UHUK-2008-002

MİKRO-AKIŞLI SİSTEMLERDE ELEKTROKİNETİK TAŞIMA

Ali Beşkök^{*} ve Bayram Çelik[†] Old Dominion University, Aerosace Engineering Dept., Norfolk, VA, USA

ÖZET

Bu makalede, elektroosmoz, elektroforez ve dielektroforez olarak bilinen ve sıklıkla kullanılan üç elektro-kinetik taşıma mekanizmasını inceledik. Bu üç mekanizma, mikro akışlı sistemler içerisinde gerçekleşen parçacık ve tür taşınımasına ve akışın kontrol edilmesine yönelik uygulamalarda kullanılabilmektedir. Böylece, sözü edilen mekanizmalar yardımıyla biyolojik ve kimyasal türlerin yanısıra nano-teknoloji uygulamalarında kullanılan malzemelerin ve nano parçacıkların işlenmesi mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, her üç mekanizma için ayrı ayrı bünye denklemleri elde edilmiş ve bu mekanizmaları konu alan güncel deneysel ve hesaplamalı çalışmalar incelenmiştir. Bu makale ilk yazar tarafından İngilizce olarak "Micromechanics and Nanoscale Effects: MEMS, Multi-Scale Materials and Micro-Flows, Kluwer, 2004" adlı kitapta yayınlanmış olup, ikinci yazar tarafından Türkçe'ye çevrilmiştir.

GİRİŞ

Mikro-akışlı sistemler, minyaturize edilmiş yoğun paralel bütünleşik platformlar kullanarak, kimyasal ve biyolojik özlerin yanısıra ceşitli malzemelerin arıtılması, sentezi ve hızlı bir şekilde taranmasına yönelik yeni yaklaşımlara olanak sağlayan hızla gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu özellikleri sayesinde, mikro-akışlı sistemler, nano-ölçekli bileşenlerin üretimi, birleştirilmesi ve manipülasyonu gibi nano-teknoloji uygulamalarında kullanılmaktadır. Özellikle, ilaç enjeksiyonu, DNA analizi ve sıralanması, biyolojik ve kimyasal etken tespiti için geliştirilen *mikro ölçekli bütünleşik analiz sistemleri* (µBAS), nanoteknoloji kullanımına cok uygundur. µBAS'nin çoğu, parçacıklar için elektrokinetik taşınım mekanizması, türlerin yönlendirilmesi ve ana akışın kontrol edilmesine yönelik işlemlerin bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Elektrokinetik taşıma yöntemleri, asağıdaki gibi dört gruba bölünebilir:

- Elektroosmoz: İyonize haldeki sıvının dışarıdan uygulanan bir elektrik alanla yüklenen durağan bir yüzeye göre hareketi.
- Elektroforez: Yüklü yüzey ve makro moleküllerin, durağan sıvıya göre dışarıdan uygulanan elektrik alan ile hareketi.

^{*} Prof. Dr., Aerospace Engineering Dept., E-posta: ABeskok@odu.edu

[†] Dr., Aerospace Engineering Dept., E-posta: bcelik@odu.edu

- Devinimsel potansiyel: İyonize durumdaki akışkanın yüklü, sabit yüzeyler boyunca hareketi sonucu meydana getirilen elektrik alan (elektroosmozun tersi).
- Tortullaşma patansiyeli: Durağan sıvıya göre yüklü parçacıkların hareket ettirilmesi ile meydana getirilen elektrik alan.

Fiziksel ve elektrokinetik parametreler için Tablo 1.'de verilen değerler söz konusu olduğunda, nano ve mikro ölçekli uygulamalarda elektrokinetik etkiler meydana gelir.

Tablo 1. Elektrokinetik yöntemlerle harekete geçirilen olaylarda söz konusu olan fiziksel ve
elektrokimyasal parametreler.

Parametre	Kanal kalınlığının yarısı, D (µm)	Elektrolit derişimi, n _o (mM)	Debye uzunluğu, λ (nm)	Zeta potansiyeli, ζ (mV)	Elektrik alan, $\vec{E} \vec{E}$ (V/mm)	Reynolds sayısı, <i>Re</i>
Değer aralığı	0.1-100	100-1	1-100	$\pm 25 - \pm 100$	1-100	10 ⁻⁴ -1

Bu çalışmada, biz daha çok ana akışkan, parçacık veya tür taşınması ile ilgilendiğimiz için, elektroosmotik ve elektroforetik taşımayı detaylı olarak inceleyeceğiz. Ayrıca, kutuplaşabilirlik kapasitesine bağlı olarak, farklı büyüklüklerdeki parçacıkların ayrılması ve tespit edilmesine olanak sağlayan dielektroforezi inceleyeceğiz. Bu çalışmada, elektrokinetik taşıma mekanizmasına ait teori temel seviyede özetlenmistir. Bu konuda daha detaylı bilgi için, Probstein [1], Hunter[2], Melvin[3], Righetti [4], Shaw[5], Wesrermeir[6] ve Pohl[7] gibi temel ders kitaplarından yararlanılabilir. Mikro-akışlı sistemler hakkında daha kapsamlı incelemeler "Handbook of MEMS"[8] ve Karnidakis ve diğerleri tarafından yazılan kitapta [9] bulunabilir. Değişken akımlı (AC) elektrokinetik uygulamaların nanoteknoloji alanında kullanımını tartışmaya açan Hughes'ın son calışması da okuyucalara önerilir[10].

Bu çalışmayı meydana getiren bölümler ve içerikleri kısaca şöyle özetlenebilir: Elektrik-Çift-Katman (EÇK) kavramı ile okuyucunun tanıştırıldığı 2. Bölüm'ün ilk kısmını, elektrik alan, akış ve yüklü türlerin taşınmasını temsil eden bünye denklemlerinin verildiği kısımlar takip edecektir. Daha sonra, sırasıyla, elektroosmotik, elektroforetik ve dielektroforetik taşıma için geliştirilen modellerin anlatıldığı bölümler sunulacaktır. Herbir bölüm, ilgili alandaki güncel gelişmeleri içeren kapsamlı bir inceleme içermektedir. Makale, sonuçlara yer verdiğimiz 6. Bölümle son bulacaktır.

BÜNYE DENKLEMLERİ

Bu bölümde, akış ve tür taşınmasını temsil eden bünye denklemeleri gözden geçirilecektir. Bu amaca yönelik olarak, elektrokinetik taşımada büyük rol oynayan Elektrik Çift Katman kavramını ilk olarak anlatacağız. Ardından, dış elektrik alan davranışını temsil eden basitleştirilmiş bir model verildikten sonra akışkan ve tür taşınmasında geçerli olan korunum yasalarını sunacağız. Burada verilen bünye denklemlerini, takip eden bölümlerdeki, basitlestirilmiş elektorosmoz ve elektroforez modellerini elde etmek için de kullanacağız.

Elektrik-Çift-Katman

Elektrokinetik olay, iyonize çözelti ile dielektrik yüzey üzerindeki statik yüklerin etkileşimi sonucu oluşan Elektrik Çift Katman' (EÇK) dan kaynaklanir [11]. Örneğin, silika, sulu bir çözeltiye temas ettiğinde, yüzeyi silanol yüzey grupları oluşturacak şekilde suylakesime uğrar. Oluşan yüzey grupları, elektrolit çözeltinin pH değerine bağlı olarak, artı (Si – OH2+), eksi (Si-O-) veya yüksüz (Si-OH) olacak şekilde değerlik kazanabilir. Eğer kanal yüzeyi eksi yüklenmişse (iyonlarından

arındırılmış suda oldugu gibi), artı iyonlar yüzey tarafından çekilirken eksi işaretliler yüzeyden uzağa dogru itilir ve sıvının ana bölümü duvardan uzakta elektriksel olarak yüksüz olacak şekilde yeniden konumlanır. Duvardan, elekrokinetik potansiyel enerjinin ısıl enerjiye eşitlendiği sınıra olan mesafe, Debye uzunluğu (λ) olarak adlandırılır. Debye uzunluğu, iyonize akışkanın molar derişimine bağlı olup, açık ifadesi aşağıda verilmiş olan Debye-Hückel (ω) parametresi yardımıyla tahmini olarak hesaplanabilir.

$$\omega = \frac{1}{\lambda} = \sqrt{\frac{e^2 \Sigma_i c_i z_i^2}{\epsilon \epsilon_o k_b T}}.$$
(1)

Yukaridaki denklemde görülen *c*, k_b , *e*, *z*, *T*, e_o ve *e* sırasıyla; derişim, Boltzmann sabiti, elektron yükü, değerlik, sıcaklık, boşluğun dielektrik geçirgenliği ve çözücünün dielektrik sabitini temsil etmektedir. Alt indis *i*, tür numarasını göstermektedir. c_o = 1.0x10⁻², 1.0x10⁻⁵, ve 1.0x10⁻⁶ *M* derişim değerleri için, simetrik elekrolit kabulu yapılır ve Deklem (1) kullanılırsa, sırasıyla, λ =3 *nm*, 100 *nm* ve 300 *nm* değerleri elde edilir [2,12]. EÇK, Stern ve dağınık katman olarak adlandırılan iki farklı kısımdan meydana gelir. Stern katmanı, iyonlara karşıt yüklü yüzey tarafından uygulan güçlü çekim kuvveti sonucu oluşur. Yüklü yüzey civarinda iyonlar hareketsizleşir ve Stern katmanı boyunca elektrokinetik potansiyel Zeta potansiyeli (ζ) olarak bilinen, Stern katmanı sınırındaki değere, çabucak düşer. Dağınık katman içerisindeki yeni iyon dağılımı sonucu, net bir elektrik yükü söz konusu olur ve bu net yük Gauss yasası yardımıyla elektrokinetik potansiyelle (ψ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\nabla^2 \psi = \frac{-\rho_q}{\epsilon \epsilon_o} \tag{2}$$

Elektrik yük yoğunluğu (ρ_q) asağıdaki denklemdeki gibi yazilabilir.

$$\rho_q = F \sum z_i c_i,\tag{3}$$

Yukaridaki denklemdeki *F*, Faraday sabitini temsil etmektedir. Dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında, dağınık katman içindeki yüklü parçacıklar harekete geçirilebilirler. Bu yüzden, dağınık katman içindeki net elektrik yükün, elektrokinetik etkilerin başlıca kaynağı olduğunu sonucuna varabiliriz.

Elektroosmoz başlıklı bölüm'de, simetrik elektrot için, Boltzmann dağılımı kabülü yapıldığında geçerli olan, bir elektrik yük dağılımı modeli sunacagiz. Bu şartlar altında, Denklem (2), Poisson-Boltzmann denklemi olarak adlandırılacak, ve Zeta potansiyeli Stern katmanı sonunda sınır şartı olarak kullanılacaktır. EÇK'na ait yapı ve söz konusu durum için elektrokinetik potansiyel dağılımını gösteren şema Şekil 1.'de veilmiştir. Zeta potansiyeli ve iyon deişimi, elektrokinetik taşımadaki en önemli parametrelerdir. Elektroosmotik devingenlik (birim elektrik alana karşılık gelen elektroosmotik hız) Zeta potansiyeli ile orantılıdır. İyonik derişim, elektrokinetik taşıma icin önemli bir gösterge olan EÇK kalınlığının belirlenmesinde kullanılır. Elektrokinetik potansiyel ile tanımlanan yük dağılımının etkisi, Denklem (1) ile değeri tahmini olarak hesaplanan Debye uzunluğundan daha belirgindir. Dutta ve Beşkök, yaklaşık olarak 4.5λ uzunluğundaki etkin EÇK içerisinde, elektrokinetik potansiyelin asıl değerinin (Zeta potansiyel) %1'ne düştüğünü göstermiştir [11].

EÇK kalınlığı, tipik mikro kanal boyutları ile karşılaştırıldığında, görece oldukça küçüktür. Ancak, EÇK söz konusu olduğunda, mikro-akışlı sistemlerin başarımı belirgin bir şekilde değişir. EÇK ve tipik kanal boyutları arasındaki ölçek farklılığına bağlı olarak (bakiniz Tablo 1.), EÇK etkileri genellikle sınır şartlarına dahil edililir. Kanal boyutlarının EÇK kalınlığı civarında olduğu nano kanallarda, kanal duvarlarındaki dağınık katmanlar bibirleriyle de etkileşim içinde olduklarından, halen bu kanallarda elektrokinetik akış ölçümüne yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Deneysel calışmalardan elde edilen ilk sonuçlar, Poisson-Boltzmann denklemiyle elde edilen sonuçlardan farklılıklar göstermektedir [13].



Şekil 1. Eksi yüklü katı bir yüzey üzerinde oluşan elektrik çift katman' (EÇK) a ait şematik çizim. Bu şemada, ψ elektrokinetik poatansiyel, ψ yüzey elektrik potansiyeli, ζ Zeta potansiyel ve Y duvardan uzaklıktır. Debye uzunluğu ve EÇK kalınlığı λ ve EÇK ile verilmiştir.

Dış Elektrik Alan

Elektrokinetik taşımada, toplam elektrik alan dışarıdan uygulanan elektrik alan ve EÇK kaynaklı elektrik alan olmak üzere iki kısıma bölünebilir. Bolum 2.1'de, EÇK ayrıntılı olarak incelendiğinden, bu bölümde dışarıdan uygulanan elektrik alan (\vec{E}) etkisine odaklanacağız. Basitçe, dış elektrik alanı, elektrostatik yasası ile elde edebileceğimizi varsayalım. Gauss yasası ile elektrik alan asağıdaki gibi yazılır:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0. \tag{4}$$

EÇK icerisindeki elektrik yük yoğunlugu (ρ_q), daha önceden Denklem (2)'ye dahil edildiğinden, yukarıdaki denklemin sağ tarafı sıfıra eşit alınmıştır. Manyetik alanın olmadığı kabul edilir ve Faraday yasası kullanılırsa, elektrik alan korunumlu hale gelir. Böylece, aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\vec{E} = -\nabla\phi,\tag{5}$$

Yukarıdaki denklemde yer alan ρ_q , dışardan uygulanan elektrik alanın potansiyelini temsil etmektedir. Denklem (4), (5) te kulanılırsa, aşağıdaki denklem elde edilir.

4

$$\nabla^2 \phi = 0. \tag{6}$$

Bu denklem, elektrotların yüzeyinde sabit elektrik potansiyel ve dilektrik yüzeylerde sıfır-gradyan şartları uygulanarak çözülür.

Güncel elektrokinetik mikro-akış uygulamalarında, daimi olmayan elektrik alan kullanılmaktadır. Ayrıca, elektrik ve manyetik alanın birarada kullanıldığı birçok uygulama söz konusudur. Böyle durumlarda, elektrik alan icin daimi akım yaklaşımı uygun olmayabilir. Bu yüzden, bu tip uygulamalarda, yukarıda verilen denklemler yerine Maxwell denklemleri kullanılmalıdır. Ancak, bu bölümde sunulan sonuçlar, daimi olmayan veya zamanda-periyodik akış ve taşıma oluşturmak için sanki-daimi elektrik alanın kullanıldığı yeterince düşük frekansların söz konusu olduğu durumda yararlı olabilir. Kütle/momentum transferi icin geçerli olan zaman ölçeği ile elektrostatik yasasının geçerliliğini koruduğu zaman ölçeği arasında belirgin bir farklılık olduğu için, bu yaklaşım doğru kabul edilebilir.

Korunum Yasaları

Sabit ağdalılığa sahip sıkıştırılamaz Newtonian akış kabülü yapıldığında, ana akışkanın hareketi, aşağıda verilen sıkıştırılamaz Navier-Stokes deklemleri ile temsil edilir.

$$\rho_f(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + f_{EK},\tag{7}$$

Yukarıdaki denklemde; *p* basınç, \vec{V} , duvarlarda kaymama şartını sağlayan korunumlu hız alanı $(\nabla \vec{V} = 0)$; ρ_{f} , akışkanın yoğunluğu ve f_{EK} , elektrokinetik gövde kuvvetini temsil etmektedir. Birim hacime etki eden elektrokinetik kuvvet asağıdaki genel denklemle verilir.

$$f_{EK} = \rho_q \vec{E} - \frac{1}{2} \vec{E}^2 \epsilon_o \nabla \epsilon + \frac{\epsilon_o}{2} \nabla (\rho_f \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho_f} \vec{E}^2), \tag{8}$$

Denklemde yer alan \vec{E} , dışardan uygulanan elektrik alanı temsil eder. Sondaki terim geçirgenliğin yoğunlukla değişimini gösterir ve özellikle gaz/sıvı arayuzeyinde ve iyonize gaz akışında önem kazanır. Biz burada amacımiz dogrultusunda, sıkıştırılamaz akış ve sabit elektrik geçirgenlik ($\epsilon_o x \epsilon$) kabulü yaptık. Bu sayede, sadece ilk terimin ($\rho_a \vec{E}$) katkısını hesaba kattık.

Kimyasal tepkimenin olmadığı, çok bileşenli bir akışkan için, tür korunum denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \vec{j}_i = 0,\tag{9}$$

Yukarıdaki denklemde yer alan c_i ve j_i , sırasıyla *i* nolu türe ait derişim ve akıyı temsilen kullanılmıştır. j_i , açık olarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{j}_i = -D_i \nabla c_i + c_i [\vec{V} + \mu_{ek,i} \vec{E} + \mu_{dep,i} (\vec{E} \cdot \vec{E})],$$
(10)

Denklem (10)' daki D_i , iletim katsayısını, μ_{ek} ve μ_{dep} sırasıyla elektrokinetik ve dielektroforetik devingenliği temsil etmektedir. Sağ tarafta yer alan ilk terim, derişimdeki degişime bağlı olarak ortaya çıkan iletim akısını, ikinci terim ise ana akışkanın $\vec{V} \vec{V}$ hızıyla hareketinden kaynaklanan taşınımı göstermektedir. Diğer terimler ise, elektrokinetik ve dielektroforetik etkiler sonucu meydana gelen taşımayı temsil eder. Genel halde, eletrokinetik devingenlik, hem elektroosmotik

hem de dielektroforetik etkileri içermektedir.(Detaylar için [15,16]'ya bakınız). Devingenlik, elektrokinetik göç hızı, \vec{u}_{ek} ile aşağıda verilen şekilde ilişkili olup, değeri, parçacık ve yüzeyin yanısıra kullanılan akışkanın kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır.

$$\vec{u}_{ek} = \mu_{ek}\vec{E},\tag{11}$$

Çok ince bir EÇK için elektroosmotik devingenlik, Helmholtz-Smoluchowski bağıntısı [2] ile verilir:

$$\mu_{eo} = \frac{-\zeta\epsilon}{\mu},,\tag{12}$$

 ζ , yüzeydeki Zeta potansiyelidir. Elektroosmotik devingenlik kullanılarak, aşağıda verilmiş olan elektroosmotik göç hızı elde edilir.

$$\vec{u}_{eo} = \mu_{eo}\vec{E} = \frac{-\zeta\epsilon\vec{E}}{\mu}.$$
(13)

Eksi işareti yüzeydeki Zeta potansiyelden kaynaklanmaktadır. Örneğin, eksi yüklü bir yüzey ($\zeta < 0$) söz konusu olduğunda, EÇK artı yüklü olacak ve Şekil 1.'de görüldüğü üzere, katod yönünde elektroosmotik bir hareket meydana gelecektir.

Hückel'e göre, elektroforetik devingenlik asagidaki şekilde ifade edilir [2].

$$\mu_{ep} = \frac{2\zeta\epsilon}{3\mu},\tag{14}$$

Buradaki 2/3 küresel geometriden kaynaklanmaktadır (makro moleküller için elektroforetik devingenlik çoğunlukla deneysel olarak belirlenir). Buradan, aşağıda verilen elektroforetik göç hızı elde edilir.

$$\vec{u}_{ep} = \mu_{ep} \vec{E}. \tag{15}$$

Yukarıdaki denkleme göre eksi yüklü bir parçacık ($\zeta < 0$), Şekil 1.'de de görülebileceği gibi anoda doğru hareket eder.

Dielektrofooretik etkiler, elektrik alan değişiminin küçük olduğu birçok bölgede ihmal edilebilir. Mikro kanalların köşe ve uç kısmlarında elektrik alan gradyanı çok büyük değerlere ulaşabildiğinden [17], bu tip geometrilerin söz konusu olduğu durumlarda dikkatli davaranılmalıdır. Ayrıca, Denklem (10) da yer alan μ_{dep} içeren terimin, sadece doğru akımlı (DC) dielektroforez durumunda geçerlidir. Değişken akımlı (AC) dielektroforez için geçerli olan bağıntılar, ilgili bölümde detaylarıyla verilecektir.

ELEKTROOSMOZ

Elektroosmoz, elektrik alan kullanılarak iyonize haldeki bir sıvının yüklü ve durağan yüzeylere göre hareketlendirilmesi olup mikro akışlı sistemlerde en çok uygulanan elektrokinetik yöntemdir. Elektrik alanın seçimli olarak uygulanması yoluyla, mikro kanal sistemlerindeki akışkanın kontrol edilmesine olanak sağlayan elektroosmoz, hareketli mekanik bileşenlere olan gereksinimi ortadan

kaldırdığı için, yorulma ve üretim hatalarından kaynaklanabilecek olası sorunları da bertaraf eder. Electroosmotik pompalama, mikro-yonga tabanlı algılayıcılarda biyolojik/kimyasal belirteçlerin tespitinde, pompalama ve ilaç gönderimi gibi biyo-tıp uygulamalarında da geniş bir biçimde kullanılmaktadır.

Elektroosmoz için Bünye denklemeleri

Hidrodinamik taşınım etkilerinin ihmal edilebilir, elektrik iletkenliğinin değişmediği, iyonların denge (Boltzmann) dağılımı durumunda bulunduğu ve simetrik değerlikli seyreltik elekrolitin söz konusu olduğu durumda, elekroosmotik taşıma için bünye denklemleri, türler için verilen korunum denkleminden (Denklem (9)) çıkarılabilir. Bu yaklaşım, söz konusu uygulamaları fazla basitleştirdiği için, yüksek Peclet sayısı (Pe)'nın söz konusu olduğu akışlarda hatalı sonuç verebilir. Pe, Reynolds (*Re*) ve Schmidt (*Sc*) sayılarının fonksiyonu olarak yazılabilir (Pe =*Re* x *Sc*). Mikro ölçekteki aygıtlarda, akışa ait *Re* coğunlukla 1'den kücük olup, Stokes akışı bölgesinde yer alır. Öte yandan, aynı şartlarda *Sc* (=*v/D_i*) çok büyük değerlere ulaşabilmektedir (Sc > 500). Bu koşullarda, Denklem (9) ile verilen tür taşınım denklemi, iletim ve elektroosmotik devingenlik arasında denge kuracak şekilde yeniden düzenlenebilir. Nernst-Einstein denklemi ($D_j = k_B T \mu_j$) kullanılarak, devingenlik ile iletim ilişkilendirilirse, aşağıda verilen Poisson-Boltzmann denklemi elde edilir.

$$\nabla^2 \psi = -\frac{\rho_q}{\epsilon \epsilon_o} = \frac{2Fc_o}{\epsilon \epsilon_o} \sinh\left(\frac{zF\psi}{RT}\right). \tag{16}$$

EÇK'ların çakışmadığı iki boyutlu düz bir kanal için, elektrokinetik potansiyel dağılımı asağıdaki gibidir:

$$\psi = \frac{4k_bT}{ez} \tanh^{-1} \left[\tanh\left(\frac{ez\zeta}{4k_bT}\right) \exp\left(\frac{|y| - h}{\lambda}\right) \right]$$
(17)

Yukaridaki denklemde yer alan λ , Denklem (1)'le verilen Debye uzunluğudur. Birkez elektroosmotik potansiyel belirlendiğinde, Denklem (5) kullanılarak dış elektrik alan (\vec{E}) hesaplanabilir ve ardından elektroosmotik kuvvet de aşağıdaki ifade yardımıyla elde edilir.

$$f_{EK} = f_{eo} = \rho_q \vec{E}.$$
(18)

Ardından, Navier-Stokes denklemleri çözülerek meydana gelen akış alanı elde edilir. Bu yaklaşım sayesinde, tür, akış ve dış elektrik alan denklemleri birbirinden bağımsız bir biçimde çözülebilmektedir.

Elektroosmotik akış genellikle cok yavaştır (Re <<1). Bu sebeple, Denklem (7) de yer alan taşınım terimi ihmal edilebilir. Basınç gradyanın olmadığı daimi bir akış için, elektroosmotik gövde kuvveti ağdalı iletimi yener saf elektroosmotik akış meydana gelir. 2-boyutlu düz bir kanal icindeki hız dağılımı aşağıda ifadesi verilen hale gelir.

$$u(y) = -\frac{\zeta \epsilon E_x}{\mu} \left(1 - \frac{\psi}{\zeta} \right) = u_{eo} \left(1 - \frac{\psi}{\zeta} \right)$$
(19)

Tipik elektrokinetik ve akışa ait parametreler, elektrokinetik patansiyelin etkin Debye katmanında ($\delta_{99} \approx 4.5 \lambda$) azalarak etkisini yitirdiğini ve kanalın geri kalan kısmında tıpa (plug) benzeri bir hız dağılımı meydana getirdiğini göstermektedir.

Elektroosmoz için burada verilen bünye denklemleri, aşağıda sıralanan basitleştirme ve kabullere dayanmaktadır.

- Akışkanın ağdalılığı kayma gerilmesinden bağımsızdır. Bu sebeple, Newtonian akışkan kabulu yapılmaktadır.
- Akışkanın ağdalılığı, yerel elektrik alan şiddetinden bağımsızdır. EÇK içerisindeki iyon derişimi ve elektrik alan şiddeti arttığından, akışkanın ağdalılığı bu durumdan etkilenebilir. Ancak, bu etkiler, seyreltik çözeltinin söz konusu olduğu, burada sunulan analizlerde ihmal edilmektedir.
- İyonlar, duvardaki elektrik yükü ile denge halindedir. Bu yüzden, Poisson-Boltzmann denklemi elektrokinetik potansiyel dağılımının belirlenmesinde kulanılabilmektedir.
- Çözücü sürekli olup, geçirgenlik, genel yada yerel elektrik alan şiddeti ile değişmememektedir.
- İyonlar noktasal yük olarak kabul edilmiştir.
- Elektrik iletkenlik sabittir.
- Joule ısınması ihmal edilebilir.

Güncel Gelişmeler ve Sonuçlar

Bu bölümde, elektroosmozu konu edinen yakın tarihli teorik, deneysel ve sayısal modeller için kapsamlı bir kaynak taraması sunulacaktır. Hemen ardından, Zeta potansiyelinin değiştirilmesi yolu ile elektroosmozun kontrol edilmesi ve elektroosmotik etkilere dayalı mikro-karıştırıcıların geliştirilmesine yönelik güncel girişimler gibi çeşiltli konulardaki gelişmelere yer verilecektir.

1809 da Reuss'un elektrokinetik taşınımı keşfetmesinden bu yana [18], dış elektrik alan etkisi altındaki kılcal gözenekli sistemlerdeki sıvı akışı pekçok bilim insanının dikkatini çekmiştir. 1870'de Helmholtz, elektrik ve akışa ait parametrelerle, elektrokinetik taşınımı ilişkilendiren elektrik çift katman teorisini geliştirmiştir. 1930'ların sonundan itibaren, kimya alanındaki uygulamalarda, elektroosmoz yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Son teorik gelişmeler, başınç farkının yanısıra elektroosmozun da uygulanışı cok ince 2-boyutlu açıklıklar [19-20,11] ve silindirik kesitli kılcallardaki yapılardaki [21-23] karmaşık akışların çözümüne olanak tanımaktadır. İlk kez 1952'de, Overbeak, rastgele şekillendirilmiş geometrilerde elektroosmotik iç akışın irrotasyonel olduğunu öne sürdü [24]. Ardından, dış alana ait sınır şartlarının belli bir şekilde uygulanması durumunda, elektrik ve hız alanının benzer davranışlar gösterdiğini gözlemleyen Cummings ve çalışma arkadaşları, dışarıdan bir basınç farkının uygulanmadığı elektrosmotik akış için geçerli olan ideal elektroosmoz kavramını ortaya koydular [17]. Santiago, ideal elektroosmozun düşük Reynolds sayılı daimi akış durumunda gözlemlenebileceğini birkaç yıl önce gösterdi. Ancak, yüksek Reynolds sayılı veya daimi olmayan akış için durum geçerliliğini kaybeder [25]. Dutta ve Beşkök, daimi olmayan elekroosmotik akış için elde ettikleri analitik çözümü kullanarak Santiago'nun tahminini doğruladılar [26].

AC elektroosmoz olarak da bilinen, zamanda periyodik elektroosmotik akış, değişken elektrik alan ile harekete geçirilir. Bu konuda yapılan çalışmalar oldukça sınırlı olmakla beraber, Dose ve Guiochon, birden başlatılan elekroosmotik akış için sayısal yöntemlerle elde ettikleri sonuçları yayınladılar [27]. Soderman ve Jonsson, iki boyutlu kanal ve borulardaki (yarı sonsuz uzunluklu) elektroosmotik akışın başlatılması konulu analitik calışmalarını yayınladılar [28]. Green ve çalışma arkadaşları, daimi ve daimi olmayan elektrik alanla harekete geçirilen düzlemsel mikro-elektrotlar uzerindeki elektroosmozu inceldiler [29]. Yine Green ve grubu, aynı problemi lineerleştirilmiş Debye katmanı teorisini kullanarak da incelemiştir. Barragan ve Bauza, harmonik olarak değişen

elektroosmotik akışla aynı anda gerçekleşen daimi elektrosmotik akışa ait deneysel sonuçlar elde etmiştir [30]. Dutta ve Beşkök, geniş bir tahrik frekansı aralığı için, 2-boyutlu düz kanal içerisinde gerçekleşen AC elektroosmoz için analitik çözüm elde etmiştir [26]. Aynı çalışmada, AC elektroosmotik akışla ana akış içinde yer alan sınırlanmış Stokes katmanı arasındaki benzerlikler de ortaya konmuştur.

Şimdi de yakın tarihli deneysel calışmalara kısaca bir göz atalım. Molho ve diğerleri, elektroosmotik yöntemle harekete geçirilen mikro-kanal içindeki akışlar için ölçümler yapmış ve Joule ısınmasının bir sonucu olarak meydana gelen akışkan ağdalılığındaki değişimin, akış yönündeki basınç gradyanıyla kıyaslandığında ikincil bir etken olduğunu göstermişlerdir [32]. Aynı yıl Paul ve digerleri, hem basınç farkı hem de elektroosmotik yöntemle tahrik edilen bir akışın izlediği yolu belirlemek için, *ışınırlığı tetiklenebilir boya* tekniği kullanmıştır. Cummings ve çalışma arkadaşları, düz ve birbirini kesen kanallar içindeki hız dağılımını elde etmek için µPIV kullandılar [34]. Kim ve arkadaşları, yeni bir µPIV tekniği geliştirip bu tekniği aynı anda hem elektroosmotik hem de basınç farkı ile tahrik edilen + ve T şekilli kanallar içindeki akış ölçümünde kullanmıştır [35]. En son, Singh ve diğerleri, mikro-akışı izlemek için yeni bir parçacık (unilamellar liposome) tipi geliştirmiştir. Geleneksel kauçuk işaretleyicilerden farklı olarak, hem çekirdek hem de yüzeyi ışınır malzemeden yapılmış olan bu parçacıklar sayesinde daha yüksek bir ışınırlık şiddeti elde edilebilmektedir.

Herr ve çalışma arkadaşları, yüzeylerinde düzensiz yük dağılımı olan silindirik kılcal yapılardaki elektroosmotik akış için, hız ve dağılma oranlarını ölçmüşlerdir [37]. Çalışmalarında, Zeta potansiyelini değiştirerek farklı yüzey yük yoğunlukları elde etmek için, polimerik kaplamanın yanısıra farklı yüzey malzemeleri de kullanmışlardır. *Işınırlığı tetiklenebilen boya* tekniğinin kulanıldığı bu deneyler, hızın ve dağılma oranlarının, yüzey yük yoğunluğuyla belirgin bir biçimde değiştiğini işaret etmektedir [37]. Elektrokinetik akışta, elektroosmotik akış oranı ve elektrik alan arasındaki uyumsuzluk, akışkanın dağılmasına sebep olabilir. Benzer bir biçimde, dağılma, Joule ısınmasından da kaynaklanabilir.

Elektroosmotik taşımayı konu olan sayısal çalışmalar oldukça fazladır. Yang ve Li, Debye-Hückel linerizasyonuna dayanan bir sayısal algoritma geliştirmiş ve basınç farkı ile tahrik edilen sıvı akışındaki elektokinetik etkileri araştırmışlardır [38]. Elekroosmotik kuvvet aracılığıyla iki kanalın arayüzeyi boyunca mikro akışlı sistem enjeksiyonunun sayısal benzetimi, Patankar ve Hu tarafından sonlu hacimler algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir [39]. *Re* > 1 için elde ettikleri sonuçlarda, Santiago'nun teorik calışmasında işaret ettiği gibi [25], belirgin biçimde atalet kuvvetleri etkisi gözlemlenmiştir. Bianchi ve diğerleri, T şekilli bir kanal içindeki elektroosmotik akışın benzetimi için sonlu elemanlar formülasyonu kullanmıslardır [40]. Beşkök ve çalışma arkadaşları, aynı anda hem elekroosmotik hem de basınç farkıyla tahrik edilen karmaşık geometriler içindeki akışın cözümünde kullanılmak üzere bir spektral eleman algoritması geliştirmistir [41-42].

Zeta Potansiyelinin Değistirilmesi Yolu ile Elektroosmozun Kontrolü

Mikro-akışlı sistemlerde kullanılan pompalama uygulamaları için ilgi çekici bir teknik olan elektroosmozun, kılcal yapılar ve yongalardaki isoelektrik odaklama (IEF) uygulamalarında olduğu gibi, Zeta potansiyelinin değistirilmesi yolu ile tamamen ortadan kaldırılması veya yeniden düzenlenmesi gerekebilir. Bu işlem, polimer kaplama ve yüzeye gömülü elektrotlar gibi teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Durağan ve değişken olmak üzere iki adet basit polimer kaplama tekniği söz konusudur. Durağan kaplama, kaplama malzemesi ve kılcal yapı yüzeylerinin elektron paylaşarak bağ kurmasına dayanırken, değişken bağlanma, iyonik etkileşim sonucu meydana gelir [43-44]. Değişken kaplama, kimya alanında halen etkin bir araştırma konusudur. Liu ve diğerleri, akışın yönü ve şiddetini değiştirmek için, katyonik polybrene katman ve anyonik dextran-sulfat katman gibi, farklı polimer katman çiftleri kullanınştır [45]. Her iki kaplama tekniğinin, geniş bir pH aralığı için yeniden elektroosmotik akış oluşturabildikleri gösterilmiştir. Hidrodinamik yolla tahrik edilen kılcal bir yapıdaki bölgesel elektroforez için, elektroosmotik hareketliliğin kontrol altına alınması gerekir. Kaniansky ve çalışma arkadaşları, sekiz farklı elektroosmotik akış kontrol ediciyi

incelemiş ve bunların farklı pH değerlerindeki elektroforetik ayrılma verimine olan etkilerini göstermişlerdir [46]. Ramsey ve çalışma arkadaşları, sadece elektroforetik taşımadan yararlanarak koli basili tespiti yapabilen bir mikro–akışlı sistem geliştirmiştir. Yine aynı ekip, Polydimethylacrylamide kullanarak, elektroosmozu kontrol etmeyi başarmıştır [47]. Barker ve diğerleri, polisitren ve akrilik mikro-akışlı sistemler içinde, çok elektrotlu katmanlar kullanararak elektroosmotik akışın yönünü değiştirmeyi başarmış ve bu sayede, aynı kanal içerisinde farklı yönlerde akış ve karmaşık akış düzenleri elde etmişlerdir.

Yüzeye gömülü elektrotlar, sadece istenilen bir bölgede Zeta potansiyelinin değiştirilmesine olanak sağlar. Schasfoort ve arkadaşları, iletken bir malzeme kullanarak bir mikro-kanal imal etmiş ve yüzeylerini yalıtkan malzemeyle çok ince şekilde kaplamışlardır. Bu sayede, elektroosmotik hareketliliğin, yalıtkanla kaplanmış yüzeye uygulanan elektrostatik potansiyelle değiştirilebileceğini göstermişlerdir [49]. Doğrudan Zeta potansiyelinin kontrol edilmesine yönelik benzer bir çalışma da, Buch ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [50].

Elektroosmotik Akış Yardımıyla Mikro Karıştırma

Çok kücük moleküler iletim katsayısı (Sc >> 1) ve ihmal edilebilir atalet etkilerinin (Re < 1) söz konusu olması sebebiyle, mikro-akışlı sistemlerde iyi bir karıştırma elde edebilmek çok zordur. Mikro ölçekteki taşınım ya da iletime dayalı karıştırma, uzay ve zamanda cok büyük ölçekler gerektirir. Bu zorluklar, birçok araştırma grubunun dikkatini elektroosmotik yöntemle tahrik edilen karıştırıcılara yöneltmesine sebep olmuştur. Jocobson ve diğerleri, mikro boyutlu kılcal şebekeler kullanarak, paralel ve seri karıştırma mekanizmaları geliştirmiştir [51]. Santiago ve çalışma arkadaşları, zamanda periyodik elekroosmoz için, "Düşük Reynolds sayılı akışların dengesizliği (Re ≥ 0.1)" başlıklı bir çalışma gerçekleştirmiş [52] ve iki farklı akışı sürekli ve araklıklarla çalkalayabilecek bir mikro-karıştırıcı imal etmişlerdir.

Zeta potansiyelinin, zamanda veya sınırlı bir bölge içerisinde değiştirilebilmesi olasılığı, yaygın akış kontrolü ve karıştırmanın artırılması gibi alanlarda yeni ufuklar açmıştır. Erickson ve Li, Zeta potansiyelin istenilen bir bölgede değiştirilmesi ile meydana gelen elektroosmotik akışla tahrik edilen bir mikro-akışlı sistem içindeki karıştırmayı ve bunun sonucunda ortaya çıkan karıştırmadaki gelişimin benzetimini gerçekleştirmistir. Qian ve Bau, elektroosmotik çalkalamayla harekete geçirilebilen kaotik karıştırma için teorik bir model geliştirmiştir [53]. Bu model, zamanda periyodik karmaşık 2-boyutlu akışların oluşmasına sebep olacak şekilde Zeta potansiyelinin zaman ve uzayda değiştirilmesi fikrine dayanmaktadır. Akış zamanda periyodik davransa da, Lagrangian dinamiği kullanılarak hesaplanabilen parçacıkların izlediği yol, kaotik taşınıma sebep olduğundan düşük *Re* akışlarda bile iyi bir karıştırma meydana gelir. Kaotik taşınım konusunda daha fazla bilgi için, Aref [54] ve Aref ve Balachandar [55] tarafından gerçekleştirilen çalışmalar incelenebilir.

ELEKTROFOREZ

İletken bir sıvı içerisinde dağınık halde bulunan yüklü parçacıkların, uygulanan elektrik alanın etkisiyle kendilerini çevreleyen sıvıya göre hareketlenmesi işlemine elektroforez denir. Bu parçacık veya moleküllerin, anod veya katoda yönelmeleri sonucu kazandıkları hız, elektroforetik göç hızı olarak adlandırılır. Net yüklerinden dolayı parçacıklara etki eden Coulomb kuvveti ve bu kuvvete zıt yönde oluşan viskoz sürükleme arasındaki dengeden yararlanılarak parçacığın hareketi belirlenebilir. Bu sebeple, elektroforetik göç hızı, moleküllerin net yükü ve uygulanan elektrik alanla doğru, akışkanın ağdalılığı ve parçacıkların büyüklüğü ile ters orantılıdır. Elektroforez, özellikle DNA ve protein makromolekülleri gibi biyolojik ve kimyasal özlerin tespitine dayalı ayırma ve tür ayırmada yaygın bir biçimde kullanılır [56-58]. Önceki bölümlerde olduğu gibi, takip eden kısımlarda sırasıyla, önce bünye denklemlerini vereceğiz ve hemen ardından da elektroforez konusunda gerçekleştirilmiş güncel sayısal, deneysel ve teorik çalışmalardan söz edeceğiz.

Elektroforez için Bünye Denklemleri

Elektroforetik taşıma için detaylı formülasyon Kaynak [16]'da bulunabilir. Biz burada, elektriksel olarak yüksüz ($\rho_q = 0$) ve heryerde eşit yük yoğunlugu olduğu ($\sigma =$ sabit) kabulüne dayalı daha basit bir model sunacağız. Bu basitleştirmelerden sonra, tür taşıma denklemi asağıdaki şekilde yazılabilir [59,16]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla (c_i \vec{V} + c_i \vec{u}_{ep}^i) = D_i \nabla^2 c_i,$$
(20)

Yukaridaki denklemde yer alan \vec{u}_{ep} (= $\mu_{ept}\vec{E}$), elektroforetik göç hızıdır. Elektrik alan (\vec{E}) ve hidrodinamik hız (\vec{V}), sırasıyla Denklem (6) ve Denklem (7) ile verilen sıkıştırılamaz Navier-Stokes denklemeleri çözülerek elde edilir. Elektriksel yüksüzlük kabulü yaptığımız için, Navier-Stokes denkleminin sağ tarafında yer alan gövde kuvveti sıfıra eşittir. Bu yaklaşım, EÇK içerisinde geçerli değildir. Bu sebeple, burada sunulan yaklaşım, kanal boyutlarının EÇK'a göre çok büyük olduğu durumda geçerlidir. Bu bilgiler ışığında, Navier-Stokes denklemleri, Denklem (12) ile verilen Helmholtz-Smoluchowski kayma şartı uygulanarak çözülür. Dışarıdan uygulanan elektrik alan sonucu elektroosmoz elektroforez aynı anda ortaya çıktığı için, kayma şartı, elektroosmotik taşımadan kaynaklanan etkilerin de dikkate alınması açısından önemlidir. Burada sunulan modelde kullanılan diğer basitleştirme ve kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Örnek derişimi, diretken derişimine oranla çok küçük olup, diretken derişimi ve pH'ı heryerde aynıdır.
- Çözeltinin iletkenliği, çözeltinin heryerinde aynı değerdedir.
- Diretken çözeltinin derişimi göreceli olarak oldukça yüksek olduğundan, EÇK kalınlığı kanal boyutlarıyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- Çözeltinin sıcaklığı heryerde aynı olup, Joule ısınması dikkate alınmayacak kadar küçüktür (detaylar için, Joule ısınmasından kaynaklanan sıcaklık artışının, elektrik alan, elektirik iletkenlik, diretken çözelti ve duvar iletkenliğinin fonksiyonu olduğu ampirik bir bağıntının verildiği Kaynak [61]'e bakınız.).
- İletim katsayısı, akışkanın ağdalılığı, elektrokinetik devingenlik ve dielektrik özellikler gibi termofiziksel parametreler sabittir.

Sınırlı kapasitesine rağmen, bu model bircok araştırma grubu tarafından elektroforetik taşıma modellenmesinde kullanılmıştır [16,59,62-67]. Ancak, nano-kanallardaki düşük iyonik derişimlerde gözlemlenen sonlu EÇK etkileri için, söz konusu modelin tekrar gözden geçirilip geliştirilmesi gerekmektedir. Bu değişikliklere yerel yük dağılımının elektroforetik taşımaya etkileri de dahil edilmelidir. Bu sayede, pH değişimini kullanan iso-elektrik odaklama (IEF) da modellenebilir.

Güncel Gelişmeler ve Sonuçlar

Elektroforez, yüklü parçacıkların yanısıra biyolojik moleküllerin ayrılması ve/veya sınıflandırılması gibi amaçlara yönelik olarak kullanılan en yaygın elektrokinetik olaydır. Örneğin, elektroforez tekniği kullanılarak, proteinler, amino asitler, peptitler ve nükleotitler birbirlerinden ayrılabilir. Elektroforez, sınırı hareketli, daimi ve bölge elektroforezi olmak üzere 3 ana gruba bölünebilir [3].

Sınırı hareketli elektroforez, ticari alanda ve labaratuvar ortamında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, elektrik alan etkisine maruz çözelti içerisindeki artı ve eksi yüklü parçacıklar, zıt işaretli elektroda doğru yönlenirler. Bu yönelim, genellikle Schleiren optik teknikleri kullanılarak tespit edilebilen çözücünün sınırlarının hareket etmesine sebep olur.

Daimi elekroforez, ayrılan bileşenlerin zaman içerisinde konumlarını değiştirmedikleri durumda elde edilir [3] ve genellikle iso-elektrik odaklama uygulamalarında gözlemlenir. İso-elektrik odaklamada, yüklü parçacıklar elektroforetik taşıma ve pH gradyanı altında, net yükün sıfır olacağı, isolektrik nokta olarak adlandırılan, diretken çözelti içindeki bir noktaya doğru hareket eder.

İsolektrik nokta büyük ölçüde pH gradyanı etkisindeki elektroforetik taşıma ile belirlenir [4,12,68-69].

Örnekleri tutmak için bir destek ortamın kullanıldığı bölgesel elektroforezde, elektrik potansiyel bu destek ortamın bitiminde uygulanır. Destek ortam olarak, genellikle, filtre kağıt, selüloz, selüloz-asetat ve jöle kullanılmaktadır [6].

Elekroforez, genellikle kılcal yapı ve mikro kanallarda uygulanır [70]. 1980'lı yılların başında Jorgenson ve Lukacs tarafından gerçekleştirilen kılcal bir yapı içindeki elektroforetik ayırma, kılcal içindeki elektroforezin önemini ortaya koymuştur. Bu deney, cok hızlı analizler yapabilen ve anında tespit olanağı sunan otomatik analitik donanımların geliştirilebileceğini göstermiştir. Halen kullanmakta olduğumuz birçok ayırma tekniği, kılcal elektroforez ve elektro-osmotik akış ikilisinin algılayıcılara doğru yönlendirdiği çözünenler sayesinde gerçekleşmektedir.

Polson ve Hayes, elektrotların konumunu, dış elektrik alanı belirgin bir şekilde azaltacak, dolayısıyla elektroforetik ayırma etkinliğini artıracak biçimde belirleyip sabitledikleri bir dizi deney aracılığıyla, dış elektrik alan altındaki kılcal bir yapıda elektro-forezle akış kontrolünün mümkün olduğunu gösterdiler [71]. Ramsey ve çalışma arkadaşları, koli basili tespiti için, sadece elektroforetik taşımadan yararlanan bir mikro-akışlı aygıt geliştirdiler [47]. Ermakov ve diğerleri, elekroosmotik/elektroforetik taşıma ve tür yayınımı için 2-boyutlu sayısal bir model geliştirdiler [16]. Bu model arcılığıyla, kesişen kanal geometrisi içinde örnek odaklama ve enjeksiyonu ve T-şekilli kanalda da örnek karıştırılması olmak üzere iki basit yonga elemanında, elektrokinetik taşıma analizi gerçekleştirdiler. Ayrıca, elektrokinetik örnek odaklama, enjeksiyon ve ayırma için elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırdılar [60].

DİELEKTROFOREZ

Dielektroforez, uzayda düzgün dağılı olmayan elektrik alan etkisi altındaki elektrolit içinde asılı halde bulunan kutuplanabilir parçacıkların hareketidir [7]. Parçacıkların hareketi, düzgün dağılı olmayan elektrik alanın, parçacık ve onu çevreleyen akışkan üzerinde oluşturduğu çiftucay momenti tarafından meydana getirilir. Parçacığın üstündeki çiftucay momenti, akışkanın üstündekinden büyükse, parçacık yüksek elektrik alanın olduğu bölgeye doğru hareketlenir ve bu olay positif dielektroforez olarak adlandırılır. Akışkanın, parçacıklardan daha çok kutuplanabilir olduğu durumda ise; parçacıkların, elektrik alan yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerden uzaklaştığı gözlemlenir ve bu olay da negatif dielektroforez olarak adlandırılır [72].

Dielektroforez için Bünye Denklemleri

Dielektroforetik kuvetin zaman ortalaması aşağıda verilmiştir:

$$\vec{F}_{DEP} = 2\pi r^3 \epsilon_m Re[K(\omega)] \nabla \|E_{rms}\|^2, \tag{21}$$

Yukarıda verilen denklemde: E_{rms} , elektrik alanın ortalama karekökünü: r, parçacık yarıçapını; ϵ_m , ortamın dielektrik geçirgenliğini; ω , elektrik alan frekansını; $Re[K(\omega)]$, ise parçacığın etkin kutuplanabilirliğinin bir ölçüsü olan ve açık ifadesi aşağıda verilmiş olan [73] Clasius-Mossotti etkenidir.

$$K(\omega) = \frac{(\epsilon_p^* - \epsilon_m^*)}{(\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*)},\tag{22}$$

 ϵ_p^* ve ϵ_m^* , sırasıyla parçacığın ve ortamın karmaşık geçirgenliğidir. Karmaşık geçirgenlik aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\epsilon^* = \epsilon - \sqrt{-1}\frac{\sigma}{\omega},\tag{23}$$

Yukarıdaki denklemde yer alan ϵ , ve σ , sırasıyla dielektrik ortamın geçirgenlik ve iletkenliğini temsil etmektedir.

Brownian hareketi, kaldırma kuvveti ve diretken çözücünün hareketi ihmal edilidiğinde, parçacığa ait hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$m_p \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_{DEP} - \vec{F}_{Drag},$$

 F_{drag} , parçacık üzerindeki anlık sürükleme kuvvetidir. Ağdalılığı suya yakın olan diretken çözeltilerde, boyutu 10µm den küçük olan bir parçacık için, parçacık boyutuna dayalı Reynolds sayısı 1'den küçük olur. Bu şartlarda, atalet kuvvetlerinin parçacık hareketine etkisi ihmal edilebilir. Seyreltik çözelti kabulu yapıldığında, *r* yarıçaplı küresel parçacıkların birbirleriyle etkileşimde bulunmayacakları düşünülebilir ve bu parçacıklara etki eden sürükleme kuvveti, Stokes fomülü yardımıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{F}_{Drag} = 6\pi\mu r \vec{V},$$

Yukarıdaki deklemde görülen μ , dinamik ağdalılık, \vec{V} ise parçacık hızıdır. Atalet kuvvetleri ihmal edildiğinde, parçacığın anlık hızının anlık dielektroforetik kuvvetle orantılı olduğunu düşünebiliriz. Bu sayede, parçacık hızı aşağıdaki gibi yazılabilir [73].

$$\vec{V} = \frac{r^2 \epsilon_m Re[K(\omega)] \nabla \|E_{rms}\|^2}{3\mu}.$$
(24)

Parçacık yüzey alanı r^2 ile orantılı olduğundan, parçacığa ait dielektroforetik hızın parçacığın yüzey alanıyla orantılı olduğu söylenebilir. Denklem (24) dikkatlice incelendiğinde, parçacık hızının, elektrik alanın ortalama karekökünün karesi ile belirlenebileceği görülebilir. Bu çıkarım, dielektroforezin düzgün ya da degişken elektrik alanla elde edilebilecegini gösterir.

Pozitif ve negatif dielektroforez, (sırasıyla parçacığın yüksek elektrik alanı gradyanları yönündeki ve aksi yönündeki hareketi sırasıyla, $Re[K(\omega)] > 0$ ve $Re[K(\omega)] < 0$ olması durumunda meydana gelir. Dielektroforezin bu davranışı, hassas bir biçimde seçimli olarak kontrol edilebilen mikro-akışlı parçacık/hücre ayrımı yöntemlerine olanak tanımaktadır.

Dielektroforetik devingenlik yüzey alanı ile orantılı olduğundan, çok küçük parçacıkların (mikron altı boyutlu) kabul edilebilir bir zaman aralığı içerisinde, dielektroforez kullanılarak yönlendirilmesi çok yüksek elektrik alan gradyanları gerektirir. Bununla birlikte, yüksek elektrik alan ise Joule ısınmasına sebep olur. Tüm bunlara rağmen, daha da küçük aygıt bileşenlerinin yakın zamanda üretilebilecek olması, Joule ısınmasından kaynaklanan etkileri belirgin bir biçimde azaltacaktır. Bu da, elektrotlar arasında göreceli olarak daha küçük potansiyel farklılıklarıyla, daha yüksek elektrik alan gradyanları üretilebilmesi ile mümkün olur. Dielektroforez'de Joule ısınması etkisinin analizi Kaynak [73]' de görülebilir.



Şekil 2. 50 KHz' lik AC elektrik sinyali, kan kanseri hücrelerinin elektriksel kutuplanmasına neden olur ve sağlıklı insan hücreleri elektrot yüzeyleri civarında tutulurken, kanserli olanlar dört adet spiral elektrotun merkezine dogru hareket ederler. (P. Gascoyne and X. Wang)

Dielektroforez Alanında Son Gelişmeler ve Sonuçlar

Bu bölümde, biyo-tıp, mikro akışlı sistemler ve nano-teknoloji gibi farklı alanlardaki dielektroforez uygulamalarından söz edeceğiz. İlk kez Green ve Morgan, bir dizi mikro elektrot aracılığıyla bir nano-parçacık öbeğinin (93 nm lik kauçuk boncuklar), dielektroforetik özelliklerindeki farklılıklarından yararlanılarak iki alt gruba bölünebileceğini göstermiştir [74]. Bu gelişme, kromozomlardan virüslere, DNA'dan macro moleküllere kadar geniş bir yelpaze içinde yer alan ve bivolojik olarak farklı özellikler göstermelerine rağmen benzer boyutta olan cok kücük parcacıkların ayrılmasına yönelik uygulamaları başlatmıştır. Örneğin, Gascoyne ve diğerleri, göğüs kanseri hücrelerini kandan (AC elektrik alan) dielektroforez kullanarak ayırmıştır [75]. Hem kanser hem de kan hücrelerinin dielektrik özelliklerinin frekansa bağlı olmasından yararlanılan bu yöntemde özetle su işlemler gerçekleştirilmiştir: İlk aşamada, 50 kHz lik dielektroforezlerle, hem kan hem de kanser hücrelerinin dielektrik etkileşim odalarında (elektrot) kıstırılması ve toplanması sağlanır. Tahrik frekansı değistirilerek, bu etkilesim odalarındaki kan hücrelerinin serbest kalması sağlanırken sadece kanserli hücrelerin elektrotlar üzerinde kalması sağlanır. Ardından, serbest kalan kan hücreleri basınç farkıyla sürülen akışla akımaltına taşınırken, kanserli hücreler elektrot uçlarında kalır [75].

Gascoyne ve Wang, mikro-uretim dört spiral elektrottan oluşan daha güncel bir tasarım aracılığıyla, kan kanseri hücrelerini sağlıklı hücrelerden dielektroforetik yöntemle ayırmayı başarmıştır. Şekil 2, kanserli kan hücrelerinin dört sipiral elekrotun merkezine doğru yoğunlaştığını göstermektedir. Bu tasarımda normal hücreler elektrot yüzeylerinde tutulurken, kanserli hücreler merkeze doğru sürüklenirler. Daha farklı dielektroforez uygulamaları, Kaynak [76-80, 73]'de görülebilir.

Dielektroforetik uygulamaların çoğunda AC elektrik alan kullanılır. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi, DC elektrik alan kullanmak da mümkündür. DC elektrik alanın söz konusu olduğunda, Denklem (22) ile verilen Clausius-Mossotti etkisinin karmaşık kısmı sıfıra eşit olur ve elektroforetik kuvvet frekansdan bağımsız hale gelir. Cummings ve Singh, gömülü elekrotların olmadığı, daire veya kare kesitli yalıtılmış çubuk dizilerinden oluşan bir düzenek geliştirmiş ve bu düzeneğin dışında konumlandırdıkları elekrotları DC elektrik alanla uyararak, çubukların dizili olduğu doğrultuyla istenilen acıyı yapacak sekilde akışlar elde etmişlerdir [72]. Zayıf bir elektrik alanda, elektrokinetik etkiler ve iletim, ikincil dereceden bir etken olan dielektroforetik kuvvete göre ezici konumdadırlar. Ancak, zayıf olan elektrik alan şiddeti arttırılırsa, iki ayrı olay gözlenir. İlk olarak, dielektroforezin iletimden daha baskın olmaya başladığı anda, akış alanında yüksek ve düşük parçacık derişiminin olduğu düz hatlar (ipliksiler) belirir. Elektrotlarla çubuk dizileri arasındaki açı ve çubukların kesit şekline bağlı olarak, farklı derişim gradyanlarının söz konusu olduğu bu durum ipliksi dielektroforez" olarak adlandırılır [72, 15]. İkinci olay ise, dielektroforezin, taşınım ve elektrokinetik etkilerle kıyaslanabilir ya da onlardan büyük olduğu daha yüksek şiddetli bir elektrik alan söz konusu olduğunda gözlemlenir. Parçacıkların yalıtkan yüzeyler civarında tersinir bir biçimde hareketsizleştiğinin deneylerle gözlemlendiği bu durum yakalama dilelektroforezi olarak adlandırılmaktadır. [72, 15]. Şekil 3'de, dairesel kesitli çubuk dizileri etrafındaki, ipliksi dielektroforez (üstte) ve yakalama dielektoforezine (altta) ait parçacık ışınırlığı görüntüsü verilmistir.

Dielektroforezin kullanıldığı ilginç bir nano teknoloji uygulaması da, Velev ve ekip arkadaşları tarafından gerçekleştirilen, nano parçacıkların kendiliğinden mikro ölçekli tel oluşturması işlemidir [81]. Düzlemsel elektrotlarda, 50-200 Hz frekans ve 50-200 V gerilim kullanarak oluşturdukları AC elektrik alanla gerçekleştirdikleri deneyde, 5 milimetrelik bir telin saniyede 50 mikrometreyi aşacak bir şekilde uzadığını kaydettiler. Teller, 15 ile 30 *nm* aralığında çapa sahip altın parçacıkların kendiliğinden bir araya gelmesiyle oluşmakta ve iyi bir ohmik iletkenlik göstermektedir. Oluşan telin kalınlığı, yüksek yüzey/nacim oranı verecek şekilde kontrol altına alınabilmektedir. Bir araya gelme süreci basit ve kendi kendini tamir edebilir nitelikte olup, tel ile iletken adacık veya parçacıklar arasında kendiliğinden elektriksel bağlantılar oluşmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı, söz konusu yapılar, ıslak elektronik ve biyo-elektronik devre alanında gelecek vaadetmektedir [81].

Jones ve çalışma arkadaşları, dielektroforez kullanarak mikro-litreden nano-litreye varan ölçekte su damlacık hacimleri oluşturarak dielektroforezin, oldukça güçlü yüzey gerilimi ve kılcal etkilerin söz konusu olduğu küçük su hacimlerinin işlenmesine olanak tanıyan bir metod olabileceğini gösterdiler [82]. Kullandıkları yöntem, suyun kılcal sistemler içinde yumuşak bir üstleç ile beraber hızlı hareket etmesine ve 0.1 sn'den daha az bir sürede birçok nano-litre hacimli damlacığının oluşmasına olanak sağlamaktadır. Tanı, karıştırma, ayırma ve ilaç hazırlama gibi süreçlere yönelik olarak, damlacığın üstleç boyunca hareketinin bir yonga üzerindeki labaratuvarda gözlemlenmesi olasılığı bu yöntemin önemli bir potansiyelidir.. Ancak, bu yöntemin en önemli getirisi "işleme konmadan evvel eldeki ilk sıvının farklı damlacıklara bölünebilmesi ve böylelikle çapraz örnek kirlenmesi olasılığının ortadan kaldırılmasıdır" [82]. Dielektreforez ve ona karşı koyan yüzey gerilimi ve kılcal etkilerin yanısıra; ıslanma, geçici akış hareketleri, Joule ısınması ve elektromanyetik yük boşalması da oldukça önemlidir. Bu olayların daha iyi kavranması ve daha hassas bir biçimde modellenmesi için bu alanda daha fazla araştırma yapılmasına geeksinim duyulmaktadır [83].



Şekil 3. İpliksi ve yakalama dielektroforezine ait parçacık ışınırlık görüntüleri yukarıdan aşağıya doğru verilmiştir. Yüksek parçacık derişiminin söz konusu olduğu bölgeler şiddetli ışınırlığa sebep olmaktadır. Yukarıdan aşağıya doğru olmak üzere, sırasıyla 25 ve 100 V/mm şiddetinde alanlar uygulanmıştır. Dairesel kesitli çubukların çapı 33 µm olup aralarındaki mesafe 63 µm dir. (E. Cummings)

SONUÇLAR

Bu makalede, bünye denklemlerine ek olarak, elektrosmotik, elektroforetik ve dielektroforetik taşıma mekanizmalarını konu alan güncel uygulamalardan söz ettik. Bu sayede, nanoteknoloji kullanımına en yatkın uygulamalar olan mikro-akışlı sistemlerin önemini belirttik. Elektrokinetik olayı tüm detaylarıyla incelemek ya da mikro akışlı sistemler alanındaki tüm gelişmeleri burada sunmak neredeyse imkansızdır. Bilindiği gibi, mikro akışlı sistemler, kimya, biyoloji, akışkanlar dinamiği, ısı geçişi gibi birden fazla bilim dalı ve mühendislik alanına yayılmış olan disiplinlerarası bir konudur. Bu nedenle, seçilmiş birkaç araştırmanın sonuçlarını detaylı olarak incelemek yerine, mümkün olduğunca çok sayıda çalışmadan söz etmeyi tercih ettik. Böylece okuyucunun, durmaksızın gelişen bu alana ait resmin bütününü görebilmesini hedefledik.

Elektrodönme ve manyetik dalga dielektroforezi, sıcaklık gradyanı ile hareketlendirme gibi parçacık kutuplanmasına dayalı etkilerin bu çalışma dışında tutulduğunu belirtmek isteriz. Hughes, çözelti içinde asılı haldeki parçacıkların derişimi, tek bir nano-parçacığın yönlendirilmesi, parçacık taşıma ve ayırma gibi olayların etkileri ve nano teknolojideki olası kullanımlarından söz etmiştir [10].

Sunulan bu çalışmada söz edilmeyen devinimsel iyon akımı etkileri, dağınık katman içindeki iyonların akım altına sürüklendiğ, basınç farkı ile harekete geçirilen iyonize akışlarda önemli olabilir. Bu durum, akımaltı ve akımüstü arasında eletriksel potansiyel farkına sebep olacak bir sürekli akım meydana getirir. Doğal olarak bu durum, basınç farkı ile hareketlendirilen iyonlar üzerinde, bu hareketin aksi yönünde bir etki meydana getirir.Bu etki, mikro kanallardaki iyonize (kutuplanmış) sıvıların akışında gözlemlenen yüksek sürtünme katsayısının nedenlerinden biri olarak sayılmıştır [19, 84, 85].

Son olarak, burada sunulan yaklaşımların tümünün mikron ve mikron altı ölçekli akışların sürekli ortam mekaniğine dayalı olarak modellenmesine dayandığını belirtmek isteriz. Son deneyler, susever ve su-sevmez yüzeylerde kayma gerilmesine bağlı bir kayma hızının varlığına işaret etmektedir [86, 87]. Bununla birlikte, sıvı/duvar arayüzünü konu alan moleküler dinamik çalışmaları, sürekli ortam yaklaşımının yüzeyden 10 nm uzaklıktan itibaren geçerli olduğunu göstermektedir [9]. Tüm bunlar, makro moleküllerin de dahil edilebileceği bir şekilde taşıma süreçlerini belirgin bir biçimde etkileyebilir.

Kaynaklar

- [1] R.F. Probstein. *Physiochemical Hydrodynamics*. Wiley and Sons Inc, 2nd ed. New York, 1994.
- [2] R. J. Hunter. Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications. Academic Press Inc, New York, 1981.
- [3] M. Melvin. *Electrophoresis*. John Wiley and Sons Inc, London, 1987.
- [4] [4] P.G. Righetti. *Isoelectric Focussing: Theory, Methodology and Applications*. Elsevier Biomedical, Amsterdam, 1983.
- [5] D. J. Shaw. Introduction to Colloid and Surface Chemistry. Academic Press, New York, 1980.
- [6] R. Westermeier. *Electrophoresis in Practice*. VCH Publishers Inc, New York, 1990.
- [7] H.A. Pohl. *Dielectrophoresis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1978.
- [8] M. Gad-el Hak. *The MEMS Handbook*. CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [9] G.E. Karniadakis, A. Beskok, and N. Aluru. *Microflows and Nanoflows: Fundamentals and Simulation*. Springer-Verlag, New York, 2005.
- [10] M. P. Hughes. AC electrokinetics: application for nanotechnology. *Nanotechnology*, 11:124-132, 2000.
- [11] P. Dutta and A. Beskok. Analytical solution of combined electroosmotic/pressure driven flows in two-dimensional straight channels: Finite Debye layer effects. *Analytical Chemistry*, 73(9):1979-1986, 2001.

- [12] K. Macounova, C.R. Cabrera, M.R. Holl, and P. Yager. Generation of natural pH gradients in microfuidic channels for use in isoelectric focusing. *Analytical Chemistry*, 72(16):3745-3751, 2000.
- [13] S.C. Jacobson, J.P. Alarie, and J.M. Ramsey. Electrokinetic transport through nanometer deep channels. In *Micro Total Ananysis Systems, 2001*, pages 57-59.
- [14] J.A. Strantton. *Electromagnetic theory*. McGraw Hill, New York, 1941.
- [15] E.B. Cummings. Ideal electrokinesis and dielectrophoresis in arrays of insulating posts. *AIAA*, (2001-1163):1-10, 2001.
- [16] S.V. Ermakov, S.C. Jacobson, and J.M. Ramsey. Computer simulation of electrokinetic transport in micro fabricated channel structures. *Analytical Chemistry*, 70(21):4494-4504, 1998.
- [17] E.B. Cummings, S.K. Gri±ths, R.H. Nilson, and P.H. Paul. Conditions for similitude between the fluid velocity and electric feld in electroosmotic flow. *Analytical Chemistry*, 72(11):2526-2532, 2000.
- [18] F. F. Reuss. Sur un nouvel effet de l'electricite galvanique. *Memoires de la Societe Imperiale de Naturalistes de Moscou*, 2:327-337, 1809.
- [19] D. Burgreen and F.R. Nakache. Eletrokinetic flow in ultra ne capillary silts. *J. Phys. Chem.*, 68(5):1084-1091, 1964.
- [20] H. Ohshima and T. Kondo. Electrokinetic flow between two parallel plates with surface charge layers: Electroosmosis and streaming potential. J. Colloids and Interface Science, 135(2):443-448, 1990.
- [21] C.L. Rice and R. Whitehead. Electro kinetic flow in a narrow cylindrical capillary. *J. Phys. Chem.*, 69(11):4017-4023, 1965.
- [22] W.Y. Lo and K. Chan. Poisson-Boltzmann calculations of ions in charged capillaris. J. Chem. Phys., 101(2):1431-1434, 1994.
- [23] H.J. Keh and Y.C. Liu. Electrokinetic flow in a circular capillary with a surface charge layer. *J. Colloids and Interface Surfaces*, 172:222-229, 1995.
- [24] J.T.G. Overbeek. *Colloid Science, Volume 1, Editor: Kruyt, H.R.* Elsevier Publishing Company, Armasterdam, 1952.
- [25] J.G. Santiago. Electroosmotic flows in microchannels with finite inertial and pressure forces. *Analytical Chemistry*, 73(10):2353-2365, 2001.
- [26] P. Dutta and A. Beskok. Analytical solution of time periodic electroosmotic flows: Analogies to Stokes' second problem. *Analytical Chemistry*, 73(21):5097-5102, 2001.
- [27] E.V. Dose and G. Guiochon. Time scales of transient processes in capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography*, 652:263-275, 1993.
- [28] O. Soderman and B. Jonsson. Electroosmosis: velocity profiles in different geometries with both temporal and spatial resolution. *Journal of Chem. Phys.*, 105(23):10300- 10311, 1996.
- [29] N. G. Green, A. Ramos, A. Gonzalez, H. Morgan, and A. Castellanos. Fluid flow induced by nonuniform AC electric fields in electrolytes on microelectrodes: I. experimental measurements. *Physical Review E*, 61(4):4011-4018, 2000.
- [30] Gonzalez, A. Ramos, N. G. Green, and A. Castellanos. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes: II. a linear double layer analysis. *Physical Review E*, 61(4):4019-4028, 2000.
- [31] V. M. Barrgan and C. R. Bauza. Electroosmosis through a cation-exchange membrane: Effect of an AC perturbation on the electroosmotic flow. *J. of Colloid and Interface Science*, 230:359-366, 2000.
- [32] J. I. Molho, A.E. Herr, M. Desphande, J.R. Gilbert, M.G. Garguilo, P.H. Paul, P.M. John, T.M. Woudenberg, and C. Connel. Fluid transport mechanisms in micro fluidic devices. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1998, pages 69-75.

- [33] P.H. Paul, M.G. Graguilo, and D.J. Rakestraw. Imaging of pressure and electrokinetically driven flows through open capillaries. *Analytical Chemistry*, 70(13):2459-2467, 1998.
- [34] E.B. Cummings, S.K. Griffiths, and R.H. Nilson. Irrotationality of uniform electroosmosis. In *Proc. SPIE Microfluidic devices and systems II, 1999*, pages 180-189.
- [35] M.J. Kim, K.D. Kihm, and A. Beskok. A comparative study of μ -*PIV* measurements and numerical simulations of electroosmotic flows in various micro-channel configurations. *Experiments in Fluids*, 33:170-180, 2002.
- [36] Singh, E. B. Cummings, and D. J. Throckmorton. Flourescent liposome flow markers for microscale particle -image velocimetry. *Analytical Chemistry*, 73(5):1057-1061, 2001.
- [37] A.E. Herr, J.I. Molho, J.G. Santiago, M.G. Mungal, T.W. Kenny, and M.G. Garguilo. Electroosmotic capillary flow with non uniform zeta potential. *Analytical Chemistry*, 72(5):1053-1057, 2000.
- [38] C. Yang and D. Li. Analysis of electrokinetic effects on the liquid flow in rectangular microchannels. *J. Colloids and Surfaces*, 143:339-353, 1998.
- [39] N.A. Patankar and H.H. Hu. Numerical simulation of electroosmotic flow. *Analytical Chemistry*, 70(9):1870-1881, 1998.
- [40] F. Bianchi, R. Ferrigno, and H.H. Girault. Finite element simulation of an electroosmoticdriven flow division at a t-junction of microscale dimension. *Analytical Chemistry*, 72(9):1987-1993, 2000.
- [41] P. Dutta, A. Beskok, and T. C. Warburton. Numerical simulation of mixed electroosmotic/pressure driven microflows. *Numerical Heat Transfer, Part-A: Applications*, 41(2):131-148, 2002.
- [42] P. Dutta, A. Beskok, and T. C. Warburton. Electroosmotic flow control in complex microgeometries. *J. Microelectromechanical Systems*, 11(1):36-44, 2002.
- [43] J. Horvath and V. Dolnik. Polymer wall coatings for capillary electrophoresis. *Electrophoresis*, 22:644-655, 2001.
- [44] P. G. Righetti, C. Gel, B. Verzola, and L. Castelletti. The state of art of dynamic coatings. *Electrophoresis*, 22:603-611, 2001.
- [45] Y. Liu, J. C. Fanguy, J. M. Bledsoe, and C. S. Henry. Dynamic coating using polyelectrolyte multilayers for chemical control of electroosmotic flow in capillary electrophoresis microchips. *Analytical Chemistry*, 72(24):5939-5944, 2000.
- [46] D. Kaniansky, M. Masar, and J. Bielcikova. Electroosmotic flow separation for capillary zone electrophoresis in a hydrodynamically closed separation system. *Journal of Chromatography A*, 792:483-494, 1997.
- [47] M.A. McClain, C.T. Culbertson, S.C. Jacobson, and J.M. Ramsey. Flow cytometry of escherichia coli on microfluidic devices. *Analytical Chemistry*, 73(21):5334-5338, 2001.
- [48] S.L.R. Barker, D. Ross, M.J. Tarlov, M. Gaitan, and L.E. Locasio. Control of flow direction in microfluidic devices with polyelectrolyte multilayers. *Analytical Chemistry*, 72(24):5925-5929, 2000.
- [49] R.B.M. Schasfoort, S. Schlautmann, J. Hendrikse, and A.V.D. Berg. Electroosmotic flow in a microcapillary with one solution displacing another solution. J. Colloid and Interface Sciences, 242:264-271, 2001.
- [50] J.S. Buch, P.C. Wang, D.L. DeVoe, and S.L. Lee. Field-effect flow control in a polydimethylsiloxane-based microfluidic system. *Electrophoresis*, 22:3902-3907, 2001.
- [51] S.C. Jacobson, T.E. McKnight, and J.M. Ramsey. Microfluidic devices for electrokinetically driven parallel and serial mixing. *Analytical Chemistry*, 71:4455-4459, 1999.
- [52] C. Yang, C. B. Ng, and V. Chan. Transient analysis of electroosmotic flow in a slit microchannel. *J. Colloid and Interface Science*, 248(2):524-527, 2002.

- [53] S. Qian and H.H. Bau. A chaotic electroosmotic stirrer. *Analytical Chemistry*, 2002 *Analytical Chemistry*, 74 3616-25, 2002.
- [54] H. Aref. Stirring by chaotic advection. J. Fluid Mech., 143:1-21, 1984.
- [55] H. Aref and S. Balachandar. Chaotic advection in a Stokes flow. *Phys. Fluid*, 29:3515-3521, 1986.
- [56] W. L. Tseng and H. T. Chang. A new stategy for optimizing sensitivity, speed, and resolution in capillary electrophoretic separation of DNA. *Electrophoresis*, 22:763-770, 2001.
- [57] K. Kleparnik, Z. Mala, and P. Bocek. Fast separation of DNA sequencing fragments in highly alkaline solutions of linear polyacrylamide using electrophoresis in bare silica capillaries. *Electrophoresis*, 22:783-788, 2001.
- [58] M. Saur, B. Angerer, W. Ankenbauer, Z. Foldes-Papp, F. Gobel, K. T. Han, R. Rigler, A. Schulz, J. Wolfrum, and C. Zander. Single molecule DNA sequencing in submicrometer channels: State of the art and future prospects. *Journal of Biotechnology*, 86(3):181-201, 2001.
- [59] O.A. Palusinski, A. Graham, R.A. Mosher, M. Bier, and D.A. Saville. Theory of electrophoretic separations, part ii: Construction of a numerical simulation scheme and it's applications. *AICHE Journal*, 32(2):215-223, 1986.
- [60] S.V. Ermakov, S.C. Jacobson, and J.M. Ramsey. Computer simulation of electrokinetic mass transport in microfabricated fluidic devices. In *Proc. of Modeling and simulation of Microsystems*, 1999, pages 534-537.
- [61] M. Jansson, A. Emmer, and J. Roeraade. Some design considerations in miniaturized electrokinetic separation systems. *J. High Resolut. Chromatogr.*, 12(12):797-807, 1989.
- [62] S.V. Ermakov, O.S. Mazhorova, and Y.P. Popov. Mathematical modeling of the electrophoretic separation of biological mixtures, ii. *Translated from Differentsial'nye Uravneniya*, 12:2129, 1992.
- [63] T.M. Grateful and E.N. Lightfoot. Finite difference modelling of continuous-flow electrophoresis. *Journal of Chromatography*, 594:341-349, 1992.
- [64] S.V. Ermakov, M.S. Bello, and P.G. Righetti. Numerical algorithms for capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 661:265-278, 1994.
- [65] S.V. Ermakov, S.C. Jacobson, and J.M. Ramsey. Computer simulations of electrokineticinjection techniques in microfluidic devices. *Analytical Chemistry*, 72(15):3512-3517, 2000.
- [66] M.G. Giridharan and A. Krishnan. An implicit numerical model for electrophoretic systems. In *Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Proceedings, 1998*, pages 61-68.
- [67] S. Krishnamoorthy and M.G. Giridharan. Analysis of sample injection and band-broadening in capillary electrophoresis microchips. In 2000 Int'l. Conference on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM), 2000.
- [68] K. Macounova, C.R. Cabrera, and P. Yager. Concentration and separation of proteins in microfluidic channels on the basis of transverse IEF. *Analytical Chemistry*, 73(7):1627-1633, 2001.
- [69] C.R. Cabrera, B. Finlayson, and P. Yager. Formation of natural pH gradients in a microfluidic device under flow conditions: Model and experimental validation. *Analytical Chemistry*, 73(3):658-666, 2001.
- [70] P. Janos. Role of chemical equilibria in the capillary electrophoresis of inorganic substances. *Journal of Chromatography A*, 834:3-20, 1999.
- [71] N. A. Polson and M. A. Hayes. Electroosmotic flow control of fluids on a capillary electrophoresis microdevice using an applied external voltage. *Analytical Chemistry*, 72(5):1088-1092, 2000.

- [72] E.B. Cummings and A.K. Singh. Dielectrophoretic trapping without embedded electrodes. In Proc. of SPIE Conferences on Micromachining and Microfabrication, 2000, pages 164-173.
- [73] H. Morgan, M.P. Hughes, and N.G. Green. Separation of submicron bioparticles by dielectrophoresis. *Biophysical Journal*, 77:516-525, 1999.
- [74] N. Green and H. Morgan. Rapid communication dielectrophoretic separation of nanoparticles. J. Physics D: Allp. Phys., 30:L41-L44, 1997.
- [75] P. Gascoyne and X. Wang. Dielectrophoretic separation of cancer cells from blood. *IEEE Transactions on Industry Application*, 33(3):670-678, 1997.
- [76] P. Gascoyne, Y. Huang, R. Pethig, J. Vykuokal, and F. Becker. Dielectrophoretic separation of mammalian-cells studied by computerized image-analysis. *Meas. Sci. and Tech*, 3:439-445, 1992.
- [77] G. Markx and R. Pethig. Dielectrophoretic separation of cells: continuous separation. *Biotechnology and Bioengineering*, 45:337-343, 1995.
- [78] G. Markx, P. Dyda, and R. Pethig. Dielectrophoretic separation of bacteria using a conductivity gradient. *J. of Biotechnology*, 51:175-180, 1996.
- [79] S. Fiedler, T. Shirley, S. Schnelle, and G. Fuhr. Dielectophoretic sorting of particles and cells in a microsystem. *Analytical Chemistry*, 70:1909-1915, 1998.
- [80] J. Cheng, E. Sheldon, L. Wu, A. Uribe, L. Gerrue, M. Carrino, J. Heller, and J. O'Connell. Preparation and hybridization analysis of DNA/RNA from E-coli on microfabricated bioelectronic chips. *Nature Biotechnology*, 16:541-546, 1998.
- [81] K.D. Hermanson, S.O. Lumsdon, J.P. Williams, E.W. Kaler, and O.D. Velev. Dielectrophoretic assembly of electrically functional microwires from nanoparticle suspensions. *Science*, 294:1082-1086, 2001.
- [82] T.B. Jones, M. Gunji, and H.J. Feldman. Dielectrophoretic liquid actuationa and nanodroplet formation. *J. Apply. Phys.*, 89:1441-1448, 2001.
- [83] T.B. Jones. Liquid dielectrophoresis on the microscale. *J. of Electrostatics*, 51-52:290-299, 2001.
- [84] C. Yang, D. Li, and J.H. Masliyah. Modeling forced liquid convection in rectangular microchannels with electrokinetic effects. *Int. J. Heat Mass Trans*, 41:4229-4249, 1998.
- [85] P. Dutta. *Numerical Modeling of Electroosmotically Driven Flows in Complex Micro-Geometries*. PhD thesis, Texas A&M University, College Station, TX, Agust 2001.
- [86] C. Meinhart, D. Tretheway, L. Zhu, and L. Petzold. Examination of the slip boundary condition by m-piv and lattice Boltzmann simulations. In *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2002-33704, 2002.*
- [87] K.S. Breuer, C. Choi, and K.J. Westin. To slip or not to slip: Water flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels. In *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2002-33707, 2002.*

Terimce

elektrik çift katman, EÇK	electric double layer, EDL
dağınık katman	diffuse layer
derişim	concentration
devingenlik	mobility
diretken	buffer
elektrodönme	electrorotation
elektroforez	electrophoresis
elektroosmoz	electroosmosis
göç hızı	migration velocity
ışınırlığı tetiklenebilir boya	caged dye fluorescence
iyonlarından arındırılmış	deionized
kilcal	capillary
kutuplanabilirlik	polarizability
mikro akışlı sistemler	microfluidics
mikro ölçekli bütünleşik analiz sistemleri, µBAS	micro total analysis systems, µTAS
silika	silica
suylakesim	hydrolyse
tortullaşma	sedimentation
tür	species