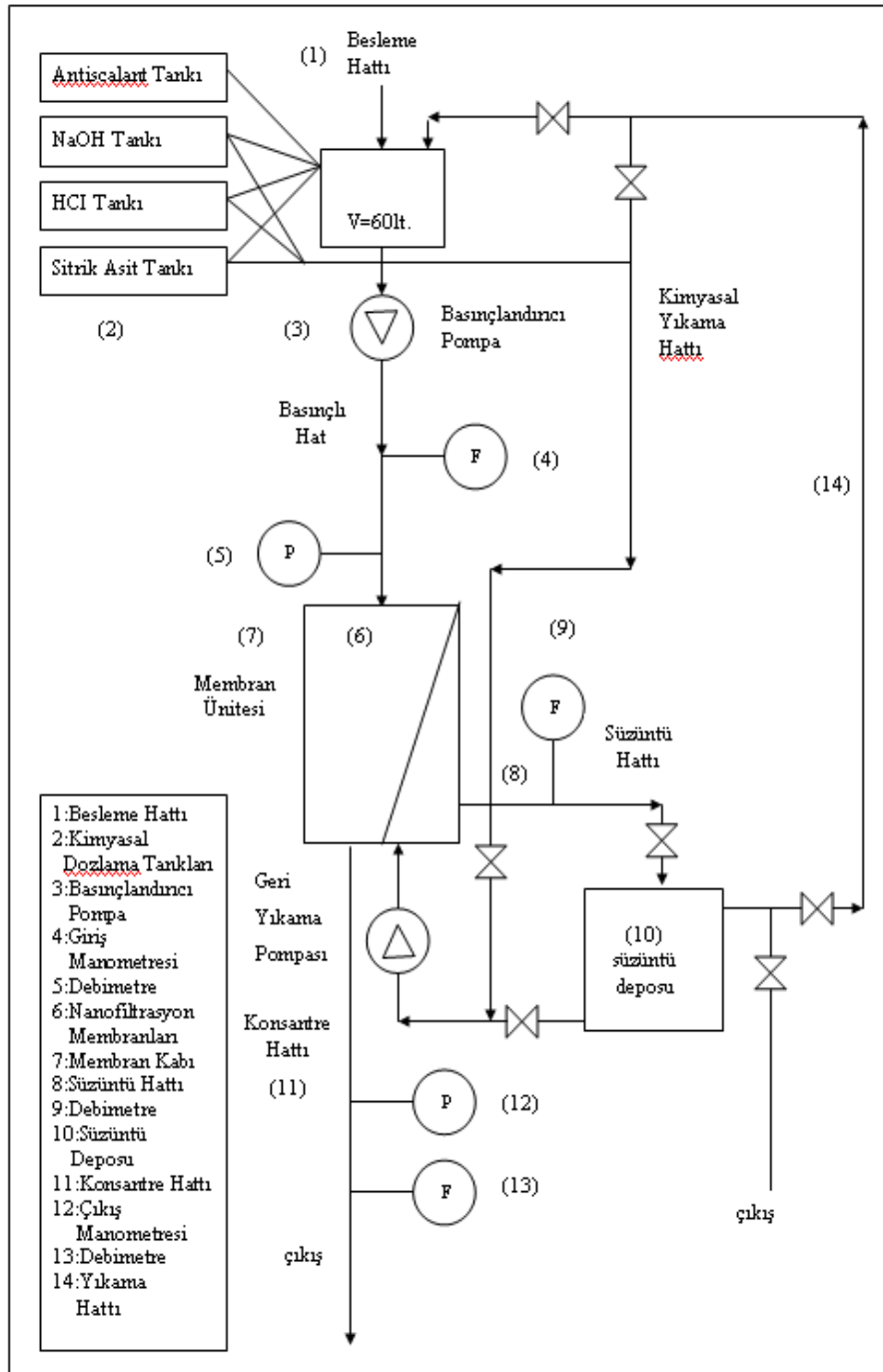
Pilot tesis çalışmaları çöp sızıntı suları üzerinde yapılmıştır. Nanofiltrasyon ünitesinde %40'luk NaOH, %20'lik sitrik asit, % 10'lük HCl ve antiskalant kullanılmıştır. NaOH, sitrik asit ve HCl ile haftada bir kere kimyasal yıkama yapılmıştır. Sisteme giren suyun belli pH sınırları arasında olması için NaOH, sitrik asit ve HCl kullanılmıştır. Tıkanma olmaması için de antiskalant ilave edilmektedir.

5.1.5 Pilot Tesisin Çalıştırılması

Pilot tesisin akım şeması Şekil 5.12 de verilmiştir. Çöp sızıntı suyu ilk önce 60 litrelik çelik bir tanka gelmektedir. Burada gerekli miktarda kimyasal ilavesi yapılmaktadır. Bu 60 litrelik tankın yanında antiskalant tankı, NaOH tankı, HCl tankı ve sitrik asit tankı bulunmaktadır. Her kimyasal madde tankının üzerinde otomatik dozlama cihazları vardır. Otomatik dozlama cihazları kontrol ünitesine tarafından kontrol edilmekte ve bu 60 litrelik su dolu tanka dozlama yapılmaktadır.

Daha sonra basınçlandırıcı pompadan geçen su membran ünitesine iletilmiştir. Membran ünitesine giriş hattında manometre ve debimetre vardır. Membran ünitesinden iki akım çıkmaktadır. Membrandan geçemeyen akım konsantre hattıdır ve bu hatta bir manometre ve bir debi ölçer vardır. Konsantre akımındaki sular atık olarak atılır. Bu atığın gelecekte düzenli çöp depolama sahasına gönderilmesi planlanmaktadır.

Membrandan geçen sular ise süzüntü akımını oluşturmuş ve süzüntü deposuna gönderilmiştir. Süzüntü deposunda toplanan suyun fazlası çıkıştan sistem dışına çıkmıştır. Eğer membranlarda geri yıkama yapılacak ise geri devir pompası ile süzüntü deposundaki su ve iki kat akı ile geri yıkama yapılmış ve membranın porları temizlenmiştir. Geri yıkamada membranın süzüntü hattındaki basınç membranlardaki basınçtan fazladır. Geri yıkamada sadece süzüntü suyu veya çeşme suyu



Şekil 5.12: Nanofiltrasyon ünitesi akım şeması

kullanılmıştır. Yıkama suyu konsantre hattından sistem dışına atılmıştır. Eğer kimyasal yıkama yapılacak ise süzöntü suyu yıkama hattından giderken gerekli kimyasallar katıldıktan sonra kimyasal yıkama hattından yine geri yıkama hattına ve oradan da membranlara ulaşır. Kimyasal yıkama, geri yıkamanın kimyasal maddelerle yapılan cinsi olarak düşünülebilir. Kimyasal yıkamadan sonra geri yıkama yapılmalıdır. Eğer ileri yıkama yapılacak ise süzöntü deposundaki su yıkama hattından 60 litrelik tanka verilir ve böylece sistemde debi artırılarak ileri yıkama yapılabilir. Pilot tesisin debisi 1 m³/saat'tir. Tesis TMB yaklaşık olarak 5 bar civarında olmuştur.

5.1.6 Deneylerin Yapılışı

Pilot tesiste gerçek çöp sızıntı suyu ve kapiler nanofiltrasyon membranı kullanılarak bir seri deneyler yapılmıştır.

Deneylerde KOİ, NH₄-N ve toplam azot deneyleri yapılmıştır. Deneyler Standart metodlara uygun olarak spektrofotometrik yöntem ile yapılmıştır. Ayrıca giriş basıncı, çıkış basıncı, TMB, giriş debisi, çıkış basıncı ile iletkenlik, sıcaklık ve pH değerleri ölçülmüştür.

Numuneler hem süzöntü suyu hattında hem de besleme hattından alınan anlık numuneler ile incelenmiştir.

Deneylerde Merck marka spektrofotometre, WTW marka iletkenlik ölçer, WTW marka pH ölçer ve WTW marka sıcaklık ölçer kullanılmıştır.

6 DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çöp sızıntı suyu değişken bir karakteristiğe sahip olup ilgili kirletici parametreler Tablo 5.1 de verilmiştir. Bölgedeki genç çöplerden oluşan katı atık düzenli depolama sahasındaki mevcut çöp sızıntı suyu arıtma tesisinde elde edilen arıtma sonuçları da Tablo 5.2 de sunulmuştur. Araştırma konusu olan çöp sızıntı suyunun nanofiltrasyon ile arıtılması ile ilgili nanofiltrasyon pilot tesisine giren ve çıkan suların kirletici parametreleri ise Tablo 5.3 te özetlenmiştir. Deneyler sırasında ölçülen değerler ise Ek.1’de verilmiştir.

Pilot çalışmada MBR çıkış suları NF’nin giriş suyu olarak kullanılmıştır. Nanofiltrasyon membranında akı, süzüntü, KOİ, Toplam-N ve iletkenlik parametrelerindeki değişim incelenmiştir.

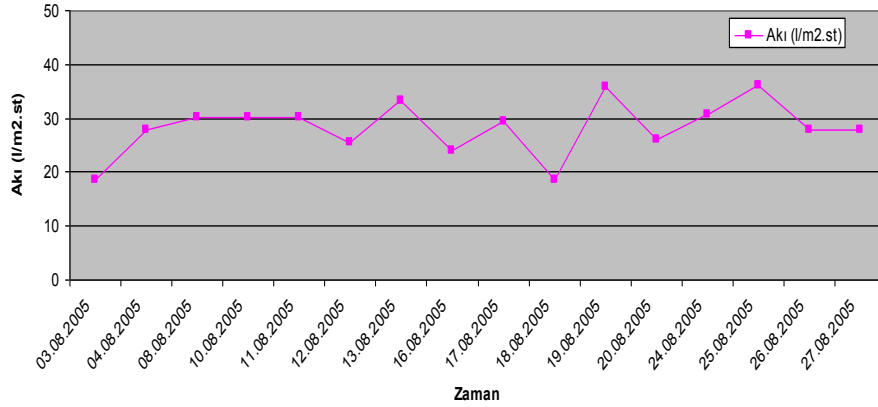
6.1. Akı

Şekil 6.1’de NF membranının akı-zaman grafiği verilmiştir. Akı süzüntü debisinin membran alanına bölünmesi ile bulunmaktadır. Pilot tesiste 3 adet nanofiltrasyon membranı kullanılmıştır. Her membranın alanı $3,6\text{m}^2$ ’dir. Toplam Membran alanı = $3 \times 3,6\text{m}^2 = 10,8\text{m}^2$ ’dir.

$$\text{Akı} = Q \text{ (l / st) } / A \text{ (m}^2\text{)}$$

Bu denklemde Q süzüntü debisi, A toplam membran alanıdır. Bu deneyler yapılırken her gün, gün sonunda geri yıkama ve her hafta sonunda kimyasal yıkama yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere, akı, $20\text{ l/m}^2\text{.sa}$ ile $40\text{ l/m}^2\text{.sa}$ arasındadır. TMB 5 bar için ortalama $30\text{ l/m}^2\text{.sa}$ akı değeri elde edilmiştir. Temiz su için bu değer yaklaşık $60\text{ l/m}^2\text{.sa}$ ’tır. Bu nedenle elde edilen sonuç normaldir. Akıdaki dalgalanma giriş suyundeki parametrelerdeki değişimlerden dolayı olmaktadır. Grafiğe bakıldığında

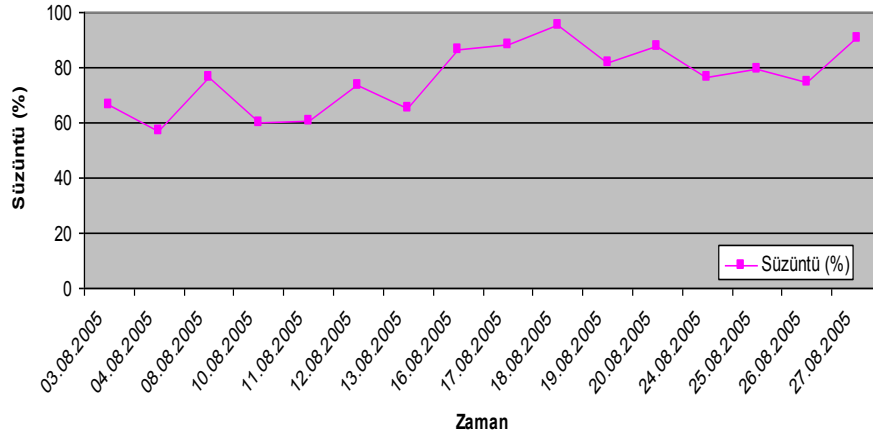
akının neredeyse sabit kaldığı ve tıkanmanın olmadığı söylenebilir. Kullanılan kapiler membranların temizlenmesi daha kolaydır ve tıkanmaya daha dirençlidir. Burada çöp sızıntı suyu kirlilik parametrelerinin çok yüksek olan bir suda bile tıkanmadığı ve akının azalmadığı görülmektedir.



Şekil 6.1: NF membranında akı-zaman grafiği (TMB 5 bar)

6.2. Süzüntü

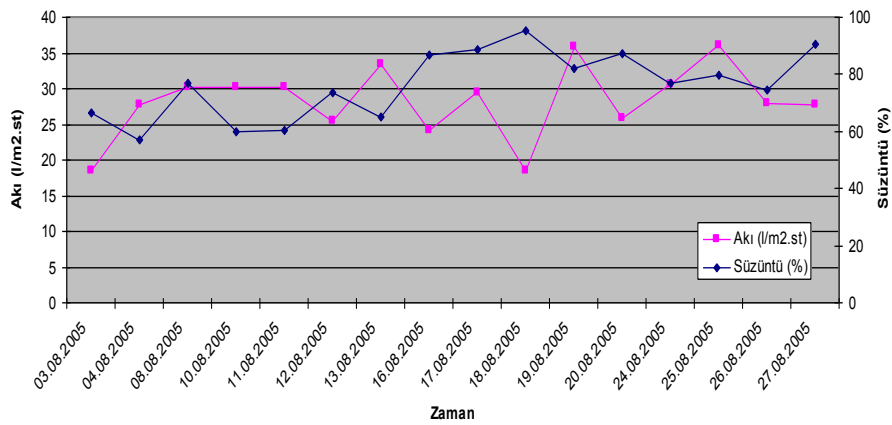
Şekil 6.2’de NF membranının süzüntü-zaman grafiği verilmiştir. Bu deneyler yapılırken her gün, gün sonunda geri yıkama ve her hafta sonunda kimyasal yıkama yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere, süzüntü oranı, % 60 ile %95 arasında değişmektedir. Grafikteki artış ve azalmalar giriş suyunun karakteristiğine göre değişiklik göstermektedir. Kullanılan kapiler membranların temizlenmesi daha kolaydır ve tıkanmaya daha dirençlidir. Burada çöp sızıntı suyu kirlilik parametrelerinin çok yüksek olan bir suda bile tıkanmadığı ve akının azalmadığı görülmektedir.



Şekil 6.2: NF membranında süzüntü-zaman grafiği (TMB 5 bar)

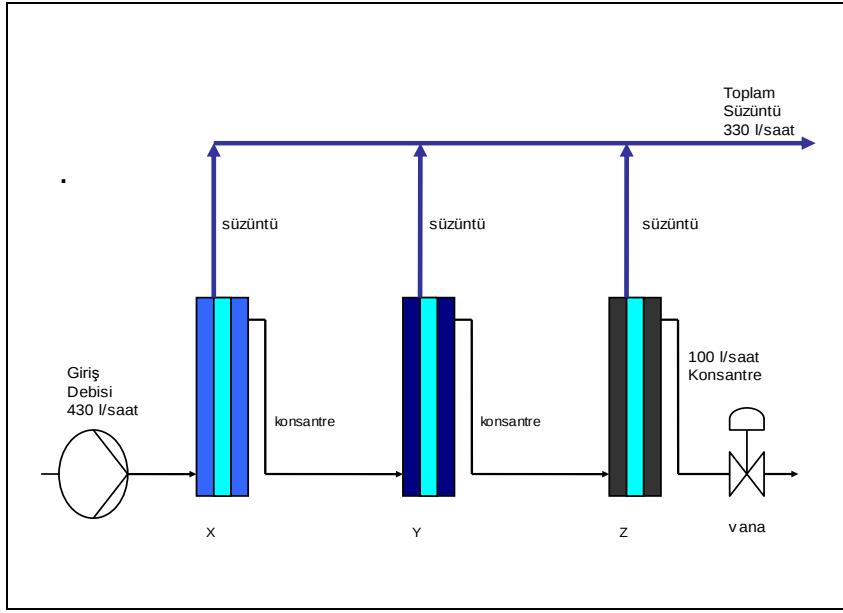
6.3. Akı-Süzüntü

Şekil 6.3’de NF membranının akı-süzüntü-zaman grafiği verilmiştir. Bu deneyler yapılırken her gün, gün sonunda geri yıkama ve her hafta sonunda kimyasal yıkama yapılmıştır. Grafikte akı, $20 \text{ l/m}^2.\text{sa}$ ile $40 \text{ l/m}^2.\text{sa}$ arasında ve ortalama $30 \text{ l/m}^2.\text{sa}$ civarında seyretmektedir. Süzüntü oranı ise %60 ile %95 arasında seyretmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere akı ile süzüntü arasında ters bir orantı vardır. Akı arttığında süzüntü oranı azalmakta, akı azaldığı zaman ise süzüntü oranı artmaktadır.



Şekil 6.3: NF membranında akı-süzüntü-zaman grafiği (TMB 5 bar)

Akındaki dalgalanma giriş suundaki parametrelerdeki değişimlerden dolayı olmaktadır. Grafiğe bakıldığında akının neredeyse sabit kaldığı ve tıkanmanın olmadığı söylenebilir. Kullanılan kapiler membranların temizlenmesi daha kolaydır ve tıkanmaya daha dirençlidir. Burada çöp sızıntı suyu kirlilik parametrelerinin çok yüksek olan bir suda bile tıkanmadığı ve akının azalmadığı görülmektedir.



Şekil 6.4: Konsantre hattındaki vananın akı ve süzüntüye etkisi

Tablo.6.1: Akı ile süzüntünün ters orantılı olduğunu açıklaya örnek veriler

Giriş debisi	Toplam Süzüntü Debisi	Konsantre Debisi	Toplam Akı	Toplam Süzüntü oranı
l/saat	l/saat	l/saat	l/m2.saat	%
430,00	330,00	100,00	30,56	76,74
893,00	358,00	535,00	33,15	40,09
320,00	280,00	40,00	25,93	87,50

Yukarıdaki örnekte konsantre hattındaki vana açılınca, konsantre debisi 100 l/saat'ten 535 l/saat'e artmakta ve konsantre debisi arttığından dolayı giriş debisi de

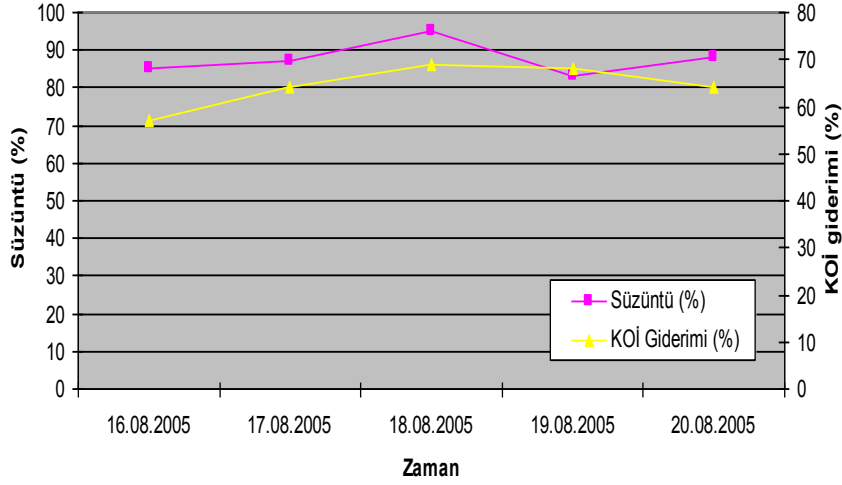
artmaktadır. Membranın içindeki konsantrenin çoğu konsantre hatından çıktığından, membranın içindeki konsantre azalmakta bu nedenle membrandan geçen süzüntü debisi bir miktar artmakta ve buna paralel olarak akı miktarı artmaktadır. Sonuçta konsantre debisi artınca, süzüntü debisi ve giriş debisi artmakta fakat süzüntü oranı azalmaktadır. Bunun nedeni giriş debisinin artış oranının toplam süzüntü debisinin artış oranına göre çok daha fazla olmasıdır. Sonuç olarak konsantre hattındaki vana açılınca, akı artmakta fakat süzüntü oranı azalmaktadır.

Yine aynı Şekilde yukarıdaki örnekte konsantre hattındaki vana kısılinca, konsantre debisi 100 l/saat'ten 40 l/saat'e azalmakta ve konsantre debisi azaldığından dolayı giriş debisi de azalmaktadır. Kısılan vanadan dolayı membranın içindeki konsantre, konsantre hatından çıkmakta zorlandığı için, membranın içindeki konsantre oranı artmakta bu nedenle membrandan geçen süzüntü debisi bir miktar azalmakta ve buna paralel olarak akı miktarı da azalmaktadır. Sonuçta konsantre debisi azalınca, süzüntü debisi ve giriş debisi azalmakta fakat süzüntü oranı artmaktadır. Bunun nedeni giriş debisindeki azalma oranının toplam süzüntü debisindeki azalma oranına göre çok daha fazla olmasıdır. Sonuç olarak konsantre hattındaki vana kısılinca, akı azalmakta fakat süzüntü oranı artmaktadır.

6.4. Arıtılan Su Kalitesi

6.4.1. KOİ Giderimi

Şekil 6.5'de NF membranda KOİ Giderimi-süzüntü-zaman grafiği verilmiştir. Nanofiltrasyona girişte KOİ değişken olmakla beraber ortalama 820 mg/l civarında iken, çıkışta ortalama 300 mg/l civarında olmaktadır. Grafiğe göre KOİ giderme verimi %60 ile %70 arasında ve ortalama %65 civarında seyretmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere KOİ Giderim verimi hemen hemen sabittir. Süzüntü akımı genellikle KOİ giderimi verimi ile ters orantılıdır.



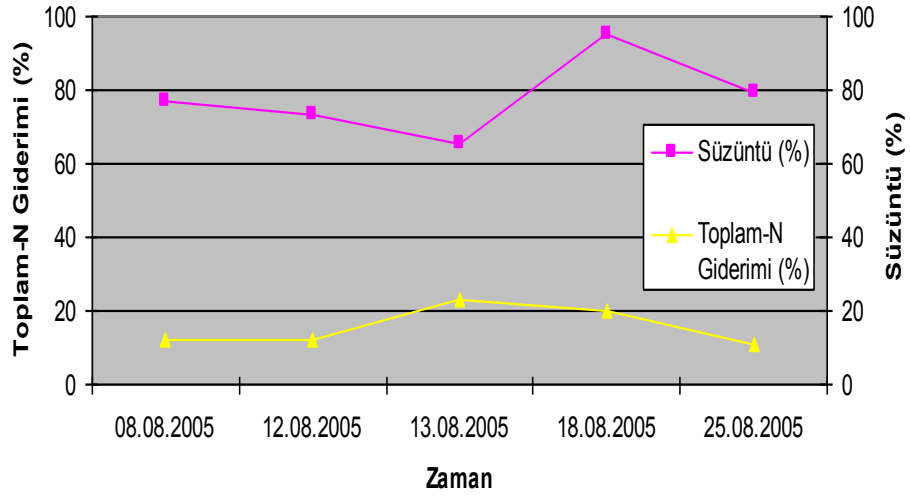
Şekil 6.5: NF membranında KOİ Giderimi-süzüntü-zaman grafiği (TMB 5 bar)

6.4.2. Toplam Azot Giderimi

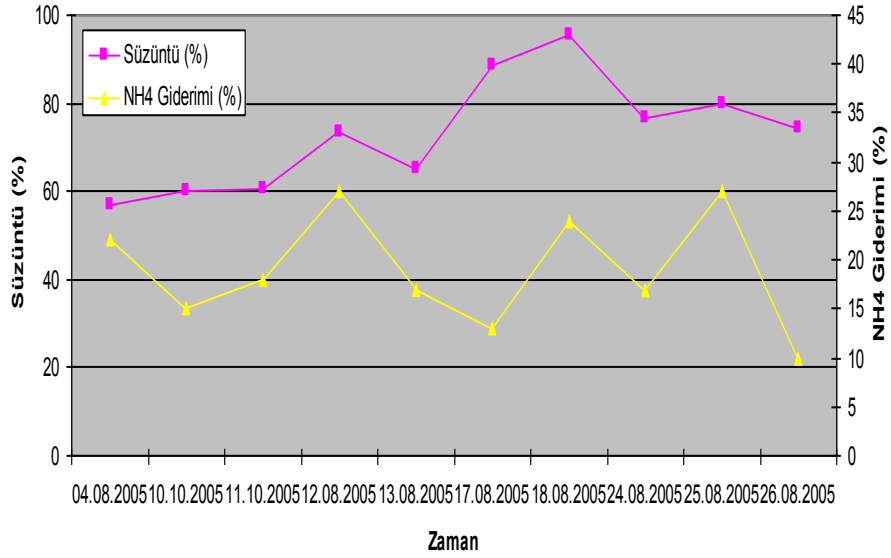
Şekil 6.6’de NF membranda toplam azot giderimi-süzüntü-zaman grafiği verilmiştir.. Grafiğe göre azot giderimi %15 ile %22 arasında ve ortalama %17 civarında seyretmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere toplam azot giderimi azdır. Toplam N içinde bulunan NH_4 , NO_2 , NO_3 ve organik azot nanofiltrasyon membranından çoğunlukla geçtiğinden dolayı toplam-N giderim veriminin düşük olması normaldir. Süzüntü akımı ile Toplam Azot giderimi verimi ile ters orantılıdır.

6.4.3. NH_4 Giderimi

Şekil 6.7’de NF membranda NH_4 -süzüntü-zaman grafiği verilmiştir. Grafiğe göre NH_4 giderimi %15 ile %25 arasında ve ortalama %20 civarında seyretmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere NH_4 Giderim verimi hemen hemen aynıdır. NH_4 nanofiltrasyondan membranından geçebildiğinden dolayı NH_4 gideriminin az olması normaldir.



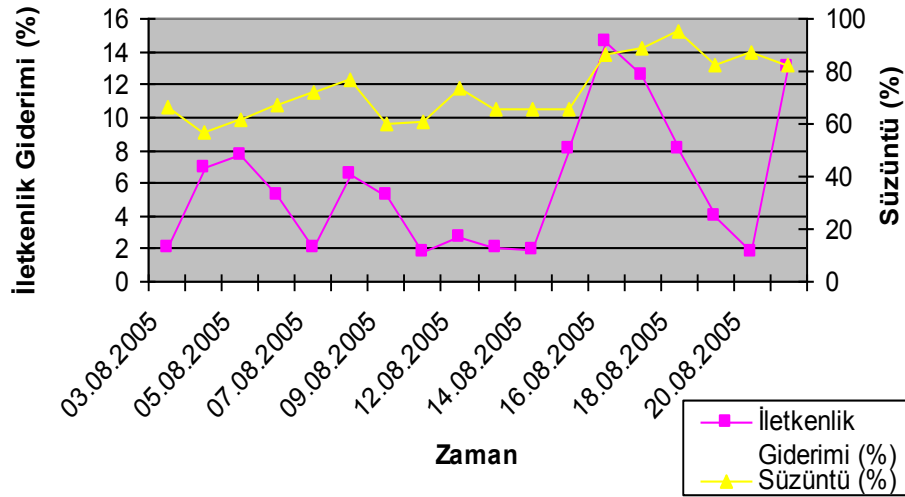
Şekil 6.6: NF membranında Toplam-N Giderimi-süzüntü-zaman grafiği (TMB 5 bar)



Şekil 6.7: NF membranında NH4 Giderimi-süzüntü-zaman grafiği (TMB 5 bar)

6.4.4. İletkenlik Giderimi

Şekil 6.8’de NF membranda İletkenlik Giderimi -süzüntü-zaman grafiği verilmiştir. Grafiğe göre İletkenlik Giderim verimi %2 ile %14 arasında değişmekte olup ortalama %6 civarında seyretmektedir. İletkenliğe çöp sızıntı suyundaki iyonlar neden olmaktadır. Fakat çöp sızıntı suyunda Na^+ , Cl^- iyonları çok olduğundan dolayı ve bunların çoğu nanofiltrasyondan geçtiğinden dolayı iletkenlik giderme verimi azdır. Mg^{+2} ve Ca^{+2} iyonları nanofiltrasyonda %80 civarında tutulmasına rağmen Na^+ , Cl^- iyonlarına göre oranları çok düşük olduğundan iletkenliğe etkileri azdır. Bu nedenle iletkenliğin bu seviyede gideriliyor olması normaldir.



Şekil 6.8: NF membranında İletkenlik Giderimi-süzüntü-zaman grafiği (TMB 5 bar)

6.5. Deşarj Standartları İle Karşılaştırma

Tablo 6.2’de çöp sızıntı suyu için alıcı ortam dere deşarj limit değerleri belirtilmiştir.

Tablo 6.2: Alıcı Ortam Dere Deşarj Limit Değerleri

Parametre	Birim	Değer
BOI ₅	mg/l	50
KOI	mg/l	125
AKM	mg/l	35
Toplam Azot	mg/l	400
Kadmiyum	mg/l	0,1
Kurşun	mg/l	1
Bakır	mg/l	3
Total- Krom	mg/l	0,5
Çinko	mg/l	5
pH	---	6 – 9
Sıcaklık	°C	35
Demir	mg/l	10
Toplam P	mg/l	2

Tablo 6.3’te alıcı ortam dere deşarj limit değerleri ile bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde KOİ değeri ortalama 300 mg/l civarlarında bulunmuştur. Toplam azot değeri ise 600 mg/l civarlarındadır. Görüldüğü gibi çıkış deşarj limit değerlerine yaklaşılmıştır. Bu limit değerlerin elde edilebilmesi için nanofiltrasyondan çıkan süzüntü suyunun aktif karbon veya ters osmozdan geçirilmesi veya nanofiltrasyondan önceki biyolojik safhada verimin artırılması veya membran arıtımının birkaç kademe yapılması gerekmektedir.

Tablo 6.3: Alıcı Ortam Dere Deşarj Limit Değerleri ile karşılaştırma

Parametre	Birim	Ham çöp sızıntı suyu	NF çıkışı	Standart
KOI	mg/l	15.000	300	125
Toplam Azot	mg/l	3.000	600	400

6.6. Maliyetler

Tablo 5.2 verilen karakteristiklere sahip çöp sızıntı suyunu arıtarak, Tablo 6.2’deki alıcı ortam dere deşarj limitlerine indirmek için 1200 m³/gün kapasiteli MBR sonrası

nanofiltrasyon tesisi kurulur ise bunun yaklaşık ilk yatırım maliyeti 555.000 Avro ve işletme maliyeti 275.000 Avro/yıl hesaplanmıştır. 15 yıl ömürlü olan bu Nanofiltrasyon tesisinin ilk yatırım birim maliyeti yıllık %8 faiz için yaklaşık 0,84 Avro/m³ olup yaklaşık toplam işletme birim maliyeti 0,57 Avro/m³ civarındadır. Kimyasal birim maliyeti 0,32 Avro/m³, enerji maliyeti 0,12 Avro/m³, membran değişimi maliyeti 0,075Avro/m³, işletme işçiliği 0,04 Avro/m³, tamir bakım yedek parça birim maliyeti 0,02 Avro/m³ olacağı hesaplanmıştır. NF öncesi MBR için ise ilk yatırım maliyeti 3.190.000 Avro olup yıllık işletme maliyeti 1.778.000 Avro/yıl olacağı hesaplanmıştır. MBR arıtma tesisinin işletme masrafı yaklaşık 1,82 Avro/m³ olacaktır.

7 SONUÇLAR

Nanofiltrasyon membranları, çöp sızıntı sularının arıtılması için kullanılmıştır. Çöp sızıntı sularında kirlilik parametreleri çok yüksek olmasına rağmen membranların süzöntülerinde ölçülen parametreler belirli aralıklar arasında çıkmıştır. Deneysel çalışmalarda seri ve yatay akışlı çalışan üç adet nanofiltrasyon membranlarında geri kazanım %80 elde edilmiştir. Çalışma süresince TMB 5 bar civarında olduğundan dolayı ters osmoza göre düşük basınçta çalışılmış ve elektrik sarfiyatının ters osmoza göre çok düşük olacağı düşünülmüştür. Membranlar her gün çalışma sonunda geri yıkama yapıldığından dolayı süzöntü akımında bir düşüş ve dolayısı ile membranlarda bir tıkanma söz konusu değildir. Birim m³ süzöntü suyu başına ortalama enerji tüketimi NF membranı için 0,12 Avro/m³ civarındadır. Nanofiltrasyonun işletme masrafları 0,57 Avro/m³ civarındadır.

Nanofiltrasyonda çöp sızıntı suyu için iletkenlik giderimi, Na⁺, Cl⁻ iyonları çok yoğun olduğundan ve tek değerlikli iyonların tutulma verimi az olduğundan dolayı azdır. Her ne kadar Mg⁺² ve Ca⁺² iyonları büyük oranda tutuluyor ise de +2 değerlikli iyonların oranı, +1 değerlikli iyonların oranına göre çok az olduğundan dolayı iletkenlik verimi düşüktür. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğinde iletkenlik bir kirlletici parametre değildir. Na⁺, Cl⁻ iyonları kirlletici parametreler arasında değildir ve alıcı ortamda yeteri kadar seyrelirse, herhangi bir problem teşkil etmez. Ayrıca Na⁺, Cl⁻ iyonlarının tutulmaması, nanofiltrasyonun bir özelliğidir ve bu sayede az bir basınç altında kirlletici parametreler tutulurken, Na⁺, Cl⁻ iyonları da tutulmadan alıcı ortama verilmiş olur.

Ortalama TMB 5 bar için 25 l/m².saat akı değeri elde edilmiştir. Temiz su için bu değer yaklaşık 60 l/m².saat'tir. Bu nedenle elde edilen sonuç normaldir.

Nanofiltrasyon tesisinden süzüntü ve konsantre olmak üzere iki akım çıkmaktadır. Süzüntü suyu alıcı ortam deşarj limitlerine uygun olduğundan alıcı ortama deşarj edilebilecektir. Konsantre akımı ise debisi az olmasına rağmen kirletici parametreleri çok yüksek olan bir sudur. Konsantre akımının çöp depo sahasına geri devrettirilmesi veya buharlaştırma- yakma yöntemleri ile uzaklaştırılması gerekmektedir.

Membranların çalışma ömürlerini belirlemek için membranların tıkanma süresinin ve temizlenme periyotlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu maksat için pilot tesislerin yeterli bir süre sürekli çalıştırılması gerekmektedir.

KOİ, NH₄ ve toplam azot parametreleri incelenmiş, alıcı ortama deşarj standartlarına yakın değerler bulunmuştur. İletkenlik yüksek çıkmasına rağmen alıcı ortam kirletici parametreleri arasında olmadığından ve seyredikten sonraya çevreye zararı olmayacağından sorun oluşturmayacağı kanaatine varılmıştır. Nanofiltrasyon TMB 5 bar civarında çalıştığından enerji sarfıyatı ters osmoza göre az olacağı düşünülmektedir. Nanofiltrasyon tesisi kurulunca, çöp sızıntı suyunun kamyonlarla taşınmasına gerek kalmayacak ve yaklaşık 6 Avro/m³ olan taşıma maliyetinden kurtulmuş olunacaktır. Çöp sızıntı suyu arıtılmadan İSKİ'nin arıtma tesislerine gönderilmeyecek ve İSKİ'nin evsel arıtma tesislerinin yükünü artırmamış olacaktır.

Bu sonuçlara göre, Nanofiltrasyon ile çöp sızıntı suyunun arıtılmasının uygun olduğu, alıcı ortama deşarj standartlarına yaklaşıldığını söylenebilir. Arıtılmış su kalitesini artırmak için nanofiltrasyondan sonra aktif karbon veya ters osmoz seçenekleri denenmek sureti ile uygun olanı konularak, kirletici parametrelerin daha iyi bir Şekilde giderilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] **Aponso, M.D., Pinho, M.N.**, 1991. “ Membrane Separation Processin the Pulp and Paper Industry”, Desalinisation, 85 : 53-58.
- [2] **Baker, R.J., Fane A.G., Fell, C.J.D. and Yoo, B.H.** 1985. “Factor affacting flow in crossflow filtration”, Desalinisation, 53, 81-93
- [3] **Bilstad, T.**, 1997. “ Membrane operations”, Water Sci. Tech. Vol. 36 No. 2 17-24.
- [4] **Buckley C.A.**, 1992. “Membrane Technology for the treatment of dyehouse effluents”, Water Science and Technology, V.25 ,N.10.
- [5] **DOE.**, 1990. “Membrane separation system report”, DOE/ ER/30133-HI, U.S., Department of Energy
- [6] **Koyuncu, İ.**, 1995. “ Membran Teknolojisinin Çevre mühendisliğinde kullanım potansiyeli ve ters osmoz ile amonyum iyonu giderimi” Doktora tezi .
- [7] **Koyuncu, İ. ve Topacık D.** 1999. “Sızıntı Sularının Membran Teknolojisi İle Arıtımı ” Kent yönetimi insan ve çevre sorunları sempozyumu, İstanbul
- [8] **Lloyd D.R., and MELUCH, T.B.**, 1985. “Selection and evaluation of Membrane material for liquide separations” In material Science of Synthetic Membranes, Ed. D.R. Lloyd, ACS Symp.Ser. No. 269. Washington, D.C. American Chemical Society.
- [9] **Meares P.**, 1976. ”Membrane seperati,on Proseses”, Amsterdam,
- [10] **Mulder M.**, 1991. “Basic Principles of Membrane Technology, Kluver Academic Puplishers, The Netherlands”.
- [11] **Pepper D.**, 1981, “ Pretperatment and operating experiense on revers osmosis plant inthe Middle East ” , Desalination ,
- [12] **Pusch,W.**, 1986 “Measurement techniques of transport through membranes”, Desalinisation, 59:105.

- [13] **Riley R.**, 1989 “Serariton systems”IntarnationalLa Jolla, CA.,
- [14] **Schierach M.**, 1988 “Desalinization By Reverse Osmosis, Hydrotenic.
- [15] **Scott K.**, 1995 , Handbook of Industrial Membranes, I. Baskı.
- [16] **Schonewille H., Woelders H.**, 1992. “Leachate treatment By Direct Capillary Nanofiltration”
- [17] **Topacık D. ve Koyuncu, İ.** 1996. “Türkiyedeki Membran Proses Uygulamaları ve Karşılaşılan Güçlükler ” Çevre '96, Türk Devletleri Arasında 3. İlmi İşbirliği Konferansı, 10-12Eylül 1996 , UFA, Başkurdistan
- [18] **Williams M.R. and Bhattacharyya D.**, 1990 “Seperation of hazardous organics by reverse osmosis membranes” , Environmental Programme, 9:118.

Ek 1**Akı ve Süzüntü Miktarları**

Tarih	Akı (l/m2.st)	Süzüntü (%)
03.08.2005	18,52	66,67
04.08.2005	27,78	57,03
08.08.2005	30,28	76,76
10.08.2005	30,28	60,11
11.08.2005	30,28	60,56
12.08.2005	25,56	73,48
13.08.2005	33,33	65,22
16.08.2005	24,07	86,67
17.08.2005	29,5	88,5
18.08.2005	18,52	95,24
19.08.2005	35,93	82,03
20.08.2005	25,93	87,5
24.08.2005	30,56	76,74
25.08.2005	36,11	79,59
26.08.2005	27,87	74,5
27.08.2005	27,78	90,36

Ek 2**KOİ Değerleri**

Tarih	Akı (l/m2.st)	Süzüntü (%)	NF giriş (mg/l)	NF çıkış (mg/l)	KOİ Giderimi (%)
16.08.2005	24,07	86,67	823	350	57
17.08.2005	29,5	88,5	830	300	64
18.08.2005	18,52	95,24	810	254	69
19.08.2005	35,93	82,03	820	264	68
20.08.2005	25,93	87,5	942	336	64

Ek 3**Toplam N Değerleri**

Tarih	Akı (l/m2.st)	Süzüntü (%)	Toplam-N Giderimi (%)	NF giriş (mg/lt)	NF çıkış (mg/lt)
08.08.2005	30,28	76,76	12	1500	1320
12.08.2005	25,56	73,48	12	1820	1600
13.08.2005	33,33	65,22	23	2220	1720
18.08.2005	18,52	95,24	20	600	480
25.08.2005	36,11	79,59	11	700	620

Ek 4**NH4 Değerleri**

Tarih	Akı (l/m2.st)	Süzüntü (%)	NF giriş (mg/l)	NF çıkış (mg/l)	NH4 Giderimi (%)
04.08.2005	27,78	57,03	1905	1480	22
10.08.2005	30,28	60,11	1615	1380	15
11.08.2005	30,28	60,56	1850	1515	18
12.08.2005	25,56	73,48	1915	1390	27
13.08.2005	33,33	65,22	2115	1755	17
17.08.2005	29,5	88,5	530	463	13
18.08.2005	18,52	95,24	612	463	24
24.08.2005	30,56	76,74	690	570	17
25.08.2005	36,11	79,59	900	660	27
26.08.2005	27,87	74,5	900	810	10

Ek 5**İletkenlik Değerleri**

Tarih	Süzüntü (%)	İletkenlik Giderimi (%)	NF giriş (mS/cm)	NF çıkış (mS/cm)
03.08.2005	66,67	1,99	25,1	24,6
04.08.2005	57,03	6,85	24,8	23,1
05.08.2005	61,96	7,74	15,5	14,3
06.08.2005	66,90	5,23	15,3	14,5
07.08.2005	71,83	2,04	14,7	14,4
08.08.2005	76,76	6,49	15,4	14,4
09.08.2005	60,11	5,23	15,3	14,5
11.08.2005	60,56	1,83	8,74	8,58
12.08.2005	73,48	2,75	10,91	10,61
13.08.2005	65,22	2,02	9,4	9,21
14.08.2005	65,22	1,89	8,99	8,82
15.08.2005	65,22	8,05	9,94	9,14
16.08.2005	86,67	14,54	9,97	8,52
17.08.2005	88,50	12,51	9,51	8,32
18.08.2005	95,24	8,05	9,94	9,14
19.08.2005	82,03	3,91	10,22	9,82
20.08.2005	87,50	1,86	10,78	10,58
21.08.2005	43,75	13,01	15,6	13,57

Tez Danış
Diğer Jüri

ÖZGEÇMİŞ

1979 Niğde doğumlu olan Metin Selman TOPACIK, 1997 yılında Kartal Anadolu İmam Hatip Lisesini bitirdikten sonra aynı yıl, Y.T.Ü İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümüne girmiştir. Evsel atıksu arıtma çamurları üzerinde bitirme çalışması yapan ve 2001 yılında lisans öğrenimini bitirdikten sonra Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı'na kabul alan tez sahibi, 2002 yılında özel bir şirkette başladığı görevine devam etmektedir.