

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİR BORUDAKİ ISIL OLARAK TAM GELİŞMİŞ HİDRODİNAMİK OLARAK
GELİŞMEKTE OLAN ATIMLI AKIŞTA MANYETİK ALANIN AKIŞ VE ISI
TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Abdullah Alperen OKUMUŞ

HAZİRAN – 2023
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİR BORUDAKİ ISIL OLARAK TAM GELİŞMİŞ HİDRODİNAMİK OLARAK
GELİŞMEKTE OLAN ATIMLI AKIŞTA MANYETİK ALANIN AKIŞ VE ISI
TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON FLOW AND
HEAT TRANSFER IN FULLY DEVELOPED HYDRODYNAMICALLY
DEVELOPING PULSATING FLOW IN A PIPE**

YÜKSEK LİSANS

Abdullah Alperen OKUMUŞ

**HAZİRAN – 2023
GÜMÜŞHANE**



T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİR BORUDAKİ ISIL OLARAK TAM GELİŞMİŞ HİDRODİNAMİK OLARAK
GELİŞMEKTE OLAN ATIMLI AKIŞTA MANYETİK ALANIN AKIŞ VE ISI
TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON FLOW AND
HEAT TRANSFER IN FULLY DEVELOPED HYDRODYNAMICALLY
DEVELOPING PULSATING FLOW IN A PIPE**

YÜKSEK LİSANS

Abdullah Alperen OKUMUŞ

Danışman: Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU

HAZİRAN – 2023
GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Bir Borudaki Isıl Olarak Tam Gelişmiş Hidrodinamik Olarak Gelişmekte Olan Atımlı Akışta Manyetik Alanın Akış Ve Isı Transferi Üzerine Etkisinin İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmalarını kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

14/06/2023

Abdullah Alperen OKUMUŞ

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca çalışmalarında yardımcı olan danışman hocalarım Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU'na, lisans eğitimimden bu zamana kadar eğitim – öğretim faaliyetlerimde ve bu tezi hazırlayabilmemde büyük emeği olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Cemalettin AYGÜN'e, sayısal çalışmalarım sırasında yardımları için Arş. Gör. Esra YAĞCI hocama ve tez çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Ecem BULAT, Elvin AĞTAŞ ve İkrım TAŞDEMİR'e ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah Alperen OKUMUŞ
GÜMÜŞHANE – 2023

ÖZET

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip akışkanın, ısı olarak gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişmekte olan atımlı akışta manyetik alanın, akış hızı ve ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma, sonlu hacimler tekniğine dayalı, ANSYS Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda; öncelikle daha öncesinde bu kapsamda yapılmamış yeni bir çalışma literatüre kazandırılmıştır. Laminer boru akışında manyetohidrodinamik (MHD) etkileri ile atımlı akış, akışkanın hareketi ve ısı transferi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Manyetik alan akış hızını düşürmüştür, aynı zamanda genlik ve Nusselt sayısının artmasına sebep olarak ısı transferini arttırmıştır. Düşük frekans ($F=0.01 - 1$) değerlerinde; en yüksek Nusselt sayısı akışın hızlanma bölgesinde ($F_r = 0.5$), en düşük Nusselt sayısı yavaşlama bölgesinde ($F_r = 1.5$) oluşmuştur. Manyetik alanın varlığı yüksek frekansta halkasal etkinin oluşmasını engellemiştir. Dört farklı manyetik alan ($B=0 \text{ T} - 0.05 \text{ T} - 0.1 \text{ T} - 0.15 \text{ T}$) değerinde analizler yapılarak, ilk manyetik alan değerinde ($B=0.05 \text{ T}$) akışkan davranışlarında gözle görülür bir etkinin olduğu, ancak yüksek manyetik alan değerlerinin akış davranışlarına çok fazla etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Analiz edilen bu sonuçlar neticesinde daha sonrasında yapılacak olan araştırma ve geliştirmelere yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Atımlı akış, Isı transferi, Laminer akış, Manyetohidrodinamik, Sonlu hacimler

SUMMARY

In this study, the effects of a magnetic field on the flow velocity and heat transfer in a pulsatile flow of an electrically conductive fluid with circular cross-section in a channel were numerically investigated. The numerical study was conducted using the ANSYS Fluent package program based on the finite volume technique. In line with the obtained results, firstly, a new study that has not been previously conducted in this scope was added to the literature. It was observed that the pulsatile flow with magnetohydrodynamic (MHD) effects in laminar pipe flow has an influence on the fluid motion and heat transfer. The magnetic field decreased the flow velocity and increased the amplitude and Nusselt number, thus enhancing heat transfer. In low-frequency values ($F=0.01 - 1$), the highest Nusselt number was observed in the acceleration region of the flow ($F_t = 0.5$), while the lowest Nusselt number occurred in the deceleration region ($F_t = 1.5$). The presence of the magnetic field prevented the formation of the circumferential effect at high frequencies. By performing analyses for four different magnetic field values ($B=0 \text{ T} - 0.05 \text{ T} - 0.1 \text{ T} - 0.15 \text{ T}$), it was concluded that there was a noticeable effect in the fluid behavior at the first magnetic field value ($B=0.05 \text{ T}$), but high magnetic field values had little influence on the flow behavior. These analyzed results will assist in future research and developments.

Keywords: Pulsatile flow, Heat transfer, Laminar flow, Magnetohydrodynamics, Finite volume

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
EKLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ	14
1.1. Manyetohidrodinamik.....	14
1.2. Atımlı Akış.....	16
1.3. Isı Transferi	17
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	23
2.1.Tez Çalışmasının Amacı	29
2.2.Tez Çalışmasının Kapsamı.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1.Geometrinin Oluşturulması.....	30
3.2.Ağ Yapısının Oluşturulması.....	31
3.3.Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Analiz	36
3.4.MHD ve Atımlı Akış için Sayısal Modelin Doğrulama Çalışmaları	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
4.1.MHD Çalışmalarında Ağ Bağımsızlığın Önemi	54
4.2.Manyetik Alan ve Atımlı Akışın Akış Davranışlarına Etkisi	56
4.2.1.Manyetik Alanın Farklı Faz Açılarındaki Hız Profiline Etkisi	57
4.2.2.Manyetik Alanın Farklı Faz Açılarındaki Sıcaklık Profiline Etkisi.....	71
4.2.3.Manyetik Alanın Genliğe Etkisi.....	85
4.2.4.Manyetik Alan ve Atımlı Akışın Nusselt Sayısına Etkisi.....	87
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
KAYNAKÇA.....	93
EKLER.....	97
ÖZGEÇMİŞ	99

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Manyetohidrodinamik akış ile ilgili sayısal yöntemle yapılan çalışmalar.....	23
Tablo 2. Manyetohidrodinamik akış ile ilgili deneysel yöntemle yapılan çalışmalar.....	27
Tablo 3. Atımlı Akış ile ilgili yapılan çalışmalar.....	27
Tablo 4. Ağ yapılarının eleman sayılarına göre değişimi	34
Tablo 5. Analiz çözümünde kullanılan ayrıklaştırma yöntemleri.....	43



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İlk çalışan tam ölçekli MHD gemisi (URL-3, 2022).	15
Şekil 2. Daimî, salınımlı ve atımlı akış (Aygün, 2013).	16
Şekil 3. Atımlı akış sonucu oluşan bir sünüş eğrisinin fiziksel prensibi (Aygün, 2013).17	
Şekil 4. Zorlanmış ve doğal taşınım örneği (Çengel, 2011).	18
Şekil 5. Laminer ve türbülanslı akış örneği (Çengel ve Cimbala, 2020).	19
Şekil 6. Boru içi akışta hız sınır tabaka gelişimi (Çengel ve Cimbala, 2020).....	20
Şekil 7. Boru içi akışta ısı sınır tabaka gelişimi (Çengel, 2011).....	20
Şekil 8. Boru içi akışta hız ve ısı sınır tabakalarının gelişimi (Çengel, 2011).....	21
Şekil 9. Sabit yüzey sıcaklığında akışkanın sıcaklık değişimi (Çengel, 2011).....	22
Şekil 10. ANSYS’de geometrinin oluşturulma görselleri.....	31
Şekil 11. Yapılandırılmış ağ görüntüsü.....	32
Şekil 12. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 1	33
Şekil 13. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 2.....	33
Şekil 14. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 3.....	34
Şekil 15. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 4.....	34
Şekil 16. Eleman sayısına göre ortalama dikey kalite grafiği.....	35
Şekil 17. MHD ağ bağımsızlık testleri hız değerleri.....	36
Şekil 18. ANSYS Fluent ayar menüsü.....	37
Şekil 19. MHD model ayarları.....	37
Şekil 20. Malzeme özellikleri tanımlama görüntüsü.....	38
Şekil 21. Eşitlik 5’in malzeme özelliklerinde tanımlanması.....	39
Şekil 22. Eşitlik 6’nın malzeme özelliklerinde tanımlanması.....	40
Şekil 23. Eşitlik 7’nin malzeme özelliklerinde tanımlanması.....	40
Şekil 24. Eşitlik 8’in malzeme özelliklerinde tanımlanması.....	41
Şekil 25. ANSYS Fluent’te hesaplama ayarlarının görüntüsü.....	44
Şekil 26. MHD etkisindeki boyutsuz hız ve sıcaklık profillerinin literatür ile karşılaştırılması	46
Şekil 27. Atımlı akışta farklı faz açılarındaki boyutsuz hız profillerinin literatür ile karşılaştırılması	51
Şekil 28. Farklı iterasyon sayılarına göre boru kesitindeki hız profillerinin karşılaştırması	52

Şekil 29. Farklı iterasyon sayılarına göre boru kesitindeki sıcaklık profillerinin karşılaştırması	53
Şekil 30. Ağ yapısına göre ağdan bağımsızlık grafikleri	54
Şekil 31. Manyetik alanın hız ve sıcaklık değerlerine etkisi.....	55
Şekil 32. Boru çıkış merkezindeki zamana göre hız değişimi	56
Şekil 33. Farklı frekans ve farklı manyetik alan değerlerindeki hız profillerinin faz açılarına göre değişimi	58
Şekil 34. Farklı frekans ve farklı faz açılarındaki hız profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi.....	65
Şekil 35. Farklı frekans ve farklı manyetik alan değerlerindeki sıcaklık profillerinin faz açılarına göre değişimi	72
Şekil 36. Farklı frekans ve farklı faz açılarındaki sıcaklık profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi.....	79
Şekil 37. Farklı frekanslarda periyot boyunca zamana göre hız değişimi	85
Şekil 38. Nusselt sayısının manyetik alan ve faz açılarındaki değişimi	88

EKLER DİZİNİ

Ek 1. MHD modülünün etkinleştirilmesi.....	97
Ek 2. Atımlı akış için UDF dosyası	98



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MHD: Manyetohidrodinamik

UDF : Kullanıcı tanımlı fonksiyon (*User Defined Function*)

Q : Isı transfer hızı [W]

h : Isı transfer katsayısı [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

A_s : Taşınımın olduğu yüzey alanı [m^2]

T_s : Yüzey sıcaklığını [$^\circ C$]

T_∞ : Akışkan sıcaklığı [$^\circ C$]

V_{ort} : Ortalama akışkan hızı [m/s]

D : Boru çapı [m]

ϑ : Kinematik viskozite [m^2/s]

Re : Reynolds sayısı

ρ : Yoğunluk [kg/m^3]

C_p : Özgül ısı [$J/kg \cdot K$]

k : Isıl iletkenlik [$W/m \cdot K$]

μ : Dinamik viskozite [$kg/m \cdot s$]

$\frac{1}{\rho_e}$: Elektriksel iletkenlik [S/m]

μ_e : Manyetik geçirgenlik [H/m]

F : Boyutsuz frekans

r : Boru yarıçapı [m]

f : Frekans [s^{-1}]

T : Periyot [s]

ω : Açısal hızı [rad/s]

F_τ : Boyutsuz faz açısı

Pr : Prandtl sayısı

C_p : Özgül ısı [$J/kg \cdot K$]

L_t : Isıl gelişme uzunluğu [m]

L_h : Hidrodinamik gelişme uzunluğu [m]

u^* : Boyutsuz hız

ΔT_{ln} : Logaritmik ortalama sıcaklık farkı [K]

θ^* : Boyutsuz sıcaklık

1. GİRİŞ

Isı enerjisi tarih boyunca farklı alanlarda kullanılmış ve yaşam var olduğu sürece kullanılacak olan bir enerji çeşididir. İlk çağlardan günümüze kadar insanlar bu enerjiyi çeşitli şekillerde kullanmışlar ve zaman geçtikçe enerjiyi daha verimli kullanabilmek için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Günümüze kadar birçok bilim insanı, enerjinin bir çeşidi olan ısı enerjisinin nasıl verimli bir şekilde kullanılacağını araştırmışlardır.

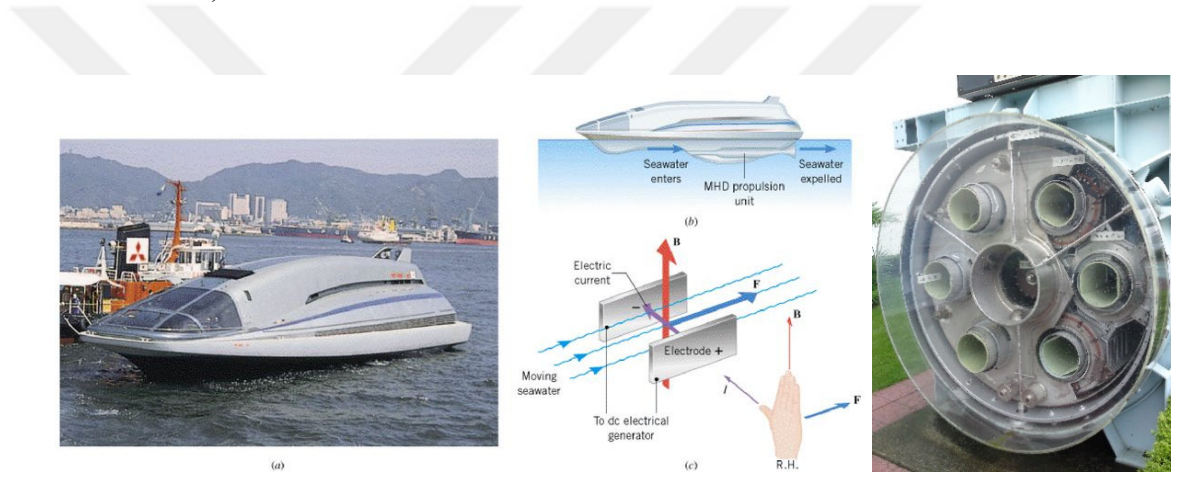
Son zamanlarda yaşanan enerji krizlerinden ve küresel ısınmanın bir sonucu olarak, insanlığın tükenebilen her türlü enerjiyi dikkatli ve en verimli şekilde kullanılmasının önemi konusunda farkındalık artmış olup, gittikçe hızlı artış gösteren enerji sarfiyatlarının düşürülebilmesi için çalışmalar hız kazanmıştır. Elektriksel iletkenliği olan sıvılarla manyetik alanın birlikte kullanılması ve atımlı akış şartları ile ısı transferinin iyileştirilmesi bu çalışmalardan bazılarıdır.

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 (Şekil 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).



Şekil 1. İlk çalışan tam ölçekli MHD gemisi (URL-3, 2022).

MHD'nin sağlık alanına örnek çalışması; manyetik akışkan hipertermidir, ilk 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).

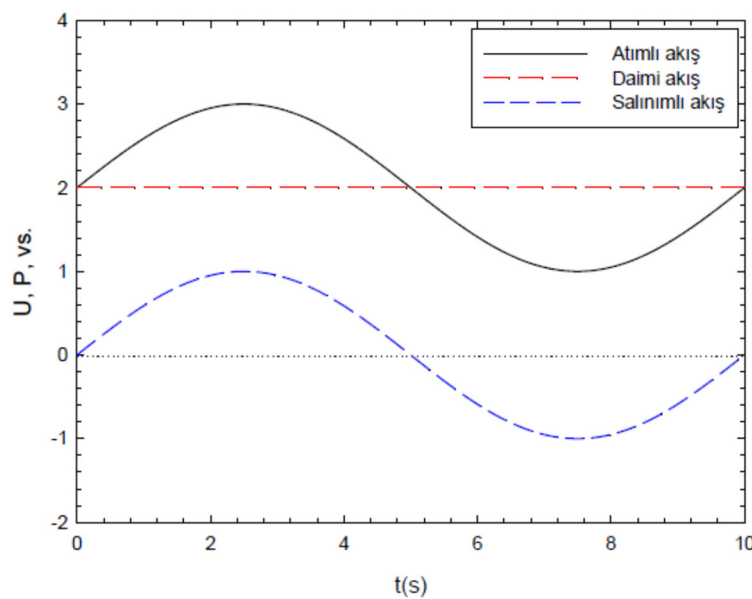
Manyetohidrodinamiğin astronomi ve jeofizikteki uygulamaları arasında; yıldızların ve gezegenlerin yapısı, güneş fırtınaları, gezegenler ve yıldızlararası madde, gezegenlerarası manyetik alan ve akışkan etkileşimleri, uzay iletişim sistemleri ve iyonosferde radyo dalgaları üretimi yer almaktadır (Zaloğlu, 2003).

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 kaviteasyonun engellenmesi, özel ısı değiştiricilerde, elektronik soğutucularda, nükleer reaktörlerde, uzay ve havacılıkta atımlı akış kullanılmaktadır (Aygün, 2013).

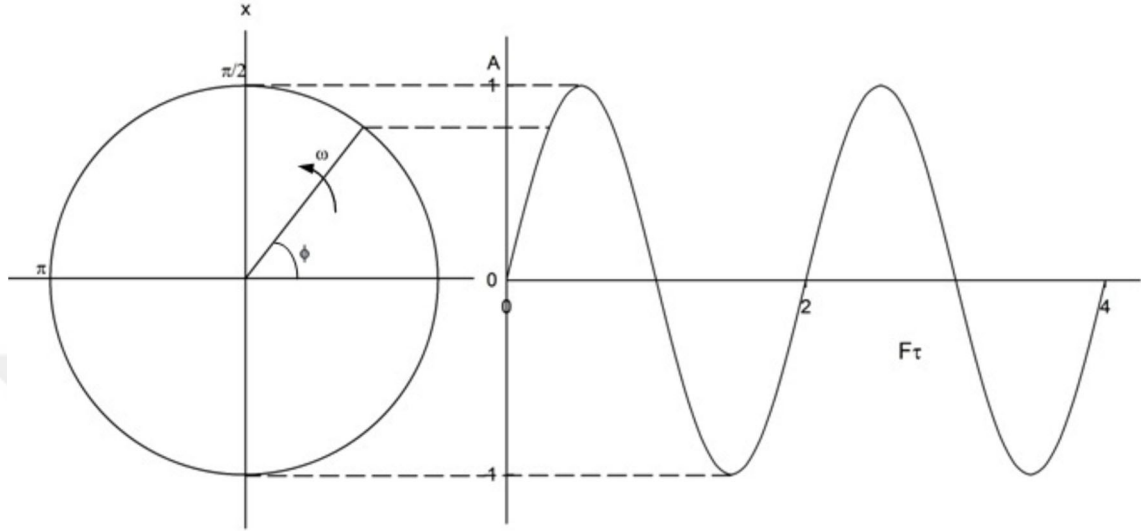
Atımlı akış (*pulsatile flow*), periyodik bir salınımlı akış bileşeninin sabit bir akışın üzerine bindirildiği, belirli bir zamana bağımlı akış türüdür. Atımlı akışlar; ısı transferini arttırmak, kanal içerisindeki temizliği sağlamak, farklı akışkanların karışımının sağlanması vb. özellikleri ile ortaya 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 (Şekil 2) olarak ikiye ayırabilmektedir (Aygün, 2013).



Şekil 2. Daimî, salınımlı ve atımlı akış (Aygün, 2013).

Atımlı akış sonucu oluşan bir sinüs eğrisinin fiziksel prensibi Şekil 3'te görülmektedir. Burada çember üzerindeki her bir tura (çevrime) periyot T , her bir turun saniyedeki tekrarlanma sayısına frekans f , ve salınımın en yüksek değerine ($F_t = 0.5 = \pi/2$) genlik A , denilmektedir (Aygün, 2013).



Şekil 3. Atımlı akış sonucu oluşan bir sinüs eğrisinin fiziksel prensibi (Aygün, 2013).

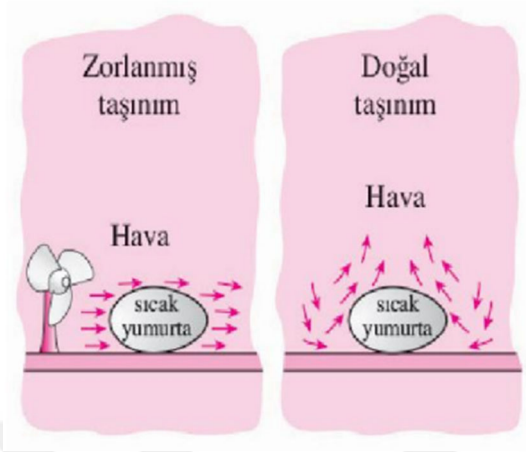
Atımlı akış üç yöntem kullanılarak oluşturulabilmektedir: Borunun girişinde veya çıkışında periyodik olarak salınımlı basınç değişimleri ile “Basınç Kaynaklı Akış” (*Pressure-Driven Flow*) oluşturulmaktadır. Piston aracılığıyla akışkanın ileri ve geri hareket ettirilmesi sayesinde “Piston Kaynaklı Akış” (*Piston-Driven Flow*) oluşturulmaktadır. Cidarın ileri-geri hareket ettirilmesiyle bir salınım hareketi oluşturularak “Sınır Kaynaklı Akış” (*Boundary-Driven Flow*) oluşturulabilmektedir. (Aygün, 2013). Bu çalışmada basınç kaynaklı yöntem kullanılarak etkileri analiz edilmiştir.

1.3. Isı Transferi

Isı transferi, birbirleri ile etkileşim halinde bulunan farklı sıcaklıklara sahip cisimlerin aralarında ısı alışverişinde bulunmalarıdır. Isının katı cisimler veya durgun sıvılar vasıtasıyla taşınmasına iletim, akışkan akışı ile aktarılmasına taşınım, fotonlar ile ulaşmasına ışınlıma ısı transferi denilmektedir. Bu bölümde tezde, taşınım ısı transferi konusu incelenmiştir.

Taşınım ısı transferi, katı yüzey ile sıvı veya gaz halindeki akışkan arasındaki enerji aktarım çeşididir. Akışkan, yüzey üzerinden; fan, pompa veya rüzgâr yardımıyla

akıyorsa zorlanmış taşınım, sıcaklık değişiminden dolayı yoğunluk farkının sonucunda kaldırma kuvveti etkisiyle akıyorsa doğal taşınım denir (Şekil 4). Taşınım ile ısı transferi Newton'un Soğutma Kanunu Eşitlik 1 ile hesaplanır (Çengel, 2011).



Şekil 4. Zorlanmış ve doğal taşınım örneği (Çengel, 2011).

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad [\text{W}] \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Bu eşitlikte:

$\dot{Q}_{\text{taşınım}}$: Taşınım ile ısı transfer hızı [W],

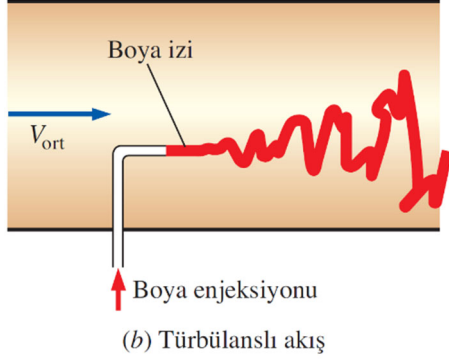
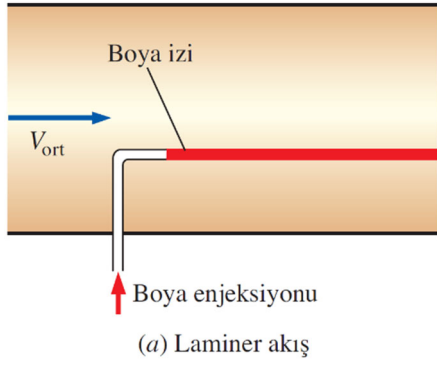
h : Isı transfer katsayısı [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$],

A_s : Taşınımın olduğu yüzey alanı [m^2],

T_s : Yüzey sıcaklığını [$^\circ\text{C}$],

T_{∞} : Akışkan sıcaklığını [$^\circ\text{C}$] ifade etmektedir.

Akışkanın; düzgün ve çalkantısız halde akmasına laminar akış, düzensiz, dalgalı ve yüksek hızlarda akmasına türbülanslı akış denir (Şekil 5). Akış rejiminin belirlenmesinde boyutsuz bir parametre olan Reynolds sayısı (Re) (Eşitlik 2); Osborne Reynolds'un 1880'li yıllarda yaptığı deneylerle atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranı olarak ortaya çıkmıştır. Dairesel boru içi akışlarda; $Re \leq 2300$ ise laminar akış, $Re \geq 4000$ ise türbülanslı akış, bu iki değerin arasında ise geçiş akışı oluşmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2020: 349).



Şekil 5. Laminer ve türbülanslı akış örneği (Çengel ve Cimbala, 2020).

$$Re = \frac{V_{ort} D}{\vartheta} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

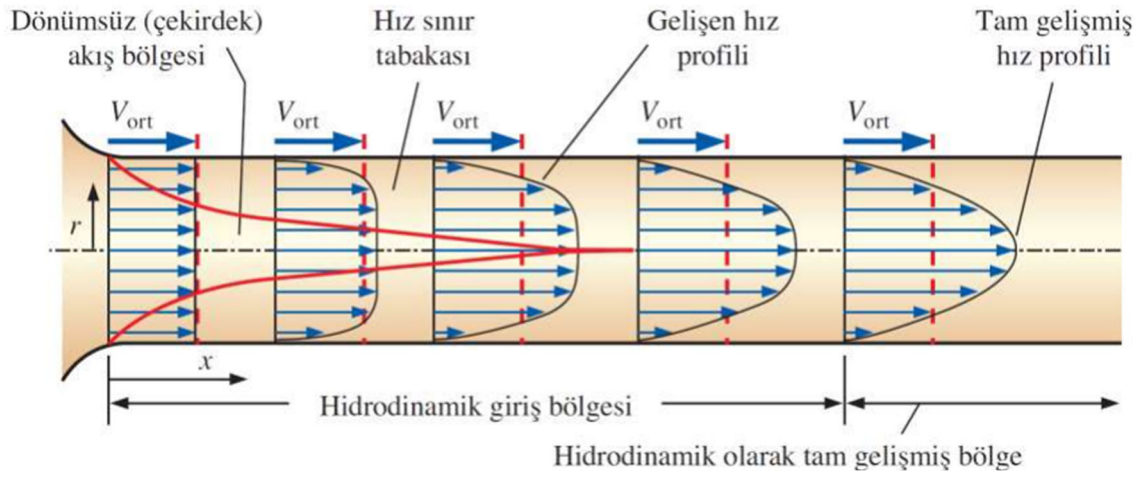
Bu eşitlikte:

V_{ort} : Ortalama akışkan hızı [m/s]

D : Boru çapı [m]

ϑ : Akışkanın kinematik viskozitesini [m^2/s] ifade etmektedir.

Dairesel bir boru içerisinde, çeperde, yüzey pürüzlülükleri ve akışkan viskozitesi sebebiyle kaymama sınır şartı oluşur. Bundan dolayı boru iç cidarlarında hız sıfırdır ve akış yönünde giderek artmaktadır. Bu viskoz etkilerinin görüldüğü akış bölgesine “hız sınır tabaka” adı verilir. Akış yönü boyunca, akışın merkezine ulaşıncaya kadar bu tabaka kalınlaşır, bir noktadan sonra akışın tamamını kaplar ve sonraki kısımlarda hız tam gelişmiş hale gelir. Boru girişinden, hızın tam gelişme noktasına kadar olan kısmına “hidrodinamik giriş bölgesi” ve uzunluğuna “hidrodinamik giriş uzunluğu (L_h)”, sonraki kısma ise “hidrodinamik olarak tam gelişmiş bölge” denilmektedir ve bu bölge içerisinde hız profili değişmemektedir (Şekil 6) (Çengel ve Cimbala, 2020).



Şekil 6. Boru içi akışta hız sınır tabaka gelişimi (Çengel ve Cimbala, 2020).

Laminer akıştaki hidrodinamik giriş uzunluğu yaklaşık olarak Eşitlik 3 ile hesaplanır (Kays vd., 2004).

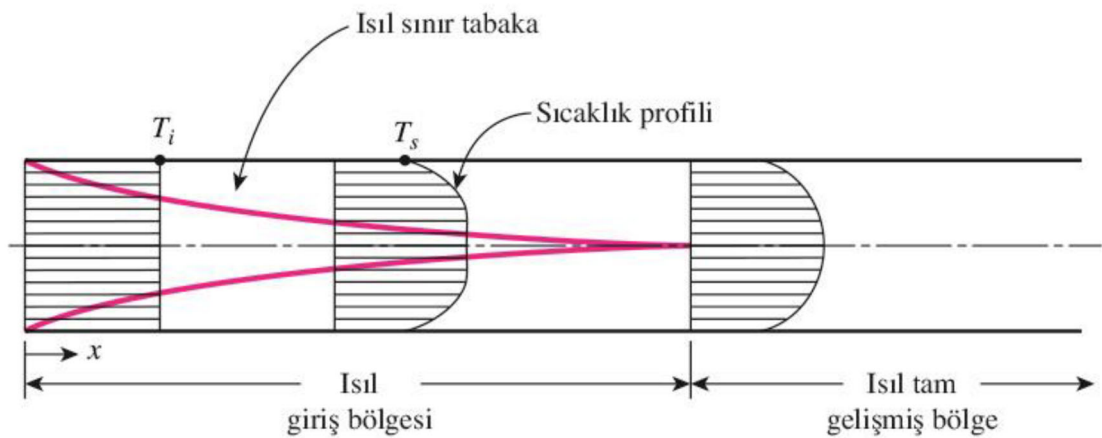
$$L_{h,laminer} \approx 0.05ReD \text{ [m]} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Bu eşitlikte:

Re : Reynolds sayısı

D : Boru çapını [m] ifade etmektedir.

Üzerinde ısı sınır tabakanın oluştuğu ve boru eksenine ulaştığı akış bölgesi “ısı giriş bölgesi” olarak adlandırılır (Şekil 7). Isıl giriş bölgesinin uzunluğu L_t ile ifade edilir ve yaklaşık olarak Eşitlik 4 ile hesaplanır.



Şekil 7. Boru içi akışta ısı sınır tabaka gelişimi (Çengel, 2011).

$$L_{t,laminer} \approx 0.05RePrD \text{ [m]} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

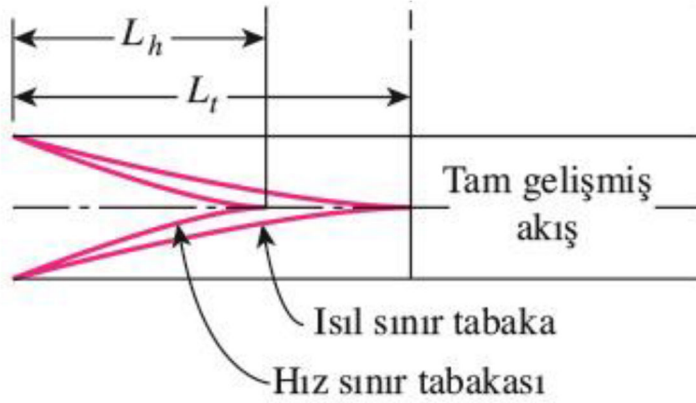
Bu eşitlikte:

Re : Reynolds sayısı

D : Boru çapı [m]

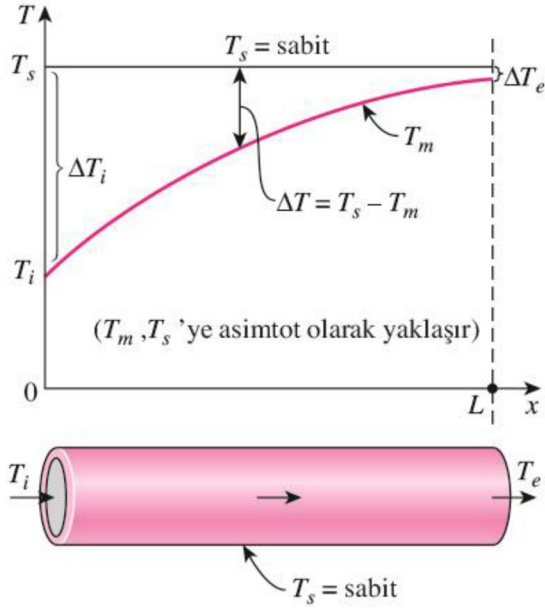
Pr : Prandtl sayısını ifade etmektedir.

Isıl giriş bölgesinin ilerisinde, sıcaklık profilinin değişmeden kaldığı kısım “ısıl tam gelişmiş bölge” olarak adlandırılmaktadır. Akış hem ısıl hem de hidrodinamik olarak gelişmiş ise “tam gelişmiş akış” olarak isimlendirilir (Şekil 8).



Şekil 8. Boru içi akışta hız ve ısıl sınır tabakalarının gelişimi (Çengel, 2011).

Bir boru yüzeyindeki ısıl şartlar “sabit yüzey ısı akısı” (*constant surface heat flux*) veya “sabit yüzey sıcaklığı” (*constant surface temperature*) olarak ikiye ayrılmaktadır ve bu durumlardan yalnızca birine sahip olmaktadır (Şekil 9).



Şekil 9. Sabit yüzey sıcaklığında akışkanın sıcaklık değişimi (Çengel, 2011).

Analizlerde sabit ısı akısı kabulü gerçek koşullara daha uygun olmaktadır ancak sabit yüzey sıcaklığı, ısı depolama gibi faz değiştiren sistemlerde (faz değişiminde sıcaklığın sabit kalması sebebiyle) ve MHD gibi özel durumlarda daha uygun bir kabuldür ve çalışmada bu prensip benimsenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

MHD ile ısı transferini iyileştirme yöntemleri hakkında literatürde yayımlanan sayısal ve deneysel araştırmalar incelenmiş ve özet olarak Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulmuştur. Konu ile ilgili; farklı akışkanlar, farklı manyetik alan değerleri ve türleri ile ilgili yapılan çalışmalara erişilmiştir. Ayrıca bu tezin kapsamına giren MHD’ye ilave olarak “atımlı akış” ile ilgili de literatür araştırması yapılmıştır ve Tablo 3’te özet olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Manyetohidrodinamik akış ile ilgili sayısal yöntemle yapılan çalışmalar

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Hartmann (1937)	Literatürde ilk olarak iki paralel plaka arasında, elektriksel iletkenliği olan ve sıkıştırılmaz viskoz akışkanın (cıva) manyetik alan altında davranışını deneysel olarak incelenmiştir. Sıvının hız profillerinin enine bir manyetik alan varlığında düzleştiğini bulunmuştur.
Chopra (1961)	Akış yönüne çapraz bir yönde düzgün bir manyetik alan uygulanarak, boru içerisinden geçen, elektrik iletkenliğine sahip bir sıvının akışı incelenmiştir. Daha güçlü bir manyetik alan uygulandığında, sıvının hız profiline kendisini parabolten düze dönüştürdüğü bulunmuştur.
Ji ve Gardner (1997)	Yatay silindirik boruda türbülanslı akışta sabit manyetik alanın ısı taşınımına etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Hartman sayısının artması ile Re sayısının dolayısıyla da Nu sayısının azaldığını göstermişlerdir.
Hossain vd. (2001)	Enine manyetik alan içerisindeki döner disk üzerindeki daimî olmayan akışta manyetik alan ve sıcaklığa bağlı viskozitenin ısı transferine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Viskozite değişim parametresinin artmasıyla radyal ve teğetsel hız bileşenlerinin azaldığını, manyetik alan parametresinin artmasıyla eksenel hız bileşeninin azaldığını görmüşlerdir.
Chamkha (2000)	Düzgün bir enine manyetik alan varlığında kanallar ve dairesel borular boyunca elektriksel olarak ileten bir sıvı içindeki partikül süspansiyonunun kararsız laminar akışı ve ısı transferi üzerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak; Hartmann ve Stokes sayıları, parçacık yükü ve viskozitenin akış üzerindeki etkileri sunulmuştur.
Tastoush ve Al-Odat (2004)	Dalgalı bir yüzeyde, zorlanmış ısı transferi ve akışa uygulanan manyetik alanın etkisini sayısal olarak incelemiştir. Sonuç olarak; manyetik alanın Nusselt sayısının azalmasına sebep olarak, yüzey sıcaklığını arttırması ile taşınım ısı transferini azalttığını bulmuşlardır.

Tablo 1. (Devamı)

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Racabovadiloğlu (2002)	Silindirik yatay bir boruda zorlanmış konveksiyon ile ısı transferine manyetik alanın etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Akış yönüne dik olarak yerleştirilen manyetik alanın şiddeti artırıldığında akış hızı ve debide olduğu gibi sıcaklık dağılımında da belirli şekilde fark edilebilir artışlar olduğu (yaklaşık olarak %4.5 civarında) tespit edilmiştir.
Attia (2006)	Elektriksel olarak iletken, Newtonian olmayan Bingham sıvısının tozlu viskoz sıkıştırılmaz dairesel bir borudan geçişi Hall etkisi dikkate alınarak sayısal olarak incelenmiştir. Manyetik alanın sıvı ve parçacıkların hızlarını azalttığını, Hall parametresi hem sıvı hem de parçacık fazlarının ortalama hızlarında ve sonuç olarak akış hızlarında ve duvardaki hız gradyanlarında bir artışa yol açtığı bulunmuştur.
Muthuraj, Srinivas (2010)	S. Gözenekli ortamla dolu asimetric dalgali bir kanalda optik olarak ince bir sıvının MHD salınımlı akışı araştırılmıştır, ilgili parametrelerin akışkan akışı ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkileri analitik olarak incelenmiştir. N , s , Gr ve Pe 'deki artışla hızın arttığı ancak Hartmann sayısı ve geometrik parametrelerdeki artışla hızın azaldığı görülmüştür. N 'nin artmasıyla sıcaklık artmıştır. M arttıkça yüzey sürtünmesi ve Nusselt sayısının arttığı görülmüştür.
Afify (2007)	Değişken viskoziteli ve elektriksel iletkenliğe sahip akışkanın manyetik alan içerisindeki düşey yüzeydeki serbest ısı taşınımını sayısal olarak incelemiştir. Hız ve sıcaklık profilleri ile Nusselt sayılarını farklı parametrelere göre göstermiştir.
Recebli, Atik ve Sekmen (2008)	Değişken fiziksel özellikli akışkan ile ısı taşınımına manyetik alan etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Akış yönüne dik olarak yerleştirilen manyetik alanın şiddeti artırıldığında soğutulan akışkan için hız ve sıcaklıklarda azalmalar olduğu görülmüştür. Reynolds sayısının artışıyla Nusselt sayısının arttığı, manyetik alan etkisinin artmasıyla da Nusselt sayısının azaldığı bu çalışmada da gözlemlenmiştir.
Tezer, Bozkaya ve Türk (2013)	Değişken manyetik alan etkisinde ve ani daralma gösteren damarlar boyunca akan, ısı transferinin de dikkate alındığı biyomanyetik akışkan modelinin nümerik çözümleri elde edilmiştir. Noktasal kaynaktan uygulanan manyetik alanın şiddeti arttıkça, manyetik kaynağın yakın çevresinde oluşan vorteksin uzunluğunun arttığı, diğer yandan biyoakışkan hızının bu bölgede azaldığı görülmektedir.

Tablo 1. (Devamı)

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Recebli, Selimli ve Gedik (2013)	Yatay dairesel bir borudaki kararlı hal laminer sıvı lityum akışına dik olarak uygulanan manyetik alanın etkisi, 3 boyutlu bilgisayar tabanlı program ile teorik olarak analiz edilmiştir. Konvektif ısı transferi davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Manyetik alan indüksiyonunun artmasıyla yerel akış hızı azalmış, ancak boru uzunluğu boyunca sıvı lityumun ısıtma ve soğutma koşulları için Nusselt sayısı, yüzey sürtünme katsayısı ve basınç artmıştır. Ek olarak, sıvı lityum ısıtırken sıvı sıcaklığı düşürülmüş ve sıvı lityum soğutulurken boru uzunluğu boyunca manyetik alan indüksiyonunun artmasıyla sıvı sıcaklığı artmıştır. Manyetik alan indüksiyonunun artması, konvektif ısı transferini arttırmıştır ve böylece sıvı lityumun soğutulmasını ve ısıtılmasını dolaylı olarak iyileştirdiği bulunmuştur.
Selimli (2015)	Silindirik bir boru ve dikdörtgen bir kanalda sürekli akış durumunda, harici olarak uygulanan manyetik alanın ve ayrıca elektrik alanın manyetik alanla birlikte sıvı lityum hidrodinamik, termofiziksel akış parametreleri ve ısı transferi üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sıvı lityum laminer akış üzerinde uygulanan manyetik alanın artmasının akış hızını ve dinamik basıncı azalttığını, aynı zamanda statik basıncı, yüzey sürtünme katsayısını, duvar kayma gerilmesini, merkezi sıcaklığı, yerel sıcaklığı ve Nusselt sayısını arttırdığı ve dolayısıyla ısı transferinin arttığını göstermiştir. Türbülanslı akış durumunda, uygulanan manyetik alanın artması statik basıncı arttırdığı, fakat aynı zamanda akış hızını, dinamik basıncı, yüzey sürtünme katsayısını, duvar kayma gerilmesini, merkezi sıcaklığı, yerel sıcaklığı ve Nusselt sayısını ve dolayısıyla ısı transferini azalttığını bulmuştur.
Yağcı (2016)	Boru ve kanal içerisinde akmakta olan elektrik iletkenliğine sahip bir akışkana uygulanan sabit ısı akısı ve manyetik alanın, akış ve ısı transferine etkisi analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Hartmann sayısının artması, elektromanyetik kuvvetin akışı yavaşlatması sebebiyle, alışılmış boyutsuz hız profilinin parabolik şeklini değiştirmiştir. Cidarda hız gradyanı arttırmış ve eksen etrafında hız profili düzleşmiştir. Nusselt sayısı; Hartmann sayısının artmasıyla artmış, Brinkman sayısının artması ile azalmıştır. Brinkman sayısına bağlı olarak, Hartmann sayısının belli bir değerinin üzerinde, Nusselt sayısı Hartmann sayısı ile asimptotik olarak değişmiştir. Nusselt sayısının asimptotik değeri Brinkman sayısının artmasıyla azalmıştır. Nusselt sayısı asimptotik değerine ulaştığında manyetik alanın ısı transferi üzerinde bir etkisi olmayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1. (Devamı)

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Yağcı, Aydın, Avcı ve Bali (2017)	Silindirik bir boru içerisindeki sıkıştırılamaz, sabit termofiziksel özelliklere ve elektrik iletkenliğine sahip viskoz akışkanın, hidrodinamik ve ısı olarak tam gelişmiş akış durumu için, akışa dik olarak uygulanan manyetik alan altındaki laminar akışı analitik olarak incelenmiştir. Boru cidarına sabit ısı akısı uygulanarak, viskoz yayılım ve Joule ısıtmadan kaynaklı ısı üretim terimleri analize dahil edilmiştir. Brinkman sayısı ve Hartmann sayısının hız ve sıcaklık profillerinin yanı sıra Nusselt sayısı üzerindeki etkileri sunulmuştur. Viskoz yayılımı ve Joule ısıtmanın varlığında gözlemlenen karmaşık ısı transfer karakteristikleri tartışılmıştır.
Yağcı, Aydın ve Bali (2021)	Bu çalışmada, elektriksel olarak iletken, viskoz, sıkıştırılamaz ve Newton tipi bir sıvının paralel plakalar arasında ve düzgün bir manyetik alan altında hidrodinamik ve ısı olarak gelişen akışını incelemek için 2 boyutlu sayısal bir analiz yapılmıştır. Problem geometrisi biri sabit diğeri sabit hızla hareket eden elektriksel olarak yalıtılmış iki paralel plakadan oluşmaktadır. Akışkan, duvarlara uygulanan sabit ısı akısı ile ısıtılır ve akışa dik bir dış düzgün manyetik alan uygulanır. Isıl sınır koşulları altında iki farklı durum incelenmiştir: hareketli duvarda ve adyabatik sabit duvarda üniform ısı akısı ve sabit duvar ve adyabatik hareketli duvarda üniform ısı akışı. Viskoz yayılımdan ısı üretimi ve Joule ısınması da analize dahil edilmiştir. Hesaplamalar ANSYS 16.0 paket programında yapılmıştır. Akış bölgesinde, akışkan hareketi ile elektromanyetik alanın etkileşiminden kaynaklanan manyetohidrodinamik (MHD) akışkan akışı ve ısı transferi incelenmiştir. Farklı duvar hızları ve ısıtma koşulları için, Brinkman ve Hartmann sayılarının hız ve sıcaklık profilleri üzerindeki etkisi ve Nusselt sayıları sunulmuştur.
Erdem, Fırat ve Varol (2018)	Lityum sıvısı dıştan manyetik alan indüksiyonuna maruz bırakılan üç boyutlu dairesel bir kanalda sayısal olarak incelenmiştir. Manyetik alan etkisinin akışkan hızını azaltırken, basıncı arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, manyetik alan boru uzunluğu boyunca kanalın farklı bölgelerinde, sıcaklığı farklı şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Sıvı lityum için soğutma uygulamalarında manyetik alan etkisinin soğutmayı iyileştirdiği belirlenmiştir.
Karadağ (2020)	Yüzeyine manyetik alan uygulanmış dairesel kesitli kanal içerisinde akmakta olan Fe_3O_4 -su ferronanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Taşınım ile gerçekleşen ısı transfer hızının; Re sayısı, nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ve sabit manyetik alan uygulaması ile arttığı gözlemlenmiştir.
Erdem, Varol ve Fırat (2021)	Manyetik alan etkisi altındaki bir boruda Al_2O_3 -su nanoakışkanının ısı transferi olgusu laminar akış durumunda sayısal olarak incelenmiştir. Re sayısı, Ha sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının artışıyla ısı transferinin arttığı belirlenmiştir.

Tablo 2. Manyetohidrodinamik akış ile ilgili deneysel yöntemle yapılan çalışmalar

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Racabovadiloğlu (2002)	Manyetikleşme özelliği olmayan bir malzemedan yapılan silindirik bir boruya dik manyetik alanın, tek fazlı laminar manyetohidrodinamik akışa etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Akış yönüne dik olarak yerleştirilen manyetik alanın şiddeti artırıldığında akış hızı ve debisi artmaktadır.
Gedik (2012)	Sıkıştırılamaz, viskoz ve üç farklı özellikte elektriksel iletkenliğe sahip akışkanların, silindirik bir boruda laminar akışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, akışa uygulanan manyetik alanın akışkanların viskozitesini artırarak akış hızlarını azalttığı görülmüştür.
Erdem (2019)	Silindirik bir boru içerisindeki laminar akışta, manyetik alanın etkisi altında tek fazlı sıkıştırılamaz, viskoz ve elektrik iletkenliğine sahip farklı nanoakışkanların davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sonuç olarak; nanoparçacığın ve manyetik alanın akışkanın hızını azalttığı, Re sayısı ile birlikte basıncı ve ısı transferini arttırdığı görülmüştür.
Tekir (2020)	Sabit manyetik alan (DC) ve alternatif manyetik alan (AC) etkisi altındaki dairesel kesitli kanal içerisinde akmakta olan hibrit nanoakışkan (Fe_3O_4 -Cu/su) akışının akış ve ısı transferi karakteristikleri laminar akış durumunda deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sabit manyetik alan etkisi altında hibrit nanoakışkanların ısı performansını, içindeki Fe_3O_4 hacimsel nanopartikül konsantrasyonu ile doğru orantılı sonuç vermektedir. Sabit manyetik alan uygulandığı durumda, çalışma akışkanı olarak %2,0 Fe_3O_4 /su nanoakışkanının kullanımı, en iyi ısı transferi performansını göstermiştir.

Tablo 3. Atımlı Akış ile ilgili yapılan çalışmalar

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Womersley JR (1955)	Atardamarlarda kan akışıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Akışkan dinamiğinde atımlı akış profilleri ilk defa elde edilmiştir. Boyutsuz frekans olan Womersley sayısına ismi verilmiştir.
He ve Ku (1994)	Giriş uzunluğunu sayısal olarak incelemişler ve Womersley sayısının artmasıyla bu uzunluğun azaldığını bulmuşlardır.
Zaloğlu (2003)	Elektriksel iletkenliği olan ikinci mertebe Rivlin-Ericksen akışkanının, aralarında titreşimli bir kaynak bulunan paralel levhalar arasında ve levhalara üniform ve akış yönüne dik bir manyetik alanın uygulanması sonucu gelişen hareketi analitik olarak incelenmiştir. Non-Newtonian etkinin artırdığı radyal hızların, manyetik alanın etkisi ile azaldığı görülmüştür.

Kaynak	Amaç ve Sonuç
Bandyopadhyay ve Layek (2012)	Harici bir enine muntazam manyetik alanın mevcudiyetinde farklı şekilde şekillendirilmiş yerel olarak daraltılmış bir kanalda elektriksel olarak iletken bir sıvının sabit ve atımlı akışlarının çalışması sayısal olarak incelenmiştir. Artan manyetik parametre değerleri ile akış ayırma bölgesinin azaldığını ortaya koymaktadır. Manyetik alan gücündeki artışın, eksenel hızın ilerleyici düzleşmesiyle sonuçlandığı fark edilir. Manyetik parametrenin artan değerleri ile duvar kesme geriliminin değişimleri hem sabit hem de darbeli akış koşulları için gösterilmiştir. Manyetik alan kuvveti M'nin her iki akış koşulu üzerindeki etkisi, eksenel hız profilini azaltmakta olduğu gözlemlenmiştir.
Aygün (2013)	Dairesel kesiti boru içerisindeki atımlı akışın, akış ve ısı transferine etkisini analitik, deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Basınç kaynaklı ve piston kaynaklı akış için frekansın ve genliğin, hidrodinamik ve ısı karakteristیکler üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, frekans arttıkça ısı geçişinin arttığı gözlenmiştir. Atımlı akışla frekans ve genlik değiştirilerek kontrollü ısı geçişi sağlamanın mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
Aydın ve Aygün (2014)	Reynolds sayısının sabit bir değeri için, atımlı akış frekans (F) ve genliğinin (A) gelişme uzunluğu üzerindeki etkisi belirlenmiştir. F'in $1 \leq F \leq 10$ aralığındaki değerleri için hidrodinamik gelişme uzunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahipken, F'in çok yüksek ($F \geq 100$) veya düşük ($F \leq 0.1$) değerleri için bu etkinin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Ayrıca, genliğin de etkisi incelenmiş, F'in düşük değerleri için ($F \leq 0.1$), genlik etkisinin önemli olduğu görülmüştür.
Aygün ve Aydın (2014)	Bir boruda piston tahrikli laminar darbeli akış incelenmiştir. Bu çalışma temel olarak iki bölümden oluşmaktadır: gelişen akış ve tam gelişmiş akış. Çalışma analitik, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada piyasada bulunan bir CFD paketi olan FLUENT kullanılmıştır. Titreşim frekansının sürtünme katsayısı ve hız profilleri üzerindeki etkisi elde edilmiştir. Bu bölümde hidrodinamik olarak gelişen akış sayısal olarak incelenmiştir.
Aygün ve Aydın (2015)	Bu çalışmada, bir boru içerisindeki basınç kaynaklı laminar atımlı akış sayısal olarak incelenmiştir. Hidrodinamik olarak gelişmekte olan akış ve tam gelişmiş akış koşullarının her ikisi de göz önüne alınmıştır. Simülasyonlarda bir ticari CFD paket programı olan FLUENT kullanılmaktadır. Zaman-ortalama Reynolds sayısı için sabit bir değer dikkate alınmıştır ($Re=1000$). Boyutsuz frekansın altı farklı değeri ($F=0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000$) ve boyutsuz genliğin üç farklı değeri ($A=0.1, 0.5$ ve 0.95) incelenmiştir. Hem hidrodinamik olarak gelişmekte olan akış hem de tam gelişmiş akış analiz edilmiştir. Atımlı giriş hızı genlik ve frekansının, hız alanının yanı sıra sürtünme katsayısına etkisi belirlenmiştir.

2.1. Tez Çalışmasının Amacı

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip bir akışkanın, ısı 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. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, daha öncesinde bu kapsamda yapılmamış yeni bir çalışma literatüre kazandırılmıştır.

2.2. Tez Çalışmasının Kapsamı

Bu çalışmada, manyetik alan ve atımlı akışın boru içi laminar akışa etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Dört farklı manyetik alan değerinde ($B=0\text{ T} - 0.05\text{ T} - 0.1\text{ T} - 0.15\text{ T}$), üç farklı boyutsuz frekansta ($F=0.01 - 1 - 100$) ve $Re=1000$ değerinde yapılan çalışmada; hız, sıcaklık ve Nusselt sayısındaki 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. MHD doğrulama aşamasında literatürden farklı olarak; yarım kesitli boru geometrisinde, yapılandırılmış sınır tabaka ağı ile ve malzeme özellikleri program içerisindeki denklemler yardımıyla tanımlanarak çözülmüştür. Bu hususların literatürdeki çalışmadan farklı olmasının sebepleri şunlardır: Tam boru geometrisinde artık (*residual*) olarak tanımlanan terimlerin -verilen taşıyıcı (*transport*) denklem çözümlerinin tam çözümden sapma ölçütü- fazla olacağından yakınsama problemlerine neden olmaktadır, bu sebeple yarım kesitli boru tercih edilmiştir. Akış problemlerinde boru cidarındaki kaymama sınır şartı sebebiyle bu bölgedeki akışkan davranışlarının daha hassas incelenmesi gerekmektedir, bu sebeple hem yapılandırılmış ağ hem de cidara doğru sıklaşan ağ yapısının (*inflation*) uygulanması tercih edilmiştir.

Bu çalışmada zaman adımındaki en fazla iterasyon sayısının (*Max iterations / Time step*) belirlenmesinde de bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Farklı iterasyon sayılarında analizler yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır ve uygun iterasyon değeri belirlenmiştir.

Daha sonra atımlı akış ve manyetik alanın birlikte çözümleriyle çalışma tamamlanmıştır ve bulgular ve tartışmalar kısmındaki sonuçlara ulaşılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip bir akışkanın, ısı 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.

Sayısal analiz çalışmaları, mühendislik problemlerinde sıklıkla kullanılmakla beraber, deneysel çalışmalara göre daha pratik ve az maliyetli olduğundan, gerçek sonuçlara nispeten yakın sonuçlar sağlaması açısından, deneysel çalışmalardan önce veya birlikte kullanılmaktadır.

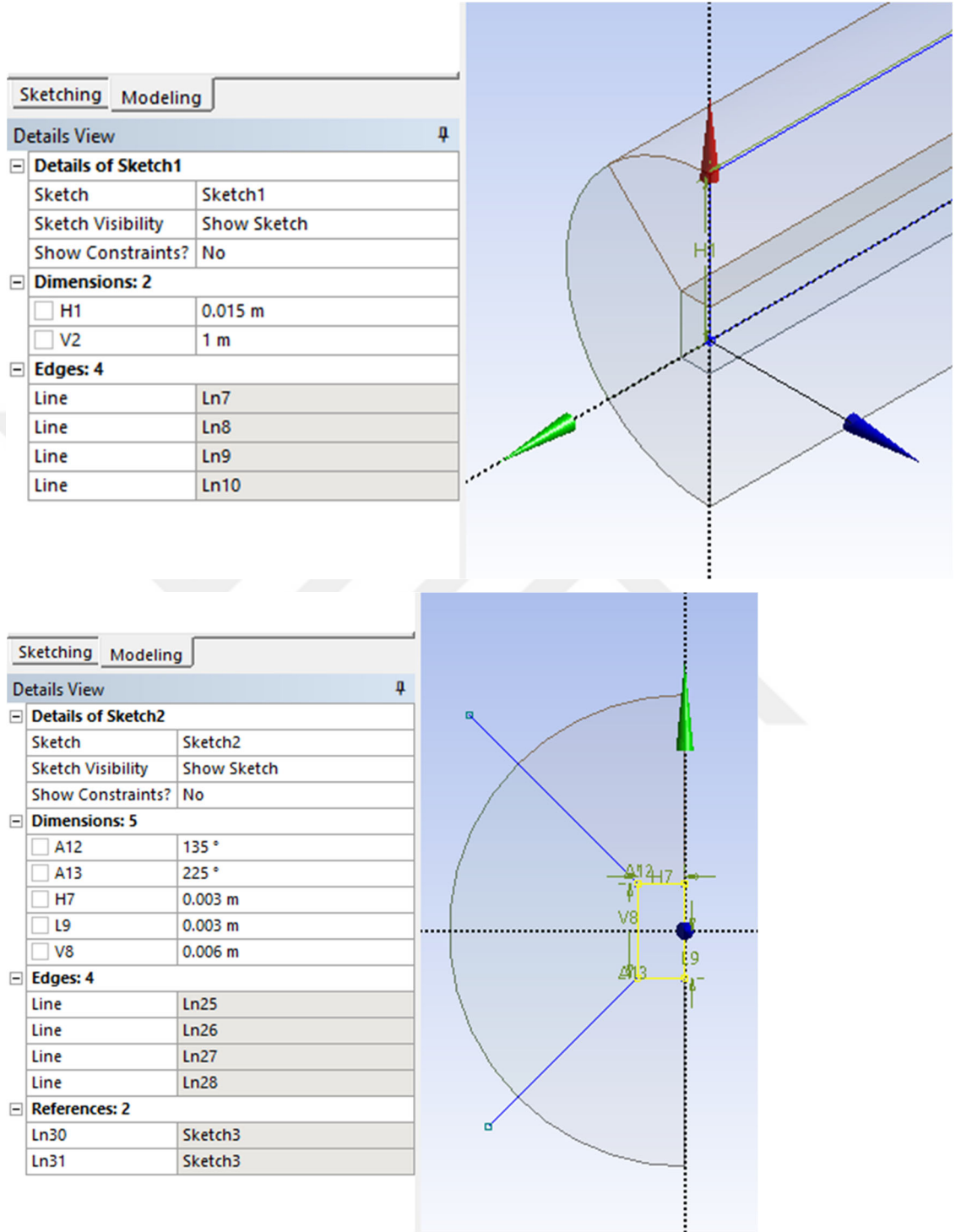
Sayısal analiz çalışmalarından birisi olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkan hareketlerinin incelenmesinde ve ısı transferi uygulamalarında kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin ana parametrelerinden birisi ağ yapısı diğeri ise sınır koşullarıdır. Bu iki parametre ne kadar doğru ve gerçeğe yakın oluşturulursa sonuçlar da o kadar doğru çıkmaktadır. Analize başlamadan önce ağ yapısında ağdan bağımsız çözümün oluşturulması gerekmektedir. Uygun ağ yapısı ve yeterli miktarda düğüm noktası elde edilmelidir. Analizi yapılacak geometriye; uygun olmayan ağ yapısı, düşük veya çok fazla miktarda düğüm noktası ile yapılan çözümlerdeki sonuçlar yanıltıcı veya gerçek sonuçlardan uzak olabilir. Ayrıca çok fazla düğüm noktası içeren ağ yapısının analiz süresi de çok uzun olabilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2020: 349).

HAD analizleri üç ana işlem basamağından oluşmaktadır. Bunlar; ön işlemci, çözümleyici ve son işlemcidir. Ön işlemci kısmında; analizi yapılacak geometrinin hazırlanması, geometriye uygun ağın oluşturulması ve sınır şartlarının tanımlanması yapılmaktadır. Çözümleyici kısımda; problemin hangi yöntem ile çözüleceğinin belirlenmesi (sonlu fark, sonlu hacim, sonlu elemanlar), ayrıklaştırma işlemi ve çözüm yer almaktadır. Son işlemci kısmında ise hesaplanan çözümlerin çeşitli grafikler veya şekiller vasıtası ile elde edilmesi sağlanmaktadır (Taşkesen, 2021: 35).

3.1. Geometrinin Oluşturulması

ANSYS Design Modeler kullanılarak, $D=0.03$ m ve $L=1$ m boyutlarında 3B yarım kesitli dairesel kanal geometrisi oluşturulmuştur. Ağ yapısı kısmında yapılandırılmış ağ kullanılacağından Şekil 10'da görüldüğü gibi geometri düzenlenmiştir. Boru merkezinde

oluşturulan dikdörtgenin boyutlarının analiz sonuçlarını etkilediği çalışma sürecinde görülmüştür ve farklı ölçülerde çalışmalar yapılarak uygun ebatlar belirlenmiştir.

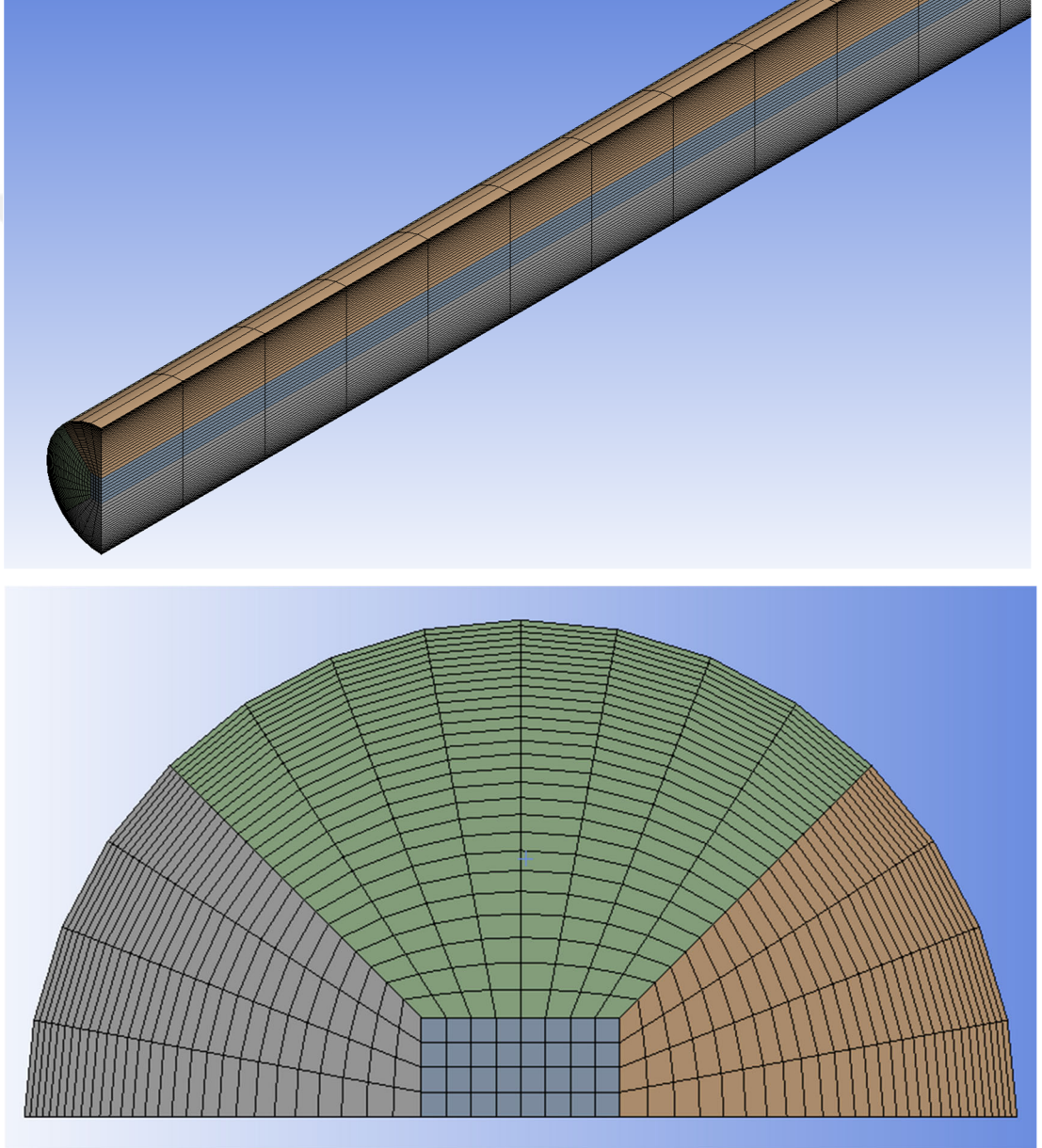


Şekil 10. ANSYS’de geometrinin oluşturulma görselleri

3.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

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

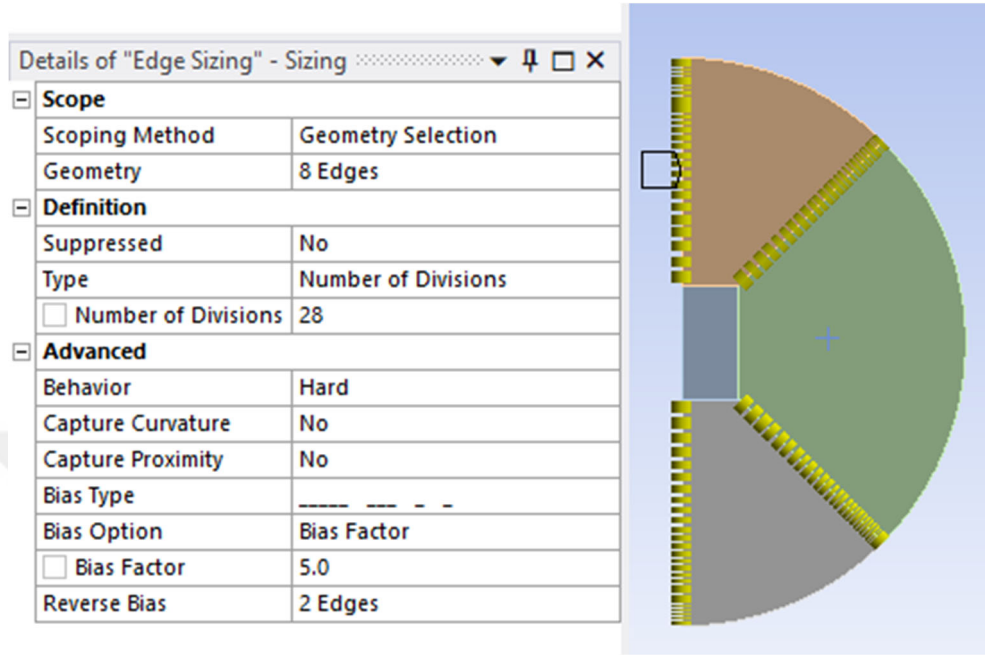
(*structured grid*) ve yapılandırılmamış ağ (*unstructured grid*) olarak ayrılmaktadır. Yapılandırılmamış ağ yapısı daha kolay oluşturulabilmektedir ancak birtakım hatalara yol açmakta ve daha fazla sayıda düğüm noktası oluşturmaktadır. Boru cidarındaki kaymama şartı nedeniyle cidara yakın bölgelerde istenilen hassasiyette çözüm yapılamamaktadır. Bu sebeple, sınır tabaka ağı ile birlikte, akış değişkenlerinin hesaplanacağı hücreleri tanımlayacak ağı yapılandırılmış olması tercih edilmektedir. Bu çalışmada, Şekil 11’de gösterildiği gibi yapılandırılmış ağ uygulanmıştır.



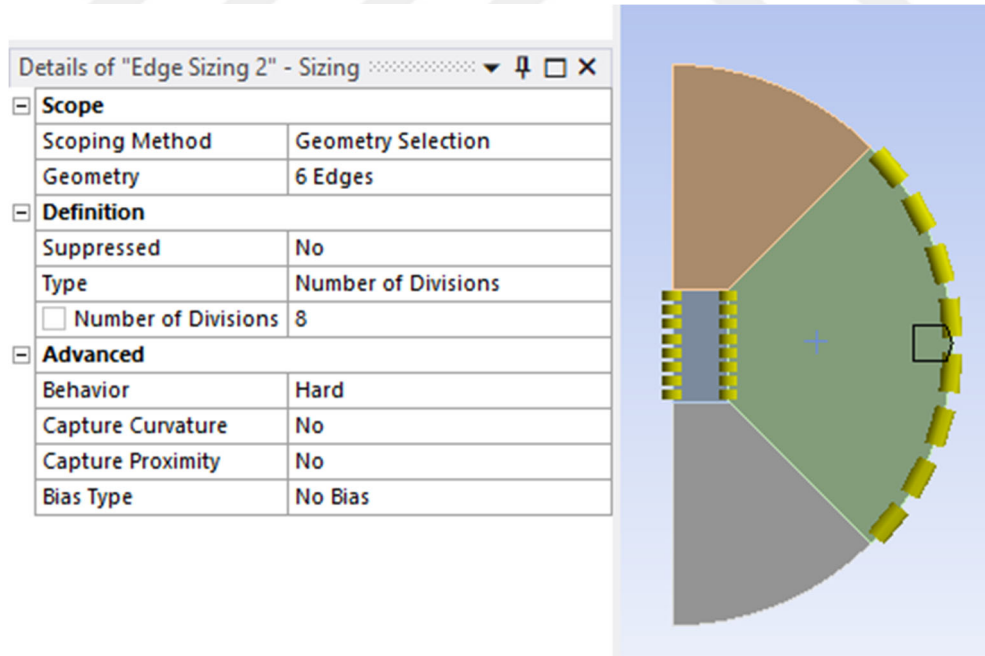
Şekil 11. Yapılandırılmış ağ görüntüsü

Sayısal çalışmalarda bir diğer önemli husus yapılan çözümlerin ağ bağımsızlığının gösterilmesidir. Her ne kadar ağ yapısı düzgün oluşturulsa da ideal yapı sağlanamamaktadır veya yapılan ağı uygun olup olmadığının denetlenmesi

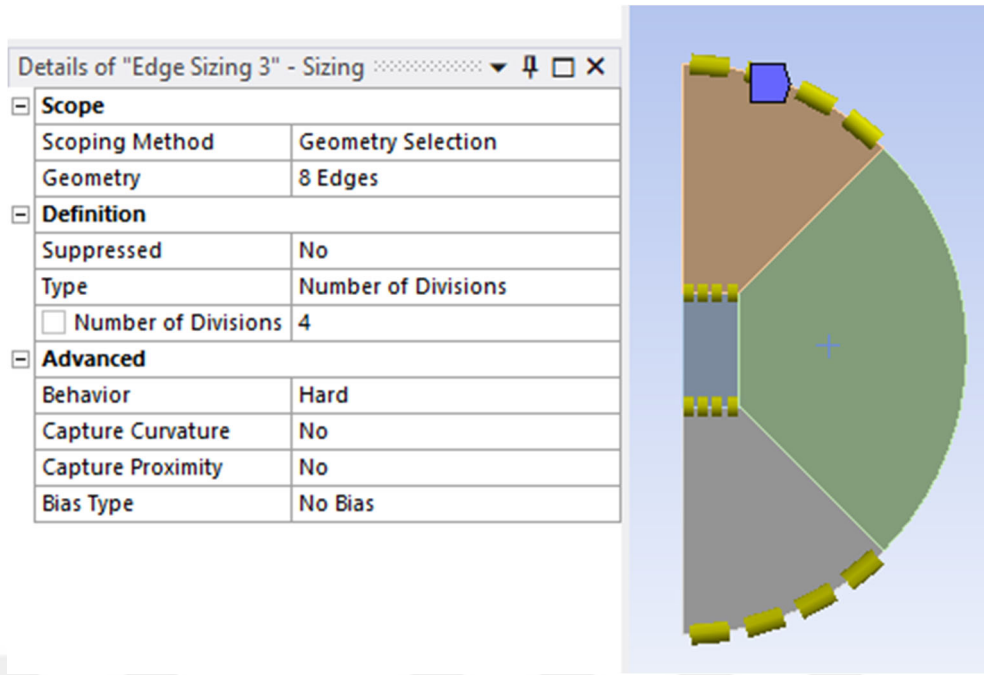
gerekmektedir. Bu sebeple analiz çözümlerine geçmeden önce ağ bağımsızlık testleri (*grid independence test*) yapılmaktadır. Bu çalışmada yapılacak ağ bağımsızlığı testleri için, geometriyi oluşturan kenarlar belirli oranlarda bölünmüştür (Şekil 12-13-14-15).



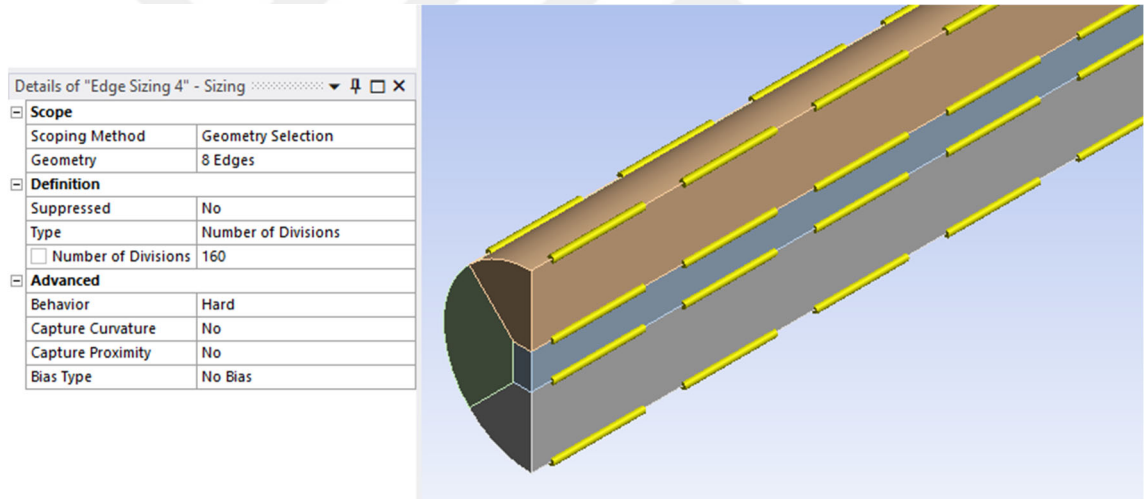
Şekil 12. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 1



Şekil 13. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 2



Şekil 14. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 3



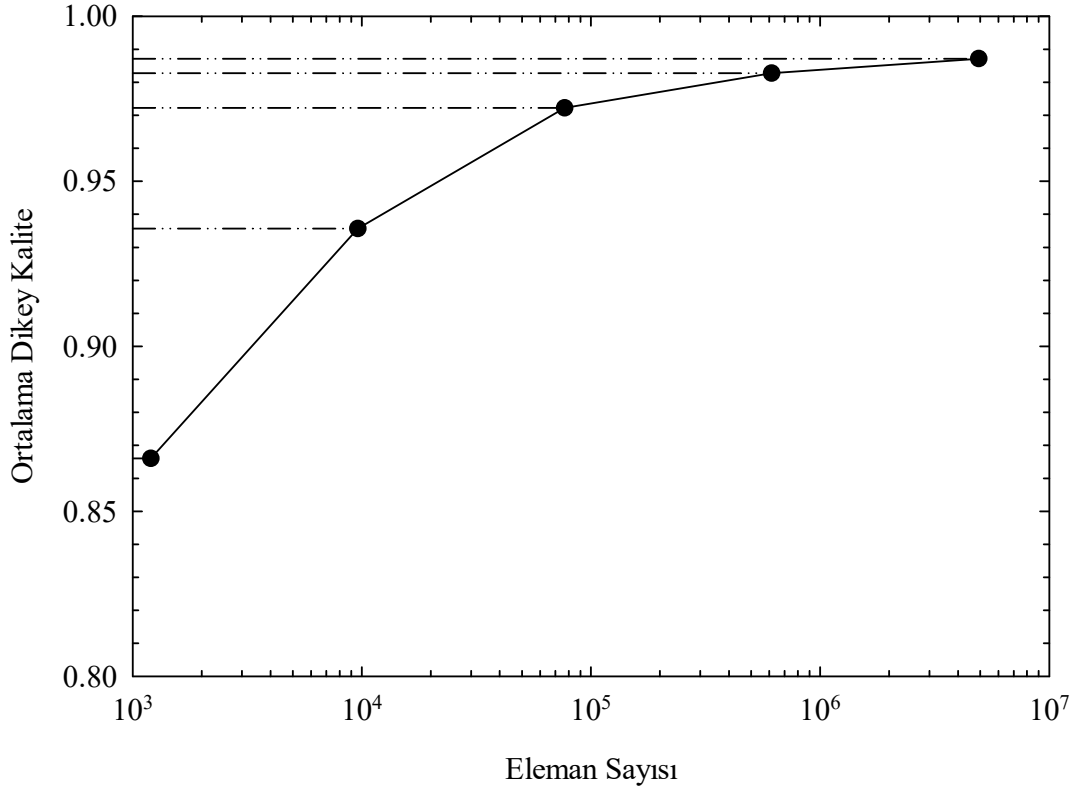
Şekil 15. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 4

Oluşturulan kenar boyutlandırmaları (*edge sizing*) ile parametrik çalışma yapılmıştır ve boyutlandırma sonucu oluşan değerler Tablo 4'te belirtilmiştir.

Tablo 4. Ağ yapılarının eleman sayılarına göre değişimi

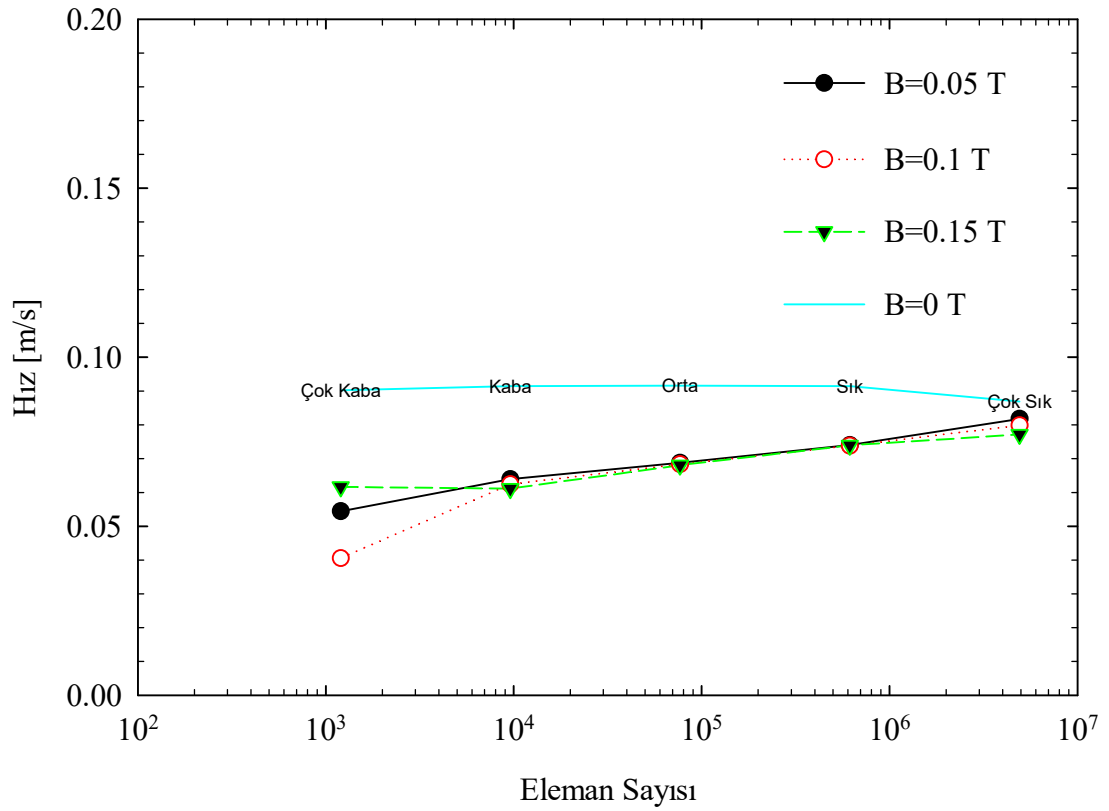
Eleman Sayısı	Hız (m/s)	Ağ Yapısı
1.20E+03	0.090	Çok Kaba
9.60E+03	0.091	Kaba
7.68E+04	0.092	Orta
6.14E+05	0.092	Sık
4.92E+06	0.092	Çok Sık

Ağ yapısında bakılması gereken bir diğer husus hücre kaliteleridir. Bunlardan sıklıkla kullanılanları; hücrelerin en-boy oranı (*aspect ratio*), çarpıklık (*skewness*) ve *skewness* değerinin tersi olan *orthogonal quality* değeridir. İdeal dikey kalite (*orthogonal quality*) değeri 1'dir ve hesaplanan değerler 1'e yaklaştıkça kalitenin arttığını ifade etmektedir. Çalışmamızdaki dikey kalite değerleri Şekil 16'da belirtildiği gibidir.



Şekil 16. Eleman sayısına göre ortalama dikey kalite grafiği

Yapılan ağ bağımsızlık testleri, boru çıkışındaki aksenal hız değerleri hesaplanarak oluşturulmuştur ve sonuçlar Şekil 17'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre en uygun hücre yapısının “sık ağ” olduğu sonucuna varılmıştır ve bundan sonraki hesaplamalar bu ağ boyutunda gerçekleştirilmiştir.

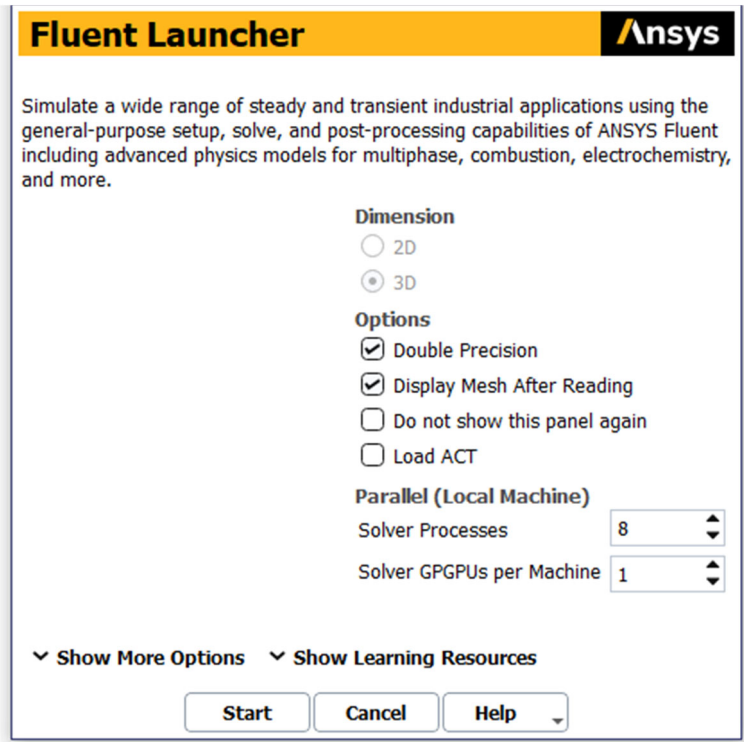


Şekil 17. MHD ağ bağımsızlık testleri hız değerleri

Manyetik alan altındaki ağ bağımsızlık test değerleri Şekil 17’de görülmektedir. Bu sonuçlara göre; manyetik alan uygulanmadan ve $B=0$ T değerindeki sonuçların; sık ağa kadar tam uyum içerisinde olduğu ancak çok sık ağda, yakınsama kriterleri sebebi ile tam uyum içerisinde olmadığı görülmüştür.

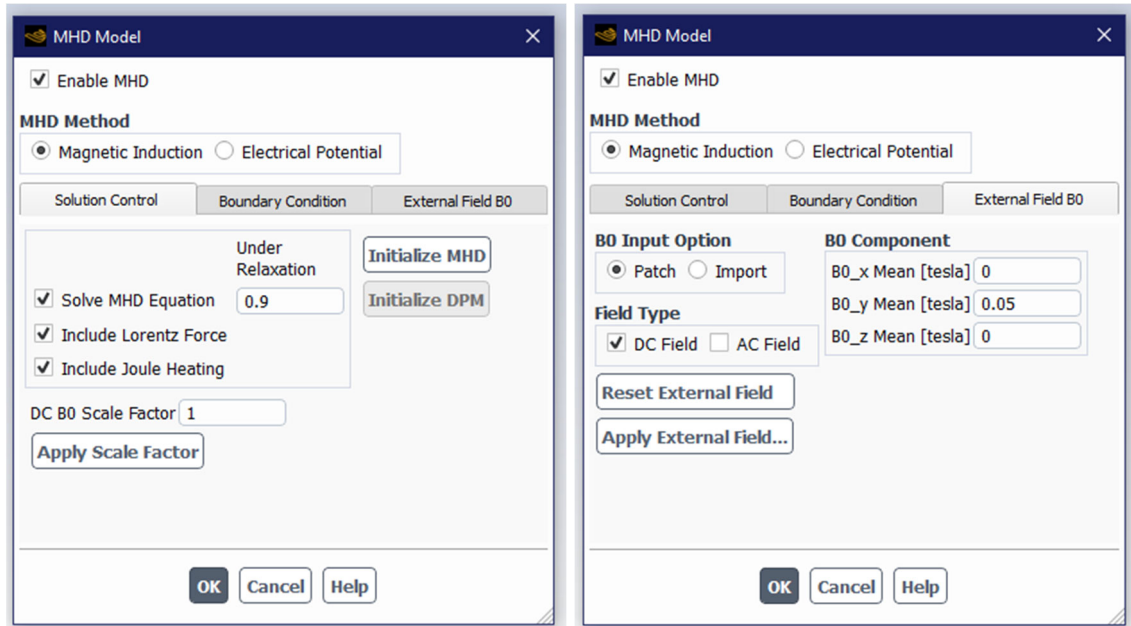
3.3. Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Analiz

Sayısal çalışmada, sınır koşullarının belirlenmesi ve problemin çözülmesi bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmadaki çözümler; 3B, çift hassasiyet (*double precision*) ve çözümlerin hızlı olabilmesi için 8 paralel çekirdek ve 1 ekran kartı kullanılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. ANSYS Fluent ayar menüsü

Bu çalışma; zamana bağlı olarak, laminar akış şartlarında ve MHD modülü kullanılarak manyetik alan uygulaması ile çözülmüştür. MHD modülünün etkinleştirilmesi Ek 1.'de belirtilmiştir. MHD modülü ayarları Şekil 19'da görülmektedir.



Şekil 19. MHD model ayarları

Bu çalışmada 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, Şekil 20'deki gibi tanımlanmıştır. Özgül ısı değeri ise, program içerisinde denklem oluşturabilme özelliğinin olmaması nedeniyle, polinom (*polynomial*) olarak tanımlanmıştır.

Şekil 20. Malzeme özellikleri tanımlama görüntüsü

Sıvı lityumun fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı ($300 \leq T \leq 600K$) ampirik ilişkiler şeklinde aşağıdaki Eşitlik 5’de verilmiştir (Selimli, 2015):

$$\rho = 558.4[kg/m^3] - 0.101[kg/m^3 \cdot K^{-1}] * StaticTemperature \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$C_p = 5714.5 - 4.417T + 0.0033T^2 \text{ kJ/kgK} \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$k = 21.42[W/m \cdot K] + 0.0523[W/m \cdot K^2] * StaticTemperature - 1.371E - 5[W/m \cdot K^3] * StaticTemperature^2 \quad (\text{Eşitlik 7})$$

$$\mu = 0.0015[Pa.s] - 3E - 6[Pa.s/K] * StaticTemperature + 2E - 9[Pa.s/K^2] * StaticTemperature^2 \quad (\text{Eşitlik 8})$$

Bu eşitliklerde:

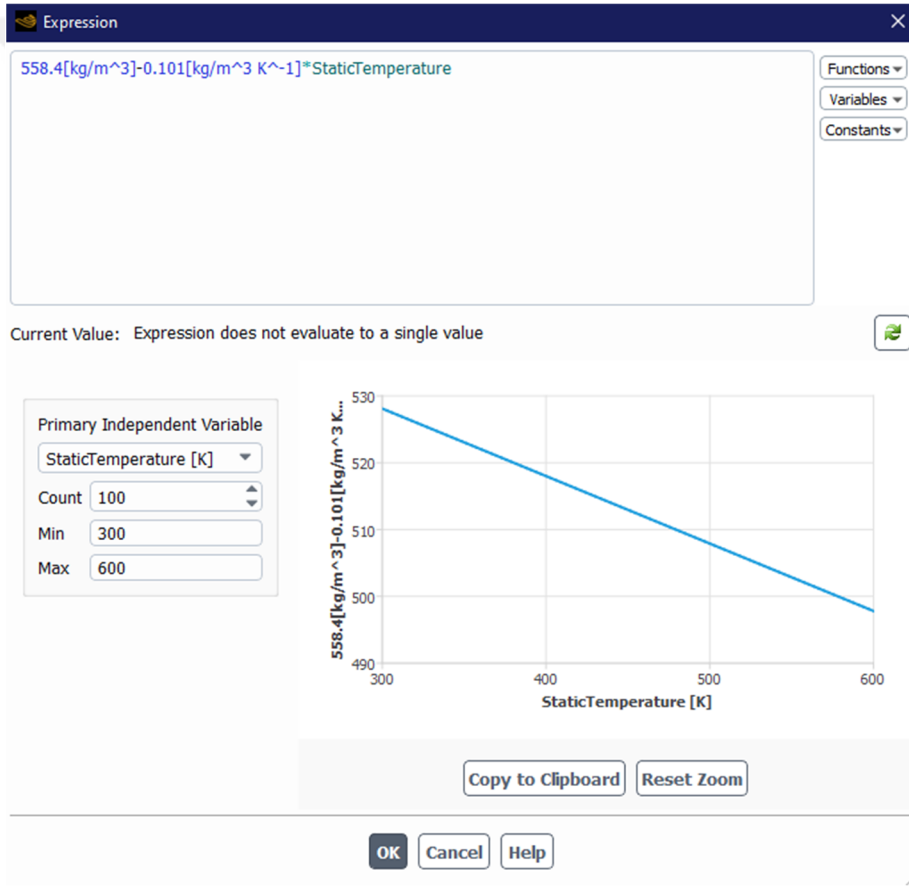
ρ : Yoğunluk [kg/m³],

C_p : Özgül ısı [J/kg K],

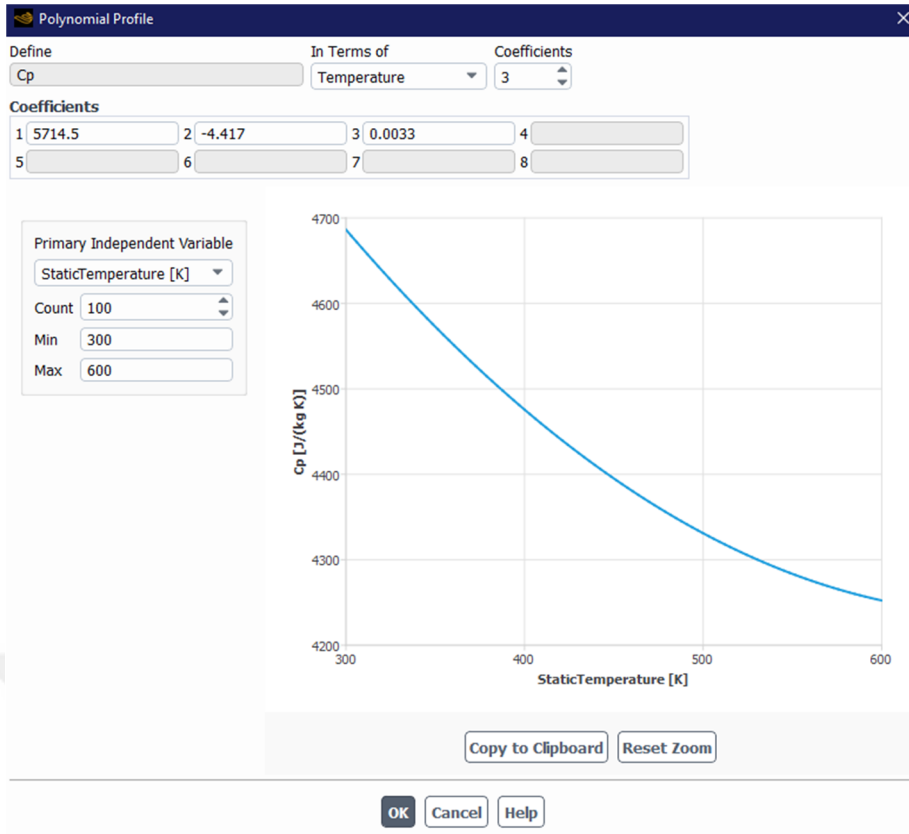
k : Isıl iletkenlik [W/m K],

μ : Dinamik viskoziteyi [kg/m s] ifade etmektedir.

Belirtilen denklemlerin programa tanımlanmaları Şekil 21-22-23-24'te gösterilmiştir.



Şekil 21. Yoğunluk değişiminin tanımlanması



Şekil 22. Özgül ısıнын tanımlanması



Şekil 23. Isı iletim katsayısının tanımlanması



Şekil 24. Dinamik viskozitenin tanımlanması

Sıvı lityuma ait elektrik iletkenliği (Eşitlik 9) ve manyetik geçirgenliği (Eşitlik 10) değerleri sabit (*constant*) olarak tanımlanmıştır.

$$\frac{1}{\rho_e} = 4 \times 10^6 \text{ [S/m]} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$\mu_e = 1.2 \times 10^{-6} \text{ H/m} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

Bu eşitliklerde:

$\frac{1}{\rho_e}$: Elektriksel iletkenlik [S/m],

μ_e : Manyetik geçirgenliğini [H/m] ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan sınır koşulları; giriş (*inlet*) hızı (*velocity*), zamana bağlı olduğu için, kullanıcı tanımlı fonksiyon (*UDF: User Defined Function*) olarak programa tanımlanmıştır (Ek 2). Giriş (*inlet*) ve yüzey (*wall*) sıcaklıkları sabit kabul edilmiştir ve sırasıyla şu şekildedir: $T_i = 300 \text{ K}$ ve $T_w = 573.15 \text{ K}$. Analizlerde sabit ısı akısı kabulü gerçek koşullara daha uygun olmaktadır ancak sabit yüzey sıcaklığı, ısı depolama gibi faz

değiştiren sistemlerde (faz değişiminde sıcaklığın sabit kalması sebebiyle) ve MHD gibi özel durumlarda daha uygun bir kabuldür ve çalışmada bu prensip benimsenmiştir.

Hesaplamalarda, laminar akış şartlarında çözüm yapılacağı için $Re = 1000$ kabul edilmiştir ve giriş hız Eşitlik 11’de hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvet}}{\text{Viskoz kuvvet}} = \frac{\rho x D x U}{\mu} = \frac{528.1 x 0.03 x u}{7.8 x 10^{-4}} = 1000 \rightarrow u = 0.04923 \text{ m/s}$$

(Eşitlik 11)

Bu eşitlikte:

Re: Reynolds sayısı,

ρ : Yoğunluk [kg/m^3],

D: Boru çapı [m],

u: Hız [m/s],

μ : Dinamik viskoziteyi [kg/m s] ifade etmektedir.

Atımlı akış için; $Re=1000$ için $u = 0.04923 \text{ m/s}$, genlik $A=0.5$ ve üç farklı boyutsuz frekans ($F=0.01 - 1 - 100$) kabul edilmiştir. Frekans, periyot ve açısal hız Eşitlik 12-13-14 ile elde edilmiştir.

$$F = \frac{r^2 x f}{v} = \frac{0.015^2 x f}{1.5 x 10^{-6}} \rightarrow f = 0.00006564 \text{ s}^{-1}$$

(Eşitlik 12)

$$T = \frac{1}{f} = 15233.65385 \text{ s}$$

(Eşitlik 13)

$$\omega = 2\pi f = 0.0004125 \text{ rad/s}$$

(Eşitlik 14)

Bu eşitliklerde:

F: Boyutsuz frekans,

r: Borunun yarıçapı [m],

f: Frekans [s^{-1}],

v: Kinematik viskozite [m^2/s],

T: Periyot [s],

ω : Açısal hızı [rad/s] ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında akışın ısı olarak tam gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişmekte olan bölgedeki davranışları incelenmiştir. Hidrodinamik sınır tabaka

kalınlığının ısı sınır tabaka kalınlığına oranını temsil eden, boyutsuz bir parametre olan Prandtl sayısı ile ısı ve hidrokinamik gelişme uzunlukları Eşitlik 15-16 ve 17’de ifade edilmiştir.

$$Pr = \frac{\text{Viskoz difüzyon}}{\text{Isıl difüzyon}} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{4686.4 \times 7.8 \times 10^{-4}}{35.88} = 0.102 \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$L_t = 0.05 \times Re \times D \times Pr = 0.05 \times 1000 \times 0.03 \times 0.102 = 0.153 \text{ m} \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$L_h = 0.05 \times Re \times D = 0.05 \times 1000 \times 0.03 = 1.5 \text{ m} \quad (\text{Eşitlik 17})$$

Bu eşitliklerde:

Pr : Prandtl sayısı,

C_p : Özgül ısı [J/kg K],

μ : Dinamik viskoziteyi [kg/m s],

k : Isıl iletkenlik [W/m K],

L_t : Isıl gelişme uzunluğu [m],

Re : Reynolds sayısı,

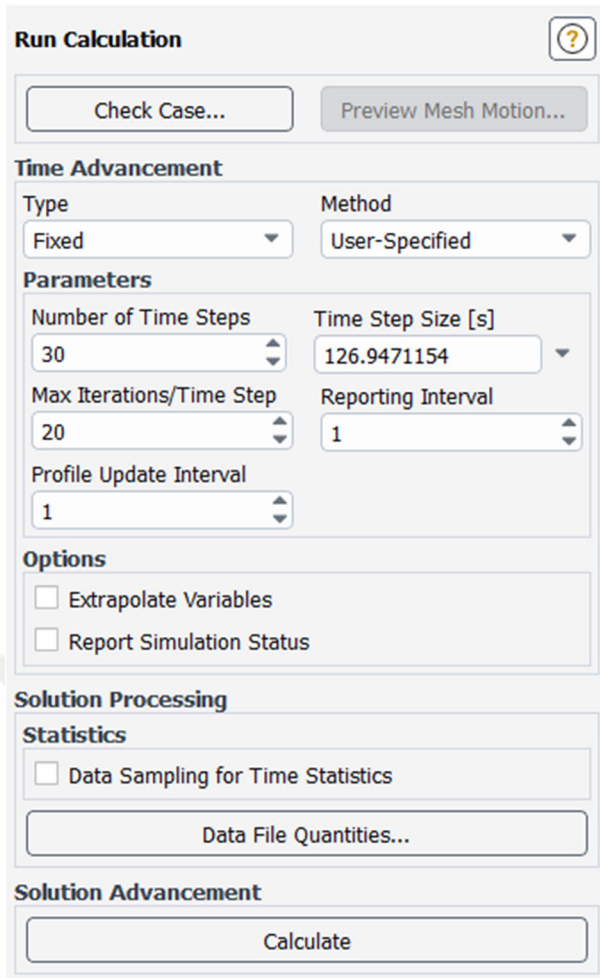
D : Boru çapı [m],

L_h : Hidrokinamik gelişme uzunluğunu [m] ifade etmektedir.

Analizlerde; süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için yakınsama kriterleri 10^{-6} olarak tanımlanmıştır. Çözüm yöntemi ve hesaplama ayarları Tablo 5 ve Şekil 25’de belirtilmiştir.

Tablo 5. Analiz çözümünde kullanılan ayrıklaştırma yöntemleri

Parametre	Yöntem
Basınç-Hız ilişkisi	Basit (<i>Simple</i>)
Basınç	İkinci Derece (<i>Second Order</i>)
Momentum	İkinci Derece (<i>Second Order</i>)
Enerji	İkinci Derece (<i>Second Order</i>)
Zaman Formülasyonu	İkinci Derece Kapalı (<i>Second Order Implicit</i>)



Şekil 25. ANSYS Fluent'te hesaplama ayarlarının görüntüsü

Sayısal analizin son aşaması sonuçlar kısmıdır. Buradan elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde irdelenecektir. Elde edilen sonuçların boyutlardan bağımsız olması için hız, sıcaklık ve boru çapı değerleri boyutsuz olarak grafikler ile sunulmuştur.

Boyutsuz sayıların kullanılmasının temel sebepleri, problemdeki parametre sayısının az olması ve parametreler arasındaki ilişkilerin kavranmasını sağlamaktır. Bu sebeple yapılan çalışmada boyutsuz hız ve sıcaklıklardan ve diğer boyutsuz sayılardan yararlanılmıştır. Boyutsuz hız Eşitlik 18 ile elde edilmektedir.

$$u^* = u/u_{ort} \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Bu eşitliklerde:

u^* : Boyutsuz hız,

u : Anlık hız [m/s],

u_{ort} : Ortalama hızı [m/s] ifade etmektedir.

Boyutsuz sıcaklık için logaritmik ortalama sıcaklık farkı, Eşitlik 19-20-21 yardımıyla, Eşitlik 22 ile elde edilmiştir.

$$\Delta T_{ln} = (\Delta T_e - \Delta T_i) / \ln(\Delta T_e / \Delta T_i) \text{ [K]} \quad (\text{Eşitlik 19})$$

$$\Delta T_e = T_s - T_e \text{ [K]} \quad (\text{Eşitlik 20})$$

$$\Delta T_i = T_s - T_i \text{ [K]} \quad (\text{Eşitlik 21})$$

Bu eşitlikte:

ΔT_{ln} : Logaritmik ortalama sıcaklık farkı [K],

ΔT_e : Borunun çıkışında yüzeyle akışkan arasındaki sıcaklık farkı [K],

ΔT_i : Borunun girişinde yüzeyle akışkan arasındaki sıcaklık farkı [K],

T_s : Yüzey sıcaklığı [K],

T_i : Giriş sıcaklığı [K],

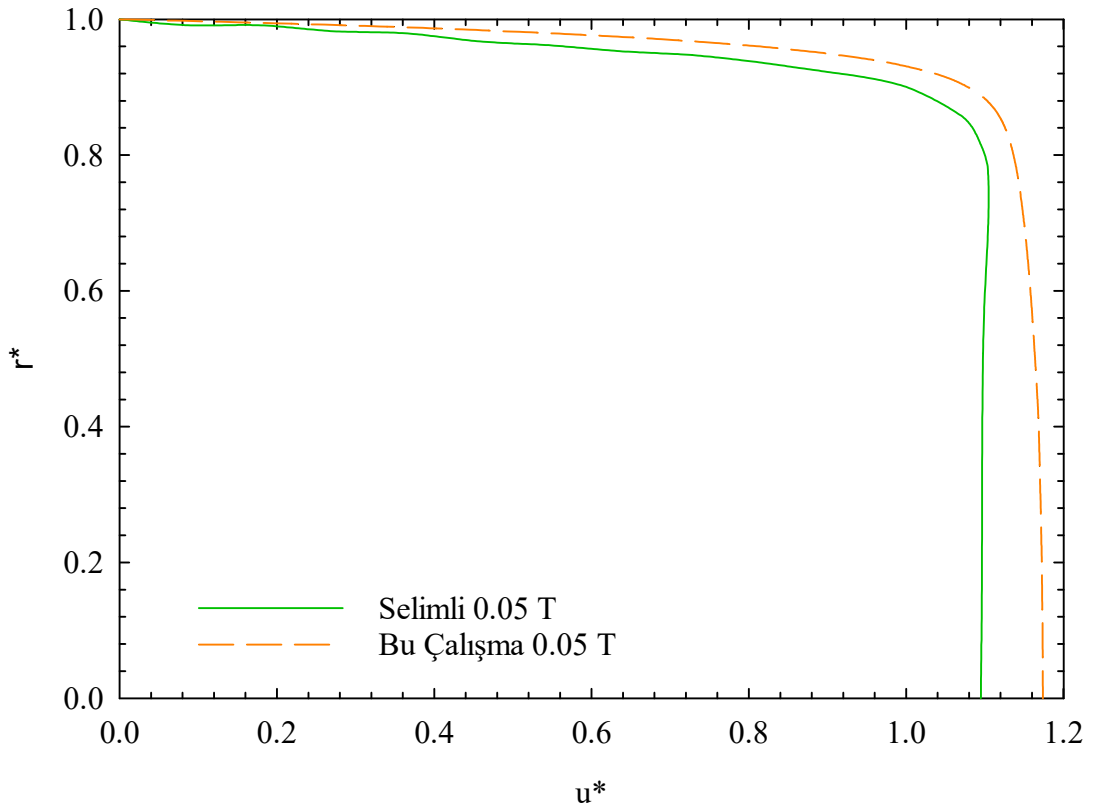
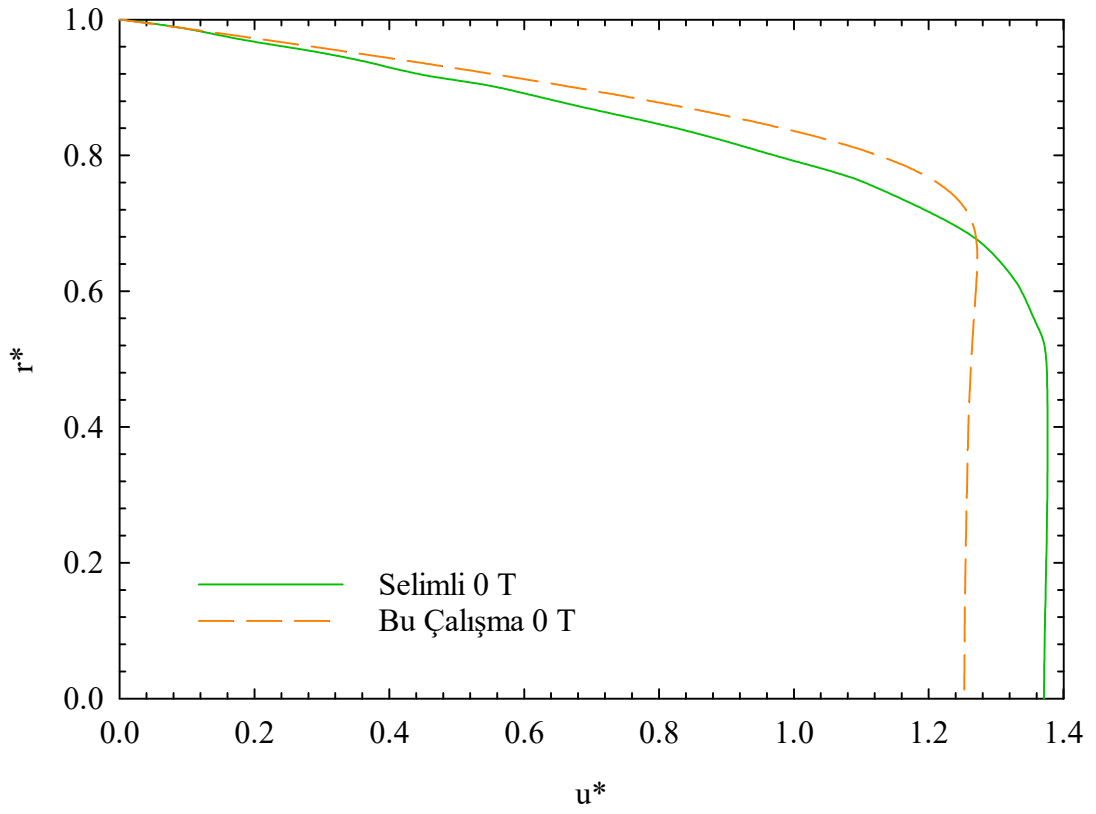
T_e : Çıkış sıcaklığını [K] ifade etmektedir.

Boyutsuz sıcaklık Eşitlik 22 ile elde edilmektedir.

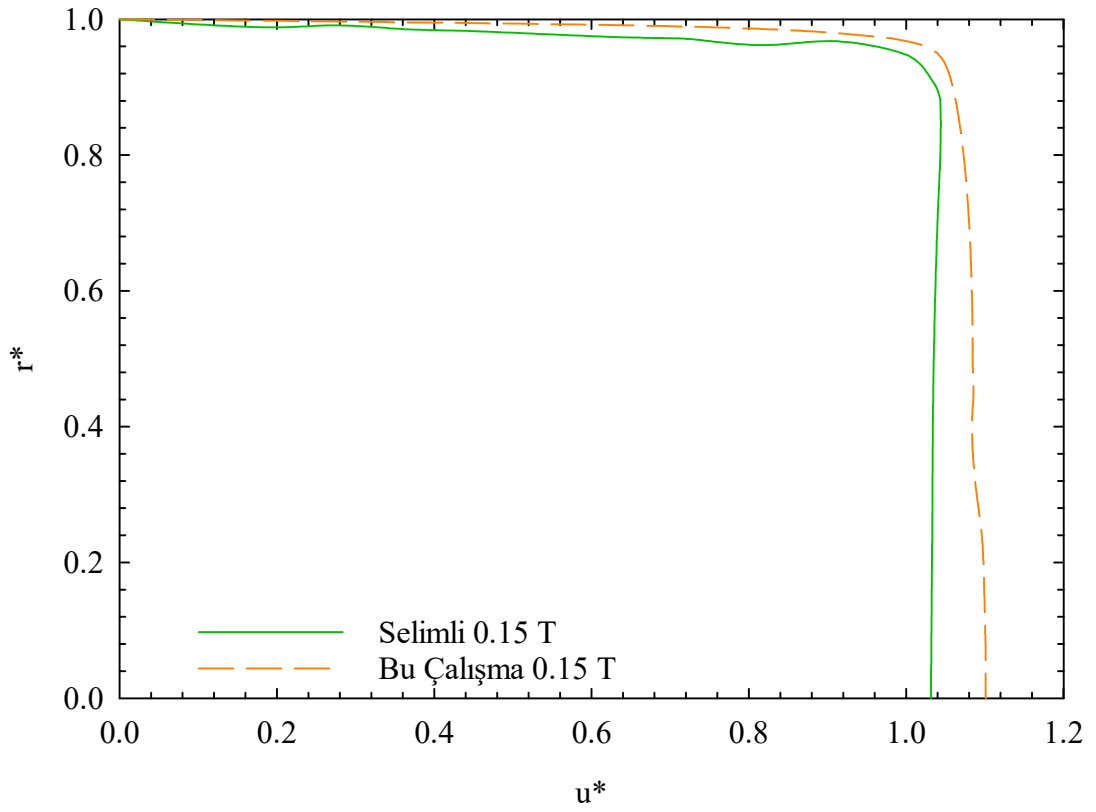
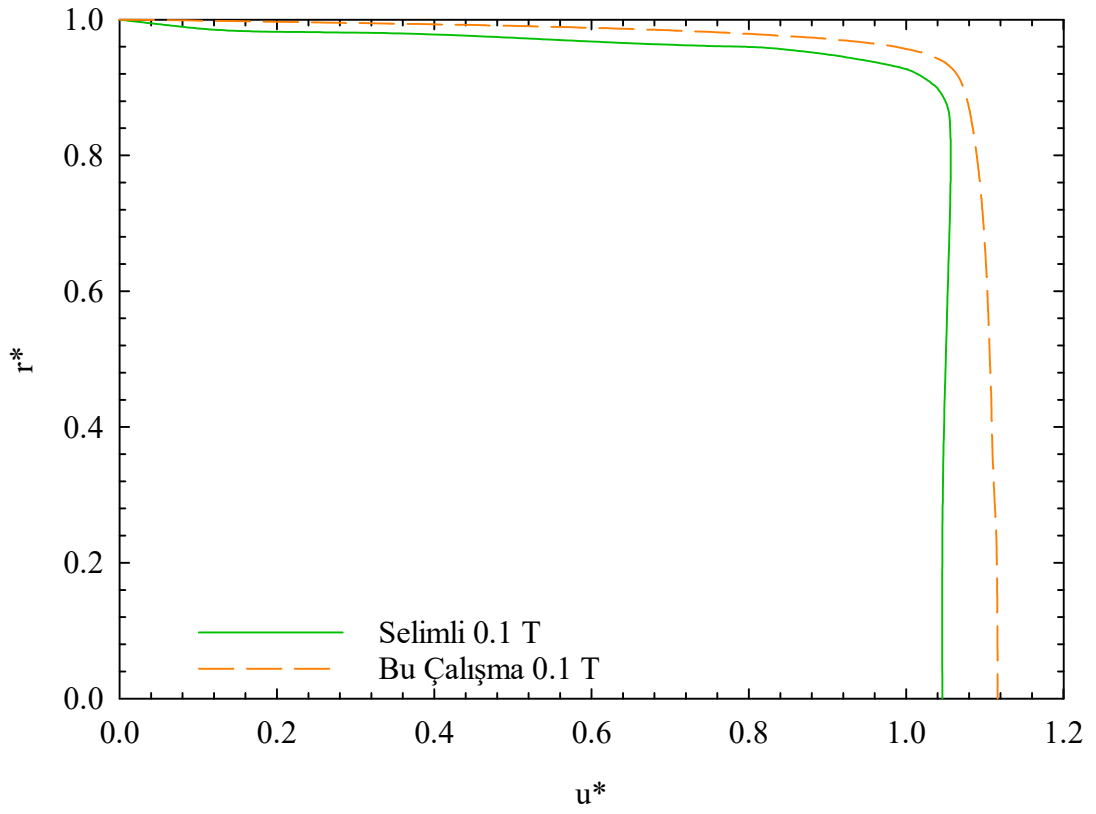
$$\theta^* = T / T_s - T_m = T / \Delta T_{ln} \quad (\text{Eşitlik 22})$$

3.4. MHD ve Atımlı Akış için Sayısal Modelin Doğrulama Çalışmaları

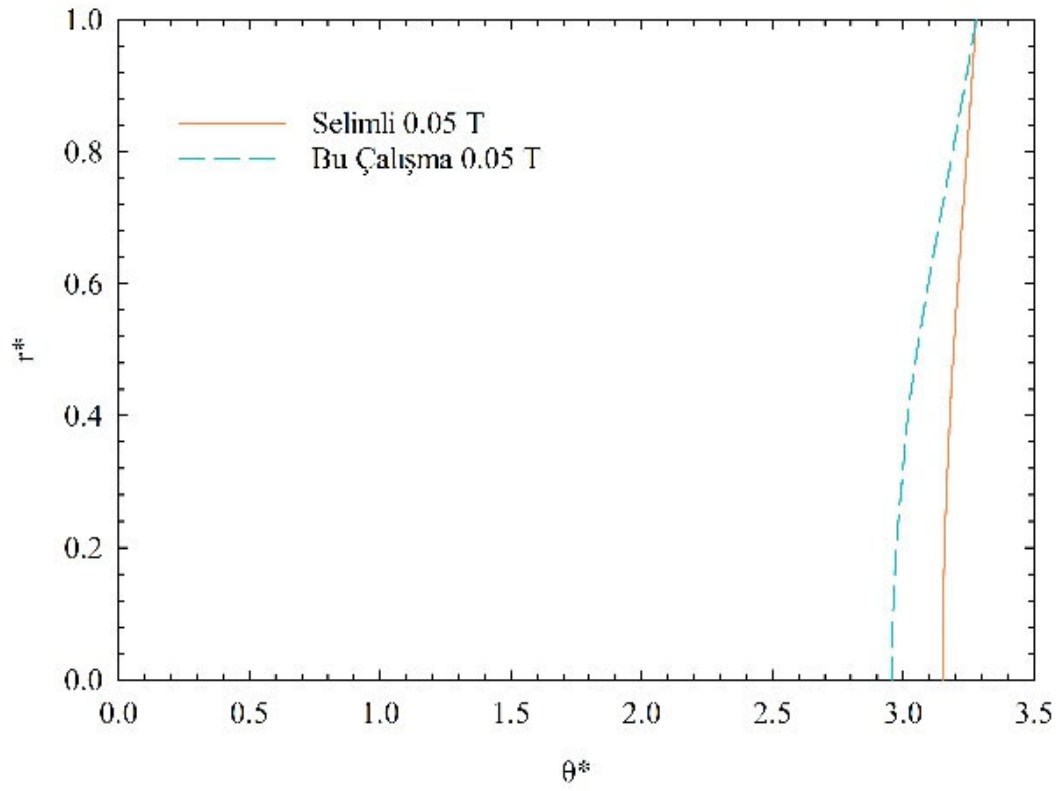
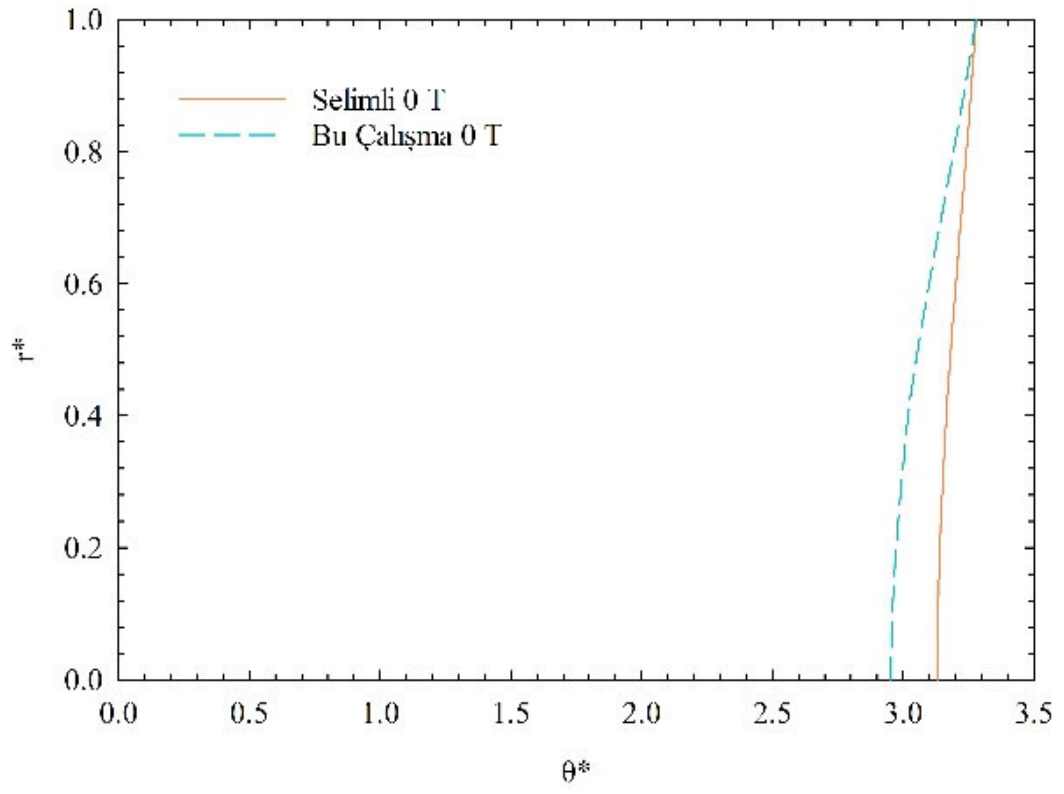
Bu çalışmada MHD uygulanarak yapılan çözüm yönteminin doğruluğu, literatürde daha önce -Selimli (2015) tarafından- yapılmış farklı bir çalışma ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Her iki çalışmada da akışkan olarak elektrik iletkenliğine sahip sıvı lityum kullanılmıştır ve benzer sınır koşulları ile $Re=2200$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



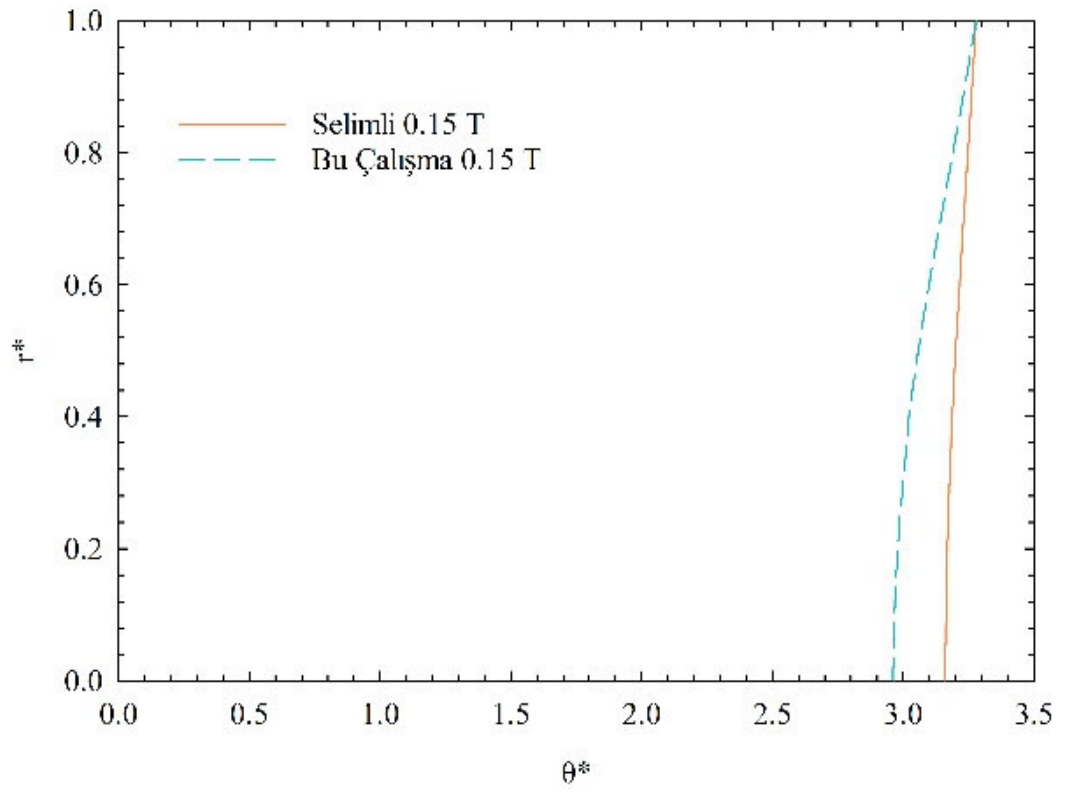
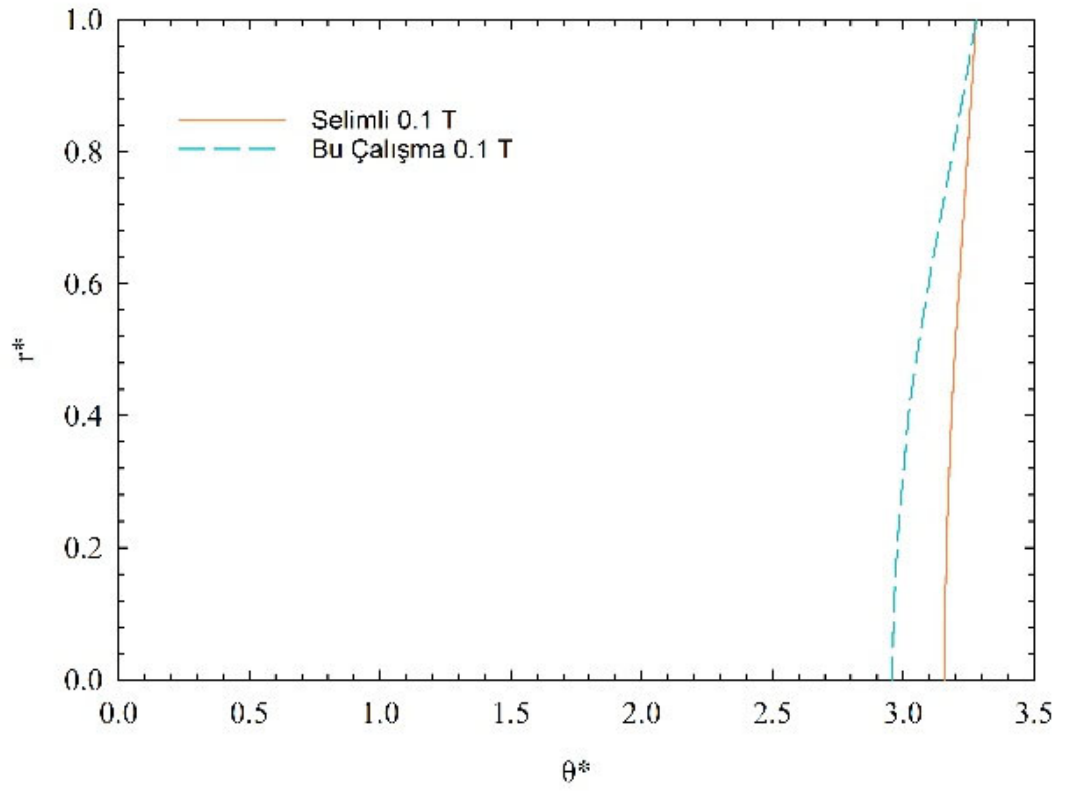
Şekil 26. MHD etkisindeki boyutsuz hız ve sıcaklık profillerinin literatür ile karşılaştırılması



Şekil 26.'nın Devamı



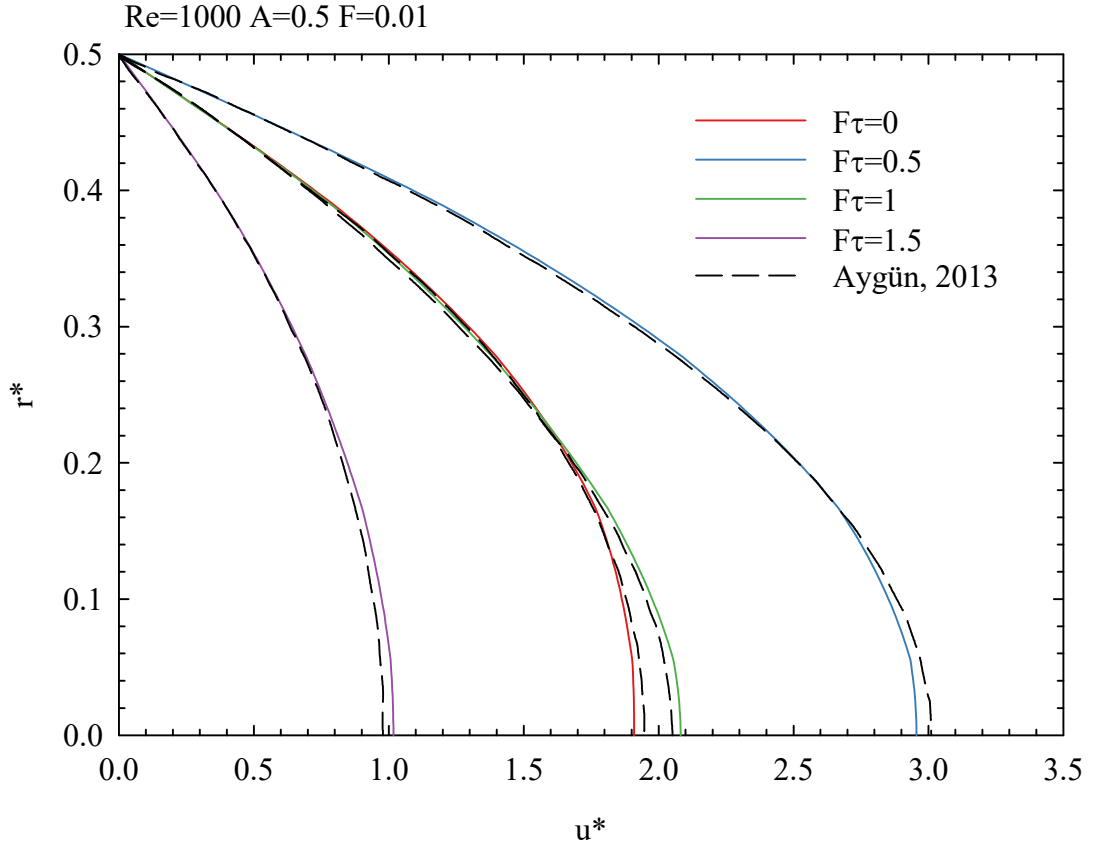
Şekil 26.'nın Devamı



Şekil 26.'nın Devamı

Analiz sonuçlarının literatürdeki çalışma ile karşılaştırılması Şekil 26'da görülmektedir. 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. Literatürdeki çalışma, tam boru geometrisinde, yapılandırılmamış ağ şeklinde ve malzeme özellikleri UDF tanımlanarak çözümlenmiştir. Bu çalışmada ise, yarım kesitli boru geometrisinde, yapılandırılmış sınır tabaka ağı ile ve malzeme özellikleri program içerisindeki denklemler yardımıyla tanımlanarak çözülmüştür. Bu hususların farklı olmasının sebepleri şunlardır: Tam boru geometrisinde artık (*residual*) olarak tanımlanan terimlerin -verilen taşıyıcı (*transport*) denklem çözümlerinin tam çözümden sapma ölçütü- fazla olacağından yakınsama problemlerine neden olmaktadır, bu sebeple yarım kesitli boru tercih edilmiştir. Akış problemlerinde boru cidarındaki kaymama sınır şartı sebebiyle bu bölgedeki akışkan davranışlarının daha hassas incelenmesi gerekmektedir, bu sebeple hem yapılandırılmış ağ hem de cidara doğru sıklaşan ağ yapısının (*inflation*) uygulanması tercih edilmiştir.

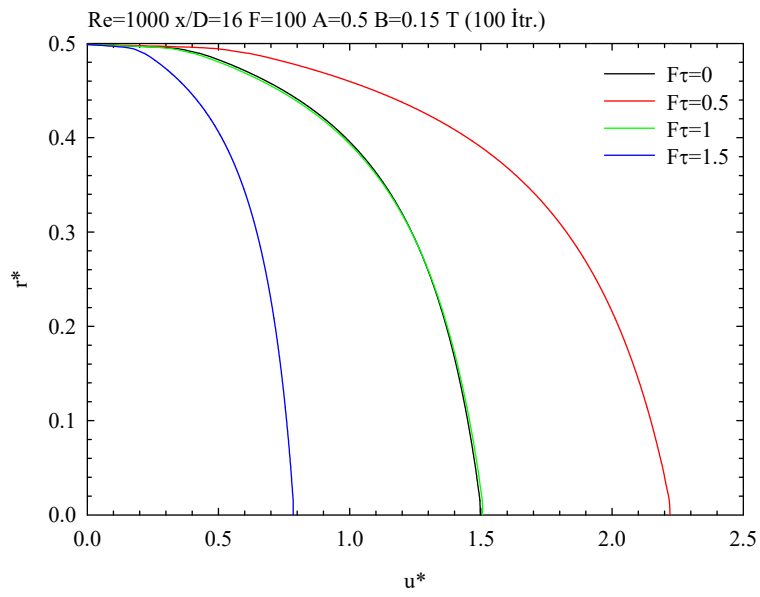
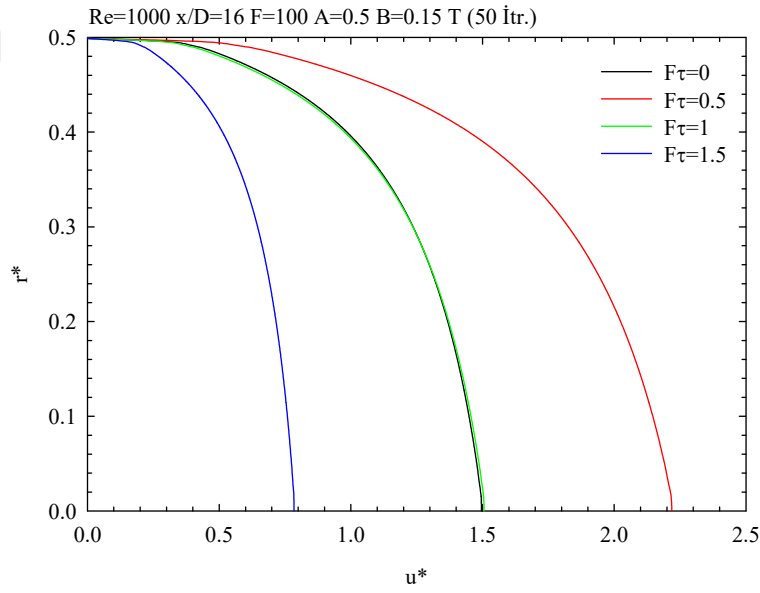
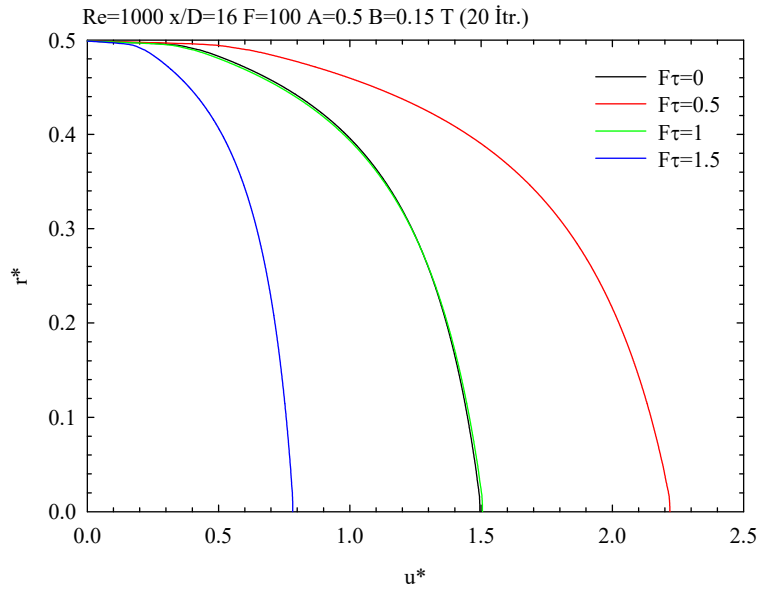
Bir sonraki doğrulama çalışması atımlı akış şartları için yapılmıştır. Uygulanan çözüm yönteminin doğruluğu, literatürde daha önce yapılmış farklı bir çalışma -Aygün, 2013- ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Her iki çalışmada da akışkan olarak hava kullanılmıştır ve benzer sınır koşulları ile $Re=1000$ değerinde laminar akış şartlarında çözümler yapılmıştır.



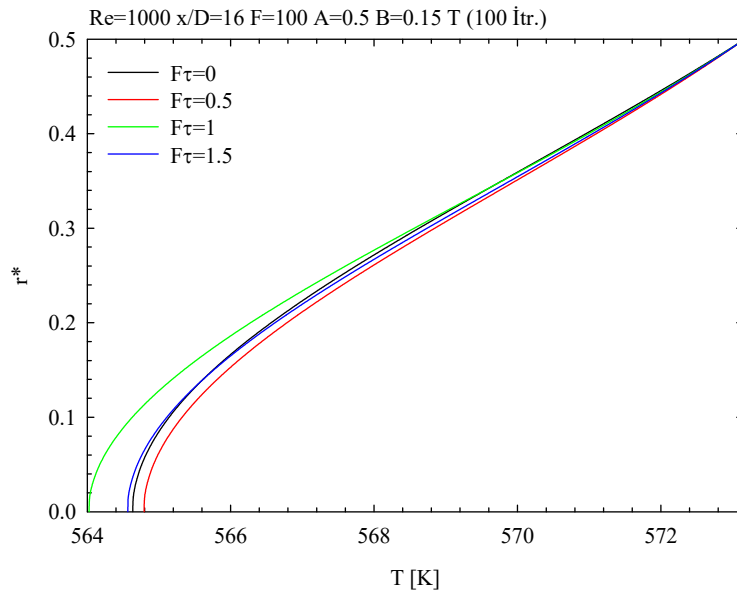
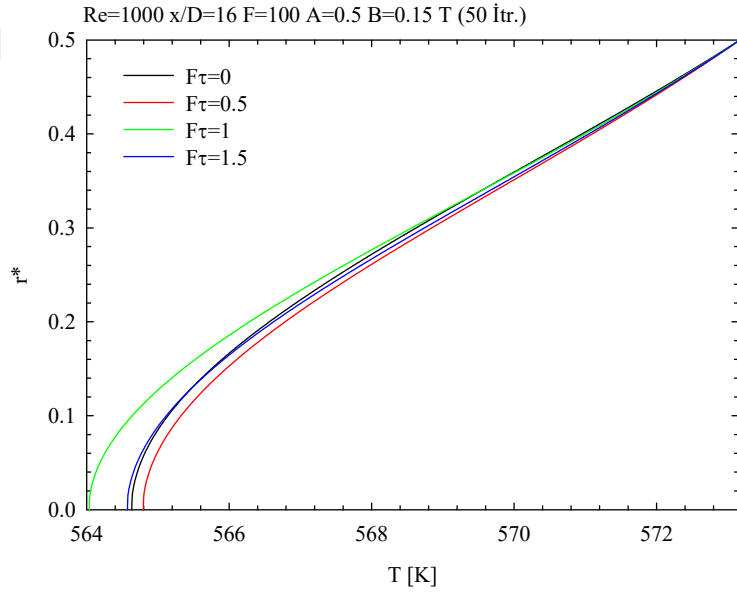
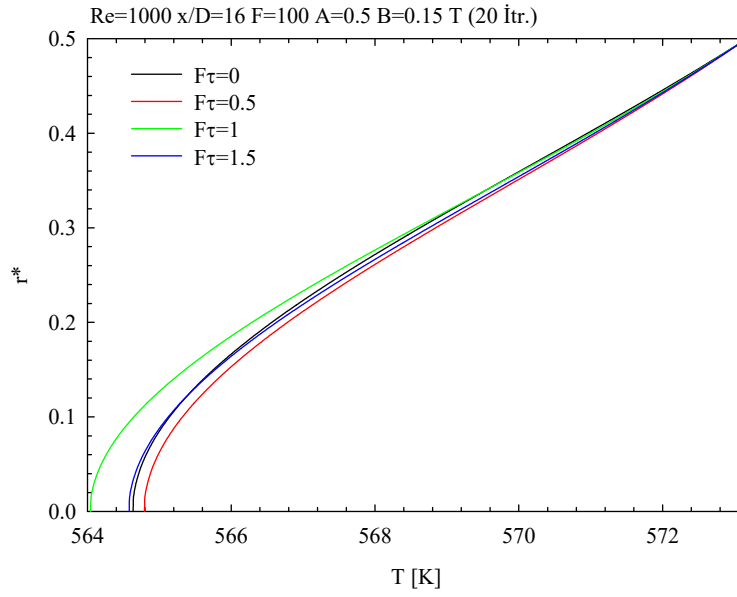
Şekil 27. Atımlı akışta farklı faz açılarındaki boyutsuz hız profillerinin literatür ile karşılaştırılması

Atımlı akış doğrulama çalışmasının sonuçları Şekil 27’de belirtilmektedir ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada zaman adımındaki en fazla iterasyon sayısının (*Max iterations / Time step*) belirlenmesinde de bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen sabit boyutsuz değerlerde, adım başına 20 – 50 – 100 iterasyon sayılarında hız ve sıcaklık grafikleri Şekil 28 ve 29’da görülmektedir. Grafiklere bakıldığında, adım başına iterasyon sayısının sonuçlarda herhangi bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür. Zamandan tasarruf etmek için adım başına iterasyon sayısı 20 olarak belirlenmiştir.



Şekil 28. Farklı iterasyon sayılarına göre boru kesitindeki hız profillerinin karşılaştırması



Şekil 29. Farklı iterasyon sayılarına göre boru kesitindeki sıcaklık profillerinin karşılaştırması

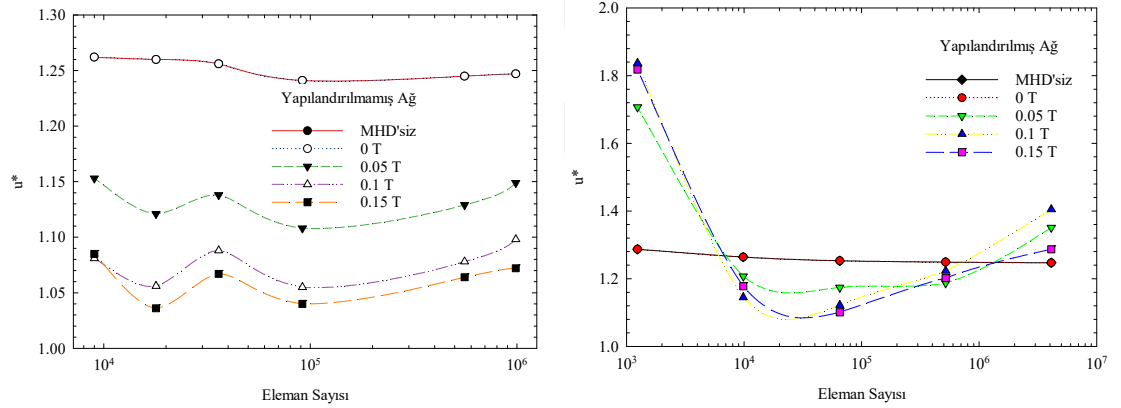
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada iki önemli bulgu irdelenmiştir: Manyetik alan uygulamasında ağ bağımsızlığının önemi ve çalışmanın ana irdeleme konusu olan, manyetik alan ve atımlı akışın akış davranışlarına etkisidir.

4.1. MHD Çalışmalarında Ağ Bağımsızlığın Önemi

Elektrik iletkenliğine sahip sıvı lityum akışkanına uygulanan manyetik alan sonucunda ulaşılan bulgular bu bölümde incelenmiştir.

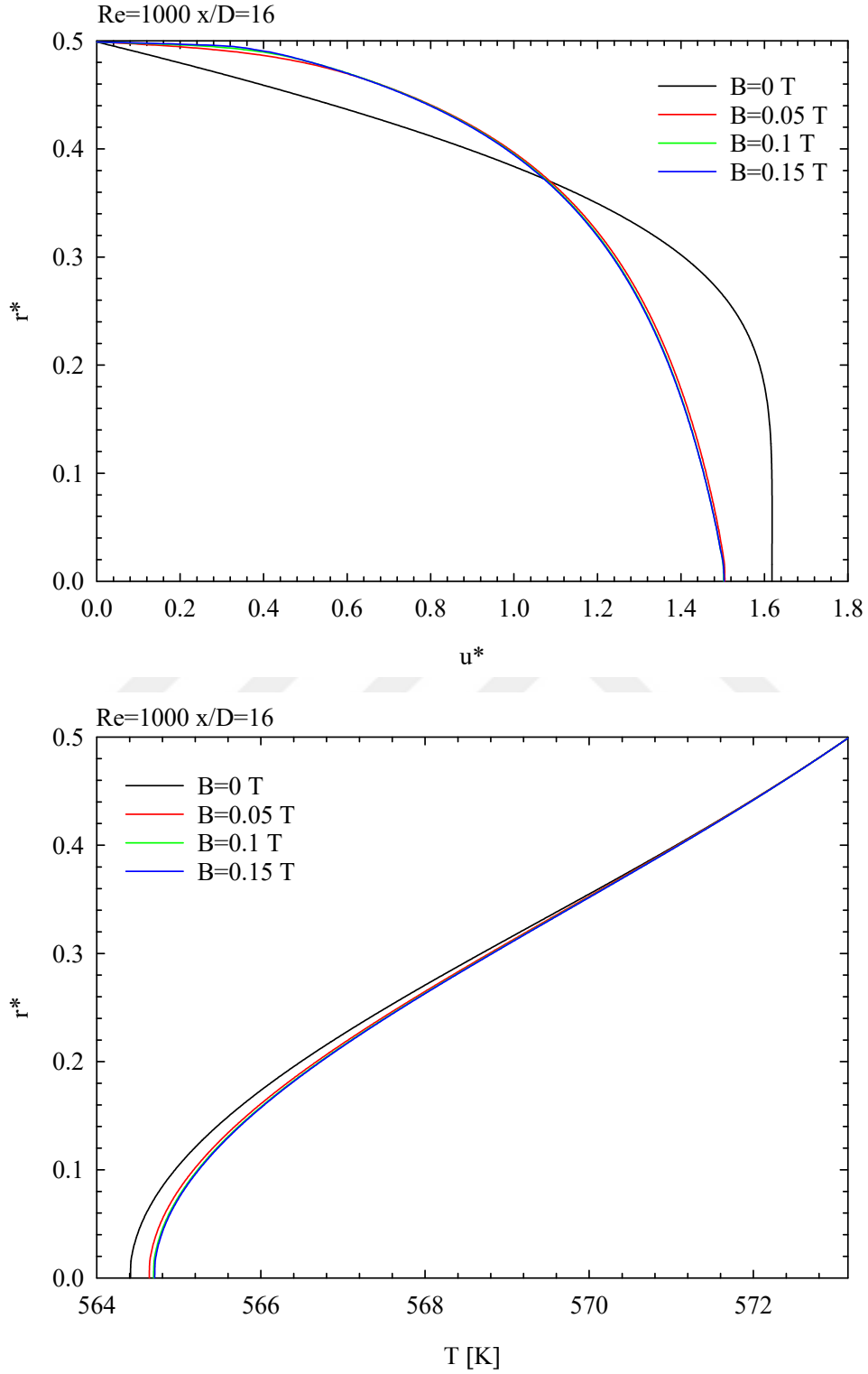
Doğrulama çalışması yapıldıktan sonra ağ şekli akış analizlerine uygun olarak yapılandırılmış ve 4 farklı manyetik alan değerinde ($B=0$ T, 0.05 T, 0.1 T ve 0.15 T) analizler yapılmıştır.



Şekil 30. Ağ yapısına göre ağdan bağımsızlık grafikleri

Bu analizde; MHD modülü kullanılırken parametrik çalışmanın yapılamadığı, her bir manyetik alan değerinde ve her bir ağ boyutunda analizlerin birer birer koşurulması gerektiği görülmüştür. Şekil 30'daki sonuçlara göre, MHD modülü etkinleştirilmeden önce ve etkinleştirilerek oluşturulan $B=0$ T değerindeki sonuçların tam uyum içerisinde oldukları görülmektedir. $B=0$ T ile diğer manyetik alan değerlerinde oluşan eğrilerin aynı olmadığı ve bu sebeple manyetik alan uygulandıktan sonra tekrar ağ bağımsızlık testlerinin yapılması gerektiği görülmüştür. Benzer bir sonuçta, Mousavi vd. (2016) tarafından dikdörtgen kesitli bir kanalda yapılmış olup, manyetik alan uygulanmasıyla sonuçların ağ sayısına göre değişiklik gösterdiği rapor edilmiştir. Bu bağlamda, dairesel kesitli kanallarda benzer bir araştırmanın yapılmadığı görülmüş ve bu çalışma literatüre kazandırılmıştır.

Manyetik alanın; daimî (*steady*) durumda, $Re=1000$ değerinde ve $x/D=16$ 'da alınan değerlere göre, hız ve sıcaklığa etkisi Şekil 31'de belirtilmiştir.

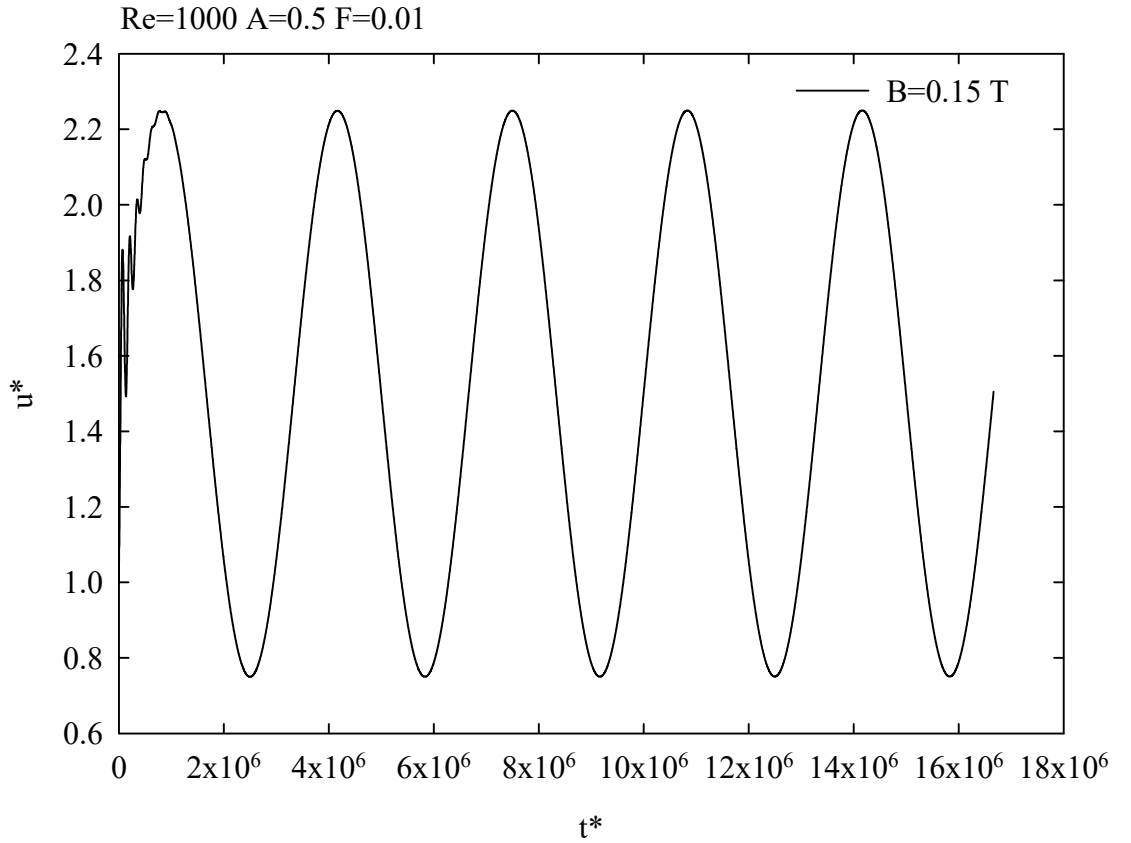


Şekil 31. Manyetik alanın hız ve sıcaklık değerlerine etkisi

Grafikler incelendiğinde manyetik alanın akış hızını düşürdüğü ve sıcaklığı arttırdığı görülmektedir. Bu duruma sebep olan Lorentz kuvvetleri ilerleyen bölümde açıklanmıştır.

4.2. Manyetik Alan ve Atımlı Akışın Akış Davranışlarına Etkisi

Manyetik alan ve atımlı akışın, laminar boru içi akışta, hız ve sıcaklık değerlerine etkisi incelenmiştir.



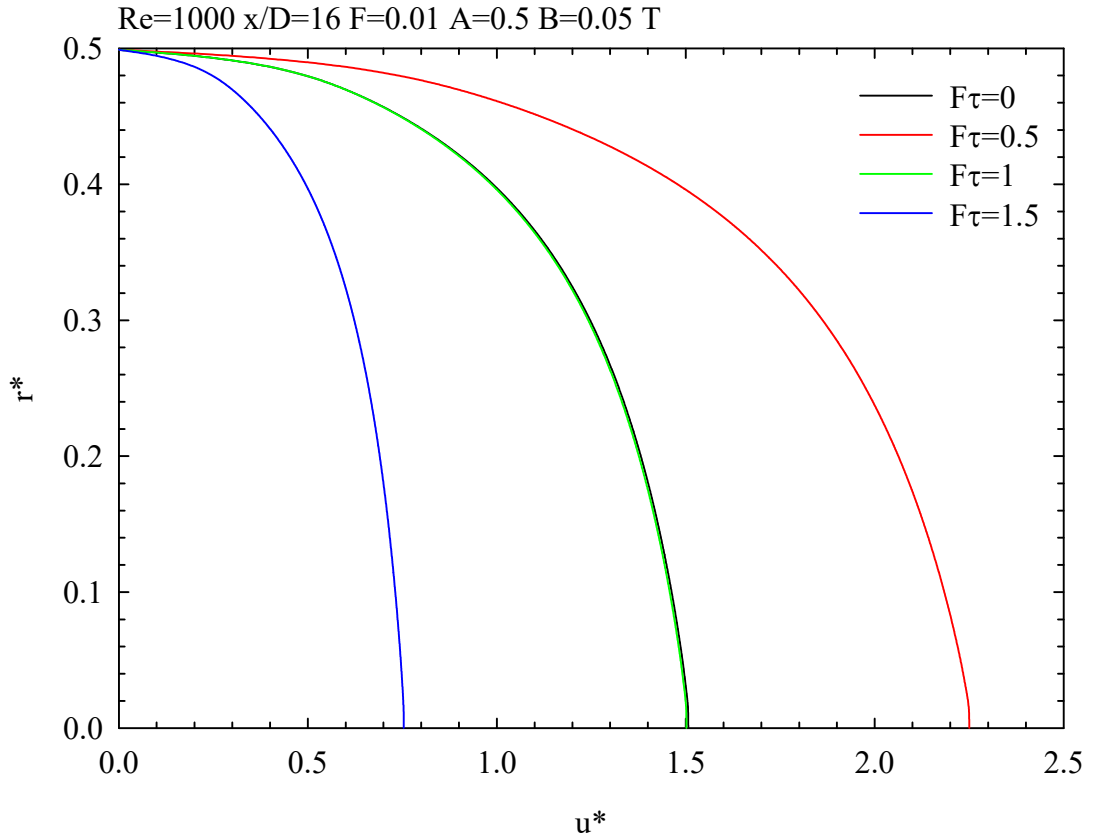
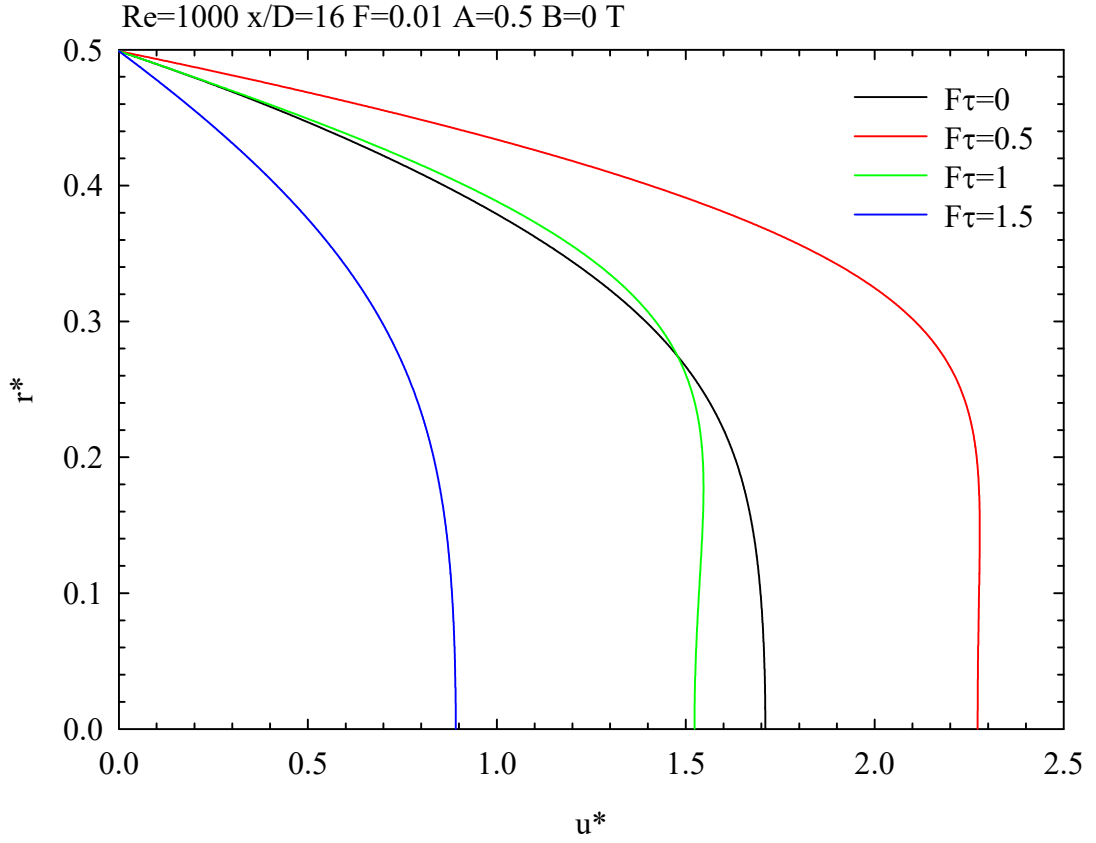
Şekil 32. Boru çıkış merkezindeki zamana göre hız değişimi

Manyetik alan altında atımlı akış uygulamasında sonuçların en az beş periyot sonrasında alınması gerektiği elde edilen değerler sonucunda ulaşılmıştır. Şekil 32’de görüldüğü gibi akışın ilk anlarında manyetik alanın etkisiyle sıçramalar ortaya çıkmaktadır ve devamında düzgün bir sinüs eğrisi şeklinde devam etmektedir.

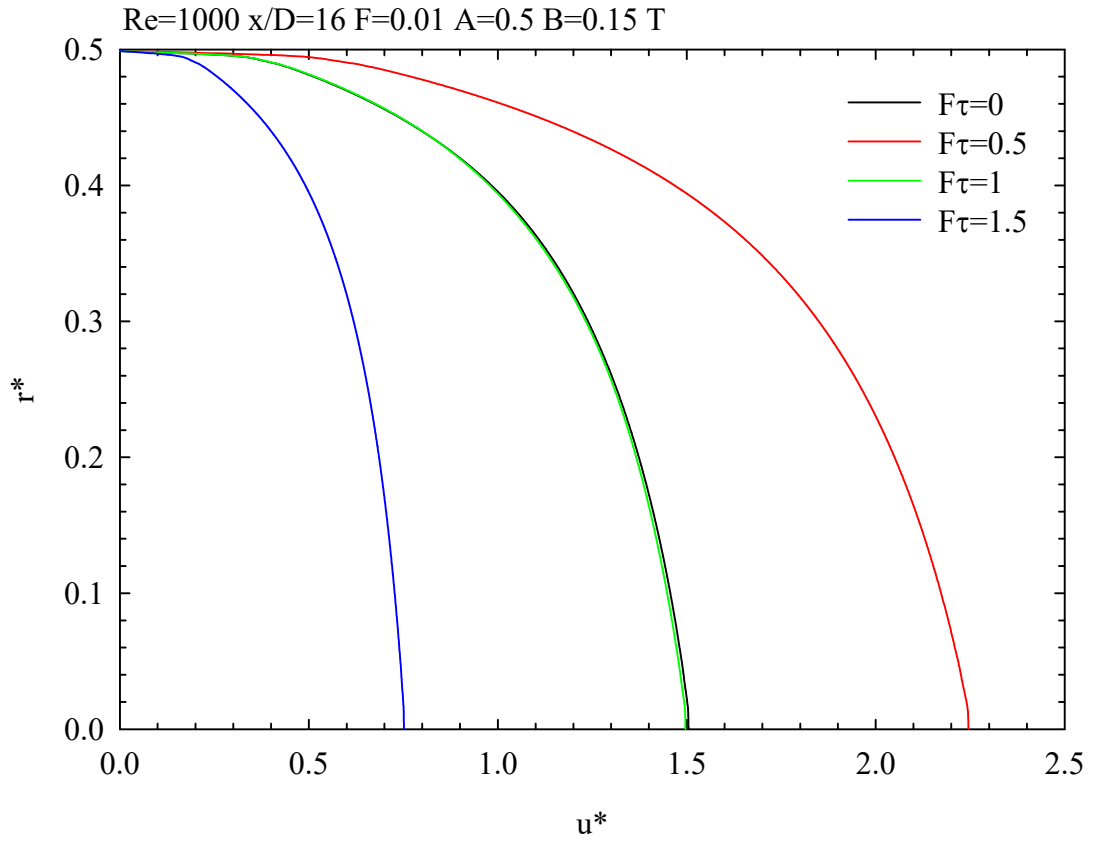
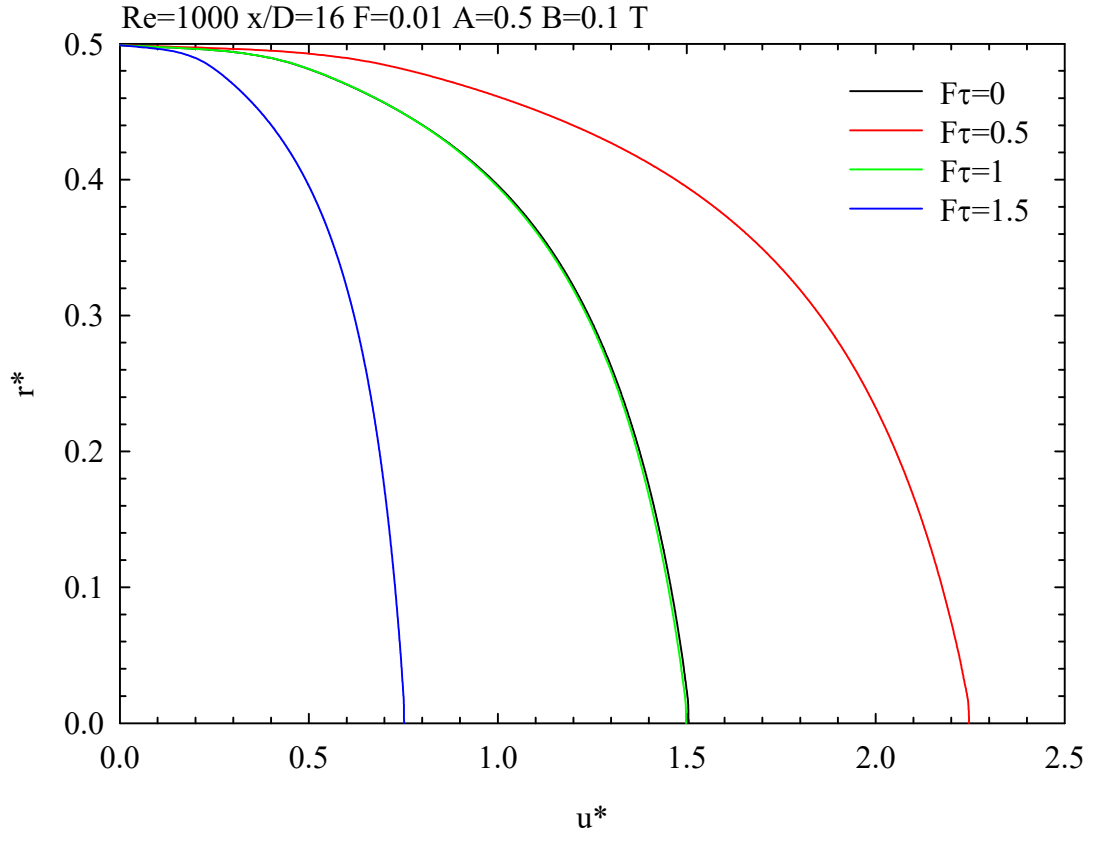
4.2.1. Manyetik Alanın Farklı Faz Açılarındaki Hız Profiline Etkisi

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 ($F\tau=0 - 0.5 - 1 - 1.5$) boyutsuz hız profilleri Şekil 33'te belirtilmiştir.

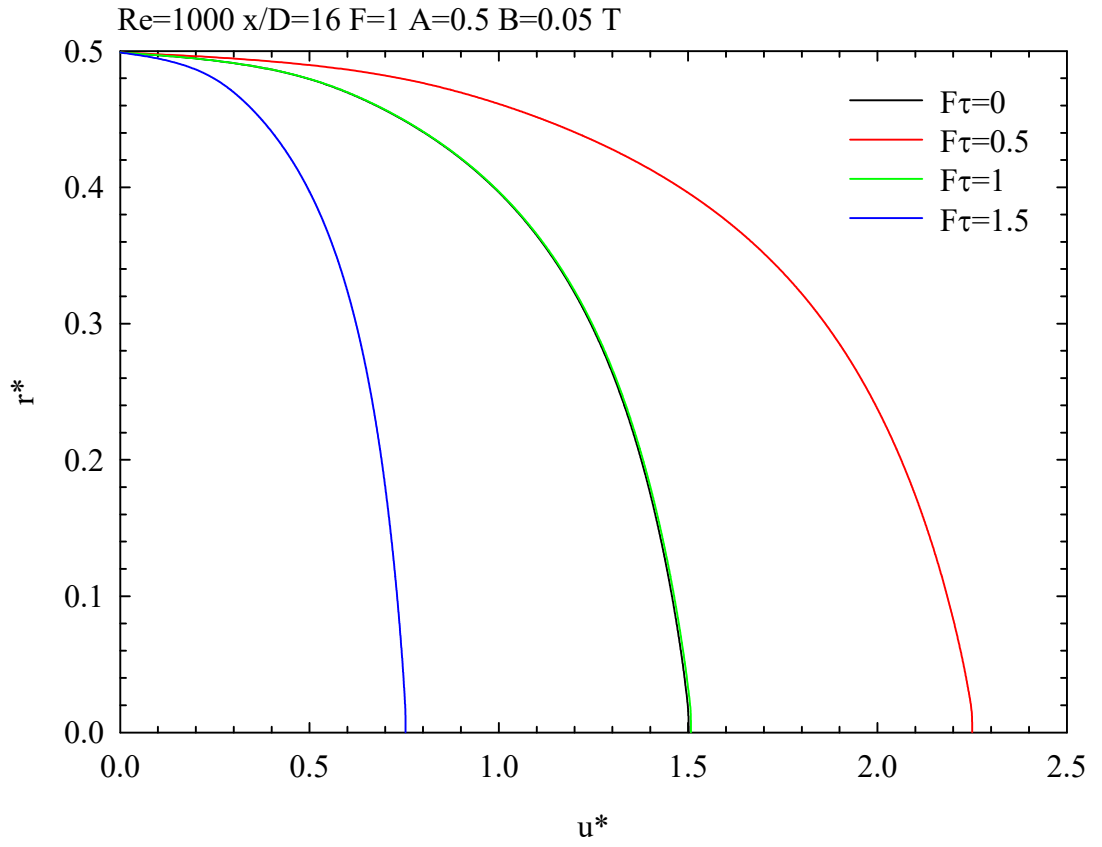
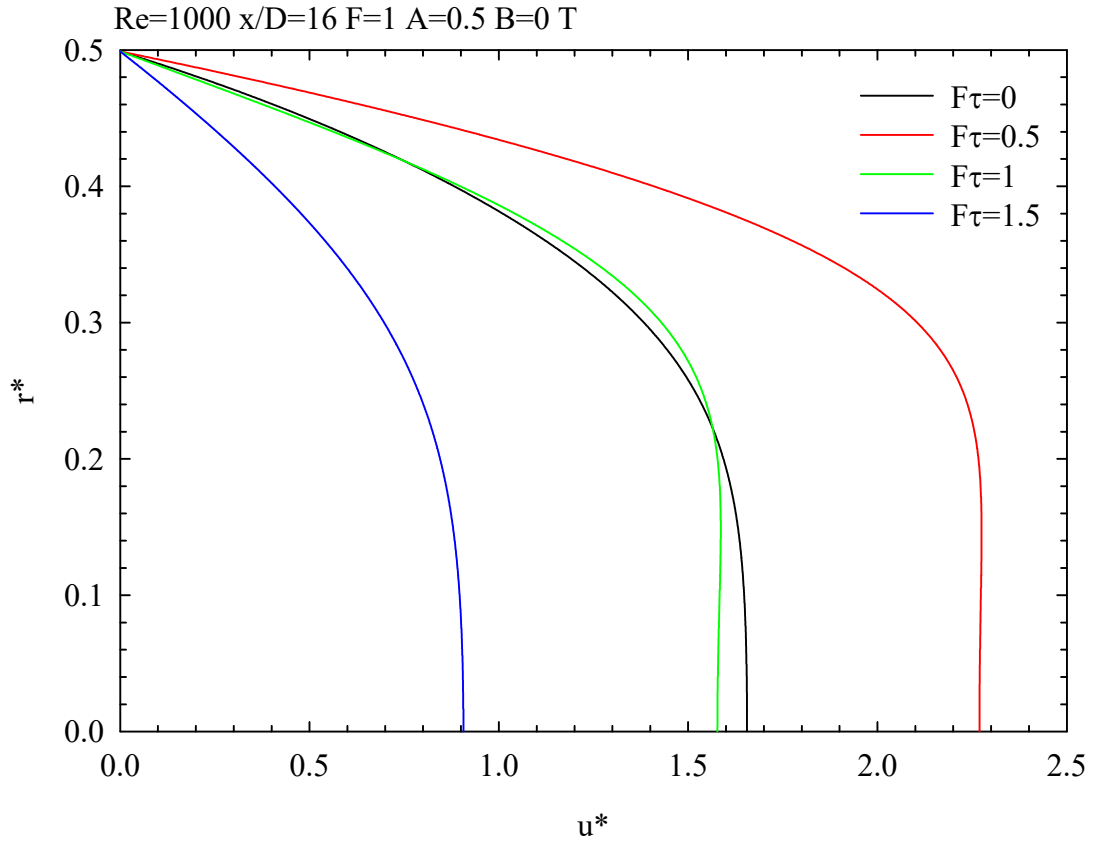




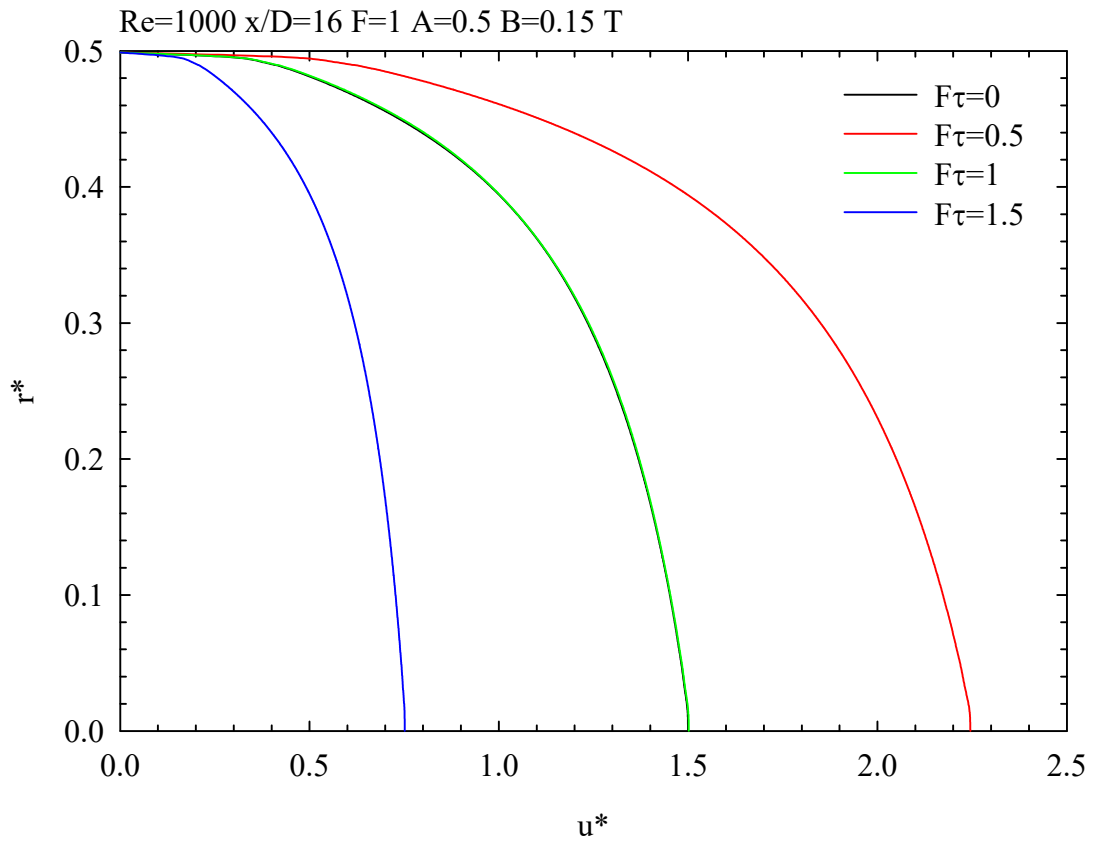
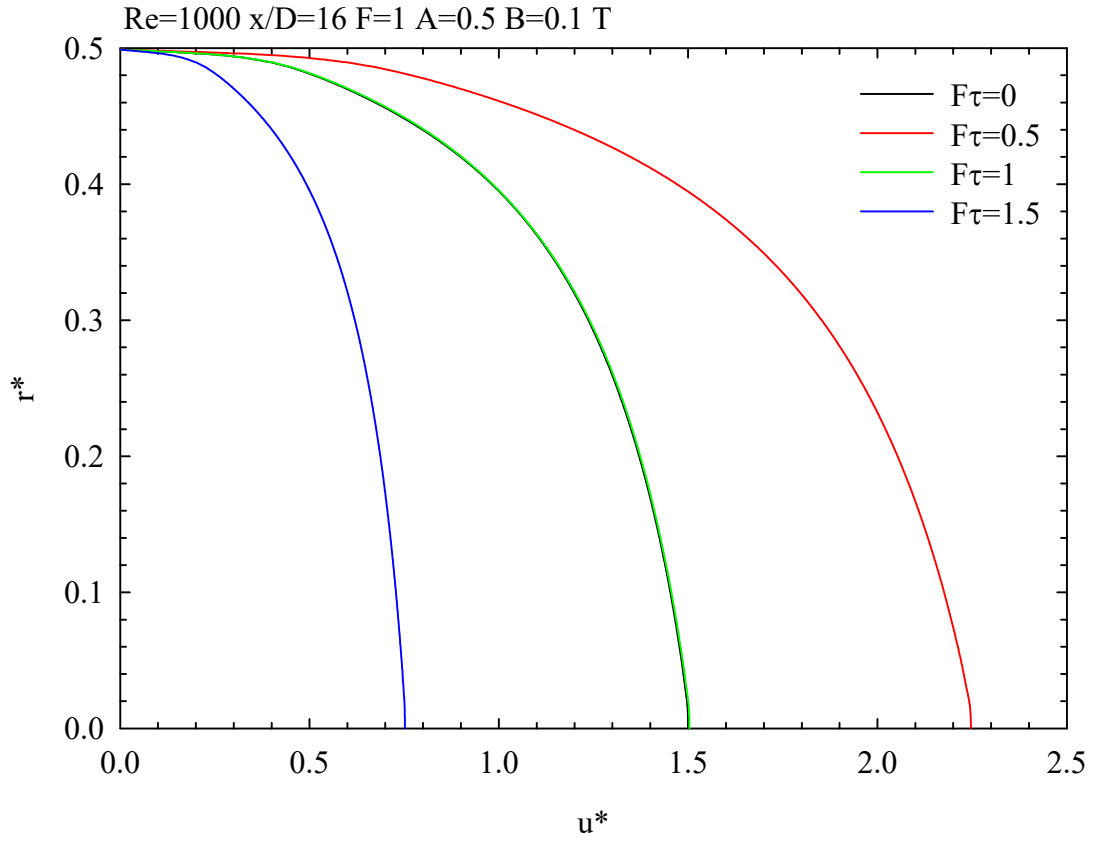
Şekil 33. Farklı frekans ve farklı manyetik alan değerlerindeki hız profillerinin faz açılarına göre değişimi



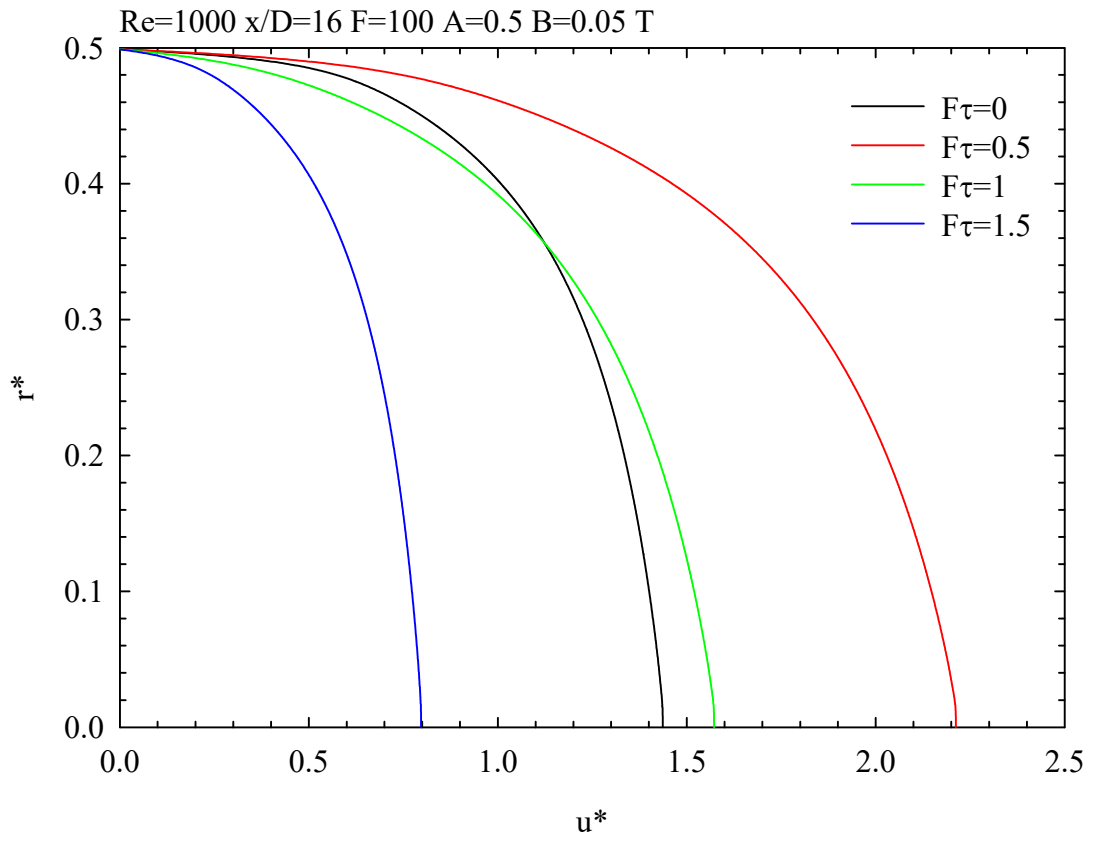
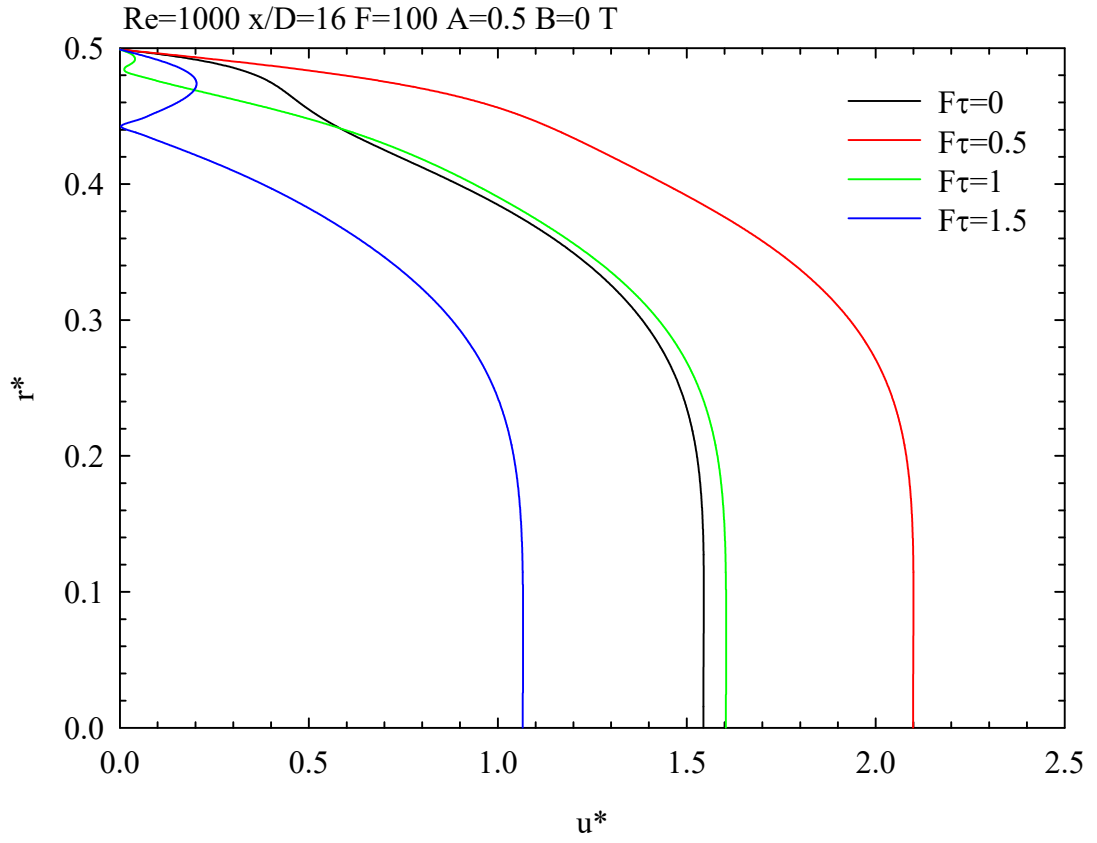
Şekil 33.'ün Devamı



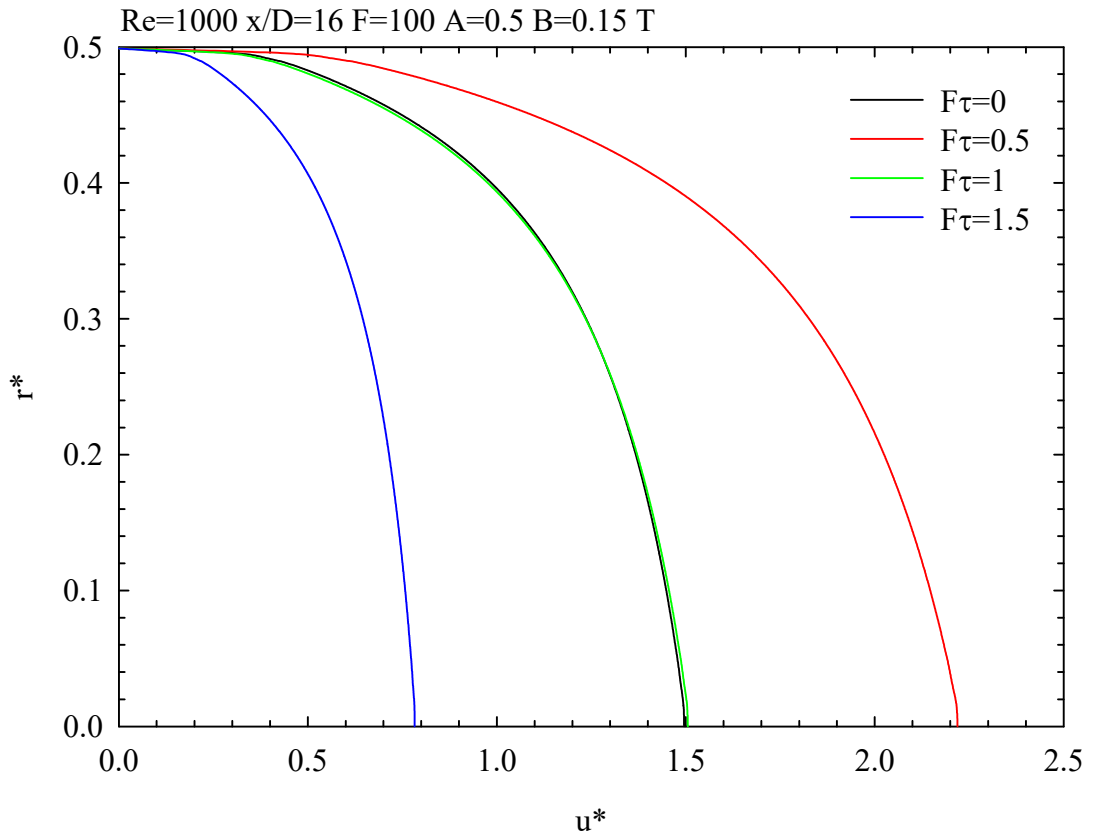
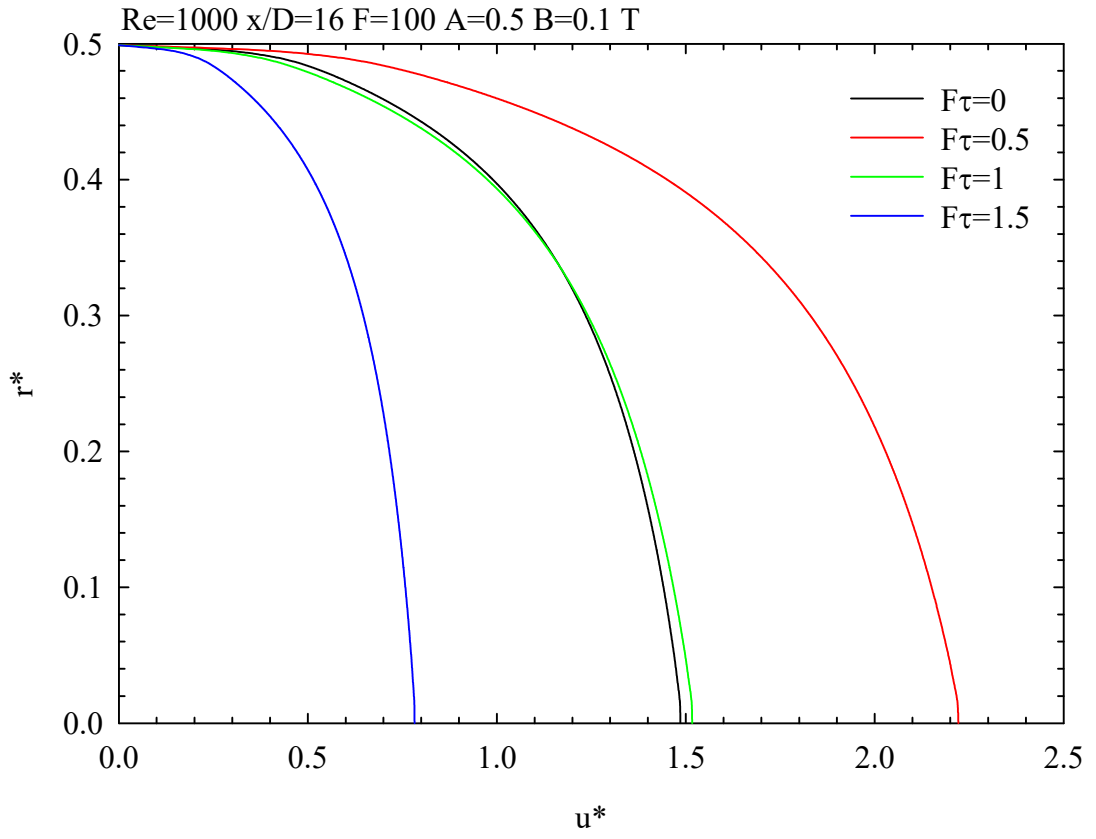
Şekil 33.'ün Devamı



Şekil 33.'ün Devamı



Şekil 33.'ün Devamı

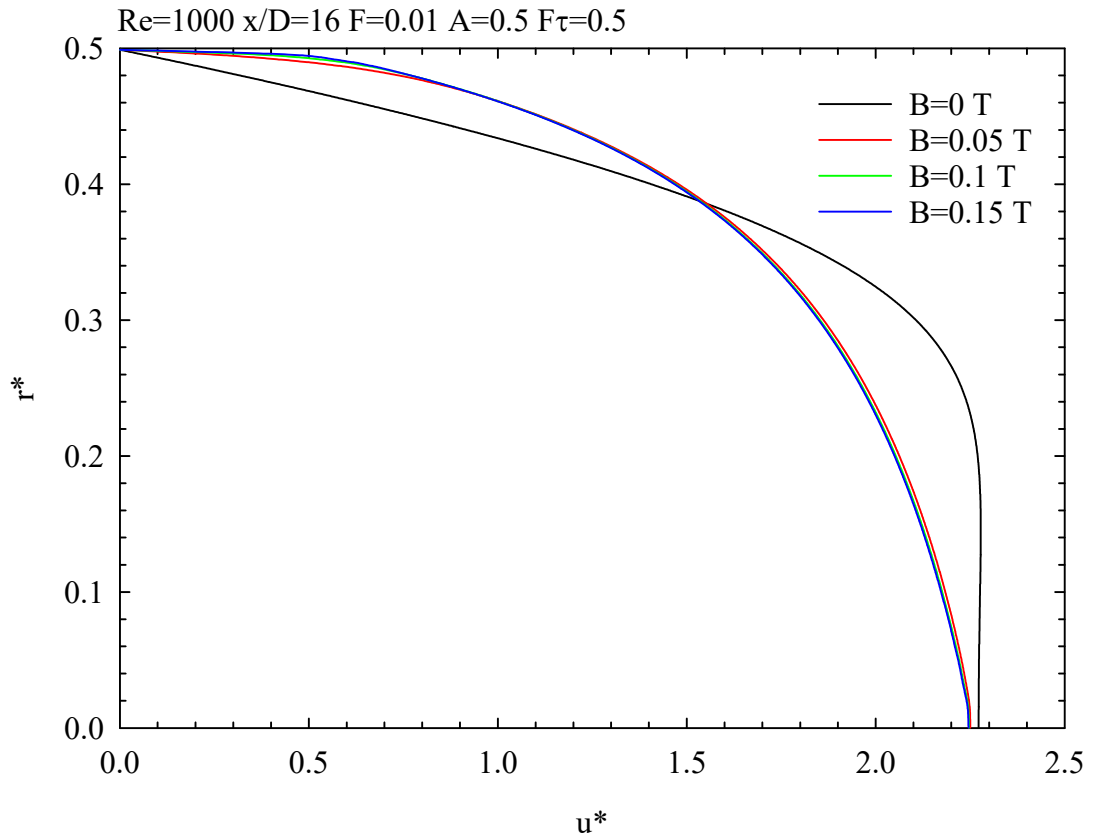
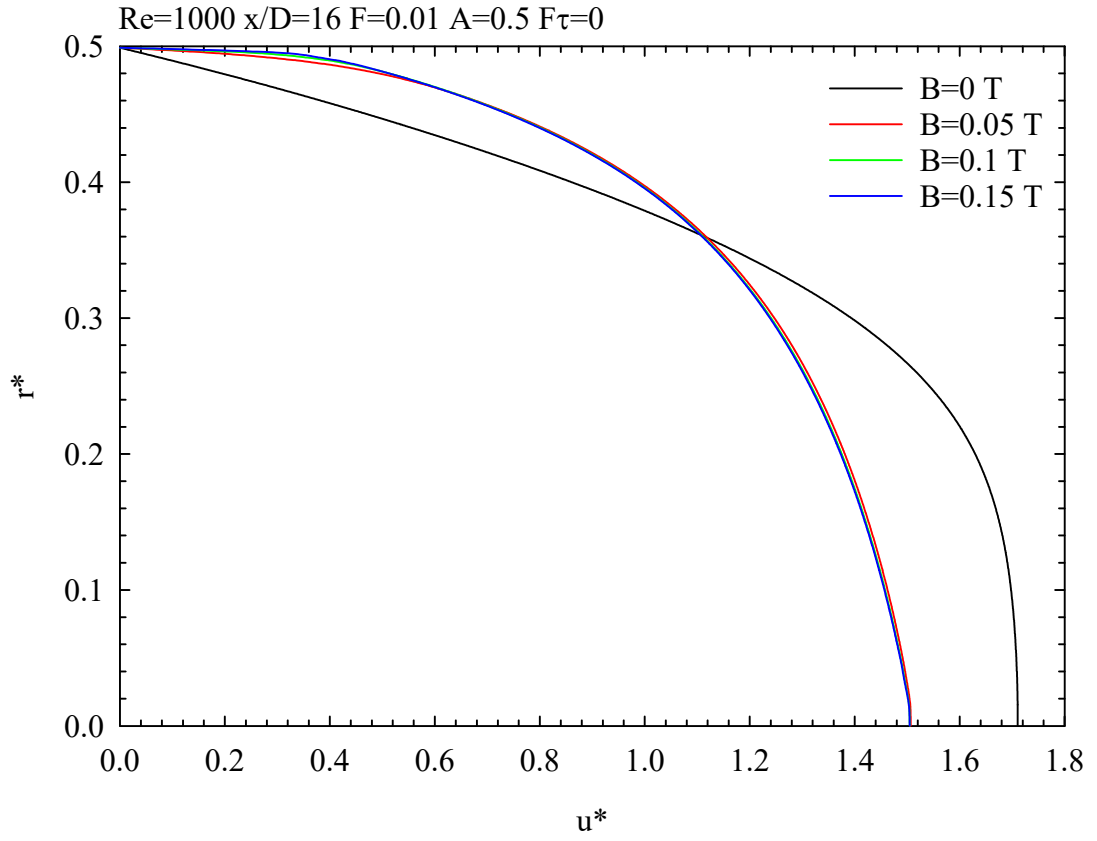


Şekil 33.'ün Devamı

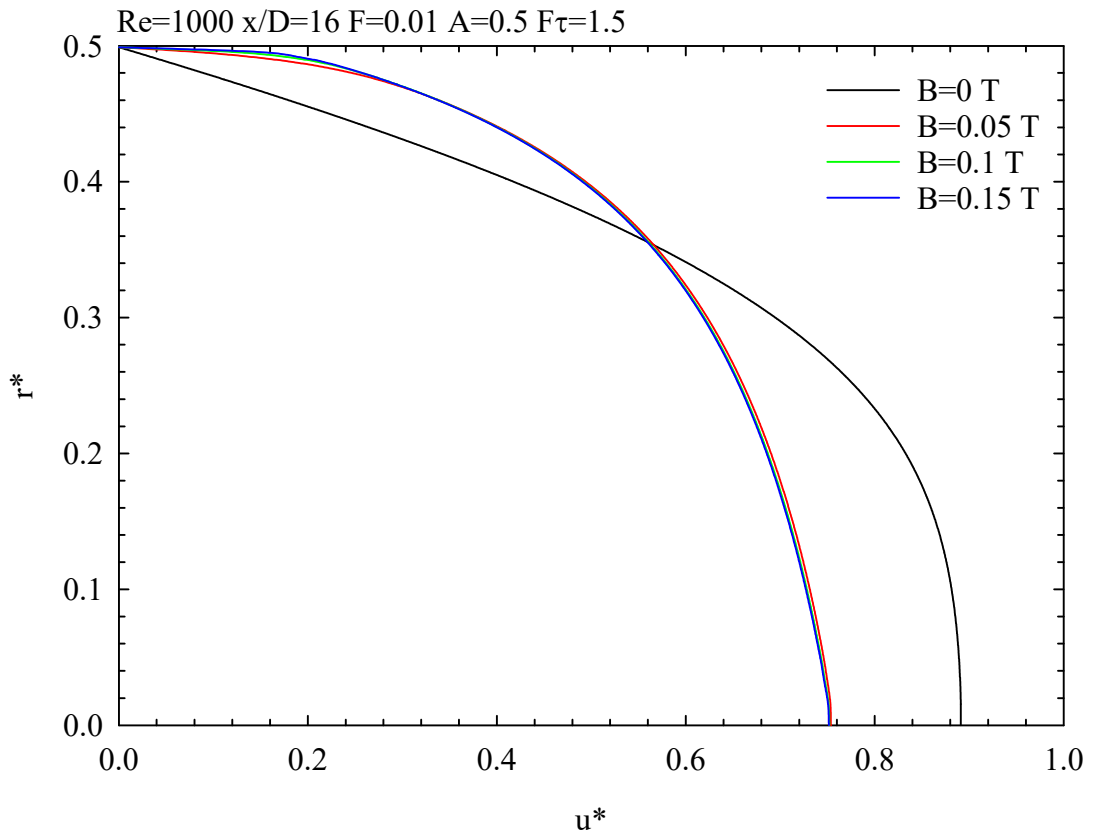
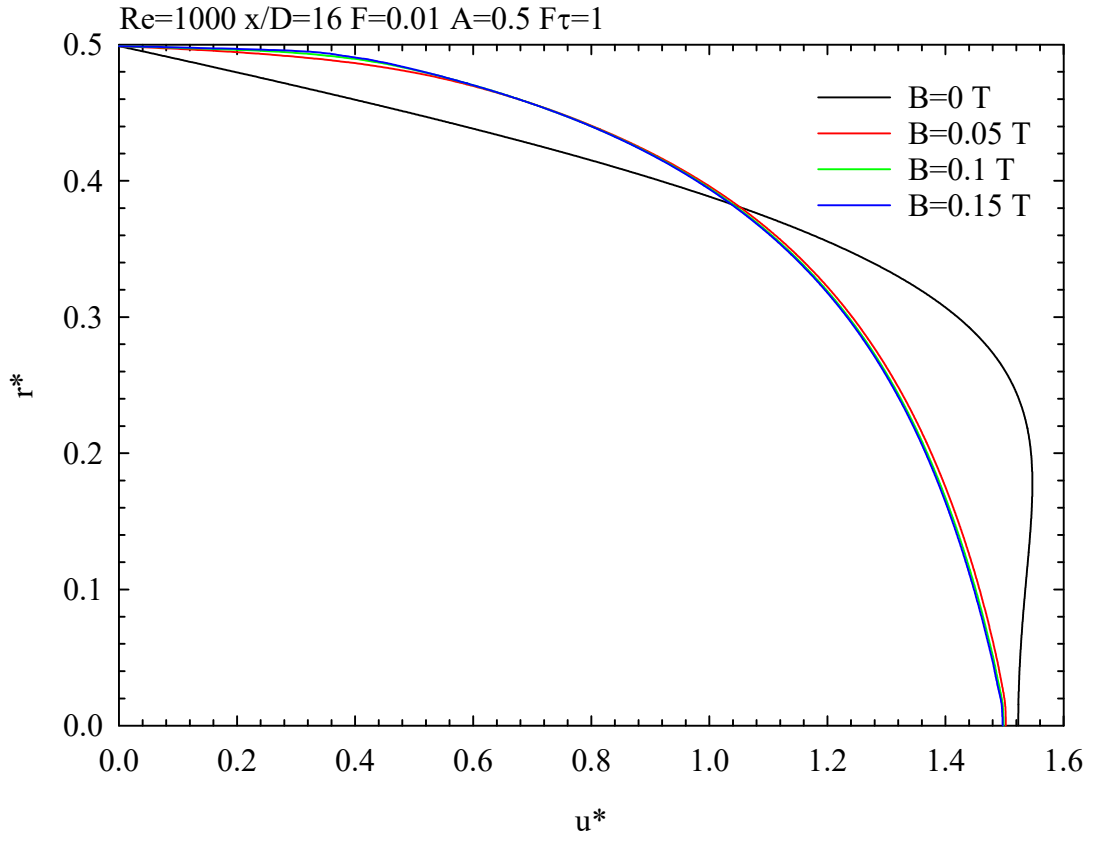
Farklı faz açılarındaki akışın hızlanma -pozitif ivmelenme- ($F\tau = 0 - 0.5$ ile $1.5 - 2$) ve yavaşlama -negatif ivmelenme- ($F\tau = 0.5 - 1.5$) bölgeleri görülmektedir. Hızlanma bölgesinde pozitif ivmelenmeyle hız artarken, yavaşlama bölgesinde negatif ivmelenmeyle hız azalmaktadır. Boru akışlarında atım frekanslarının artmasıyla yüksek hızın borunun cidara yakın bölgede oluşmasına halkasal etki (*annular effect*) adı verilmiştir (Aygün, 2013). Bu etki $F=100$ frekans değerinde, manyetik alanın sıfır olduğu durumda görülmektedir. Ancak manyetik alan uygulaması ile halkasal etki ortadan kalkmaktadır. Bu durumun sebebi, Lorentz kuvvetlerinin akışı frenleyerek ters dönmesine engel olmasıdır.

Farklı frekans ve farklı faz açılarındaki boyutsuz hız profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi Şekil 34’de görülmektedir.

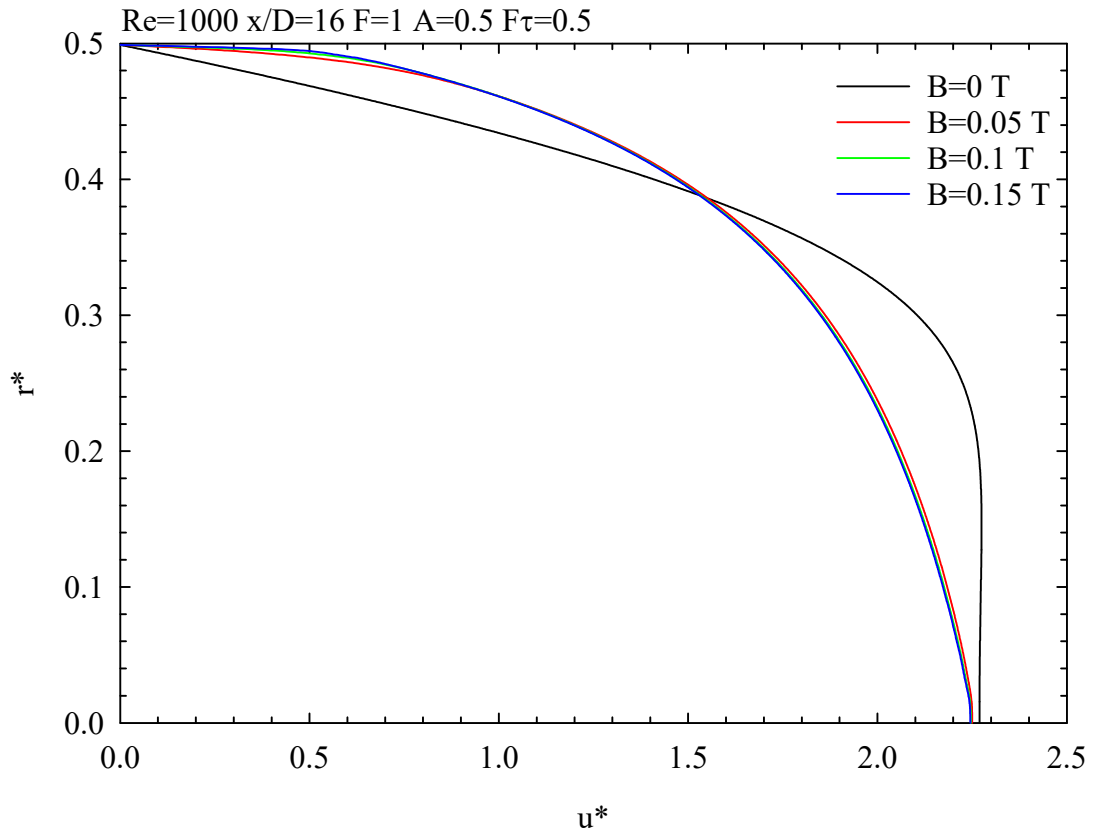
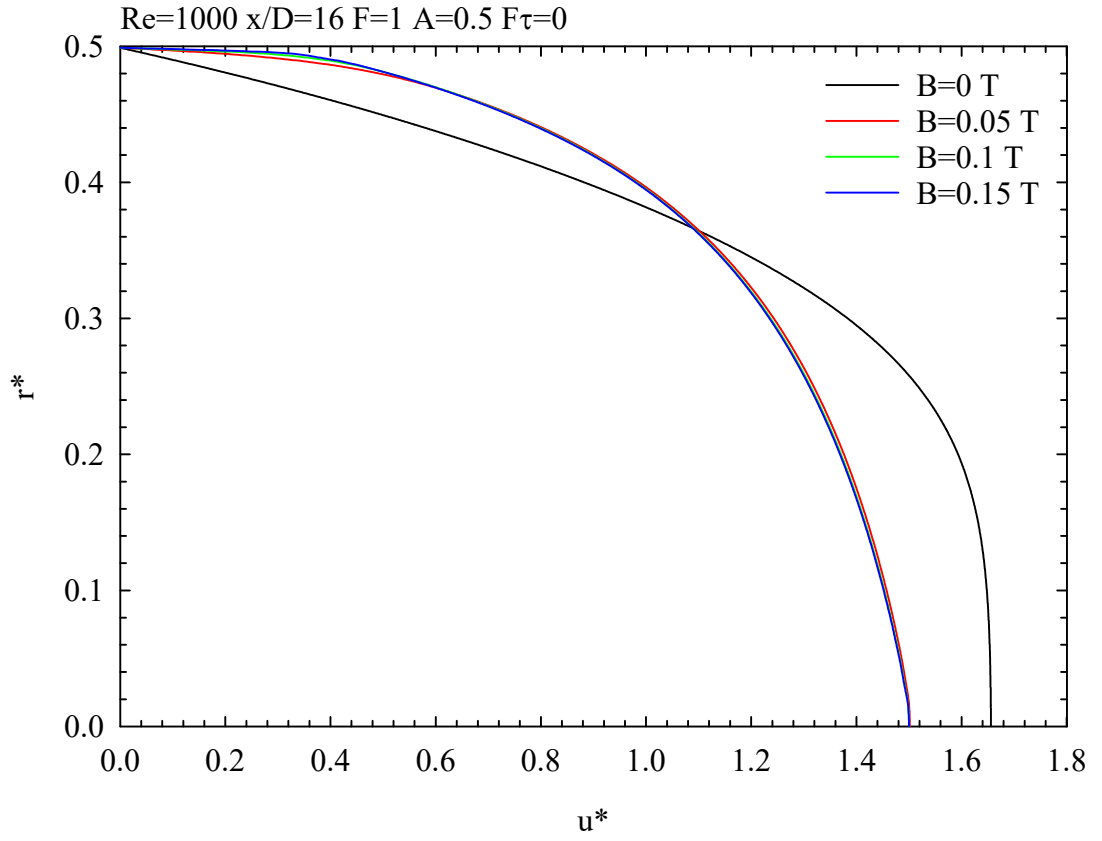




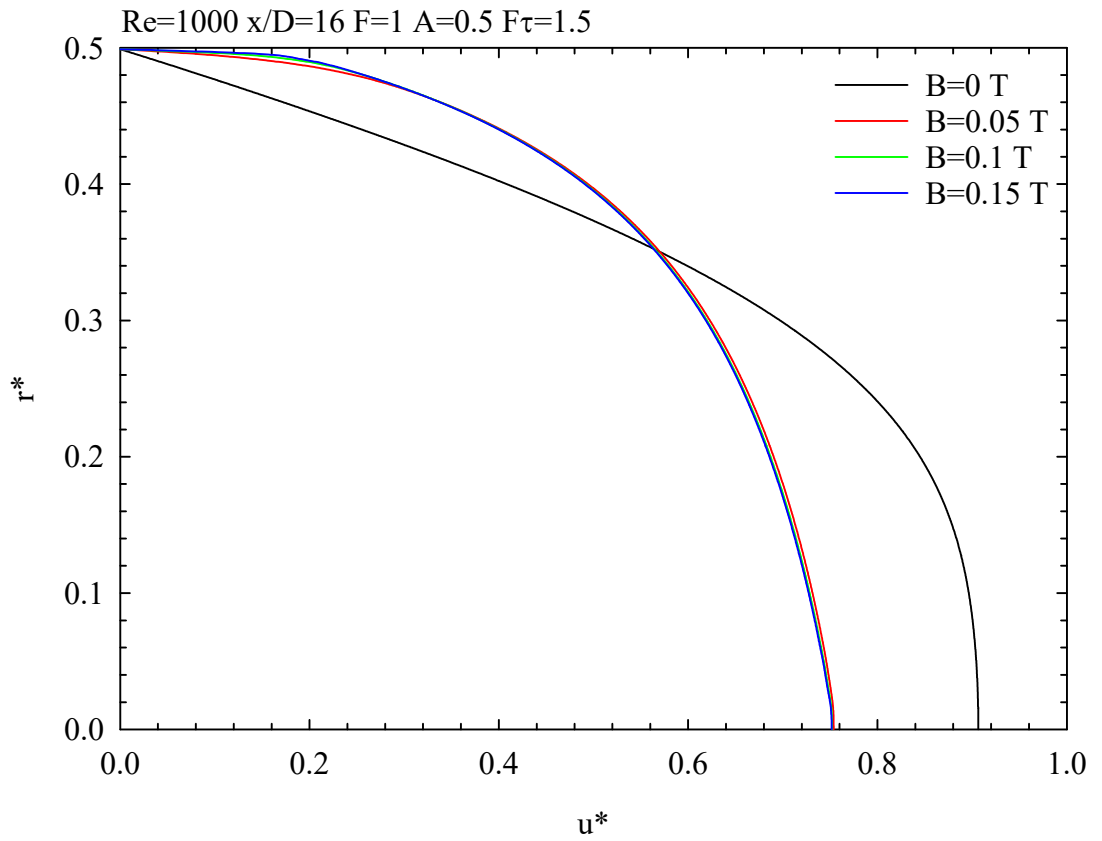
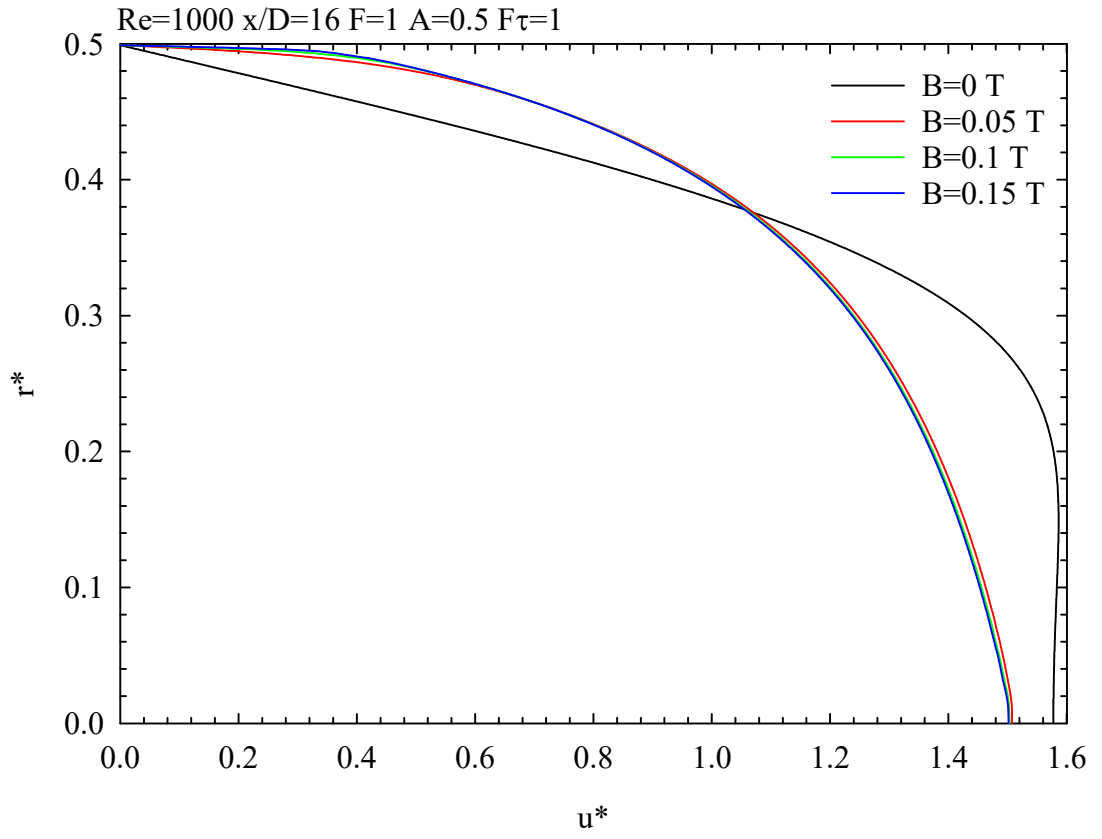
Şekil 34. Farklı frekans ve farklı faz açılarındaki hız profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi



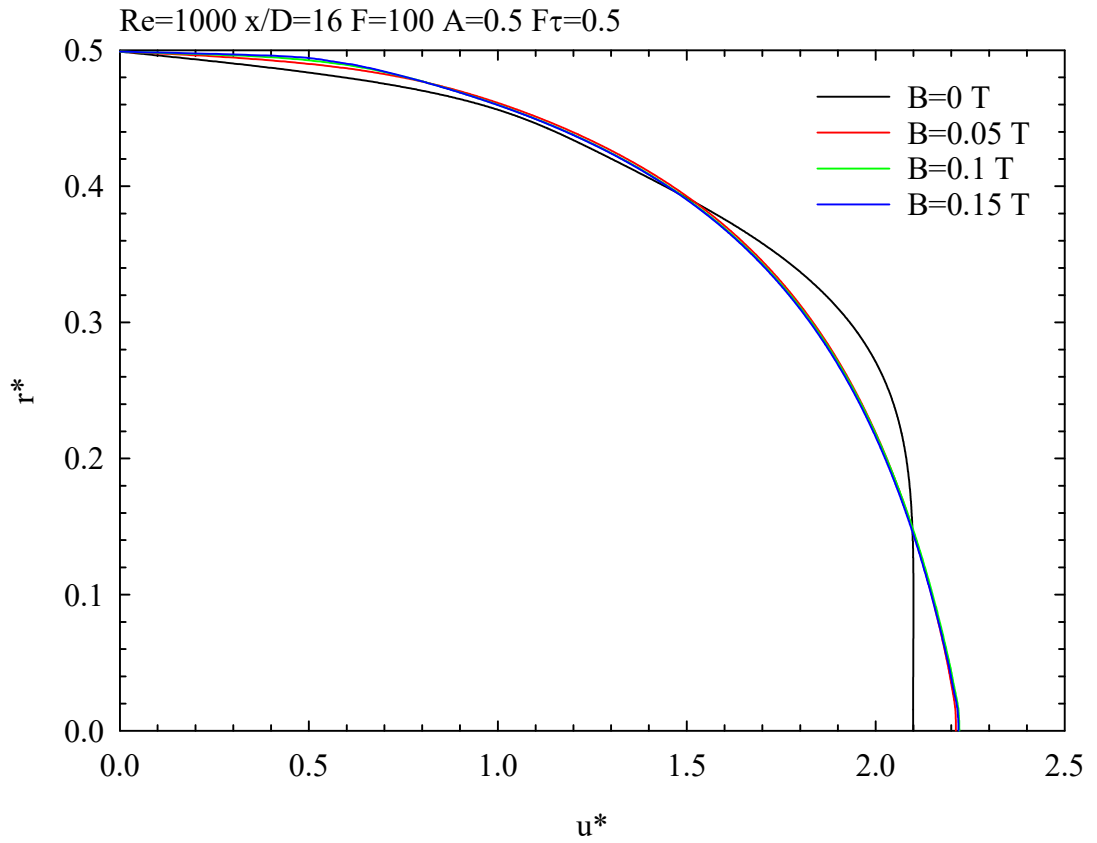
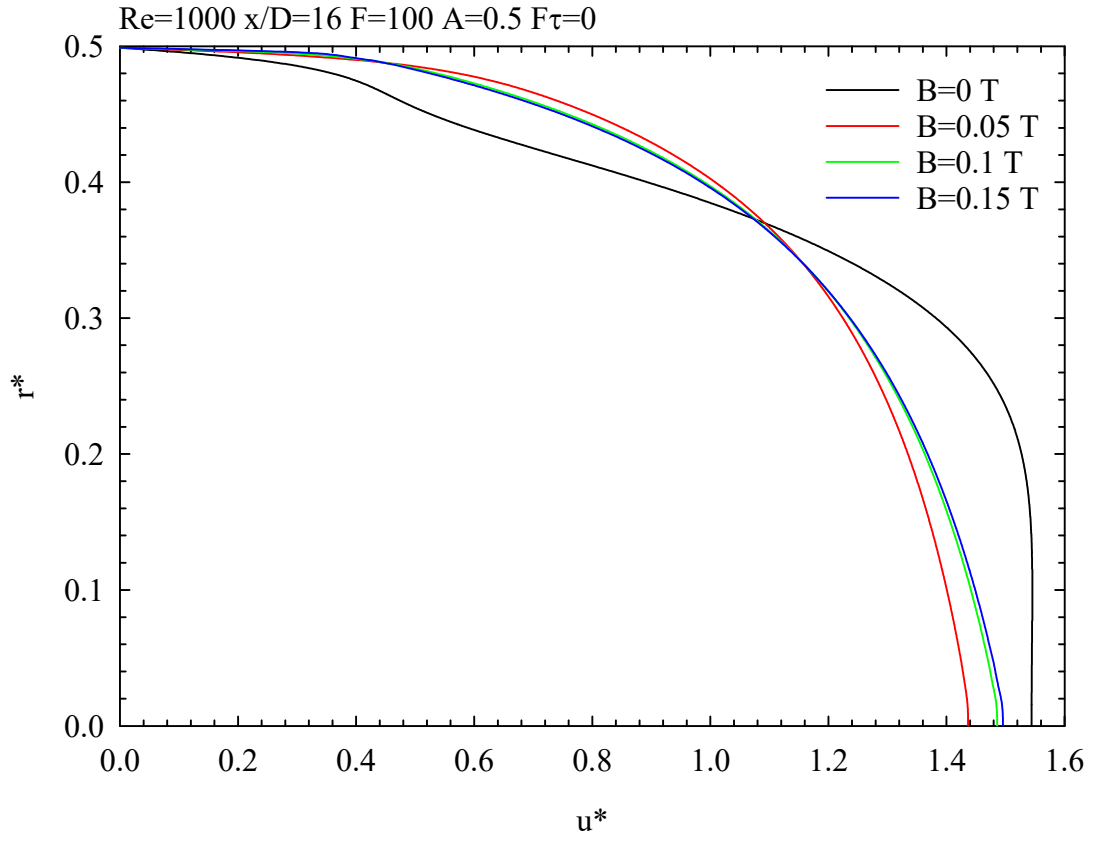
Şekil 34.'ün Devamı



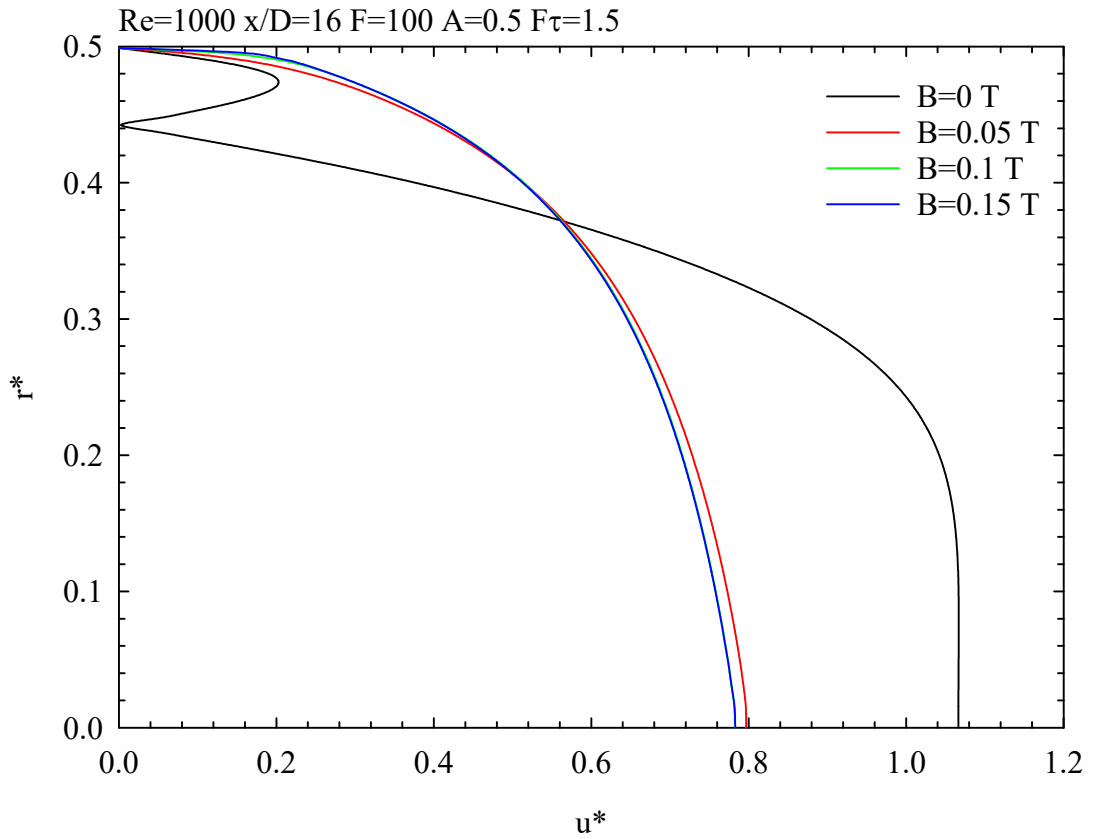
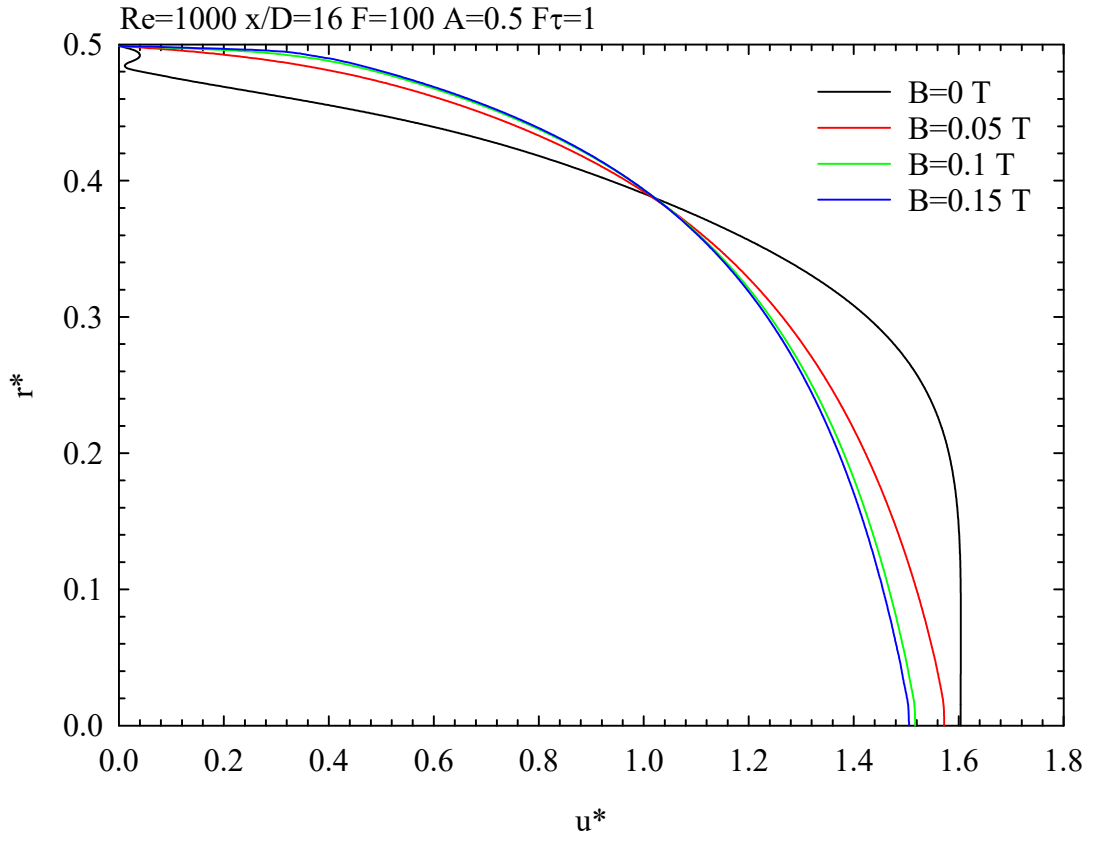
Şekil 34.'ün Devamı



Şekil 34.'ün Devamı



Şekil 34.'ün Devamı



Şekil 34.'ün Devamı

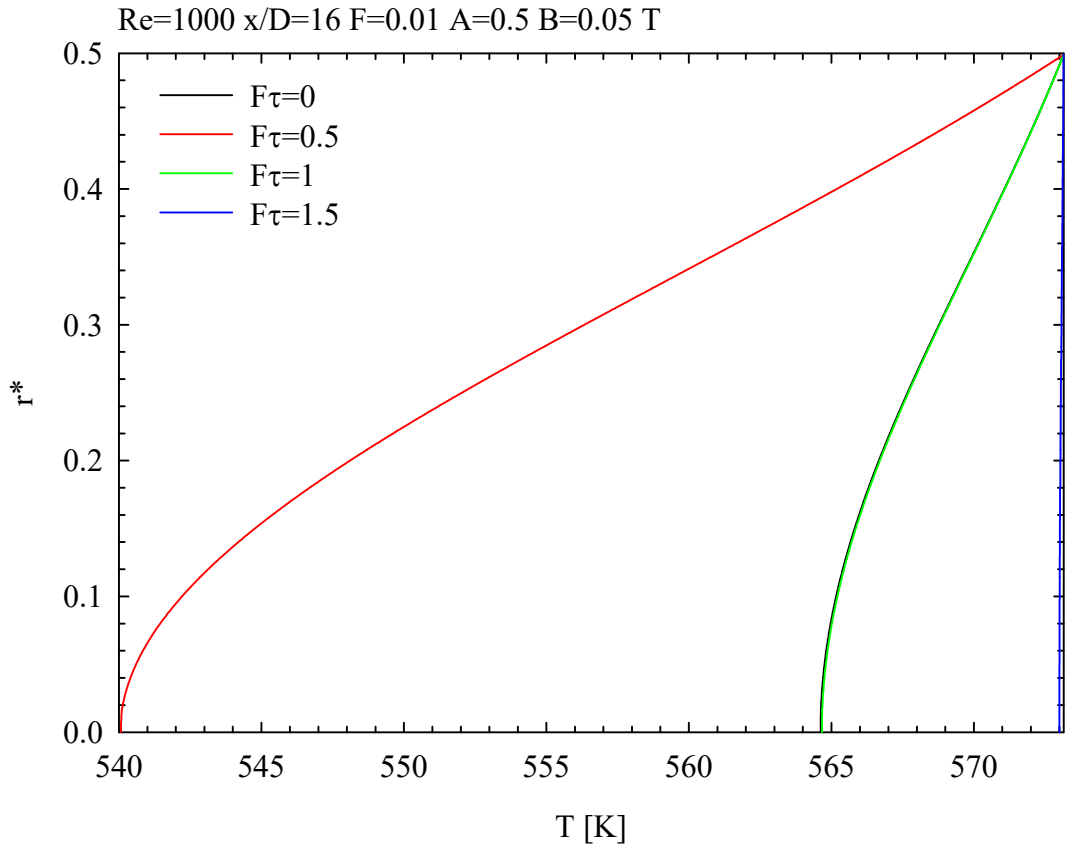
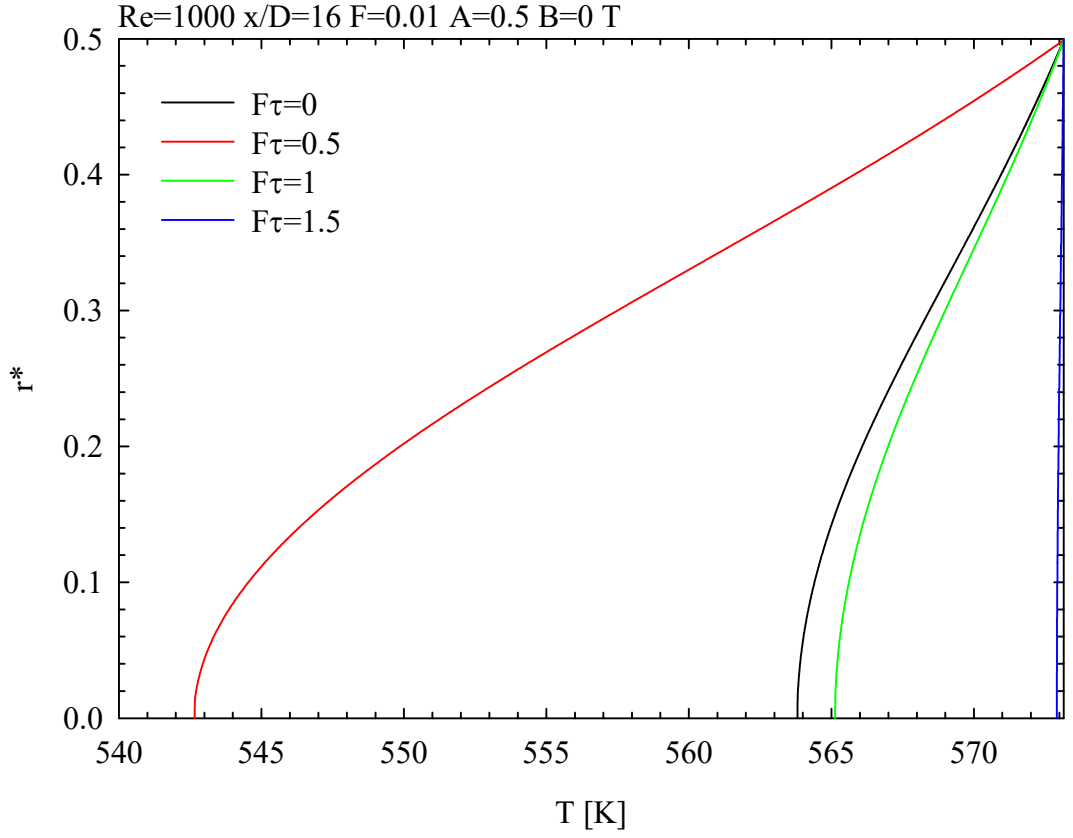
Manyetik alan varlığında akış hızında azalma meydana geldiği, bu durumun ilk manyetik alan değerinde daha etkili görüldüğü ancak manyetik alan değerlerinin artması

ile hız düşümünde azalmanın çok daha az olduğu gör÷lmektedir. Bunun sebebi, manyetik alanın artmasıyla direnç kuvvetleri arttığı için çok fazla bir etki oluşturmamaktadır. Manyetik alanın, borunun cidarında ve ekseninde farklılıklara yol açtığı gör÷lmektedir. Bu durumun sebebi 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 gör÷lmektedir. Frekans değeriyle artışıyla bozulmalar da ortaya çıkmaktadır.

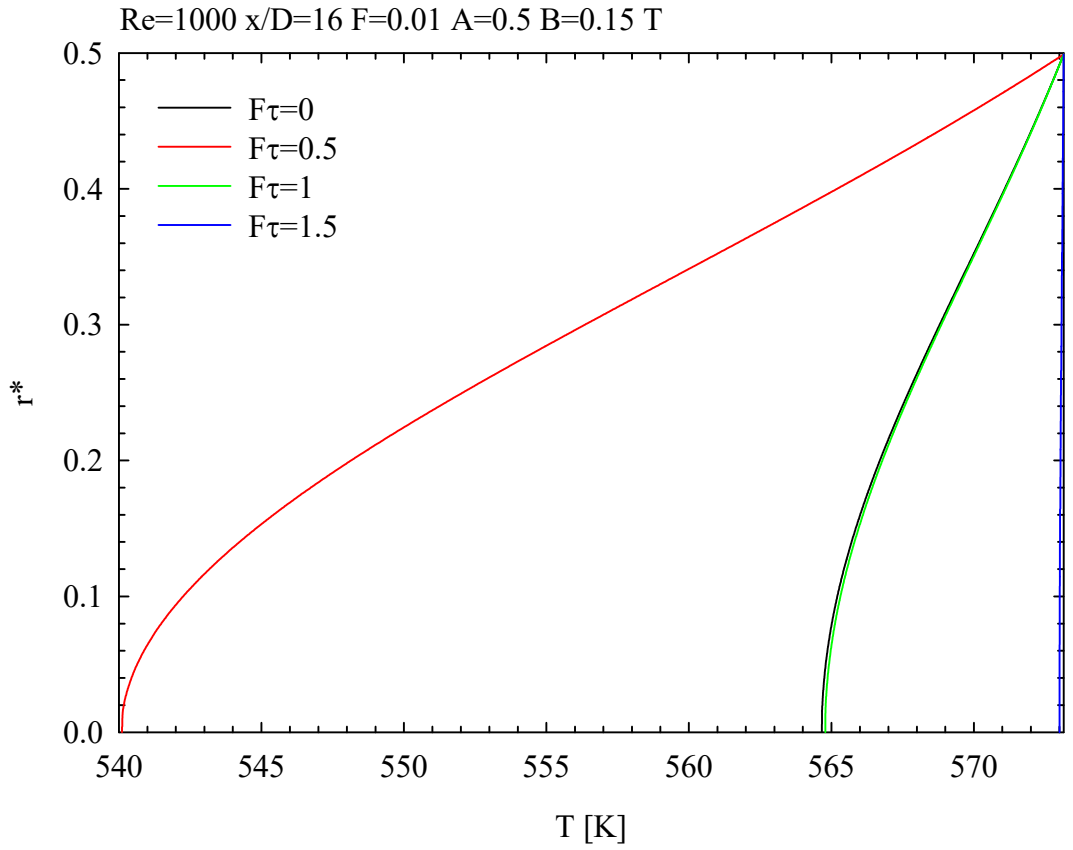
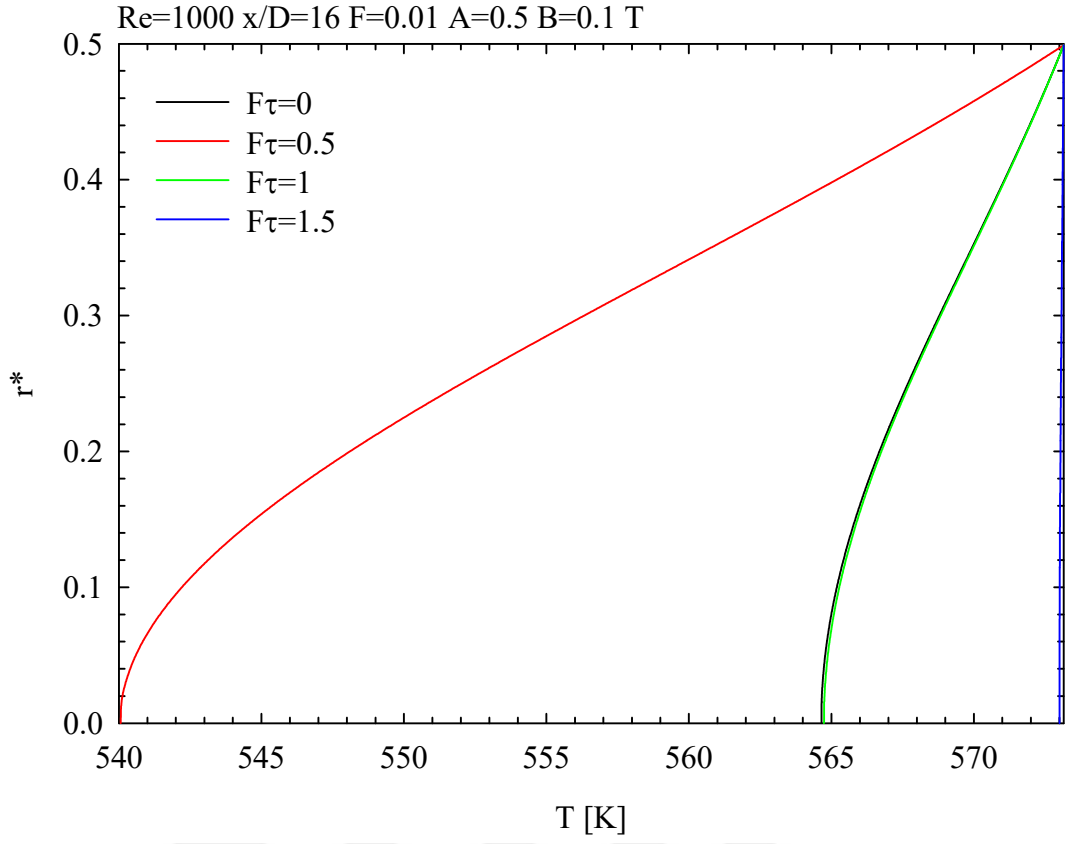
4.2.2. Manyetik Alanın Farklı Faz Açılarındaki Sıcaklık Profiline Etkisi

Farklı manyetik alan değeriindeki boyutsuz sıcaklık profillerinin faz açılarına göre değışimi Şekil 35'te belirtilmektedir.

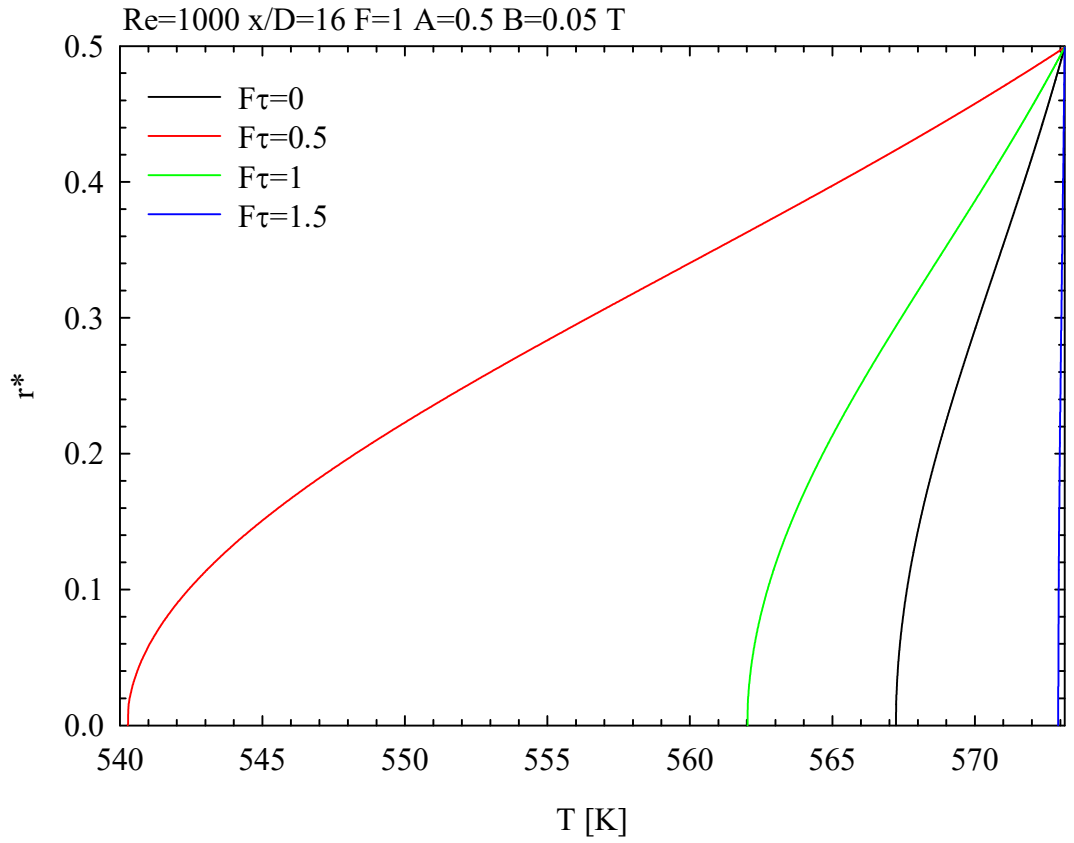
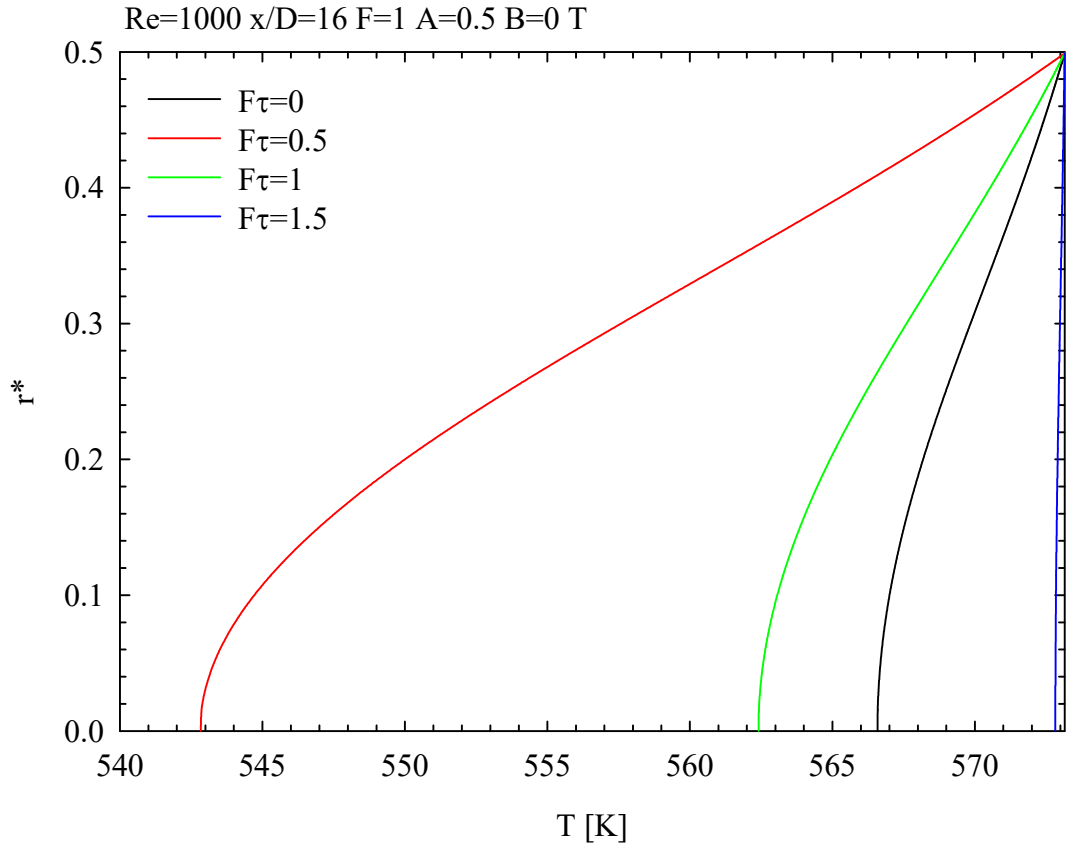




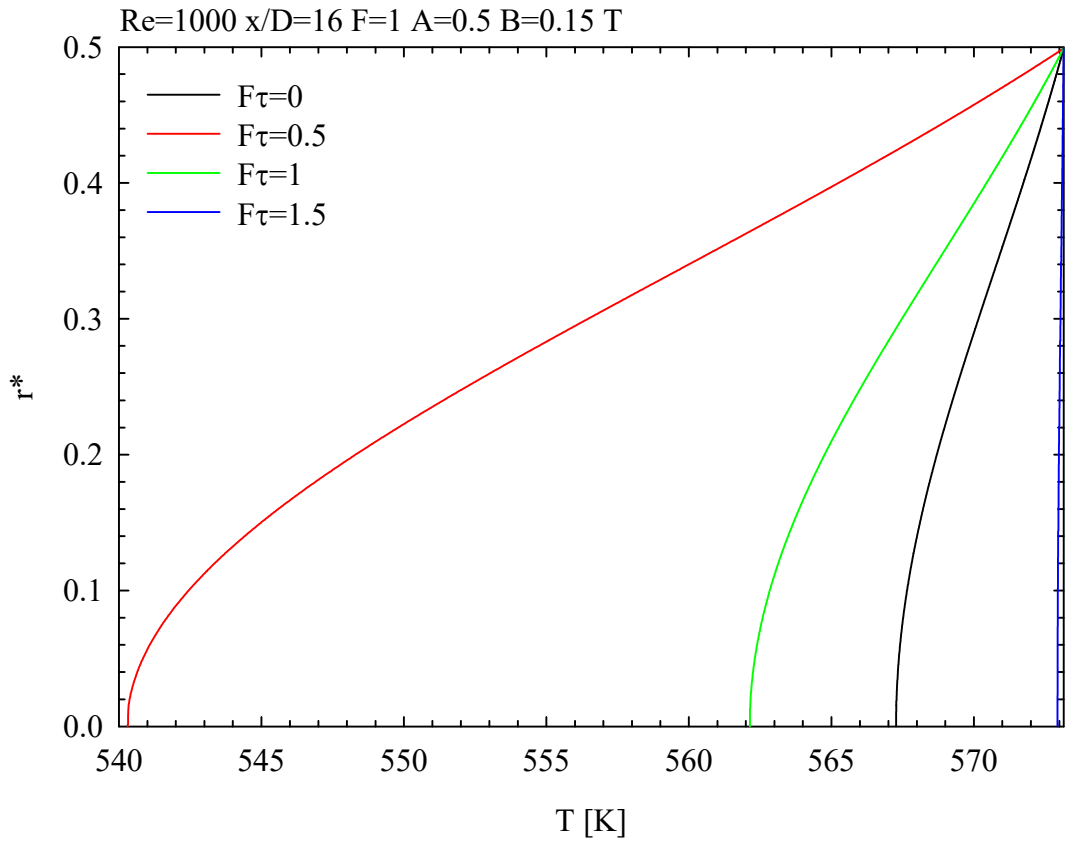
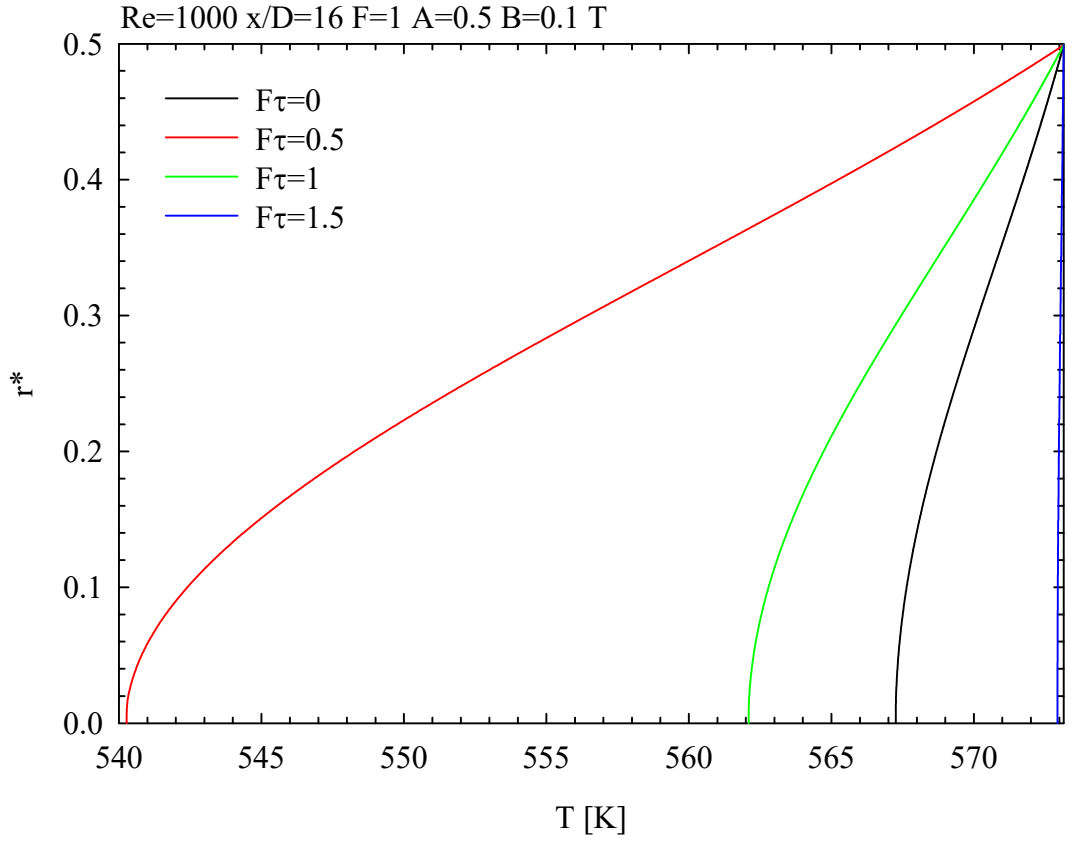
Şekil 35. Farklı frekans ve farklı manyetik alan değerlerindeki sıcaklık profillerinin faz açılarına göre değişimi



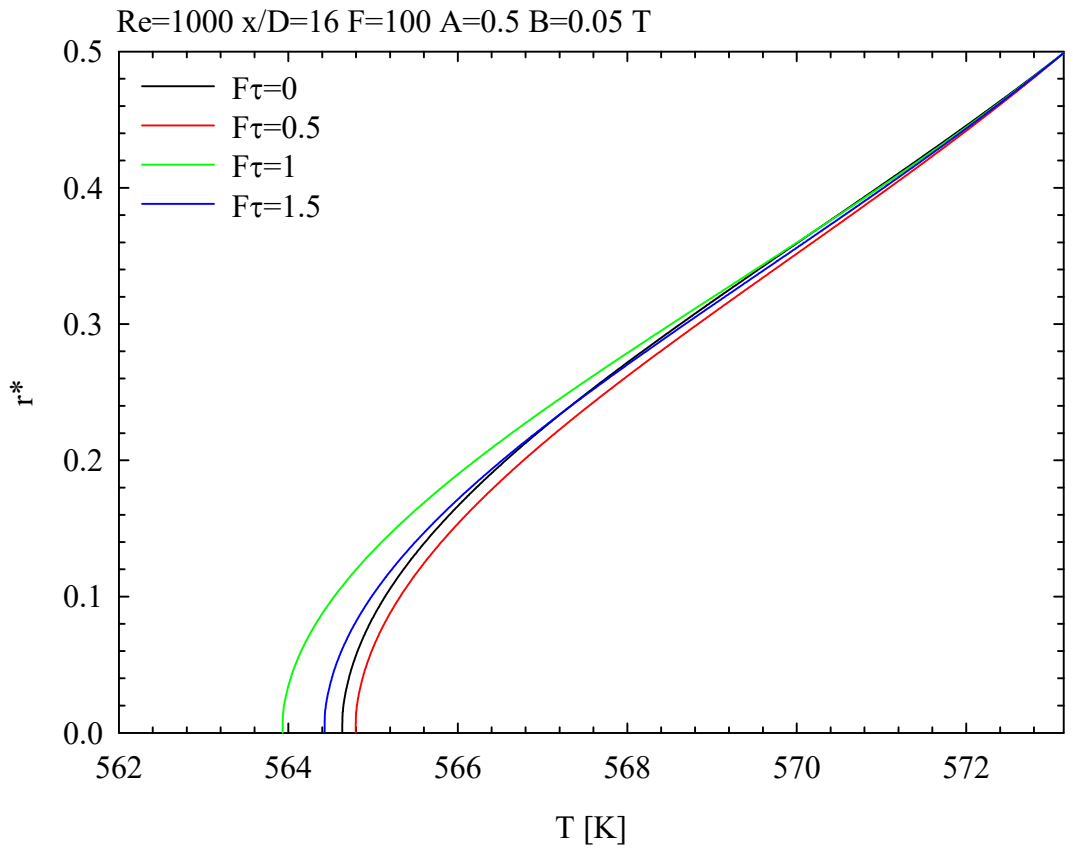
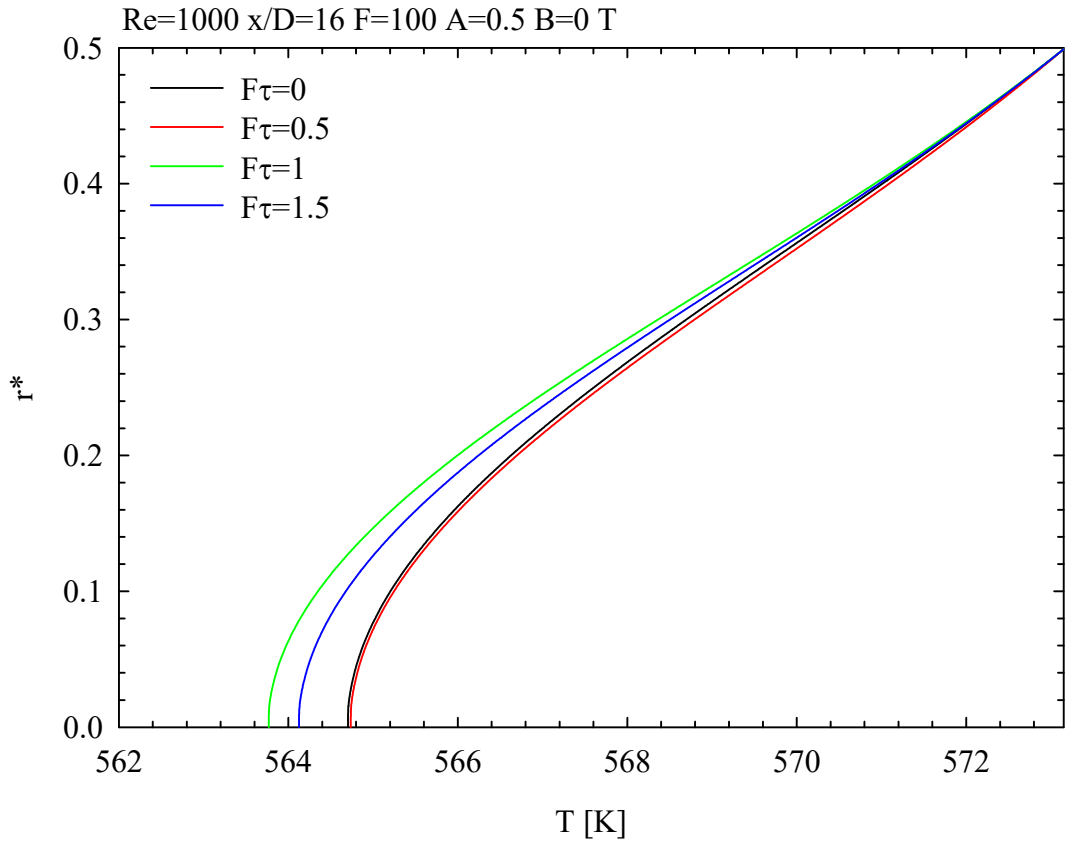
Şekil 35.'in Devamı



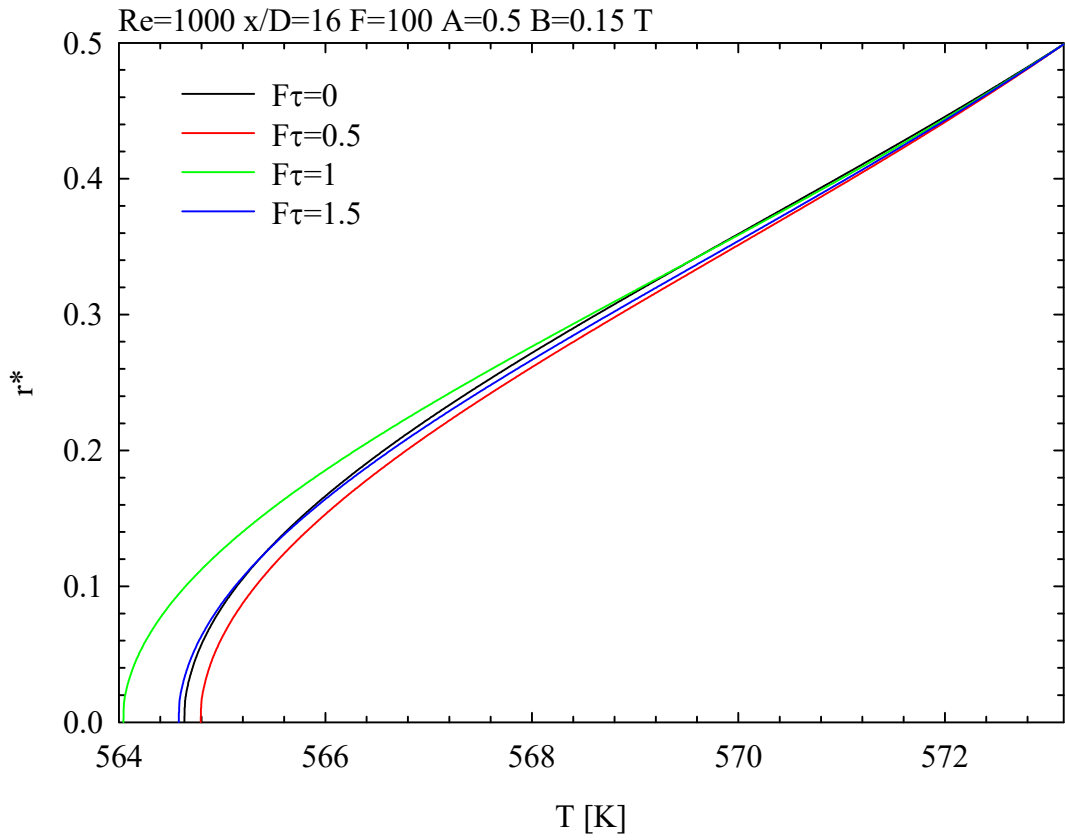
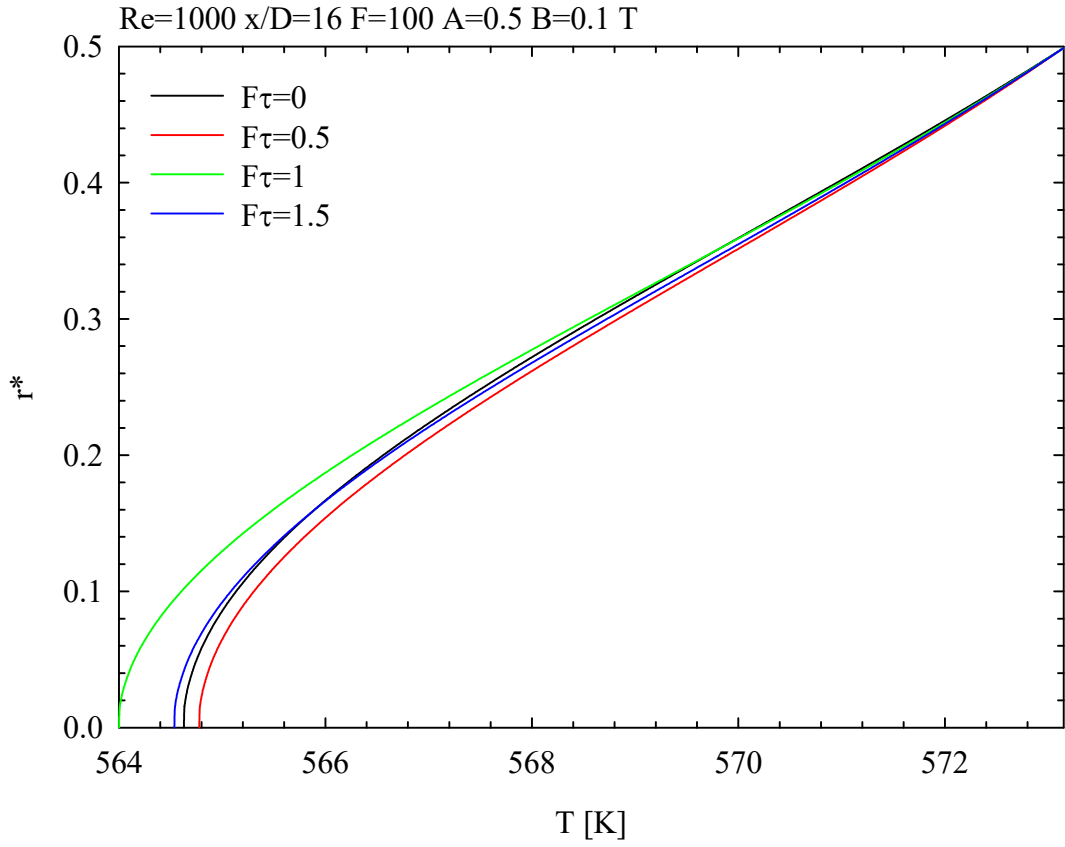
Şekil 35.'in Devamı



Şekil 35.'in Devamı



Şekil 35.'in Devamı

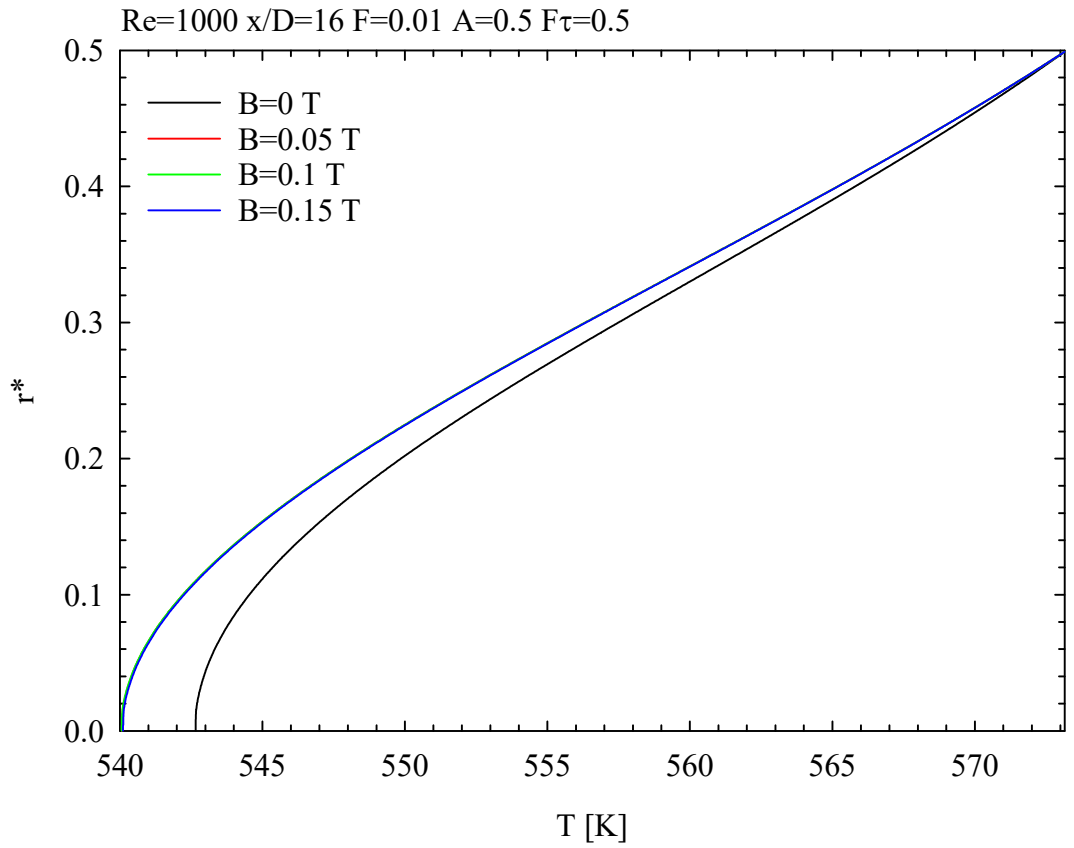
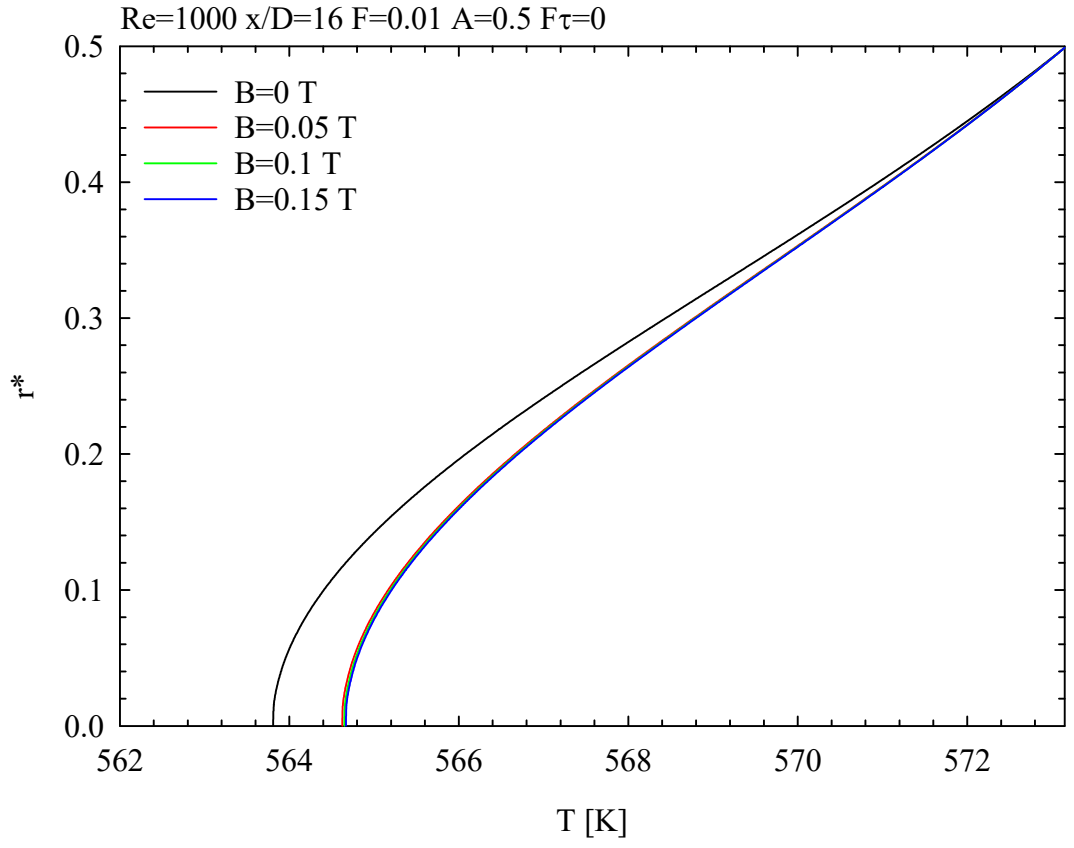


Şekil 35.'in Devamı

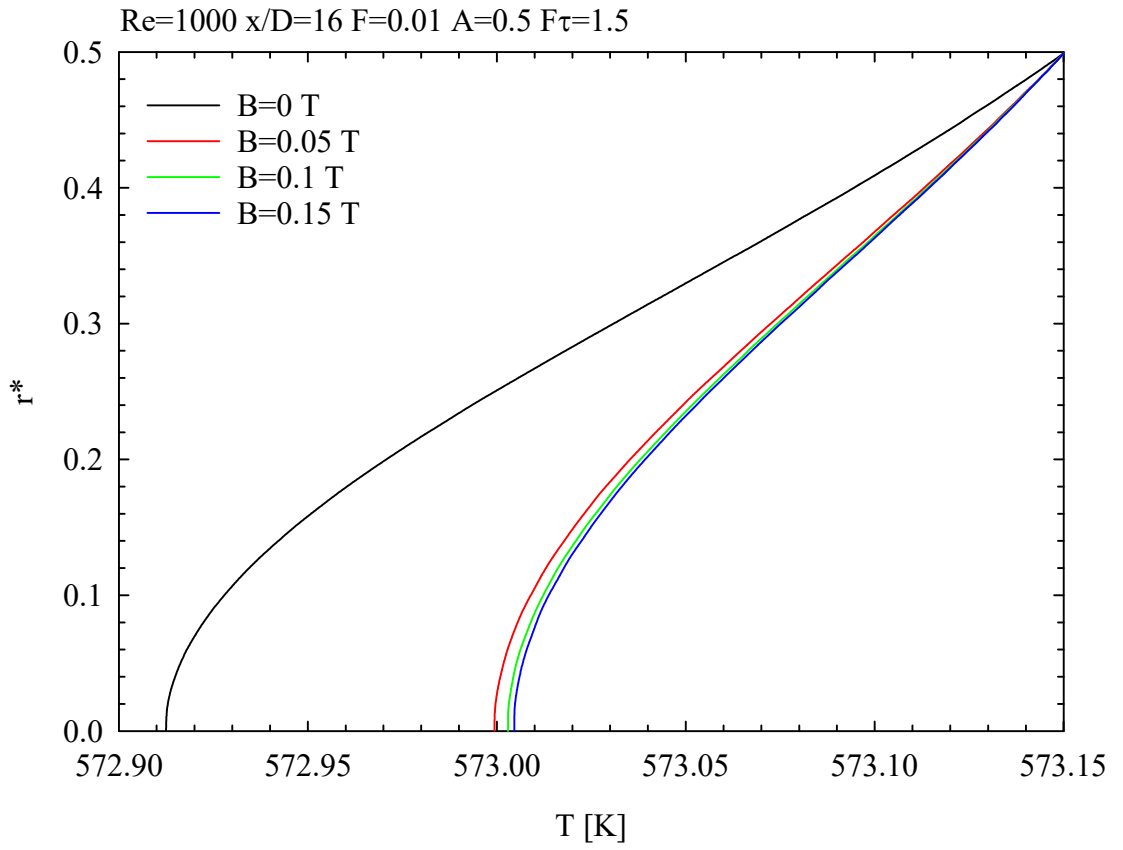
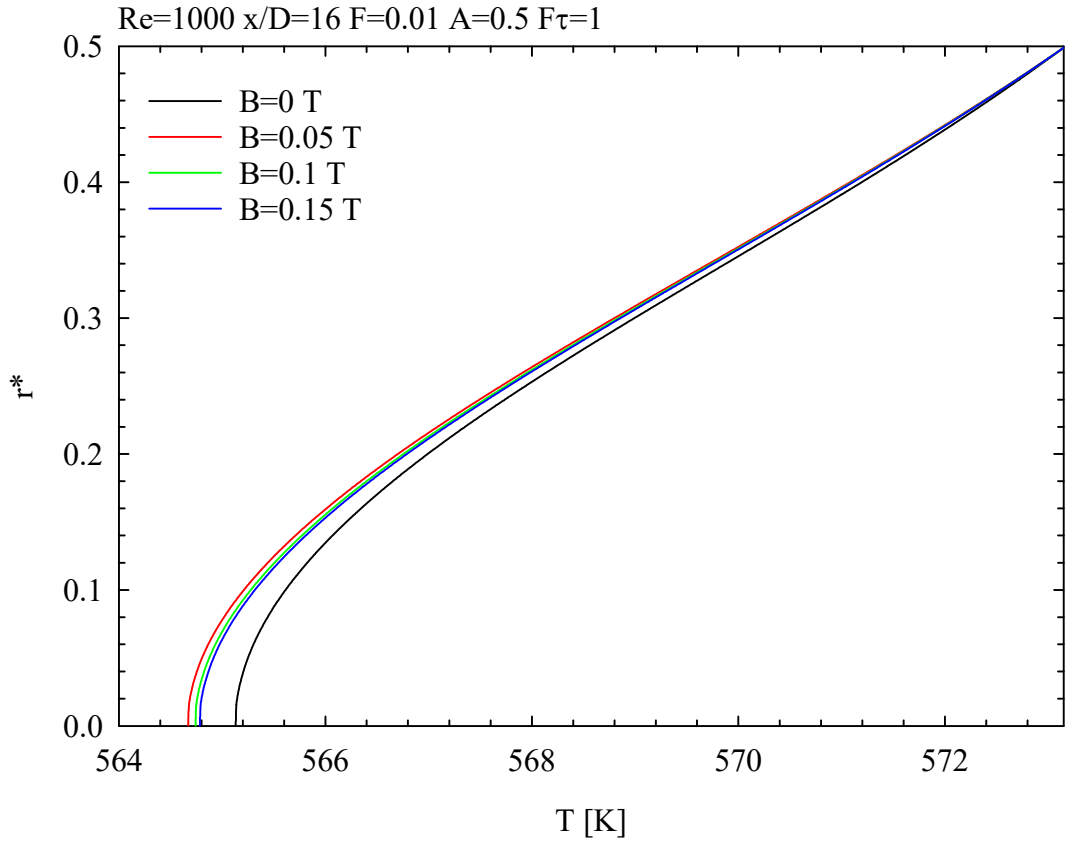
Grafiklere bakıldığında, düşük frekansta ($F=0.01 - 1$), hız profilindekine benzer şekilde sıcaklık değişimleri görülmektedir, ancak yüksek frekansta ($F=100$) sıcaklık farkının daha az olduğu görülmektedir. Hızlanma bölgesinde sıcaklığın düştüğü ve yavaşlama bölgesinde sıcaklığın arttığı görülmektedir.

Farklı boyutsuz faz açılarındaki sıcaklık profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi Şekil 36'da belirtilmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere manyetik alanın artmasıyla merkezdeki sıcaklık artmaktadır.

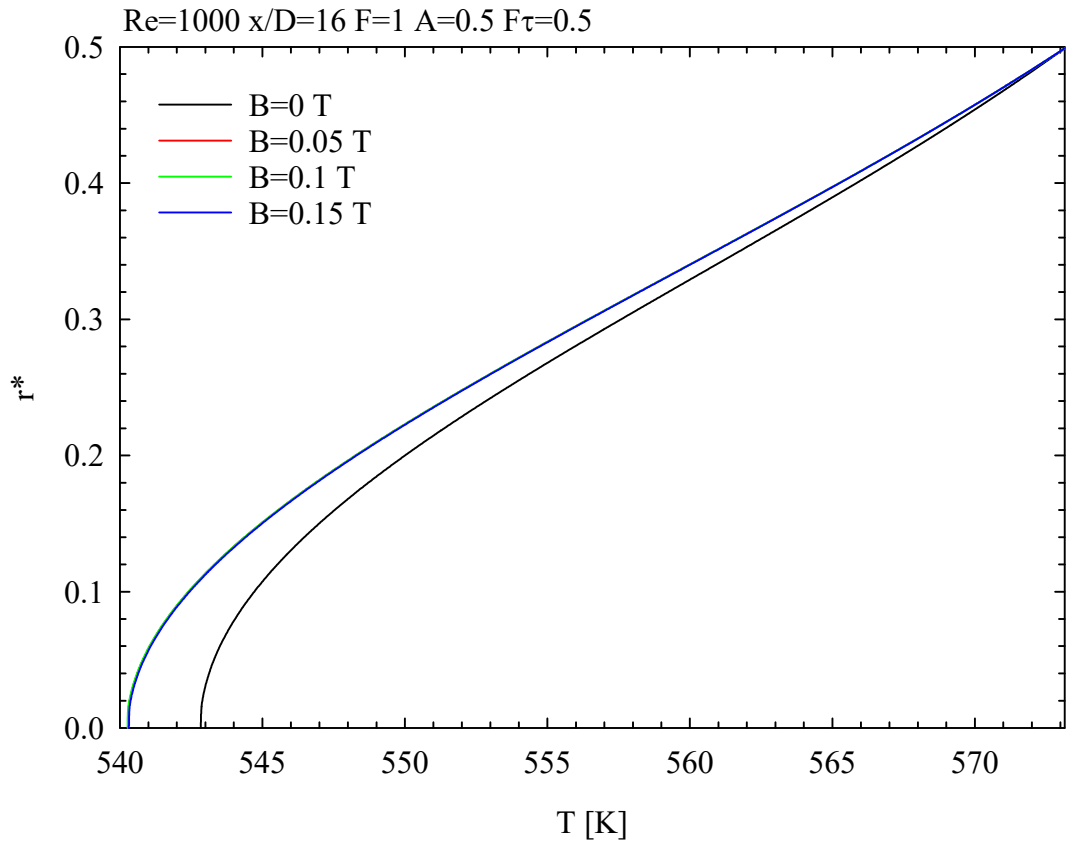
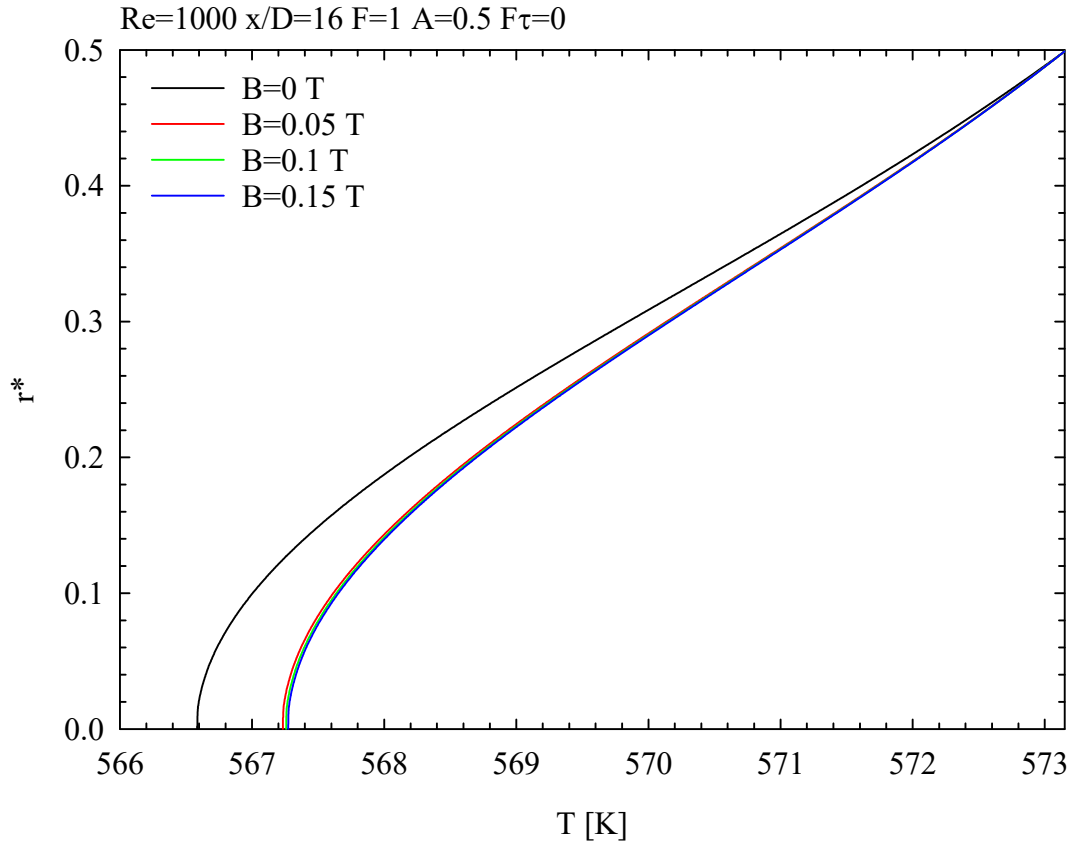




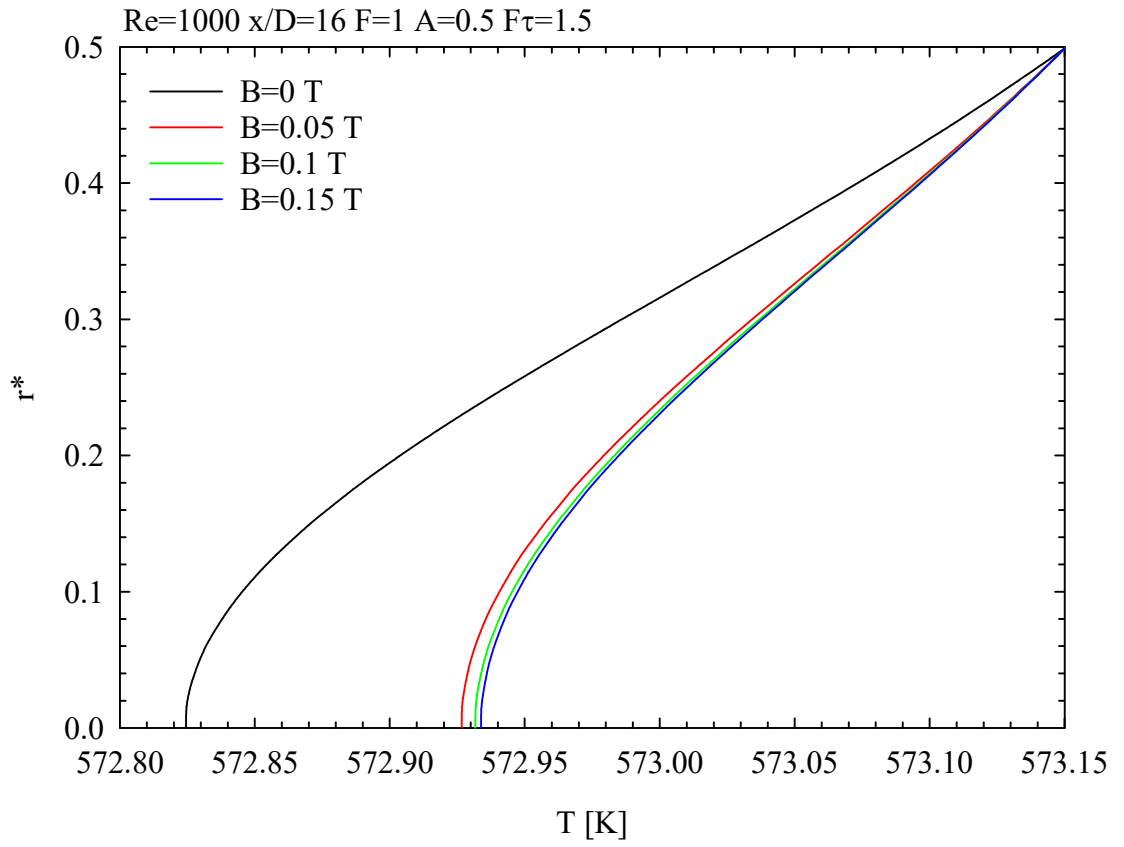
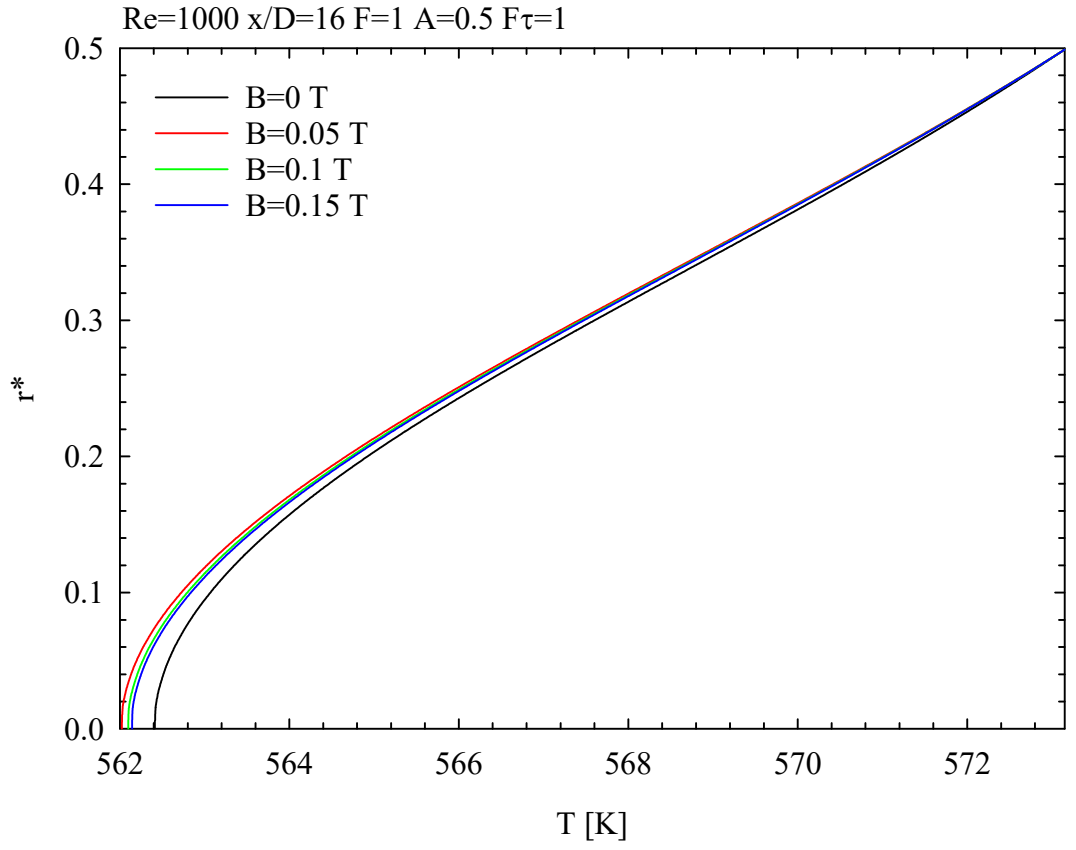
Şekil 36. Farklı frekans ve farklı faz açılarındaki sıcaklık profillerinin manyetik alan değerlerine göre değişimi



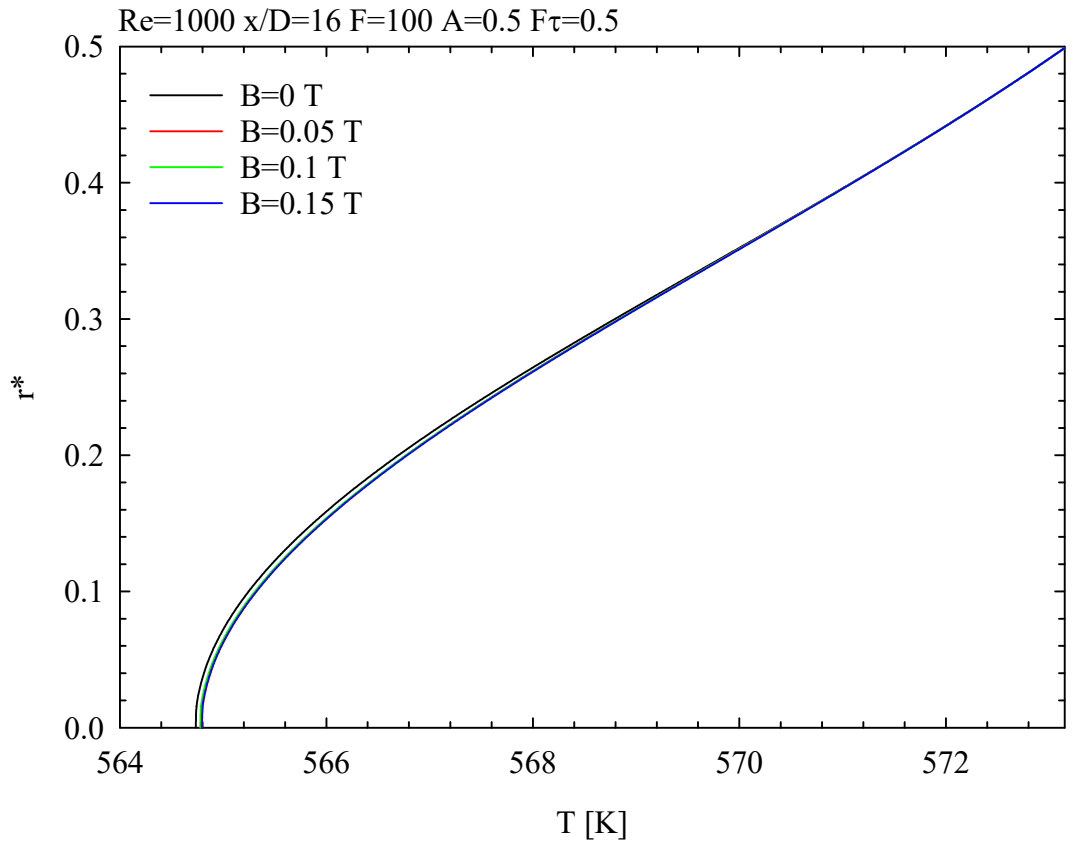
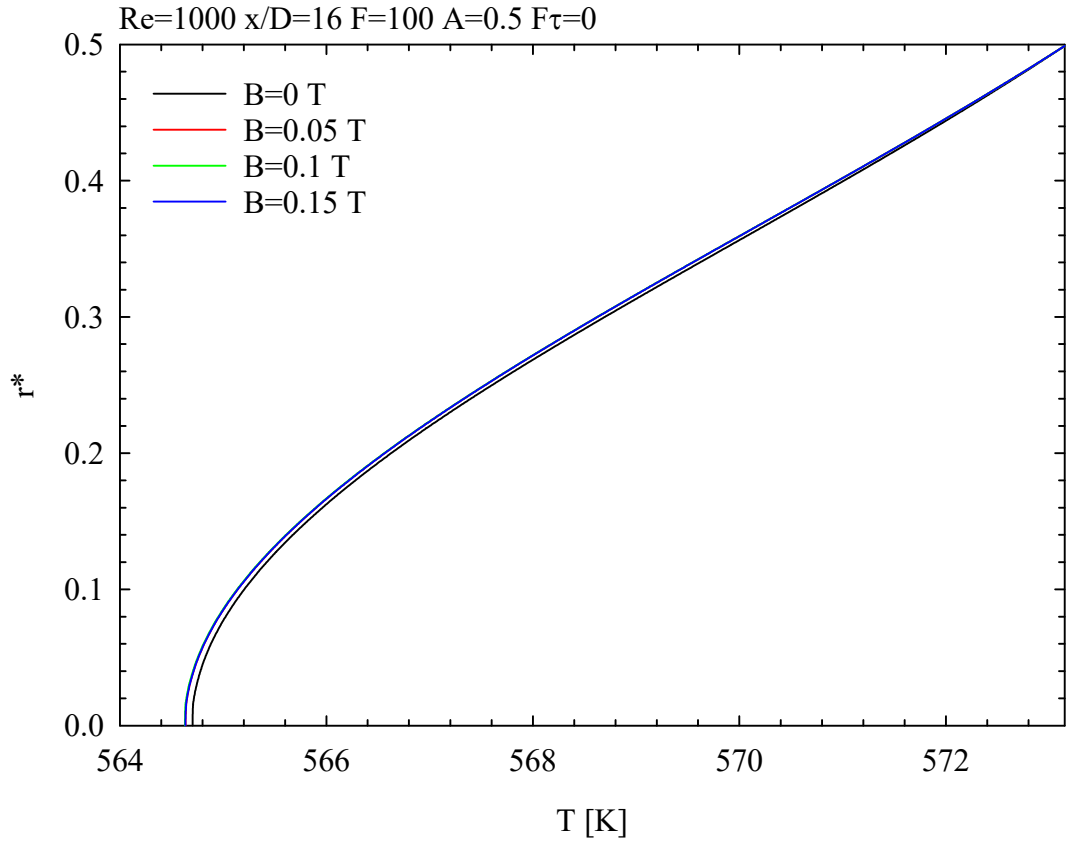
Şekil 36.'nın Devamı



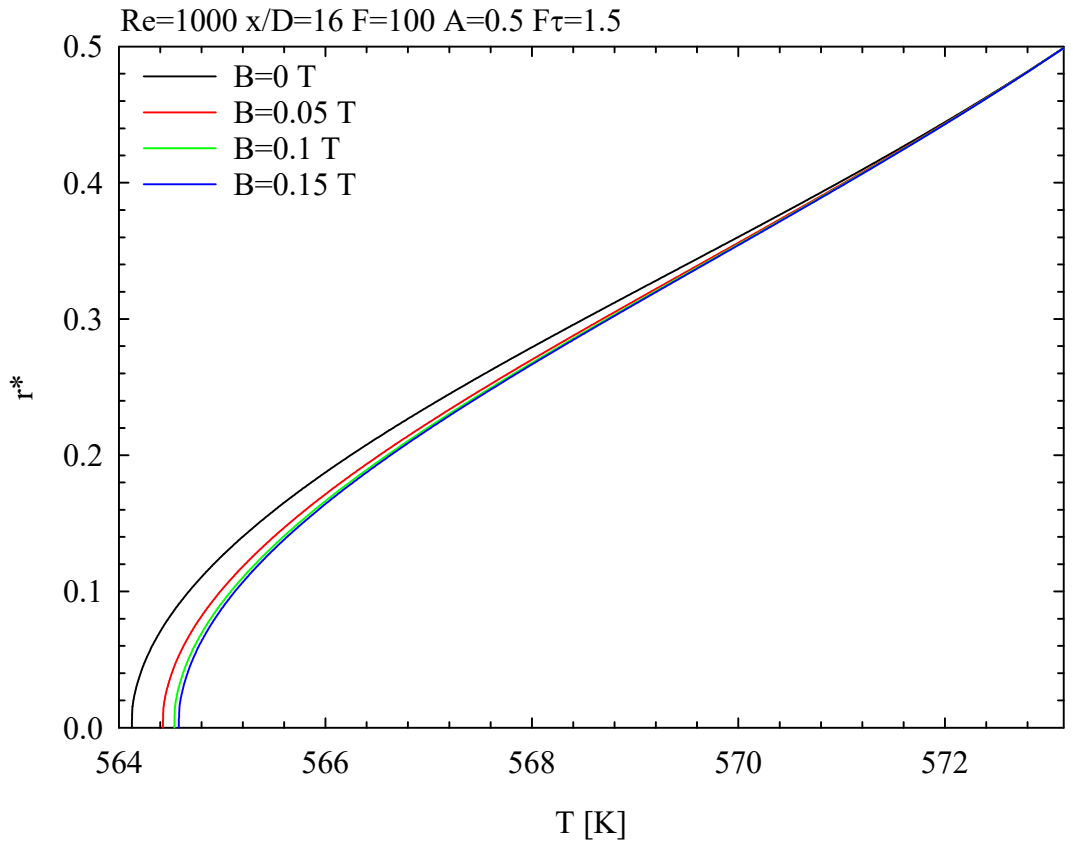
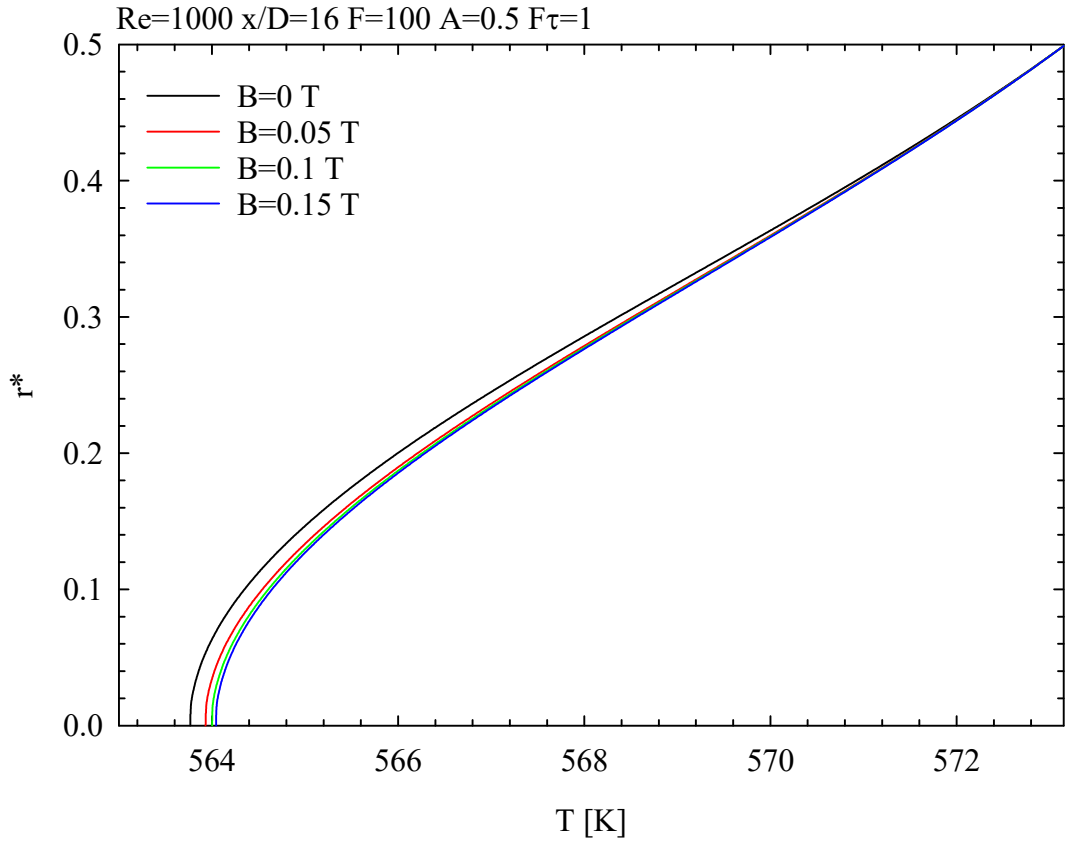
Şekil 36.'nın Devamı



Şekil 36.'nın Devamı



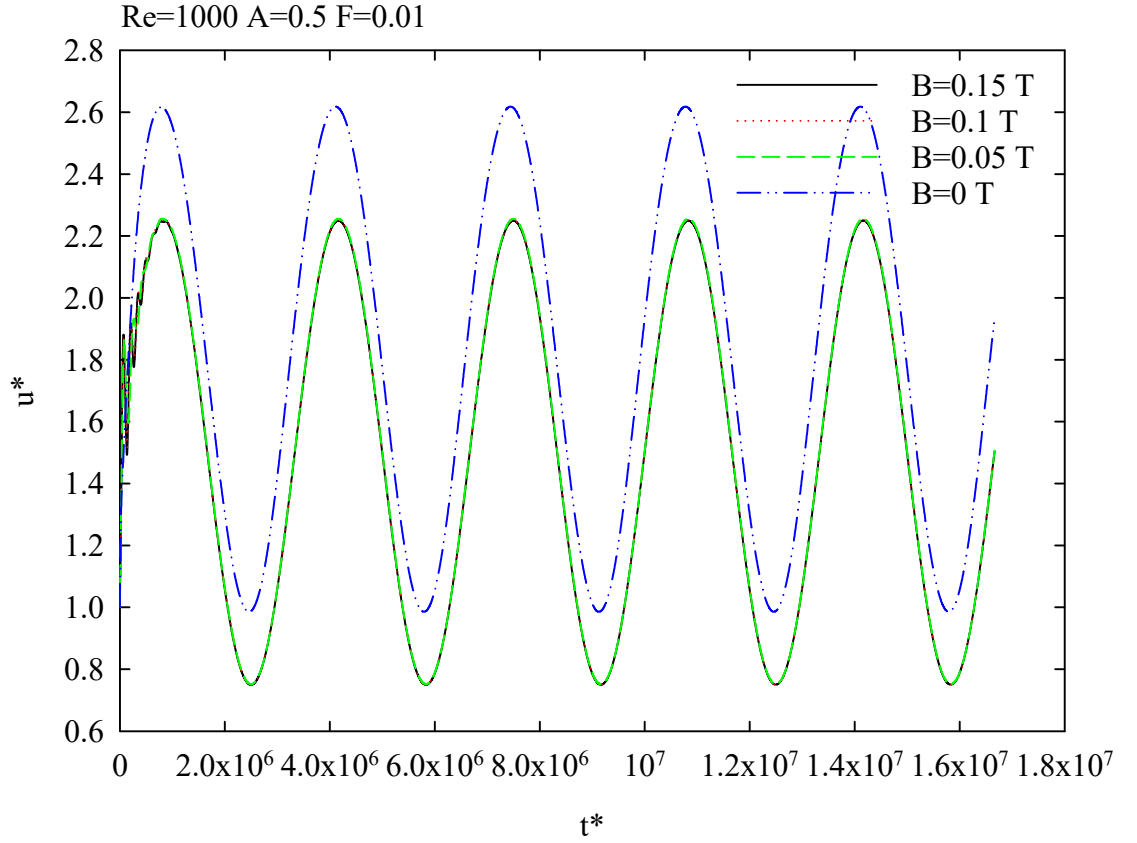
Şekil 36.'nın Devamı



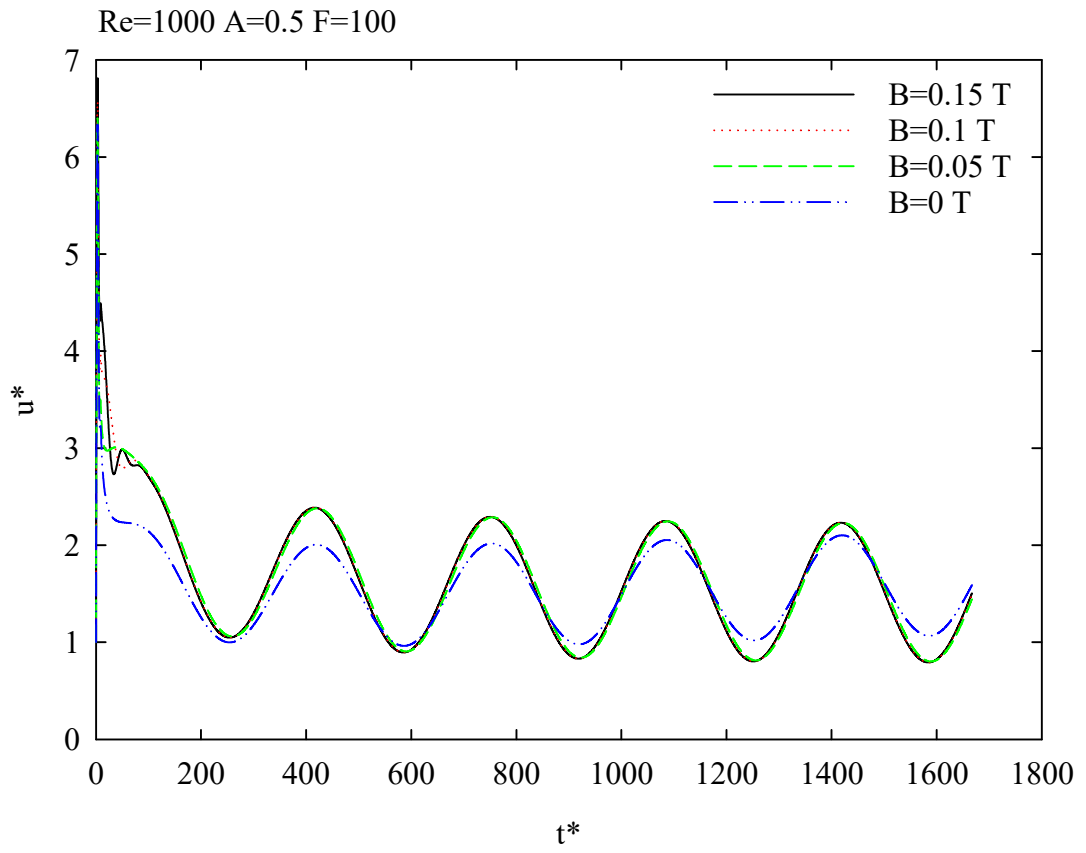
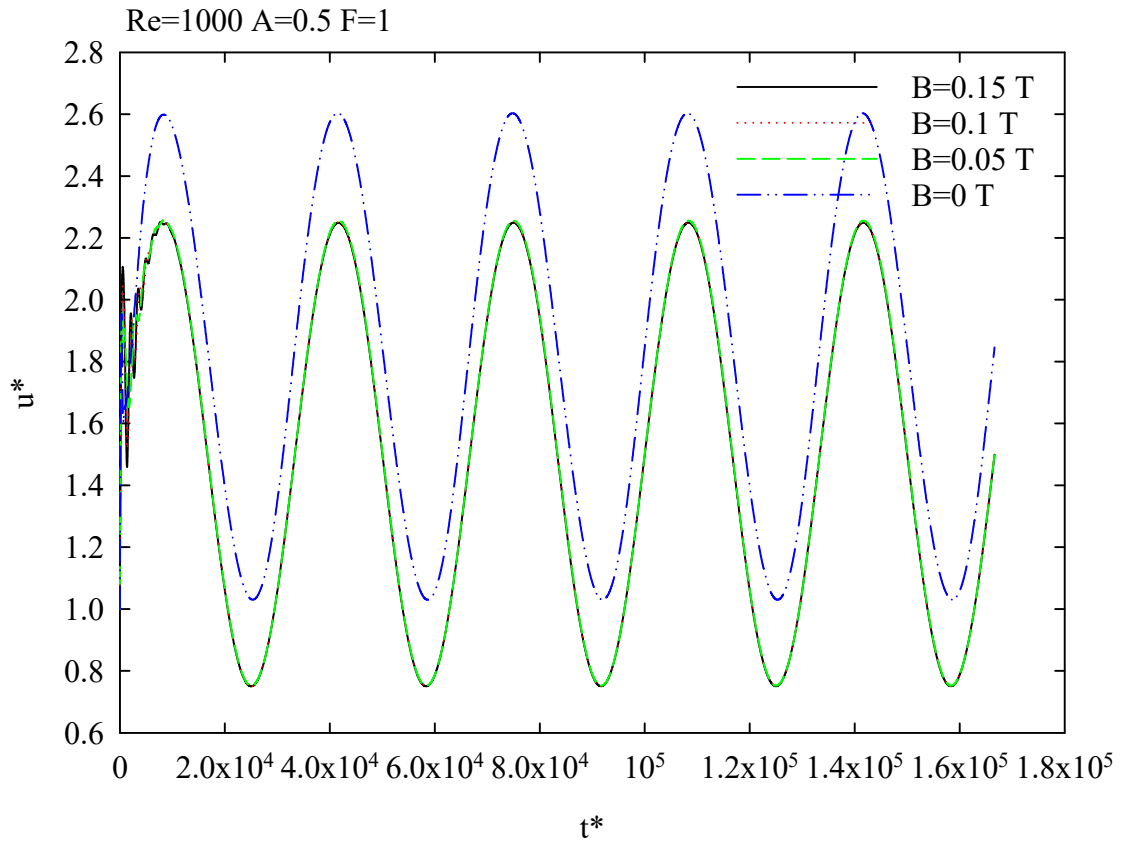
Şekil 36.'nın Devamı

4.2.3. Manyetik Alanın Genliğe Etkisi

Bu çalışma sonucu elde edilen bir diğer bulgu da genlik ile ilgilidir. Üç farklı frekansta yapılan çalışmada, analizin beş periyot boyunca koşturulması ile, boru çıkışından alınan hız değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 37). Grafiklerden görüldüğü üzere manyetik alan genliğinin artmasına neden olmaktadır. Genliğin artışı da ısı transferini arttırmaktadır. Benzer bir sonuçta Aygün (2013) tarafından yapılan çalışmalarda bulunmuştur.



Şekil 37. Farklı frekanslarda periyot boyunca zamana göre hız değişimi

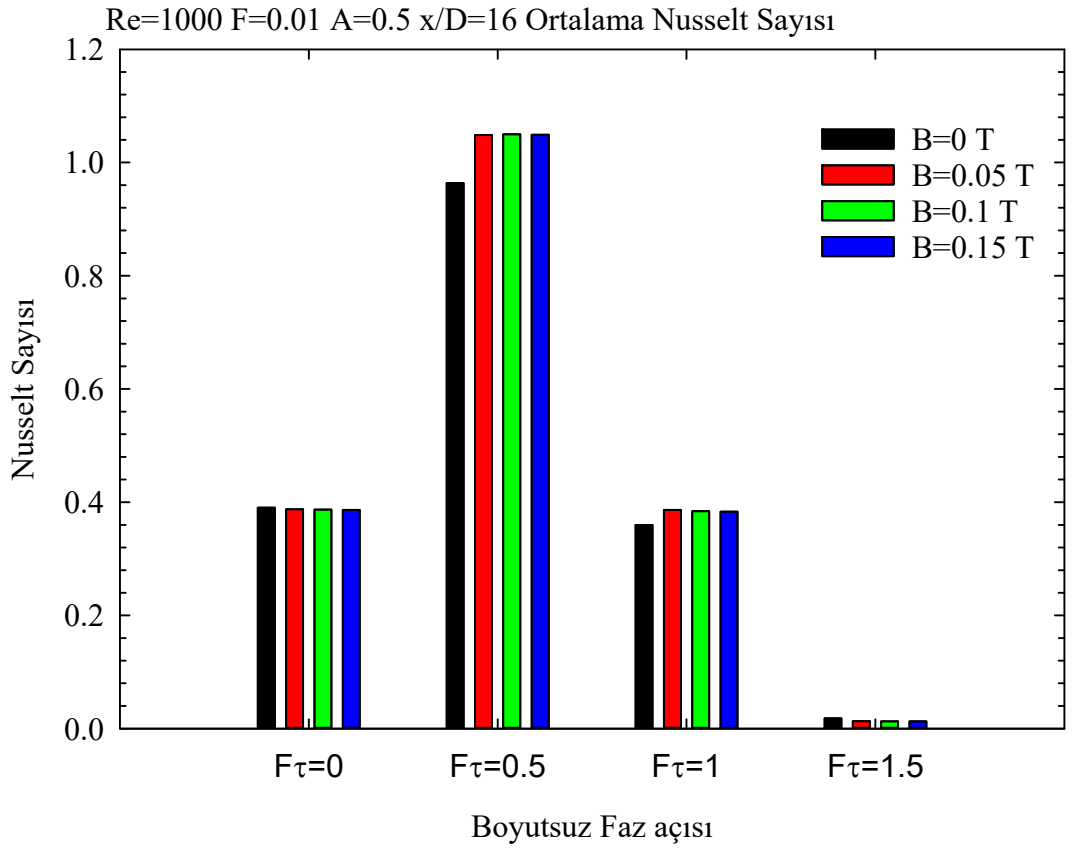
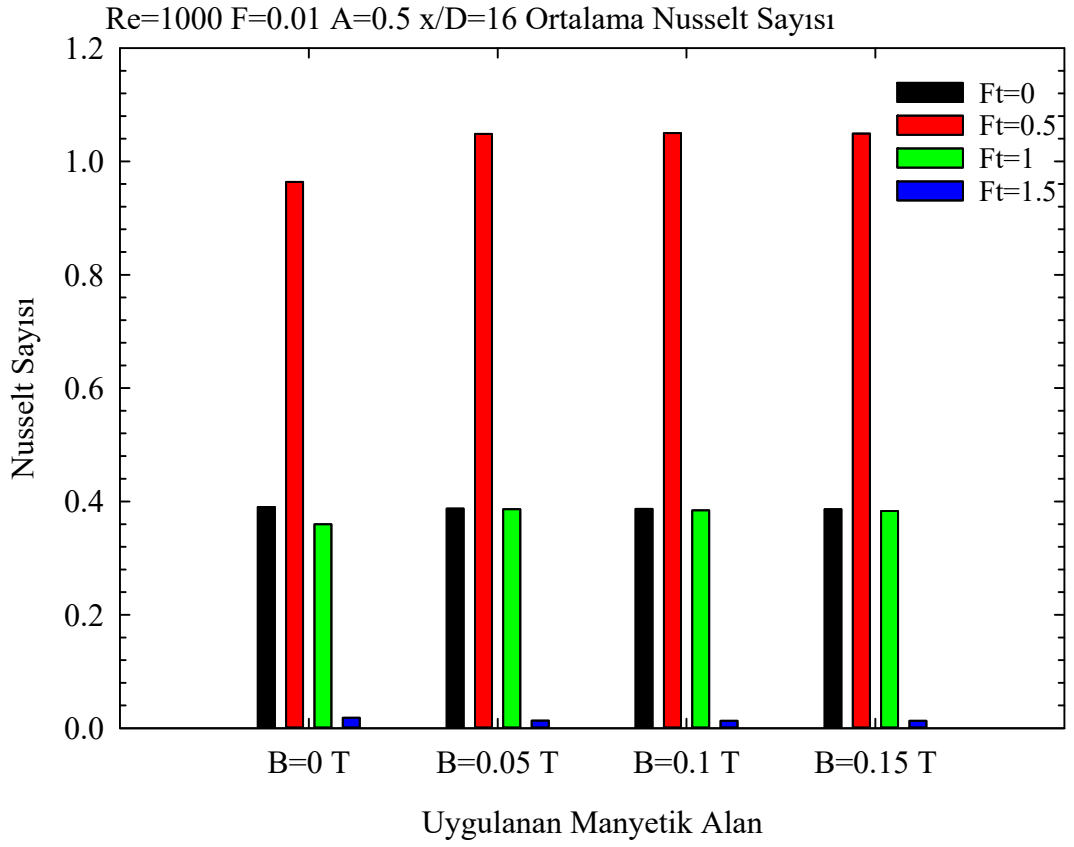


Şekil 37.'nin Devamı

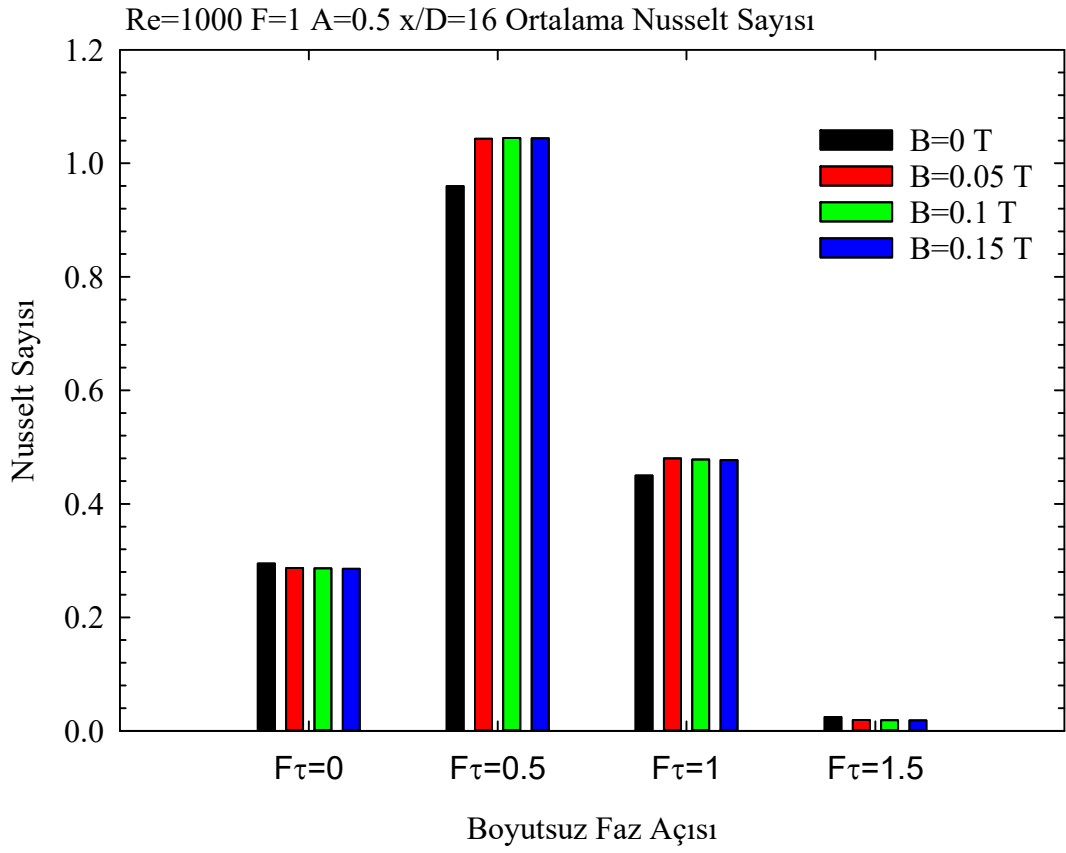
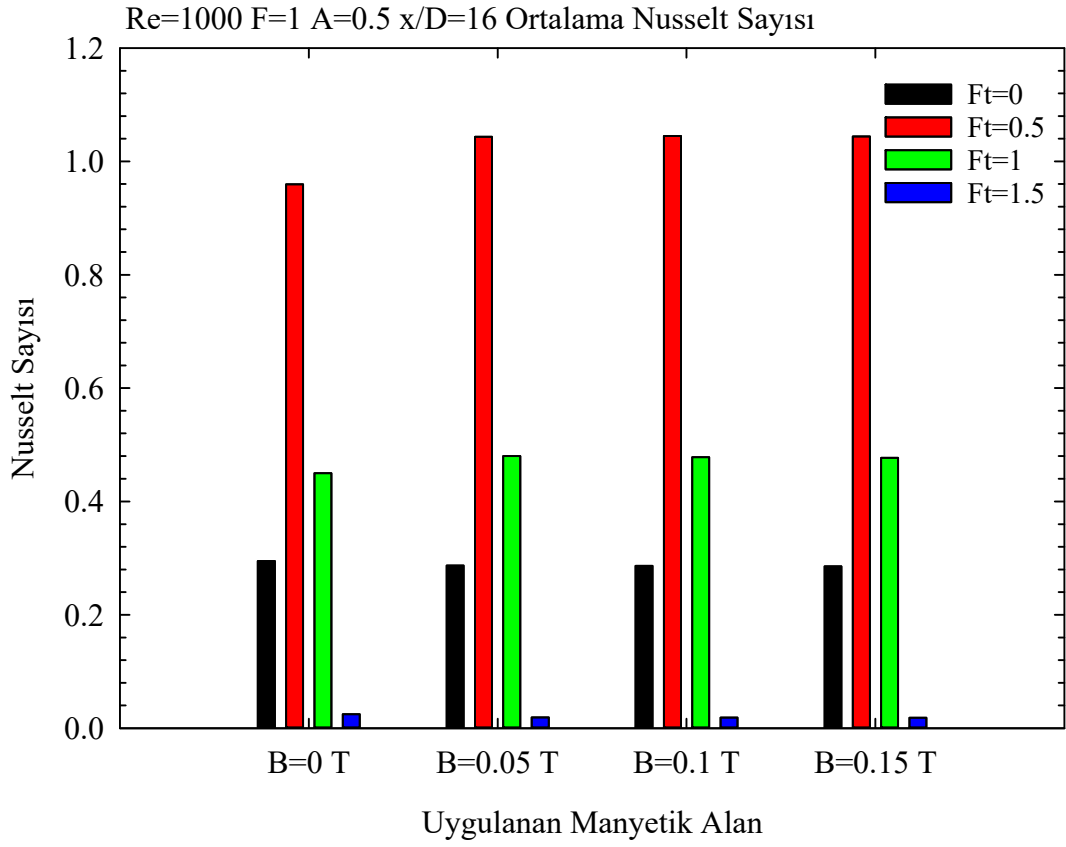
4.2.4. Manyetik Alan ve Atımlı Akışın Nusselt Sayısına Etkisi

Bu çalışmada üç frekans, dört manyetik alan ve dört faz açısı için Nusselt değişimleri incelenmiştir. Şekil 38’de görüldüğü gibi manyetik alan varlığında Nusselt sayılarında bir artış olduğu ancak ilk manyetik alan değerinden sonraki değerler için belirgin bir artış olmamıştır. Düşük frekanslar için ($F=0.01 - 1$) akışın hızlanma bölgesinde en yüksek Nusselt değerlerine ulaştığı, yavaşlama bölgesinde ise en düşük Nusselt sayısına ulaştığı ancak yüksek frekansta ($F=100$) boyutsuz faz açısının sıfır olduğu durumda Nusselt sayılarının arttığı görülmektedir. Frekans artışıyla birlikte hız profilindeki gradyan artmakta dolayısı ile sınır tabaka incelmekte ısı transferi ve Nusselt sayısı artmaktadır.

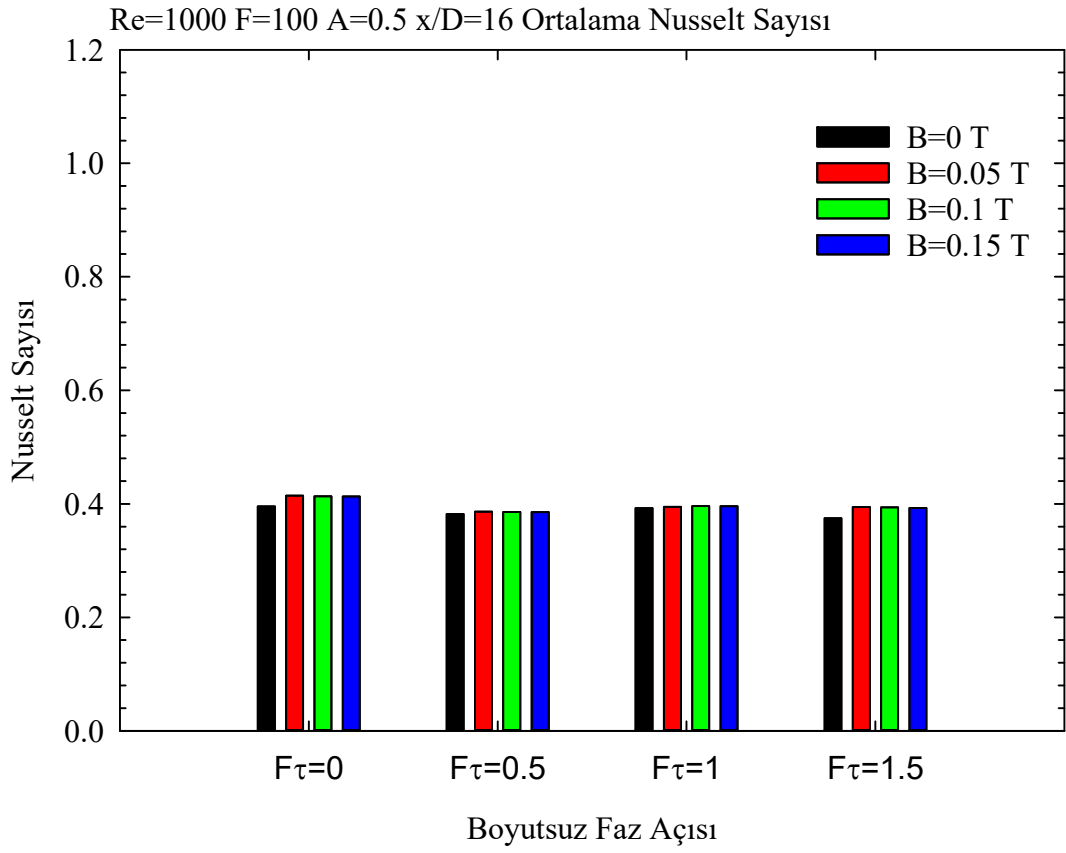
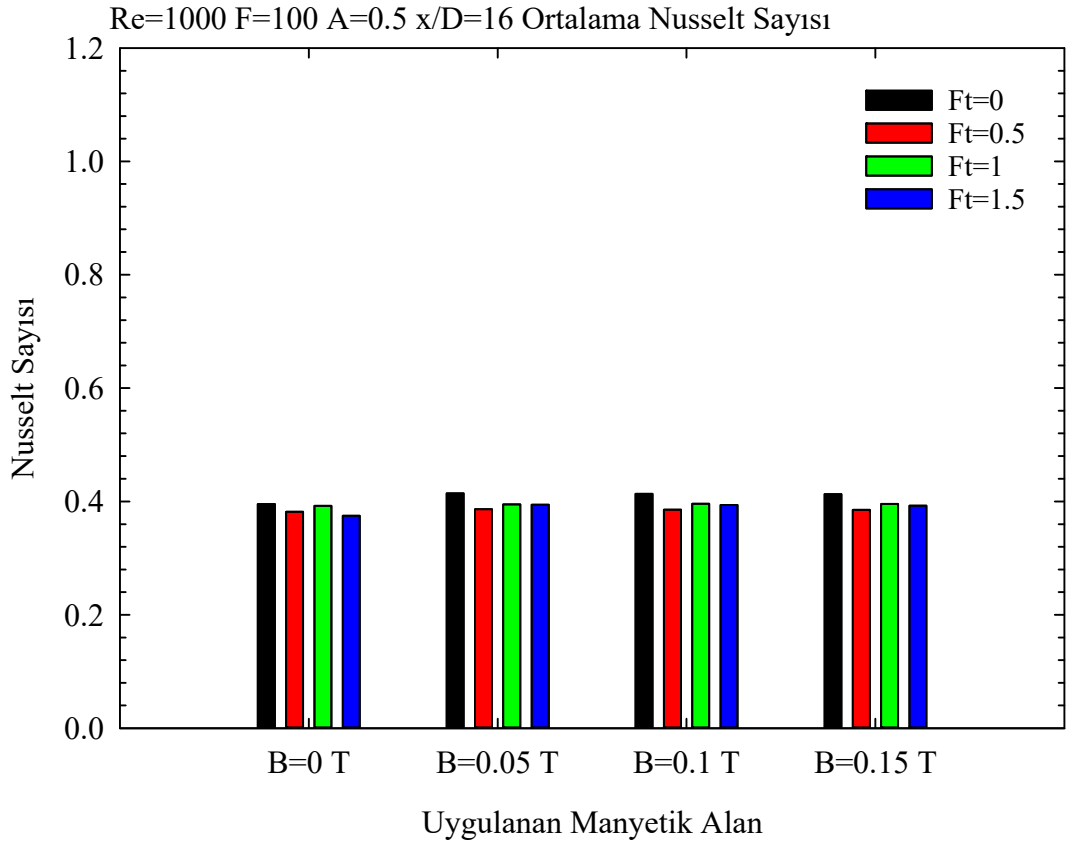




Şekil 38. Nusselt sayısının manyetik alan ve faz açılarındaki değişimi



Şekil 38.'in Devamı



Şekil 38.'in Devamı

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

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

- ❖ Laminer boru akışında manyetohidrodinamik (MHD) etkileri ile atımlı akış, akışkanın hareketi ve ısı transferi üzerinde etkilidir. Atımlı akışın frekansı, akışkanın hızı ve sıcaklığındaki değişiklikleri kontrol etmektedir, manyetik alanın şiddeti ise akışkan içerisinde hareket eden yüklerin davranışını değiştirmektedir.
- ❖ Manyetik alanın artışı Lorentz kuvvetinin artmasına neden olur. Bu kuvvet, sıcaklık ve hız değişikliklerini oluşturan konveksiyon akımlarına karşı çalışır, dolayısı ile Lorentz kuvvetinin artması konveksiyonun azalmasına yol açar. Bunun sonucu olarak ısı transferi yavaşlar ve Nusselt sayısı azalır. Ancak, bu çalışmada görüldüğü gibi bazı durumlarda manyetik alanın artışı, akışın düzenlenmesine ve sıcaklık dağılımının homojenleşmesine yol açabilir. Bu da ısı transferini artırarak Nusselt değerinin artmasına neden olmaktadır.
- ❖ Atımlı akışta ise frekans arttıkça, sıcaklık değişimleri daha sık gerçekleşmekte ve ısı transferi artmaktadır. Düşük frekans ($F=0.01 - 1$) değerlerinde; en yüksek Nusselt sayısı akışın hızlanma bölgesinde ($F_r = 0.5$), en düşük Nusselt sayısı yavaşlama bölgesinde ($F_r = 1.5$) oluşmuştur.
- ❖ Manyetik alanın varlığı yüksek frekansta halkasal etkinin oluşmasını engellemiştir. Bu durumun sebebi, Lorentz kuvvetlerinin akışı frenleyerek ters dönmesine engel olmasıdır.
- ❖ Dört farklı manyetik alan ($B=0 \text{ T} - 0.05 \text{ T} - 0.1 \text{ T} - 0.15 \text{ T}$) değerinde analizler yapılarak, ilk manyetik alan değerinde ($B=0.05 \text{ T}$) akışkan davranışlarında gözle görülür bir etkinin olduğu, ancak yüksek manyetik alan değerlerinin akış davranışlarına çok fazla etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebi, manyetik alanın artmasıyla direnç kuvvetleri arttığı için çok fazla bir etki oluşturmamaktadır.
- ❖ Manyetik alan aynı zamanda genliğin de artmasına sebep olarak ısı transferini arttırmaktadır.

❖ Sonuç olarak, laminar bir boru akışında MHD etkileri ile atımlı akışın ısı transferi üzerindeki etkisi, atımlı akışın frekansına ve manyetik alanın şiddetine bağlıdır. Atımlı akışın frekansı ve manyetik alan arttıkça ısı transferi de artmaktadır.

❖ Çalışmada elde edilen sonuçlardan bir diğeri de manyetik alan çalışmalarında ağ bağımsızlığının önemi ile ilgilidir. Ağdan bağımsızlık çalışmalarının manyetik alan dahil edilerek yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmaya ilave olarak; farklı akışkan, frekans, genlik, manyetik alan ve Reynolds sayılarında çalışmalar yapılarak etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.



KAYNAKÇA

- Afify, A. A. (2007). *Effects of Variable Viscosity On Non-Darcy MHD Free Convection Along A Non Isothermal Vertical Surface In A Thermally Stratified Porous Medium*. Applied Mathematical Modelling, 31, 1621–1634.
- Attia, H. A. (2006). *Hall Effect on the Flow of a Dusty Bingham Fluid in a Circular Pipe*. Turkish J. Eng. Env. Sci., 30, 14-21.
- Aygün, C. (2013). *Atımlı Giriş Akışının Akış ve Isı Transferi Üzerindeki Etkisi*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı, Trabzon.
- Aygün, C. ve Aydın, O. (2014). *Hydrodynamics Of Piston-Driven Laminar Pulsating Flow: Part 1. Developing Flow*. Nuclear Engineering and Design, 274, 164-171.
- Aydın, O. ve Aygün, C. (2014). *On The Hydrodynamical Development Length For Pressure-Driven Pulsating Laminar Flow In A Pipe*. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 34, 1, 85-91.
- Aygün, C. ve Aydın, O. (2015). *Pressure-driven Laminar Pulsating Flow In A Pipe: Effect Of The Amplitude*. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 35, 1, 97-105.
- Bandyopadhyay, S. ve Layek, G.C. (2012). *Study Of Magnetohydrodynamic Pulsatile Flow In A Constricted Channel*. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 17, 2434–2446.
- Chamkha, A. J. (2000). *Unsteady Laminar Hydromagnetic Fluid-Particle Flow And Heat Transfer In Channels And Circular Pipes*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 21, 740-746.
- Choi, S. U. S. ve Eastman, J. A. (1995). *Enhancing Thermal Conductivity Of Fluids With Nanoparticles*. Argonne National Lab., IL (United States).
- Chopra, K. P. (1961). *Hydromagnetic Flow in a Circular Pipe*. Zeitschrift für Physik 162, 46-52.
- Çengel, Y. A. (2011). *Isı ve Kütle Transferi*. (3. Baskıdan Çev. V. Tanyıldız), Güven Kitabevi.
- Çengel, Y. A. ve Cimbala J. M. (2020). *Isı ve Kütle Transferi*. (3. Baskıdan Çev. T. Ergin), Palme Yayınevi.
- Erdem, M. (2019). *Nano Parçacık Katkılı Manyetohidrodinamik Akışın Deneysel ve Sayısal İncelenmesi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.

- Erdem, M., Fırat, M. ve Varol, Y. (2018). *Dairesel Bir Kanalda Soğutma Şartları Altında MHD Sıvı Lityum Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(1), 30-35.
- Erdem, M., Varol, Y. ve Fırat, M. (2021). *Soğuk Şartlar Altındaki Bir Boruda MHD Nanoakışkanın Zorlanmış Taşınım ile Isı Transferi*. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 33(1), 303-313.
- Gedik, E. (2012). *Silindirik Borularda Manyetohidrodinamik Akışın Deneysel Olarak İncelenmesi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Sayısal Analizi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Hartmann, J. ve Lazarus, F. (1937). *"Hg-dynamics II", Theory Of Laminar Flow Of Electrically Conductive Liquids In A Homogeneous Magnetic Field*. 15(7).
- He, X., and Ku, D. N. (1994). Unsteady entrance flow development in a straight tube, *Journal of Biomechanical Engineering*, 116, pp. 355-360.
- Hossain, An., Hossain, Ak. ve Wilson, M. (2001). *Unsteady Flow of Viscous Incompressible Fluid With Temperature dependent Viscosity Due to a Rotating Disc in Presence of Transverse Magnetic Field and Heat Transfer*. Int. J. Therm. Sci., 40, 11–20.
- Ji, H.C. ve Gardner, R.A. (1997). *Numerical Analysis of Turbulent Pipe Flow in a Transverse Magnetic Field*. Elsevier Science, 40(8), 1839-1851.
- Karabulut, K., Buyruk, E. Kılınç, F. (2018). Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 59(690), 45-67.
- Karadaş, M. (2020). *Sabit Manyetik Alan Etkisi Altındaki Ferronanoakışkan Akışının Çift Faz Çözüm Yöntemi Kullanılarak Isı Transfer Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük.
- Kays, W. M., Crawford, M. E. ve Weigand, B. (2004). *Convective Heat and Mass Transfer, 4th ed*. New York: McGraw-Hill.
- Mahian, O., Kolsi, L., Amani, M., Estellé, P., Ahmadi, G., Kleinstreuer, C., Marshall, J. S., Siavashi, M., Taylor, R. A., Niazmand, H., Wongwises, S., Hayat, T., Kolarjyil, A., Kasaeian, A., ve Pop, I. (2019). *Recent Advances In Modeling And Simulation Of Nanofluid Flows – Part I: Fundamentals And Theory*. Physics Reports, 790: 1–48.

- Mousavi, S. M., Farhadi, M., Sedighi, K. (2016). Effect Of Non-Uniform Magnetic Field On Biomagnetic Fluid Flow In A 3d Channel. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 7336–7348.
- Muthuraj, R. ve Srinivas, S. (2010). *A Note On Heat Transfer To MHD Oscillatory Flow In An Asymmetric Wavy Channel*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1255–1260.
- Racabovadiloğlu, Z. (2002). *Isı Taşınımına Manyetik Alanın Etkisi*. *Politeknik Dergisi*, 5(4), 293-298.
- Racabovadiloğlu, Z. (2002). *Silindirik Borularda Tek Fazlı Manyeto Hidrodinamik Akışın Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi*. *Teknoloji*, Yıl 5, Sayı 1-2, 43-48.
- Recebli, Z., Atik K. ve Sekmen P. (2008). *Değişken Fiziksel Özellikli Akışkan ile Isı Taşınımına Manyetik Alanın Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi*. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 41-47.
- Recebli, Z., Selimli, S. ve Gedik, E. (2013). *Three Dimensional Numerical Analysis Of Magnetic Field Effect On Convective Heat Transfer During The Mhd Steady State Laminar Flow Of Liquid Lithium In A Cylindrical Pipe*. *Computers & Fluids*, 88, 410–417.
- Rinaldi, C., Latorre M. (2009). *Applications Of Magnetic Nanoparticles In Medicine: Magnetic Fluid Hyperthermia*. *PRHSJ*, 28(3), 227-238.
- Selimli, S. (2015). *Computational Hydrodynamic And Heat Transfer Analysis Of Magnetohydrodynamic Internal Flow*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Tastoush, B. ve Al-Odat, M. (2004). *Magnetic Field Effect on Heat and Fluid Flow Over a Wavy Surface With a Variable Heat Flux*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 268, 357–363.
- Taşkesen, E. (2021). *Sabit Manyetik Alan Etkisi Altında Dairesel Kesitli Kanal İçerisinde Akan Ferro Nanoakışkanın Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Tekir, M. (2020). *Farklı Dalga Tiplerinde Alternatif Manyetik Alan Etkisi Altında Dairesel Kesitli Kanal İçerisindeki Hibrit Nanoakışkanın Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

- Tezer, M., Bozkaya, C. ve Türk, Ö. (2013). *Daralma Gösteren Damar Boyunca Akan Biyomanyetik Akışkan Modelinin Sonlu ve Sınır Elemanları Yöntemleri ile Çözümü*. Orta Doğu Teknik Ü. Fen F. Matematik B., TÜBİTAK Proje No: 111T269.
- URL-1, <https://alarga.uskudar.biz/kemere/b%c3%a2li-kaptan.html>. 2022.
- URL-2, https://tr.wikipedia.org/wiki/Manyetik_hidrodinamik. 2022.
- URL-3, https://en.wikipedia.org/wiki/Yamato_1. 2022.
- Womersley, J.R. (1955). *Method For The Calculation Of Velocity, Rate Of Flow And Viscous Drag In Arteries When The Pressure Gradient Is Known*. J. Physiol, 127 (3): 553–563.
- Yağcı, E. (2016). *İç Akışta Manyetik Alan Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Yağcı, E., Aydın, O., Avcı, M. ve Bali, T. (2017). *Silindirik Bir Boru İçerisindeki Tam Gelişmiş Akışta Manyetik Alanın Akış ve Isı Transferi Üzerine Etkisi*. 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 445-453.
- Yağcı, E., Aydın, O., Avcı, M. ve Bali, T. (2019). *Düzlemsel Bir Kanal İçerisindeki Tam Gelişmiş Akışta Manyetik Alanın Akış ve Isı ve Isı Transferi Üzerine Etkisi*. 22. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi.
- Yağcı, E., Aydın, O. ve Bali, T. (2021). *Effect Of Magnetic Field On Flow And Heat Transfer In Hydrodynamically And Thermally Developing Couettepoiseuille Flow Between Parallel Plates*. 5th International Anatolian Energy Symposium, 249-258.
- Zaloğlu, A. (2003). *Paralel İki Levha Arasındaki Rivlin-Ericksen Akışlarının MHD Radyal Titreşimli Akışı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

Ek 1. MHD modülünün etkinleştirilmesi

/define/models> addon-module

Fluent Addon Modules:

- 0. None
- 1. MHD Model
- 2. Fiber Model
- 3. Fuel Cell and Electrolysis Model
- 4. SOFC Model with Unresolved Electrolyte
- 5. Population Balance Model
- 6. Adjoint Solver
- 7. Single-Potential Battery Model
- 8. MSMD Battery Model
- 9. PEM Fuel Cell Model
- 10. Macroscopic Particle Model
- 11. Reduced Order Model
- 12. PCB Model

Enter Module Number: [0] 1

Ek 2. Atımlı akış için UDF dosyası

```
/******  
*****  
Sin.c  
UDF for specifying a transient velocity profile boundary condition  
*****  
*****/  
  
#include "udf.h"  
  
DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity, thread, position)  
{  
    face_t f;  
    real t = CURRENT_TIME;  
  
    begin_f_loop(f, thread)  
    {  
        F_PROFILE(f, thread, position) = 0.275*(1 + 0.5*sin(0.003175*t));  
    }  
    end_f_loop(f, thread)  
}
```

ÖZGEÇMİŞ

2018 yılında Gümüşhane Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Aynı yıl üniversitenin Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2019 yılında, savunma sanayi alanında ilk kez millileştirilecek bir proje için, özel bir şirkette mühendis olarak çalışmaya başlamıştır ve halen devam etmektedir. Öğrenim hayatı boyunca çeşitli sosyal, kültürel ve sportif faaliyetlerde aktif görev almış ve sualtı sporları branşında antrenörlük, hakemlik, cankurtaranlık belgelerine sahip olup profesyonel olarak dalgıcılık yapmaktadır.

