

Özgün Elektroosmotik Mikrokarıştırıcı Tasarımının Farklı Voltajlardaki Karıştırma Performansının Nümerik İncelenmesi

Mehmet Berk AZDURAL¹ , Sinan YİĞİT^{2*}  Ali KAHRAMAN¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 10.03.2024
Kabul Tarihi: 26.06.2024
Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Biyomems,
Çip Üzerinde Laboratuvar,
Mikroakışkan,
Mikrokarıştırıcı.

Bu çalışmada, mikrokarıştırıcıların tasarımı ve performansı üzerine nümerik bir inceleme sunulmuştur. İnceleme, özellikle yüzük tipi elektroosmotik mikrokarıştırıcıların farklı voltaj ve frekanslardaki karıştırma etkinliği ve maliyetleri üzerinde odaklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan nümerik analizler, karışma performansını belirleyen faktörleri ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, mikrokarıştırıcıların tasarımı ve optimize edilmesinde dikkate alınması gereken nümerik bilgileri vurgulanmıştır. Frekansın artışının karışma performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve belirli bir bölgede karışma performansını artırırken, bazı durumlarda negatif etkilere neden olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, voltajın karışma üzerindeki etkileri de detaylı olarak değerlendirilmiş ve doğrudan bir artışın karışma etkinliğini artırdığı belirlenmiştir. Özellikle, geometrik boyutlar, uygulanan gerilim ve frekans gibi parametrelerin karışma performansı üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. 1 ila 5V arası gerilimler ile 4 ve 8Hz frekanslarında analizler gerçekleştirilmiştir. En iyi performans, 4,5V ve 8Hz uygulandığı durumda elde edilmiştir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda, daha karmaşık sistemlerin ve farklı çalışma koşullarının dikkate alınarak daha kapsamlı analizlerin yapılması önerilmektedir.

A Numerical Study of the Mixing Performance of the Electroosmotic Micromixer Design at Different Voltages

Article Info

ABSTRACT

Received: 10.03.2024
Accepted: 26.06.2024
Published: 31.12.2024

Keywords:

Biomems,
Lab on a Chip,
Microfluidics,
Micromixer.

In this study, a numerical investigation on the design and performance of micromixers is presented. The investigation focuses particularly on the mixing efficiency and costs of ring-type electroosmotic micromixers at different voltages and frequencies. Numerical analyses performed using the finite element method reveal the factors that determine mixing performance. According to the obtained results, numerical data that should be considered in the design and optimization of micromixers are highlighted. The effects of increasing frequency on mixing performance were examined, and it was observed that while it enhances mixing performance in a certain range, it can cause negative effects in some cases. Similarly, the effects of voltage on mixing were also evaluated in detail, and it was determined that a direct increase in voltage enhances mixing efficiency. Specifically, parameters such as geometric dimensions, applied voltage, and frequency were found to be decisive on mixing performance. Analyses were conducted at voltages ranging from 1 to 5V and at frequencies of 4 and 8Hz. The best performance was achieved when 4.5V and 8Hz were applied. In this context, it is recommended that future studies consider more complex systems and different operating conditions for more comprehensive analyses.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Azdural, M.B.; Yiğit, S. & Kahraman, A. (2024). Özgün Elektroosmotik Mikrokarıştırıcı Tasarımının Farklı Voltajlardaki Karıştırma Performansının Nümerik İncelenmesi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), XX- XX. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.60>

*Sorumlu Yazar: Sinan Yiğit, sinan.yigit@erbakan.edu.tr

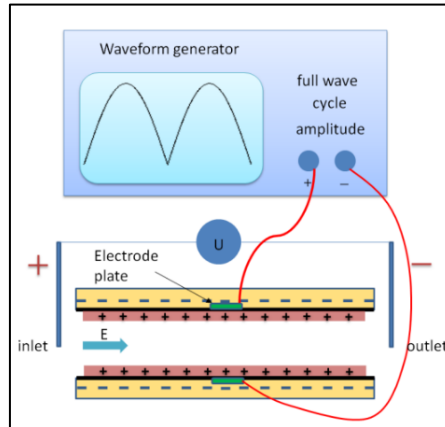


GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mikro fabrikasyon yöntemlerinin kullanımlarının gelişmesiyle mikro toplu analiz sistemleri, ve çip üzerinde laboratuvar (lab on a chip/LOC) uygulamaları geçtiğimiz 10 yılda kat ettikleri mesafeye öne çıkmaktadır [1]. Çip üzerinde laboratuvar (LOC) alanındaki çalışma tecrübeleri, hastalıkların erken tespiti ve tedavisinde tıp bilimine büyük katkıda bulunmasının dışında, diğer alanlardaki mikroakışkan uygulamalarının geliştirilmesine ön ayak olmuştur. LOC uygulamaları, genellikle replika kalıplama, mikrokontakt baskılama gibi yumuşak litografi teknikleri ile üretilir. Yumuşak litografi ile üretim, gelişmiş cihazlara gereksinim duyarken, günümüzde üç boyutlu baskı tekniklerinin gelişmesi, evlerde dahi üretilebilmesine olanak sağlamıştır. LOC uygulamaları birçok alt mikroakışkan sistemlere sahip olup, çoğu uygulama bünyesinde mikrokarıştırmacıları içermektedir. Mikrokarıştırmacılar, sıvıların verimli olarak birbirine karıştırılmasının gerekli olduğu Kimya, Biyoloji, Tıp ve Endüstri gibi alanlarda büyük önem arz etmektedir [2].

Mikrokarıştırmacılar, herhangi bir makro ölçekli laboratuvar ekipmanlarına gereksinim duyulmaksızın, taşınabilir bir ortamda karıştırma işleminin yapılmasını sağlayan ve mikro ölçekte dizayn edilen cihazlardır. Laboratuvar ölçekli sistemlere göre nispeten daha az maliyetli, daha hızlı ve güvenlidir. Üretiminde en yaygın kullanılan malzeme yüksek basınca dayanıklılığı ve sızdırmazlığa katkısı ile bilinen silikon bazlı PDMS(Polydimethylsiloxane) malzemesidir. Bu platformlar, mikro boyutlardaki ölçme sistemlerine ait numunelerin hassas bir şekilde karıştırılmasını sağlar. Tıbbi uygulamalarda bu sıvılar, kanla etkileştiğinde kanın ya da hücrelerin bazı özelliklerini incelenebilir kılacak olan heparin, sodyum sitrat gibi proteinleri alt bileşenlerine ayıracak sıvılar olabilir.

Mikrokarıştırmacıların içerisindeki akışkanlara etki eden ataletsel kuvvetlerin, viskoz kuvvetlere göre etkisinin göz ardı edilebilecek kadar az olduğu, $Re < 1$ durumu Stokes(Sünme) akışı olarak adlandırılır. Laminer akışın özel bir hali olan Stokes akışı, çok yavaş akışlarda gerçekleşir. Genellikle mikrokanaallardaki karışma olayları boyutlarından ötürü bu sınıfa girer. Bu durumda karışmanın gerçekleştirilebilmesi, dışarıdan bir etki uygulanmasını gerektirir. Dışarıdan uygulanabilecek kuvvetler Elektriksel alandan (Elektroosmotik) kaynaklanabileceği gibi manyetik alan, piezoelektrik, basınç alanı ve akustik gibi etkilerden de oluşabilir. Bu şekilde çalışan bir mikrokarıştırmacının temel çalışma prensibi Şekil 1’de gösterilmiştir [6].



Şekil 1

Temel Çalışma Prensibini Gösteren Bir Görsel

Mikro ölçekte karıştırmanın avantajları olsa da, akışkanların bu boyuttaki davranışlarından ötürü bazı yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu ölçekte viskoz kuvvetlerin, ataletsel kuvvetlere oranla, daha baskın olması akışın laminer olmasına ve karışmanın sadece yayılım etkileri vasıtasıyla

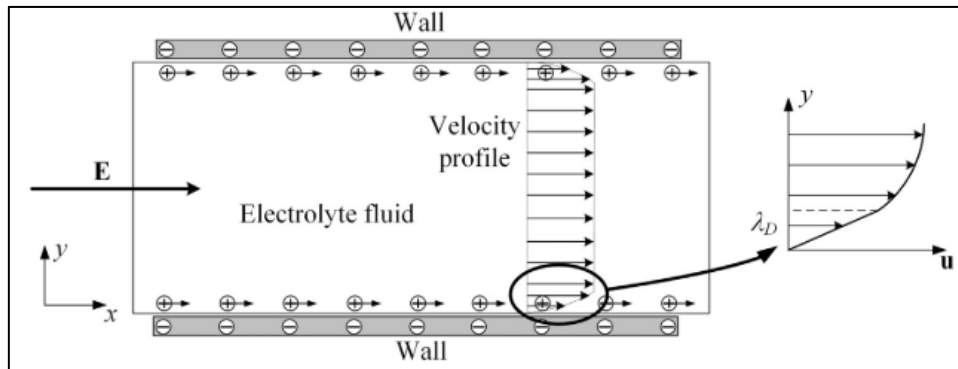
gerçekleşmesine yol açar [3]. Bu sebepten karıştırıcılar aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Pasif karıştırıcılarda sıvılar arasında oluşan ara yüzeydeki kütle transferi laminer sıvı tabakalarını zamanla bozar [4]. Bu etki, kütleli yayılım katsayısına bağlı olmakla beraber, genellikle yavaş gerçekleşir. Bazı sıvılar aralarındaki yüksek yoğunluk farkı ve yüzey gerilmelerinden ötürü kendiliğinden karışamaz, bu noktada aktif karıştırıcılara ihtiyaç duyulur. Aktif karıştırıcılar, akışkanlara dışarıdan bir etki uygulayarak viskoz kuvvetlerin akış üzerindeki etkilerini bertaraf eder. Bu etkiler elektrik alan kaynaklı olabileceği gibi manyetik alan, piezoelektrik, basınç veya akustik akustik kaynaklı olabilir [5].

Genellikle elektrokimyada kullanılan elektroosmotik etkinin mikro ve nano cihazlardaki kullanımının yaygınlaşması günümüzde bu alandaki çalışmaları önemli kılmaktadır. Bu gelişmeler neticesinde geçtiğimiz on yılda fonksiyonel biyomedikal cihaz üretimindeki kullanımı giderek artmıştır [7]. Alternatif akımlı elektrosmosis mikropompalarda ve karıştırıcılarda, mikroparçacıkların ayrıştırılmasında, damlacık oluşturma uygulamalarında; düşük çalışma voltajı, az miktarda elektrot bozunması ve akışkan kontrolünün kolay olması özelliklerinden dolayı diğer metotlara nazaran tercih edilebilirler [8]. ICEO uygulamalarında akışa etkiyen kuvvetler, mikrokanal çeperlerinde elektrik alanların simetrik konumlandırılması ile oluşturulur. Çeper yüzeyinde oluşan akım yoğunluğu, yüzey ile zıt yüklü iyonları çepere doğru hareketlendirir ve bunun neticesinde sıvı içerisinde elektriksel çift tabaka olarak adlandırılan yapı ortaya çıkar [9]. Bu kanal duvarlarına dik ve akış yönünde ek bir elektriksel etki uygulanırsa, akışkan coulomb kuvvetlerinin etkisiyle bu yönde akmaya başlar. Çift tabaka dışında kalan ve elektriksel alandan daha az etkilenen kanal ortasındaki akış ise üniform bir hız profili oluşturur. Akışkan içerisinde ICEO etkiler vasıtasıyla oluşturulan bu hız profili, akışkanın kendi viskozitesinden kaynaklanan hidrodinamik hız profilinden farklılıklar gösterir. Laminer ya da türbülanslı bir akışta duvar dibine yaklaştıkça kaymazlık şartından ötürü yavaşlayan akış, momentumun korunumundan dolayı kanal ortasındaki akışın parabolik bir hız profili kazanmasına sebep olur. Benzer şekilde, ICEO etkisindeki akışta da çift tabaka içerisinde kalan bölgelerde hız profili yavaşlarken, dışında kalan bölgelerdeki akış sabit bir hıza sabit olur. ICEO etkisindeki kanal içerisindeki sabit hız değeri Helmholtz–Smoluchowski denklemi ile yaklaşık olarak elde edilebilir [9].

$$V_{eo} = \mu_{eo}E = -\frac{\epsilon_0\epsilon_r\zeta}{\eta}E \quad (1)$$

μ_{eo} ($m^2/V.s$) elektroosmotik mobilite, ϵ_0 (F/m) vakum dielektrik sabiti, ϵ_r (-) akışkana ait dielektrik katsayısı, η ($kg/m.s$) akışkan viskozitesi, ζ (V) Zeta potansiyeli, E (V/m) elektrotlara uygulanan elektriksel potansiyel fark olarak isimlendirilir Denklem (1). Elektroosmotik hız profiline ait görsel

Şekil 2’de görülebilir [10].



Şekil 2
ICEO hız profili

Kanal geometrisi pasif karıştırıcılarda olduğu gibi aktif karıştırıcılarda da önemli bir etkidir. Geometrinin boyutlarına bağlı olarak ataletsel kuvvetler karışmaya yardımcı olabilir. Bu durumda

ataletsel kuvvetlerin, viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan Reynolds sayısı karışma performansının bir ölçüsü olarak değerlendirilir. Denklem 2’de ifade edildiği üzere Reynolds sayısı, yoğunluk, akışkan hızı, hidrolik çapı çarpımının dinamik viskoziteye oranıyla hesaplanabilir.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (2)$$

ρ (kg/m³) yoğunluk, U (m/s) akışkan hızı, D_h (m) hidrolik çap, μ (Pa.s) dinamik viskozite olarak isimlendirilir.

Peclet sayısı karışmanın başka bir ölçütüdür ve konveksiyonun kütsel yayınıma oranı olarak ifade edilir [11]. Peclet sayısı, akışkanın difüzyon hızını (moleküller arası karışım) ve akışkanın taşıdığı maddeyi (konveksiyon hızıyla) ne kadar hızlı ilettiğini gösterir. Mikrokariştiricilerde ise kütle transferi genellikle difüzyon etkisiyle gerçekleşir. Peclet sayısının düşük olduğu durumlarda difüzyon daha baskın olur. Bu durum, karışımın homojenliğini ve reaksiyonun etkinliğini etkileyebilir. Öte yandan, yüksek Peclet sayıları, konveksiyonun difüzyona göre baskın olduğu durumları ifade eder. Bu durumda, karışım hızlı bir şekilde gerçekleşir ve reaksiyon süresi kısalmaktadır. Ancak, yüksek Peclet sayıları bazen karışımın homojenliğini azaltabilir ve sistemdeki türler arası geçişkenliği etkileyebilir. Sonuç olarak, mikrokariştiricilerde Peclet sayısının belirlenmesi, karışımın hızı, homojenliği ve reaksiyon etkinliği gibi faktörlerin kontrol edilmesi açısından önemlidir. Bu sayede, sistemde istenilen reaksiyon koşulları ve ürün özellikleri sağlanabilir. Çalışmada giriş sınır koşuluna göre hesaplanan Peclet sayısı 8000 civarındadır. Elektroosmotik etki kullanılmadığında yüksek Peclet sayısı (Denklem 3) dolayısıyla plug flow akış rejimine benzer olarak karışmaksızın devam edeceği öngörülmektedir.

$$Pe = \frac{LU}{a} \quad (3)$$

L (m) karakteristik uzunluk, U (m/s) akışkan hızı, a (m²/s) difüzyon katsayısı olarak isimlendirilir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Akışkanların davranışlarının matematiksel olarak ifade edip, altında yatan fiziği anlayabilmek, tasarım sürecinde yapılabilecek hataların önüne geçmede büyük önem arz eder. Navier Stokes denklemi akışkanların davranışlarını açıklayan genelleştirilmiş matematiksel denklemdir [12]. Kütle korunumu diğer adıyla süreklilik denklemi ve momentumun denklemlerini içerir. Sıkıştırılmaz Newtonian akışkanlar için matematiksel ifade aşağıdaki şekilde Denklem 4 ve 5’te ifade edilmiştir.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} + \rho(V \cdot \nabla) \cdot V = -\nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (5)$$

Denklem 5’ten basınç ve hız değerleri elde edilebilirken Denklem 6 haline dönüştürülerek kütsel transport çözümünü de içerecek hale getirilir [13].

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \nabla^2 c - u \cdot \nabla c \quad (6)$$

İki solüsyonun karışma performansının karşılaştırılmalı olarak incelenebilmesi için bir kriter ihtiyacı duyulmaktadır. Bu ihtiyaç neticesinde literatürde Karışma İndeksi kavramı ortaya atılmıştır [14]. Denklem 7’de bu indeksin hesaplanmasında kullanılan ifadeyi göstermektedir.

$$\sigma = \left(1 - \frac{\int_L |c - c_m| dy}{\int_L |c_0 - c_m| dy} \right) \times 100 \quad (7)$$

Çıkıştaki konsantrasyon ortalama konsantrasyon c , homojen karışımın konsantrasyonu c_m ,

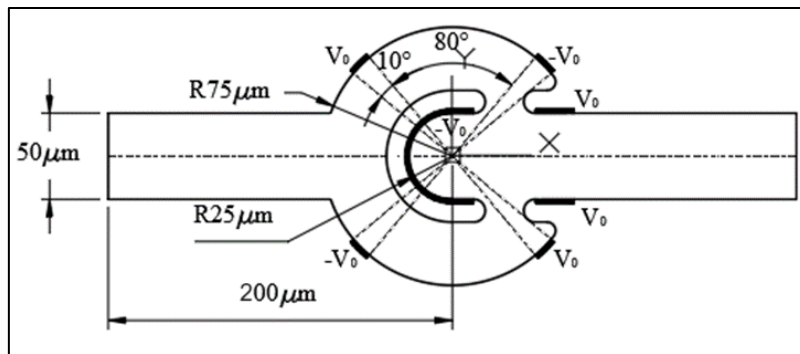
girişteki karışmayan sıvıların konsantrasyon farkı c_0 olarak ifade edilir. Literatürde karşılaştırma amacıyla kullanılan diğer bir parametre ise Karışma maliyeti olarak adlandırılır. Karışma indeksinin, kanal boyunca oluşan basınç farkına oranı olarak Denklem 8’de ifade edilmiştir [15].

$$\text{Karışma maliyeti} = \frac{\sigma}{\Delta P} \quad (8)$$

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulaması (Computational Fluid Dynamics Study)

Ahmed ve ark. [16] çalışmalarında 2400 μm uzunluğa, 300 μm genişliğe ve 36 μm yüksekliğe sahip bir T tipi karıştırıcıya heterojen elektrot yamaları uygulamış, yamaların geometrik parametrelerinin karışma indeksi üzerinde etkilerinin optimum durumda kanal ortasında %95, kanal çıkışında ise %99 olarak bulmuştur. Hu ve ark. [17] çalışmalarında 80 μm yüksekliğinde, 200 μm genişliğinde değişik uzunluklardaki, Y tipi bir karıştırıcılara asimetrik Herringbone elektrotları uygulamış, verilen geometrideki giriş hızı, voltaj, frekans değişimlerine göre karışma performanslarını incelemiş ve %81 ila %96 arasında değerler elde etmiştir. Zhou ve ark. [18] çalışmalarında yüzük tipi bir karıştırıcının geometrik şeklini değiştirerek kayda değer bir gelişime ulaşmıştır. Jalili ve ark. [19] çalışmalarında 80 μm uzunluğunda, 10 μm genişliğinde yüzük tipi bir karıştırıcı geometrisini keskin köşeli yapılar da dahil olmak üzere üç farklı şekilde incelemiş bunun sonucunda keskin köşeli olanların yuvarlak hatlar kadar başarılı olamadığı sonucunu ortaya koymuştur.

Literatürde daha önceki yapılan çalışmalar dikkate alınarak keskin hatlar içermeyen, kesit daralmasını ve elektrotların birbirlerine olan konumlarını kullanarak karışmayı arttıracak bir geometri tasarımı planlanmıştır. Yüzük tipi bir ICEO karıştırıcı tasarlanmış ve tasarlanan geometri akış analizi yapılmak üzere bir sonlu elemanlar programı olan Comsol yazılımına aktarılmıştır. Bu yazılımda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak laminar akış, elektrik alan ve kütle taşıma çözümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’te yerleri belirtilen elektrotlara sırasıyla 1, 2,5 ve 5V’luk AC gerilim uygulanmış ve bu gerilme değerlerinin değişim sıklıklarına göre dinamik karışma davranışları 1,25sn’lik simülasyon boyunca gözlemlenmiştir. Akışkanlar kanala 400 $\mu\text{m}/\text{s}$ hızla girerken hesaplanan Reynolds sayısı 0,32 olarak elde edilmiştir. Çözüm, kanal yüksekliği boyunca parametrelerin değişimi göz ardı edilerek 2D olarak modellenmiştir.



Şekil 3

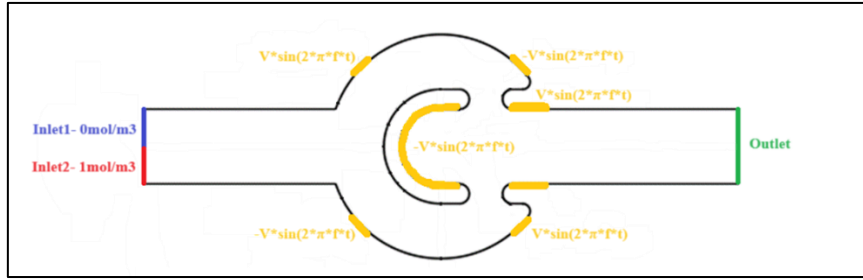
Tasarımı Yapılan ICEO Mikrokarıştırıcı

Materyal Özellikleri (Material Properties)

Karıştırma etkinliğinin değerlendirilmesinde literatürdeki nümerik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan sulu çözeltilerden faydalanılmıştır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında da karıştırılan sıvılardan biri saf su iken diğeri 1 mol/m³ oranında çözünmüş madde (boyar madde) içeren su karışımıdır.

Tablo 1*Simülasyonda Kullanılan Akışkan İçin Materyal Özellikleri*

Akışkan türü	Su
Yoğunluk	1000[kg/s]
Dinamik Viskozite	0,0010005 [Pa.s]
Elektriksel İletkenlik	0,11845[S/m]
Dielektrik Sabiti	80,2
Yayınım katsayısı	1E-11[m ² /s]

Uygulanan Sınır Koşulları (Applied Boundary Conditions)**Şekil 4***Analizde Uygulanan Sınır Koşulları*

Şekil 4’te belirtilen elektrotlara herhangi bir faz farkı olmadan 4 ve 8 Hz sıklığında sinüs fonksiyonu uygulanmış geriye kalan tüm duvarlar elektriksel olarak izole kabul edilmiştir. Ayrıca tüm duvarlara kaymazlık şartı yerine elektroosmotik hız şartı uygulanmıştır.

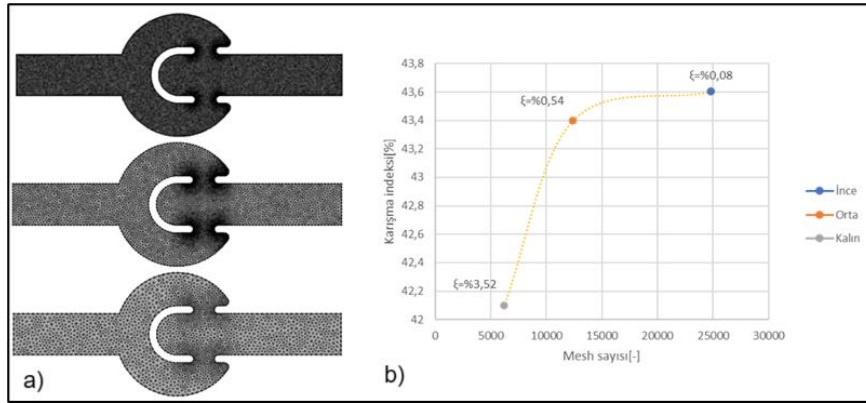
Tablo 2*Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi Yapılan Simülasyon Modelinde Kullanılan Sınır Koşulları*

Sınır koşulları	Sınır koşulu türü	Değeri
Inlet1	Normal Hız sınır koşulu, Inflow	400[μm/s], 0[mol/m ³]
Inlet2	Normal Hız sınır koşulu, Inflow	400[μm/s], 1[mol/m ³]
Outlet	Sabit Basınç sınır koşulu, Outflow	0[Pa] gösterge basıncı
Wall1	Elektroosmotik hız sınır koşulu	Zeta potansiyeli (-0,1)[V], Dielektrik sabiti 80,2 +- 1[V]*sin(2π*f[Hz]*t[s]),
Wall2	Elektrik potansiyel sınır koşulu	+-2.5[V]*sin(2π*f[Hz]*t[s]), +- 5[V]*sin(2π*f[Hz]*t[s])

Sayısal Çözüm (Numerical Solution)

Çözümler bir sonlu hacimler çözücüsü olan Comsol programında gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı gerçekleştirilen analizlerde 0,005sn’lik sabit zaman adımı kullanılmıştır. Her bir zaman adımında çözümlenen denklemlere ait iteratif farklar 1E-4 yakınsama seviyelerine ulaşmıştır. Analizler 300 iterasyon yani 1,5sn süresince koşturulmuştur. Analizlerde, akış, kütle transferi ve elektrik alan çözümlenmeleri için ikinci dereceden ayrıklaştırma şemaları kullanılmıştır.

Mesh sayısı bağımsız analizinde Richardson ekstrapolasyonu metodu kullanılmıştır [20]. 8 Hz, 1 V parametrelerinin uygulandığı konfigürasyon için kalın-6200 eleman, orta-12400 eleman ve ince-24800 eleman olmak üzere üç farklı mesh sayısı için analizler gerçekleştirilmiştir. Mesh seviyeleri eleman sayıları oranı olan inceltme oranı (Refinement ratio) 2 olarak kabul edilmiştir. Sırasıyla, %42,1, %43,4 ve %43,6 karışma indeksi değerleri elde edilmiştir. Hesaplamalara göre yakınsama değeri (Order of convergence) 2,70, yüzde ayrıklaştırma hata oranları ise sırasıyla %3,52, %0,54, %0,08 olarak bulunmuştur. $GCI_{ince-orta}$ ve $GCI_{orta-kalın}$ (Grid convergence index) değerleri sırasıyla %0,09 ve %0,59, asimptotik yakınsama aralığı (Asimptotic range of convergence) ise 1,03 olarak bulunmuştur. Yüzde ayrıklaştırma hata oranlarının %5'ten az olması ve asimptotik yakınsama aralığının 1'e yakın olmasından monoton yakınsamaya ulaşıldığı görülmektedir. Alınan sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiş olup alınan sonuçların mesh sayısından bağımsız olduğu söylenebilir.



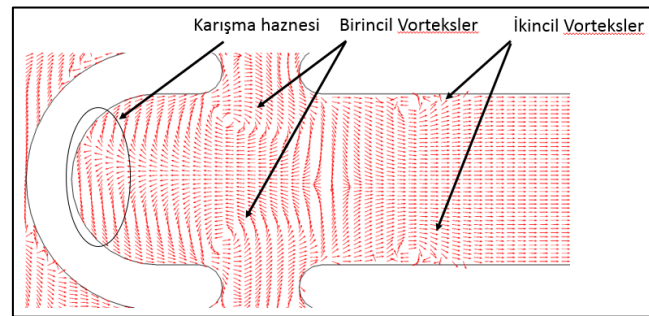
Şekil 5

(a) Kalın, orta, İnce Mesh Görünümleri (b) Karıştırma İndeksine Göre Ayrıklaştırma Hataları

BULGULAR (RESULTS)

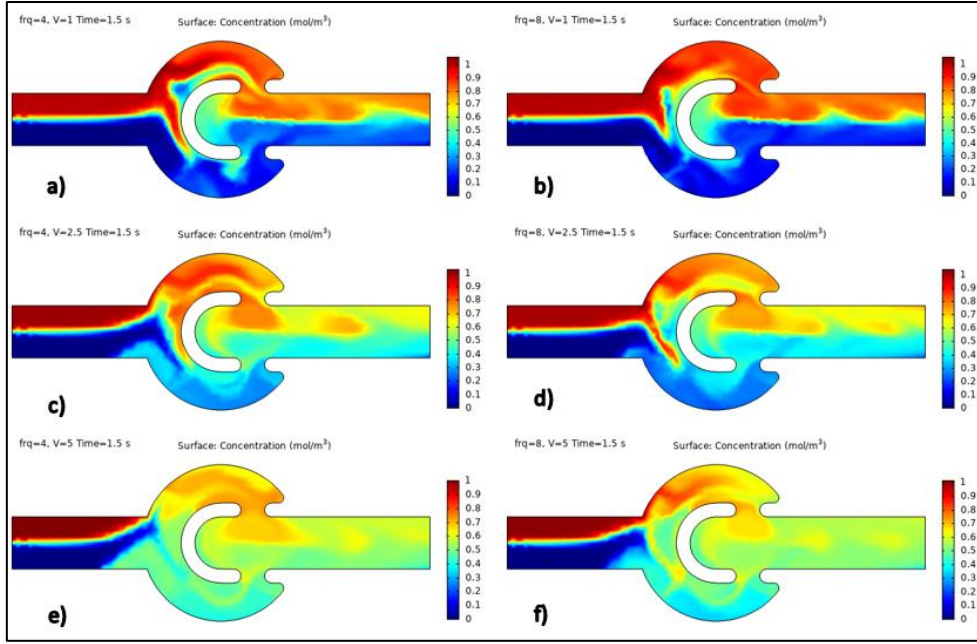
Kesit daralmasının sonrasında karışma haznesine dolan akış iki farklı elektrik alandan etkilenerek kesit alanının daraldığı yere yakın yerlerde periyodik vorteksler oluşturur. Karışmayı sağlayan bu vorteksler

Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6

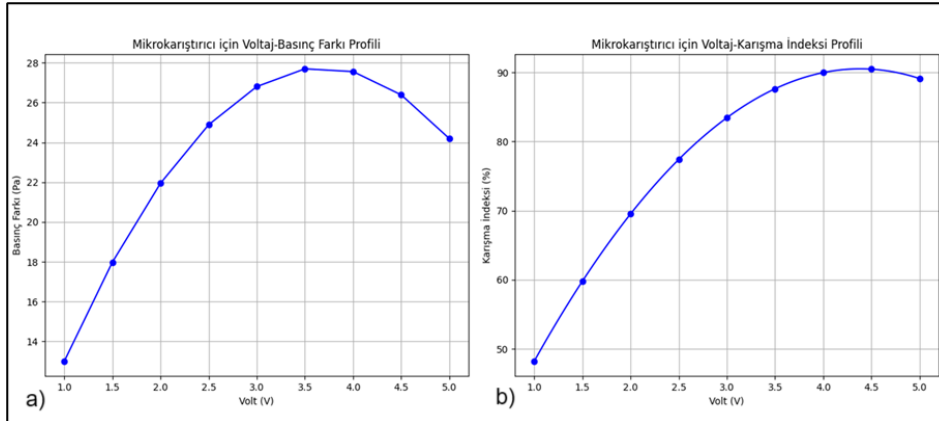
Karışmaya Etki Eden Birincil ve İkincil Vorteksler



Şekil 7

1.5 sn'lik Karıştırma Sonucunda Konsantrasyon Gradyenleri (a) $f=4$ Hz $V=1$ V, (b) $f=8$ Hz $V=1$ V, (c) $f=4$ Hz $V=2,5$ V, (d) $f=8$ Hz $V=2,5$ V, (e) $f=4$ Hz $V=5$ V, (f) $f=8$ Hz $V=5$ V

Şekil 7'de görüldüğü üzere 1.5sn sonundaki karışma indeksleri sırasıyla a) %48,2, b) %43,7, c) %77,4, d) %74,1, e) %89,1, f) %90,4 olarak elde edilmiştir. Yine aynı şekilde karışma maliyeti değerleri sırasıyla a) 83,3, b) 75,6, c) 133,84, d) 128, e) 153,9, f) 156,4 olarak hesaplanmıştır. Literatürde gerçekleştirilen bir çalışmada $Re=30$ durumunda 3 boyutlu bir ayrıştır ve birleştir tipi (split-and-recombine) bir mikrokarıstırıcı kullanılmış ve karıştırma indeksi %88,4 olarak elde edilmiştir. [21] Diğer bir çalışmada ise clothoid geometriye sahip pasif bir mikrokarıstırıcıda $Re>70$ olduğu durumlarda karışma indeksinin %80 civarında olduğu bulunmuştur. [22] Literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında bulguların uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

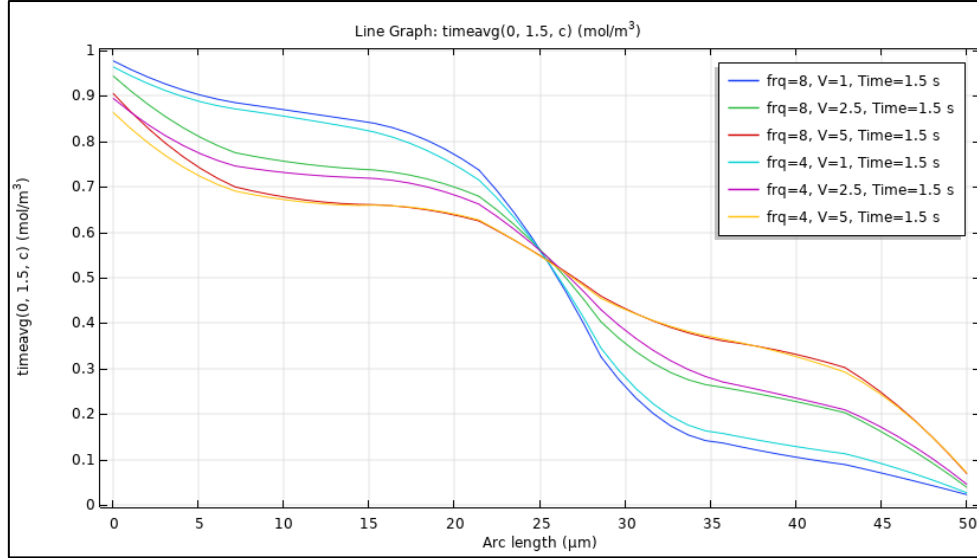


Şekil 8

(a) Voltaj-Basınç, (b) Voltaj-Karışma İndeksi Grafikleri

1,0 V ile 3,5 V arasında voltaj arttıkça basınç farkı da artmaktadır ve 3,5 V civarında maksimum değeri olan yaklaşık 27 Pa'ya ulaşmaktadır. 3,5 V'dan sonra ise voltaj arttıkça basınç farkı azalmaya başlamaktadır. Bu durum, mikrokarıstırıcının 3,5 V civarında en yüksek basınç farkını sağladığını ve bu değerden sonra verimliliğin düştüğünü göstermektedir.

Voltaj-Karışma indeksi grafiği incelendiğinde ise voltaj arttıkça karışma indeksinin de arttığı görülmektedir. 1,0 V'dan 4,5 V'a kadar sürekli bir artış gözlemlenmektedir. 4,5 V'da maksimum karışma indeksi olan yaklaşık %90'a ulaşılmakta ve bu noktadan sonra karışma indeksi sabit kalmakta ve ardından hafif bir düşüş göstermektedir. 4.5 V civarında ise en iyi karışma performansını sergilediğini görülmektedir.



Şekil 9

1,5 sn'lik Karıştırma Boyunca Çıkıştaki Zaman Ortalamalı Konsantrasyon Eğrileri

2 boyutlu yüzey geometrisinin çıkış çizgisinden alınan ortalamalı değerler Şekil 9'da gösterilmiştir. Karışmanın daima kanal ortasında en iyi gerçekleştiği cidarlara yakın olan noktalarda ise uygulanan voltaj ve frekansa göre farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Frekans değişiminin 4'ten 8'e çıkarılmasının ihmal edilebilir etkisinin olduğu bulunmuştur.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

- Frekansın artırılmasının karışma performansına belirli bir bölgede pozitif etki ettiği bu alanın dışında negatif etkisinin olduğu, fakat bu durumun çıkış basıncını arttırdığı gözlemlenmiştir. ICEO mikrokarıştırıcılar yapılarından dolayı, mikropompa olarak da kullanılabilirdiğinden frekansın artırılmasının mikropompa olarak kullanımında pozitif bir etkisinin olduğu görülmüştür.
- Mikrokarıştırıcının, basınç farkı açısından en verimli şekilde 3,5 V'da çalıştığı bulunmuştur. Karışma indeksi açısından ise en verimli şekilde 4,5 V'da çalışmaktadır. Optimum voltaj seçimi yapılırken her iki parametre de göz önünde bulundurulmalı, uygulamanın hangi parametreye daha fazla önem verdiğine göre en uygun voltaj seçilmelidir. Eğer hem yüksek basınç farkı hem de yüksek karışma indeksi isteniyorsa, voltajın 3,5 V ile 4,5 V arasında bir değerde tutulması ideal olabilir.
- Voltaj miktarının direkt olarak karışmayı arttırdığı, karışma indeksi ve maliyeti değerleri üzerinde pozitif etki ettiği görülmüştür. Geometrik boyutlar performans üzerinde büyük önem arz etmektedir. Geometrik boyutların değiştirilmesi ve giriş hızının artırılması Reynolds sayısını önemli ölçüde etkilemektedir. Lakin Reynolds sayısının artırılması, kayda değer ataletsel kuvvetlere sebep olmadığı sürece karıştırıcının etkinliğini düşürmektedir. Reynolds sayısının 0,32 olduğu durumda gerçekleştirilen çalışmamızda, Reynolds sayısı artırıldığında artan kütleli

debi nedeniyle aynı voltaj değerinde karışmanın daha geç gerçekleştiği görülmüştür. Elektroosmotik etkinin boyutlar arttıkça etkisinin azalmasından ötürü tasarım aşamasında yanlış boyutlandırılan bir mikrokarıştırıcının beklenenden daha yüksek voltaj değerlerine gereksinim duyacak olması kaçınılmazdır. Ayrıca sıvıların içerisinde çözünmüş olan iyonların sayısı elektriksel iletkenliğe, bununla birlikte performansa da etkimektedir.

- Çalışmamız neticesinde yapılan tasarımın 8 Hz 4,5 V uygulandığı durumda en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Sonuç olarak karıştırıcı tasarımı yapılırken boyut, hız, uygulanan frekans ve gerilim değerlerinin karışmaya etkisinin istenilen düzeyde olduğundan emin olmak üzere nümerik çözümlerin yapılmasının faydalı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 3**Semboller**

μ_{eo} (m ² /V.s)	Elektroosmotik mobilite
ϵ_0 (F/m)	Vakum dielektrik sabiti
ϵ_r (-)	Akışkana ait dielektrik katsayısı
η (kg/m.s)	Akışkan vizkozitesi
ζ (V)	Zeta potansiyeli
E (V/m)	Elektrotlara uygulanan elektriksel potansiyel fark
ρ (kg/m ³)	Yoğunluk
U (m/s)	Akışkan hızı
D_h (m)	Hidrolik çap
σ (-)	Karışma indeksi
C (mol/m ³)	Konsantrasyon

Etik Kurul Onayı (Ethical Commttee Approval)

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) M.B.A. (%50) – S.Y. (%50)

Veri Toplama (CRediT 2) M.B.A. (%60) – S.Y. (%40)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) S.Y. (%50) – A.K. (%50)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) M.B.A. (%60) – S.Y. (%40)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) M.B.A. (%40) – S.Y. (%30) – A.K. (%30)

Finansman

Çalışma herhangi bir kurum/kuruluş tarafından finanse edilmemiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The author has no conflicts of interest to disclose for this study.)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Desteklemiyor.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] S. Jeong, J. Park, J.M. Kim, S. Park, Microfluidic mixing using periodically induced secondary potential in electroosmotic flow, *Journal of Electrostatics*. 69 (2011), 429–434. doi:10.1016/j.elstat.2011.06.001.
- [2] X. Jia, B. Che, G. Jing, C. Zhang, Air-bubble induced mixing: A fluidic mixer chip, *Micromachines*. 11 (2020), 1–9. doi:10.3390/mi11020195.
- [3] P. Modarres, M. Tabrizian, Phase-controlled field-effect micromixing using AC electroosmosis, *Microsystems and Nanoengineering*. 6 (2020). doi:10.1038/s41378-020-0166-y.
- [4] K. Du, W. Liu, Y. Ren, T. Jiang, J. Song, Q. Wu, Y. Tao, A high-throughput electrokinetic micromixer via AC field-effect nonlinear electroosmosis control in 3D electrode configurations, *Micromachines*. 9 (2018). doi:10.3390/mi9090432.
- [5] G. Cai, L. Xue, H. Zhang, J. Lin, A review on micromixers, *Micromachines*. 8 (2017). doi:10.3390/mi8090274.
- [6] S. Dong, P.F. Geng, D. Dong, C.X. Li, Mixing enhancement of electroosmotic flow in microchannels under DC and AC electric field, *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 13 (2020), 79–88. doi:10.29252/jafm.13.01.30063.
- [7] Y. Ren, W. Liu, Y. Tao, M. Hui, Q. Wu, On AC-field-induced nonlinear electroosmosis next to the sharp corner-field-singularity of leaky dielectric blocks and its application in on-chip micro-mixing, *Micromachines*. 9 (2018). doi:10.3390/mi9030102.
- [8] X. Gao, Y. Li, Simultaneous microfluidic pumping and mixing using an array of asymmetric 3D ring electrode pairs in a cylindrical microchannel by the AC electroosmosis effect, *European Journal of Mechanics, B/Fluids*. 75 (2019), 361–371. doi:10.1016/j.euromechflu.2018.10.008.
- [9] H.Y. Wu, C.H. Liu, A novel electrokinetic micromixer, *Sensors and Actuators, A: Physical*. 118 (2005), 107–115. doi:10.1016/j.sna.2004.06.032.
- [10] Y. Deng, T. Zhou, Z. Liu, Y. Wu, S. Qian, J.G. Korvink, Topology optimization of electrode patterns for electroosmotic micromixer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 126 (2018), 1299–1315. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.065.
- [11] M.B. Okuducu, M.M. Aral, Novel 3-D T-shaped passive micromixer design with Helicoidal Flows, *Processes*. 7 (2019). doi:10.3390/pr7090637.
- [12] M. Rafeie, M. Welleweerd, A. Hassanzadeh-Barforoushi, M. Asadnia, W. Olthuis, M.E. Warkiani, An easily fabricated three-dimensional threaded lemniscate-shaped micromixer for a wide range of flow rates, *Biomicrofluidics*. 11 (2017). doi:10.1063/1.4974904.
- [13] J. Clark, M. Kaufman, P.S. Fodor, Mixing enhancement in serpentine micromixers with a non-rectangular cross-section, *Micromachines*. 9 (2018). doi:10.3390/mi9030107.
- [14] K.-R. Huang, Z.-H. Hong, J.-S. Chang, Microfluidic mixing on application of traveling wave electroosmosis, *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 48 (2014), 153–164. doi:10.1016/j.euromechflu.2014.05.010.
- [15] W. Raza, S. Hossain, K.Y. Kim, A review of passive micromixers with a comparative analysis, *Micromachines*. 11 (2020). doi:10.3390/mi11050455.
- [16] F. Ahmed, K.Y. Kim, Parametric study of an electroosmotic micromixer with heterogeneous charged surface patches, *Micromachines*. 8 (2017). doi:10.3390/mi8070199.
- [17] Q. Hu, J. Guo, Z. Cao, H. Jiang, Asymmetrical induced charge electroosmotic flow on a herringbone floating electrode and its application in a micromixer, *Micromachines*. 9 (2018). doi:10.3390/mi9080391.
- [18] T. Zhou, H. Wang, L. Shi, Z. Liu, S. Joo, An Enhanced Electroosmotic Micromixer with an Efficient Asymmetric Lateral Structure, *Micromachines*. 7 (2016), 218. doi:10.3390/mi7120218.

- [19] H. Jalili, M. Raad, D.A. Fallah, Numerical study on the mixing quality of an electroosmotic micromixer under periodic potential, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 234 (2020), 2113–2125. doi:10.1177/0954406220904089.
- [20] Roache, P.J., K. Ghia, and F. White, Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 108 (1986) 2.
- [21] Shakhawat Hossain, Kwang-Yong Kim, Mixing analysis in a three-dimensional serpentine split-and-recombine micromixer, *Chemical Engineering Research & Design*, 100 (2015), 95-103.
- [22] F. Pennella, M. Rossi, S. Ripandelli, M. Rasponi, F. Mastrangelo, M. Deriu, L. Ridolfi, C. Kähler, U. Morbiducci, Numerical and experimental characterization of a novel modular passive micromixer, *Biomedical Microdevices*, 14 (2012), 849-862.