ATIMLI AKIŞTA MANYETİK ALANIN ETKİSİ

Abdullah Alperen OKUMUŞ [1], Cemalettin AYGÜN [2], Mehmet BAŞOĞLU [3]

[1] Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gümüşhane, Türkiye.
[2] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi Makinaları İşletme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye.
[3] Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Gümüşhane, Türkiye.

Özet

Bu çalışma, disiplinler arası önemli konulardan olan atımlı akış ve manyetohidrodinamik (MHD) üzerine odaklanmıştır. Atımlı akış, periyodik bir salınımlı akış bileşeninin sabit bir akışın üzerine bindirildiği, belirli bir zamana bağımlı akış türüdür. Manyetohidrodinamik ise, elektrik iletkenliğine sahip akışkanların manyetik alan altındaki etkileşimlerini inceleyen bir konudur. Bu alanda yapılan araştırmalar, manyetik alanın akışkan davranışları üzerindeki etkilerini anlamamıza ve manyetohidrodinamik olayları analiz etmemize yardımcı olmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, üç boyutlu dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip sıvı lityum akışkanın, atımlı akışta manyetik alan etkisindeki akış özellikleri (hız ve sıcaklık) sayısal olarak incelenmiştir. Analizler, sonlu hacimler tekniğine dayalı, ANSYS ticari paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Laminer akış şartlarında, üç farklı boyutsuz frekans (F=0.01 – 1 – 100) ve dört farklı manyetik alan değerinde (B=0 T – 0.05 T – 0.1 T – 0.15 T) çalışılarak akışkanın hız ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda; manyetik alan etkisi altındaki atımlı akışın, akışkanın hareketi ve ısı transferi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Manyetik alan akış hızını düşürmüştür, aynı zamanda ısı transferini arttırmıştır. Manyetik alanın varlığı yüksek frekansta halkasal etkinin oluşmasını da engellemiştir. Farklı manyetik alan değerlerindeki analizlerde, ilk manyetik alan değerinde (B=0.05 T) akışkan davranışlarında gözle görülür bir etkinin olduğu, ancak yüksek manyetik alan değerlerinin akış davranışlarına çok fazla etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışma, dairesel kesitli kanallarda manyetik alan etkisi altındaki atımlı akışta akışkan davranışının analizini gerçekleştirerek önemli bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, bu kapsamda yapılmamış yeni bir çalışma literatüre kazandırılarak MHD ve atımlı akışın akışkanlar dinamiği uygulamalarında ortaya çıkan önemli etkilerini daha iyi anlamamıza ve gelecekteki mühendislik uygulamalarında kullanılmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Atımlı akış, Laminer akış, Isı transferi, Manyetik alan, Manyetohidrodinamik (MHD).

1. Giriş

1.1. Manyetohidrodinamik

Manyetohidrodinamik (MHD), kelime anlamı itibariyle manyetik özelliğe sahip sıvıların hareketi anlamına gelmektedir. MHD bu anlamda, elektriksel iletkenliğe sahip akışkanların manyetik alan etkisi altındaki davranışlarını inceleyen disiplinler arası bir konudur. MHD alanında yapılan öncü çalışmalar şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak 1832 yılında Londra'da bulunan Thames Nehrindeki elektriksel potansiyel farkı ölçmek isteyen Faraday, akımın çok küçük olmasından ve o günkü şartlarda yeterli teknolojik donanıma sahip olunamaması sebebiyle bunu başaramamıştır. Sonrasında 1937 yılında Hartmann, iki plaka arasındaki cıvanın manyetik alan etkisi altında akış davranışlarını incelemiştir. Ardından 1940 yılından Alfven manyetik alan altındaki iletken akışkanın akışkanlar mekaniğinde var olmayan yeni dalgaların yayıldığını tespit etmiştir (Yağcı, 2016).

MHD; denizaltıların, gemilerin ve insansız sualtı araçlarının sevk edilmesinde, sınır tabaka müdahalesi ile direncin ve gürültünün azaltılmasında, elektromanyetik izlerin azaltılmasında, özel maksatlı tulumbalarda, güç üretiminde (MHD jeneratörleri) ve akışın kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. MHD itki ve güç sistemlerinde, iletken akışkanları yalnızca elektrik ve manyetik alan ile itici güç oluşturarak kullanılmaktadır, bu sayede hareketli bir parçası (şaft, pervane vb.) bulunmayan sistemde aşınma ve gürültü gibi olumsuz etkiler bulunmamaktadır. MHD sistemlerinde hareketli parça yoktur, bu da iyi bir tasarımın sessiz, güvenilir ve verimli olabileceği anlamına gelmektedir. Ek olarak, MHD tasarımı, bir motor tarafından doğrudan tahrik edilen bir pervane ile aktarma organlarının birçok aşınma ve sürtünme parçasını da ortadan kaldırmış olur. MHD kullanılan bir deniz taşıtına örnek; 1991 yılında, dünyanın ilk tam boyutlu prototip Yamato 1 Haziran 1992'de Kobe Limanı'nda 15 km/sa'e varan hızlarda on altı yolcudan oluşan bir mürettebatı başarıyla taşımıştır. Sualtı MHD itiş gücü ile ilgili askeri araştırmalar, yüksek hızlı torpidoları, uzaktan çalıştırılan sualtı araçlarını (*ROV: Remotely operated underwater vehicle*), otonom sualtı araçlarını (*AUV: Autonomous underwater vehicle*), denizaltılar gibi daha büyük araçları da içermektedir. Uzay araştırmaları için manyetohidrodinamik kullanan plazma tahrik motorları da aktif olarak çalışılmıştır, çünkü bu tür elektromanyetik itme, aynı zamanda yüksek itme ve yüksek özgül itme sağlar ve itici gaz, kimyasal roketlerden çok daha uzun süre dayanır (URL-1, URL-2, URL-3, 2022).

MHD'nin sağlık alanına örnek çalışması manyetik akışkan hipertermidir. İlk olarak manyetik nanoparçacık içeren bir akışkan tümöre enjekte edilir ardından uygulanan manyetik alan yardımı ile nanoparçacıkların ısı üretmesine dayanan ve tümörün tahribatı ile sonuçlanan kanser tedavi yöntemidir (Rinaldi ve Latorre, 2009). Manyeto-hidrodinamiğin astronomi ve jeofizikteki uygulamaları arasında; yıldızların ve gezegenlerin yapısı, güneş fırtınaları, gezegenler ve yıldızlararası madde, gezegenler arası manyetik alan ve akışkan etkileşimleri, uzay iletişim sistemleri ve iyonosferde radyo dalgaları üretimi de yer almaktadır (Zaloğlu, 2003).

2023 tarihinde Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) tarafından bir program oluşturuldu. PUMP (Denizaltı MHD Pompalarının İlkeleri) adındaki program; MHD tasarımlarını ölçeklendirmek için hidrodinamik, elektrokimya ve manyetikler dahil olmak üzere çoklu fizik modelleme ve simülasyon araçlarını bir araya getirecek ve doğrulayacaktır. Programın amacı, bir elektrot malzeme sistemi belirlemek ve ölçeklendirilebilen bir MHD sürücüsünün prototipini oluşturmaktır. DARPA'nın Savunma Bilimleri Ofisinde yönetici Susan Swithenbank: Bir MHD sürüşte bugüne kadar gösterilen en iyi verimlilik, yaklaşık 4 Tesla değerinde bir manyetik alan kuvveti kullanarak yaklaşık %30'luk bir verimlilikle 6.6 deniz mili elde eden 30

metrelik bir gemi olan Yamato-1'de 1992'de gerçekleştirildiğini, son birkaç yılda, ticari füzyon endüstrisi, bir MHD sürücüde potansiyel olarak %90 verimlilik sağlayabilen 20 Tesla'ya kadar büyük ölçekli manyetik alanlar sergileyen nadir toprak baryum bakır oksit (REBCO) mıknatıslarında ilerleme kaydettiğini açıklamıştır (URL-4, 2023).

1.2. Atımlı Akış

Akış problemlerinin çözümündeki karmaşıklığı azaltmak için genellikle zaman bağımsız çözümler yapılır. Ancak doğadaki çoğu akış uygulamalarının zamana bağımlı olduğu görülmektedir. Örneğin insan vücudunda; kalbin belirli bir düzen içerisinde çalışması ile damarlar içerisine pompalanan kan bir atımlı akış oluşturmaktadır. Mühendisliğin de birçok alanında; içten yanmalı motorlar, hidrolik borularda kavitasyonun engellenmesi, özel ısı değiştiricilerde, elektronik soğutucularda, nükleer reaktörlerde, uzay ve havacılıkta atımlı akış kullanılmaktadır (Aygün, 2013).

Literatürde atımlı akış ile ilgili çalışmalar; Miller ve Fejer 1964 yılında akışı durdurup başlatabilen bir kelebek valf kullanarak gerçekleştirmiştir. Ardından Brown ve arkadaşları (1969) sıvı ortamda, Baird ve arkadaşları ise (1971) su ortamında hava titreşimi kullanarak salınım oluşturmuşlardır.

Atımlı akış (*pulsatile flow*), periyodik bir salınımlı akış bileşeninin sabit bir akışın üzerine bindirildiği, belirli bir zamana bağımlı akış türüdür. Atımlı akışlar; ısı transferini arttırmak, kanal içerisindeki temizliği sağlamak, farklı akışkanların karışımının sağlanması vb. özellikleri ile ortaya çıkmaktadır (Aygün ve Aydın, 2015). Farklı bir örnekte; nükleer enerjinin gemilerde ve okyanus ortamında geliştirilmesi ve uygulanması, araştırmacıları titreşimli gemi hareketinde nükleer sistemlerin hidrodinamik ve ısıl özelliklerini ve güvenliğini araştırmaya motive etmiştir (Aygün ve Aydın, 2014). Akışlar, zamana bağlılık açısından; daimî (*steady*) ve daimî olmayan (*transient*) olmak üzere ikiye ayrılabilir. Daimî akış zamana göre bir değişimin olmamasını, daimî olmayan akış ise zamana göre değiştiği belirtmektedir. Akışın belirli bir düzen içerisinde kendini tekrarlamasına (ör. sinüs eğrisi şeklinde) periyodik akış denilmektedir. Zamana göre periyodik olarak değişmekte olan veya yönü değişen akışlar, atımlı (*pulsatile*) ve salınımlı (*oscillation*) akışlar olarak ikiye ayırabilmektedir (Aygün, 2013).

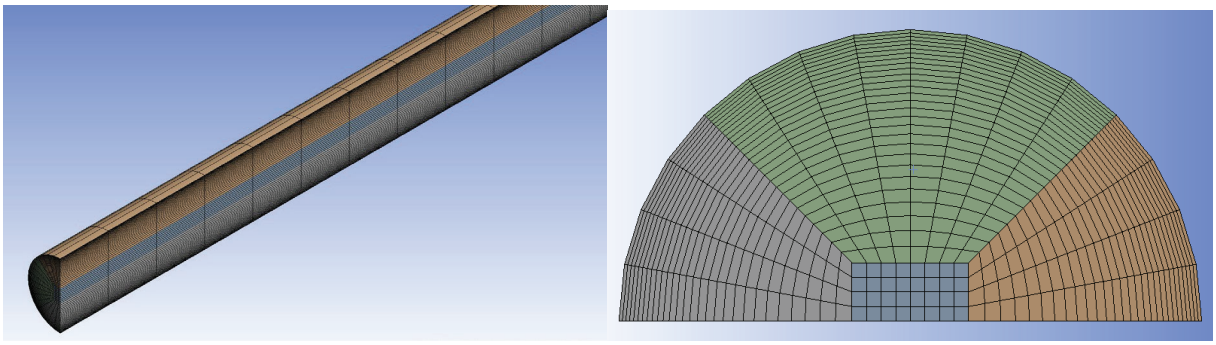
Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip bir akışkanın, ısıl olarak gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişmekte olan atımlı akışta manyetik alanın, akış ve ısı transferi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma, sonlu hacimler tekniğine dayalı, ANSYS Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik alanın, atımlı akış ile birlikte uygulanmasıyla, boru içerisindeki akışkanın hız ve sıcaklık değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında, manyetik alan ve atımlı akışın boru içi laminer akışa etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Dört farklı manyetik alan değerinde (B=0 T – 0.05 T – 0.1 T – 0.15 T), üç farklı boyutsuz frekansta (F=0.01 – 1 – 100) ve Re=1000 değerinde yapılan çalışmada hız ve sıcaklık değişimler incelenmiştir. Sayısal çalışmaya başlamadan önce literatürde daha öncesinde MHD ve atımlı akış ile ilgili iki ayrı çalışmanın doğrulaması yapılarak çözüm yönteminin doğruluğu teyit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Sayısal çalışma, sonlu hacimler tekniğine dayalı, ANSYS Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ANSYS Design Modeler kullanılarak, D=0.03 m ve L=1 m boyutlarında 3B yarım kesitli dairesel kanal geometrisi oluşturulmuştur.

Sayısal analizlerde en önemli kısım ağ yapısının (*mesh*) oluşturulmasıdır. Geometrinin yapısına göre uygun ağ şeklinin belirlenmesi, sayısal çözümdeki hataları azaltabilmekte ve zamandan tasarruf sağlayabilmektedir. Ağ şekli yapılandırılmış (*structured mesh*) ve yapılandırılmamış ağ (*unstructured mesh*) olarak ayrılmaktadır. Yapılandırılmamış ağ yapısı daha kolay oluşturulabilmektedir ancak birtakım hatalara yol açmakta ve daha fazla sayıda düğüm noktası oluşturmaktadır. Boru cidarındaki kaymama şartı nedeniyle cidara yakın bölgelerde istenilen hassasiyette çözüm yapılamamaktadır. Bu sebeple, sınır tabaka ağı ile birlikte, akış değişkenlerinin hesaplanacağı hücreleri tanımlayacak ağın yapılandırılmış olması tercih edilmektedir. Bu çalışmada, Şekil 1'de gösterildiği gibi yapılandırılmış ağ uygulanmıştır.



Şekil 1. Yapılandırılmış ağ görüntüsü

Sayısal çalışmalarda bir diğer önemli husus yapılan çözümlerin ağ bağımsızlığının gösterilmesidir. Her ne kadar ağ yapısı düzgün oluşturulsa da ideal yapı sağlanamamaktadır veya yapılan ağın uygun olup olmadığının denetlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple analiz çözümlerine geçmeden önce ağ bağımsızlık testleri (*mesh independence test*) yapılmaktadır.

Bu çalışmada yapılacak ağ bağımsızlığı testleri için, geometriyi oluşturan kenarlar belirli oranlarda bölünmüştür. Oluşturulan kenar boyutlandırmaları (*edge sizing*) ile parametrik çalışma yapılmıştır ve boyutlandırma sonucu oluşan değerler Tablo 1'de belirtilmiştir. Belirtilen değerlere göre bu çalışma için uygun ağ boyutunun "sık ağ" yapısı olduğu sonucuna ulaşılmıştır ve devamındaki analizler de bu ağ boyutunda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Ağ yapılarının eleman sayılarına göre değişimi.

Eleman Sayısı	Hız (m/s)	Ağ Yapısı
1.20E+03	0.090	Çok Kaba
9.60E+03	0.091	Kaba
7.68E+04	0.092	Orta
6.14E+05	**0.092**	**Sık**
4.92E+06	0.092	Çok Sık

Bu çalışmadaki çözümler; 3B, çift hassasiyet (*double precision*) ve çözümlerin hızlı olabilmesi için 8 paralel çekirdek ve 1 ekran kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak, laminer akış şartlarında ve MHD modülü kullanılarak manyetik alan uygulaması ile çözülmüştür. Akışkan olarak, yüksek elektrik iletkenliği ve analiz sırasında sürekli akmaya uygun viskozitesi nedeniyle sıvı lityum seçilmiştir. Malzeme özellikleri (yoğunluk, ısı iletkenliği ve dinamik viskozite), ANSYS Fluent programı içerisinde denklem (*expression*) oluşturabilme özelliği kullanılarak tanımlanmıştır. Özgül ısı değeri ise, program içerisinde denklem oluşturabilme özelliğinin olmaması nedeniyle, polinom (*polynomial*) olarak tanımlanmıştır. Sıvı lityumun fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı ($300 \leq T \leq 600$ K) ampirik ilişkiler şeklinde Okumuş, 2023 çalışmasında detaylı olarak verilmiştir.

Çalışmada kullanılan sınır koşulları; giriş (*inlet*) hızı (*velocity*), periyodik olduğu için, kullanıcı tanımlı fonksiyon (*UDF: User Defined Function*) olarak programa girilmiş ve ortalama hız Re=1000 olarak seçilmiştir. Giriş ve yüzey (*wall*) sıcaklıkları sabit kabul edilmiş ve sırasıyla T_i = 300 K ve T_w = 573.15 K olarak verilmiştir.

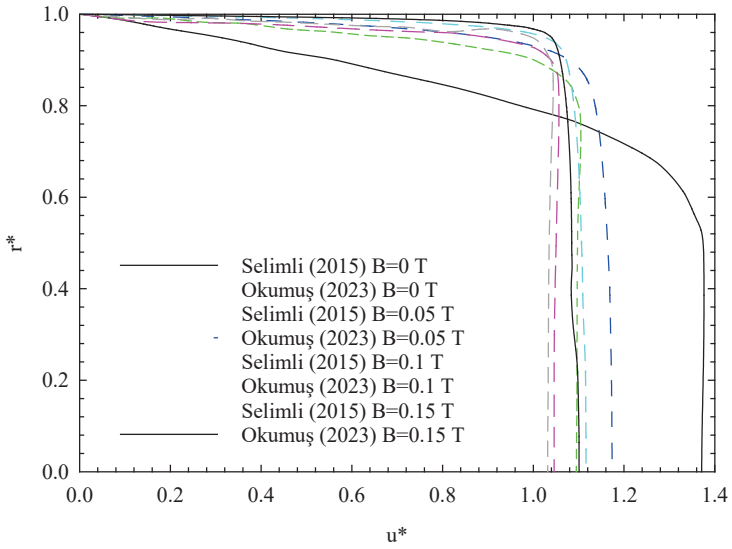
Atımlı akış için; ortalama Re=1000 için ortalama hız u = 0.04923 m/s olarak hesaplanmıştır. Akış için boyutsuz genlik A=0.5 ve boyutsuz frekanslar (F=0.01 – 1 – 100) kabul edilmiştir.

Analizlerde sabit ısı akısı kabulü daha gerçekçi bir yaklaşım olmasına rağmen, ısı depolama gibi faz değiştiren sistemlerde (faz değişiminde sıcaklığın sabit kalması sebebiyle) ve MHD gibi özel akış durumlarına daha uygun olduğu için çalışmada sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulu kabul edilmiştir. Analizlerde; süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için yakınsama kriterleri 10^{-6} olarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar; hız ve sıcaklık boyutsuz olarak grafik halinde sunulmuştur.

2.1. MHD için Sayısal Modelin Doğrulama Çalışması

Bu çalışmada MHD uygulanarak yapılan çözüm yönteminin doğruluğu, literatürde daha önce -Selimli (2015) tarafından- yapılmış farklı bir çalışma ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Her iki çalışmada da akışkan olarak elektrik iletkenliğine sahip sıvı lityum kullanılmıştır ve benzer sınır koşulları ile Re=2200 değerinde laminer akış şartlarında çözümler yapılmış, karşılaştırma Şekil 2'de sunulmuştur.

Boru girişinden 0.12 m mesafeden alınan hız ve sıcaklık profillerinin tam uyum içerisinde olmamasının sebepleri; boru geometrisinden, ağ yapısından ve malzeme özelliklerini tanımlama biçiminden kaynaklanmaktadır. Selimli'nin çalışmasında çözüm, tam boru geometrisinde, yapılandırılmamış ağ ve malzeme özellikleri UDF olarak tanımlanarak yapılmıştır. Bu çalışmada ise, yarım kesitli boru geometrisinde, yapılandırılmış sınır tabaka ağı ile ve malzeme özellikleri program içerisinde ilgili menülere denklemler tanımlanarak çözülmüştür. Tam boru geometrisinde artık (*residual*) olarak tanımlanan terimlerin -verilen taşıyıcı (*transport*) denklem çözümlerinin tam çözümden sapma ölçütü- fazla olacağından yakınsama problemlerine neden olmaktadır, ayrıca çözüm süresinin uzamaması gibi sebeplerle yarım kesitli boru tercih edilmiştir.

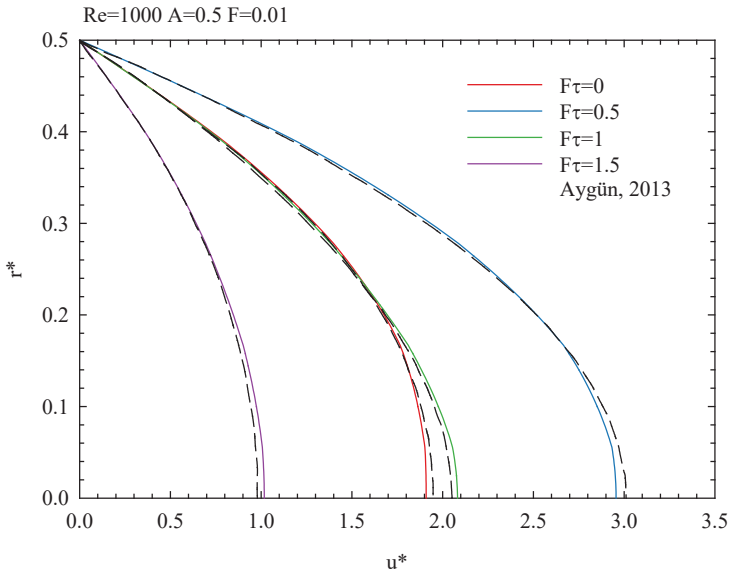


Şekil 2. MHD etkisindeki boyutsuz hız profillerinin karşılaştırılması

Akış problemlerinde boru cidarındaki kaymama sınır şartı sebebiyle bu bölgedeki akışkan davranışlarının daha hassas incelenmesi önem arz etmektedir, bu nedenle hem yapılandırılmış ağ hem de cidara doğru sıklaşan ağ yapısının (*inflation*) kullanılması uygun olacaktır.

2.2. Atımlı Akış için Sayısal Modelin Doğrulama Çalışması

Bir sonraki adımda ise atımlı akış için doğrulama çalışmasına ihtiyaç duyulmuştur. Çözüm yönteminin doğruluğu, Aygün, 2013 ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Her iki çalışmada aynı koşullarda gerçekleştirilmiş ve benzer sınır şartlarında ortalama Re=1000 değerinde laminer akış şartlarında çözümler yapılmıştır.

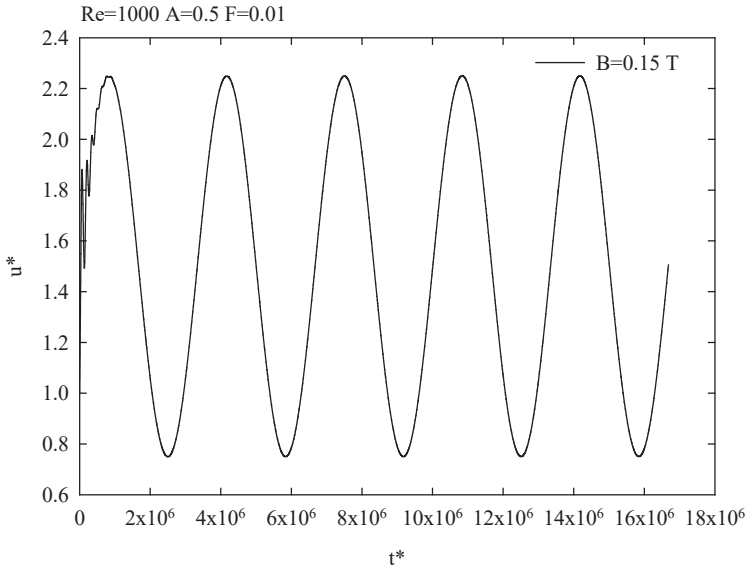


Şekil 3. Atımlı akışta farklı faz açılarındaki boyutsuz hız profillerinin karşılaştırılması

Atımlı akış doğrulama çalışmasının sonuçları Şekil 3'te verilmiş ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, manyetik alanın ve atımlı akışın, laminer boru içi akışta, akış özeliklerine etkisi incelenmiştir.



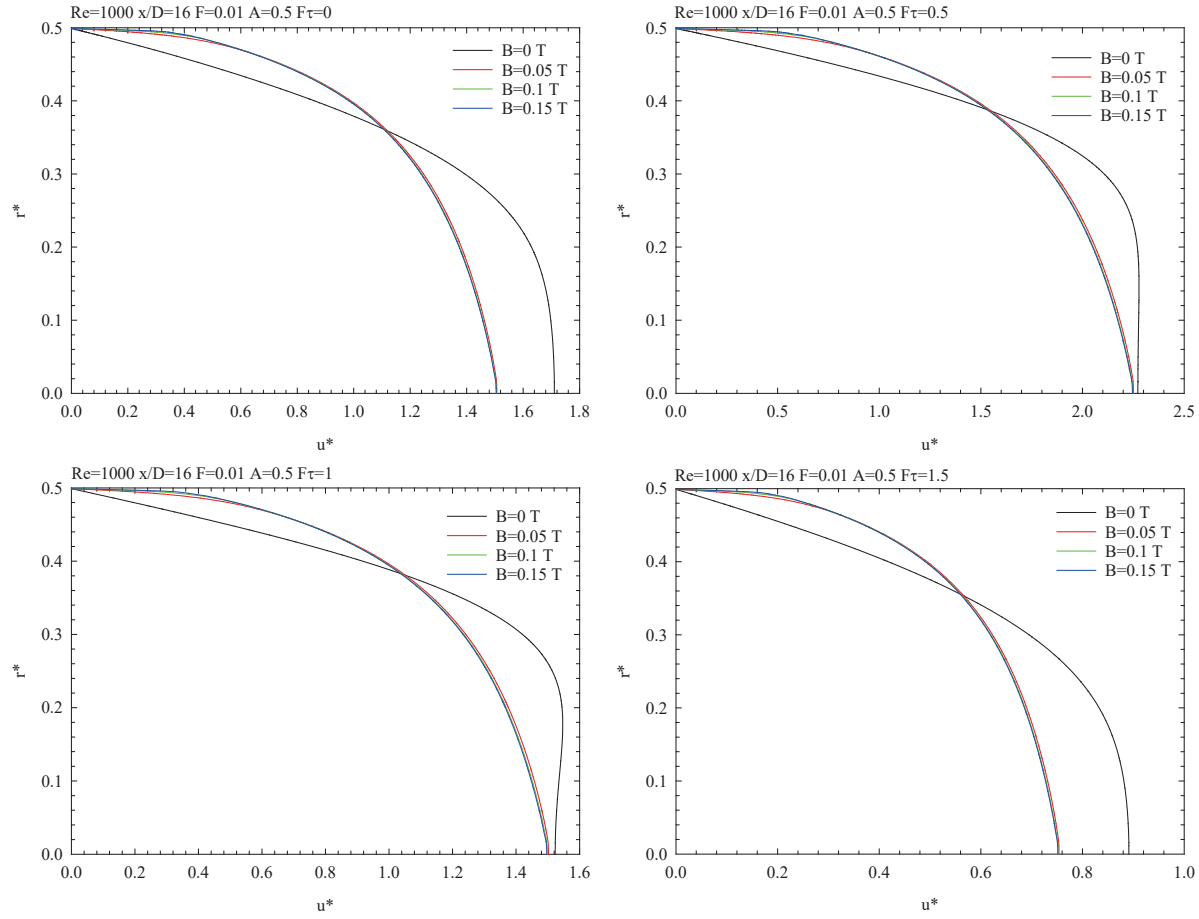
Şekil 4. Boru çıkış merkezindeki zamana göre hız değişimi

Manyetik alan altında atımlı akış uygulamasında sonuçların en az beş periyot sonrasında alınması gerektiği elde edilen değerler sonucunda ulaşılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi akışın ilk anlarında manyetik alanın etkisiyle sıçramalar ortaya çıkmaktadır ve devamında düzgün bir sinüs eğrisi şeklinde devam etmektedir.

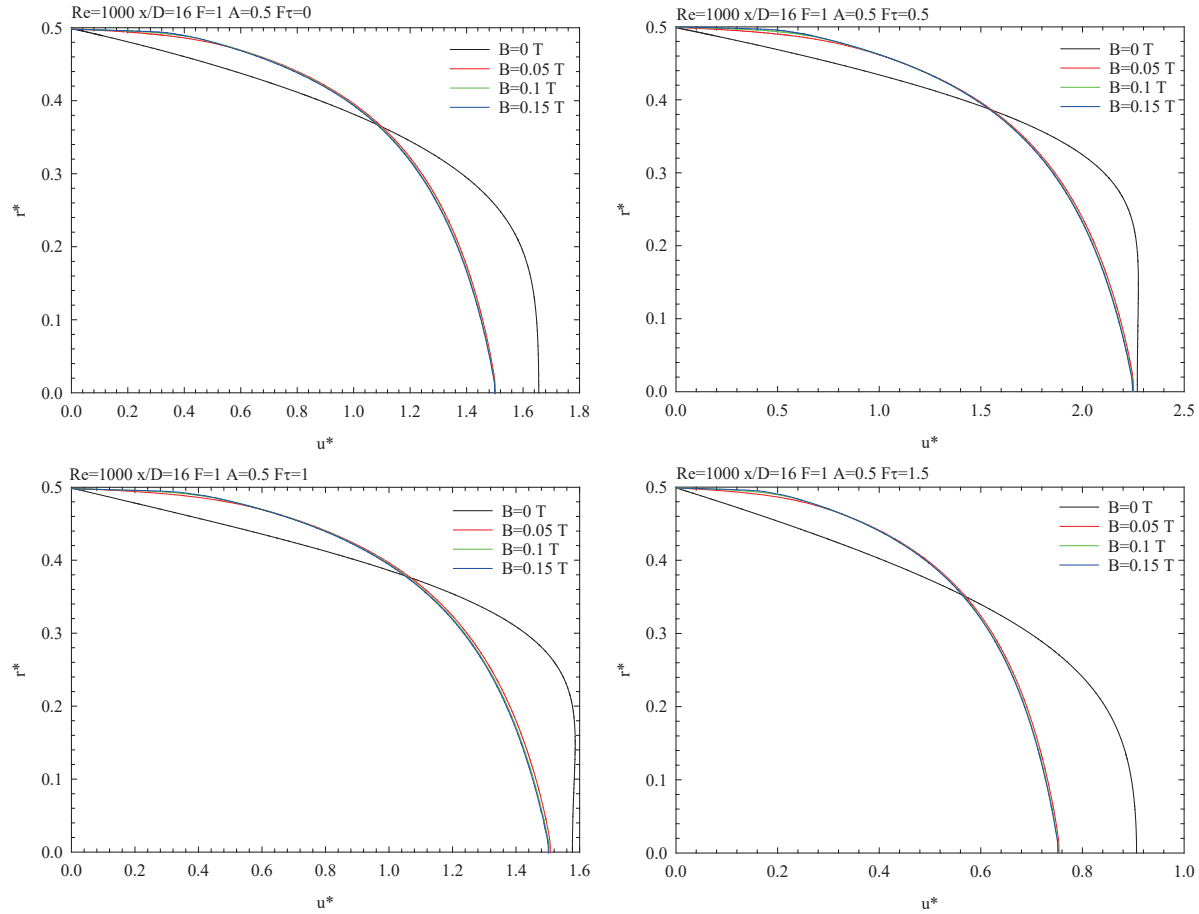
3.1. Manyetik Alanın Farklı Faz Açılarındaki Hız Profiline Etkisi

Boyutsuz genliğin 0.5 olduğu ve üç farklı boyutsuz frekans (F=0.01 – 1 – 100) durumda, dört farklı manyetik alan değerinde (B=0 – 0.05 – 0.1 – 0.15 T), boru çapının on altı kat ilerisinden (x/D=16) alınan, farklı boyutsuz faz açılarındaki (Fτ=0 – 0.5 – 1 – 1.5) boyutsuz hız profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi Şekil 5, 6 ve 7'de sunulmuştur.

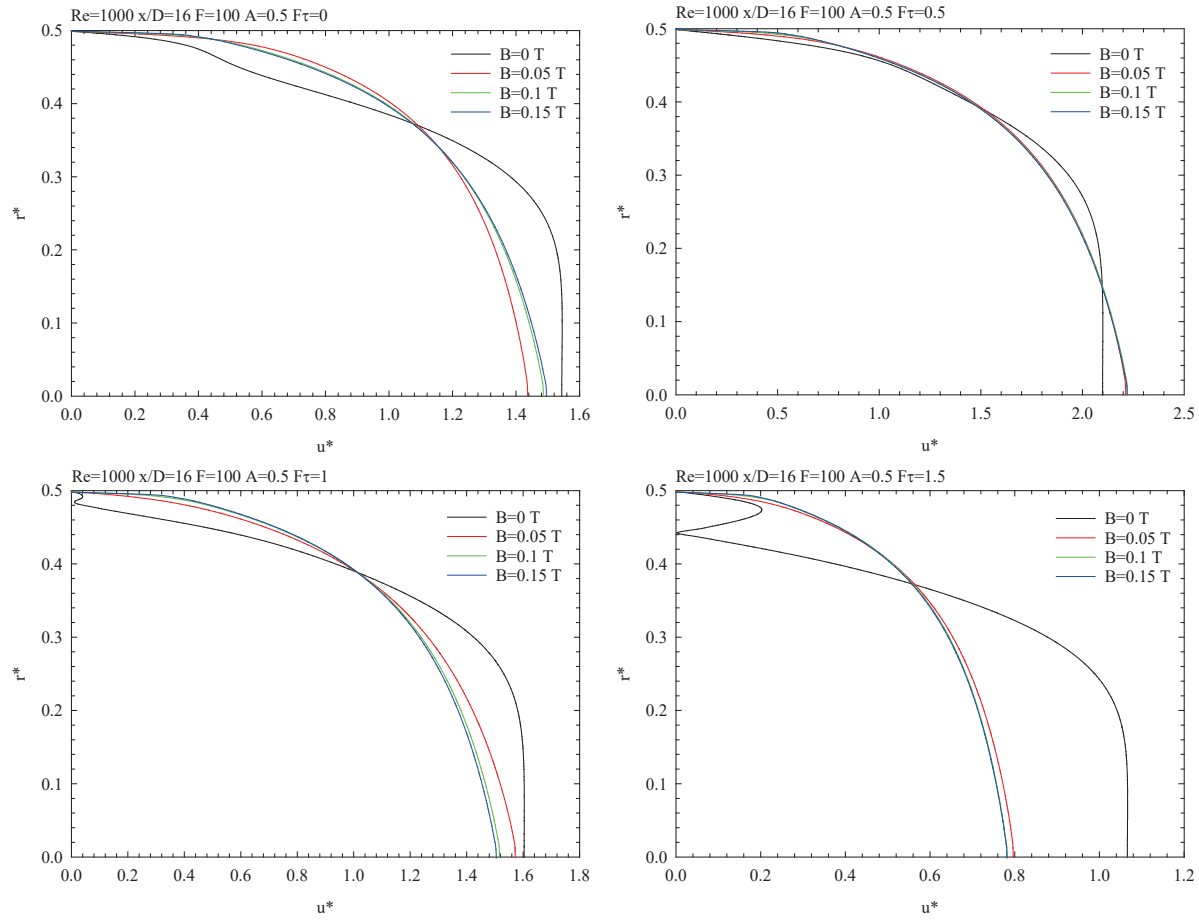
Boru akışlarında atım frekansının artmasıyla en yüksek hızın borunun cidara yakın bölgede oluşmasına halkasal etki (*annular effect*) adı verilmektedir. Bu etki F=100 frekans değerinde, manyetik alanın sıfır olduğu durumda görülmektedir (Aygün, 2013). Ancak manyetik alan uygulaması ile halkasal etki ortadan kalkmaktadır. Bu durumun sebebi, Lorentz kuvvetlerinin akışı frenleyerek ters dönmesine engel olmasıdır.



Şekil 5. F=0.01 için farklı faz açılarındaki hız profillerinin manyetik alana göre değişimi



Şekil 6. F=1 için farklı faz açılarındaki hız profillerinin manyetik alana göre değişimi



Şekil 7. F=100 için farklı faz açılarındaki hız profillerinin manyetik alana göre değişimi

Manyetik alan varlığında akış hızında azalma meydana geldiği, bu durumun uygulanan ilk manyetik alan değerinde büyük etkiye sahip olduğu görüldüğü ancak manyetik alan değerlerinin artması ile bu etkinin çok daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, manyetik alanın artmasıyla akışa karşı oluşan Lorentz direnç kuvveti artmakta fakat bu artış belli bir değerden sonra sabit kalmaktadır. Manyetik alanın, borunun cidarında ve ekseninde de farklı durumlara yol açtığı görülmektedir. Bu durumun sebebi ise yine Lorentz kuvvetlerinin etkisinden kaynaklanmaktadır (Yağcı, 2016). Lorentz kuvvetleri; cidara yakın yerlerde akış doğrultusunda etki ederek akışı hızlandırdığı, ancak boru merkezine doğru ilerledikçe akışa zıt yönde etki ettiği için akışı yavaşlattığı görülmektedir. Frekans değerinin artışıyla bozulmalar da ortaya çıkmaktadır.

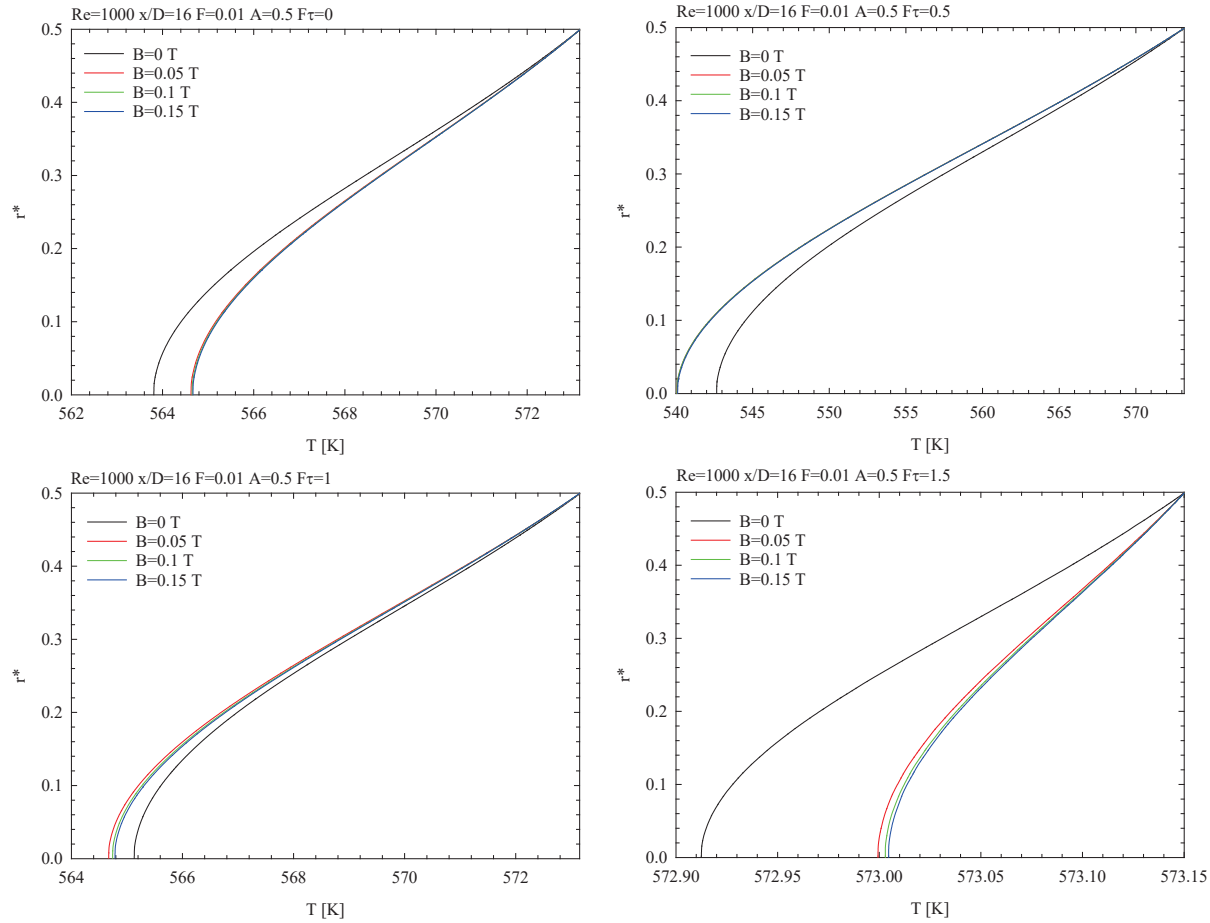
3.2. Manyetik Alanın Farklı Faz Açılarındaki Sıcaklık Profiline Etkisi

Farklı boyutsuz faz açılarındaki boyutsuz sıcaklık profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi Şekil 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

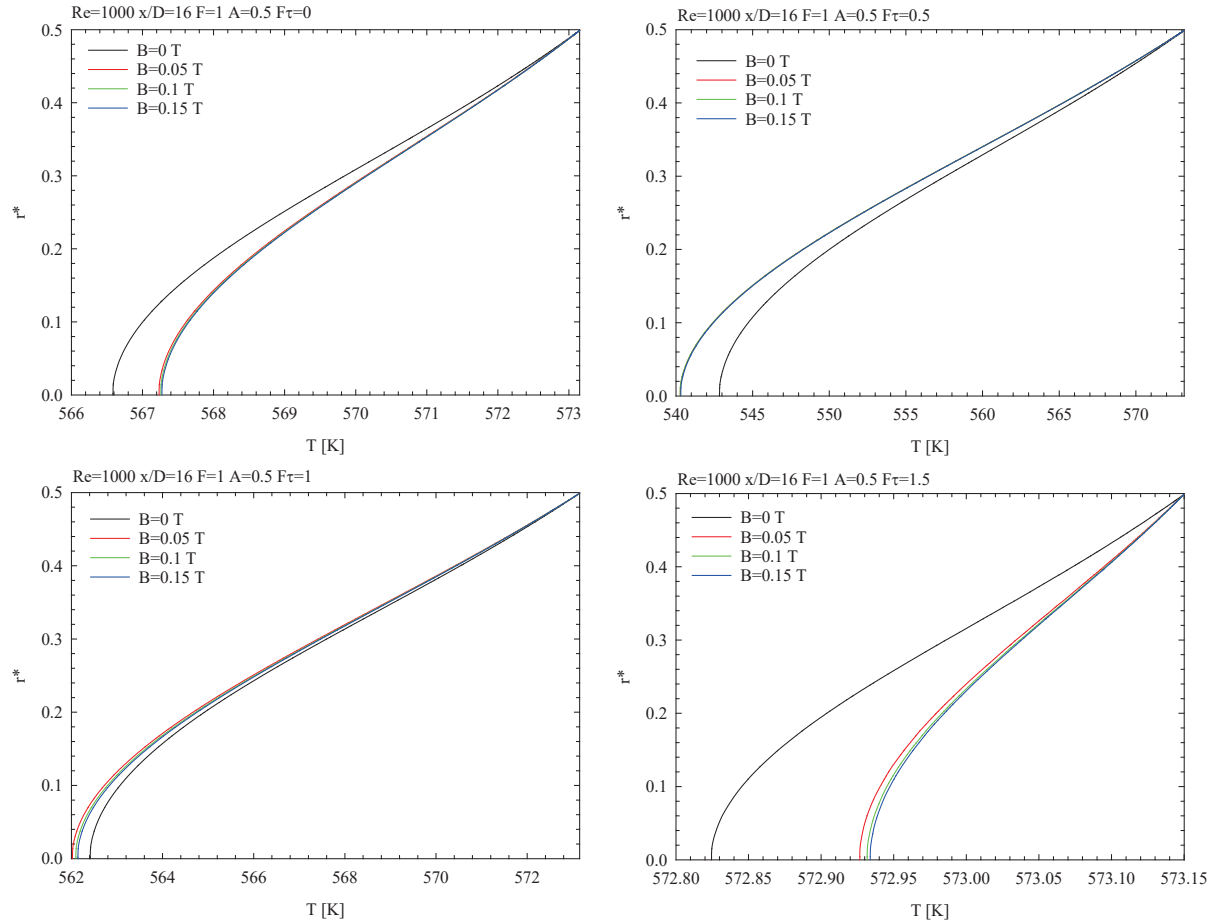
Grafiklere incelendiğinde, düşük frekansta (F=0.01 – 1), hız profilindekine benzer şekilde sıcaklık değişimleri görülmektedir, ancak yüksek frekansta (F=100) sıcaklık farkının daha az olduğu görülmektedir. Hızlanma bölgesinde, taşınım etkilerinden dolayı sıcaklığın düştüğü ve yavaşlama bölgesinde ise sıcaklığın arttığı görülmektedir.

Grafiklerden görüleceği üzere, manyetik alanın artmasıyla birlikte Lorentz kuvvetlerinin etkisi artmakta ve bu durum merkezdeki hızın azalmasına ve böylece merkezdeki sıcaklığın artmasına

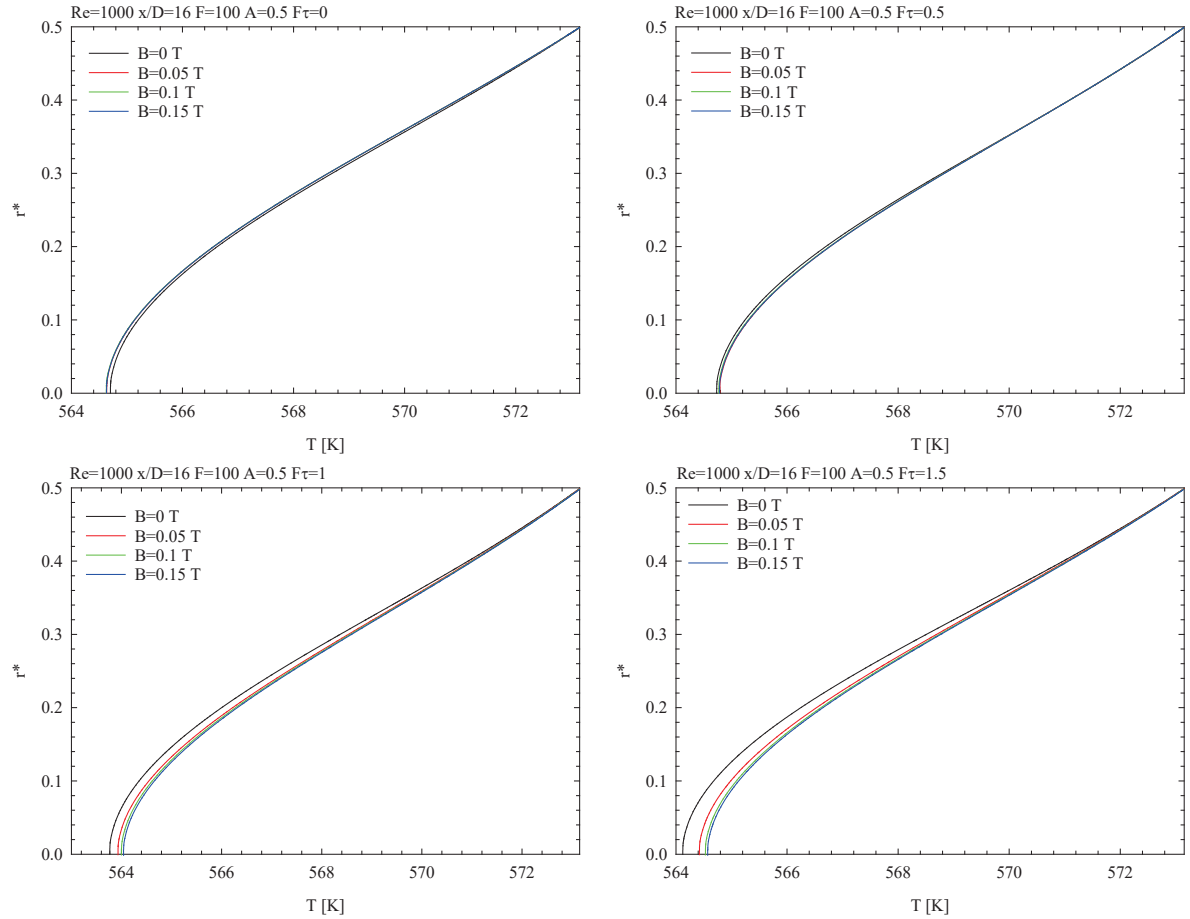
sebep olmaktadır. Ayrıca uygulanan farklı manyetik alan değerlerine göre faz açılarının da sıcaklık üzerinde önemli bir etkisinin olduğu fark edilecektir. Özellikle düşük frekanslarda (F=0.01) önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu etki frekans artışıyla (F=100) birlikte azalmaktadır. Bunun sebebi ise yüksek frekanslarda atalet kuvvetlerinin etkisinin baskın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. F=0.01 için farklı faz açılarındaki sıcaklık profillerinin manyetik alana göre değişimi



Şekil 9. F=1 için farklı faz açılarındaki sıcaklık profillerinin manyetik alana göre değişimi



Şekil 10. F=100 için farklı faz açılarındaki sıcaklık profillerinin manyetik alana göre değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip akışkanın, ısıl olarak gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişme bölgesinde, atımlı akışta manyetik alanın, akış hızı ve sıcaklığı üzerine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

1. Manyetik alanın artışı Lorentz kuvvetinin artmasına neden olur. Bu kuvvet, sıcaklık ve hız değişikliklerini oluşturan taşınım akımlarına karşı çalışır, dolayısı ile Lorentz kuvvetinin artması taşınımın azalmasına yol açar. Bunun sonucu olarak ısı transferi yavaşlar. Ancak, bu çalışmadan görüleceği üzere bazı durumlarda (atımlı akış uygulanması) manyetik alanın artışı, akışın düzenlenmesine ve sıcaklık dağılımının homojenleşmesine sebep olmaktadır. Bu bağlamda ısı transferinin artırılması çalışmalarına olumlu yönde etki yapacaktır.

2. Manyetik alanın varlığı yüksek frekansta halkasal etkinin oluşmasını engellemektedir.

3. Dört farklı manyetik alan değerinde analizler yapılmış olup, uygulanan ilk küçük manyetik alan değerinin (B=0.05 T) akışkan üzerinde önemli bir etkisi olduğu, ancak manyetik alanın artırılmasıyla hatta en yüksek manyetik alan değerlerine çıkılmasına rağmen bu etkinin hemen hemen sabit kaldığı belirlenmiştir.

4. Atımlı akışın frekansı ve manyetik alanın değeri arttıkça cidara yakın bölgede hızlar artmakta ve böylece sınır tabaka kalınlığı azalacağı için ısı transferini iyileştirebileceği anlamı taşımaktadır.

5. Farklı manyetik alan değerlerine göre faz açılarının sıcaklık üzerinde önemli bir etkisinin olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle düşük frekanslarda önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu etki frekans artışıyla (F=100) birlikte azalmaktadır. Bu durum manyetik alan değiştirilerek ısı transferi kontrolünü mümkün kılabilmektedir.

6. Toplam ısı transferinin artırılmasında veya azaltılmasında, cidara yakın bölgede ısı transferinin artırılmasında veya azaltılmasında atımlı akışla birlikte manyetik alanın kullanılabileceği belirlenmiştir.

Newtonumsu olmayan akışkanlar kullanılarak, daha geniş frekans aralıklarında, farklı genliklerde ve faklı Reynolds sayılarında hidrodinamik ve ısıl çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Kaynaklar

1. Hartmann, J. ve Lazarus, F., *"Hg-dynamics II", Theory Of Laminar Flow Of Electrically Conductive Liquids In A Homogeneous Magnetic Field*, 1937, 15(7).
2. Yağcı, E., *İç Akışta Manyetik Alan Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 2016.
3. URL-1, https://alarga.uskudar.biz/kemere/b%c3%a2li-kaptan.html, 2022.
4. URL-2, https://tr.wikipedia.org/wiki/Manyetik_hidrodinamik, 2022.
5. URL-3, https://en.wikipedia.org/wiki/Yamato_1, 2022.
6. Rinaldi, C., Latorre M., *Applications Of Magnetic Nanoparticles In Medicine: Magnetic Fluid Hyperthermia,* PRHSJ, 2009, 28(3), 227-238.
7. Zaloğlu, A., *Paralel İki Levha Arasındaki Rivlin-Ericksen Akışlarının MHD Radyal Titreşimli Akışı,* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
8. URL-4, https://www.darpa.mil/news-events/-2023-05-18, 2023.
9. Aygün, C., *Atımlı Giriş Akışının Akış ve Isı Transferi Üzerindeki Etkisi*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı, Trabzon, 2013.
10. Miller, J., A. ve Fejer, A., A., *Transition Phenomena in Oscillating Boundary-Layer Flows*, J. Fluid Mech., 1964, 18, 438-448.
11. Brown, F., T., Margolis, D., L. ve Shah, R., P., *Small Amplitude Frequency Behavior of Fluid Lines with Turbulent Flow*, J. Basic Eng. T. ASME, 1969, 91(4), 678-693.
12. Baird, M., H., I., Round, G., F. ve Cardenas, J., N., *Friction Factors in Pulsed Turbulent Flow*, Can. J. Chem. Eng., 1971, 49, 220-223.
13. Aygün, C. ve Aydın, O., *Pressure-drıven Lamınar Pulsatıng Flow In A Pıpe: Effect Of The Amplıtude*. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 2015, 35(1), 97-105.
14. Aygün, C. ve Aydın, O., *Hydrodynamics Of Piston-Driven Laminar Pulsating Flow: Part 1. Developing Flow*. Nuclear Engineering and Design, 2014, 274, 164-171.
15. Okumuş, A., A., *Bir Borudaki Isıl Olarak Tam Gelişmiş Hidrodinamik Olarak Gelişmekte Olan Atımlı Akışta Manyetik Alanın Akış ve Isı Transferi Üzerine Etkisinin İncelenmesi*,

Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gümüşhane, 2023.

16. Selımlı, S., *Computatıonal Hydrodynamıc And Heat Transfer Analysıs Of Magnetohydrodynamıc Internal Flow.* Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2015.