

**BİR GAZ SOĞUTMALI YÜKSEK SICAKLIK REAKTÖRÜ'NÜN  
SAYISAL TERMAL-HİDROLİK ANALİZİ**

**Ömür AKBAYIR**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2012**

**ANKARA**



**BİR GAZ SOĞUTMALI YÜKSEK SICAKLIK REAKTÖRÜ'NÜN  
SAYISAL TERMAL-HİDROLİK ANALİZİ**

**Ömür AKBAYIR**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2012**

**ANKARA**

Ömür Akbayır tarafından hazırlanan “BİR GAZ SOĞUTMALI YÜKSEK SICAKLIK REAKTÖRÜ’NÜN SAYISAL TERMAL-HİDROLİK ANALİZİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN .....  
Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Cemil KOCAR .....  
Ortak Tez Danışmanı, Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Eğitimi Ana Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sümer ŞAHİN .....  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Atılım Üniversitesi

Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN .....  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA .....  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ .....  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Taner ALTUNOK .....  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Tarih: 09/02/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ömür AKBAYIR

# BİR GAZ SOĞUTMALI YÜKSEK SICAKLIK REAKTÖRÜ'NÜN SAYISAL TERMAL-HİDROLİK ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Ömür AKBAYIR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2012

## ÖZET

Bu çalışmada; Modüler Helyum Reaktörü'nün (MHR) normal çalışma durumunda yakıt sıcaklığını kabul edilebilir seviyenin altında tutarken, çıkış sıcaklığını 850°C üzerine çıkartmak için alternatif çalışma koşulları incelenmiştir. Parametrik ısı akış simülasyonları Sayısal Akışkanlar Dinamiği yazılımı ANSYS CFD FLUENT kullanılarak yapılmıştır. Simüle edilen geometri Birim Hücre Modeli ve Eşdeğer Silindir Modeli olarak seçilmiştir. Eşdeğer Silindir Model ile simülasyonda korun içindeki kompleks yapıyı modellemek için gözenekli ortam yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmaya şu anki 600 MWt GT-MHR (Gaz Türbinli Modüler Helyum Reaktörü) 'nin analizi ile başlanmıştır. Nümerik model diğer çalışmalarla doğrulanmıştır. Daha sonra alternatif çalışma koşulları simüle edilmiştir. Sonuç olarak yakıt sıcaklığı kabul edilebilir seviyenin altındayken bazı çalışma koşulları için çıkış sıcaklığı ~1000 °C civarında olduğu görülmektedir.

**Bilim Kodu** :708.3.015

**Anahtar Kelimeler** :Modüler Helyum Reaktör, Sayısal Akışkanlar Dinamiği, Enerji, Nükleer Güç

**Sayfa Adeti** :103

**Tez Yöneticisi** :Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

**NUMERICAL THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF  
A GAS COOLING HIGH TEMPERATURE REACTOR  
(Ph. D. Thesis)**

**Ömür AKBAYIR**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**February 2012**

**ABSTRACT**

**In this study alternative operating conditions for the Modular Helium Reactor (MHR) were investigated to increase coolant outlet temperature above 850°C, while keeping the fuel temperature below acceptable level at normal operation. Parametric thermal-hydraulic simulations were carried out by using Computational Fluid Dynamics software ANSYS CFD FLUENT. The simulated geometry was chosen as Unit Cell Model and Equivalent Cylinder Model. The porous media approach has been applied to model the complex structure in the core for the simulation with Equivalent Cylinder Model. The study began with an analysis of the current 600 MWt GT-MHR (Gas Turbine-Modular Helium Reactor). The numerical model was validated by other studies. Then, alternative operating conditions were simulated. The results have shown that the MHR with some alternative operating conditions have the coolant outlet temperatures about 1000 °C, while keeping the fuel temperature below acceptable level.**

**Science Code :708.3.015**  
**Key Words :Modular Helium Reactor, Computational Fluid Dynamic, Energy, Nuclear Power**  
**Page Number :103**  
**Adviser :Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN**

## TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN'e ve ikinci danışman hocam Doç. Dr. Cemil KOCAR'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Tez İzleme Komitesi üyesi hocalarım Prof. Dr. Sümer ŞAHİN ve Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA'ya, tez jüri üyeleri Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a ve Prof. Dr. Taner ALTUNOK'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca uzun süre ev arkadaşlığı yaptığım Araştırma Görevlisi Özer CAN'a, TCDD'deki çalışma arkadaşlarıma, çalışmam boyunca desteklerini sürdüren eşime, anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

Çalışmanın maddi desteğini sağlayıp gerçekleştirilmesini mümkün kılan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğüne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
3. GT MHR’NİN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	11
3.1. Bir GT-MHR Modülü .....	13
3.2. Reaktör Kapı (GT) ve Güç Kabı (MHR) .....	15
3.3. TRISO Kaplamalı Yakıt.....	17
3.4. Korun Yapısı .....	20
3.5. MHR’nin Diğer Kullanım Alanları.....	22
3.6. Güvenlik Özellikleri.....	23
3.6.1. Aktif soğutma sistemi .....	24
3.6.2. Pasif soğutma sistemi .....	26
4. PROBLEMİN TANIMI VE SINIR ŞARTLARI.....	27
4.1. Birim Hücre Modeli .....	27
4.2. Eşdeğer Silindir Modeli .....	33
5. ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE TEMEL DENKLEMLER.....	42
5.1. Sayısal Akışkanlar Dinamiği (SAD).....	42

**Sayfa**

5.2. Temel Denklemler.....	43
5.2.1. Kütlelerin korunumu (Süreklilik denklemi).....	43
5.2.2. Momentumun korunumu (Navier Stokes denklemi) .....	43
5.2.3. Enerjinin korunumu .....	44
5.3. ANSYS FLUENT Yazılımı .....	44
5.4. Sonlu Hacimler Metodu .....	46
5.5. Denklemlerin Ayrık Hale Getirilmesi.....	47
5.6. Türbülanslı Akış, Türbülans Modeli Seçimi, Türbülans Modelleri.....	51
5.6.1. Standart k- $\epsilon$ modeli.....	52
5.6.2. RNG k- $\epsilon$ modeli.....	54
5.6.3. Gerçekleştirilebilir (Realizable) k- $\epsilon$ modeli .....	54
5.7. Gözenekli Ortam Yaklaşımı.....	57
5.7.1. Gözenekli ortam için momentum eşitliği .....	58
5.7.2. Gözenekli ortamdaki enerji eşitliğinin iyileştirmesi.....	58
6. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	60
6.1. Birim Hücre Modeli .....	60
6.1.1. Çözümün doğruluğunun ve geçerliliğinin kontrolü.....	60
6.1.2. Sonuçların değerlendirilmesi .....	69
6.2. Eşdeğer Silindir Modeli .....	73
6.2.1. Çözümün doğruluğunun ve geçerliliğinin kontrolü.....	73
6.2.2. Sonuçların değerlendirilmesi .....	83
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR .....	96
ÖZGEÇMİŞ .....	102

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. GT-MHR'nin genel özellikleri .....	11
Çizelge 4.1. Yakıt kompaktının ve grafitin ısı iletim katsayısı ve özgül ısı kapasitesi [22] .....	31
Çizelge 4.2. Helyumun termal özellikleri [65].....	32
Çizelge 4.3. Bölgeler için atalet direnç değerleri.....	36
Çizelge 6.1. Bypass akışı azaltmanın karşılaştırılması .....	72
Çizelge 6.2. Akış kontrolünün karşılaştırması .....	72
Çizelge 6.3. Aktif kordaki ve reaktör kabındaki maksimum sıcaklığın karşılaştırılması [22, 29].....	83
Çizelge 6.4. Değişik çalışma koşullarında reaktörde oluşan maksimum sıcaklık (°C).....	86
Çizelge 6.5. Değişik çalışma koşullarında reaktör çıkış sıcaklığı (°C).....	87

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Helyumun akış diyagramı [2].....	12
Şekil 3.2. Isıl verimin karşılaştırılması [2] .....	12
Şekil 3.3. Bir GT-MHR modülü [45] .....	13
Şekil 3.4. Reaktör ve güç üretim sistemini gösteren GT-MHR yapısı [45] .....	14
Şekil 3.5. MHR'nin metalik içyapısını, korunu, kontrol çubuğu kılavuz borularını kapama soğutma sistemini gösteren kesit görünüş [10] .....	15
Şekil 3.6. GT'nin içindeki türbini, kompresörleri, rekuperatorleri, ön soğutucu, ara soğutucu ve jeneratörü gösteren kesit görünüş [10].....	17
Şekil 3.7. TRISO kaplamalı parçacığın bir bölümünden kaplamaların çıkarılmış haldeki fotoğrafı [10] .....	18
Şekil 3.8. TRISO kaplamalı parçacığın kullanılmadan önceki ve kullanıldıktan sonraki hali [53] .....	18
Şekil 3.9. TRISO kaplamalı yakıt parçasının sıcaklık kapasitesi [2-11].....	19
Şekil 3.10. MHR'de çok farklı tipte yakıtlar kullanabilmektedir [54] .....	19
Şekil 3.11. Yakıt elemanı [55].....	20
Şekil 3.12. TRISO kaplamalı yakıt parçası ve reaktörün oluşumu [10].....	21
Şekil 3.13. Reaktör korunun üstten görünüşü [10].....	21
Şekil 3.14. S-I işleminde sıcaklığa göre hidrojen üretim verimliliği [15-17] .....	22
Şekil 3.15. MHR'den elde edilen ısı ile S-I işlemi vasıtasıyla Hidrojen üretimi [45] .....	23
Şekil 3.16. Kapama Soğutma Sistemi'nin kesit görünüşü [20].....	25
Şekil 3.17. Kapama Soğutma Sistemi'nin çalışma prensibi [54] .....	25
Şekil 3.18. Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi. Atık ısı; iletim, ışıınım ve taşınım ile uzaklaşıyor [54] .....	26
Şekil 4.1. Birim hücre modeli.....	28

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.2. Birim hücre model geometrisi (birim: mm) .....	28
Şekil 4.3. Sınır şartlarının model üzerinde gösterimi .....	29
Şekil 4.4. Her bir sıcaklık değeri için termal özelliklerin girilmesi .....	31
Şekil 4.5. Analiz için kullanılan eşdeğer silindir modeli, modeldeki bölgelerin adı ve sınır şartları .....	33
Şekil 5.1. ANSYS FLUENT CFD çalışma prensibi [60] .....	45
Şekil 5.2. SAD yazılımlarının basamakları [61] .....	46
Şekil 5.3. Boru akışının sıvı bölgesi sonlu kontrol hacim kümelerine ayrıklaştırılması [61] .....	48
Şekil 5.4. Kartezyen koordinatlarda hücre yapısı [56] .....	49
Şekil 5.5. Silindirik koordinatlarda hücre yapısı [56] .....	50
Şekil 6.1. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde“Realizable k-e” türbülans modeli seçilmiştir) .....	62
Şekil 6.2. İterasyon sayısına bağlı olarak modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri .....	62
Şekil 6.3. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde“Standart k-e” türbülans modeli seçilmiştir) .....	63
Şekil 6.4. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde“RNG k-e” türbülans modeli seçilmiştir) .....	63
Şekil 6.5. 1000 iterasyona kadar bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri .....	64
Şekil 6.6. 1000 iterasyona kadar modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri .....	65
Şekil 6.7. Birim hücre modeli için hücre yapısı .....	67
Şekil 6.8. Hücre sayısına göre elde edilen maksimum yakıt sıcaklığının değişimi .....	67
Şekil 6.9. Model uzunluğu boyunca elde edilen Y artı değeri .....	68

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.10. Yakıt ve soğutucu merkez çizgileri boyunca aksenal sıcaklık dağılımı.....	70
Şekil 6.11. Maksimum yakıt sıcaklık düzleminde sıcaklık konturları (°C) .....	70
Şekil 6.12. ANSYS CFD Post’da birim hücre modelinin değişik açılardan sıcaklık dağılımı görüntüleri .....	71
Şekil 6.13. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde“Realizable k-e” türbülans modeli seçilmiştir) .....	75
Şekil 6.14. İterasyon sayısına bağlı olarak modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri.....	75
Şekil 6.15. İterasyon sayısına bağlı olarak reaktör çıkış sıcaklığı değeri.....	76
Şekil 6.16. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde“Standart k-e” türbülans modeli seçilmiştir) .....	76
Şekil 6.17. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde“RNG k-e” türbülans modeli seçilmiştir) .....	77
Şekil 6.18. 4000 iterasyona kadar bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri.....	78
Şekil 6.19. 4000 iterasyona kadar modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri.....	79
Şekil 6.20. 4000 iterasyona kadar reaktör çıkış sıcaklığının değeri .....	79
Şekil 6.21. Eşdeğer silindir modeli için hücre yapısı .....	81
Şekil 6.22. Hücre sayısına göre elde edilen maksimum yakıt sıcaklığının değişimi .....	81
Şekil 6.23. Reaktör kabı iç yüzeyi uzunluğu boyunca elde edilen Y artı değeri.....	82
Şekil 6.24. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları (°C) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s) .....	84
Şekil 6.25. Reaktördeki akış vektör profili (m/s) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s).....	84

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.26. Reaktörde meydana gelen basınç konturları (Pa) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s) .....	84
Şekil 6.27. Korun orta düzleminde radyal sıcaklık dağılımı (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s) .....	85
Şekil 6.28. Korun 1,72 m yarıçapında aksenal sıcaklık dağılımı (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s) .....	85
Şekil 6.29. Orijinal MHR çalışma şartlarında soğutucu giriş debisi değişiminin soğutucu çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi .....	88
Şekil 6.30. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları (°C) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/227kg/s) .....	89
Şekil 6.31. Reaktördeki akış vektör profili (m/s) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/227kg/s).....	89
Şekil 6.32. Orijinal MHR çalışma şartlarında soğutucu giriş sıcaklığı değişiminin soğutucu çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi .....	90
Şekil 6.33. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları (°C) (Giriş sıcaklığı/debisi: 644°C/320kg/s) .....	90
Şekil 6.34. Reaktördeki akış vektör profili (m/s) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/227kg/s).....	90
Şekil 6.35. Soğutucu giriş debisinin 320 kg/s'de ve soğutucu giriş sıcaklığının 490 °C sabit olması durumlarında soğutucu çıkış sıcaklığına göre reaktörde oluşan maksimum sıcaklığın değişimi .....	91

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$c_p$	Özgül ısı (J/kgK)
$C_2$	Atalet kayıp katsayısı ( $m^{-1}$ )
$C_\mu$	Ortalama gerilme ve rotasyon oranı
$E_f$	Akışkan entalpisi (kJ/kg)
$E_s$	Katı ortam entalpisi (kJ/kg)
$f$	Yerçekimi gibi diğer gövde kuvvetleri
$G_b$	Yüzmeden (buoyancy) dolayı türbülanslı kinetik enerji üretim oranı
$G_k$	Ortalama hız eğimlerinden (mean velocity gradients) dolayı türbülanslı kinetik enerji üretim oranı
$H$	Aktif korun toplam yüksekliği (m)
$k$	Isı iletim katsayısı (W/mK)
$k_{eff}$	Ortamın efektif ısı iletkenliği (W/mK)
$k_f$	Akışkan fazın ısı iletkenliği (türbülansın katkısını içerir, $k_t$ ) (W/mK)
$k_s$	Katı ortam ısı iletkenliği (W/mK)
$L$	Gözenekli ortamın uzunluğu (m)
$p$	Basınç ( $N/m^2$ )
$P_0$	Aktif kor içindeki ortalama güç yoğunluğu ( $MWm^{-3}$ )
$\dot{Q}$	Isı üretimi (w)
$S_k$	Kullanıcı tanımlı kaynak terimi (kJ/kg)
$S_\varepsilon$	Kullanıcı tanımlı kaynak terimi (kJ/kg)
$S_f^h$	Akışkan entalpi kaynak terimi (kJ/kg)
$S_\emptyset$	Kaynak terimi (kJ/kg)
$S_s^h$	Katı entalpi kaynak terimi (kJ/kg)
$T$	Sıcaklık (K)
$t$	Zaman (s)
$u$	Akış hızı (m/s)
$x$	Radyal yönde aktif korun altından yukarıya doğru mesafesi (m)

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$Y_M$	Sıkıştırılabilir türbülanslarda tüm yayılım oranına (dissipation rate) dalgalanan genişlemenin (fluctuating dilatation) katkısı
$\emptyset$	Genel akış değişkeni (örnek: entalpi)
$\Gamma$	Difüzyon katsayısı
$\nabla$	Del operatörü
$\gamma$	Ortamın gözenekliliği (%)
$\varepsilon$	Yayma oranı
$\mu$	Dinamik vizkozite (kg/sm)
$\mu_t$	Türbülans eddy viskozitesi (kg/sm)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma_k$	k için türbülans Prandtl sayısı
$\sigma_\varepsilon$	$\varepsilon$ için türbülans Prandtl sayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AHTR</b>	İleri Yüksek Sıcaklık Reaktörü
<b>CEA</b>	Teknoloji Araştırma Organizasyonu
<b>CRP</b>	Koordineli Araştırma Projesi
<b>D-LOFC</b>	Basınçsız Zorlanmış Taşınım Kaybı
<b>ECN</b>	Enerji Araştırma Merkezi
<b>GT-MHR</b>	Gaz Türbinli Modüler Helyum Reaktörü
<b>HTR</b>	Yüksek Sıcaklık Reaktörü
<b>IAEA</b>	Uluslar arası Atom Enerji Ajansı
<b>INET</b>	Nükleer Enerji Teknoloji Enstitüsü
<b>JAERI</b>	Japonya Atom Enerji Ajansı
<b>LOFC</b>	Zorlanmış Taşınım Kaybı
<b>MHR</b>	Modüler Helyum Reaktörü
<b>NGNP</b>	Gelecek Nesil Nükleer Tesisi
<b>NIST</b>	Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
<b>OKBM</b>	Makina Mühendisleri için Deneysel Tasarım Bürosu
<b>ORNL</b>	Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı
<b>P-LOFC</b>	Basınçlı Zorlanmış Taşınım Kaybı

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

<b>RCCS</b>	Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi
<b>SAD</b>	Sayısal Akışkanlar Dinamiği
<b>SCS</b>	Kapama Soğutma Sistemi
<b>UDF</b>	Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon
<b>VHTR</b>	Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü
<b>3ddp</b>	3 boyutlu iki misli hassasiyet

## 1. GİRİŞ

Dünya enerji talebi yaşam standartlarının ve nüfusun artmasıyla birlikte artmaktadır. Fosil yakıtları ve hidroelektrik günümüzde dünya elektrik talebinin çoğunu karşılamaktadır. Diğer taraftan 377,000 MWe toplam kapasite ile 30 ülkede işletilen 440'ın üzerinde ticari nükleer güç santrali bulunmaktadır. Bunlar dünya elektrik talebinin yaklaşık % 14'ünü karşılamaktadır [1].

Türkiye bu ileri teknolojiye, stratejik konumu ile bağdaşmayacak ölçüde geri kalmıştır. GT-MHR (Gaz Türbinli Modüler Helyum Reaktörü) sunduğu birçok avantaj nedeniyle gelecekte ülkemize inşa edilmesi muhtemel bir reaktördür. GT-MHR gelecek enerji talebini karşılayacak yeni nesil gelecek vaat eden reaktörlerden biri olarak düşünülmektedir. GT-MHR, Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı dördüncü nesil reaktör tasarımlarından birisidir.

GT-MHR güç santrali temelde yerin altında kapalı beton yapı içinde birbirine bağlı iki basınç kabından oluşmaktadır. Birinci kap MHR temelli reaktör sistemini içermekte, ikinci kap ise güç dönüşüm sistemini içermektedir. GT-MHR, General Atomic (GA) tarafından geliştirilmiştir ve başlıca şu tasarım karakteristiklerine sahiptir: Helyumun kora giriş/çıkış sıcaklığı 491 °C / 850 °C dir, kor boyunca helyumun akış debisi 320 kg/s tir, kor soğutucu basıncı 7MPa dır, altıgen şekilli grafit bloklar dairesel kora yerleştirilmiştir [2-11].

Reutler ve Lohnert yüksek sıcaklık reaktör (HTR) tasarımı fikrini ilk olarak 1980lerde sunmuş olmalarına rağmen son yıllarda yüksek sıcaklıkta nükleer ısı üretmek için HTR'ye olan ilginin arttığı görülmektedir [12, 13]. Bu ilgi hidrojen üretimi için nükleer enerji kullanımı imkânı ile artmaktadır. Hidrojen evrendeki en bol element olmasına rağmen, dünyada büyük miktarda veya yüksek konsantrasyonda doğal olarak bulunmamaktadır. Çevreye hiç zarar vermeden hidrojeni üretmenin yolu nükleer ısı kullanarak yüksek sıcaklıkta suyu parçalamaktır. Çalışmalar verimli şekilde hidrojen üretmenin reaktör çıkış sıcaklığının 1000 °C yakınında olması gerektiğini göstermektedir. Şimdiki HTR tasarımları 850 °C

üzerinde çıkış sıcaklığı elde etmek için değiştirilmekte ve genişletilmektedir. Bu nedenle, bu HTR tasarımlarından biri olan MHR, suyu Hidrojen ve Oksijene 950 °C - 1050 °C aralığında gerçekleşen termokimyasal yolla parçalamak için güçlü bir adaydır [14-18].

Diğer birçok enerji üretim teknolojisine göre zaten çok düşük emisyon oranlarına sahip olan nükleer teknolojinin sunduğu GT-MHR, halen artan iklim değişikliği gibi çevre sorunlarının çözümüne katkı yapmasının yanında proses ısı uygulamaları ve Hidrojen üretimi için fosil yakıtlara alternatif veya ek olabilecektir. GT-MHR'ın getirdiği iki önemli katma değerden birincisi; diğer nükleer santral tiplerine göre sahip olduğu yüksek termodinamik verimi sayesinde daha verimli elektrik enerjisi üretmesidir. GT-MHR'ın getirdiği ikinci katma değer ise çevre dostu uygulamalara sahip Hidrojen enerjisi kullanımı için Hidrojen üretim teknolojileriyle uyumlu bir biçimde çalışabilme imkânıdır.

Yüksek verimde hem hidrojen üretmek hem de elektrik üretmek için yüksek derecede termal enerjiye ihtiyaç vardır. Bunların dışında, suyu tuzdan arındırma süreci ve endüstriyel işlerde de yüksek derecede termal enerji gereklidir. MHR'nin çalışma şartlarında ve yapısında değişiklikler yaparak 850 °C 'nin üzerinde nükleer ısı üretmek mümkündür.

Bu nedenle; bu çalışmada MHR için yeni çalışma şartları ve yeni tasarımlar önerilmiş; bunların reaktör üzerinde etkileri incelenmiştir. Bu çalışma ile orijinal MHR üzerinde yapılacak bu değişikliklerin reaktör üzerine etkilerini göz önünde tutularak yukarıda sözü edilen yerlerde kullanılmak üzere 1000 °C civarında sıcaklık üretmek amaçlanmıştır.

Bu reaktör ABD'den General Atomics ve Rusya'dan Minatom ortaklığıyla geliştirilerek tasarlanmıştır. Ayrıca Fransa'dan Framatome (1996) ve Japonya'dan Fuji Electric (1997) uluslararası firmalar tarafından desteklenmektedir. Tasarlama ve geliştirme çalışmalarına 1995 yılında başlanmıştır. 1997 yılında fikirsel tasarım tamamlanmıştır [2-11].

Helyum soğutucu, grafit moderator ve prizmatik kor tasarımı içinde TRISO (Tristructural isotropic) kaplamalı yakıt parçası kullanımı MHR'nin anahtar tasarım karakteristikleridir. Helyum soğutuculu reaktörler, helyumun doğal olarak soy gaz ve tek fazlı oluşundan dolayı bugünün geleneksel nükleer santrallerinden daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılabilir.

Ayrıca MHR, grafit kor sayesinde yüksek ısı kapasite, yavaş ısıl yanıt ve yüksek sıcaklıklarda yapısal sağlamlık sağladığı için doğal güvenlik karakteristiğine sahiptir. Helyum soğutucu, grafit moderator ve TRISO kaplamalı parça yakıt kullanımı sayesinde, bağımsız pasif atık ısı uzaklaştırma sistemine sahiptir. Bir kaza olması durumunda aktif soğutma sistemlerinden hiçbiri çalışmadığı takdirde reaktör içindeki sıcaklık tasarım limitlerini geçmeden, kor atık ısı iletim, termal ışınlama ve doğal taşınım ile reaktör kabını çevreleyen reaktör boşluğu soğutma sistemine (RCCS) transfer edilmektedir.

Orijinal MHR'de helyumun reaktör giriş debisi 320 kg/s, giriş sıcaklığı 491 °C dir. Bu çalışmada giriş debisi 200-350 kg/s aralığında, giriş sıcaklığı 350-650 °C aralığında değiştirilerek yeni alternatif çalışma şartları nümerik olarak simule edilmiştir.

TRISO kaplamalı yakıt parçaları normal çalışma durumunda 1250 °C'den sonra termal olarak zarar görmeye başladığından reaktörde meydana gelen maksimum sıcaklık için tasarım limiti 1250 °C'dir. Bu çalışmada her bir alternatif çalışma şartı için reaktör çıkış sıcaklığıyla beraber reaktörde meydana gelen maksimum sıcaklık da belirlenmiştir.

Prizmatik reaktörlerin içindeki kompleks yapıyı modellemek için basitleştirilmiş sayısal modeller geliştirilmiştir. Bunlar; Birim Hücre Modeli (Unit Cell Model) ve Eşdeğer Silindir Modelidir (Equivalent Cylinder Model). MHR'nin ısı-akış tasarım çalışması ilk olarak Birim Hücre Modelini kullanan POKE bilgisayar kodu kullanılarak yapılmıştır. Mevcut çalışmasında her iki modelde kullanılmıştır. Nümerik hesaplamalar ANSYS CFD FLUENT yazılımıyla yapılmıştır. İlk olarak bu

hesaplamalar orijinal MHR çalışma şartları için yapılmıştır. Nümerik sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve simülasyon modelinin geçerliliği tartışılmıştır. Daha sonra bu hesaplamalar yukarıda sözü edilen değişikliklerin maksimum yakıt sıcaklığı ve çıkış sıcaklığı üzerine etkilerini belirlemek amacıyla tekrarlanmıştır.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Reutler ve Lohnert tarafından yüksek sıcaklık reaktör (HTR) tasarımı fikrini ilk olarak 1980'lerde ortaya konmuştur [12, 13]. GT-MHR, Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı dördüncü nesil reaktör tasarımlarından birisidir. Tasarlama ve geliştirme çalışmalarına 1995 yılında başlanmış 1997 yılında fikirsel tasarım tamamlanmıştır. ABD'den General Atomics ve Rusya'dan Minatom ortaklığıyla geliştirilerek tasarlanmıştır. Tasarlama çalışmalarına 1996 yılında Fransa'dan Framatome ve 1997 yılında Japonya'dan Fuji Electric firmaları katılmıştır. GT-MHR'yi geliştirme programına göre; portatif reaktörün inşasına 2006 yılında Rusya'nın Seversk (Tomsk-7) şehrindeki Siberian Chemical Combine'de başlanmıştır [2-11]. Bu bölümde; GT-MHR'nin yapısı ile ilgili, MHR üzerinde orijinal çalışma durumu ve alternatif çalışma durumları için yapılan sayısal ısı akış analizleri ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar özetlenmiştir.

GT-MHR ile ilgili ilk genel bilgiler General Atom tarafından sunulmuş olup 600 MW'lık GT-MHR fikrinin; maliyet, güvenlik, inşa edilebilirlik, çalıştırılabilirlik, bakım yeteneği, uygunluk değerlendirmelerinin sonuçları ve özet tanımı hakkında bilgiler verilmiştir [3, 4]. Buna benzer başka bir çalışma ise Kiryushin ve arkadaşlarınca yapılmıştır [6]. Daha sonra, Uluslar arası Atom Enerji Ajansı (IAEA) tarafından hem GT-MHR hem de diğer Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Modüler Reaktörlerin durumu ve gelişmesi ele alınmıştır [7].

MHR üzerinde yapılan ilk sayısal çalışmalar yine General Atomics tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla POKE adında bir kod hazırlanmıştır. POKE kodu ile 2 boyutlu, oldukça basitleştirilmiş boyutlar ve parametreler ile sabit ısı üretimi şartlarında birim hücre modeli ile ısı akış analiz yapılabilmektedir. Bu kodla normal çalışma şartlarında reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1267 °C olarak bulunmuştur [19].

Uluslar arası Atom Enerji Ajansı, MHR'nin ısı akış analizi için Koordineli Araştırma Projesi-3 (CRP-3) ile bir değerlendirme probleminin tanımını yapmıştır.

Burada tanımlanan sınır şartlarına ve ölçülere göre; Rusya'dan OKBM, Fransa'dan CEA, Hollanda'dan ECN, Çin'den INET ve USA'den ORNL sırasıyla; GTAS, CASTEM, CFX-F3D, THERMIX/KONVEK ve MORECA yazılımlarıyla MHR'nin normal çalışma, basınçlı ve basınçsız kaza durumlarında (PLOFC, DLOFC) 100 saate kadar ısı-akış analizi yapılmıştır. Normal çalışma durumunda reaktörde oluşan maksimum sıcaklık sırasıyla; 948 °C, 1027 °C, 949 °C, 1046 °C ve 956 °C bulunmuştur [22].

Haque ve arkadaşları, MHR'nin ısı-akış analizini eşdeğer silindir modeli ile 2 boyutlu olarak THERMIX yazılımıyla yapmışlardır. Çıkan sonuçları, değişik ülkelerin değişik kodlarla analizini yaptığı CRP-3 değerlendirme probleminin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Basınçlı iletim soğutması (PCC, pressurized conduction cooldown) ve basınçsız iletim soğutması (DCC, depressurized conduction cooldown) kaza durumlarındaki analizlere ilave olarak; giriş/çıkış sıcaklığı, atık ısı, grafit iletim katsayısı ve yüzey yayma oranı gibi parametrelerin yakıt ve basınç kapı sıcaklığına etkilerini incelemişlerdir. Basınçlı ve basınçsız kaza durumlarında önerilen çalışma şartlarında maksimum yakıt sıcaklığının 1600 °C nin altında olduğu sonucuna ulaşmışlardır [24, 25].

Woaye-Hune ve Eshter, MHR'nin 2 boyutlu olarak eşdeğer silindir modeli ile ısı akış analizini STAR-CD yazılımıyla yapmışlardır. Çalışmalarında, CRP-3 değerlendirme problemine göre zorlanmış taşınım kaybı (LOFC, Loss of Forced Convection) kaza durumundaki atık ısı uzaklaştırmasını incelemişler, maksimum yakıt sıcaklığının 1600 °C nin altında olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca bazı parametrelerin yakıt sıcaklığına etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları analizler grafit iletim katsayısı ve çelik yayılım katsayısının yüksek öneme sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır [27].

Siccama ve Koning, MHR'nin 2 boyutlu olarak ısı akış analizini CFX-F3D yazılımıyla yapmışlardır. Helyumun 4 adet geniş kanaldan aktığını varsayarak CRP-3 değerlendirme problemine göre normal çalışma durumunu ve kaza durumunu incelemişlerdir [28].

Li, GT-MHR'nin 2 boyutlu olarak ısı akış ve ısı mekanik analizini STAR-CD yazılımını kullanarak normal çalışma durumu ve basınçlı LOFC kaza durumu için eşdeğer silindir modeli ile yapmıştır. CRP-3 değerlendirme problemine göre yaptığı analizi daha önce yapılan çalışmalara karşılaştırmıştır. Isıl akış çalışmaları, grafit reflektörün ısı iletim katsayısı değerinin hem normal çalışmada hem de kaza durumunda ana faktör olduğunu göstermektedir [29].

Mays ve arkadaşları, prizmatik bloklulu HTR'de giriş/çıkış sıcaklık parametrelerine göre basınçsız kaza durumundaki sıcaklık değişimini ve oluşan maksimum sıcaklığı eşdeğer silindir modeli ile STAR-CD ve THERMIX yazılımı ile hesaplamışlardır. Bu hesaplamalar ilk olarak 850 °C çıkış sıcaklığındaki MHR için yapılmış, daha sonra yüksek çıkış sıcaklığının ısı etkilerini belirlemek için VHTR çalışma şartlarına genişletilmiştir. Tüm durumlar içinde, çalışma sıcaklığındaki değişiklikler sadece kaza durumunun ilk evrelerini etkilemektedir [26].

Tak ve arkadaşları, VHTR'lerin analizinde kullanılan birim hücre modeli yakıt elemanları arasındaki bypass akışı hesaba katmadığından, bu maksimum yakıt sıcaklığının bulunmasını etkilediğinden, yakıt elemanının 1/12 lik dilimi için ANSYS CFX 11.0 yazılımını kullanarak üç boyutlu CFD analizini yapmışlardır. Yakıt elemanına bypass akışın ve radyal güç dağılımının etkilerini incelemiştir [34].

Tak ve arkadaşları, VHTR'de soğutucu çıkış sıcaklığını artırmak için yakıt sıcaklığının artışı ile sonuçlandığından, bu durumun üstesinden gelmek için prizmatik reaktörlerde çift kısımlı soğutucu dairesel yakıt (double-side-cooled annular fuel) fikrini önermişlerdir. Önerilen yakıt tasarımının detaylı ısı-akış analizi için Birim Hücre Modelini kullanmışlardır. ANSYS CFX 11.0 yazılımını kullanarak yapılan ısı akış analizlerinde elde edilen maksimum yakıt sıcaklığının şu anki tasarımlarda elde edilen maksimum yakıt sıcaklığından az olduğunu bulmuşlardır [35].

Sahin ve arkadaşları MHR'nin çıkış sıcaklığını artırmak için giriş sıcaklığı, akış debisi ve bypass akış oranını değiştirmişlerdir. Bu değişikliklerin etkilerini

incelemişlerdir. Birim hücre modeli kullanılarak MHR üzerinde üç boyutlu nümerik analiz ANSYS 12 CFD FLUENT ile yapmışlardır [36].

MacDonald ve arkadaşları, iki muhtemel gelecek nesil nükleer reaktörünün (Prismatic NGNP ve Pebble Bed NGNP) ilk fikirsel tasarımı hakkında bilgi vermiş ve ön değerlendirmesini yapmışlardır. Bunlar prizmatik yakıt tipli helyum gaz soğutuculu reaktör (Prismatic NGNP) ve çakıl taşlı helyum gaz reaktörüdür (Pebble Bed NGNP). Her iki tasarımda 1000 °C soğutucu çıkış sıcaklığı, pasif güvenlik ve toplam güç çıkışı ile üç temel gereksinimi karşılamaktadır [10, 20].

Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı tarafından MHR tasarımı üzerinden geliştirilen İleri Yüksek Sıcaklık Reaktörünün (AHTR) ön kavramsal tasarımının durumu hakkında bilgi verilmiştir [21].

Simoneau ve arkadaşları, HTR'nin 30°C lik dilimi için 3 boyutlu olarak ısı-akış analizini STAR-CD yazılımıyla yapmışlardır. Reaktörde basınçlı iletim soğutması (PCC, pressurized conduction cooldown) ve basınçsız iletim soğutması (DCC, depressurized conduction cooldown) kaza durumlarındaki doğal taşınımı incelemiş ve karşılaştırmışlardır [23].

Ball, GT-MHR ve PBMR'nin 3-boyutlu olarak GRSAC yazılımıyla D-LOFC, P-LOFC, D-LOFC (atmosfer havası girişli), D-LOFC (ATWS li), P-LOFC (ATWS li) kaza durumları için ısı-akış analizini yapmıştır. [30,31],

Ball ve arkadaşları, GT-MHR ve PBR'nin ORNL-GRSAC yazılımıyla atmosfer havası girişli kaza durumunu incelemişlerdir [32].

Ball ve Forsberg, MHR de yapılan değişiklik sonucu ortaya koyulan İleri Yüksek Sıcaklık Reaktörü'nü (Advanced High Temperature Reactor (AHTR)) ORNL-GRSAC yazılımıyla LOFC kaza durumu için ısı-akış analizini yapmışlardır. Yeni tip AHTR (2 400 MW (t))'de kaza durumunda oluşan maksimum sıcaklığın tasarım limitlerini aşmadığı sonucuna ulaşmışlardır [33].

Cioni ve arkadaşları, MHR'nin soğutucu kanallarının bir kaçının tıkanması durumları için ısı-akış analizini 3 boyutlu olarak Trio-U yazılımıyla yapmışlardır. Tıkalı kanalların çevresindeki sıcaklık dağılımını gözlemlemişlerdir [37, 38].

Anderson ve arkadaşları, MHR'nin kor çıkışındaki soğutucu akışkan karışımının, ısı-akış sistem analizi kodu (RELAP-3D) ve sayısal akışkanlar dinamiği kodunu beraber kullanan bir yazılım aracılığıyla 3-boyutlu olarak ısı-akış analizini yapmışlardır [39, 40],

Nakano ve arkadaşları, MHR'nin fiziksel yapısında değişiklik yaparak, kor bypass akış oranını azaltarak oluşturulan ve çıkış sıcaklığı 950 °C olan VHTR'nin ANSYS v.10 yazılımı ile ısı analizini; DELIGHT-8, FLOWNET ve TAC-2D yazılımları ile nükleer, akış dağılımı ve yakıt sıcaklığı analizlerini yapmışlardır [41].

Reza ve arkadaşları, MHR'de soğutucu helyumun dış yansıtıcıların içinde geçtiği yeni bir tasarım önermiş ve normal çalışma, LPCC, HPCC kaza durumları için RELAP5-3D/ATHENA yazılımları ile sıcaklık analizini yapmışlardır. Bu tasarımda soğutucu akışkan dış reflektör içinden girmektedir. [42].

Kim ve arkadaşları, MHR için soğutuculu bir kap tasarımı önererek ANSYS CFX-10 ve GAMMA yazılımı ile normal çalışma ve kaza durumları için analizini yapmışlardır. Önerilen yeni tasarımda oluşan maksimum yakıt sıcaklıkları emniyet sınırlarını geçmediği sonucuna ulaşmışlardır [43].

ANSYS-CFX, STAR-CD, FLUENT ve PHOENICS; nükleer reaktör güvenliği problemlerinde kullanılan başlıca CFD yazılımlarıdır [44]. Literatür araştırmasında da görüleceği gibi Yüksek Sıcaklık Reaktörleri ile ilgili birçok sayısal çalışma; POKE kodu, GTAS, CATEM, CFX, THERMIX, KONVEK, GRSAC, STAR-CD, Trio-U, RELAP-3D, THERMIX yazılımları ile 2 veya 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada, daha önce çok az incelenmemiş olan, çıkış sıcaklığını artırmaya yönelik farklı çalışma parametrelerinin MHR üzerine etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Literatürde; çok az çalışma parametresi ile çalışılmıştır

ve birçok çalışma parametresinin daha detaylı karşılaştırması pek yoktur. Bu amaca yönelik olarak; farklı çalışma parametreleri sayısal olarak incelenmiş; çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkileri karşılaştırılmıştır. Soğutucu giriş sıcaklığı ve soğutucu giriş debisindeki değişiklikler; reaktör çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Çalışmamızda, bu sebeple soğutucu giriş sıcaklığı ve soğutucu giriş debisinin çok geniş aralıkta değiştiği ayrıntılı sayısal analizler ANSYS FLUENT yazılımı ile yapılmış bu sayede hem önerilen çalışma şartlarının reaktörde meydana getirdiği etkilerin benzerlik ve farklılıkları ortaya konmuş, hem de soğutucu çıkış sıcaklığını artırmaya yönelik çalışmalarda kullanılabilecek veriler elde edilmiştir.

### 3. GT MHR'NİN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

GT-MHR'yi geliştirme programına göre portatif reaktör Rusya'nın Seversk (Tomsk-7) şehrindeki Siberian Chemical Combine'ye inşa edilmektedir. GT-MHR'nin geliştirilmesinin en önemli nedenlerinden biri Rusya'da çok fazla bulunan nükleer silah yapımında kullanılan Plütonyumun tüketilmesi ve Rusya'da Plütonyum üreten nükleer santrallerinin yerini almasının sağlanmasıdır [2-11].

GT-MHR elektrik üretmek için çok temiz, çok ekonomik ve güvenli bir yoldur. Brayton çevrimli gaz türbini ile enerji dönüşüm sistemi (GT) ve gaz soğutmalı modüler helyum reaktörü (MHR); nihai basitliği, güvenliği ve ekonomiyi sunmaktadır. GT-MHR; elektrik üretiminin kWh'i başına %50 daha az atık üretmekte, karbon emisyonları çıkarmamakta, asit yağmurları oluşturmamakta, kömürden 1000 kat az hacimde atık oluşturmakta, sınırlı doğal kaynakları korumaktadır [2].

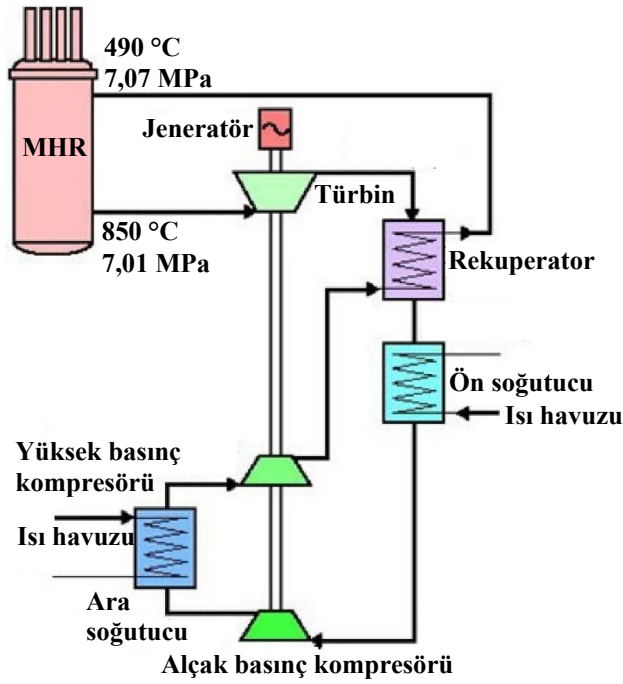
GT-MHR'nin tek modülü 600 MW(t) ve 286 MW(e) gücündedir ve santral 4 modülden oluşmaktadır (Çizelge 3.1) [2-11].

Çizelge 3.1. GT-MHR'nin genel özellikleri

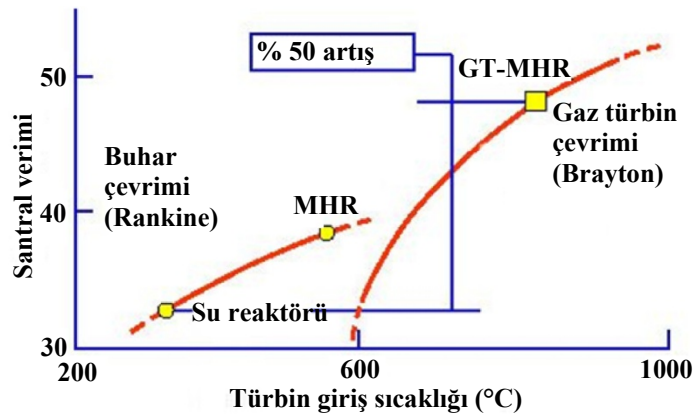
Kor termal gücü (MWt)	600
Net elektrik üretimi (MWe)	286
Verim (%)	48
Helyum kütleli akış debisi (kg/s)	320
Kor giriş/çıkış sıcaklığı (°C)	490/850
Kor giriş/çıkış basıncı (Mpa)	7,07/7,02

Çevrimde Helyum gazı kullanılmaktadır. Helyum soy gazdır, tüm koşullar altında tek fazlıdır ve hiçbir radyoaktif etkiye sahip değildir. GT-MHR'nin modüler helyum reaktörü (MHR) ve güç dönüşüm sistemini (GT) içeren genel diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Burada Helyumun güç üretim sistemi (GT) boyunca akışı görülmektedir [2-11].

GT-MHR diğer reaktörlere göre verimi çok yüksektir. Çalışma sıcaklığının yüksek olması ve güç üretiminde Brayton çevriminin kullanılması santralin net verimini artırmıştır (Şekil 3.2). Elektrik üretmek için Brayton çevriminin kullanımı net santral veriminin yaklaşık % 48 olması ile sonuçlanmıştır. GT-MHR nin verimi şu anki nükleer güç santrallerinin veriminden %50 fazladır [2-11].



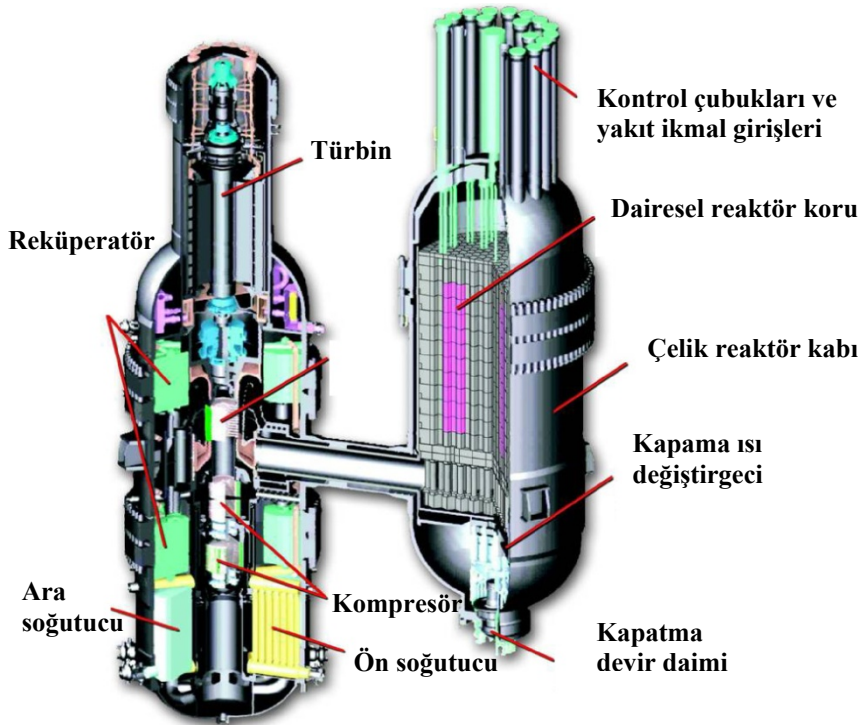
Şekil 3.1. Helyumun akış diyagramı [2]



Şekil 3.2. Isıl verimin karşılaştırılması [2]

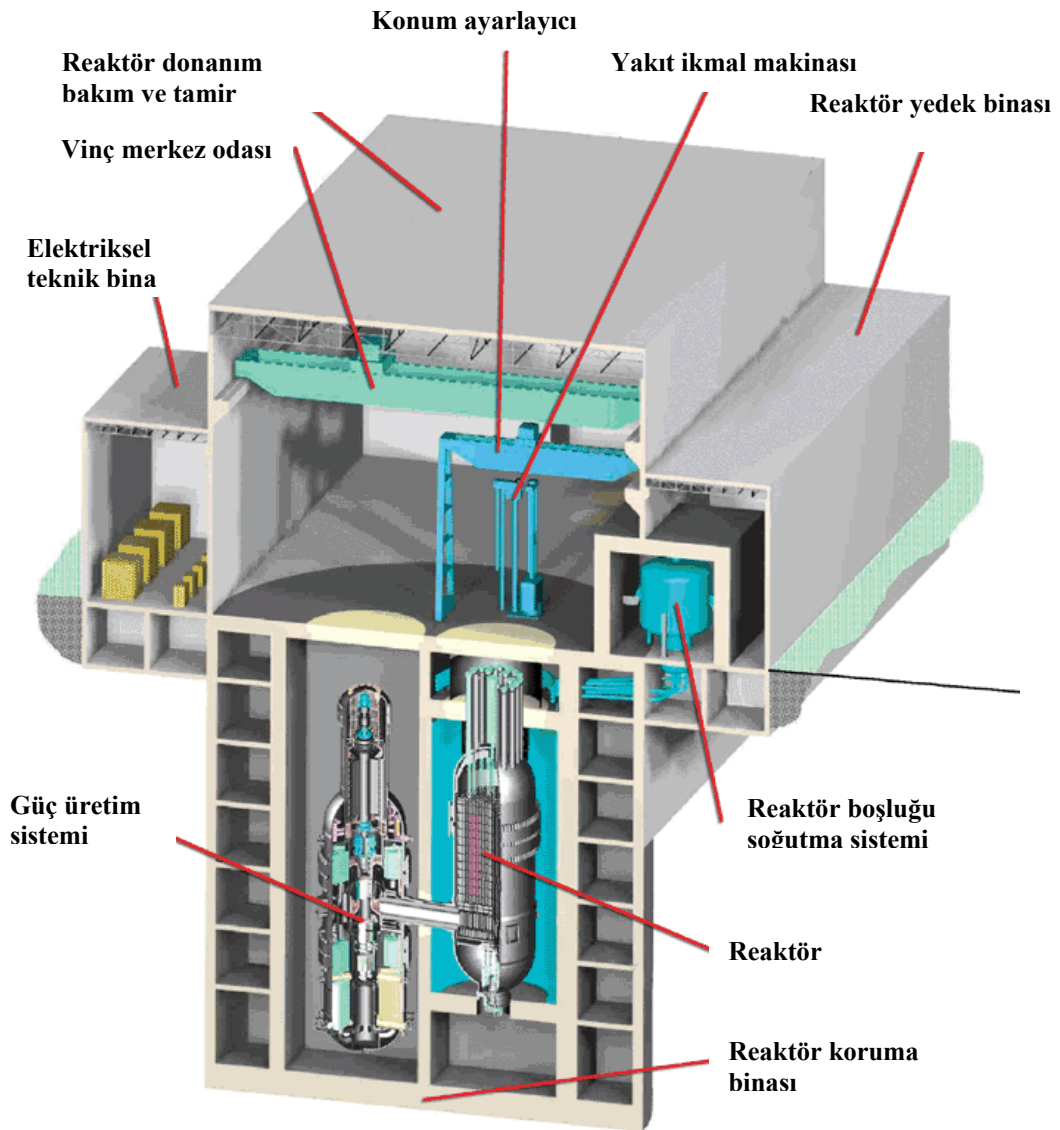
### 3.1. Bir GT-MHR Modülü

Bir GT-MHR modülü Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Yatay bir boru ile bağlı iki dikey çelik kaptan oluşmaktadır. Bir GT-MHR modülü gaz soğutmalı modüler helyum reaktöründen (MHR) ve yüksek verimli Brayton çevrimli (GT) güç üretim sisteminden oluşmaktadır. Sol taraftaki kabın içinde güç üretim sistemi, sağ taraftaki kabın içinde reaktör sistemi bulunmaktadır. Reaktör kabı ve güç kabı bir modülü oluşturmaktadır. Bu iki kap birbirine bir geçiş kanalı ile bağlıdır. Bu geçiş kanalı termal genişlemelerden etkilenmemesi için mümkün olduğu kadar kısa yapılmıştır. Geçiş kanalı kor giriş gazını çıkış gazından ayıran bir izolasyon yapısına sahiptir. Bu izolasyon yapısı GT-MHR’nin 60 yıllık ömrü boyunca gerektiğinde değiştirilebilmeye uygundur. Çevrimde Helyum gazı kullanılmaktadır. Helyum reaktör kabı çıkışında geçiş kanalının iç kısmından, girişinde ise geçiş kanalının dış kısmından akmaktadır. Helyum reaktörün dışından akarak kora girmektedir. Bu iki nedenden dolayı reaktör kabı ve geçiş kanalı dış metali çok yüksek sıcaklıklara maruz kalmamaktadır [2-11].



Şekil 3.3. Bir GT-MHR modülü [45]

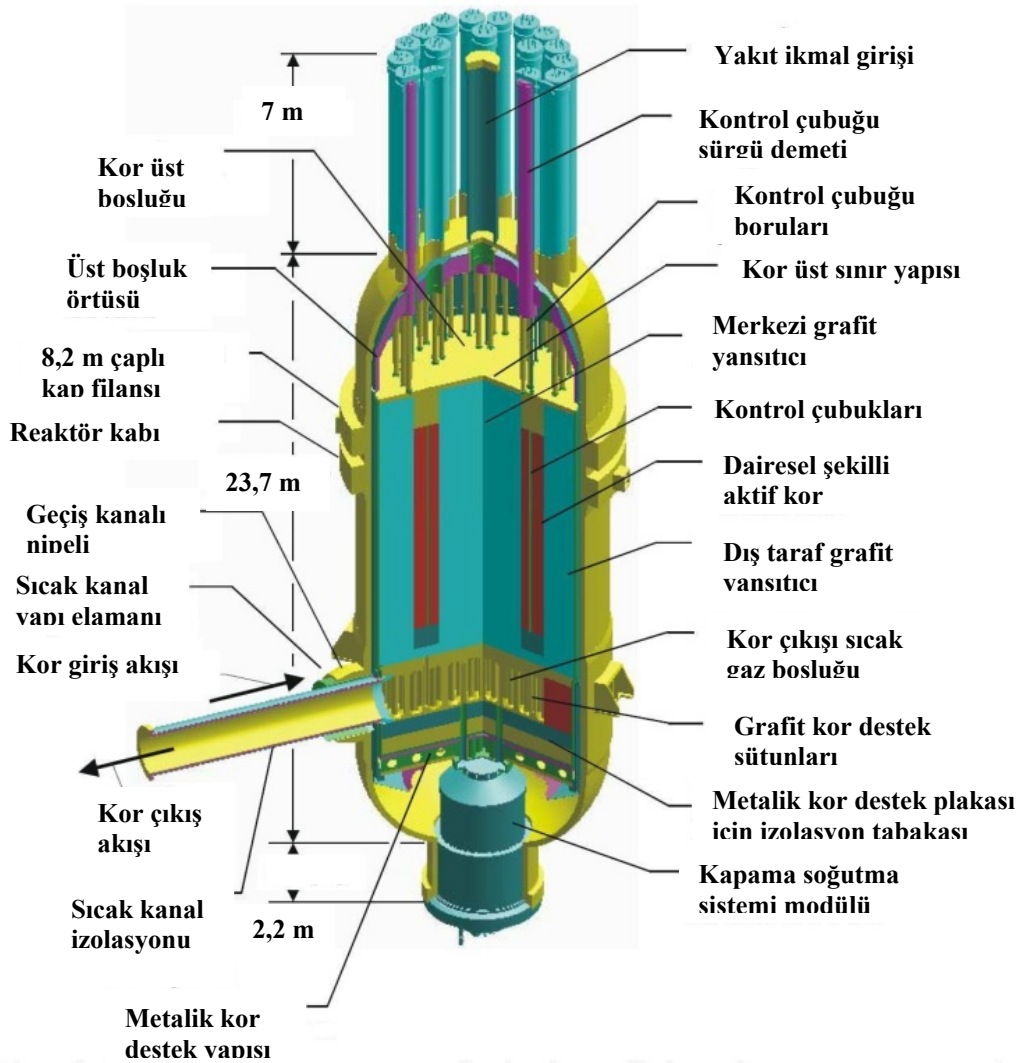
GT-MHR yerin altında beton siloların içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). GT-MHR santrallerinin basit ve modüler tasarımı gerekli donanım sayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Donanım sayısındaki bu azalma bakım ve çalıştırma için gerekli personel sayısı ve diğer gereksinimleri azaltmıştır. Bu tasarım yakıt değiştirmeyi kolaylaştırmaktadır. Ayrıca deprem durumunda sismik hareketlerin etkisini azaltmaktadır. Yerin altında beton siloların içinde olması sabotaj ve saldırıları durumlarında meydana gelebilecek zararın etkisini hafifletmektedir [2-11].



Şekil 3.4. Reaktör ve güç üretim sistemini gösteren GT-MHR yapısı [45]

### 3.2. Reaktör Kapı (GT) ve Güç Kabı (MHR)

MHR'nin iç yapısını gösteren kesit görünüş Şekil 3.5'de gösterilmiştir. MHR; reaktör kuru, çelik reaktör kabı, kor destekleri, reaksiyonu kontrol eden kor çubukları (sürgü demeti), yakıt ikmal girişi, geçiş kanalı, kapama soğutma sisteminden oluşmaktadır [2-11].



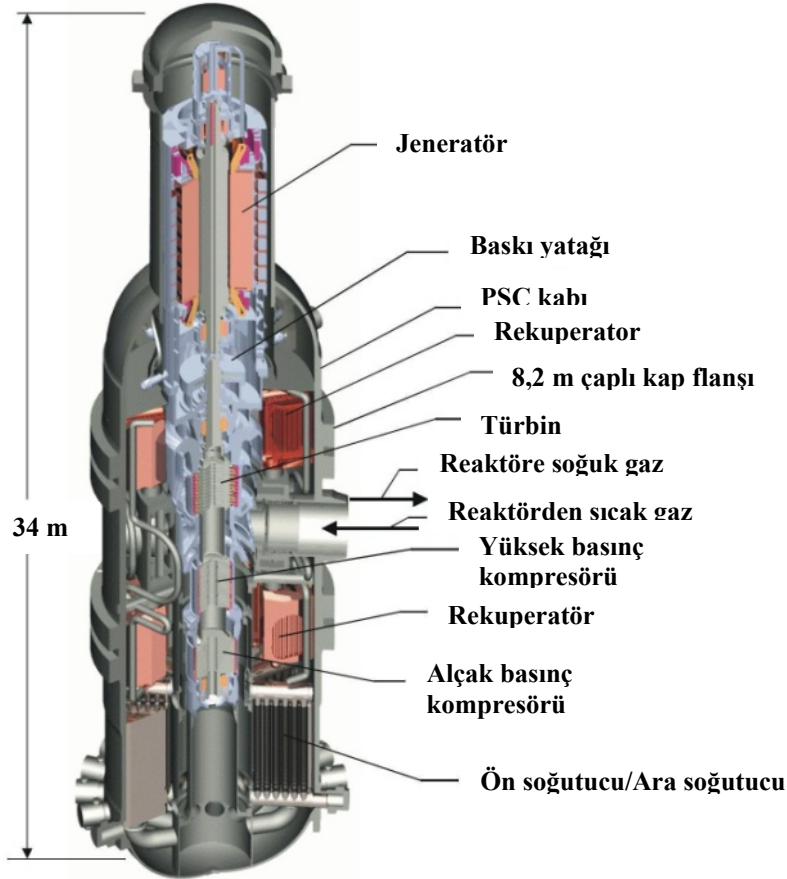
Şekil 3.5. MHR'nin metalik iç yapısını, korunu, kontrol çubuğu kılavuz borularını kapama soğutma sistemini gösteren kesit görünüşü [10]

Geçiş kanalının dış tarafından reaktör kabına giren helyum ( $\sim 490^{\circ}\text{C}$ ,  $\sim 7\text{MPa}$ ), reaktör kabı ile dış yansıtıcıyı çevreleyen metalik kor bariyeri arasından yukarı doğru

ilerler. Helyum kontrol çubuklarının bulunduğu üst bölgeye gelir. Reaktör kabının üst kafası, yüksek sıcaklığa dayanıklı metal plakalar ile desteklenen lifli “Kaowool” izolasyon tabakasına ve karbon-karbon kompozit malzemedan yapılmış destek elemanlarına sahiptir. Bu izolasyon kaza durumunda koruma sağlayabilmektedir. Helyum yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemedan yapılmış korun üst destek elemanlarının arasından aşağıya doğru akar. Helyum daha sonra ilk olarak yakıt elemanları içindeki soğutucu kanalların içinden akar. Akışın bir kısmı yakıt elemanları ve yansıtıcı elemanlar arasındaki aralıklardan akarak bypass olur. Bu nedenle; kor boyunca değişik akış yollarındaki soğutucunun sıcaklık artışı geniş bir aralık boyunca değişmektedir. Lokal gücün en yüksek olduğu yerlerdeki yakıt elemanı kanallarındaki helyum sıcaklığı oldukça yüksektir. Oysa yansıtıcılara yakın ısınmamış bölgelerde helyumun sıcaklığı giriş sıcaklığına yakın değerdedir. Kor boyunca ortalama sıcaklık artışı 350 °C’dir. Türbine giren helyumun sıcaklığının uniform karışmış olarak 850 °C olması sağlanmak amacıyla; yüksek sıcaklık farkı ve sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle aşırı termal gerilimlerden kaçınmak için, helyumun kor çıkışında iyi karışımı gereklidir. Kor çıkış boşluğunun yapısı bu durumun etkilerini azaltmak için tasarlanmıştır. Reaktörlerde kor çıkış sıcaklığının mümkün olduğu kadar yüksek olması istenen bir özelliktir. Fakat kor çıkış sıcaklığını geçiş kanalının malzemesi ve kor destek yapısının limitleri engellemektedir. Ayrıca kor çıkış sıcaklığındaki artış, normal çalışma ve kaza durumlarında oluşan maksimum yakıt sıcaklığının artışı ile sonuçlanmaktadır. Son olarak Helyum geçiş kanalının iç kısmından güç kabına geçer [2-11, 39, 40].

Kor çıkış boşluğu ile alt metalik kor destek plakası arasında ~1.2m kalınlıkta izolasyon tabakası vardır. Bu izolasyon 200mm karbon-karbon kompozit malzeme ve 1m grafitten oluşmaktadır. Bu malzeme bileşimi ve kalınlığı sıcaklığı; 850 °C’den (kor çıkış sıcaklığı) kor destek plakasının üstünü 510 °C’ye ve altını 490 °C’ye düşürür. Metalik reaktör kabı duvarı malzemesi normal çalışma durumunda maksimum 440 °C sıcaklığa, kaza durumunda maksimum 550 °C sıcaklığa dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Kordaki yakıt elemanları, grafit yansıtıcıları, kontrol çubukları ve yuvaları, kapama küre kanallarının tümü kaza durumlarında oluşacak yüksek sıcaklığa dayanıklı metal olmayan malzemelerden yapılmıştır [2-11].

Güç üretim birimi Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Güç üretim sisteminde yüksek termal verime sahip Brayton çevrimi vardır. Jeneratör, türbin, manyetik yataklı dikey tek shafta bağlı kompresör bölümlerinden oluşmaktadır. Güç sistemi ayrıca rekuperator-rejenaratör, ön soğutucu, ara soğutucu ve ısı değiştirgeçlerinden oluşmaktadır [2-11].

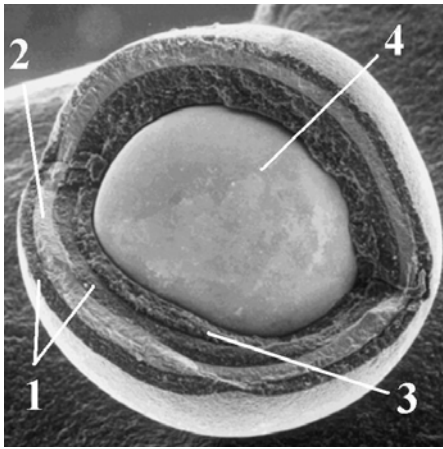


Şekil 3.6. GT'nin içindeki türbini, kompresörleri, rekuperatorleri, ön soğutucu, ara soğutucu ve jeneratörü gösteren kesit görünüşü [10]

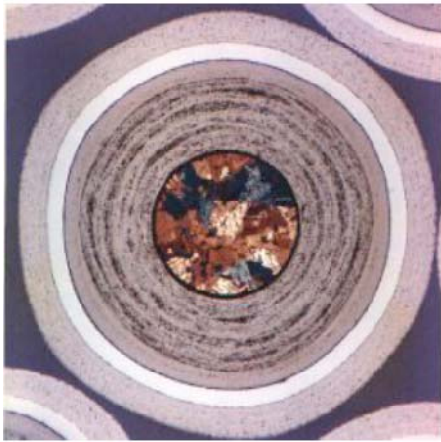
### 3.3. TRISO Kaplamalı Yakıt

Reaktör de kullanılan TRISO (Tristructural isotropic) kaplamalı yakıt parçası Şekil 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir. Yakıt parçası tabakalardan ve yakıt çekirdeğinden oluşmaktadır. TRISO kaplamalı parçacık çoklu kaplama tabakalarına sahiptir. Bu kaplama sistemi reaktörün çalışma şartları altında fizyon ürünlerinin tutulmasını sağlamaktadır. Ayrıca, kullanılmış yakıtların depolanması ve jeolojik depolanması için radyonüklidlerin tutulması için mükemmel bir bariyerdir. Atık yakıt, kaplamalı

yapısı nedeniyle yüzlerce yıl kalabilmektedir. TRISO kaplamalı yakıt parçalarının çapı 650 mikron ile 850 mikron arası değişmektedir. Kaplamalı yapı yüksek sıcaklıklara dayanımı sağlamaktadır. Her bir kaplamanın güvenlik açısından bir önemi vardır. TRISO kaplamalı yakıt parçası Şekil 3.7’de görüldüğü gibi pirolitik karbon katman (1), silikon karbür katman (2), gözenekli karbon tampon katman (3) ve çekirdekten (4) oluşmaktadır. En büyük özelliği yüksek sıcaklıklarda fisyon ürünlerini tutabilmesidir [46-52].

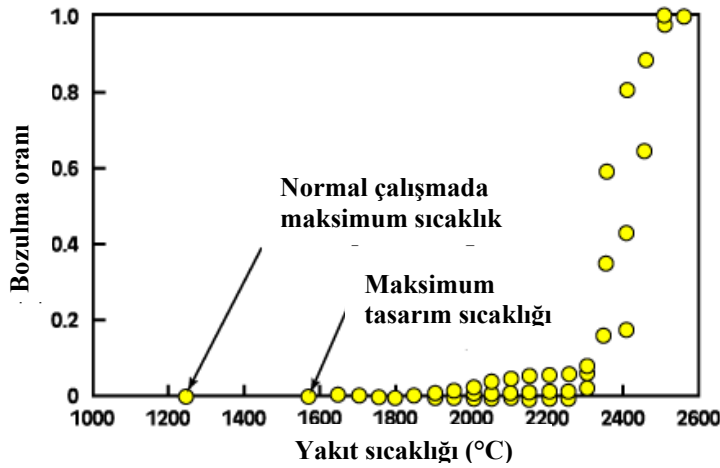


Şekil 3.7. TRISO kaplamalı parçacığın bir bölümünden kaplamaların çıkarılmış haldeki fotoğrafı [10]



Şekil 3.8. TRISO kaplamalı parçacığın kullanılmadan önceki ve kullanıldıktan sonraki hali [53]

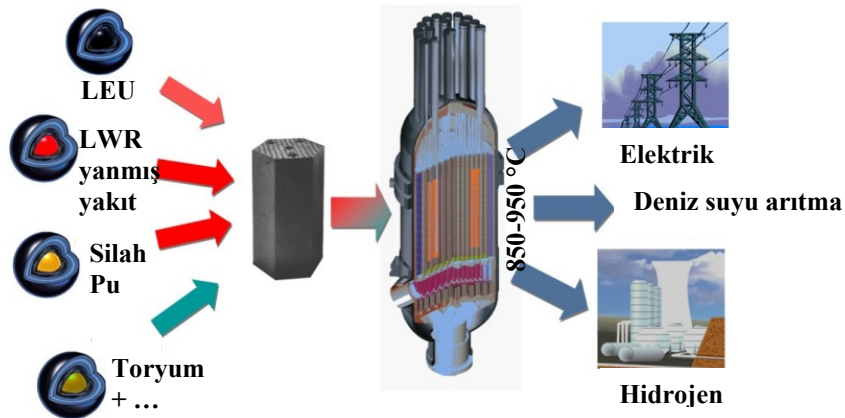
Şekil 3.9'daki grafiğe göre sıcaklık 2000 °C yaklaşıncaya kadar, TRISO kaplamalı yakıt parçası termal olarak zarar görmemektedir. Normal çalışma durumunda maksimum sıcaklığın 1250 °C, kaza durumlarında 1600 °C altında olması istenir [46-52].



Şekil 3.9. TRISO kaplamalı yakıt parçasının sıcaklık kapasitesi [2-11]

General Atomics'in ticari tasarımına göre bu reaktörde fisil olarak %19,8 zenginleştirilmiş ve fertil olarak doğal Uranyumlu TRISO kaplamalı yakıt parçalarının karışımı kullanılmaktadır [2-11].

MHR'de çok farklı tipte yakıtlar (Zenginleştirilmiş ve Doğal Uranyum, Toryum, Radyoaktif Nükleer Atık Aktinidler, Kullanılmış LWR Yakıtları, Askeri Plutonyum, MOX yakıt ve karışımları) kullanılabilir (Şekil 3.10) [46-52].



Şekil 3.10. MHR'de çok farklı tipte yakıtlar kullanılabilmektedir [54]

### 3.4. Korun Yapısı

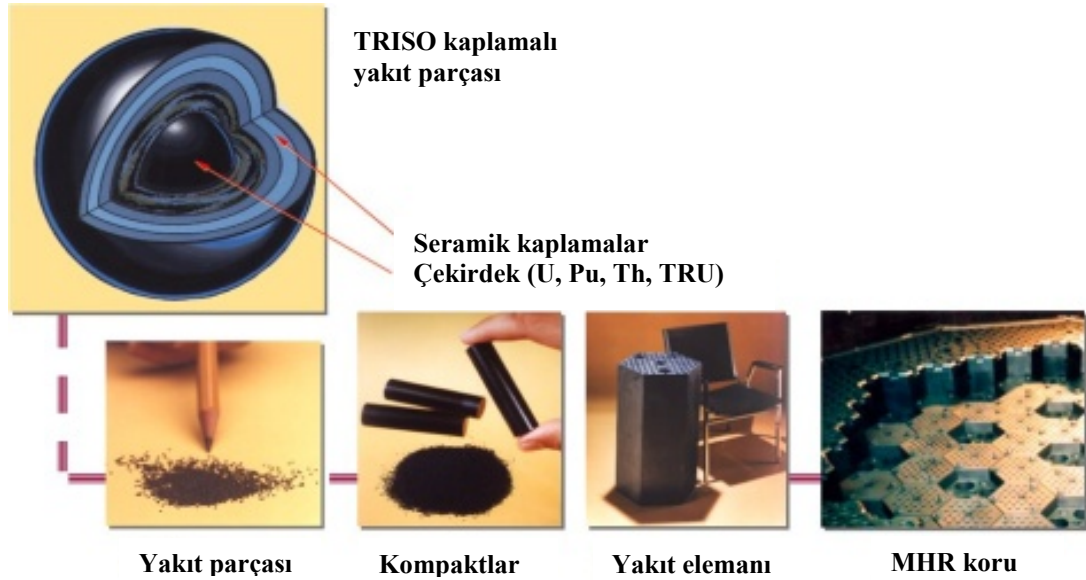
Fisil ve fertil TRISO kaplamalı yakıt parçalarının karışımı bir kompaktı (Şekil 3.12) oluşturmaktadır. Kompaktın çapı yaklaşık 13 mm boyu yaklaşık 51 mm dir. Şekilde grafitten yapılmış altıgen yakıt elemanı görülmektedir. Yakıt elemanının grafitten yapılmış olması yüksek ısıl kapasite, yavaş ısıl yanıt ve yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılık sağlamaktadır. Yakıt elemanı 793 mm yüksekliğe ve 360 mm ene sahiptir. Yakıt elemanında (Şekil 3.11) soğutma kanalları ve yakıt kanalları vardır. Bir yakıt elemanı yakıt kompaktları için 210 kanala ve helyum soğutucu için 108 akış kanalına sahiptir. Kompaktlar yakıt kanallarının içine yerleştirilmiştir. Yakıt kompaktları içinde üretilen ısı grafit bloklar üzerinden iletilmekte ve son olarak Helyum soğutucu tarafından uzaklaştırılmaktadır. [2-11].



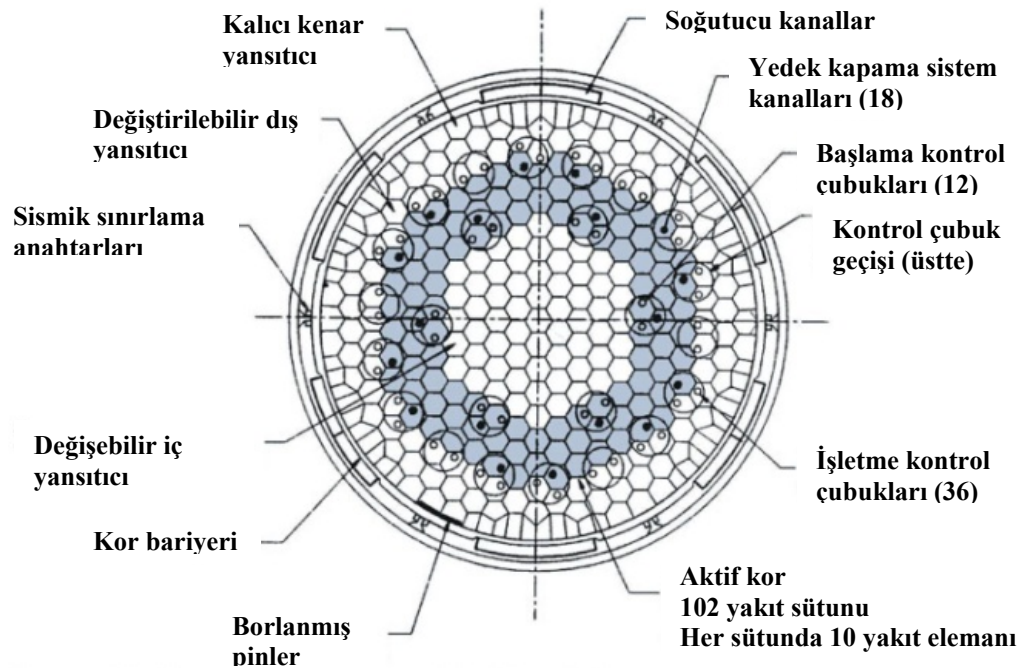
Şekil 3.11. Yakıt elemanı [55]

Şekil 3.13'deki reaktör korunun üstten görünüşüne göre reaktör kuru 3 dairesel halkadan oluşmaktadır. Bunlar iç yansıtıcı, aktif kor ve dış yansıtıcıdır. Aktif kor halkası 102 yakıt sütunundan oluşmaktadır. Her bir standart yakıt sütunu 10 yakıt elemanı, üst ve alt grafit reflektöre sahiptir. Üst ve alt reflektörler sırasıyla 120 cm ve 158 cm yüksekliğindedir. Toplamda 1020 adet yakıt elemanı vardır. Reaktör korunda kullanılan 3 tür yakıt elemanı kullanılmaktadır. Bunlar; standart yakıt elemanı, kontrol çubuğu kanalı içeren yakıt elemanı, yedek kapama kanalı içeren yakıt

elemanıdır. Aktif kor sütunlarının 12 âdeti başlama kontrol çubuğu için, 18 âdeti yedek kapama kontrol çubuğu için kanal içerir. Dış yansıtıcı sütunların 36 âdeti işletme kontrol çubuğu için kanal içerir [2-11].



Şekil 3.12. TRISO kaplamalı yakıt parçası ve reaktörün oluşumu [10]



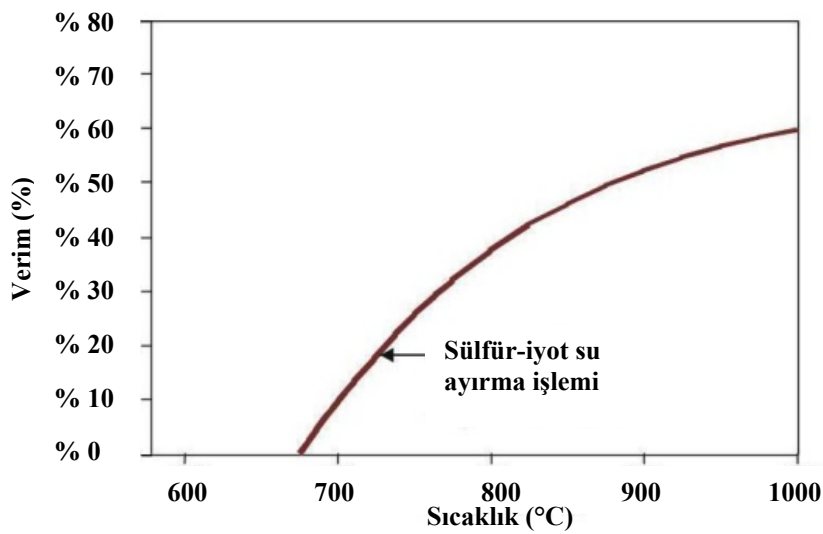
Şekil 3.13. Reaktör korunun üstten görünüşü [10]

### 3.5. MHR'nin Diğer Kullanım Alanları

Çok yüksek sıcaklık reaktör (VHTR) tasarımına yüksek sıcaklıkta nükleer ısı kaynağı elde etmek için son yıllarda yeniden ilgi gösterilmektedir. Bu ilgi Hidrojen üretimi için nükleer enerji kullanımı imkanı ile artmıştır. Şimdiki yüksek sıcaklık reaktör (HTR) tasarımları 850°C çıkış sıcaklıkları üretmek için değiştirilmekte ve genişletilmektedir. GA tarafından geliştirilen MHR, nükleer hidrojen üretimi için bu yüksek sıcaklık reaktör tasarımlarından güçlü olan adaydır. Yüksek sıcaklıkta Helyum üretme yeteneğinden dolayı MHR Hidrojen üretimi için tamamen uygundur.

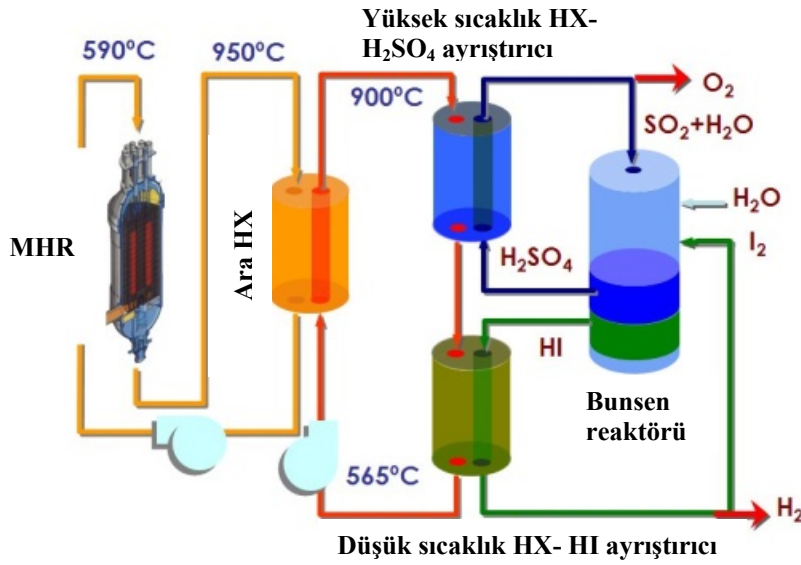
Hidrojen 21. yüzyıla damgasını vuracak bir enerji taşıyıcısıdır. Bilindiği üzere hidrojen üretimi için yüksek sıcaklığa ihtiyaç vardır. Şekil 3.14'deki grafiğe göre S-I işlemi ile Hidrojen üretiminde çıkış sıcaklığı yükseldikçe hidrojen üretimi verimi artmaktadır. S-I işlemi ile Hidrojen üretimi 3 çift kimyasal süreçten oluşmaktadır (Şekil 3.15). S-I işleminin girdileri MHR'den elde edilen ısı ve su; çıktıları ise Hidrojen, oksijen ve atık ısıdır [18].

MHR elektrik üretiminde ve hidrojen üretiminde kullanılabilirdiği gibi bölgesel ısıtma ve deniz suyu arıtmasında da kullanılmaktadır.



Şekil 3.14. S-I işleminde sıcaklığa göre hidrojen üretim verimliliği [15-17]

MHR yüksek çıkış sıcaklığına sahip olduğundan gelecekte hidrojen üretiminde de kullanılması planlanmaktadır. Bu amaçla uygulanan ve reaktör sistemi GT-MHR ile aynı olan reaktöre H<sub>2</sub>-MHR denmektedir. H<sub>2</sub>-MHR’de elde edilen yüksek sıcaklıktaki nükleer ısı kullanılarak Hidrojenin termokimyasal yolla üretimi gerçekleştirilmektedir [15-17].



Şekil 3.15. MHR’den elde edilen ısı ile S-I işlemi vasıtasıyla Hidrojen üretimi [45]

MHR üzerinde yapılan değişikliklerle şu an dünyada araştırma safhasındaki yeni bir reaktör fikri olan ve yaklaşık 1000 °C çıkış sıcaklığına sahip olduğu için gelecekte hidrojen üretiminde kullanılması düşünülen NGNP (Next Generation Nuclear Plant) ve AHTR (Advanced High Temperature Reactor) geliştirilmiştir [10, 20, 21, 33].

### 3.6. Güvenlik Özellikleri

GT-MHR sahip olduğu aşağıdaki özellikler nedeniyle doğası gereği son derece güvenlidir [2-11].

Soğutucu akışkan olarak Helyum gazının kullanılmaktadır. Helyum soy gazdır, tüm koşullar altında tek fazlıdır ve hiçbir radyoaktif etkiye sahip değildir.

MHR grafit kora sahiptir. Korun grafiten yapılmış olması yüksek ısıl kapasite, yavaş ısıl yanıt ve yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılık sağlamaktadır.

Yakıt olarak TRISO kaplamalı yakıt parçası kullanılmaktadır. Kaplamalı yapı yüksek sıcaklıklara dayanımı sağlamaktadır. Her bir kaplamanın güvenlik açısından bir önemi vardır. En büyük özelliği kaza durumlarında oluşan yüksek sıcaklıklarda fisyon ürünlerini tutabilmesidir.

Reaktifliğin negatif sıcaklık katsayısına sahip olması, normal çalışma sıcaklığının üstünde sıcaklığa sahip korun doğal olarak kendiliğinden kapanmasını sağlamaktadır.

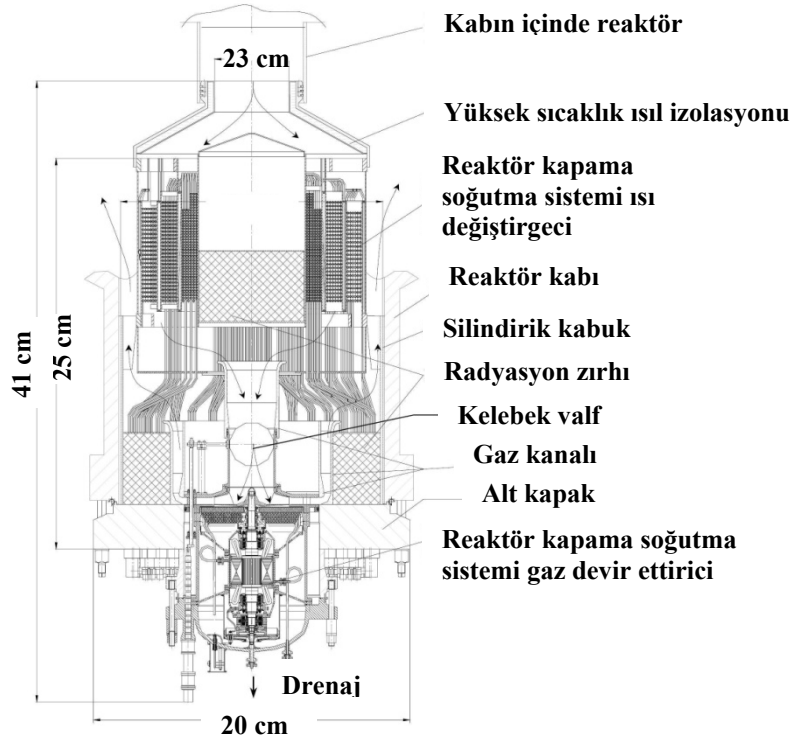
İzolasyonsuz çelik reaktör kabı içindeki dairesel ve düşük güç yoğunluklu kor, doğal sirkülasyonlu reaktör boşluğu soğutma sistemiyle çevrilidir.

Çernobil kazasındaki reaktörler “seviye 3” güvenlik kriterlerini karşılamaktaydı. MHR ise “seviye 1” kriterlerini karşılayan tek reaktördür. MHR, güvenliği sağlayan iki tür soğutma sistemine sahiptir. Bunlar, Kapama Soğutma Sistemi ve Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi’dir. Kaza durumlarında; sıcaklık TRISO kaplamalı yakıt parçaları için tehdit oluşturacak bir yüksekliğe çıkmadan iletim, ışıınım ve doğal taşınım ile pasif olarak uzaklaştırılmaktadır. MHR çok yüksek negatif sıcaklık katsayısına sahip olduğundan; kaza durumunda doğal güvenliği artıran, reaktörün kendiliğinden durmasını sağlayan, pasif atık ısı uzaklaştırma özelliğine sahiptir. Aktif soğutma sisteminin çalışmaması durumunda pasif atık ısı uzaklaştırma özelliği reaktörün güvenliğini sağlamaktadır [2-11].

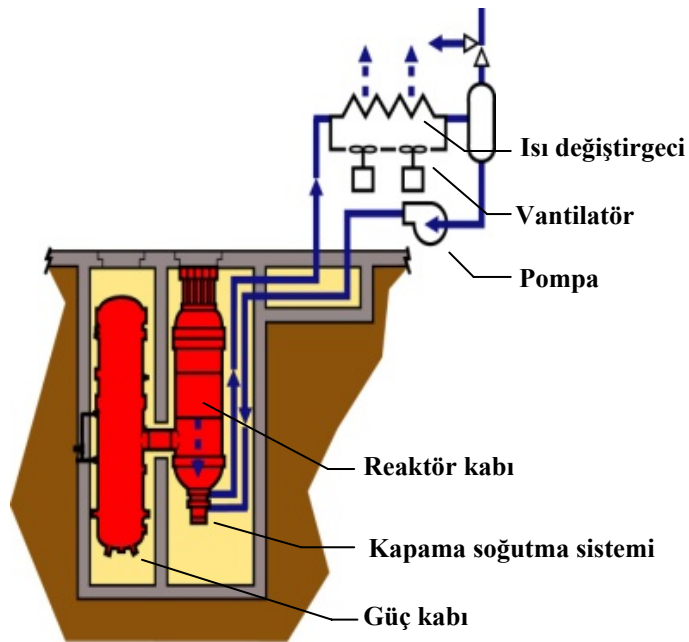
### **3.6.1. Aktif soğutma sistemi**

MHR’nin (Şekil 3.5) metalik kor desteklerinin altında Kapama Soğutma Sistemi modülü (Şekil 3.16) vardır. Bu modül normal kapama boyunca kordan atık ısının uzaklaştırmasını sağlamaktadır. Yakıt ikmali ve bakım işlemleri için atık ısının uzaklaştırılması için kullanılır. Kapama Soğutma Sistemi’nde atık ısı zorlanmış taşınım ile uzaklaştırılır (Şekil 3.17). Yani reaktörün güvenliği aktif olarak

sağlanmaktadır. Bu aktif sistemin çalışmaması durumunda atık ısı pasif olarak uzaklaştırılır [2-11].



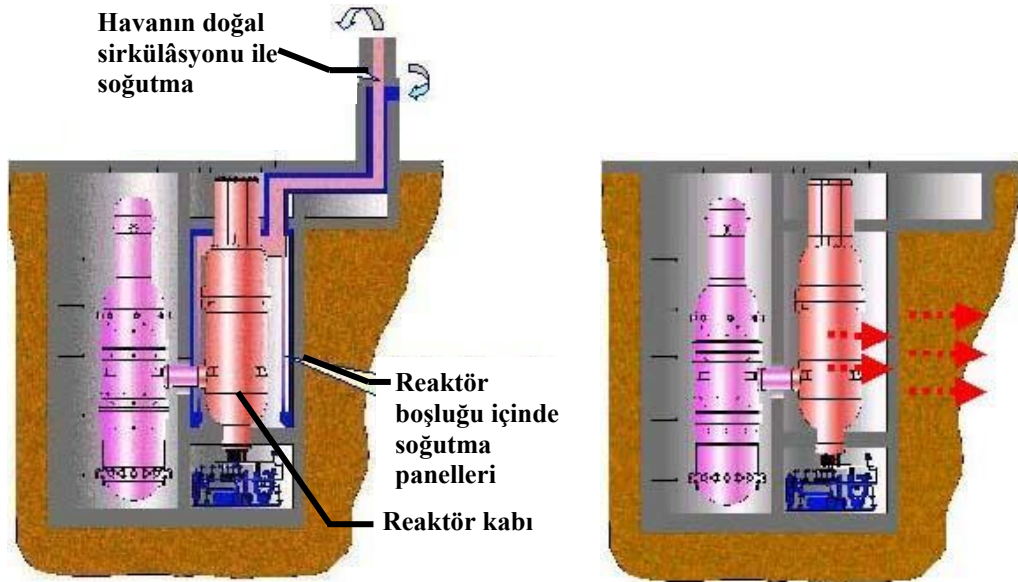
Şekil 3.16. Kapama Soğutma Sistemi'nin kesit görünüşü [20]



Şekil 3.17. Kapama Soğutma Sistemi'nin çalışma prensibi [54]

### 3.6.2. Pasif soğutma sistemi

Reaktör kabını çevreleyen Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Korun atık ısıyı Kapama Soğutma Sisteminin (SCS) çalışmaması durumunda bağımsız ve pasif olarak uzaklaştırılmaktadır. Kor güç yoğunluğu ve dairesel kor yapısı; atık ısının yakıt parçalarının sıcaklık limitini geçmeden iletim, ışınım ve doğal taşınım ile pasif olarak uzaklaştırılması için tasarlanmıştır. Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi sayesinde kaza durumlarında dahi reaktörde oluşacak maksimum sıcaklık tasarım limitlerini geçmemektedir. Aktif soğutma sisteminin çalışmaması durumunda, pasif atık ısı uzaklaştırma sistemi reaktörün soğumasını 2 durumda gerçekleştirmektedir. Bunlar; reaktör kabının çalışma basıncında kaldığı D-LOFC ve reaktör kabının atmosfer basıncında kaldığı P-LOFC kaza durumlarıdır. Reaktördeki kaza durumlarında pasif soğutmada zamana bağlı oluşabilecek en yüksek sıcaklık değeri 1600 °C’yi normal çalışma durumunda ise 1250 °C geçmemektedir [22-43].



Şekil 3.18. Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi. Atık ısı; iletim, ışınım ve taşınım ile uzaklaşıyor [54]

#### 4. PROBLEMİN TANIMI VE SINIR ŞARTLARI

MHR'nin yapısı SAD analizi için çok karmaşıktır. Çünkü MHR korundaki 7.9 m uzunluğundaki bir yakıt sütunu yakıt kompaktları için 210 kanala ve helyum soğutucu için 108 akış kanalına sahiptir ve aktif kor halkasında 102 yakıt sütunu vardır. Kompaktlar yakıt kanallarının içine yerleştirilmiştir. Yakıt kompaktı karbon matrise gömülü 650-850 mikron çaplı TRISO kaplamalı yakıt parçalarını içermektedir. Şekil 4.7, 4.8 ve Şekil 4.12 görüldüğü gibi TRISO kaplamalı yakıt parçaları pirolitik karbon, silikon karbür ve gözenekli karbon tamponu kaplamalarına sahip olup her bir tabakanın ısıl özellikleri farklıdır ve kor içinde 3 102 120 adet TRISO kaplamalı yakıt parçası vardır.

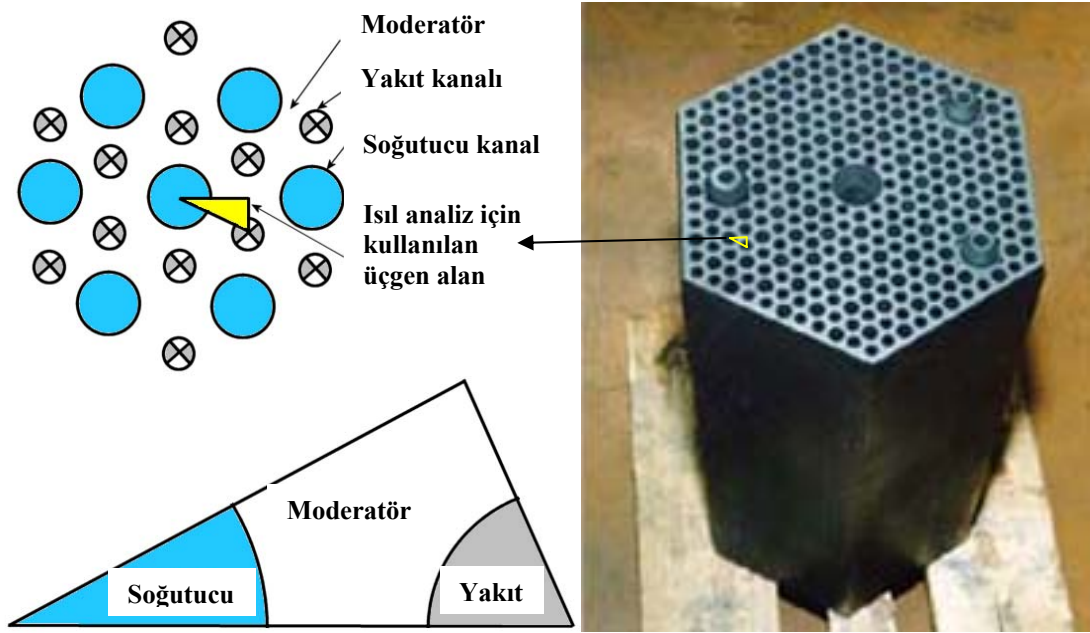
Bu nedenle prizmatik reaktörleri analitik olarak analiz etmek için basitleştirilmiş sayısal modeller vardır. Bu modeller:

- Birim Hücre Modeli
- Eşdeğer Silindir Modeli

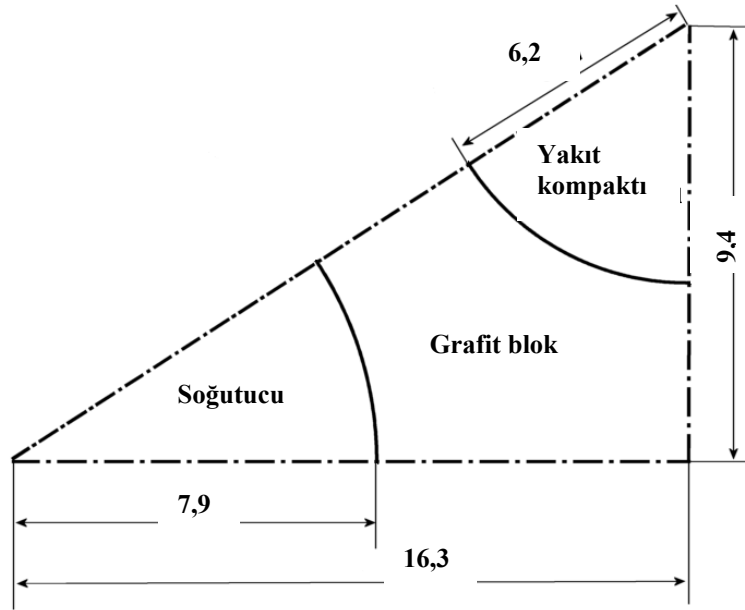
Bu çalışmada her iki yöntemde kullanılarak SAD analizi yapılmıştır.

##### 4.1. Birim Hücre Modeli

Birim hücre modeli basit olmasına rağmen, yakıt elemanı içindeki ısı transferinin aşağı yukarı temel halini anlamak için kullanışlıdır. Birim hücre modeli sadece Şekil 4.1'de görülen dik üçgen şeklindeki birim hücrelerden oluşan yakıt elemanlarının içindeki düzenli bölgeyi incelemektedir. Birim hücre yakıt kompaktı alanının üçte birinden ve soğutucu deliği alanının altıda birinden oluşur. Birim hücrenin, üçgen bölgesindeki yakıt içinde üretilen ısının sadece üçgene ait kanaldan geçen soğutucu ile uzaklaştırıldığı simetrik bir bölüm olduğu farz edilmektedir [19]. Birim hücre modelinin geometrisi Şekil 4.2'de gösterilmektedir [2-6].



Şekil 4.1. Birim hücre modeli



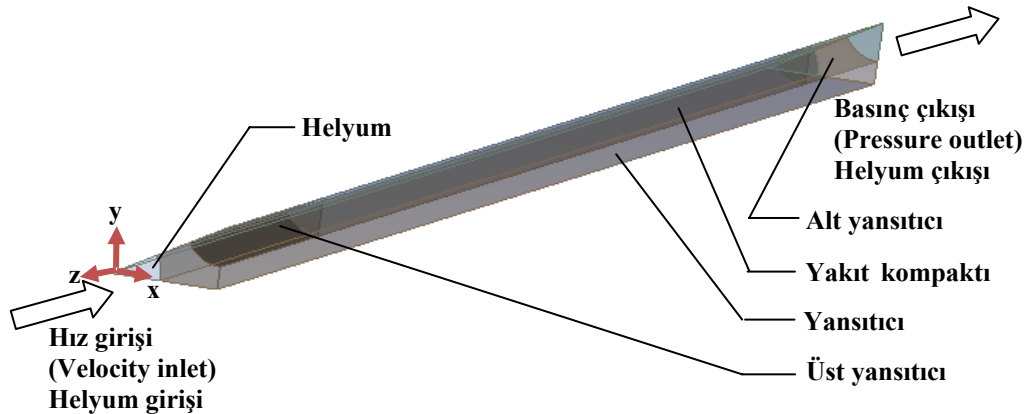
Şekil 4.2. Birim hücre model geometrisi (birim: mm)

Şekil 4.2'de görülen birim hücre modeli soğutucu, grafit blok ve yakıt kopmağından oluşmaktadır. Normalde yakıt kompaktı, karbon matrisine gömülü TRISO kaplamalı parçacıkları içermektedir. Bir TRISO kaplamalı parçacık çoklu kaplama tabakalarına sahiptir. Bu tabakalar Pirolitik Karbon, Silikon Karbür ve Gözenekli Karbon

Tampondur. Bu tabakalar ve yakıt kompaktı içindeki her bir TRISO parçacık, yakıt kompaktı homojen bir yapıya sahip olduğu varsayıldığından bu kısımda modellenmemiştir. Bu nedenle yakıt kompaktının tamamı tekdüze termal özelliklere ve güç dağılımına sahiptir. TRISO parçacığının her bir tabakasının (mikro metre) ve her bir TRISO parçacığının modellenmesinin üstesinden gelmek çok zordur. Zaman alıcı bu problemi çözmek için güçlü donanımına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, problem yakıt kompaktının tekdüze kompozisyona sahip olduğu kabulü ile basitleştirilmiştir.

MHR'nin ısı-akış tasarım çalışmaları ilk olarak Birim Hücre Modelini kullanan POKE bilgisayar kodu ile yapılmıştır. Orijinal MHR tasarımı için POKE bilgisayar kodu ile reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığını 1267°C hesaplanmıştır [19].

Birim hücre modelinde dış yüzeyler, helyumun giriş ve çıkış yüzeyleri, ayrıca soğutucu helyum, grafit blok ve yakıt kompaktı hacimleri fiziki olarak kullanılan yazılımda tanımlanmıştır. Sayısal analizde akışkan olarak kullanılan helyumun girişi Hız Girişi (Velocity Inlet) ve sıcaklık olarak girilmiştir. Çıkıştaki koşul ise normal çıkış (Pressure Outlet) olarak verilmiştir. Modelde girilen sınır şartları Şekil 4.3'de belirtilmiştir.



Şekil 4.3. Sınır şartlarının model üzerinde gösterimi

Helyumun giriş sınır şartı:

$$z = 0, u_x=0, u_y=0, u_z \neq 0, T \neq 0 \quad (4.1)$$

Helyumun çıkış sınır şartı:

$$\left. \frac{\partial u_x}{\partial z} \right|_{(x,y,-10,7\text{ m})} = 0, \quad \left. \frac{\partial u_y}{\partial z} \right|_{(x,y,-10,7\text{ m})} = 0, \quad \left. \frac{\partial u_z}{\partial z} \right|_{(x,y,-10,7\text{ m})} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{(x,y,-10,7\text{ m})} = 0, \quad P = P_{atm} \quad (4.2)$$

Helyum ile yansıtıcının ve yakıt kompaktının temas ettiği yüzeylerde sınır şartı:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(r)} = h(T_w - T_\infty) \quad (4.3)$$

Helyum ile yansıtıcının ve yakıt kompaktının temas yüzeylerinde kayma olmadığı göz önünde bulundurularak bu yüzeylerdeki hızlar  $u_x=0$ ,  $u_y=0$  ve  $u_z=0$  olmaktadır.

Simetri sınır şartı:

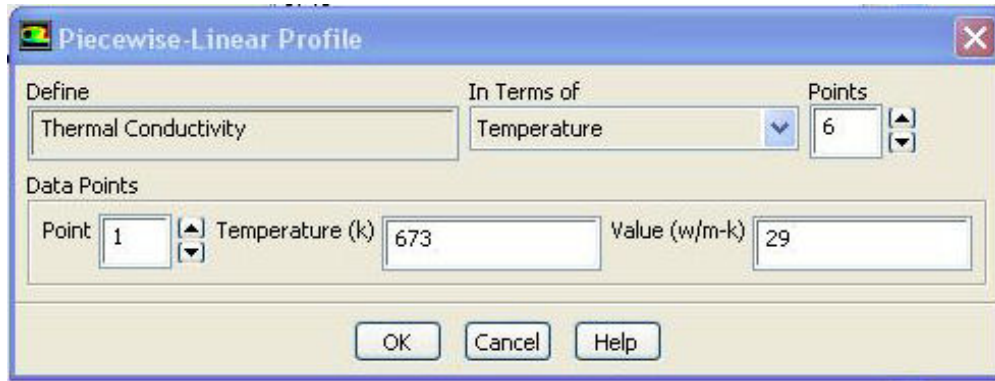
$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{(0,y,z)} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{(x,0,z)} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{(x,y,0)} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{(x,y,10,7\text{ m})} = 0 \quad (4.4)$$

Hesaplamalarda uygulanan kabuller;

- Sürekli rejim hali,
- Türbülanslı akış şartı,
- Sıkıştırılmaz akışkan ( $\rho$  sabit)

Analizde kullanılan grafit ve yakıt kompaktının termal özellikleri Çizelge 4.1’de görülmektedir. Helyum gazının 7 MPa basınç altındaki özellikleri NIST (National Institute of Standards and Technology) veri tabanına dayanmaktadır ve Çizelge 4.2’de verilmiştir [65]. Grafit ve yakıt kompaktının yoğunluğu  $1740 \text{ kg/m}^3$  dür [22]. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de her bir sıcaklık değeri için verilen termal özellikler Şekil 4.4’de görüldüğü gibi FLUENT’e parçalı doğrusal profil (piecewise linear profile) olarak girilmiştir.



Şekil 4.4. Her bir sıcaklık değeri için termal özelliklerin girilmesi

Eksenel yön boyunca güç dağılımının uniform olacağı farz edilmektedir. Reaktörde  $18,5 \text{ m}^3$  nükleer yakıt bulunmaktadır. Reaktörün toplam gücü 600 MW değerinin  $18,5 \text{ m}^3$  bölünmesiyle yakıtın ortalama güç yoğunluğu  $32,3 \text{ MW/m}^3$  olarak bulunmuştur. Eksenel güç yoğunluğunun değeri  $42,6 \text{ W/cm}^3$  dür. Bu değer ortalama güç yoğunluğunun eksenel güç faktörüyle çarpılmasıyla bulunmuştur. Eksenel güç faktörü 1,32’dir [19].

Çizelge 4.1. Yakıt kompaktının ve grafitin ısı iletim katsayısı ve özgül ısı kapasitesi [22]

Sıcaklık (°C)	Yakıt Kompaktı		Grafit	
	Özgül ısı (J/kg.K)	Isı iletim katsayısı (W/m.K)	Özgül ısı (J/kg.K)	Isı iletim katsayısı (W/m.K)
400	1840	30	1840	29,3
600	1840	27	1840	31,4
800	1840	24	1840	35,6

Çizelge 4.1. (Devam) Yakıt kompaktının ve grafitin ısı iletim katsayısı ve özgül ısı kapasitesi [22]

<b>1000</b>	1840	22	1840	37,7
<b>1200</b>	1840	20	1840	41,4
<b>1400</b>	1840	19	1840	42,3
<b>1600</b>	1840	18	1840	43

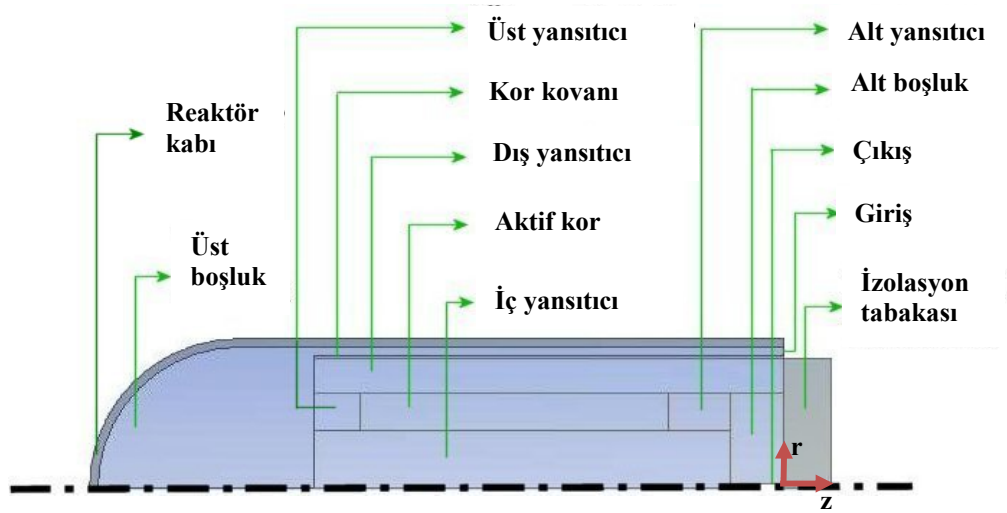
Çizelge 4.2. Helyumun termal özellikleri [65]

Sıcaklık (°K)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül ısı (J/kg.K)	Isı iletim katsayısı (W/m.K)	Vizkozite (kg/m.s)
<b>400</b>	8,2340	5187,2	0,19451	2,4467x10 <sup>-5</sup>
<b>500</b>	6,6212	5187,4	0,22622	2,8504x10 <sup>-5</sup>
<b>600</b>	5,5363	5187,9	0,25616	3,2333x10 <sup>-5</sup>
<b>700</b>	4,7565	5188,4	0,2847	3,5996x10 <sup>-5</sup>
<b>800</b>	4,1691	5188,9	0,31208	3,9520x10 <sup>-5</sup>
<b>900</b>	3,7108	5189,4	0,33847	4,2926x10 <sup>-5</sup>
<b>1000</b>	3,3432	5189,7	0,36402	4,6231x10 <sup>-5</sup>
<b>1100</b>	3,0418	5190,1	0,38883	4,9447x10 <sup>-5</sup>
<b>1200</b>	2,7902	5190,3	0,41298	5,2584x10 <sup>-5</sup>
<b>1300</b>	2,5770	5190,6	0,43655	5,5650x10 <sup>-5</sup>
<b>1400</b>	2,3941	5190,8	0,45959	5,8651x10 <sup>-5</sup>
<b>1500</b>	2,2354	5190,9	0,48215	6,1594x10 <sup>-5</sup>

MHR, birim hücre modeli kullanılarak üç boyutlu olarak ANSYS CFD FLUENT yazılımı ile nümerik olarak analiz edilmiştir. Soğutucu Helyumun yüksek hızı nedeniyle FLUENT çözücüsünde “Enhanced Wall Treatment” duvar tipi ile “Realizable k-e” türbülans modeli kullanılmıştır. “Standart k-e”, “RNG k-e” ve “Realizable k-e” türbülans modelleri ile çözüm yapılmıştır. Çözümler Bölüm 6.1.1’de aralarında karşılaştırılmış ve sonraki tüm çözümler için “Realizable k-e” türbülans modeli kullanılmasına karar verilmiştir. Model üç boyutlu olduğundan ve daha doğru sonuç alabilmek için FLUENT çözücüsünde “3ddp (3 dimension doubled-precision)” seçeneği tercih edilmiştir. Tüm eşitlikler için çözüm metodu olarak “Second Order discretization” seçeneği kullanılmıştır.

## 4.2. Eşdeğer Silindir Modeli

Eşdeğer silindir modelinde korun altıgen yapısının ortalama yarıçap ile dairesel şekle sahip olduğu varsayılmaktadır. Dairesel şekil Şekil 4.5’de görüldüğü gibi 2 boyutlu ve aksi-simetrik olarak modellenmiştir. Model; aktif kor, iç/dış grafit reflektör, üst/alt reflektör, kor kovani, kor üst/alt boşluğu, reaktör kabı ve yalıtım tabakasını içermektedir. Geçiş kanalı, tüm destekler, kor üst sınır yapısı, kontrol çubukları için kılavuz boruları ve üst boşluk örtüsü ihmal edilmiştir. Korun iç ve dış çapı sırasıyla 2,96 m ve 4,84 m’dir. Şekil 4.5’de gösterilen eşdeğer silindir modelinin geometrisi referans [2-11] de bulunan verilere dayanmaktadır.



Şekil 4.5. Analiz için kullanılan eşdeğer silindir modeli, modeldeki bölgelerin adı ve sınır şartları

Eşdeğer silindir modelinde dış yüzeyler, helyumun giriş ve çıkış yüzeyleri, ayrıca soğutucu helyum, grafit blok ve yakıt kompaktı hacimleri fiziki olarak kullanılan yazılımda tanımlanmıştır. Sayısal analizde akışkan olarak kullanılan helyumun girişi Kütle Akış Girişi (Mass Flow Inlet) ve sıcaklık olarak girilmiştir. Çıkıştaki koşul ise normal çıkış (Pressure Outlet) olarak verilmiştir. Modelde girilen sınır şartları Şekil 4.5’de belirtilmiştir.

Helyumun giriş sınır şartı:

$$z = 0, u_r=0, u_\theta=0, u_z \neq 0, T \neq 0 \quad (4.5)$$

Helyumun çıkış sınır şartı:

$$\left. \frac{\partial u_r}{\partial r} \right|_{(0,0,0,1,\theta,z)} = 0, \quad \left. \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right|_{(0,0,0,1,\theta,z)} = 0, \quad \left. \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|_{(0,0,0,1,\theta,z)} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(0,0,0,1,\theta,z)} = 0, \quad P = P_{atm} \quad (4.6)$$

Dış yüzey sınır şartı:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(r=3,8m)} = h(T_w - T_\infty) \quad (4.7)$$

Simetri sınır şartı:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(0,\theta,z)} = 0, \quad (4.8)$$

Hesaplamalarda uygulanan kabuller;

- Sürekli rejim hali,
- Türbülanslı akış şartı,
- Sıkıştırılamaz akışkan ( $\rho$  sabit)

Korda basıncın 7,07 Mpa dan 7,01Mpa'a düştüğü bilindiğinden atalet direnç değerleri; "bilinen basınç kaybını kullanarak gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi" metodu kullanılarak belirlenmiştir.

$$C_2 = \Delta p (1/\gamma)^2 / L \quad (4.9)$$

burada

- $C_2$  = atalet kayıp katsayısı ( $m^{-1}$ )  
 $\Delta p$  = basınç düşüşü (Mpa)  
 $\gamma$  = ortamın gözenekliliği (%)  
 $L$  = gözenekli ortamın uzunluğu

Korun gözenekliliği; soğutma kanallarının korun alanına oranına bölerek % 18,1 olarak hesaplanmıştır. Reflektör bloklarının gözenekliliği; yakıt sütunlarının aralarında ortalama 2mm boşluk olduğu düşünülerek % 1,1 olarak hesaplanmıştır [22]. İç reflektör, dış reflektör, aktif kor, kor alt reflektörü ve kor üst reflektöründen içinden geçen eksenel ve radyal yöndeki akış için viskoz kayıp katsayıları tanımlanmıştır. Kor kanallı bir yapıya sahip olduğundan viskoz kayıp terimi ( $1/m^2$ ) elimine edilmiştir [62, 63].

Aktif korun, üst ve alt reflektörün eksenel yönü için aşağıdaki değerler kullanılarak atalet kayıp katsayısı  $0,024 (m^{-1})$  bulunmuştur.

- $\Delta p$  = 0,06 MPa  
 $\gamma$  = 18,1  
 $L$  = 10,7

Aktif korun, üst, alt, iç ve dış reflektörün radyal yönü için aşağıdaki değerler kullanılarak atalet kayıp katsayısı  $6,55 (m^{-1})$  bulunmuştur.

- $\nabla p$  = 0,06 MPa  
 $\gamma$  = 1,1  
 $L$  = 10,7

Model, 2 boyutlu olduğundan Direction-1 Vector X ve Y değerleri sırasıyla 1 ve 0 olarak girilmiştir. Tüm bölgeler anizotropik olduğundan çözümün daha kararlı olabilmesi için atalet direnci altındaki alternatif formülasyon seçeneği seçilmiştir.

Burada Direction-1 eksenel yön ve Direction-2 radyal yöndür. Ana yön vektörleri için atalet direnç değerleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Bölgeler için atalet direnç değerleri

Gözenekli Ortam Bölgelerinin Adı	Direction-1 (Eksenel yön) Atalet Direnci (1/m)	Direction-2 (radyal yön) Atalet Direnci (1/m)
İç reflektör	6,55	6,55
Dış reflektör	6,55	6,55
Üst reflektör	0,024	6,55
Alt reflektör	0,024	6,55
Aktif kor	0,024	6,55

Reaktör kabı 10Cr9MoVNb’den ve kor kovani 03Cr21Ni32Mo3Nb’den oluşmuştur. Hesaplamalarda grafitin izotropik özelliklere sahip olduğu varsayılmıştır.

Kordaki toplam enerji üretimi 600MW’dır. Bu enerjinin çoğu zorlanmış helyum akışıyla uzaklaştırılmaktadır. Ancak çok küçük bir oranı reaktör kabından çevreye kaybolmaktadır. Reaktör kabından çevreye (reaktör boşluğu ve Reaktör Boşluğu Soğutma Sistemi toplam ısı transferi 3,3 MW’dır [3, 4]. Bu ısının çoğu (% 94) ışınilma, geri kalanı da doğal taşınımla iletilmektedir [22]. Bu çalışmada, reaktör boşluğu modellenmemiştir. Oluşturulan modelde reaktör kabı duvarından ışınilm ve doğal taşınımla ısı transferi olduğu düşünölmüş ve sınır şartları aşağıdaki gibi girilmiştir:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,8 \\ \text{Dış ışınilm sıcaklığı} &= 65 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Serbest akıntı sıcaklığı} &= 65 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Taşınıml katsayısı} &= 6,4 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

ANSYS FLUENT'te sınır şartlarının ve kaynakların çoğu görsel arayüzden girilebilmektedir. Ancak görsel arayüzden girilemeyenler UDF'ler (User-Defined Function) vasıtasıyla girilebilmektedir.

Dairesel korda üretilen gücün radyal yönde tekdüze dağıldığı farz edilmiştir. Eksenel güç profili eşitliği (Eş. 4.10) aktif kor için kaynak olarak aşağıdaki UDF ile girilmiştir. Bu çalışmanın devamında kaza durumu analizlerinin yapılacağı düşünülerek UDF içinde atık ısının zamana göre değişimi eşitliği de vardır. Eksenel güç profili eşitliği [37, 38]:

$$P_x = P_0 1,208 \cos \left[ 1,0267 \left( \frac{2x}{H} - 1 \right) \right] \quad (4.10)$$

burada

- $P_0$  = 6,5 MW.m<sup>-3</sup> (aktif kor içindeki ortalama güç yoğunluğu)  
 $H$  = 7,93 m (aktif korun toplam yüksekliği)  
 $x$  = radyal yönde aktif korun altından yukarıya doğru mesafesi

Eş. 4.10'un UDF kodu [37, 38]:

```
#include "udf.h"
DEFINE_SOURCE(heat_gen_time,c,t,dS,eqn)
{
real x [ND_ND];
real source;
real flow_time;
real power;
flow_time = CURRENT_TIME;
power = 6500000*1.208*cos(1*(1.0267*((2.*(x[0]-1.189)/7.93)-1)));
C_CENTROID(x,c,t);
if (flow_time<1)
{
source = power-0.934*power*flow_time;
```

```

dS[eqn] = -power*0.934;
}
else if (flow_time>=1)
{
source = power*0.125*pow(flow_time,-0.28);
dS[eqn] = (-0.28)*power*0.125*pow(flow_time,-1.28);
}
return source;
}

```

Helyum gazının 7 MPa basınç altındaki özellikleri NIST (National Institute of Standards and Technology) veri tabanına [65] dayanmaktadır. Helyumun yoğunluğunun sıcaklıkla değişim eşitliği:

$$\rho=3073,2T^{-0,987} \quad (4.11)$$

burada

T = sıcaklık (K)  
 $\rho$  = yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)

Eş. 4.11'in UDF kodu:

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(He_7MPa_density,cell,thread)
{
real d;
real t = C_T(cell, thread);
d = 3073.2*pow(t,-.987);
return d;
}

```

Helyumun ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişim eşitliği:

$$k=0,0032T^{-0,6876} \quad (4.12)$$

burada

T = sıcaklık (K)

k = ısı iletim katsayısı (W/mK)

Eş. 4.12'ün UDF kodu:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(He_7MPa_k,cell,thread)
{
real k;
real t = C_T(cell, thread);
k = 0.0032*pow(t,0.6876);
return k;
}
```

Helyumun viskozitesinin sıcaklıkla değişim eşitliği:

$$\mu = 3,6874 \times 10^{-7} T^{-0,69957} \quad (4.13)$$

burada

T = sıcaklık (K)

$\mu$  = ısı iletim katsayısı (kg/ms)

Eş. 4.13'in UDF kodu:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(He_7MPa_viscosity,cell,thread)
{
real m;
real t = C_T(cell, thread);
m = 3.6874e-7*pow(t,0.69957);
return m;
}
```

}

Grafitin yoğunluğu 1740 kg/m<sup>3</sup> ve özgül ısısı 1840 J/kgK'dir. Isı iletim katsayısının sıcaklıkla değişim eşitliği [22, 66]:

$$k = -9 \times 10^{-6} T^2 + 0,0353 T + 7,1238 \quad (4.14)$$

burada

T = sıcaklık (K)

k = ısı iletim katsayısı (W/mK)

Eş. 4.14'nin UDF kodu [22, 66]:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(grafit_k,cell,thread)
{
real gk;
real t = C_T(cell, thread);
gk = -9e-6*pow(t,2)+0.0353*pow(t,1)+7.1238;
return gk;
}
```

Aktif korun yoğunluğu 1740 kg/m<sup>3</sup> ve özgül ısısı 1840 J/kgK'dir. Aktif kor; grafit, soğutma kanalları, içinde yakıt kompaktları bulunan yakıt kanallarından oluştuğu için eşdeğer ısı iletim katsayısı kullanılmıştır. Isı iletim katsayısının sıcaklıkla değişim eşitliği [66]:

$$k = -3,14 \times 10^{-6} T^2 + 0,01503958 T + 6,92364815 \quad (4.15)$$

burada

T = sıcaklık (K)

k = ısı iletim katsayısı (W/mK)

Eş. 4.15'nin UDF kodu [66]:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(eq_core_k_Haque,cell,thread)
{
real fck;
real t = C_T(cell, thread);
fck = -3.14e-6*pow(t,2)+0.01503958*pow(t,1)+6.92364815;
return fck;
}
```

MHR, eşdeğer silindir modeli kullanılarak iki boyutlu ve aksi-simetrik olarak ANSYS CFD FLUENT yazılımı ile nümerik olarak analiz edilmiştir. Soğutucu helyumun yüksek hızı nedeniyle FLUENT çözücüsünde “Standard Wall Treatment” duvar tipi ve “Realizable k-e” türbülans modeli kullanılmıştır. “Standart k-e”, “RNG k-e” ve “Realizable k-e” türbülans modelleri ile çözüm yapılmıştır. Çözümler Bölüm 6.2.1’de aralarında karşılaştırılmış ve sonraki tüm çözümler için “Realizable k-e” türbülans modeli kullanılmasına karar verilmiştir. Model aksi-simetrik olduğu için FLUENT çözücünde “axisymmetric” seçeneği seçilmiştir. Daha doğru sonuç alabilmek için de “doubled-precision” seçeneği tercih edilmiştir. Tüm eşitlikler için (basınç hariç) çözüm metodu olarak “Second Order discretization” seçeneği kullanılmıştır.

## 5. ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE TEMEL DENKLEMLER

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler akışkanlar dinamiği problemlerinin nümerik olarak çözülme yolunun gittikçe fazla tercih edilmese imkân sağlamıştır. Akışkanlar dinamiğinde ısı, kütle transferi gibi birçok problemin analitik çözümleri ya çok zordur ya da imkânsızdır. Bundan dolayı günümüzde ısı ve kütle transferi akışkanlar dinamiği uygulamaları, kimyasal reaksiyonlar ve diğer prosesler, mühendislikte doğal çevrede ve canlı bünyesinde birçok problem Sayısal Akışkanlar Dinamiği kullanılarak çözülmektedir. Bu çalışmamızda problemlerin çözülmesi konusunda ANSYS FLUENT sayısal akışkanlar dinamiği programı kullanılacaktır [56, 57].

### 5.1. Sayısal Akışkanlar Dinamiği (SAD)

SAD akışkan akışlarını içeren problemleri analiz etmek ve çözmek için nümerik metotlar ve algoritmalar kullanan Akışkanlar Mekaniğinin dallarından biridir. Başka bir ifade ile matematiksel eşitliklerin nümerik olarak çözülmesiyle akış akışını, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve ilgili olguların öngörülmesi bilimidir. Burada sözü edilen matematiksel eşitlikler; kütlenin korunumu, momentumun korunumu, enerjinin korunumu, türlerin korunumu ve gövde güçleri eşitlikleridir.

“Akışkanlar Dinamiği”nin anlamı değişik durumlardaki akış davranışı olarak ifade edilebilir. “Sayısal” ın anlamı bir şey için matematiğe başvurmayı tanımlamaktadır. İki ifade birleştirildiği zaman, değişik durumlar altındaki akış davranışlarını matematiksel olarak tanımlamak anlamına gelir.

Bilgisayarlar kısmi diferansiyel denklemleri çözemezler. Sayısal akışkanlar dinamiğinde kısmi diferansiyel denklemler lineer, cebirsel denklemlere dönüştürülür.

SAD’ne olan ilginin son yıllarda artmasının nedenleri [57]:

- Teknolojinin gelişimine paralel olarak bilgisayar hızlarının artması.
- Deneysel yöntemlerin ekonomik olmaması.

- Deneysel yöntemlerin zorlukları ve tehlikeleri.
- SAD ile kısa zamanda geniş çapta veri elde etme olanağı.
- SAD ile birçok parametrenin denenerek elde edilen sonuçların kolaylıkla karşılaştırılması.

SAD ile elde edilen sonuçların doğru olmayabileceği ve sonuçların anlamlı olup olmadığının nasıl belirleneceği hakkındaki önemli noktalar unutulmamalıdır.

## 5.2. Temel Denklemler

Aşağıdaki temel denklemler laminar akış için verilmiştir. Türbülanslı akış için gerekli dönüşümler yapılarak aynı denklemler kullanılır [58, 59].

### 5.2.1. Kütlelerin korunumu (Süreklilik denklemi)

Kütlelerin korunumundan; kontrol hacmine net kütle giriş-çıkışı sıfırdır. Kütlelerin korunumu denklemi yani süreklilik denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (5.1)$$

### 5.2.2. Momentumun korunumu (Navier Stokes denklemi)

Newton'un ikinci hareket yasasından ( $F=ma$ ); kontrol hacmini etkileyen kuvvetlerin toplamı, kontrol hacmi içindeki momentum değişimine (giriş-çıkış) eşit olmalıdır. Momentumun korunumu denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f \quad (5.2)$$

### 5.2.3. Enerjinin korunumu

Termodinamiğin birinci kanunu vasıtasıyla enerjinin korunumu denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

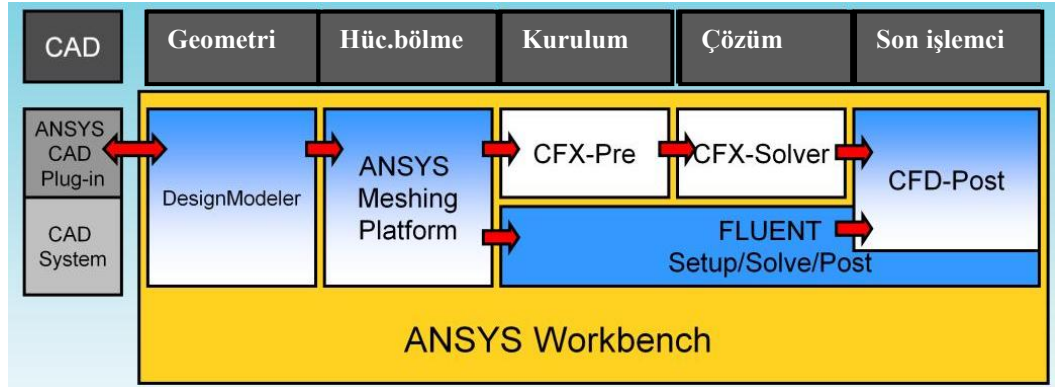
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \dot{Q} \quad (5.3)$$

burada;

- $\rho$  = akışkanın yoğunluğu
- $t$  = zaman
- $u$  = akış hızı
- $p$  = basınç
- $\mu$  = dinamik viskozite
- $f$  = yerçekimi gibi diğer gövde kuvvetleri
- $c_p$  = özgül ısı
- $\nabla$  = del operatörü
- $k$  = ısı iletim katsayısı
- $T$  = sıcaklık
- $\dot{Q}$  = ısı üretimi

### 5.3. ANSYS FLUENT Yazılımı

ANSYS FLUENT akışın modellendiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) yazılımıdır. ANSYS şirketinin FLUENT şirketini 2010 yılında bünyesine katmasıyla FLUENT yazılımı Şekil 5.1’de görüldüğü gibi ANSYS Workbench platformu üzerinde çalıştırılmaya ve ANSYS FLUENT olarak adlandırılmaya başlanmıştır. Bu birleşmeyle parametre yönetimi, proje yönetimi ve sistem çapında güncelleme gibi yeni özellikler geliştirilmiştir.



Şekil 5.1. ANSYS FLUENT CFD çalışma prensibi [60]

ANSYS FLUENT lineer olmayan kısmi diferansiyel denklem setlerinin çözümlerinde iteratif sayısal yaklaşımları kullanmaktadır. Programda kısmi diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürmek için sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır.

Diğer SAD yazılımlarında olduğu gibi 3 temel parçadan oluşur. Bunlar:

1. Ön işlemci
2. Çözücü
3. Son işlemci

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi problem belirlendikten sonra analizin ilk adımı, hazırlanan yada bir CAD yazılımından aktarılan modelin, sonlu hacim esaslarına göre hücrelere bölünmesinden ve gerekli verilerin girilmesinden ibaret olan ön işlem aşamasıdır. Ön işlemcide geometriyi oluşturmak için DesignModeler; ağ oluşturmak ve sınır şartlarını tanımlamak için Ansys Meshing Platform kullanılmaktadır.

Sayısal model bir kere hazırlandıktan sonra ANSYS FLUENT çözücünde gerekli hesaplamaları gerçekleştirir ve istenen sonuçları elde eder. Çözücünde nümerik çözüm teknikleri kullanılarak sonlu hacimler metodu ile temel denklemler çözülür.

Analizin son adımı ise, görüntü ve verilerin yorumlanarak düzenlenmesinden ibaret olan son işlem (postprocessing) aşamasıdır. Bu aşamada Şekil 5.1.’den de

anlaşılacağı üzere ANSYS FLUENT'in son işlemcisi kullanılabildiği gibi CFD-Post da kullanılabilmektedir.



Şekil 5.2. SAD yazılımlarının basamakları [61]

ANSYS FLUENT'te sınır şartlarının ve kaynakların çoğu görsel arayüzden girilebilmektedir. Görsel arayüzden girilemeyenler UDF'ler (User-Defined Function) vasıtasıyla girilebilmektedir. UDF bu çalışmada malzeme özelliklerini ve kaynak terimi (güç dağılımını) tanımlamak için kullanılmıştır.

#### 5.4. Sonlu Hacimler Metodu

Kesin olarak söylemek gerekirse “bilgisayarlar kısmi diferansiyel denklemleri” çözemezler. Sayısal akışkanlar dinamiğinde kısmi diferansiyel denklemler lineer, cebirsel denklemlere dönüştürülür. Bu cebirsel denklemleri oluşturmak için birçok yöntem mevcuttur. Sonlu Hacimler Metodu bunlardan biridir.

Sonlu hacimler yöntemi, üç ana sayısal çözüm tekniğinden (sonlu farklar, sonlu elemanlar, spektral metodlar) sonlu farklar metodunun özel bir şekli olarak geliştirilmiştir. Şu an mevcut sayısal akışkanlar dinamiği kodlarının ANSYS

FLUENT dahil birçoğunda bu yöntem kullanılmaktadır. Sonlu hacimler metodunun sayısal algoritması aşağıdaki üç basamaktan oluşmaktadır.

Birinci basamakta, çözüm alanındaki bütün kontrol hacimlerinde akışı temsil eden korunum denklemlerinin integrasyonu gerçekleştirilir. Daha sonra ikinci basamakta integre edilmiş denklemlerde, taşınım, iletim ve kaynak terimleri gibi akışı temsil eden terimler sonlu farklar gibi yaklaşımlarla yerine konur. Bunun sonucunda integral formundaki denklemler cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülür. Son basamakta cebirsel denklemler iteratif yöntemlerle çözülür [57].

Sonlu elemanlar metodu tabanlı birçok ticari SAD yazılımı piyasada olmasına rağmen, günümüzde PHOENICS, FLUENT, FLOW3D ve STAR-CD gibi yazılımlar sonlu hacimler metodu tabanlı çözüm yapmaktadır. Sonlu hacimler metodu; özellikle akışkanlar mekaniği ve ısı transferi uygulamalarında sayısal bir modelle bilgisayar teknolojilerini kullanarak çözümlene yapan ve sayısal akışkanlar dinamiğinde kullanılan yöntemlerdendir.

### **5.5. Denklemlerin Ayrık Hale Getirilmesi**

Kütle, momentum ve enerji denklemlerini de içeren korunum denklemleri kontrol hacim tekniği kullanılarak cebirsel denklem haline dönüştürüldükten sonra nümerik olarak çözülmektedir. Bölge (domain) Şekil 5.3'de görüldüğü gibi sonlu kontrol hacim kümelerine ayrıştırılır. Kütle, momentum, enerji, türler vd. için genel korunum (transport) denklemleri her bir kontrol hacmi üzerinde çözülmektedir. [56, 57, 61].

Genel korunum (transport) eşitliği genel bir ifade ile aşağıdaki gibi verilebilir:

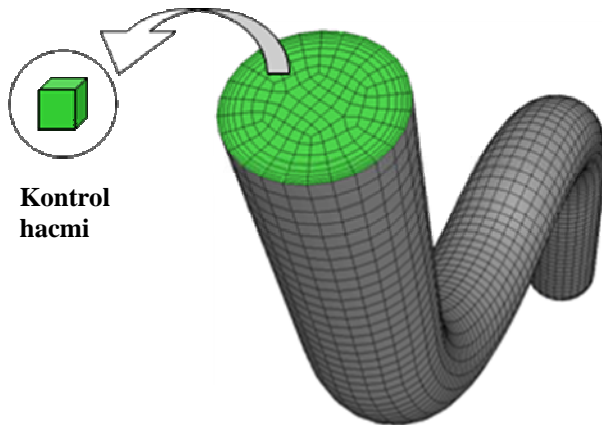
$$\begin{aligned}
& \left[ \begin{array}{l} \text{Kontrol hacmi} \\ \text{içindeki } \varnothing' \text{ nun} \\ \text{zamana bağlı} \\ \text{değişim oranı} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Kontrol hacmi} \\ \text{içindeki } \varnothing' \text{ nun} \\ \text{konveksiyon} \\ \text{nedeniyle} \\ \text{net akısı} \end{array} \right] \\
& = \left[ \begin{array}{l} \text{Kontrol hacmi} \\ \text{içindeki } \varnothing' \text{ nun} \\ \text{difüzyon} \\ \text{nedeniyle} \\ \text{net akısı} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Kontrol hacmi} \\ \text{içinde } \varnothing' \text{ nun} \\ \text{net meydana} \\ \text{gelme oranı} \end{array} \right] \quad (5.4)
\end{aligned}$$

Genel korunum (transport) denklemi:

$$\frac{\partial(\rho\varnothing)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varnothing u) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \varnothing) + \mathcal{S}_\varnothing \quad (5.5)$$

zamana bağlı değişim
konveksiyon
difüzyon
kaynak

Burada  $\varnothing$  genel akış değişkeni (örnek: entalpi),  $u$  hız,  $\rho$  yoğunluk,  $\Gamma$  difüzyon katsayısı,  $t$  zaman ve  $\mathcal{S}_\varnothing$  kaynak terimidir.



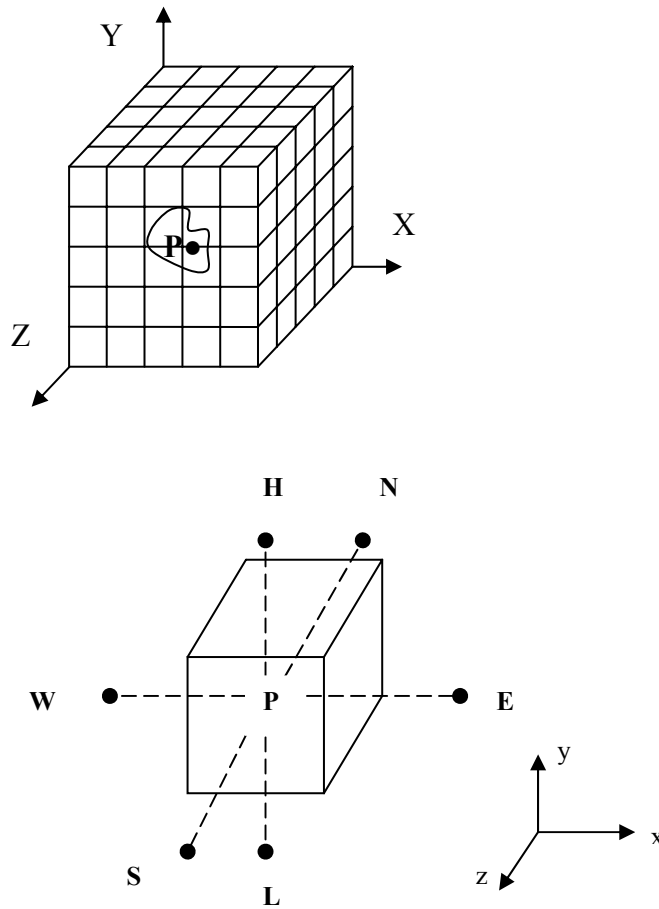
Şekil 5.3. Boru akışının sıvı bölgesi sonlu kontrol hacim kümelerine ayrıştırılması [61]

Çözülmesi istenen denklem setleri ANSYS FLUENT'te bu şekilde tanımlanmaktadır. Ana korunum denklemlerine ilave olarak başka denklemlerde

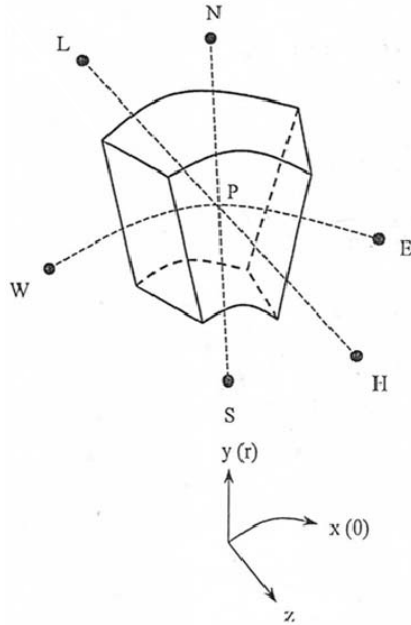
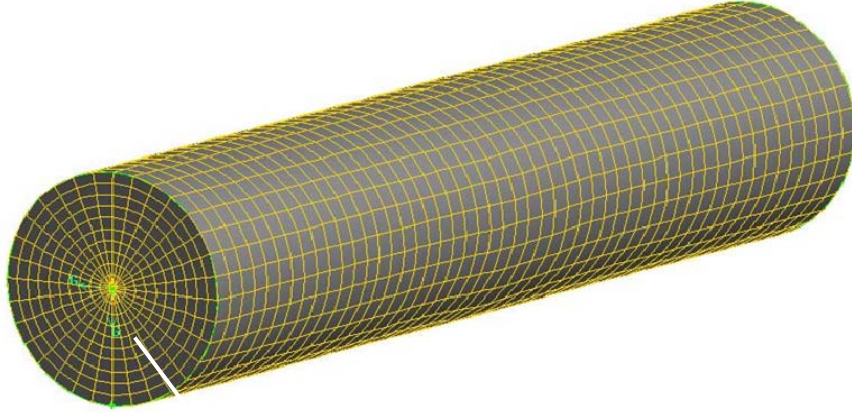
kullanmak gerekebilir. Bunlar termodinamik özellikler, taşınım özellikleri, sınır şartları v.s. olabilir.

Yukarıdaki eşitliğin sonlu sayıda kontrol hacmi üzerine integre edilmesi ile cebirsel denklem takımları oluşmaktadır.

Şekilde 5.4 ve 5.5’de ağ düzeni kullanılarak ayırık kontrol hacimlerinin tanımlaması ve bir P düğümü etrafında kullanılan hesaplama hücreleri gösterilmiştir. Burada, aynı kontrol hacmi tüm korunum denklemlerinin bütünleştirilmesi için kullanılmaktadır. Tüm değişkenler (hız bileşenleri, basınç vb.) ve bütün skaler değerler kontrol hacmin hücre merkezinde depolanmaktadır.



Şekil 5.4. Kartezyen koordinatlarda hücre yapısı [56]



Şekil 5.5. Silindirik koordinatlarda hücre yapısı [56]

Tipik üç boyutlu olarak verilen Şekil 5.4 ve 5.5.'deki düğüm noktası etrafında hesaplama hücrelerinin gösteriminde P düğüm noktası ile komşuluk halinde olan diğer düğüm noktaları, H (yüksek), L (düşük), E (doğu), W (batı), N (kuzey), S(güney)'i ifade etmektedir. Korunum denklemleri hesaplama hücreleri üzerinde entegre edilerek sonlu farklar yaklaşımlarına indirgenir [56].

P noktasındaki  $\phi_p$  değeri komşu  $\phi$  değerleriyle ilişkilidir. Ayrıca eğer problem zamana bağımlı ise bir önceki zaman dilimindeki  $\phi_p$  ile de ilişkilidir. Bununun sonucunda aşağıdaki lineer cebirsel denklemi yazmak mümkündür [56]:

$$a_p \phi_p = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_H \phi_H + a_L \phi_L + a_T \phi_T + b \quad (5.6)$$

Bu denklemde a'lar katsayıları, b ise kaynakları gösterir. Dikkat edilirse her komşu hücrenin ayrı bir katsayısı mevcuttur. Bu katsayının nümerik değeri birçok faktöre bağlıdır [56].

Her bir hücre, değişken, zaman dilimi için cebirsel bir denklem yazmak mümkündür. Bunun neticesinde, toplam denklem sayısı =  $N_X \times N_Y \times N_Z \times N_\Theta \times N_T$  [56].

### 5.6. Türbülanslı Akış, Türbülans Modeli Seçimi, Türbülans Modelleri

Mühendislik önemi olan çoğu akış türbülanslıdır. Türbülanslı akış çalkantıların hakim olduğu karmaşık bir mekanizmadır ve bu alanda araştırmacıların yaptığı çok fazla sayıda çalışmaya rağmen türbülanslı akışın teorisi halen büyük ölçüde çözülememiştir. Bu nedenle deneylere ve çeşitli durumlar için geliştirilmiş ampirik (deneye dayalı) veya yarı ampirik bağıntılara güvenilmektedir. Türbülansın özgün bir tanımı ve değeri yoktur, fakat türbülanslı akış bir girdap hareketi olarak görülebilir [58].

Türbülanslı akış, laminar akıştan şu şekilde farklılık gösterir. Türbülanslı akış, girdap adı verilen dönen akışkan bölgelerinin akış boyunca rastgele ve hızlı çalkantıları ile karakterize edilir. Bu değişimler momentum ve enerji geçişi için ilave mekanizma olarak iş görür. Laminar akışta akışkan parçacıkları, yörünge çizgileri boyunca düzgünce akar ve momentum ve enerji, akım çizgileri arasında moleküler difüzyon ile iletilir. Türbülanslı akışta dönen girdaplar; kütle, momentum ve enerjiyi akışın diğer bölgelerine moleküler difüzyondan daha hızlı bir biçimde taşır. Çünkü türbülanslı akışta kütle, momentum ve ısının transferi büyük ölçüde artar. Sonuç olarak türbülanslı akış çok daha yüksek sürtünme, ısı ve kütle geçişi katsayıları anlamına gelir. Yani türbülanslı akışta laminar akışa oranla daha çok sürtünme, ısı ve kütle geçişi oluşmaktadır [58].

Türbülans modelinin seçimi sırasında tüm problem sınıfları için genel olarak kabul edilen tek bir turbülans modeli yoktur. Türbülans modelinin seçimi; problemin sınıfına, doğruluk gereksiniminin seviyesine, mevcut hesaplama kaynaklarına, simülasyon için mevcut zaman miktarına bağlıdır [62, 63].

Hareket denklemlerinin matematiksel olarak son haline gelmesi için, ortalama hız gradyeni cinsinden türbülans gerilmesini (reynolds gerilmesi) modellemek amacıyla yarı ampirik birçok formülasyon geliştirilmiştir. Bu modeller türbülans modelleri denir. ANSYS FLUENT'in sağladığı türbülans modelleri: Spalart-Allmaras Modeli, k- $\epsilon$  Modeli, k-w Modeli, Transition k-kl-w modeli, Transition SST modeli,  $v^2$ -f Modeli, Reynolds Stress Modeli (RSM), Detached Eddy Simulation (DES) Modeli, Large Eddy Simulation (LES) Modeli. [58, 62, 63].

Aşağıdaki kısımda nükleer reaktörlerin simülasyonlarında en çok kullanılan türbülans modeli olan k- $\epsilon$  Modelinin çeşitleri (Standart k- $\epsilon$  Modeli, Gerçekleştirilebilir (Realizable) k- $\epsilon$  Modeli ve RNG k- $\epsilon$  Modeli) hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Her üç model k ve  $\epsilon$  için transport eşitlikleri ile beraber aynı formdadır. Modeller arasındaki en büyük farklılıklar [62, 63, 64]:

- Türbülans viskozitesinin hesabındaki metot
- Türbülans Prandtl sayıları
- $\epsilon$  eşitliğindeki meydana getirme ve yok etme terimleri

### 5.6.1. Standart k- $\epsilon$ modeli

Türbülans modeller arasında bilinen en yaygın model Standart k- $\epsilon$  modelidir. Isı transferi simülasyonlarında ve endüstriyel akış problemlerinde doğru sonuçlar vermesi, güvenilirlik ve ekonomiklik bakımından geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu modelin zayıf kalan kısımları, geliştirilerek performansı arttırılmıştır. Bu geliştirilen modeller, RNG k- $\epsilon$  modeli ve Realizable k- $\epsilon$  modelidir. k- $\epsilon$  modelinin yapısında akış tam gelişmiş türbülanslı şartlarda farz edilerek,

moleküler viskozitenin etkileri ihmal edilmiştir. Bu nedenle k-ε modeli sadece tam gelişmiş akışların çözümüne uygun bir modeldir.

Standart k-ε modeli, transport denklemlerine dayanan yarı ampirik bir modeldir. Bu modelde kullanılan k türbülans kinetik enerji, ε türbülans yayılım oranıdır. Aşağıda k ve ε değerlerinin elde edildiği transport denklemleri verilmiştir [62].

k için modellenmiş transport denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5.7)$$

ε için modellenmiş transport denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5.8)$$

Türbülans eddy viskozitesi  $\mu_t$  aşağıdaki formülle bulunur.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.9)$$

$G_k$  ve  $G_b$  ortalama hız eğimlerinden (mean velocity gradients) ve yüzmeden (buoyancy) dolayı türbülanslı kinetik enerji üretim oranıdır.  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülanslarda tüm yayılım oranına (dissipation rate) dalgalanan genişlemenin (fluctuating dilatation) katkısını temsil etmektedir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\epsilon$  türbülans Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\epsilon$  kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ ,  $C_\mu$  ampirik sabit değerlerdir. Bu sabitlerin varsayılan değerleri:

$$C_{1\epsilon} = 1,44, C_{2\epsilon} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\epsilon = 1,3$$

Varsayılan değerler deneysel olarak hava ve su akışkanı için deneyler sonucu bulunmuş sabit değerlerdir. Bu sabitlerin geniş bir kullanım aralığı vardır.

### 5.6.2. RNG k-ε modeli

RNG k-ε modeli statiksel teknik (renormalization group theory olarak adlandırılan) kullanılarak elde edilmiştir. Bu modelinin yapısı, standart k-ε modeline benzerdir. Fakat aşağıdaki iyileştirmeleri içermektedir [62].

RNG k-ε modeli, ( $\varepsilon$ ) denkleminde bir terim eklenmesiyle ile gerilmiş akışların doğruluk oranını önemli derecede geliştirmiştir.

RNG k-ε modelinde türbülanstaki girdap etkisi dahil edilerek dönüşlü akışların doğruluk oranı arttırılmaya çalışılmıştır.

Standart k-ε modeli kullanıcı tarafından belirlenmiş sabit değerler kullanır, RNG teorisi türbülans Prandtl sayıları için bir analitik formül sağlar.

Standart k-ε modeli yüksek Reynold sayılı modelken, RNG teorisi düşük Reynold sayısının etkilerini hesaplayan efektif viskozite için analitik olarak türetilmiş diferansiyel formüller sağlar.

### 5.6.3. Gerçekleştirilebilir (Realizable) k-ε modeli

Gerçekleştirilebilir k-ε modeli son zamanlarda geliştirilmiş ve aşağıda verilen iki önemli yol bakımından standart k-ε modelinden farklılık gösterir.

- Gerçekleştirilebilir k-ε modeli türbülans viskozitesi için yeni bir formülasyon içerir.
- Türbülans yayılım oranı için yeni bir transport denklemi,  $\varepsilon$  türetilmiştir.

RNG k-ε ve gerçekleştirilebilir k-ε her ikisi de girdaplı, dönüşlü ve düzgün olmayan sert akış çizgilerinde standart k-ε modeline göre daha iyi sonuçlar vermektedir [62].

Gerçekleştirilebilir k-ε modelinde modellenmiş transport denklemleri;

k için modellenmiş transport denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.10)$$

ε için modellenmiş transport denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (5.11)$$

$$C_1 = \max \left[ 0, 43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (5.12)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (5.13)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5.14)$$

Türbülans eddy viskozitesi ( $\mu_t$ ) Standart k-ε modelinde olduğu gibi;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.15)$$

hesaplanır.

$G_k$  ve  $G_b$  ortalama hız eğimlerinden (mean velocity gradients) ve yüzmeden (buoyancy) dolayı türbülanslı kinetik enerji üretim oranıdır.  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülanslarda tüm yayılım oranına (dissipation rate) dalgalanan genişlemenin (fluctuating dilatation) katkısını temsil etmektedir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  türbülans Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.  $C_2$ ,  $C_{1\varepsilon}$  ampirik sabit değerlerdir. Bu sabitlerin varsayılan değerleri:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_2 = 1,9, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,2$$

$C_\mu$ , Standart k- $\varepsilon$  modelinden ve RNG k- $\varepsilon$  modelinden farklı olarak sabit kabul edilmez ve aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (5.16)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (5.17)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (5.18)$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (5.19)$$

$$A_0 = 4,04,$$

$$A_s = \sqrt{6}\cos\phi \quad (5.20)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (5.21)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\xi^3} \quad (5.22)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (5.23)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5.24)$$

$C_\mu$ ; ortalama gerilme ve rotasyon oranlarının, sistem rotasyonun açısal hızı ve türbülans ürünlerinin ( $k$  ve  $\varepsilon$ ) fonksiyonu olduğu yukarıda görülmektedir.

### 5.7. Gözenekli Ortam Yaklaşımı

MHR'yi analiz etmek için birçok hücreye ihtiyaç vardır. Tüm yapıyı ayrıntılı olarak temsil edecek model ile çözüm yapmak çok zaman alıcı ve son derece pahalıdır. Bu nedenle Bölüm 4.2'de MHR'nin kompleks yapısı gözenekli ortam modeli ile basitleştirilmiştir. Bu metot kor içindeki yapının oldukça kaba hücrelerle yani daha az sayıda hücreyle modellenmesine izin vermektedir.

Bu metotta bir hücre hem katıyı hem de akışkanı temsil etmektedir. Söz konusu hücrenin akış direncini ve ısı transfer karakteristiklerini akışkan ve yakıt kompaktını temsil eden dağıtılmış direnç ve ısı kaynağı ile simule edilmektedir. Dağıtılmış direnç ve ısı kaynakları korunum eşitliklerinde kaynak terimleri olarak bulunmaktadır. Bu sayede kaba hücrelerle yani daha az sayıda hücreyle modelleme yapılabilmektedir.

Gözenekli ortam modeli; çakıl taşlı yatakların (packed beds), süzgeç kâğıtlarının (filtler papers), delikli tabakaların (perforated plates), akış dağıtıcılarının (flow distributors) ve boru kümelerinin (tube banks) içinden geçen akışları içeren çok çeşitli problemler için kullanılmaktadır. ANSYS FLUENT'de bu model kullanıldığı zaman, gözenekli ortam modelinin uygulandığı bir birim hücre ve akıştaki basınç

kayıbı tanımlanmaktadır. Akıştaki basınç kaybı girilen veriler vasıtasıyla Bölüm 5.7.1.'de tanımlandığı gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca ortam içindeki ısı transferi, ortam ve akışkan akışı arasındaki ısı denge ilkesiyle Bölüm 5.7.2.'de tanımlandığı gibi hesaplanmaktadır [62, 63].

### 5.7.1. Gözenekli ortam için momentum eşitliği

Gözenekli ortam, standart Momentumun Korunumu (Navier Stokes) eşitliğine momentum kaynağı teriminin eklenmesiyle modellenir. Kaynak terimi iki parçadan oluşur. Bunlar viskoz kayıp terimi (viscous loss term (Darcy)) ve atalet kayıp terimidir (inertial loss term).

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (5.25)$$

$S_i$  kaynak terimidir. Bu terim gözenekli hücre içersinde akışkan hızına orantılı bir basınç düşüşü yaratmaya katkıda bulunur. Burada  $\alpha$  geçirgenlik ve  $C_2$  atalet direnç faktörüdür.

### 5.7.2. Gözenekli ortamdaki enerji eşitliğinin iyileştirmesi

ANSYS FLUENT sadece standart enerji eşitliğindeki iletim akısı (conduction flux) ve süreksizlik (transient) terimlerine yapılan değişiklikler ile çözüm yapmaktadır. İletim akısı efektif iletkenliği (effective conductivity) kullanır ve süreksizlik terimi katı bölgenin ısı ataletini (thermal inertia) içerir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot \left[ k_{\text{eff}} \nabla T - \left( \sum_i h_i J_i \right) + (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + S_f^h \quad (5.26)$$

$$k_{\text{eff}} = \gamma k_f + (1-\gamma) k_s \quad (5.27)$$

$E_f$  = akışkan entalpisi ( $\int c_{p,f} dT$ )

- $E_s$  = katı ortam entalpisi ( $\int c_{p,s}dT$ )  
 $\gamma$  = ortamın gözenekliliği  
 $k_{eff}$  = ortamın efektif ısı iletkenliği  
 $S_f^h$  = akışkan entalpi kaynak terimi  
 $S_s^h$  = katı entalpi kaynak terimi  
 $k_f$  = akışkan fazın ısı iletkenliği (türbülansın katkısını içerir,  $k_t$ )  
 $k_s$  = katı ortam ısı iletkenliği

Gözenekli ortam girdilerini (viskoz kayıp ve atalet kayıp katsayıları) türetmek için aşağıdaki metotlar kullanılmaktadır [62, 63]. Bunlar:

- Bilinen basınç kaybını kullanarak gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi
- Çakıl taşlı yataklar (packed beds) için Ergun Eşitliğini kullanarak türetilmesi
- Delikli tabakalar (perforated plates) içinden türbülanslı akış için ampirik eşitlik kullanarak gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi
- Lifli paspaslar (Fibrous Mat) içinden laminar akış için tablolştırılmış verileri kullanarak gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi
- Deneysel basınç ve hız verisini kullanarak gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi
- Power-Law modelini gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi

Bu çalışmada kordaki basınç düşüşü değerleri bilindiğinden atalet direnç değerleri; “bilinen basınç kaybını kullanarak gözenekli ortam girdilerinin türetilmesi” metodu kullanılarak belirlenmiştir. Eş. 4.9 kullanılarak atalet direnç değeri bulunabilmektedir.

## 6. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde MHR'nin birim hücre modeli ve eşdeğer silindir modeli ile önceki bölümlerde belirtilen sınır şartları ve çözüm yöntemleri aracılığıyla ısı akış analizi yapılmıştır. Çözümün doğruluğu ve geçerliliği kontrol edildikten sonra farklı çalışma şartları için ısı akış analiz yapılmıştır.

### 6.1. Birim Hücre Modeli

Bu kısımda soğutucu giriş sıcaklığı, akış oranı, bypass akış oranı değişiminin etkilerinin nümerik değerlendirmesi yapılmıştır. Üç boyutlu CFD analizleri bu etkileri incelemek için yakıt sütununa birim hücre model elmanı ile uygulamıştır. İlk olarak bu hesaplar farklı bypass akış yüzdeleri ile orijinal MHR çalışma durumu için uygulanmış, daha sonra bu hesaplar; maksimum yakıt sıcaklığı, maksimum çıkış sıcaklığı, maksimum grafit sıcaklığı, basınç düşümü ve maksimum soğutucu hızı üzerine bu değişikliklerin etkilerini belirlemek için çok yüksek sıcaklık reaktörü (VHTR) çalışma şartları için tekrarlanmıştır.

#### 6.1.1. Çözümün doğruluğunun ve geçerliliğinin kontrolü

SAD metotları kullanılarak birçok nümerik çözüm elde etmek mümkündür. Bazen çok kısa sürelerde belirli problemlerin çözümlerine ulaşılır. Fakat çözümlerin ve sonuçların gerçek fiziksel olay ve fizik kanunlarına uygun olması gerekmektedir. Birçok çözüm bundan dolayı hiçbir işe yaramaz ve problem defalarca yeniden programa tanıtılarak, tanımlamalar değiştirilerek ve kullanılan SAD kodunun içerdiği çözüm teknikleri ve değişkenleri tekrar tekrar ince ayardan geçirilerek, problemin daha gerçekçi çözümleri elde edilmeye çalışılır. Elde edilen sonuçların geçerliliğinin kontrolü için 5 ana sorunun cevaplanması gerekmektedir [56].

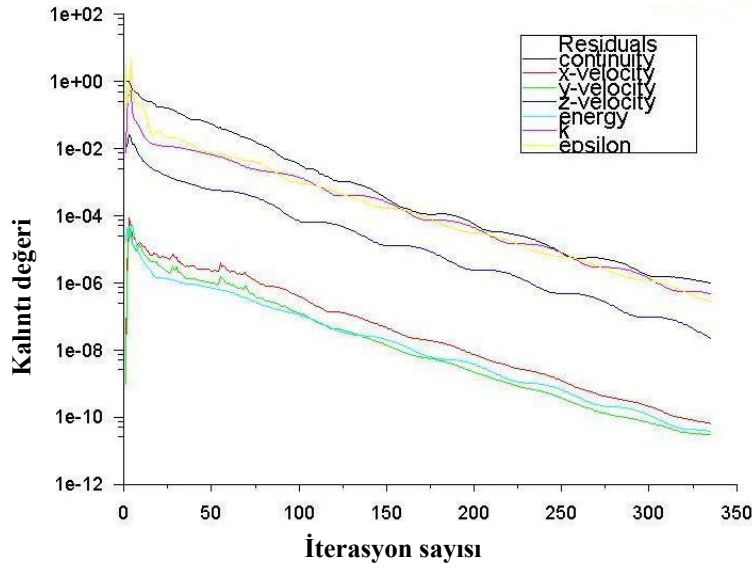
- Çözüm yakınsadı mı?
- Çözüm iterasyon sayısından bağımsız mı?
- Korunum denklemleri sağlandı mı?

- Çözüm hücre yapısından bağımsız mı?
- Sonuçlar deneysel değerlerle uyum içinde mi

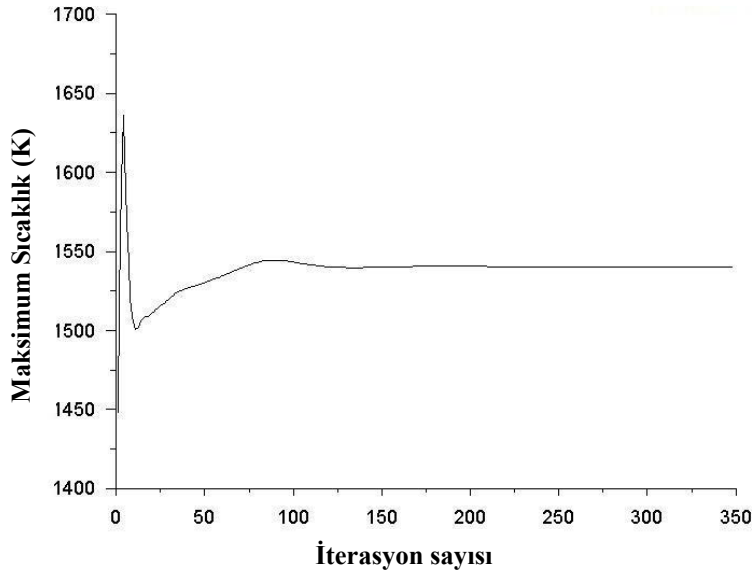
#### Çözümün yakınsaması

Şekil 6.1 iterasyon sayısına bağlı olarak kalıntı değerlerini grafik halinde vermektedir. Şekil 6.2 ise iterasyon sayısına bağlı olarak modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklık değerini anlık olarak grafik halinde vermektedir. Bu grafikler üzerinde çözümü gerçekleştirilen kalıntı değerleri ve meydana gelen maksimum sıcaklık değerini anlık olarak iterasyon sayısı ile birlikte değişimleri gösterilmektedir. Bütün değişkenlerin kalıntı değerleri monoton ve değişken bir azalma gösterdiği için çözümün yakınsadığı anlaşılmaktadır. Buna ilave olarak Şekil 6.2’de görüldüğü gibi maksimum sıcaklık değeri belirli bir dalgalanmadan sonra sabit bir değere ulaşmıştır.

Grafiksel olarak yakınsamanın kontrolü yapıldıktan sonra bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerlerine bakılmalıdır. Bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-6}$  den az olana kadar iterasyon gerçekleşmiştir. Şekil 6.1’de görüldüğü gibi 348 iterasyonda bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-6}$  den az olmuştur. Modeli herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklık değeri yaklaşık 100 iterasyondan sonra 1549 K (1276 °C) geldikten sonra bu değerde kalmış ve sapma göstermemiştir.

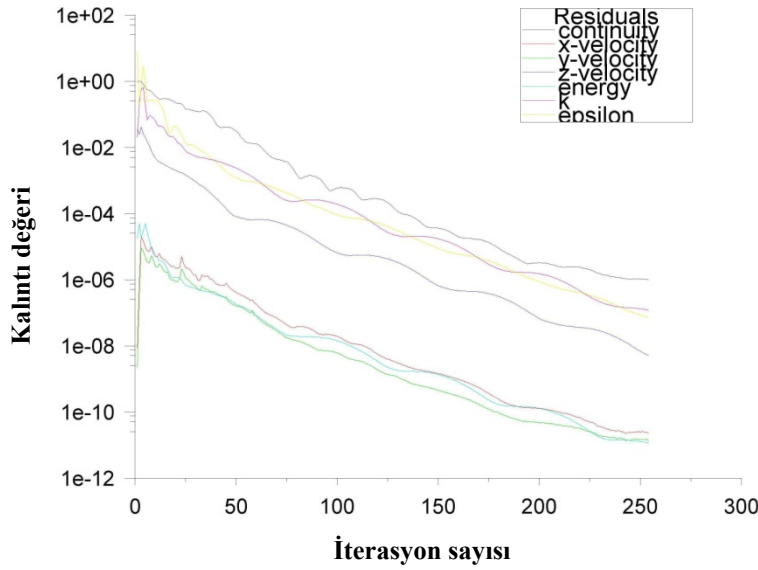


Şekil 6.1. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde “Realizable k-e” türbülans modeli seçilmiştir)

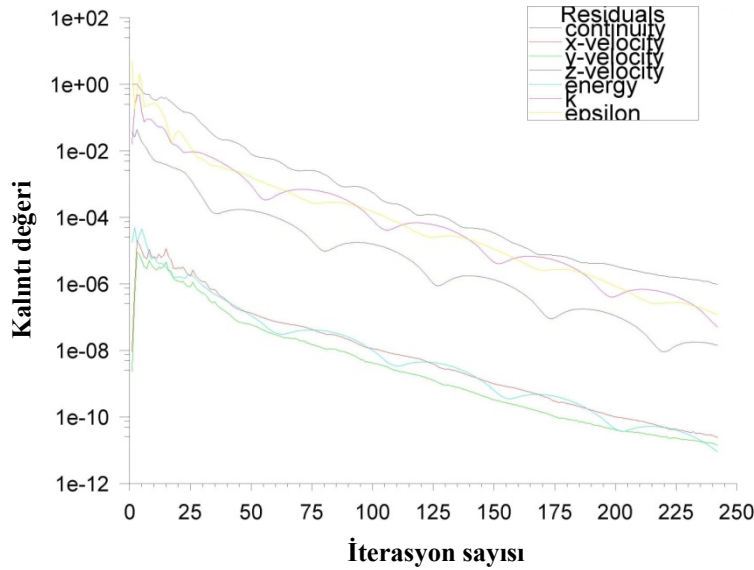


Şekil 6.2. İterasyon sayısına bağlı olarak modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri

Şekil 6.1’de FLUENT çözücünde “Realizable k-e” modeli kullanılması durumunda iterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri görülmektedir. FLUENT çözücünde “Standart k-e” ve “RNG k-e” türbülans modelleri kullanılması durumunda yakınsama Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de görüldüğü gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 6.3. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde “Standart k-e” türbülans modeli seçilmiştir)



Şekil 6.4. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde “RNG k-e” türbülans modeli seçilmiştir)

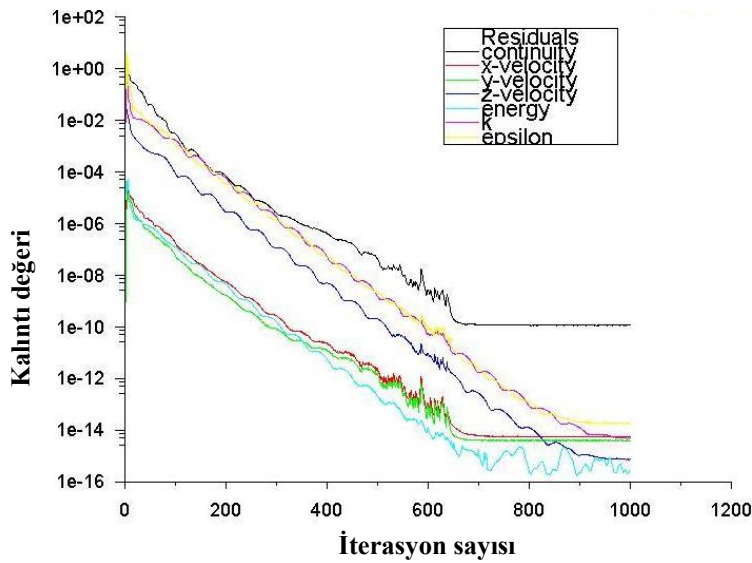
“Standart k-e”, “Realizable k-e” ve “RNG k-e” türbülans modelleri kullanılması durumunda meydana gelen maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 1265 °C, 1267 °C ve 1259 °C hesaplanmıştır. “Realizable k-e” türbülans modeli ile yapılan çözümde meydana gelen maksimum sıcaklık, literatürde bulunan değere daha yakındır [17]. Ayrıca bütün değişkenlerin kalıntı değerleri “Standart k-e” ve “RNG k-e” türbülans

modellerine göre daha monoton ve değişken bir azalma göstermiştir. Bu nedenlerden dolayı birim hücre modeli ile yapılan tüm parametrik çözümlerinde “Realizable k-e” türbülans modeli kullanılmıştır.

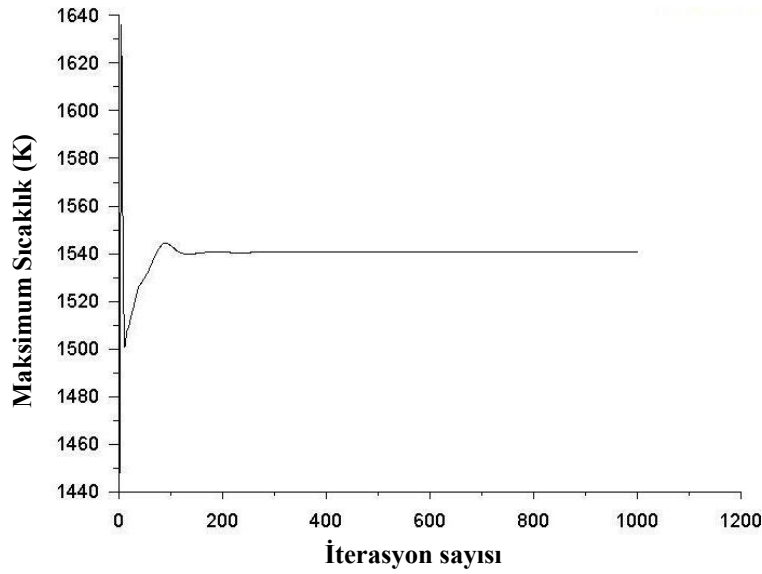
### Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı

Çözüm iterasyon sayısı ile yakından ilişkilidir. Bazı problemlerin çözümü 100 iterasyon ile geçerli bir duruma gelebilir. Oysa daha karmaşık problemlerin çözümü için 1000 iterasyon bile yetersiz gelebilir. Bundan dolayı iterasyon sayısı değiştirilerek birinci sorunun cevabı aranır. Yani, iterasyon sayısının artmasıyla yakınsamanın nasıl değiştii sürekli olarak gözlemlenir. Burada amaç, iterasyon sayısının artmasıyla yakınsamış problemin yakınsamasının devam ettiğini gözlemektir.

Şekil 6.5 ve 6.6’da görüldüğü gibi problem 348 iterasyonda yakınsamasına rağmen bütün değişkenler için istenen maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-20}$  olarak değiştirilerek 1000 iterasyona kadar çözüm yapılmıştır. Bütün değişkenler için kalıntı değerleri sürekli olarak küçüldüğünden ve maksimum sıcaklık değeri belirli bir aşamadan sonra sürekli sabit kaldığından çözüm iterasyon sayısından bağımsızdır.



Şekil 6.5. 1000 iterasyona kadar bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri



Şekil 6.6. 1000 iterasyona kadar modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri

#### Çözümün korunum denklemlerini sağlanması

İlk iki sorunun olumlu olarak cevaplandırılmasından sonra çözümü elde edilmeye çalışılan fiziksel problemi tanımlayan kütlelerin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemlerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir.

Süreklilik denklemi için soğutucu Helyumun girişteki kütleli debisinin çıkıştaki kütleli debisi ile yaklaşık aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca enerji denklemi için oluşturulan modelde sisteme giren enerjinin sistemden çıkan enerjiye yaklaşık eşit olduğu görülmüştür. Aşağıda yazılımdan alınan değerler görülmektedir.

*Süreklilik denklemi için:*

Soğutucu Helyumun girişteki kütleli debisi : 0,00205333 kg/s

Soğutucu Helyumun çıkıştaki kütleli debisi : 0,00205333 kg/s

Fark :  $-7,626582 \times 10^{-13}$  kg/s

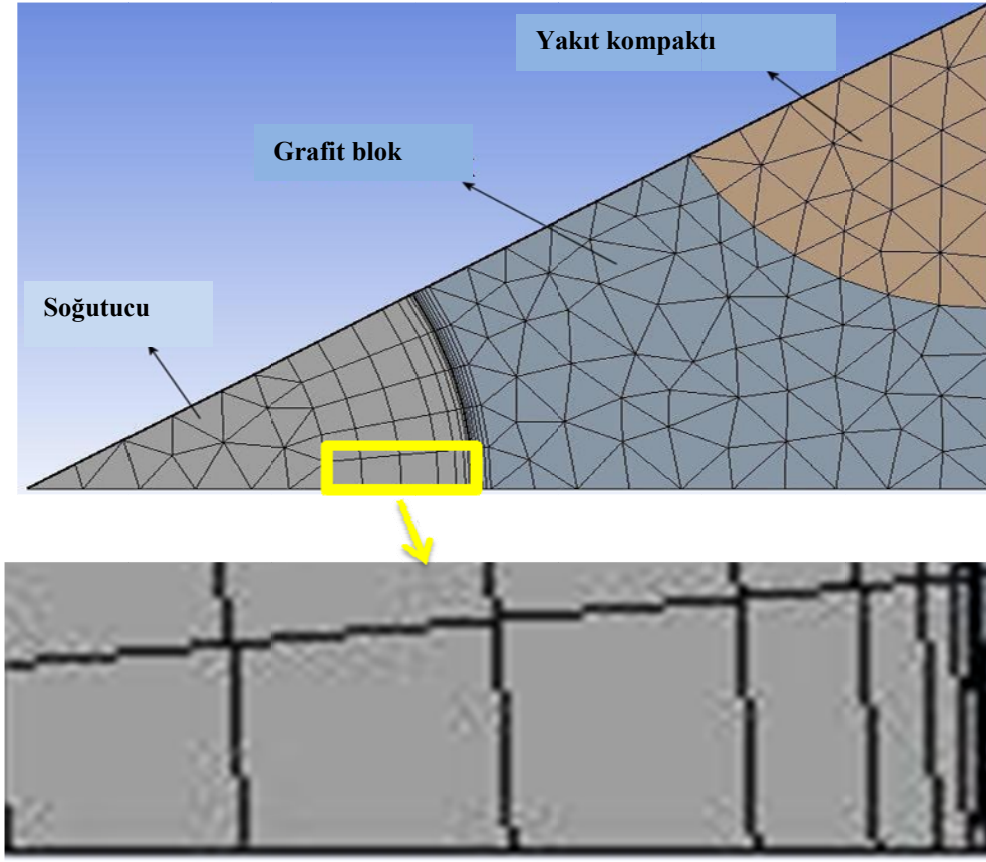
*Enerji denklemi için:*

Soğutucu Helyumun giriş çıkışı arasındaki ısı miktarı farkı :	6820,496 watt
Grafit bloktan soğutucu Helyuma geçen ısı miktarı	: 6820,496 watt
Fark	: 0,0001383164 watt

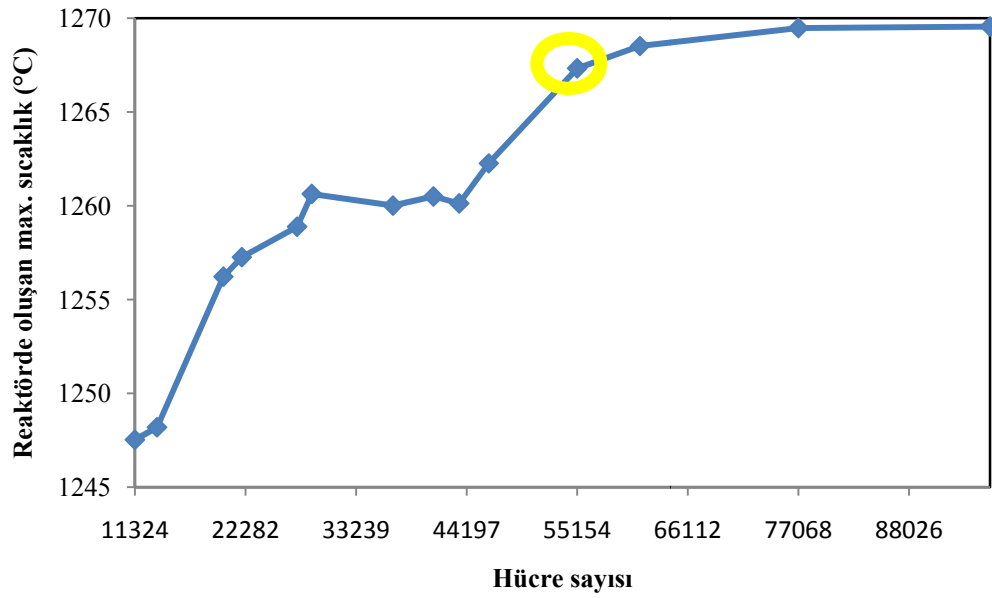
Çözümün hücre yapısından bağımsızlığı

İlk üç sorunun olumlu olarak cevaplanmasına rağmen, elde elen sonuçlar gerçek değerlerden uzak olabilir. Buna sebep olabilecek kaynaklardan biriside çözüm alanı içindeki hücrelerin sayısı ve yapısıdır.

Şekil 6.8’da görüldüğü gibi 11610 hücre sayısı ile çözüme başlanmış ve modelin hücre ölçüsü değeri artırılarak 96105 hücre sayısına kadar çözüm yapılmıştır. 55470 hücre sayısından itibaren maksimum sıcaklık değerinin çok fazla değişmediği görüldüğünden bu hücre yapısı sonraki çözümler için kullanılmıştır. 55470 hücre sayısından sonraki çözümler için bütün değişkenlerin kalıntı değerleri monoton bir azalma göstermemiştir. Şekil 6.7’de modelde oluşturulan hücre yapısı görülmektedir. 55470 hücre sayısının 14620 adeti helyum soğutucu içermektedir.

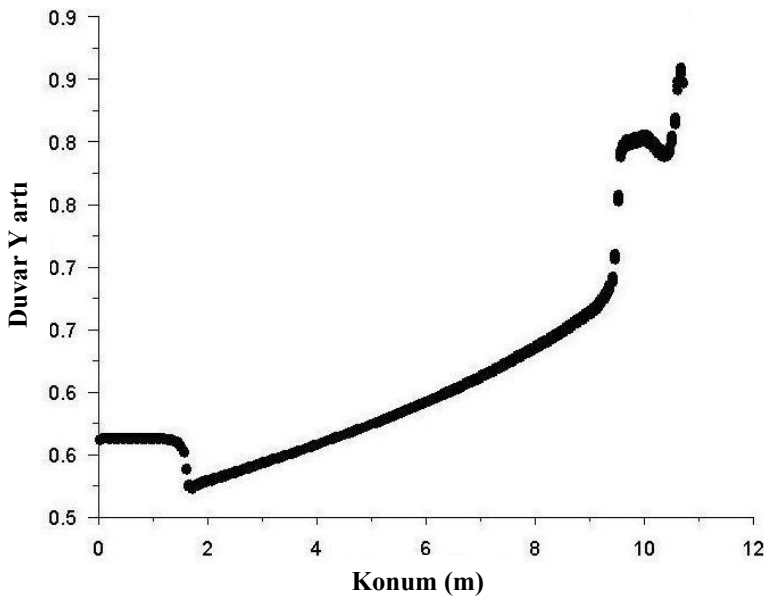


Şekil 6.7. Birim hücre modeli için hücre yapısı



Şekil 6.8. Hücre sayısına göre elde edilen maksimum yakıt sıcaklığının değişimi

Ayrıca, soğutucu kanalın sınır tabakasına ince hücre yapısı uygulanmıştır. FLUENT çözücünde “Realizable k-e” türbülans modeli ile “Enhanced Wall Treatment” duvar tipi kullanıldığından kanal duvarının yakınındaki hücre boyutu tipik  $y^+$  değerinin 1 olmasını sağlamak için dikkatlice oluşturulmuştur. Şekil 6.9’de görüldüğü gibi duvar  $y^+$  değeri 0,5 ile 0,9 arasındadır. Model boyunca elde edilen  $y^+$  değeri 1 den küçük olduğundan yakın-duvar hücre çözünürlüğü (near-wall grid resolution) kabul edilebilir seviyededir [62, 63].



Şekil 6.9. Model uzunluğu boyunca elde edilen Y artı değeri

#### Sonucun deneysel değerlerle uyumluluğu

SAD çözümlerde elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından gereklidir. Eğer hiçbir şekilde deneysel veri mevcut değilse, bu kesin karşılaştırma literatürde kabul görmüş teorik, analitik veya diğer nümerik çözümlerle yapılabilir.

Literatürde MHR'nin birim hücre modeli ile deneysel olarak incelendiği çalışma yoktur. MHR'nin ısı-akış tasarım çalışması ilk olarak birim hücre modelini kullanan POKE bilgisayar kodu kullanılarak yapılmıştır. Orijinal MHR tasarımı için POKE bilgisayar kodu ile reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı 1267°C

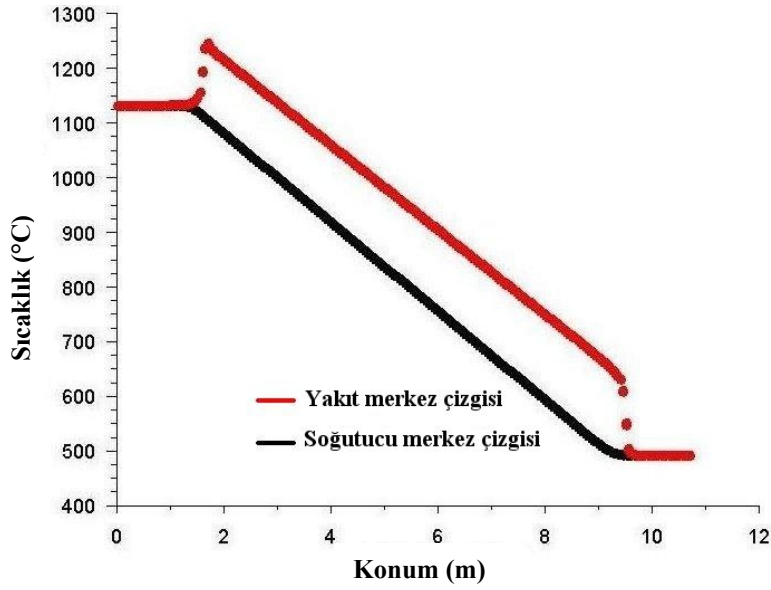
hesaplanmıştır [19]. Oluşturulan modelde reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı 1267°C bulunduğundan sonucun literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.

### **6.1.2. Sonuçların değerlendirilmesi**

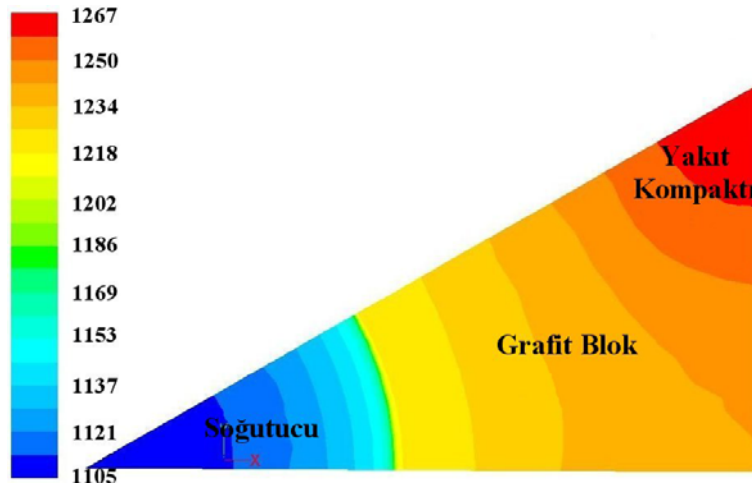
Çalışma 491°C soğutucu giriş sıcaklığı, 320 kg/s soğutucu akış oranı ve 0,2 bypass akış yüzdesi ile orijinal MHR çalışma durumunun analizi ile başlamıştır. Hesaplamalar daha sonra Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü (VHTR) çalışma koşullarına genişletilmiştir. ANSYS CFD FLUENT nümerik sonuçları elde etmek için her bir teklif edilen çalışma şartlarında çalıştırılmıştır. Her bir parametrenin hesaplamalarından elde edilen sonuçlar grafikler ve şekiller kullanılarak analiz edilmiştir.

#### Orijinal MHR tasarımı

Orijinal MHR çalışma durumu için, maksimum yakıt sıcaklığı 1267 °C hesaplandı. Bu değer referans [17] ile uyumludur. Eksenel soğutucu ve yakıt merkez çizgileri boyunca hesaplanan sıcaklıklar Şekil 6.10'da görülmektedir. Alt ve üst reflektör bloklar hariç yakıt ve soğutucu sıcaklıkları lineer olarak artmaktadır. Yakıt sıcaklığı aktif korun alt sonunun 10 cm üstünde maksimum değere sahiptir. Şekil 6.11 maksimum yakıt sıcaklığının bulunduğu düzlemdeki sıcaklık konturlarını göstermektedir. Maksimum çıkış sıcaklığı, maksimum grafit sıcaklığı, maksimum soğutucu hızı ve basınç düşümü sırasıyla 1131 °C, 1248 °C, 62,8 m/s and 19,7 kPa dır.

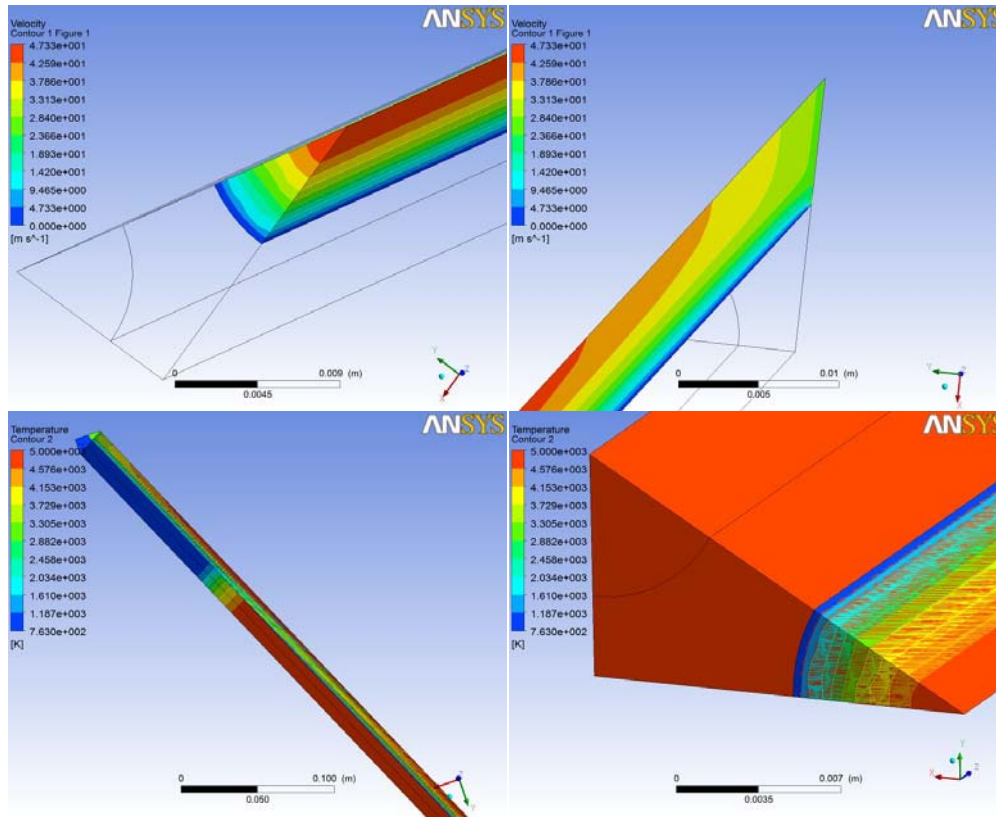


Şekil 6.10. Yakıt ve soğutucu merkez çizgileri boyunca aksel sıcaklık dağılımı



Şekil 6.11. Maksimum yakıt sıcaklık düzleminde sıcaklık konturları (°C)

Çözümleri incelemek için ANSYS CFD FLUENT'in son işlemcisi kullanılabildiği gibi ANSYS CFD Post'da kullanılabilmektedir. ANSYS CFD Post'un kullanımının daha kolay ve daha görsel olduğunu göstermek için orijinal MHR çalışma durumunda meydana gelen sıcaklık dağılımı görüntüleri Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12. ANSYS CFD Post'da birim hücre modelinin değişik açılardan sıcaklık dağılımı görüntüleri

### Bypass akış oranının etkileri

Helyumun çoğu yakıt elemanları içindeki soğutucu kanallar içinden akmaktadır. Fakat bir kısmı elemanlar arasından ve kontrol çubuk kanalları içinden bypass olmaktadır. Bu bypass akışı koru soğutmaktadır. Fakat nükleer ısı uzaklaştırmasına direk olarak katkısı yoktur. Bu nedenle bypass akışı maksimum yakıt sıcaklığını azaltmak için azaltılmalıdır.

Şu anki analiz için bypass akışın etkileri toplam akışın %20'nden %10'una sıralanan parametre olarak incelenmiştir. Bypass akışın potansiyel faydalarını hesaplamak için hesaplamalar 0,2, 0,15 ve 0,1 bypass akış oranları kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 6.1 bypass akışı azaltmanın karşılaştırmasını sağlamaktadır. Bypass akış oranını 0,2'den 0,1'e azaltmak maksimum yakıt sıcaklığını 74 °C,

maksimum çıkış sıcaklığını 71°C azaltmaktadır. Bu çalışmada kalan hesaplamalar için, bypass akış oranı %10 seçilmiştir.

Çizelge 6.1. Bypass akışı azaltmanın karşılaştırılması

	Bypass Akış Oranı		
	0,2	0,15	0,1
<b>Birim hücredeki akış oranı (kg/s)</b>	0,00205333	0,00218167	0,00231
<b>Maksimum Yakıt Sıcaklığı (°C)</b>	1267	1228	1193
<b>Maksimum Çıkış Sıcaklığı (°C)</b>	1131	1093	1060
<b>Maksimum Grafit Sıcaklığı (°C)</b>	1248	1210	1175
<b>Maksimum Soğutucu Hızı (m/s)</b>	62,8	64,9	67,1
<b>Basınç Düşümü (kPa)</b>	19,7	21,2	22,7
<b>Isı Taşınım Katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)</b>	178,8	182,8	186,6
<b>Isı akısı (W/m<sup>2</sup>)</b>	153392	153392	153392
<b>Güç (W)</b>	6820	6820	6820

#### Akış dağılımını kontrol etmenin etkileri

Orginal MHR tasarımı üzerinde şu anki MHR çalışma şartı ve üç akış dağılım şartı (1. durum, 2. durum ve 3. durum) incelendi. Her bir durum için bypass akış oranı 0,1 dir. Bu çalışma şartları ile orijinal MHR tasarımının ısı akış analizleri maksimum yakıt sıcaklığı, maksimum çıkış sıcaklığı, maksimum grafit sıcaklığı, maksimum soğutucu hızı ve basınç düşümünü hesaplamak için yapıldı. Hesaplamalar giriş soğutucu sıcaklığı (°C)/soğutucu akış oranı (kg/s) kombinasyonları ile izleyen çalışma durumları 491/320, 491/226, 641/320, 590/320 için yapıldı. Dört durum için elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de görülmektedir.

Çizelge 6.2. Akış kontrolünün karşılaştırması

	Orijinal MHR	1.Durum	2.Durum	3.Durum
<b>Giriş Soğutucu Sıcaklığı (°C)</b>	491	491	641	590
<b>Soğutucu Akış Oranı (kg/s)</b>	320	226	320	320
<b>Birim Hücre Modelinde Akış Oranı (kg/s)</b>	0,00231	0,00163144	0,00231	0,00231
<b>Maksimum Yakıt Sıcaklığı (°C)</b>	1193	1443	1340	1290
<b>Maksimum Çıkış Sıcaklığı (°C)</b>	1060	1296	1210	1159

Çizelge 6.2. (Devam) Akış kontrolünün karşılaştırması

<b>Maksimum Grafit Sıcaklığı (°C)</b>	1175	1424	1321	1271
<b>Maksimum Soğutucu Hızı (m/s)</b>	67,1	53,6	74,6	72,0
<b>Basınç Düşümü (Pa)</b>	22,7	14,8	26,5	25,2
<b>Isı Taşınım Katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)</b>	186,6	164	157,5	166,3
<b>Isı akısı (W/m<sup>2</sup>)</b>	153392	153392	153392	153392
<b>Güç (W)</b>	6820	6820	6820	6820

## 6.2. Eşdeğer Silindir Modeli

Bu bölümde normal çalışma durumunda reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı kabul edilebilir seviyenin altındayken soğutucu çıkış sıcaklığını 850 °C üzerine yükseltmek amacıyla Modüler Helyum Reaktör (MHR) için alternatif çalışma şartları incelenmiştir. Akış oranının ve soğutucu giriş sıcaklığı değişiminin MHR üzerinde etkilerinin nümerik değerlendirmesi yapılmıştır. Parametrik ısı-akış simülasyonu Sayısal Akışkanlar Dinamiği yazılımı ANSYS 13.0 CFD FLUENT kullanılarak yapılmıştır. Simule edilmiş geometri Eşdeğer Silindir Model olarak seçilmiştir. Korun içindeki kompleks yapıyı modellemek için gözenekli ortam modeli kullanılmıştır. İlk olarak şimdiki 600 MWt GT-MHR'nın analizi ile başlanmıştır. Nümerik sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve modelinin doğruluğu tartışılmıştır. Daha sonra alternatif çalışma koşulları simule edilmiştir. Maksimum yakıt sıcaklığı ve soğutucu çıkış sıcaklığı üzerinde bu değişikliklerin etkileri incelenmiştir.

### 6.2.1. Çözümün doğruluğunun ve geçerliliğin kontrolü

SAD metotları kullanılarak birçok nümerik çözüm elde etmek mümkündür. Bazen çok kısa sürelerde belirli problemlerin çözümlerine ulaşılır. Fakat çözümlerin ve sonuçların gerçek fiziksel olay ve fizik kanunlarına uygun olması gerekmektedir. Birçok çözüm bundan dolayı hiçbir işe yaramaz ve problem defalarca yeniden programa tanıtılarak, tanımlamalar değiştirilerek ve kullanılan SAD kodunun içerdiği çözüm teknikleri ve değişkenleri tekrar tekrar ince ayardan geçirilerek, problemin

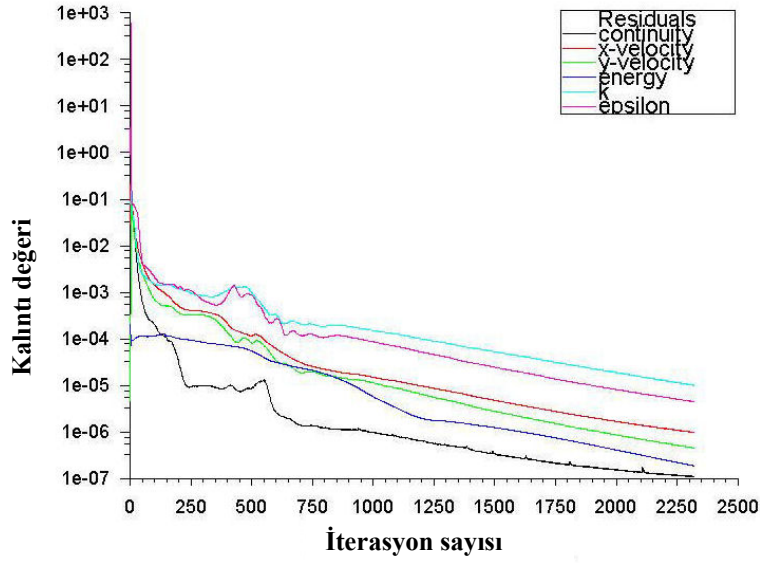
daha gerçekçi çözümleri elde edilmeye çalışılır. Elde edilen sonuçların geçerliliğinin kontrolü için 5 ana sorunun cevaplanması gerekmektedir [56].

- Çözüm yakınsadı mı?
- Çözüm iterasyon sayısından bağımsız mı?
- Korunum denklemleri sağlandı mı?
- Çözüm hücre yapısından bağımsız mı?
- Sonuçlar deneysel değerlerle uyum içinde mi?

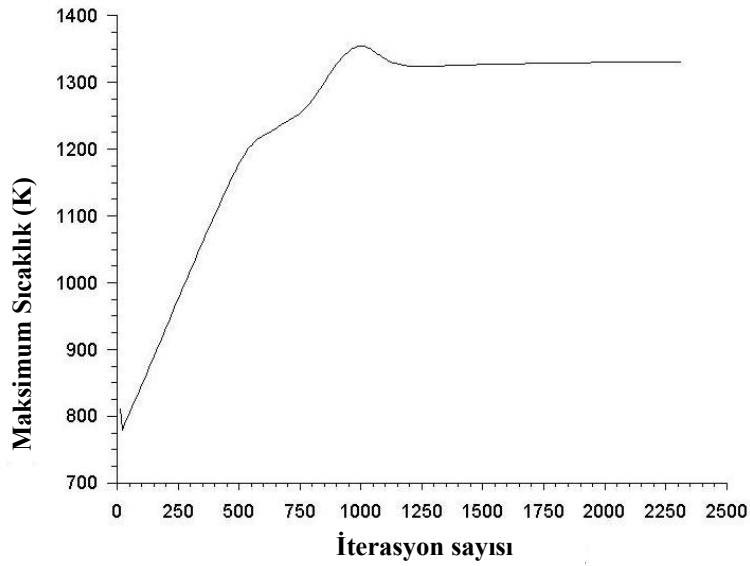
#### Çözümün yakınsaması

Şekil 6.13 iterasyon sayısına bağlı olarak kalıntı değerlerini grafik halinde vermektedir. Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 ise iterasyon sayısına bağlı olarak modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklık değerini anlık olarak ve reaktör çıkış sıcaklığını grafik halinde vermektedir. Bu grafikler üzerinde çözümü gerçekleştirilen kalıntı değerleri ve meydana gelen maksimum sıcaklık değerini ve reaktör çıkış sıcaklığını anlık olarak iterasyon sayısı ile birlikte değişimleri gösterilmektedir. Bütün değişkenlerin kalıntı değerleri monoton ve değişken bir azalma gösterdiği için çözümün yakınsadığı anlaşılmaktadır. Buna ilave olarak Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 de görüldüğü gibi maksimum sıcaklık değeri ve reaktör çıkış sıcaklığı değeri belirli bir dalgalanmadan sonra sabit bir değere ulaşmıştır.

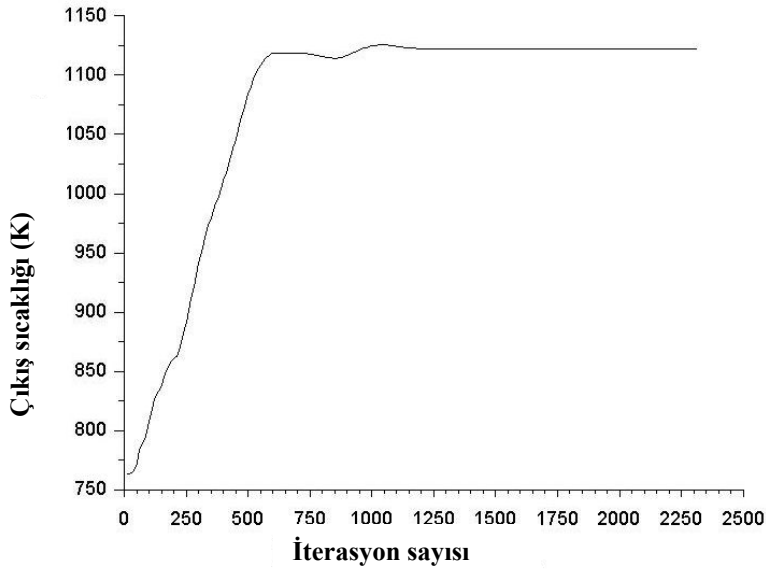
Grafiksel olarak yakınsamanın kontrolü yapıldıktan sonra bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerlerine bakılmalıdır. Bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-5}$  den az olana kadar iterasyon gerçekleşmiştir. Şekil 6.13’de görüldüğü gibi 2319 iterasyonda bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-5}$  den az olmuştur. Modeli herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklık değeri ve reaktör çıkış sıcaklığı değeri yaklaşık 1250 iterasyondan sonra sırasıyla 1331 K (1058 °C) ve 1122 K (849 °C) geldikten sonra bu değerlerde kalmış ve sapma göstermemiştir.



Şekil 6.13. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde “Realizable k-e” türbülans modeli seçilmiştir)

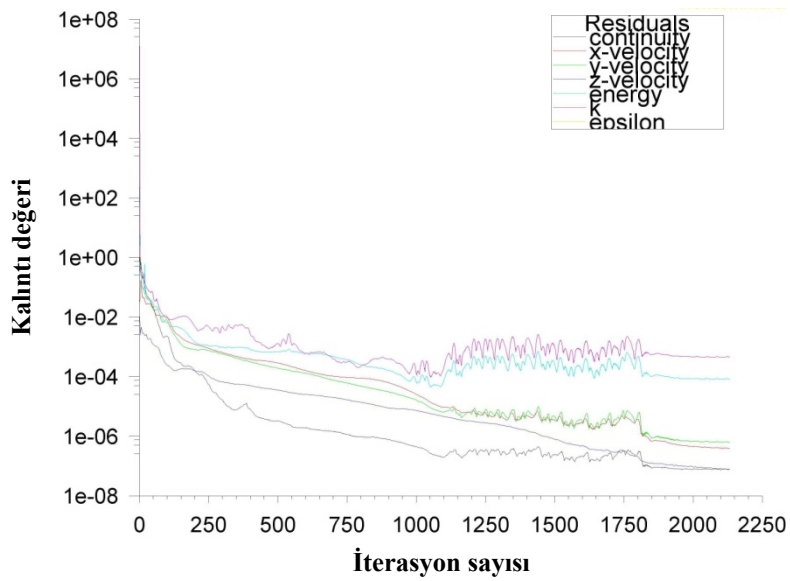


Şekil 6.14. İterasyon sayısına bağlı olarak modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri

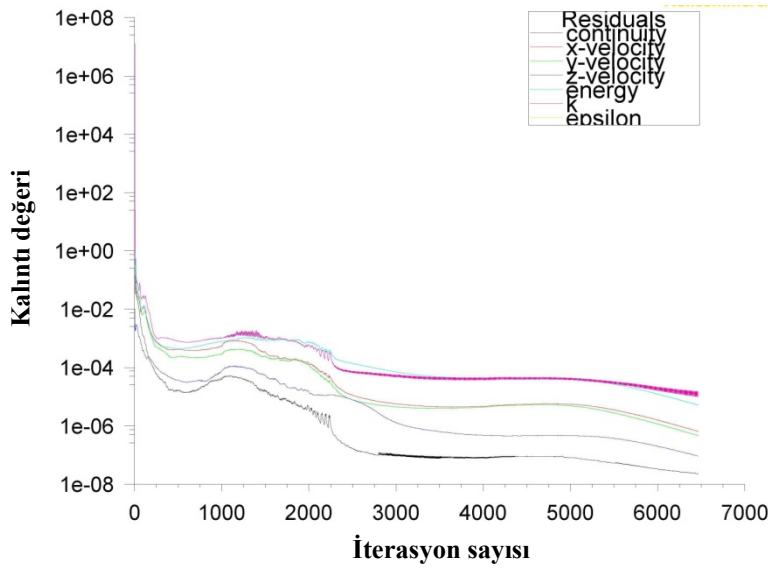


Şekil 6.15. İterasyon sayısına bağlı olarak reaktör çıkış sıcaklığı değeri

Şekil 6.13’de FLUENT çözücünde “Realizable k-e” modeli kullanılması durumunda iterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri görülmektedir. FLUENT çözücünde “Standart k-e” ve “RNG k-e” türbülans modelleri kullanılması durumunda yakınsama Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de görüldüğü gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 6.16. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücünde “Standart k-e” türbülans modeli seçilmiştir)



Şekil 6.17. İterasyon sayısına bağlı olarak bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri (Çözücüde “RNG k-e” türbülans modeli seçilmiştir)

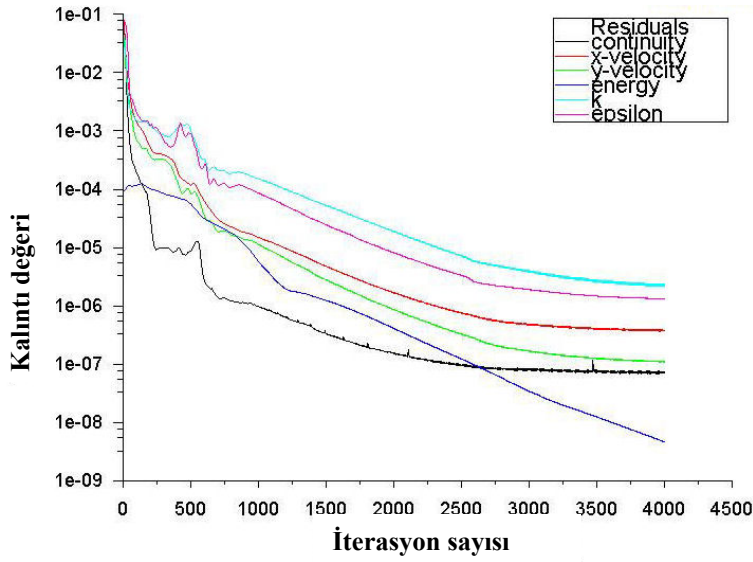
“Standart k-e”, “Realizable k-e” ve “RNG k-e” türbülans modelleri kullanılması durumunda meydana gelen maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 1043 °C, 1058 °C ve 1044 °C hesaplanmıştır. “Standart k-e” türbülans modeli ile yapılan çözümlemede bütün değişkenlerin kalıntı değerleri 1800’üncü iterasyondan sonra sabit kalmıştır yani yakınsamamıştır. “RNG k-e” türbülans modeli ile yapılan çözümlemede bütün değişkenlerin kalıntı değerleri 6500 iterasyonda yakınsamıştır. “Realizable k-e” türbülans modeli ile yapılan çözümlerlerde ise 2319 iterasyonda bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-5}$  den az olmuştur. Bu nedenlerden dolayı eşdeğer silindir modeli ile yapılan tüm parametrik çözümlerlerde “Realizable k-e” türbülans modeli kullanılmıştır.

#### Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı

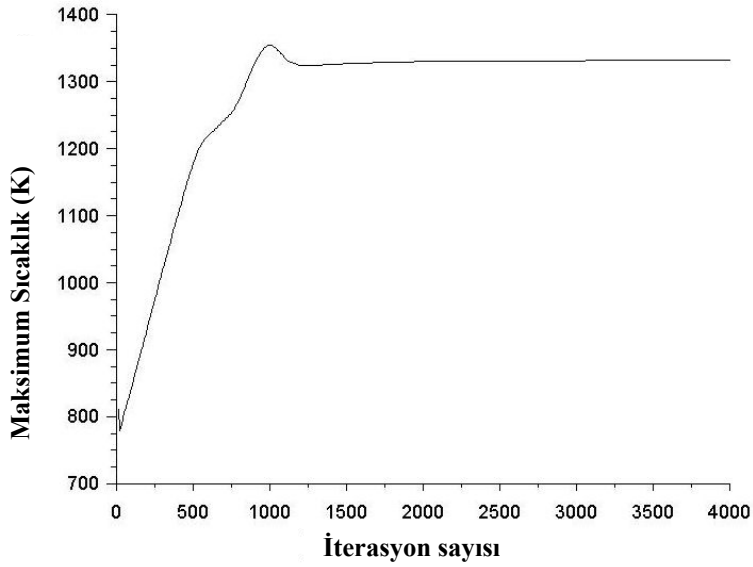
Çözüm iterasyon sayısı ile yakından ilişkilidir. Bazı problemlerin çözümü 100 iterasyon ile geçerli bir duruma gelebilir. Oysa daha karmaşık problemlerin çözümü için 1000 iterasyon bile yetersiz gelebilir. Bundan dolayı iterasyon sayısı değiştirilerek birinci sorunun cevabı aranır. Yani, iterasyon sayısının artmasıyla yakınsamanın nasıl değiştiği sürekli olarak gözlemlenir. Burada amaç, iterasyon

sayısının artmasıyla yakınsamış problemin yakınsamasının devam ettiğini gözlemektir.

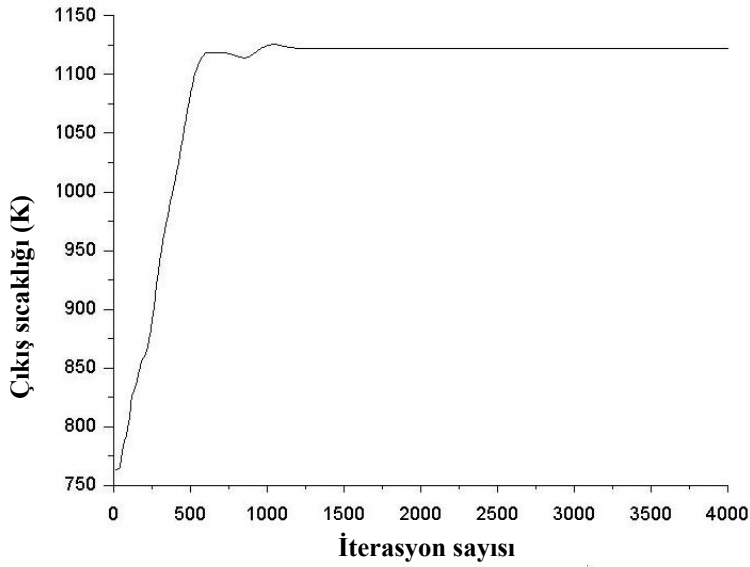
Şekil 6.18, 6.19 ve 6.20’de görüldüğü gibi problem 2319 iterasyonda yakınsamasına rağmen bütün değişkenler için istenen maksimum kalıntı değerleri  $1,0 \times 10^{-10}$  olarak değiştirilerek 4000 iterasyona kadar çözüm yapılmıştır. Bütün değişkenler için kalıntı değerleri sürekli olarak küçüldüğünden ve maksimum sıcaklık değeri ve reaktör çıkış sıcaklığı değeri belirli bir aşamadan sonra sürekli sabit kaldığından çözüm iterasyon sayısından bağımsızdır.



Şekil 6.18. 4000 iterasyona kadar bütün değişkenlerin maksimum kalıntı değerleri



Şekil 6.19. 4000 iterasyona kadar modelin herhangi bir yerinde meydana gelen maksimum sıcaklığın anlık değeri



Şekil 6.20. 4000 iterasyona kadar reaktör çıkış sıcaklığının değeri

#### Çözümün korunum denklemlerini sağlanması

İlk iki sorunun olumlu olarak cevaplandırılmasından sonra çözümü elde edilmeye çalışılan fiziksel problemi tanımlayan kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir.

Süreklilik denklemi için soğutucu Helyumun girişteki kütleli debisinin çıkıştaki kütleli debisi ile yaklaşık aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca enerji denklemi için oluşturulan modelde sisteme giren enerjinin sistemden çıkan enerjiye yaklaşık eşit olduğu görülmüştür. Aşağıda yazılımdan alınan değerler görülmektedir.

*Süreklilik denklemi için:*

Soğutucu Helyumun girişteki kütleli debisi	: 320 kg/s
Soğutucu Helyumun çıkıştaki kütleli debisi	: 320,0000577386381 kg/s
Fark	: $5,773884 \times 10^{-5}$ kg/s

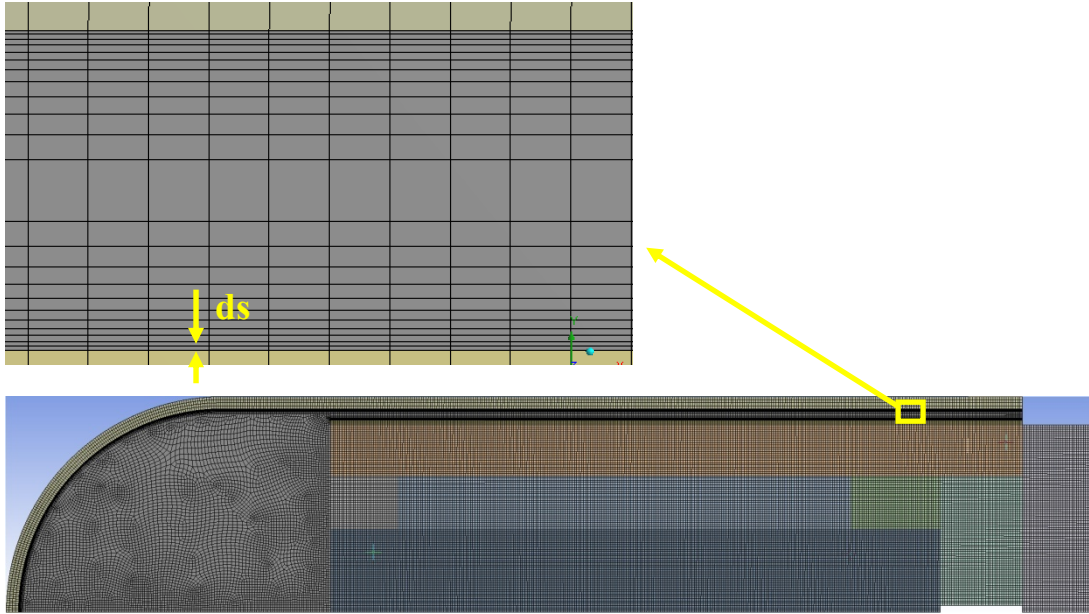
*Enerji denklemi için:*

Reaktör içinde nükleer yolla üretilen enerji miktarı	: 599,6151 MW
He'nin giriş çıkışı arasındaki enerji miktarı farkı	: 595,9824 MW
Reaktörün dışından yayılan enerji miktarı	: 3,6322 MW
Fark	: $6,7 \times 10^{-5}$ MW

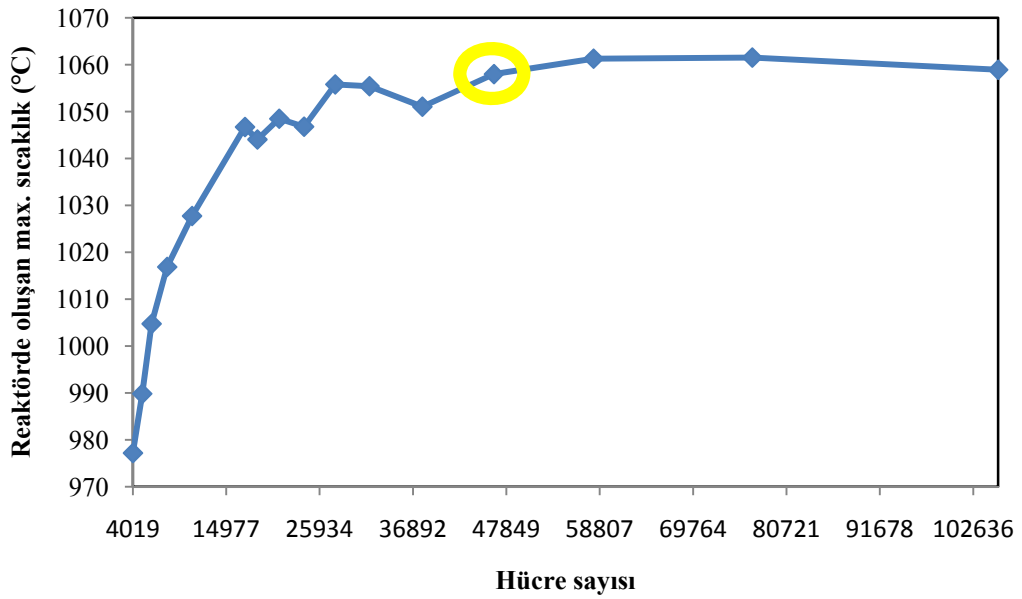
#### Çözümün hücre yapısından bağımsızlığı

İlk üç sorunun olumlu olarak cevaplanmasına rağmen, elde edilen sonuçlar gerçek değerlerden uzak olabilir. Buna sebep olabilecek kaynaklardan biriside çözüm alanı içindeki hücrelerin sayısı ve yapısıdır.

Şekil 6.22'de görüldüğü gibi 4351 hücre sayısı ile çözüme başlanmış ve modelin hücre ölçüsü değeri artırılarak 105891 hücre sayısına kadar çözüm yapılmıştır. 46443 hücre sayısından itibaren maksimum sıcaklık değerinin çok fazla değişmediği görüldüğünden bu hücre yapısı sonraki çözümler için kullanılmıştır. 46443 hücre sayısından sonraki çözümler için bütün değişkenlerin kalıntı değerleri monoton bir azalma göstermemiştir. Şekil 6.21'de modelde oluşturulan hücre yapısı görülmektedir.



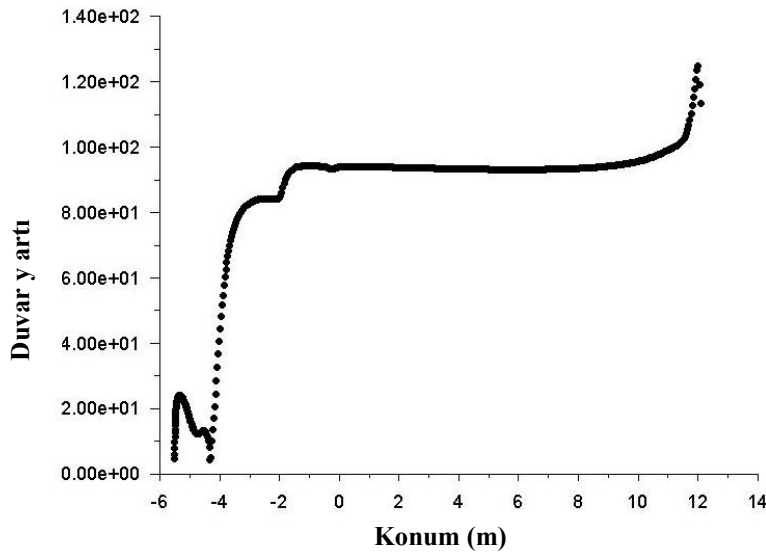
Şekil 6.21. Eşdeğer silindir modeli için hücre yapısı



Şekil 6.22. Hücre sayısına göre elde edilen maksimum yakıt sıcaklığının değişimi

Reaktör kabının iç yüzeyinin ve kor bariyerinin dış yüzeyinin sınır tabakasına Şekil 6.23'de görüldüğü gibi ince hücre yapısı uygulanmıştır. Modelde “Standart Wall Treatment” duvar tipi kullanıldığından  $y^+$  değerinin yaklaşık 100 olması için duvar yakınında hücre büyüklüğü dikkatle oluşturulmuştur. Kabul edilebilir yakın duvar

çözünürlüğünü belirlemek için NASA'nın web sitesi [67] kullanılmıştır. Bu site vasıtasıyla ilk hücre çizgisinin duvara olan mesafesi (ds) 0,0026536 bulunmuştur. Şekil 6.13'da görüldüğü gibi duvar  $y^+$  değerinin büyük bir kısmı 80 ile 100 arasında olduğundan yakın-duvar hücre çözünürlüğü (near-wall grid resolution) kabul edilebilir seviyededir [62, 63].



Şekil 6.23. Reaktör kabı iç yüzeyi uzunluğu boyunca elde edilen Y artı değeri

#### Sonucun deneysel değerlerle uyumluluğu

SAD çözümlerde elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından gereklidir. Eğer hiçbir şekilde deneysel veri mevcut değilse, bu kesin karşılaştırma literatürde kabul görmüş teorik, analitik veya diğer nümerik çözümlerle yapılabilir.

Literatürde MHR'nin eşdeğer silindir modeli ile deneysel olarak incelendiği çalışma yoktur. Oluşturulan modelde orijinal MHR çalışma şartları için maksimum yakıt sıcaklığı 1058 °C olarak hesaplanmıştır. Modelin geçerliliğini onaylamak için Çizelge 6.3'deki diğer çalışmalarla bir karşılaştırma yapılmıştır. Diğer çalışmalarla simülasyon sonuçlarının karşılaştırması birbiri ile uyumuştur.

Çizelge 6.3. Aktif kordaki ve reaktör kabındaki maksimum sıcaklığın karşılaştırılması [22, 29]

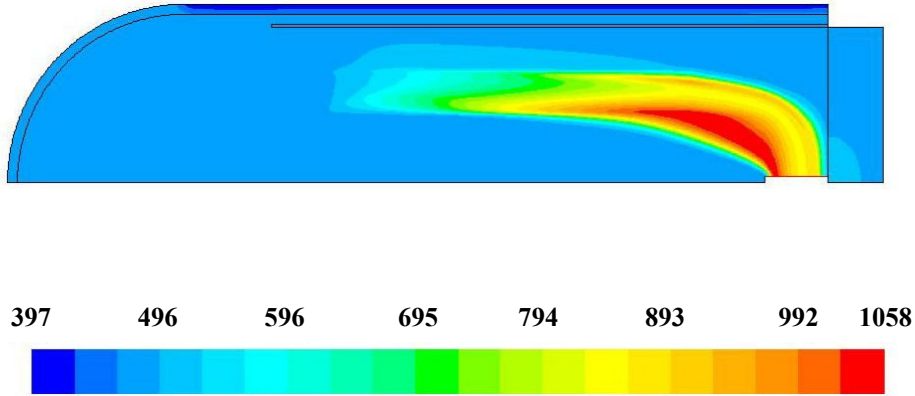
Kod/Yazılım	Ülke	Kuruluş	Maks. Yakıt Sıcaklığı (°C)	Maks. Kap Sıcaklığı (°C)
THERMIX/KONVEK	Çin	INET	1098	367
CASTEM	Fıransa	CEA	1027	260
CFX-F3D	Hollanda	ECN	949	406
GTAS	Rusya	OKBM	948	310
MORECA	ABD	ORNL	956	355
THERMIX	ABD	AREVA	972	398
STAR-CD	ABD	AREVA	969	386
STAR-CD	Çin	INET	1046	489
ANSYS FLUENT	Türkiye	Gazi Üniv.	1058	485

### 6.2.2. Sonuçların değerlendirilmesi

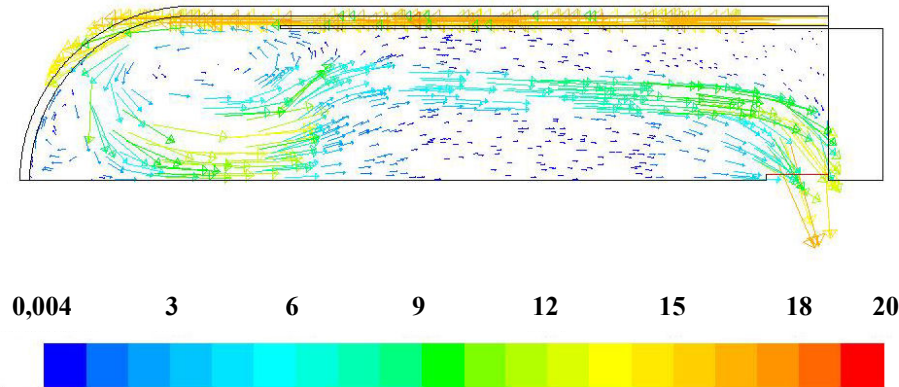
Çalışma 491°C soğutucu giriş sıcaklığı, 320 kg/s soğutucu akış oranı ile orijinal MHR çalışma durumunun analizi ile başlamıştır. Hesaplamalar daha sonra Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü (VHTR) çalışma koşullarına genişletilmiştir. ANSYS CFD FLUENT, nümerik sonuçları elde etmek için her bir teklif edilen çalışma şartlarında/tasarımında çalıştırılmıştır. Intel Core2 Quad Q9550 işlemcili 8Gb RAM'e sahip bir bilgisayarla her bir parametrenin çözümü yaklaşık 10 dk sürmüştür. Her bir parametrenin hesaplamalarından elde edilen sonuçlar grafikler ve şekiller kullanılarak analiz edilmiştir.

#### Orijinal MHR tasarımı

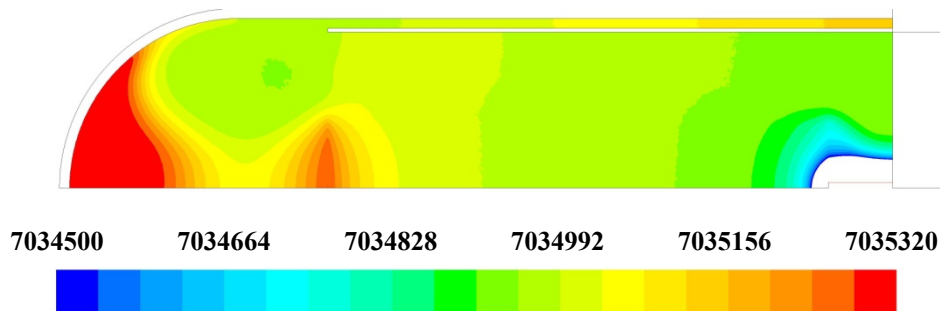
Orijinal çalışma durumu için reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları Şekil 6.24'de görülmektedir. Çıkış sıcaklığı 849 °C, reaktör kabı maksimum sıcaklığı 485 °C ve reaktörde meydana gelen maksimum sıcaklık 1058 °C hesaplanmıştır. Helyumun akış vektör profili Şekil 6.25'de ve basınç konturları Şekil 6.26'da gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları ( $^{\circ}\text{C}$ ) (Giriş sıcaklığı/debisi:  $490^{\circ}\text{C}/320\text{kg/s}$ )

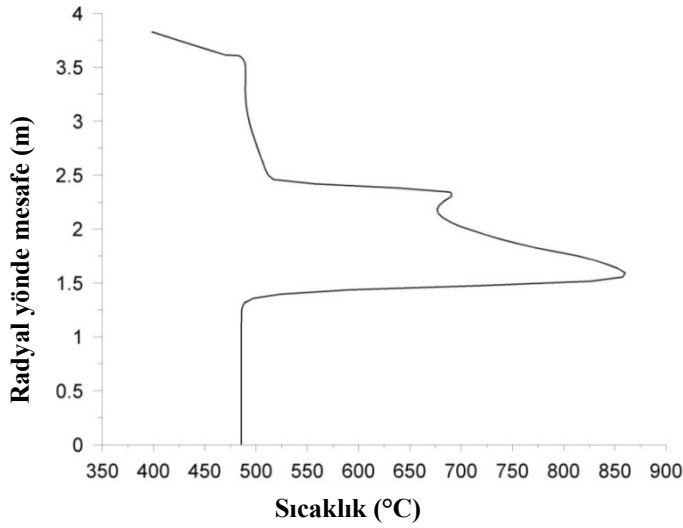


Şekil 6.25. Reaktördeki akış vektör profili (m/s) (Giriş sıcaklığı/debisi:  $490^{\circ}\text{C}/320\text{kg/s}$ )



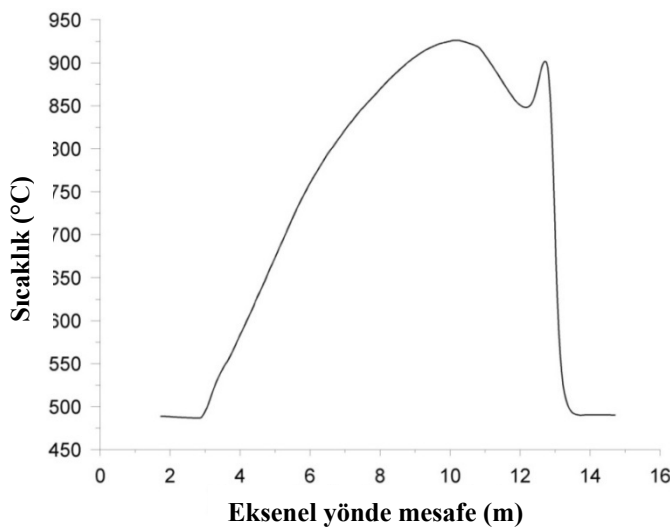
Şekil 6.26. Reaktörde meydana gelen basınç konturları (Pa) (Giriş sıcaklığı/debisi:  $490^{\circ}\text{C}/320\text{kg/s}$ )

Korun orta düzleminde radyal yöndeki mesafeye göre sıcaklık değişimi Şekil 6.27'de görülmektedir. İç ve dış reflektörlerdeki sıcaklık yaklaşık olarak reaktör giriş sıcaklığıyla aynıdır. Aktif korda ise sıcaklık ısı üretiminden dolayı yüksektir.



Şekil 6.27. Korun orta düzleminde radyal sıcaklık dağılımı (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s)

Korun 1,72 m yarıçapında eksenel yöndeki mesafeye göre sıcaklık değişimi Şekil 6.28'de görülmektedir. Soğutucu helyum reaktör içinde ilerledikçe ısınmaktadır.



Şekil 6.28. Korun 1,72 m yarıçapında eksenel sıcaklık dağılımı (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/320kg/s)



Çizelge 6.5. Değişik çalışma koşullarında reaktör çıkış sıcaklığı (°C)

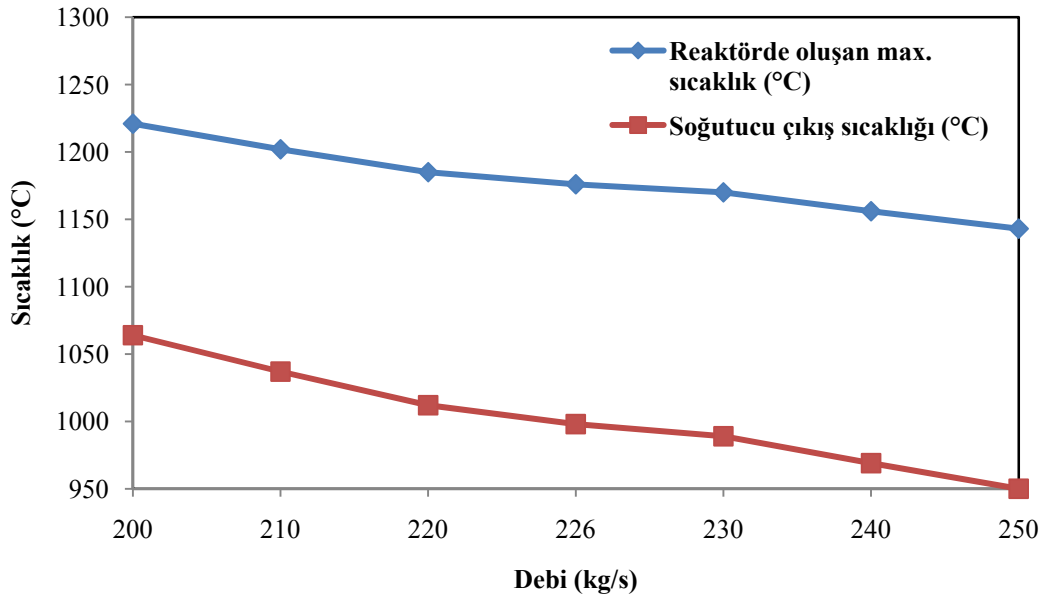
		Soğutucu akış debisi (kg/s)													
		200	210	220	226	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
Soğutucu giriş sıcaklığı (°C)	380	955													
	390	965													
	400	975													
	410	985	958												
	420	1005	968												
	430	1015	978	953											
	440	938	988	963											
	450	1025	998	972	959	950									
	460	1035	1007	982	969	960									
	470	1045	1017	992	978	970									
	480	1054	1027	1002	988	980	959								
	490	1064	1037	1012	998	989	969	950							
	500	1074	1047	1022	1008	999	978	959							
	510	1084	1057	1032	1008	1009	987	967	950						
	520		1066	1041	1017	1017	996	977	960						
	530			1051	1027	1027	1006	987	970	953					
	540				1036	1037	1016	997	980	963					
	550						1026	1007	990	973	958				
	560							1017	999	983	968	954			
	570								1009	993	978	963	950		
	580									1003	988	974	960		
	590									1013	998	984	970	958	
	600										1008	993	980	968	956
	610											1003	990	977	966
	620												1000	987	976
	630													997	986
640													1007	996	
641														997	
650														1005	

Çizelge 6.4'e bakıldığında reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı değeri; soğutucu giriş sıcaklığının ve soğutucu giriş debisinin azalmasıyla azaldığı görülmektedir. 950 °C çıkış sıcaklığına sahip önerilen alternatif çalışma şartları içinde; maksimum yakıt sıcaklığının en düşük olduğu çalışma şartı, soğutucu giriş sıcaklığının 380 °C ve soğutucu giriş debisinin 200 kg/s durumudur. Bu çalışma şartlarında maksimum yakıt sıcaklığı değeri 1072 °C olarak hesaplanmıştır.

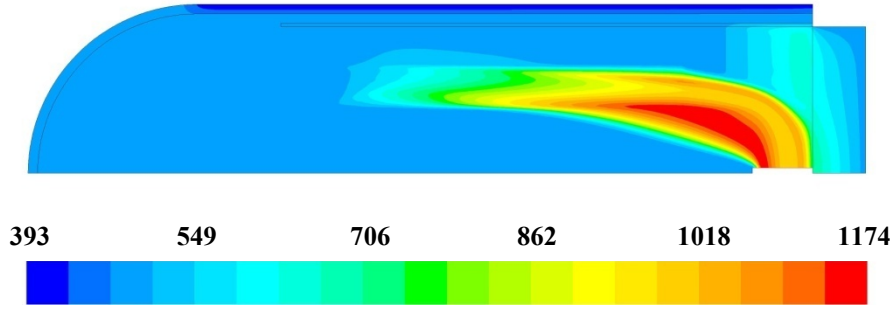
Maksimum yakıt sıcaklığı değerinin 1250 °C geçmediği alternatif çalışma şartları içinde; maksimum çıkış sıcaklığının en yüksek olduğu çalışma şartı, soğutucu giriş

sıcaklığının 510 °C ve soğutucu giriş debisinin 200 kg/s durumudur. Bu çalışma şartlarında maksimum çıkış sıcaklığı değeri 1084 °C olarak hesaplanmıştır.

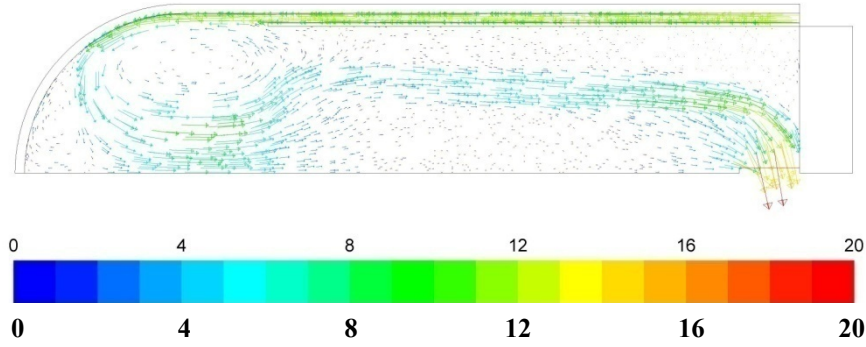
Şekil 6.29'de orijinal MHR çalışma şartlarında soğutucu giriş sıcaklığı 490 °C sabit olması durumunda; soğutucu giriş debisi değişiminin, soğutucu çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi görülmektedir. Soğutucu giriş debisinin 200-250 kg/s aralığında olması durumunda çıkış sıcaklığı 950-1064 °C aralığında değişmektedir. Reaktörde oluşan maksimum sıcaklık ise 1143-1221 °C aralığında değişmektedir. 1000 °C çıkış sıcaklığı elde etmek için soğutucu giriş debisinin yaklaşık 227 kg/s olması gerekmektedir. Bu durumda reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1178 °C olmaktadır. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları Şekil 6.30'de ve basınç konturları Şekil 6.31'de görülmektedir.



Şekil 6.29. Orijinal MHR çalışma şartlarında soğutucu giriş debisi değişiminin soğutucu çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi

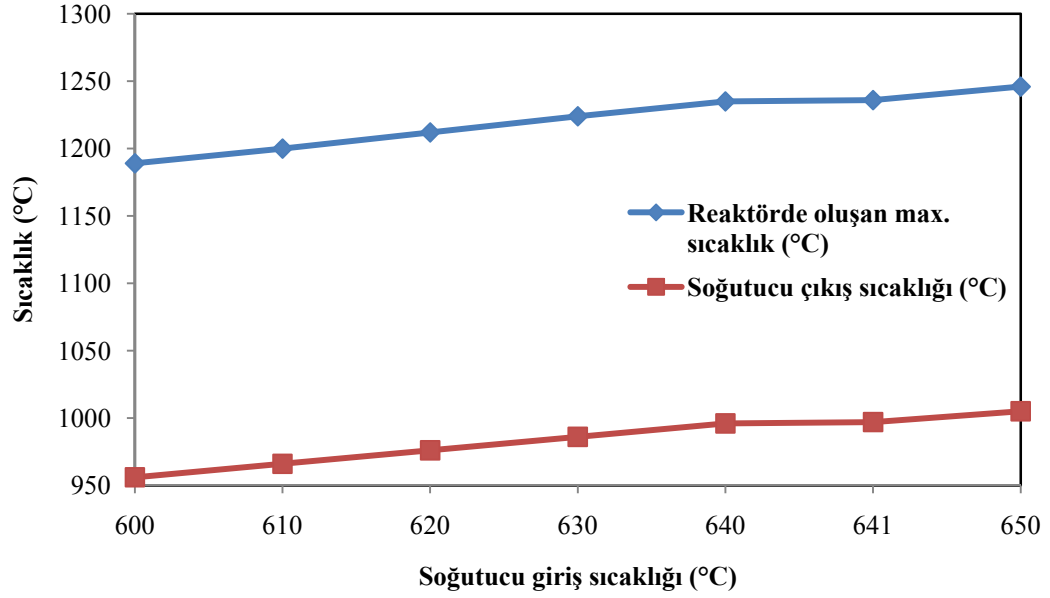


Şekil 6.30. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları (°C) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/227kg/s)

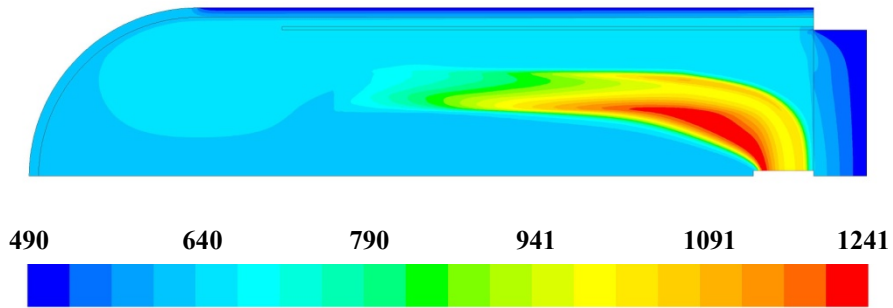


Şekil 6.31. Reaktördeki akış vektör profili (m/s) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/227kg/s)

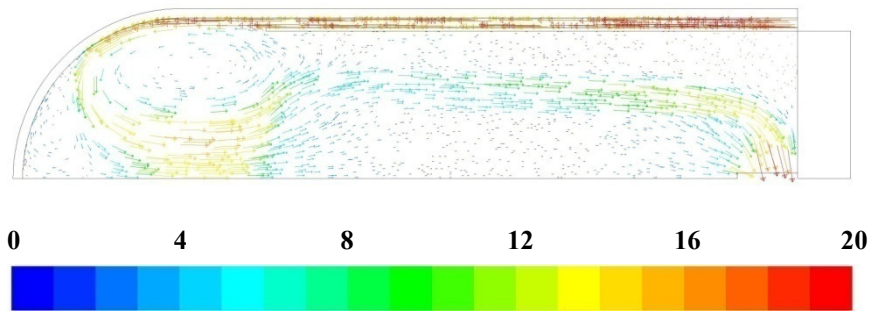
Şekil 6.32’de orijinal MHR çalışma şartlarında soğutucu giriş debisinin 320 kg/s sabit olması durumunda; soğutucu giriş sıcaklığı değişiminin, soğutucu çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi görülmektedir. Soğutucu giriş sıcaklığı 600-650 °C aralığında olması durumunda çıkış sıcaklığı 956-1005 °C aralığında değişmektedir. Reaktörde oluşan maksimum sıcaklık ise 1189-1246 °C aralığında değişmektedir. 1000 °C çıkış sıcaklığı elde etmek için soğutucu giriş sıcaklığının 644 °C olması gerekmektedir. Bu durumda reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1239 °C olmaktadır. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları Şekil 6.33’de ve basınç konturları Şekil 6.34’de görülmektedir.



Şekil 6.32. Orijinal MHR çalışma şartlarında soğutucu giriş sıcaklığı değişiminin soğutucu çıkış sıcaklığı ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi

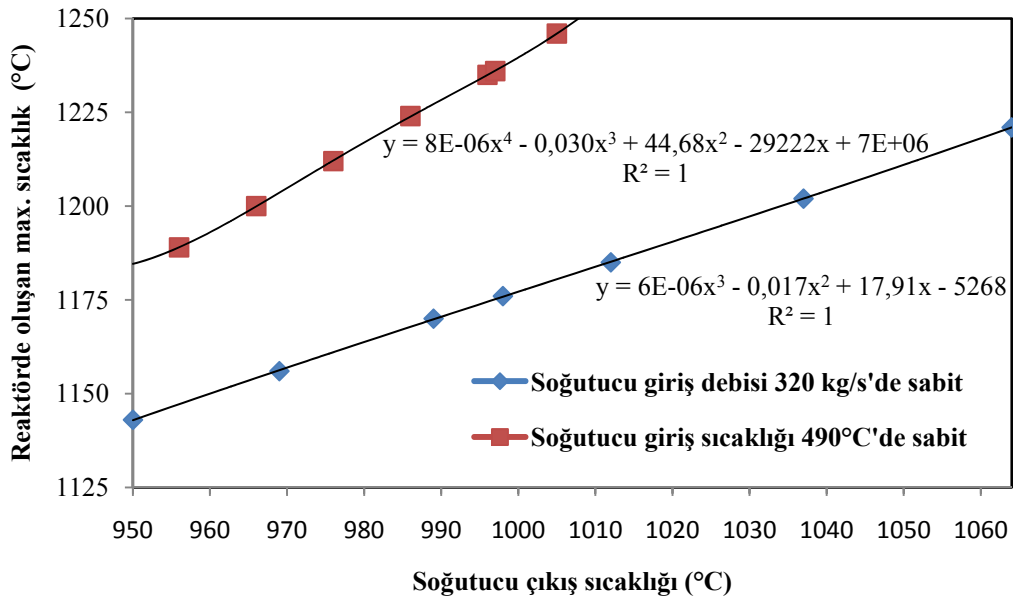


Şekil 6.33. Reaktörde meydana gelen sıcaklık konturları (°C) (Giriş sıcaklığı/debisi: 644°C/320kg/s)



Şekil 6.34. Reaktördeki akış vektör profili (m/s) (Giriş sıcaklığı/debisi: 490°C/227kg/s)

Şekil 6.35’de soğutucu giriş debisinin 320 kg/s’de ve soğutucu giriş sıcaklığının 490 °C sabit olması durumlarında soğutucu çıkış sıcaklığına göre reaktörde oluşan maksimum sıcaklık değerlerinin değişimi görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere soğutucu giriş sıcaklığının 490 °C sabit tutulup reaktör giriş debisinin değişmesi durumunda reaktörde meydana gelen maksimum sıcaklık daha az olmaktadır. 1000 °C çıkış sıcaklığı elde etmek için soğutucu giriş sıcaklığının 490°C’de olması ve soğutucu giriş debisinin yaklaşık 227 kg/s olması durumunda reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1178 °C olmaktadır.



Şekil 6.35. Soğutucu giriş debisinin 320 kg/s’de ve soğutucu giriş sıcaklığının 490 °C sabit olması durumlarında soğutucu çıkış sıcaklığına göre reaktörde oluşan maksimum sıcaklığın değişimi

Soğutucu giriş debisinin 320 kg/s’de sabit olması durumunda; soğutucu çıkış sıcaklığına ( $T_{out}$ ) göre, reaktörde oluşan maksimum sıcaklığı ( $T_{max}$ ) aşağıdaki ampirik eşitlikle hesaplanabilir:

$$T_{max} = 6 \times 10^{-6} \times T_{out}^3 - 0,017 \times T_{out}^2 + 17,91 \times T_{out} - 5268 \quad (6.1)$$

Soğutucu giriş sıcaklığının 490 °C'de sabit olması durumunda; soğutucu çıkış sıcaklığına ( $T_{out}$ ) göre, reaktörde oluşan maksimum sıcaklığı ( $T_{max}$ ) aşağıdaki ampirik eşitlikle hesaplanabilir:

$$T_{max} = 8 \times 10^{-6} T_{out}^4 - 0,03 T_{out}^3 + 44,68 T_{out}^2 - 29222 T_{out} - 7 \times 10^6 \quad (6.2)$$

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nükleer reaktör tasarımı esnasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan biri, reaktörde oluşan maksimum sıcaklığın reaktörün tasarım limitlerini geçmemesidir. Reaktörde kullanılan yakıtın termal olarak zarar görmeyeceği maksimum sıcaklık değeri bu limitlerden biridir. MHR’de kullanılan TRISO kaplamalı yakıt parçası normal çalışma durumunda 1250 °C’ye kadar termal olarak zarar görmemektedir [2-11]. Bir taraftan reaktörden yüksek çıkış sıcaklığı elde edilmek istenirken diğer taraftan reaktörde oluşan maksimum sıcaklık değerine de bakılması gerekmektedir. ANSYS CFD FLUENT ile bu durum iki yöntemle incelenmiştir.

- Birim hücre modeli ile yapılan ısı akış analizlerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.
- Çözümün doğruluğunun, geçerliliğinin kontrolü yapılmış ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1267 °C bulunmuştur.
- Maksimum yakıt sıcaklığı aktif korun en alt kısmının 10 cm üstünde oluşmuştur.
- Maksimum çıkış sıcaklığı, maksimum grafit sıcaklığı, maksimum soğutucu hızı ve basınç düşümü sırasıyla 1131 °C, 1248 °C, 62,8 m/s ve 19,7 kPa bulunmuştur.
- Bypass akış oranını 0,2 den 0,1’e azaltmak maksimum yakıt sıcaklığını 74 °C, maksimum çıkış sıcaklığını 71°C azaltmaktadır.
- 491 °C soğutucu giriş sıcaklığında soğutucu akış oranı 320 kg/s den 226 kg/s’ye azaltılırsa, reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı 250 °C artmaktadır.
- 320 kg/s soğutucu akış debisinde soğutucu giriş sıcaklığı 641 °C ’ye yükseltirse, reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı 147 °C artmaktadır.

- 320 kg/s soğutucu akış debisinde soğutucu giriş sıcaklığını 590 °C ya artırmak, maksimum yakıt sıcaklığında 97 °C artış ile sonuçlanmaktadır.

Eşdeğer silindir modeli ile yapılan ısı akış analizlerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çözümün doğruluğunun, geçerliliğinin kontrolü yapılmış ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1058 °C bulunmuştur.
- Orijinal MHR çalışma şartları için çıkış sıcaklığı, maksimum yakıt sıcaklığı ve maksimum kap sıcaklığı sırasıyla 849 °C, 1058 °C ve 485 °C elde edilmiştir.
- Orijinal MHR tasarımı üzerinden; çıkış sıcaklığının 950 °C'nin üstünde olduğu ve reaktörde oluşan maksimum sıcaklığın 1250 °C altında olduğu 118 alternatif çalışma şartı önerilmiştir.
- 490 °C soğutucu giriş sıcaklığında; soğutucu giriş debisinin 200-250 kg/s aralığında olması durumunda çıkış sıcaklığı 950-1064 °C aralığında değişmektedir. Reaktörde oluşan maksimum sıcaklık ise 1143-1221 °C aralığında değişmektedir.
- 320 kg/s soğutucu akış debisinde; soğutucu giriş sıcaklığı 600-650 °C aralığında olması durumunda çıkış sıcaklığı 956-1005 °C aralığında değişmektedir. Reaktörde oluşan maksimum sıcaklık ise 1189-1246 °C aralığında değişmektedir.
- 1000 °C çıkış sıcaklığı elde etmek için soğutucu giriş sıcaklığının 644 °C olması gerekmektedir. Bu durumda reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1239 °C olmaktadır.
- 1000 °C çıkış sıcaklığı elde etmek için soğutucu giriş sıcaklığının 490°C'de olması ve soğutucu giriş debisinin yaklaşık 227 kg/s olması durumunda reaktörde oluşan maksimum sıcaklık 1178 °C olmaktadır.

- Giriş sıcaklığının 490 °C’de sabit tutulup reaktör giriş debisinin değiştirilmesi durumunda reaktörde meydana gelen maksimum sıcaklık daha az olmaktadır.
- 490 °C de soğutucu giriş sıcaklığında soğutucu akış oranı 320 kg/s den 226 kg/s’ye azaltılırsa, reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı 118 °C artmaktadır.
- 320 kg/s soğutucu akış debisinde soğutucu giriş sıcaklığı 641 °C’ye yükseltirirse, reaktörde oluşan maksimum yakıt sıcaklığı 178 °C artmaktadır.
- Soğutucu giriş debisinin 320 kg/s’de sabit olması durumunda; soğutucu çıkış sıcaklığına ( $T_{out}$ ) göre, reaktörde oluşan maksimum sıcaklığı ( $T_{max}$ ) hesaplayan;  

$$T_{max} = 6 \times 10^{-6} \times T_{out}^3 - 0,017 \times T_{out}^2 + 17,91 \times T_{out} - 5268$$
ampirik eşitliği elde edilmiştir.
- Soğutucu giriş sıcaklığının 490 °C’de sabit olması durumunda; soğutucu çıkış sıcaklığına ( $T_{out}$ ) göre, reaktörde oluşan maksimum sıcaklığı ( $T_{max}$ ) hesaplayan  

$$T_{max} = 8 \times 10^{-6} \times T_{out}^4 - 0,03 \times T_{out}^3 + 44,68 \times T_{out}^2 - 29222 \times T_{out} - 7 \times 10^6$$
ampirik eşitliği elde edilmiştir.

Mevcut çalışmada; MHR’nin normal çalışma durumu iki yöntemle incelenmiş ve yukarıdaki sonuçlar elde edilmiştir. İki yöntemin sınır şartları birbirinden farklı olduğu için aralarında karşılaştırma yapılamamıştır. Bu çalışmanın devamı olarak eşdeğer silindir modeli ile önerilen çalışma şartlarının kaza durumunda etkileri incelenebilir. Ayrıca aktif korun boyutunu artırarak reaktör gücünün artırılması durumunda, reaktörde meydana getirdiği etkileri üzerine çalışılabilir.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: World Nuclear Association “Nuclear Power in the World Today” <http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html> (2011).
2. İnternet: General Atomics “GT-MHR” <http://gt-mhr.ga.com> (2011).
3. Potter, R. C., “GT-MHR conceptual design description report”, *General Atomics, Project no: 6302, USA*, (1-1)-(4-120) (1995).
4. Shenoy, A., “GT-MHR Conceptual Design Description Report”, *GA, Project no: 7658, USA* (1-1)-(4-120) (1996).
5. Labar, M. P., Simon, W. A., “High temperature gas cooled reactor technology development”, *IAEA, TECDOC no: 988, Austria* 59-73 (1997).
6. Kiryushin, A.I., Kodochigov, N.G., Kouzavkov, N.G., Ponomarev-Stepnoi, N.N., Gloushkov, E.S., Grebennik, V.N., “Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 173: 119-129 (1997).
7. Fukuda, K., Kendall, J., Kupitz, J., Matzner, D., Mulder, E., Pretorius, P., Shenoy, A., Shiozawa, S., Simon, W., Sun, Y., Uselton, P., Xu, Y., “Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology”, *IAEA, TECDOC no: 1198, Austria*, 69-115 (2001).
8. LaBar, M.P., “The gas turbine-modular helium reactor: a promising option for near term deployment”, *GA, no: A23952, USA*. 1-8 (2002).
9. Labar, M. P., Shenoy, A. S., Simon, W. A., Campbell, E. M., “Status of the GT-MHR for Electricity Production”, *World Nuclear Association Annual Symposium*, London, 1-15 (2003).
10. Macdonald, P. E., Sterbentz, J. W., Sant, R.L., Bayless, P. D., Schultz, R. R., Gougar, H. D., Moore, R. L., Ougouag, A. M., Terry, W. M., “NGNP point design-results of the initial neutronics and thermal-hydraulic assessments during FY-03”, *INEEL, no: 03-00870, USA*, 64-88 (2003).
11. Akbayır, Ö., Altunok, T., Şahin, H. M., “Gaz Türbinli Modüler Helyum Reaktörü (GT-MHR)’nün Yapısı ve Çalışma Prensipleri”, *Nuclear&Renewable Energy Resources Conference with International Participation*, Ankara, 181-185 (2009).
12. Lohnert, G., Reutler, H., “Advantages of going modular in HTRs”, *Nucl. Eng. Des.*, 78:129-136 (1984).
13. Lohnert, G., “Technical design features and essential safety-related properties of the HTR-module”, *Nucl. Eng. Des.*, 121: 259-275 (1990).

14. Duffey, R. B., “Nuclear production of hydrogen: when worlds collide”, *International Journal of Energy Research*, 33:126-13 (2009).
15. Richards, M., Shenoy, A., “H2-MHR Pre-Conceptual Design Summary for Hydrogen Production”, *Nuclear Engineering and Technology*, 39:1-8 (2007).
16. Richards, M., Shenoy, S., Brown, L., Buckingham, R., Harvego, E., Peddicord, K., Reza, S., Coupey, J., “H2-MHR pre-conceptual design report: SI-based plant”, *GA, no:A25401, USA*, (1-1)-(1-4) (2006).
17. Richards, M., Shenoy, S., Harvego, E., McKellar, M., Peddicord, K., Reza, S., Coupey, J., “H2-MHR pre-conceptual design report: HTE-based plant”, *GA, no:A25402, USA*, (1-1)-(1-4) (2006).
18. Baldwin, D., Campbell, C., Ellis, M., Richards, M., Shenoy., “MHR Design, Technology and Applications”, *ICENES 2007 Conference*, Türkiye (377-383) (2007).
19. Kapernick, R., “POKE User’s Manual”, *GA, no: CEGA-002928, Rev. N/C, USA*, 1-30 (1993).
20. Southworth, F. H., MacDonald, P. E., Baxter, A. M., Bayless, P. D., Bolin, J. M., Gougar, H. D., LaBar, M., Moore, R. L., Ougouag, A. M., Richards, M. B., Sant, R. L., Sterbentz, J. W., Terry, W. K., “Next Generation Nuclear Plant (NGNP) Project-Preliminary Assessment of Two Possible Designs” *14th Pacific Basin Nuclear Conference*, Hawaii, 1-11 (2004).
21. Ingersoll, D. T., Ott, L. J., Renier, J. P., Ball, S. J., Corwin, W. R., Forsberg, C. W., Williams, D. F., Wilson, D. F., Reid, L., Delcul, G. D., Peterson, P. F., Zhao, H., Pickard, P. S., Parma, E. J., Vernon, M., “Status of preconceptual design of the advanced high-temperature reactor (AHTR)”, *ORNL, no:ORNL/TM-2004/104, USA*, 1-18 (2004).
22. Niessen, Ball, S., Gao, Z., Kugeler, K., Kuzavkov, N., Mejane, A., Hishida, M., Vanheck, A., Brey, L., Cleveland, Kendall, J., “Heat Transport and Afterheat Removal for Gas Cooled Reactors under Accident Conditions”, *IAEA, no:TECDOC 1163, Austria* 104-185 (2000).
23. Simoneau, J. P., Champigny, J., Mays, B., Lommers, L., “Three-dimensional simulation of the coupled convective, conductive, and radiative heat transfer during decay heat removal in an HTR”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 237: 1923-1937 (2007).
24. Haque, H., Feltes, W., Brinkmann, G., “Thermal response of a modular high temperature reactor during passive cooldown under pressurized and depressurized conditions”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 236: 475-484 (2006).
25. Haque, H., Feltes, W., Brinkmann, G., “Thermal response of a modular high temperature reactor during passive cooldown under pressurized and

- depressurized conditions”, *2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, China, 22-24 (2004).
26. Mays, B. E., Woaye-Hune, A., Simoneau, J. P., Haque, H., Lommers, L., “The effect of operating temperature on depressurized conduction cooldown for a high temperature reactor”, *ICAPP’04*, USA, 1-9 (2004).
  27. Woaye-Hune, A., Ehster, S., “Calculation of decay heat removal transient by passive means for a direct cycle modular HTR”, *Proceedings of the Conference on High Temperature Reactors*, Netherlands, 22-24 (2002).
  28. Siccama, N.B., Koning, H., “Afterheat removal from a helium reactor under accident conditions”, *ECN, no:ECN-RX-97-066, Netherlands*, 1-11 (1998).
  29. Li, S., “Parametric thermal-hydraulic studies of HTGR reactor vessel system. consequences on the structure lifetime”, *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 18)*, China, 4311-4325 (2005).
  30. Ball, S., “Sensitivity studies of modular high-temperature gas-cooled reactor (MHTGR) postulated accidents”, *2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, China, 22-24 (2004).
  31. Ball, S., “Sensitivity studies of modular high-temperature gas-cooled reactor (MHTGR) postulated accidents”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 236: 454-462 (2006).
  32. Ball, S., Richards, M., Shepelev, S., “Sensitivity studies of air ingress accidents in modular HTGRs”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 238 (11): 2935-2942 (2008).
  33. Ball, S.J, Forsberg, C.W. “Advanced high-temperature reactor (AHTR) loss-of-forced-circulation accidents”, *2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, China, 22-24 (2004).
  34. Tak, N., Kim, M., Lee, W.J., “Numerical investigation of a heat transfer within the prismatic fuel assembly of a very high temperature reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, 35: 1892-1899 (2008).
  35. Tak, N., Kim, Y., Choi, J. H., Lee, W. J., “Thermo-fluid Investigation on a doubled-side-cooled annular fuel for the prismatic very high temperature gas-cooled reactor”, *Nuclear Engineering and Design*, 238: 2821-2827 (2008).
  36. Sahin, H. M., Akbayir, O., Kocar, C., “Effect of thermal parameters on performance of modular helium reactors”, *International Journal of Energy Research*, in press (2011).
  37. Cioni, O., Marchand, M., Geffraye, F., Ducros, F., “3D thermal-hydraulic calculations of a modular block-type HTR core”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 236:565-573 (2006).

38. Cioni, O., Marchand, M., Geffraye, F., Ducros, F., “3D thermal-hydraulic calculations of a modular block-type HTR core”, *2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, China, 22-24 (2004).
39. Anderson, N., Hassan, Y., Schultz, R., “Analysis of the hot gas flow in the outlet plenum of the very high temperature reactor using coupled RELAP5-3D system code and a CFD code”, *Nucl. Eng. Des. and Des.*, 238 (1): 274-279 (2007).
40. Condie, K. G., McCreery, G. E., McIlroy, H. M., McEligot, D. M., “Development of an experiment for measuring flow phenomena occurring in a lower plenum for VHTR CFD assessment”, *INL, no:INL/EXT-05-00603, USA*, 1-5 (2005).
41. Nakano, M., Tsuji, N., Tazawa, Y., “Conceptual reactor design study of very high temperature reactor (VHTR) with prismatic-type core”, *Journal of Power and Energy Systems*, 2(2): 768-774 (2008).
42. Reza, S. M. M., Harvego, E. A., Richards, M., Shenoy, A., Peddicord, K. L., “Design of an Alternative Coolant Inlet Flow Configuration for the Modular Helium Reactor”, *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 06)*, USA, 1-11 (2006).
43. Kim, M., Lim, H., Lee, W., “A thermal-fluid assessment of a cooled-vessel concept for a VHTR”, *Nuclear Engineering and Design*, 238: 3360-3369 (2008).
44. Smith, B. L., Bieder, U., Graffard, E., Heitsch, M., Henriksson, M., Höhne, T., Komen, E., Mahaffy, J., Moretti, F., Morii, T., Mühlbauer, P., Rohde, U., Scheuerer, M., Song, C. H., Zigh, G., “Assesment of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Problems”, *NEA, no: NEA/CSNI/R(2007)13*, 1-13 (2008).
45. Baldwin, D., Campbell, M., Ellis, C., Richards, M., Shenoy, A., “MHR design, technology and applications”, *ICENES 2007*, Turkey, 377-383 (2007).
46. Talamo, A., Gudowski, W., Venneri, F., “The burnup capabilities of the deep burn modular helium reactor analyzed by the Monte Carlo Continuous Energy Code MCB”, *Annals of Nuclear Energy*, 31: 173-196 (2004).
47. Talamo, A., Gudowski, W., “Performance of the gas turbine-modular helium reactor fuelled with different types of fertile TRISO particles”, *Annals of Nuclear Energy*, 32: 1719-1749 (2005).
48. Talamo, A., Gudowski, W., “Adapting the deep burn in-core fuel management strategy for the gas turbine-modular helium reactor to a uranium-thorium fuel”, *Annals of Nuclear Energy*, 32: 1750-1781 (2005).
49. Kim, K. S., Cho, J. Y., Lee, H. C., Noh, J. M., Zee, S. Q., “Development of a physics analysis procedure for the prismatic very high temperature gas-cooled reactors”, *Annals of Nuclear Energy*, 34 (11): 849-860 (2007).

50. Plukiene, R., Ridikas, D., “Modelling of HTRs with Monte Carlo: from a homogeneous to an exact heterogeneous core with microparticles”, *Annals of Nuclear Energy*, 30: 1573-1585 (2003).
51. Kodochigov, N., Sukharev, Y., Marova, E., Ponomarev-Stepnoy, N., Glushkov, E., Fomicheko, P., “Neutronic features of the GT-MHR reactor”, *Nucl. Eng. Des. and Des*, 222: 161-171 (2003).
52. Lee, K., Kim, K, Cho, J., Song, J., Noh, J., Lee, C., “IAEA GT-MHR benchmark calculations by using the HELIOS/MASTER physics analysis procedure and the MCNP Monte Carlo Code”, *Nucl. Eng. and Des.*, 238: 2654-2667 (2008).
53. Campbell, E. M., Venneri F., “Modular helium-cooled reactor high temperature high burnup high performance”, *General Atomics*, USA, 1-10 (2006).
54. Baxi CB., “Design summary and T-H R&D needs of the GT-MHR workshop on R&D in the areas of thermal fluids and reactor safety”, *General Atomics*, USA, 1-10 (2007).
55. İnternet: OKBM <http://www.okbm.nnov.ru/> (2011).
56. Başkaya, Ş., “Uygulamalı Sayısal Akışkanlar Dinamiği”, *Gazi Üniversitesi, Ankara*, 1-30 (2007).
57. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., “An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method”, *Longman Scientific & Technical*, USA, 1-85 (1995).
58. Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., “Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları”, Kaya, T., *Güven Bilimsel*, İzmir, 399-456 (2008).
59. Incropera, F.P., Dewitt, D.P., “Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri”, Derbentli, T., Genceli, O., Güngör, A., Hepbaşı, A., İlken, Z., Özbalta, N., Özgüç, F., Parmaksızoğlu, C., Uralcan, Y., *Literatür Yayınları*, Türkiye, 1-200 (2001).
60. Wolfe, C., “What is New in ANSYS FLUENT 12.1”, *ANSYS Inc.*, USA (2007).
61. “ANSYS Customer Training Material”, *ANSYS Inc.* USA (2011).
62. “ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide”, *ANSYS Inc.* 1-200 (2009).
63. “ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide”, *ANSYS Inc.* USA (2009).
64. Baysal, E., “Eşmerkezli borulu ısı değiştiricilerinde helisel türbülátörlerin etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-60 (2009).
65. İnternet: National Institute of Standards and Technology “Thermophysical Properties of Fluid Systems” <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid> (2010).

66. Kemal H. Development of a fast running multidimensional thermal-hydraulic code to be readily coupled with multidimensional neutronic tools, applicable to modular High Temperature Reactors, Ph.D. Thesis, *Universität Stuttgart*, 1-55 (2011).
67. Internet: NASA “Viscous Grid Spacing Calculator”  
<http://geolab.larc.nasa.gov/APPS/YPlus/> (2012).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKBAYIR, Ömür  
 Uyuşuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 03.05.1981 Eskişehir  
 Medeni hali: : Evli  
 Telefon : 0 (532) 6106727  
 Fax : 0 (312) 310 99 49  
 e-mail : [omurakbayir@gmail.com](mailto:omurakbayir@gmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yük. Lisans	Osmangazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2006
Yük. Lisans	Osmangazi Üniversitesi/Metalürji Mühendisliği	2005
Lisans	Osmangazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2003
Lise	Demiryolu Meslek Lisesi	1998

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-halen	TCDD/Ankara	Yüksek Mühendis
2004-2006	TCDD/Eskişehir	Mühendis
1999-2004	TCDD/Eskişehir	Vagon Teknisyeni

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- Şahin, H.M., Akbayır, Ö., Alternative Operating Conditions for the Modular Helium Reactor. Energy Conversation and Management, Special Issue on SET2011 (In press).
- Şahin, H.M., Akbayır, Ö., Koçar, C., Effect of Thermal Parameters on Performance of Modular Helium Reactors. International Journal of Energy Research, Special Issue on Developments in Nuclear and Renewable Energy, DOI: 10.1002/er.1949 (In press).

3. Akbayır, Ö., Şahin, H.M., Koçar, C., The Effects of Bypass Flow Fraction, Flow Rate and Inlet Coolant Temperature Variation on Modular Helium Reactor. 2<sup>nd</sup> International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resources. 04-07 July 2009, ANKARA.
4. Akbayır, Ö., Altunok, T., Şahin, H.M., Gaz Türbinli Modüler Helyum Reaktörü (GT-MHR)'nün Yapısı ve Çalışma Prensibi. Nuclear&Renewable Energy Resources Conference with International Participation. 28-29 September 2009, ANKARA.
5. Çelik, O.N., Akbayır, Ö., Gaşan, H., Er, Ü., Aydınbeyli, N., Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abrazif Aşınma Özellikleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi. 2008/1.