

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**IGBT MODÜLLERİNİN SOĞUTMA SİSTEMİNİN
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Yalçın SOLAK**

Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ISI AKIŞKAN

HAZİRAN 2008

**IGBT MODÜLLERİNİN SOĞUTMA SİSTEMİNİN
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Yalçın SOLAK
(503051117)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Lütfullah KUDDUSİ (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. İsmail TEKE (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, IGBT modüllerinin ısı gücü kaybı incelenmiş; akış analizleri, ısı analizleri ve deneysel çalışmalar ile IGBT modülleri için yeni bir soğutma sistemi tasarlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamda, olumlu eleştirileri ve önerileri ile katkıda bulunan Sn. Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

IGBT modüllerinin çalışma yapısı konusundaki değerli görüş ve önerileri için Sn. Erkan ELCİK'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımda teknik destek veren Sn. Fatih KOÇ'a ve prototip üretimi konusunda Sn. Şenel SELEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde her türlü desteği veren Sn. Okan TÜR'e, çalışmam konusunda değerli sohbetleri ve olumlu eleştirileri için Sn. V.Günhan KAYTAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam süresince, her türlü laboratuvar imkanını sunan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'ne, bilgi ve görüşlerini her zaman paylaşan Araç Teknolojileri Grubu çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Değerli Aileme, her zaman için şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2008

Yalçın SOLAK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. IGBT ve IGBT UYGULAMALARI	6
2.1. IGBT Temel Tanımları	6
2.1.1. IGBT Modüllerinin Özellikleri	7
2.1.2. BJT Modüllerinin Özellikleri	7
2.1.3. MOSFET Modüllerinin Özellikleri	7
2.2. IGBT Modüllerin Çalışma Aralıkları ve Kullanım Yerleri	8
2.2.1. IGBT Modüllerinin Güç Kayıplarının İncelenmesi	9
2.2.2. Melcosim Yazılımı İle IGBT Isıl Kayıplarının Analizi	16
3. SEMİKRON SOĞUTMA SİSTEMİ	19
3.1. Semikron Soğutma Sisteminin Yapısı	19
3.2. Semikron Soğutma Bloğunun Malzemesi	22
3.3. Semikron Soğutma Bloğunun Akış Analizleri	23
3.3.1. İki Boyutlu Geometrinin Modellenmesi ve Akış Analizi	25
3.3.2. Türbülans Modelleri	26
3.3.3. İki Boyutlu Modelin Akış Analiz Sonuçları	33
3.3.4. Üç Boyutlu Geometrinin Modellenmesi	34
3.3.5. Üç Boyutlu Modelin Akış Analizleri	36
3.3.6. Üç Boyutlu Modelin Akış Analiz Sonuçları	45
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR-AKIŞ TESTLERİ	48
4.1. Test Sisteminin Oluşturulması	48
4.2. CAD Tasarımı Ve Prototip Üretimi	48
4.3. Akış Transdüserinin Çalışma Yapısı	51
4.4. Ana Hat Debimetresinin Ölçüm Doğruluğunun İncelenmesi	52
4.5. Test Sistemi ve Kanallarda Debi Ölçümü	57
5. YENİ SOĞUTMA SİSTEMİ TASARIMI	64
5.1. Soğutma Sisteminin CAD Tasarımı	64
5.2. Soğutma Sisteminin Üretimi	65
5.3. IGBT Modüllerinin Sisteme Montajı	66

5.4. Soğutma Sisteminin Kanal Yapısı	71
5.5. Isıl Analizler	72
5.5.1. İki Boyutlu Isıl Analizler	72
5.5.2. Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması	74
5.5.3. İki Boyutlu Modelin Isıl Analiz Sonuçları	84
5.5.4. Üç Boyutlu Isıl Analizler	87
5.5.5. Üç Boyutlu Modelin Isıl Analiz Sonuçları	89
6. ELEKTRİK MOTOR SÜRÜCÜSÜNÜN TESTLERİ	91
6.1. NTC Termistörün Bağlantı Noktasının Belirlenmesi	93
6.2. NTC Termistörleri ile Sıcaklık Ölçümü	94
6.2.1. NTC Termistörlerin Özellikleri	95
6.2.2. Termistör Direncinin -Rt Değerinin Okunması	98
6.3. Test Koşulları	99
6.4. Test Sonuçları ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	104
7. SONUÇLAR VE YORUMLAR	106
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ	119

KISALTMALAR

MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistors
DC	: Direct Current
NTC	: Negative Temperature Coefficient
CNC	: Computer Numerical Control
BJT	: Bipolar Transistör
CAD	: Computer Aided Design
k-ω	: Turbulance Kinetic Energy - Specific Dissipation Rate
sst	: Shear Stress Transport
k-ϵ	: Turbulance Kinetic Energy - Turbulance Dissipation Rate
RSM	: Reynolds Stres Model
RANS	: Reynolds Avareged Navier Stokes
CFD	: Computational Fluid Dynamics

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Anahtarlama Periyodunun İncelenmesi 11
Tablo 2.2	Anahtarlama Kayıplarının Karşılaştırılması 16
Tablo 2.3	Isıl Kayıpların Karşılaştırılması 18
Tablo 3.1	k- ω Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model 29
Tablo 3.2	k- ω sst Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model 31
Tablo 3.3	RSM Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model 32
Tablo 3.4	k- ω Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model 33
Tablo 3.5	Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri 33
Tablo 3.6	Akış Debi Değerleri 33
Tablo 3.7	k- ω Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri 38
Tablo 3.8	k- ω Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü 39
Tablo 3.9	k- ω sst Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri 40
Tablo 3.10	k- ω sst Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü 40
Tablo 3.11	k- ω sst Farklı Çıkış Sınır Koşullu Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri 41
Tablo 3.12	Farklı Çıkış Sınır Şartlarına Sahip k- ω sst Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması 42
Tablo 3.13	RSM Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri 43
Tablo 3.14	RSM Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü 44
Tablo 3.15	k- ϵ Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri 45
Tablo 3.16	k- ϵ Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü 45
Tablo 3.17	Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri 46
Tablo 3.18	Akış Debi Değerleri 46
Tablo 3.19	Kanallardaki Yüzde Akış Debi Değerleri 46
Tablo 4.1	Akış Transdüserinin Özellikleri 50
Tablo 4.2	Ana Hat Debimetresinin Ölçüm Doğruluk Değerleri 55
Tablo 4.3	Ana Hat Debimetresinin Okuduğu Değerler ile Akış Transdüserinin Okuduğu Değerlerin Karşılaştırılması 56
Tablo 4.4	Test Sonuçları 60
Tablo 4.5	İki Boyutlu Akış Analiz Sonuçları ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması 61
Tablo 4.6	İki Boyutlu Akış Analiz Sonuçlarının Test Sonuçlarına Göre Hata Yüzdeleri 62

Tablo 4.7	Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçları ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	62
Tablo 4.8	Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçlarının Test Sonuçlarına Göre Hata Yüzdeleri	63
Tablo 5.1	Orta Blok IGBT Modül Yüzeylerinin Eğrilik Gereklere	67
Tablo 5.2	TC 5021 Termal Isı İletim Malzemesi Fiziksel Özelliklerinin Değerleri	69
Tablo 5.3	Ortalama Isı Gücü Kaybı ve Isı Akısı Sınır Şartı	74
Tablo 5.4	İki Boyutlu Modelin Sınır Şartlarının Değerleri	83
Tablo 6.1	Test Sistemi Verileri	100
Tablo 6.2	NTC Termistörleri İle Okunan Sıcaklık Değerleri	100
Tablo 6.3	Ortalama Isı Gücü Kaybı-600 A	101
Tablo 6.4	Ortalama Isı Gücü Kaybı-200 A	102
Tablo 6.5	Kanal İçerisindeki Akışkanın Ortalama Sıcaklık Değerleri	103
Tablo 6.6	Test Koşullarının Isıl Sınır Şartları	104
Tablo 6.7	Test Sonuçları ile Isıl Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	105
Tablo 7.1	Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması	108
Tablo 7.2	DeneySEL Çalışmalar-Akış Testleri	108
Tablo 7.3	Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçlarının Test Sonuçlarına Göre Hata Yüzdeleri	109
Tablo 7.4	IGBT Modüllerinin Isı Gücü Kayıp Analizi-600 A	111
Tablo 7.5	Elektrik Motor Sürücüsü Testinin Çalışma Koşulları	113
Tablo 7.6	NTC Termistörleri İle Okunan Sıcaklık Değerleri	113
Tablo 7.7	Test Sonuçları ile Isıl Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	114

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : IGBT Yarı İletken Anahtarların Kullanım Yerleri ve Yüzdeleri	1
Şekil 2.1 : IGBT Modülü CM600DY-12NF	6
Şekil 2.2 : IGBT Katı Modeli	7
Şekil 2.3 : Alanları	8
Şekil 2.4 : Geniş Bir Zaman Aralığında Görülen Anahtarlama Şekli	9
Şekil 2.5 : CM600DY-12NF IGBT Modülünün Anahtarlama Zamanları	10
Şekil 2.6 : Bir Periyot Aralığında Görülen Anahtarlama Şekli	11
Şekil 2.7 : Satürasyon Gerilim Değeri	12
Akım ve Gerilim Eğrileri ve Noktasal Çarpımlarıyla Elde Edilen	
Şekil 2.8 : Güç Eğrisi	13
Şekil 2.9 : Kapı Direncine Bağlı Anahtarlama Kaybı	15
Şekil 2.10 : Melcosim Program Görüntüsü	17
Şekil 3.1 : Semikron Kontrol Sistemi	19
Şekil 3.2 : Semikron Soğutma Bloğu-Ön ve Orta Blok	20
Şekil 3.3 : Semikron Kontrol Sistemi CAD Modeli	21
Semikron Soğutma Bloğu-Orta Blok ve Kanal İçerisindeki	
Şekil 3.4 : Yaylar	21
Şekil 3.5 : Semikron Soğutma Bloğu CAD Modeli-Orta Kesit	22
Şekil 3.6 : Semikron Soğutma Bloğu-Orta Kesit-Kanalların Gösterimi	24
Şekil 3.7 : Semikron Soğutma Bloğu-Orta Kesit Teknik Resmi	25
Şekil 3.8 : Gambit Programında Oluşturulan İki Boyutlu Model	26
k- ω Türbülans Modeli ile Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız	
Şekil 3.9 : Vektörleri	29
k- ω sst Türbülans Modeli ile Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız	
Şekil 3.10 : Profilleri	30
RSM Türbülans Modeli İle Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız	
Şekil 3.11 : Profilleri	31
k- ϵ Türbülans Modeli İle Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız	
Şekil 3.12 : Profilleri	32
Şekil 3.13 : Üç Boyutlu Akış Analizi İçin Akış Kanallarının Katı Modeli	34
Şekil 3.14 : Gambit Programında Oluşturulan Ağ Yapısı	34
Gambit Programında Üç Boyutlu Modelin Ağ Yapısının	
Şekil 3.15 : İncelenmesi	35
Şekil 3.16 : Eş Açılı Eğrilik Yönteminin Açıklanması	36
Debi değerlerinin Hesaplandığı Yüzeylerin Kanallar Üzerindeki	
Şekil 3.17 : Yeri	37
k- ω Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde	
Şekil 3.18 : Edilen Hız Profilleri	38
k- ω sst Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde	
Şekil 3.19 : Edilen Hız Profilleri	39

	k- ω sst Farklı Çıkış Sınır Koşullu Türbülans Modeli İle Üç	
Şekil 3.20	: Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız Profilleri RSM Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde	41
Şekil 3.21	: Edilen Hız Profilleri k- ω Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde	43
Şekil 3.22	: Edilen Hız Profilleri	44
Şekil 4.1	: Test Prototipinin Katı Modeli	49
Şekil 4.2	: Test Prototipinin Teknik Resmi	50
Şekil 4.3	: Akış Transdüserinin Boyutları	51
Şekil 4.4	: Test Prototipinde Kullanılan Akış Transdüseri Ana Hat Debimetresinin Ölçüm Doğruluğunun İncelenmesi için	51
Şekil 4.5	: Kurulan Test Sistemi	52
Şekil 4.6	: Ana Hat Debimetresi Test Sistemi	53
Şekil 4.7	: Ölçüm Sırasında Görüntülenen Frekans Değeri Ana Ha Debimetresinin Akış Yüzdesine Bağlı Hata Yüzdesi	54
Şekil 4.8	: Eğrisi	57
Şekil 4.9	: Semikron Soğutma Bloğu Prototipi Test Sistemi	58
Şekil 4.10	: Test Prototipi-Akış Transdüseri Birinci Kanala Takılı	59
Şekil 4.11	: Test Prototipi-Akış Transdüseri İkinci Kanala Takılı	60
Şekil 5.1	: Soğutma Sistemi Parçaları-Arka Blok-Orta Blok-Ön Blok	64
Şekil 5.2	: Tasarlanan Yeni Soğutma Sisteminin Katı Modeli	64
Şekil 5.3	: Arka Blok-Orta Blok-Ön Blok Yeni Soğutma Sisteminin ve IGBT Modüllerinin Montaj Edilmiş	65
Şekil 5.4	: Görüntüsü Soğutma Bloklarının Yüzeylerinin İşlenme Kalitesi-Yüzey	66
Şekil 5.5	: Eğriliğinin Önemi IGBT Modüllerin Soğutma Bloğuna Montajı-Civataların Montaj	66
Şekil 5.6	: Sıralaması Termal Direncin IGBT Modülleri Yüzeyi ve Soğutma Yüzeyi	67
Şekil 5.7	: Arasında Oluşması Termal Isı İletim Malzemesinin, Yüzey Üzerinde Sürülme	68
Şekil 5.8	: Kalınlığına Bağlı Olarak Oluşturduğu Direnç	70
Şekil 5.9	: Termal Malzemenin Sürülme Yüzeyleri Soğutma Sistemi, IGBT Modülleri, Kartları Monte Edilmiş	70
Şekil 5.10	: Elektrik Motor Sürücüsü	71
Şekil 5.11	: Soğutma Sisteminin Kanal Yapısı	72
Şekil 5.12	: Sınır Koşullarının Girildiği İki Boyutlu Modelin Kenarları	73
Şekil 5.13	: Yatay Levhadan Doğal Taşınım İle Isı Geçişi	81
Şekil 5.14	: Kanal Numaralarını İçeren Sınır Şartları	83
Şekil 5.15	: Gambit Programında Oluşturulan Ağ Yapısı	84
Şekil 5.16	: Soğutma Sistemi Orta Kesit Üzerinde Sıcaklık Dağılımı Soğutma Sistemi Orta Kesit Üzerinde Sıcaklık Dağılımı-Sol	85
Şekil 5.17	: Köşe	85
Şekil 5.18	: CM600DY-12NF IGBT Modülünün Termal Direnci	86
Şekil 5.19	: IGBT Modülü İçerisinde Isı Geçişinin Modellenmesi	86
Şekil 5.20	: Gambit Programında Oluşturulan Üç Boyutlu Modelin Ağ Yapısı	88
Şekil 5.21	: Model Üzerindeki Ağ Elemanlarının İncelenmesi	88
Şekil 5.22	: Soğutma Sistemi Üzerinde Sıcaklık Dağılımı	89
Şekil 5.23	: İki Orta Düzlem Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı	90
Şekil 6.1	: Elektrik Motor Sürücüsü Test Sistemi	91

Şekil 6.2	: Test Edilen Elektrik Motor Sürücüsü	92
Şekil 6.3	: Faz Akımlarının Okunması ve Kaydedilmesi	92
Şekil 6.4	: Sıcaklık Ölçümleri İçin Önerilen Noktalar	93
Şekil 6.5	: NTC Termistörlerinin Soğutma Bloğu Üzerindeki Yeri	94
Şekil 6.6	: NTC Termistörlerin Sıcaklığa Bağlı Direnç Değişimleri	96
Şekil 6.7	: Logaritmik Skalada Sıcaklık-Direnç Değişimi	96
Şekil 6.8	: Farklı B Değerlerinin Termistör Direncine Etkisi	97
Şekil 6.9	: Termistör Direncini Ölçmek İçin Oluşturulan Devre	98
Şekil 6.10	: IGBT Modüllerin Isı Gücü Kaybı Test Koşulları Altında Soğutma Sistemi Üzerinde Sıcaklık	101
Şekil 6.11	: Dağılımı k- ω sst Türbülans Modeli ile Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız	104
Şekil 7.1	: Profilleri	107
Şekil 7.2	: Yeni Soğutma Sistemi-Ön Blok-Orta Blok-Arka Blok	110
Şekil 7.3	: Soğutma Sistemi Yüzeyinde Sıcaklık Dağılımı-600 A	112
Şekil 7.4	: Soğutma Sistemi Yüzeyinde Sıcaklık Dağılımı-200 A	114

SEMBOL LİSTESİ

- V_{ce}** : Besleme gerilimi
I_c : Yükleme durumuna göre çekilen akım
P_{SS} : İletim güç kaybı
u' : Türbülans hız değerlerinin salınımlarının kareleri toplamının ortalamasının karekökü
U : Ortalama hız değeri
θ_{max} : Yüzeydeki veya eleman içerisindeki en büyük açı değeri
θ_{min} : Yüzeydeki veya eleman içerisindeki en küçük açı değeri
θ_e : Eş açılı yüzeyin veya elemanın standart açısı

IGBT MODÜLLERİNİN SOĞUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI

ÖZET

IGBT- (insulated gate bipolar transistors) İzole Kapılı Bipolar Transistörler; gelişmiş teknolojileri ile hibrid elektrikli araç içersinde elektrik motoru kontrol sistemi gibi sistemlerde anahtarlama elemanı olarak kullanılır. Yüksek güç sistemleri, anahtarlama akımının 100–1000 A arasında olduğu, gerilimin DC 1000 V değerlerine ulaştığı sistemlerdir. Hızlı açma-kapama, hızlı anahtarlama zorlu dinamik durumlara neden olur. Güç devresi, süpürücü kondansatörler, anahtar sürücüsü oldukça yüksek di/dt ve dv/dt gerilmelere maruz kalır. Uygun mekanik tasarım, IGBT modüllerinin verimli ve güvenilir çalışması için zorunludur. IGBT modülleri içeren kontrol sistemleri çalışma esnasında iletim ve anahtarlama kayıplarına sahiptir. Bu kayıplar sebebiyle üretilen ısı, modül içersindeki çiplerden çevreye bir soğutma bloğu ile aktarılmalıdır. Güç modüllü sistemlerde uygun termal sistem kullanılmazsa aşırı ısınma yanma ve patlama ile sonuçlanır.

IGBT modüllerinin verimli ve güvenilir çalışabilmesi, oluşan ısının IGBT modüllerinden uzaklaştırılmasına bağlıdır. Birçok uygulamada modülün maksimum kullanılabilir çıkış gücünü termal sistemin tasarımı limitler. Bu sebeple istenen ve bu çalışmada amaçlanan, IGBT modülleri içinde düşük sıcaklık sağlayabilecek ve IGBT çıkışında maksimum kullanılabilir gücü verebilecek soğutma sistemini tasarlamaktır.

Bu çalışmaya, IGBT kullanılan kontrol sistemlerinden semikron firmasına ait sistem incelenerek başlanmıştır. Bu sistemin soğutma bloğunun şeffaf bir malzeme olan “pleksi glass” dan akış testlerinin yapılabilmesine olanak sağlayan bir prototipi yapılmıştır. Yapılan CFD analizleri ve testleri sonucunda yeni bir soğutma bloğu tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni soğutma sistemi, DC fırçasız elektrik motor sürücüsünde IGBT modüllerinin altında kullanılmıştır. Isıl analizler, Fluent programında enerji denkleminin çözdürülmesi ile yapılmıştır. Isıl testler, elektrik motorunun dinamometre ile yüklenmesini ve sürücü ile elektrik motorunun kontrolünün yapılmasını içermektedir. Soğutma bloğu üzerinden NTC termistörler ile su giriş ve çıkışında termoelemanlar ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Çalışmanın her iki test aşaması, akış analiz sonuçları ve ısıl analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, uygulamaya yönelik tasarlanan soğutma bloğu; Cad tasarımı, prototip üretimi, akış testleri ve ısıl testler sonucunda hibrid elektrikli araç içersinde DC fırçasız sürekli mıknatıslı elektrik motor sürücüsünün soğutma bloğu olarak IGBT modüllerinin altında kullanılmıştır.

İleri dönemlerde planlanan çalışmalarda araç içersinde kullanılacak kontrol sisteminin soğutma bloğunu daha verimli hale getiren, soğutma kanallarının iç yüzeyine yiv açma ve yay koyma, soğutma bloğu malzemesinin ısı iletim katsayısının belirlenmesi ve en uygun alüminyum alaşımın kullanılması, ile araç içersinde donma noktasının düşürülmesini sağlayan ve antifriz olarak bilinen su-

glikol iki fazlı akışını içeren sistemin akış analizinin ve ısıl analizinin modellenmesi ve tasarımı önerilmiştir.

COOLING SYSTEM DESIGN OF IGBT MODULES

SUMMARY

IGBTs (insulated gate bipolar transistors), thanks to their advanced technology, are used as switches in electric motor control system of hybrid electric vehicles. The high power systems have a switching power between 100 and 1000 amps and a voltage level of up to 1000 V. Fast switching and power cycling causes a straining dynamic behavior. The power circuit, the sweep capacitors, and the switch driver are subjected to high di/dt and dv/dt stresses. An appropriate mechanical design is a must to ensure efficient and reliable operation of IGBT modules. The control systems that contain IGBTs suffer from conduction and switching losses during their operation. The heat generated thereby must be transferred from the devices to the environment by the use of a cooling block. The failure to use an appropriate thermal agent in such power module systems may result in overheating, burnout and, in extreme cases, explosion.

The efficient and reliable operation of IGBTs depends on the removal of the generated heat by said devices. In numerous applications the design of the thermal system limits the maximum power output of the entire module. Therefore it is the general desire and the aim of this work to design a cooling system that will allow maximum IGBT output power while keeping the interior temperature at acceptable levels.

In the first part of this work an IGBT-based control system, namely Semikron's system, has been examined. A prototype of the cooling block of Semikron's system has been constructed by using the transparent plexiglass to enable the conduction of flow tests. Following the CFD analyses a new IGBT cooling block was designed. The newly-designed cooling system was placed under the brushless electric motor driver of the IGBT modules. The heat transfer analysis has been accomplished by solving the energy equation in Fluent. The thermal tests consisted of loading the electric motor on a dynamometer, and controlling the electric motor by using its driver. The temperature measurements have been performed on the cooling block, water inlet and outlet using an NTC. The two test stages of the work have been compared with the flow- and heat analysis results. Finally, following the CAD design, prototype production, flow tests and thermal analysis, the application-friendly designed cooling block has been installed under the IGBTs to ensure proper cooling of the DC brushless continuously magnetized electric motor driver of the hybrid vehicle.

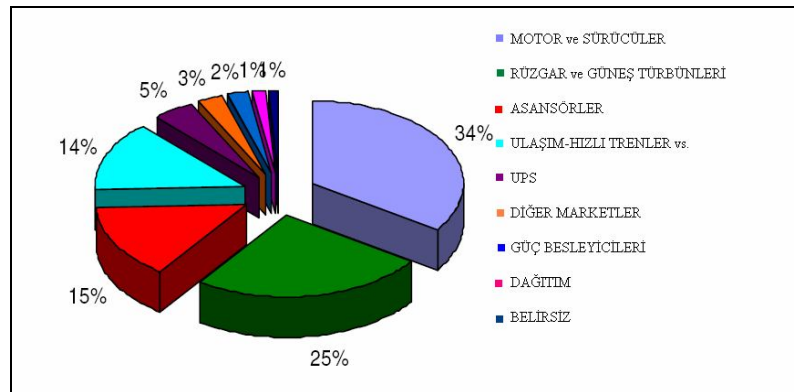
The proposed future work consists of threading the inner walls of the cooling channels and placing spring coils therein; determining the thermal conductivity of the cooling block material and utilizing the best-suited aluminium alloy for the job; and designing / modelling the thermal and fluid flow analyses of the two-phase flow of water-glycol mixture, a.k.a. anti-freeze that lowers the freezing point in the system.

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle beraber, elektronik cihazlar küçülmekte ve insan yaşamını daha kolay ve konforlu bir hale getirmektedir. Bu sistemler günlük hayat içerisinde her alanda kullanılabilmektedir. Bu gün elektronik cihazların olmadığı bir dünyayı hayal etmek zordur, çok basit dijital bir saatten, araç içerisindeki sistemlere kadar değişik formlarda yer almaktadırlar.

Güç elektroniğinde elektronik cihazların temelini entegre devreler oluşturur. Entegre devreler; 1980'li yıllarda geliştirilen metal oksit yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) veya yalıtımlı iki kutuplu kapı transistörleri (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistors) ile üretilir [1]. Diğer anahtarlama yapan yarı iletkenlerle karşılaştırıldığı zaman MOSFET ve IGBT'ler; kısa devre durumunda dahi aktif açma kapama, basitçe kontrol edilebilme, düşük anahtarlama kayıplarıyla yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilme kabiliyetlerine sahiptirler [2]. MOSFET ve IGBT'lerin üretimi basittir, bu günkü teknolojiyle mikro elektronikte rahatlıkla yapılabilir.

IGBT'lerin ve MOSFET'lerin hızlı gelişmelerin asıl sebebi, güç elektroniğinin yeni pazarlara büyüyerek açılması, uygulama alanlarının hızla artmasıdır. Hibrid araç sistemlerinde, motor ve sürücü kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 1.1'de IGBT yarı iletken anahtarların kullanım yerleri ve yüzdeleri görülmektedir [3].



Şekil 1.1: IGBT Yarı İletken Anahtarların Kullanım Yerleri ve Yüzdeleri

Kullanılan gerilim akım değerleri bakımından IGBT'ler 2500V gerilim değerlerine kadar 1000A akım değerlerini anahtarlayabilmektedirler [2]. IGBT'ler, MOSFET'lere göre daha geniş bir gerilim akım alanında kullanılabilirler.

Hibrid elektrikli araçlarda ve Şekil 1.1'de görüldüğü üzere hızlı trenler ve asansörler gibi güvenirlik seviyesi yüksek olması beklenen sistemlerde kullanılan kontrol sistemlerinden ve sürücülerinden; yüksek güvenilirlik ve verimlilik beklenmektedir [4]. Bu tez çalışmasında tasarlanan IGBT soğutma sistemi, bir elektrik motorunu sürmek amaçlı hibrid elektrikli araç için tasarlanan kontrol sistemi içerisinde kullanılmıştır.

IGBT modülleri nominal 300V doğru akım (DC – Direct Current) bara gerilimi ile beslenmektedirler. Sürekli mıknatıslı elektrik motoru, dinamometre tarafından belirlenen hız ve moment noktalarında yüklenir, sürücü (kontrol sistemi) motoru istenen hıza set eder, karşı konulan moment isteği de baradan çekilen akımla karşılanır. Motorun sürülmesinde, 5-20 kHz zaman aralıkları ile motor fazlarının beslenmesi gerekir, faz akımları belirtilen aralıktaki sabit bir frekans değerinde anahtarlanır. Üç fazlı bir motorda, üç adet IGBT modülü, akımın anahtarlanmasını sağlar. Akımın akması sırasında, iletim ve anahtarlama kayıpları oluşur, IGBT modülü içinde oluşan ısının sistemden uzaklaştırılması soğutma bloğu içerisinde olur. Bu tez çalışmasının konusu, değerlendirme (benchmark) alışmaları sırasında görülen soğutma sisteminden daha verimli, çıkış gücü ve anahtarlama frekansı daha yüksek, IGBT modülü içerisinde düşük sıcaklık ve IGBT çıkışında maksimum kullanılabilir gücü verebilecek soğutma sistemini tasarlamaktır.

IGBT modülü içerisinde düşük sıcaklık, üretilen ısının soğutma sistemi tarafından çekilebilmesi ile mümkündür. Üretilen ısının iç ortama yayılması devre elemanlarının sıcaklığında artışa sebep olacağından istenmeyen bir durumdur. Tasarımın ilk aşamasında, yurt dışı ürünler incelenmiştir. İncelenen benzer ürünlerde, Mitsubishi firmasının ve Semikron firmasının yüksek gleri anahtarlayabilen ürünlerinde, sıvı soğutmalı alüminyum alaşımlı blok sistemler kullandıkları belirlenmiştir.

Tez çalışmasının başlangıcı, incelenen yurtdışı kontrol sistemlerinden Semikron firmasına ait soğutma bloğunun daha iyisinin yapılabileceği düşüncesidir. Semikron

firmasının ürünü, kontrol sistemi demonte edilmiştir, soğutma bloğu içyapısı incelenmiştir.

Soğutma bloğu içerisinde bir kanaldan altı kanala ayrılan akış sistemi mevcuttur, bu durumun her kanalda farklı debilere sebep olacağı düşünülmüştür. Farklı debiler kanal içersinde farklı ortalama kanal sıcaklıklarına sebep olacağından, az debi geçen kanalın ortalama sıcaklığı yüksek olacaktır. Bu kanal üzerindeki bölgenin yüzey sıcaklığı diğer yüzeylere oranla yüksek olacaktır. Blok üzerinde homojen sıcaklık dağılımı olmaması, kontrol sistemi içinde bu blok üzerinde çalışan IGBT modüllerinin farklı sıcaklıklar altında çalışmasına neden olur. Bu tip kontrol sistemlerinde, sistemi kontrol eden kart, çalışma limitlerini güvenilirlik sınırları içerisinde belirler. Çalışma limitleri; besleme gerilimin belli bir aralıkta olmasıdır, sistemden çekilen akımın maksimum değeridir, soğutma bloğu üzerinden iki noktadan ölçülen sıcaklık değerinin maksimum değeri geçmemesidir. Kontrol kartı, limit değerlerinin aşılması halinde kontrol edilen elektrik motorunu kapatır.

Kontrol kartına sıcaklık bilgisini ileten negatif sıcaklık katsayılı (NTC - Negative Temperature Coefficient) termistörler açısından iki durum söz konusudur:

- 1.si NTC termistörlerinin bağlı olduğu bölge altından geçen kanaldaki debi miktarı diğer kanallara göre fazladır ve yüzey sıcaklığını düşürür. Termistörlerin okuduğu sıcaklık değeri, diğer bölgelerdeki IGBT modüllerinin altında oluşan sıcaklıktan daha düşüktür ve bu durumda bu IGBT modülü altında oluşan sıcaklık değeri limit sıcaklık değerini geçse de kart elektrik motorunun kapatmayacaktır. IGBT modülleri aşırı ısınma sonucu yanabilir, güvenilir olmayan bir durumdur.
- 2. si NTC termistörlerinin bağlı olduğu bölge altındaki kanaldan geçen debi miktarı diğer kanallara göre azdır ve yüzey sıcaklığını artırır, termistörlerin okuduğu sıcaklık değeri, diğer bölgelerdeki IGBT modülleri altında oluşan sıcaklıktan daha yüksektir ve bu durumda kontrol kartı sadece yüksek sıcaklık değerini görerek sistemi kapatmaya yönelecektir. Maksimum çıkış gücü, bir bölgedeki sıcaklık durumuna göre belirlenmektedir. Yüzey üzerinde homojen olmayan sıcaklık bölgeleri vardır.

IGBT modülleri altındaki kanallardan eşit debide akışkan geçmesi sağlanıp, homojen sıcaklık yüzeylerde sağlandığında, yüksek sıcaklık okunan bölgede ortalama sıcaklık

değerine yaklaşacak, her IGBT modülü altında sıcaklık aynı olacaktır ve bu durumda sistem maksimum çıkış gücünü verebilir.

Bu incelemeler sonucunda, bu düşüncelerin doğruluğunu test etmek amaçlı, yazılımsal ve deneysel iki çalışma yapılmıştır.

Yazılımsal programlardan beklenen gerçek sistemin ölçülerinde iki boyutlu ve üç boyutlu modeli oluşturmak ve soğutma bloğu içerisindeki akışı ve soğutma bloğu yüzeylerindeki sıcaklık dağılımını modelleyebilmektir. Yazılımsal analiz çalışmalarında Solidworks, Gambit, Fluent ve Melcosim programları kullanılmıştır. Solidworks programı, modeli ve üretimi yapılan tüm parçaların iki boyutlu ve üç boyutlu modellerini oluşturmak, parçaların teknik resimlerini çizdirmek için kullanılmıştır. Akış ve ısı analizi yapılmak istenen modellerin, üç boyutlu katı modellenmesi Solidworks programında yapılmıştır.

Gambit programı, modellerin iki ve üç boyutlu geometrilerinde ağ yapısı (mesh – ağ yapısı) oluşturmak için kullanılmıştır. Fluent programı ile bir dairesel kesitten gelen akışın geniş bir dikdörtgenel hacimli bir bölgeye yayılması ve bu bölgeden kanallara ayrılışı analiz edilmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu geometriler için farklı türbülans modelleri ile akış analizi yapılmıştır. Fluent programı ile amaçlanan her kanal içerisinde oluşan hız profillerinin kanal kesit alanında integre edilmesi ile hacimsel akışkan debisini bulmaktır. Bulunan sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar, yapılan akış analizlerinin ve ısıl analizlerin gerçek sonuçlara ne kadar yakınsadığını görmek amaçlıdır. Deneysel çalışmalardan ilki, soğutma bloğu içerisindeki her kanaldan geçen debiyi ölçmek için yapılmıştır. Fiziksel olarak kanallar içersinden akış ölçülebilmek mümkün olmadığından soğutma sisteminin akış yapısını birebir modelleyen bir prototip test bloğu yapılmıştır. Prototip testinin deneysel çalışmaları sonucunda her kanaldan birbirinden farklı debilerde akışkan geçtiği görülmüştür.

Bu çalışmanın sonucunda, kontrol sistemi içersinde bir kanaldan altı kanala ayrılan akışkanın hacimsel debi olarak azaldığı ve farklı debilerde kanallara dağılmasının soğutulan IGBT modülleri yüzeyleri altında farklı sıcaklık değerleri oluşturması beklenir.

Modellenen ve deneysel çalışmalar ile incelenen soğutma sisteminden farklı, blok içerisinde akış bölünmesine sebep olmayan yeni bir soğutma sistemi tasarlanmıştır.

Yeni tasarlanan soğutma bloğunda, akış bölünmesi ile farklı debilerin kanallar içerisinde oluşmamasını sağlamak amaçlanmıştır. Tek bir kanalı soğutma bloğu içinde dolaştırmak tasarımın ilk düşüncesidir. Tek bir kanal, tek bir debi demektir. Bu amaçla yeni soğutma sistemi üç parçadan üretilmiştir. Ön ve arka bloklar u şeklinde dönüş bölümlerini içermektedir ve orta blok ısı yükünün akışkana aktarıldığı bloktur. Sızdırmazlık dairesel kesitli contalar (o-ring) ile sağlanmıştır. Malzeme sert alüminyumdur, tüm parçalar bilgisayar ile sayısal kontrol yapan (CNC – Computer Numerical Control) parça işleme tezgahında işlenmiştir.

Soğutma sisteminin tasarımında en önemli parametre, ortaya çıkan ısı yüküdür. Isı yükünü hesaplayabilmek için, IGBT modüllerinin çalışma prensibi incelenerek ısı kayıplarının hesabı yapılmıştır.

Üretilen yeni soğutma sistemi ile hesaplanan ısı yükü altında yazılımsal ve deneysel çalışılmıştır. Fluent programında enerji denklemi çözdürülerek bloğun iki boyutlu olarak orta kesitinde, üç boyutlu olarak tüm yüzeylerinde ve iç hacminde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Melcosim programı, tasarlanmış soğutma bloğunun ısı analizinin yapılabilmesi için, IGBT modülleri içerisinde oluşan ısı kaybının hesabı sırasında kullanılmıştır. Melcosim programı ile hesaplanan ısı gücü kaybı, kullanılan IGBT modülünün teknik verileri ile hesaplanan güç kaybı ve akım-gerilim grafiğine göre hesaplanan güç kayıplarının ortalamasının alana sabit yayıldığı kabulü ile ısı akısı, Fluent programında yapılan analizlerde sınır koşulu olarak kullanılmıştır.

Tasarlanan yeni soğutma sistemi ve elektrik motor sürücüsünün deneysel çalışmaları Arçelik Çerkezköy işletmesinde, elektrik motorunun elektrik motor dinamometresi ile 70 Nm moment değerinde yüklenmesi, elektrik motor sürücüsü ile 3000 rpm hızda sürülmesiyle sürekli çalışma eğrisi üzerinde yapılmıştır. Sıcaklık değerleri, sistem yüzeyine bağlı iki NTC termistöründen test süresi boyunca okunmuştur.

Noktasal olarak ölçülen deneysel sıcaklık değerleri ile yazılım ile hesaplanan yüzey üzerindeki aynı noktadaki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. IGBT ve IGBT UYGULAMALARI

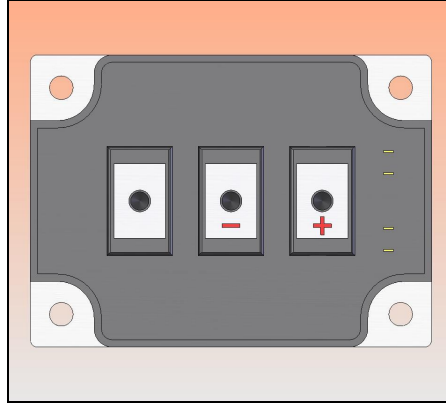
Bu bölüm, IGBT temel tanımlarını ve ısı kayıplarının hesaplanmasını içerir.

2.1 IGBT Temel Tanımları

“Insulated Gate Bipolar Transistor” kelimelerinin baş harflerinden oluşan bu elektronik devre gerilim kontrollü anahtarlama elemanıdır. Elektrik motor sürücüsü sisteminde kullanılan ve bu tezde IGBT modülü olarak bahsedilen modül Şekil 2.1’de görülmektedir. Mitsubishi firmasının CM600DY-12NF kodlu, 600 V besleme gerilimi altında, 600 A akımı anahtarlayabilen modüldür. Kontrol edilen sistemde, sürerken MOSFET gibi, voltaj kontrollü iş yaparken iki kutuplu transistör (BJT - bipolar transistör) gibi davranır. Açma (ON) ve kapama (OFF) durumları kontrol edilir [5]. IGBT modülünün bilgisayar destekli tasarımı (CAD – Computer Aided Design) Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.1: IGBT Modülü CM600DY-12NF



Şekil 2.2: IGBT Katı Modeli

2.1.1 IGBT Modüllerinin Özellikleri

- Sahip olduğu üstün karakteristik özellikleri ile çoğu uygulamanın daha ekonomik şekilde olmasını sağlamaktadır.
- İyileştirilmiş performans özellikleri ile birçok uygulamada diğer güç anahtarlarının yerini almıştır.
- Sürme devresi tıpkı MOSFET gibi, ON-durumu karakteristiği ise BJT Güç transistörleri gibidir.
- Yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilir ve BJT'nin yerine pek çok yüksek güçlü uygulamada kullanılabilirler.
- Bir MOSFET ve Bir BJT'nin tümleşik bağlanmasıyla oluşturulmuş anahtarlama elemanıdır.

2.1.2 BJT Modüllerinin Özellikleri

- Akım kontrollü olarak çalışmaktadır.
- Akım kazancı küçüktür.
- Sürme devreleri oldukça karışık bir yapıya sahiptir.

2.1.3 MOSFET Modüllerinin Özellikleri

- MOSFET'leri sürmek için çok küçük değerli kapı (gate) gerilimi kullanılmaktadır.
- Giriş empedansı çok büyüktür.
- Anahtarlama hızı iyileştirilmiştir.

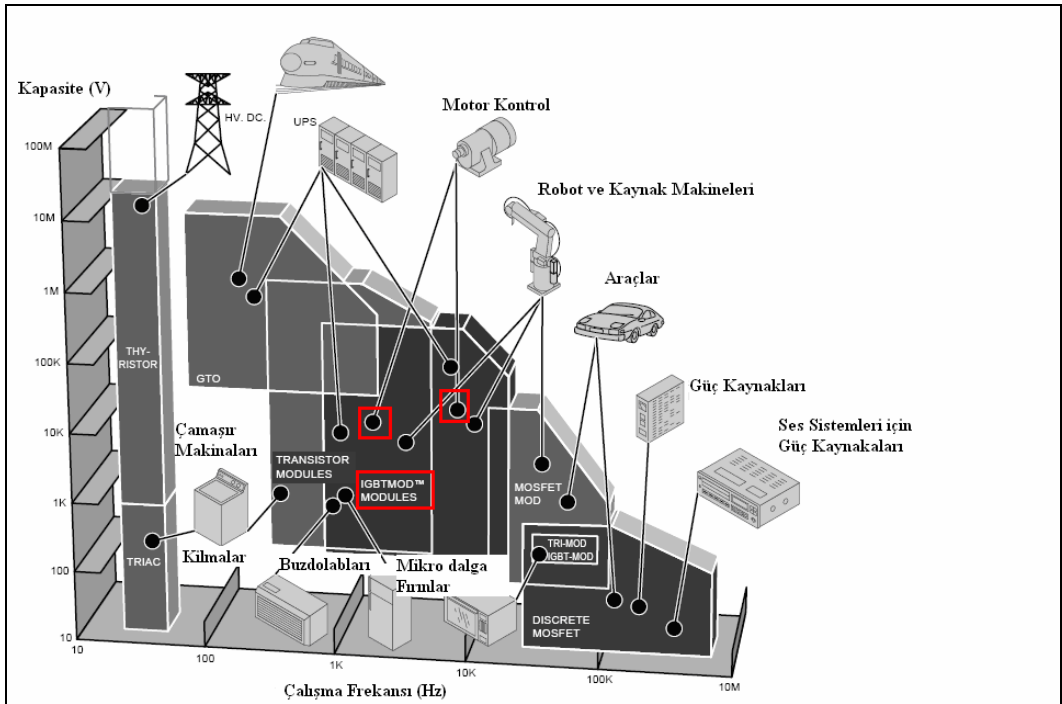
- Kırılma gerilimine yakın noktadaki akım doymaları anahtarlama kayıplarını kabul edilen sınırların dışına itmektedir.

2.2 IGBT Modüllerin Çalışma Aralıkları ve Kullanım Yerleri

IGBT modülleri, BJT ve MOSFET sistemlerinin birbirine entegre edilmesidir. Her iki güç anahtarının en iyi özelliklerini kullanır.

BJT'ler düşük gerilim düşüşleri ile yüksek akım yoğunluklarını anahtarlayabilirler. Anahtarlama frekansları düşüktür, 10 kHz frekans değerine kadar 500 ile 1000 A akım değerlerini anahtarlayabilirler. MOSFET'lerin anahtarlaması oldukça basittir. 1 MHz frekans hızında 100 A akım değerlerine kadar anahtarlama yapabilirler. IGBT'ler, MOSFET ve BJT'nin kesişim bölgesini oluşturmaktadır. MOSFET'e göre anahtarlayabildiği akım değeri yüksektir, BJT'ye göre anahtarlama frekansı yüksektir.

BJT ve MOSFET'in aynı yarı iletken malzeme içerisinde üretilmesi ile daha güçlü bir anahtarlama elemanı oluşturulmuştur. IGBT'lerin çalışması BJT transistörlerle benzerlik gösterir, sürülmesi MOSFET'lerde olduğu gibi kapı (gate) geriliminin ayarlanması ile gerçekleştirilir.



Şekil 2.3: IGBT, MOSFET ve Diğer Anahtarlama Modüllerinin Kullanım Alanları

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, IGBT modülleri 1 kW güç değerinden, 1 MW güç değeri aralığında çalışabilir, 1 kHz'den 30 kHz'e kadar anahtarlama yapılabilir. Bu bölge içerisinde IGBT modülleri; motor kontrolünde, robot kolları kontrolünde, kaynak makinelerinde, buzdolaplarında kullanılmaktadır [6].

2.2.1 IGBT Modüllerinin Güç Kayıplarının İncelenmesi

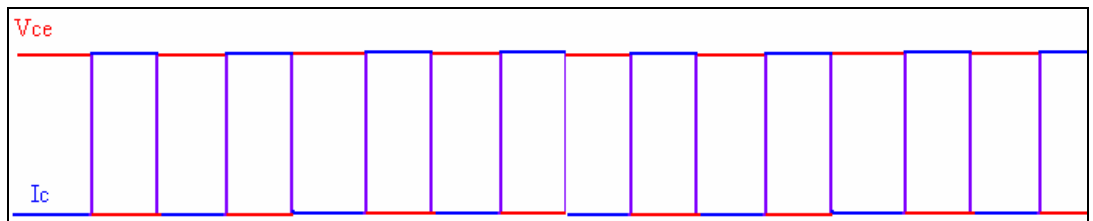
Güç modüllerinde, akım iletimi sırasında iletim güç kayıpları ve anahtarlama dolayısıyla anahtar açma-kapama güç kayıpları meydana gelir [7]. Bu kayıplar sonucu üretilen ısı, soğutma sistemi tarafından IGBT modüllerinden uzaklaştırılır.

Termal tasarımda ilk adım, toplam güç kayıplarını hesaplamaktır. IGBT modülleri içeren kontrol sistemlerinde çok önemli iki ısı kaynağı, iletim kayıpları ve anahtarlama kayıplarıdır.

İletim kayıpları, IGBT modülleri açık konumda yani akım iletilirken meydana gelen kayıplardır. İletim ile toplam yayılan güç, satürasyon gerilimi ile iletim esnasındaki akım değerinin çarpılmasıyla elde edilir. Satürasyon gerilimi, anahtar açık konumda iken devrenin iç direnci sebebiyle iletim akımının meydana getirdiği gerilimdir [7].

Besleme gerilimi V_{ce} , elektrik motorunu sürme gerilimidir. Sürme gerilimi, sabit yük altında ayarlanan 300V DC gerilim değeridir, $\pm 10V$ bir tolerans ile besleme kaynağı tarafından ortalama 300V DC besleme gerilimi sağlanmaktadır. I_c , yüklemeye göre çekilen akımdır, iletim kayıplarının maksimum değeri, IGBT modülünün maksimum anahtarlayabildiği akım değerinde meydana gelir, bu değer 600 A'dir.

Anahtarlama kayıpları, anahtar geçişlerinde açma ve kapama esnasında harcanan güç kayıplarıdır. Geniş bir zaman aralığında görülen anahtarlama şekli Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4: Geniş Bir Zaman Aralığında Görülen Anahtarlama Şekli

Bununla birlikte gerekli olan daha ayrıntılı bir incelemedir. Anahtarlama elektrik motoru sürüş çevrimi süresince yapılacağından, nano saniye aralıklarında devamlı bir

anahtarlama kaybı çalışma süresince toplamda dikkate alınması gereken bir enerji kaybıdır. 10 kHz anahtarlama frekansı, bir anahtarlama periyodunda, 100 mikro saniyedir.

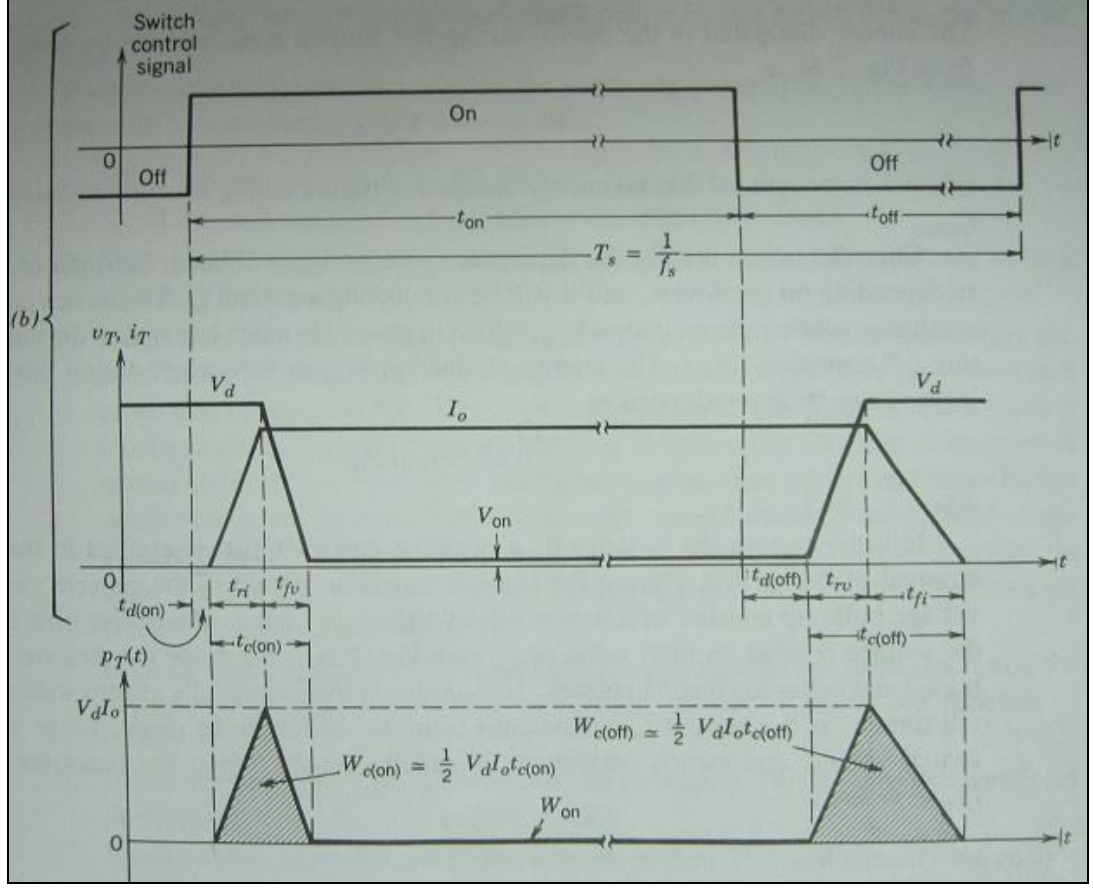
2.2.1.1 IGBT Modüllerinin Akım İletim ve Anahtarlama Sistemi

Yükleme durumunda, anahtarın akımı açma esnasında gecikme zamanı kullanılan IGBT modülü için 500 ns, akımın değerine oturma zamanı 300 ns, anahtarın kapalı durumuna gelirken gecikme zamanı 750 ns, anahtarın kapanma zamanı 300 ns'dir. Şekil 2.5'de IGBT modülünün teknik dokümanından alınmış veriler görülmektedir [6].

Inductive	Turn-on Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 300V, I_C = 600A,$	—	—	500	ns
Load	Rise Time	t_r		—	—	300	ns
Switch	Turn-off Delay Time	$t_{d(off)}$	$V_{GE1} = V_{GE2} = 15V, R_G = 4.2\Omega,$	—	—	750	ns
Time	Fall Time	t_f		Inductive Load	—	—	300

Şekil 2.5: CM600DY-12NF IGBT modülünün anahtarlama zamanları

Verilen teknik dokümanda gerilimin yükselme ve düşüş zamanları belirtilmemiştir. Fakat kullanılan IGBT modülü için açma esnasında gerilimin düşüş zamanı, akımın yükselme zamanına yakındır. Kapama esnasında, gerilimin yükselme zamanı, akımın düşüş zamanından daha kısadır, hesaplamalarda gerilimin yükselme zamanı, akımın düşüş zamanına eşit alınmıştır.



Şekil 2.6: Bir Periyot Aralığında Görülen Anahtarlama Şekli

Bir periyot içerisinde görülen anahtarlama şekli Şekil 2.6’da görülmektedir [6]. Bu şekil üzerindeki ifadelerin açıklaması ve değerleri Tablo 2.1’de yer almaktadır.

Tablo 2.1: Anahtarlama Periyodunun İncelenmesi

	AÇIKLAMA				
$t_{d(on)}$	Açma esnasındaki gecikme zamanı	500	ns	0.5	μs
t_{ri}	Açma esnasında akımın değerine oturma zamanı	300	ns	0.3	μs
t_{fv}	Gerilimin satürasyon gerilimine düşüş zamanı	300	ns	0.3	μs
$t_{c(on)}$	Anahtar açma zamanı ($t_{ri} + t_{fv}$)	600	ns	0.6	μs
$t_{d(off)}$	Kapama esnasındaki gecikme zamanı	750	ns	0.75	μs

t_{rv}	Gerilimin nominal değerine yükselme zamanı	300	ns	0.3	μs
t_{fi}	Kapama esnasında akımın kesilme zamanı	300	ns	0.3	μs
$t_{c(off)}$	Anahtar kapama zamanı ($t_{rv} + t_{fi}$)	600	ns	0.6	μs
f	Anahtarlama Frekansı	10	kHz		
T_S	Bir periyodun anahtarlama zamanı (1/f)	$100 \cdot 10^3$	ns	100	μs
t_{off}	Anahtarlama kontrol sinyali kapama zamanı ($t_{d(off)} + t_{c(off)}$)	1350	ns	1.35	μs
t_{on}	Anahtarlama kontrol sinyali açma zamanı ($T_S - t_{off}$)	$98,65 \cdot 10^3$	ns	98.65	μs
V_D	Nominal gerilimin değeri	300	V		
V_{on}	Satürasyon gerilim değeri	1.7	V		
I_o	Çekilen akım değeri	600	A		

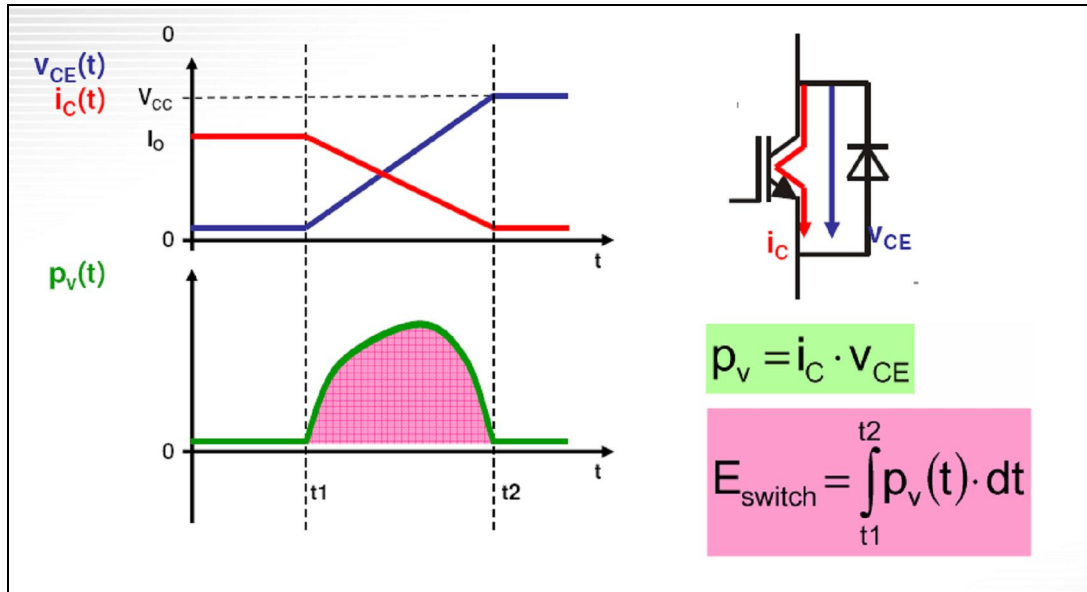
Anahtarın açılması, devrede bulunan bir kapasitörün dolması ile gerçekleşir. Kapasitöre anahtarlama sinyali gelir. Kapasitör, 15 V gerilim ile 500 ns sürede dolar. Bu süre gecikme zamanı olarak kabul edilir, sebebi kapasitör dolana kadar devre akım iletemez. Kapasitör dolduktan sonra akım 300 ns içerisinde, pik yaparak ortalama değeri 600 A akıma oturur. Gerilim, satürasyon gerilimine 1.7 volta düşer. Gerilimin, satürasyon gerilimine düşme zamanı; akımın yükselme zamanına eşit alınmıştır. Şekil 2.7’de, CM600DY-12NF IGBT modülünde, 600A akım altında oluşan satürasyon geriliminin değeri görülmektedir [6].

Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 600A, V_{GE} = 15V, T_j = 25^\circ C$	—	1.7 Volts
		$I_C = 600A, V_{GE} = 15V, T_j = 125^\circ C$	—	1.7 Volts

Şekil 2.7: Satürasyon Gerilim Değeri

Anahtarın kapanması, anahtarlama sinyalinin gelmesi ile gerçekleşir. Kapasitörün 8V ters gerilimle boşaltılması 750 ns'de olur, 8 V gerilim ile kapasitör 750 ns sürede boşalır, bu süre kapama gecikme zamanıdır. Akım 300ns içerisinde kesilir, gerilim nominal değeri 300 V'a ulaşır.

Satürasyon geriliminin olduğu zaman aralığı iletim kaybını göstermektedir. Gerilimin düşme ve yükselme zamanları anahtarlama kayıplarına dahil edilir. Anahtarın açma ve kapama zaman aralıkları anahtarlama kayıplarının olduğu bölgelerdir. Anahtarlama esnasında ısıya dönüşen enerji, akım ve gerilim eğrilerin noktasal çarpılması ile elde edilen güç eğrisi altında kalan bölgedir, Şekil 2.8'de görülmektedir [3]. Güç eğrisinin zamana göre integrali anahtarlama esnasında harcanan enerjiyi verir. Anahtarlama kayıplarını hesaplamamanın en kesin yolu, anahtarlama sırasında akım ve gerilim dalga formlarını çizdirmektir. Test esnasında ölçülmesi mümkün olan bu seçenek, sistemin tasarlanması noktasında mümkün değildir.



Şekil 2.8: Akım ve Gerilim Eğrileri ve Noktasal Çarpımlarıyla Elde Edilen Güç Eğrisi

Anahtarlama sırasında her açma ve kapama periyodu için sabit gerilim beslemesi ve sabit yük altında, kaybolan enerji aynı olduğu kabul edilmiştir.

2.2.1.2 İletim Kayıplarının Hesaplanması

Bir anahtarlama periyodu zamanı içerisinde; açma, iletim ve kapama zamanları bulunur. İletim sırasında açığa çıkan ısı enerjisi, açma anahtarlama enerji kaybı ve kapama anahtarlama enerji kaybı toplamı, bir periyot için hesaplanır. Çalışma

süresince sabit 10 kHz frekansta, her anahtarlama periyodunda aynı enerjinin açığa çıkacağı düşünülebilir. Bu sebeple bir periyot zamanı içerisinde harcanan toplam güç kaybı sistemin çalışma süresi boyunca aynı kabul edilmiştir.

İletim kaybı, satürasyon gerilimin bilinmesi ile bulunabilir. Üretici firmanın sağladığı bilgilerden; 1.7 V nominal satürasyon gerilimi 600Amper akım altında oluşmaktadır.

$$P_{SS} = I_C \cdot V_{CE(SAT)} = 600 \cdot 1.7 = 1020 \text{ W} \quad (2.1)$$

İletim kaybı, satürasyon gerilimin olduğu süre boyuncaadır. Bu zaman zarfı, anahtarlama periyot zamanından; anahtarlama sinyalin gelmesi ile kapasitörün dolma zamanı, anahtar açma zamanı ve anahtar kapama zamanının çıkarılması ile elde edilir.

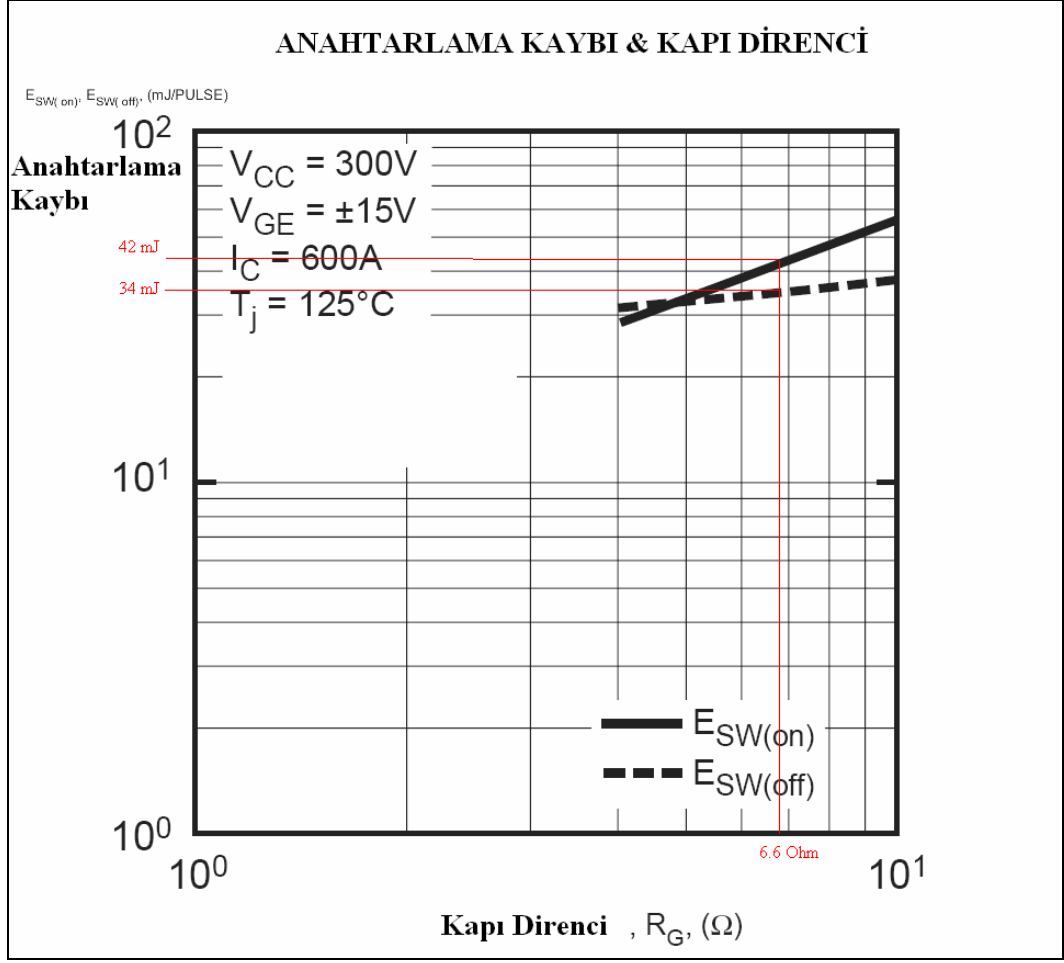
$$t_{İLETİM} = T_S - (t_{c(off)} + t_{c(on)} + t_{d(on)}) = 100 - (0.6 + 0.6 + 0.5) = 98.3 \mu s = 98.3 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (2.2)$$

$$E_{SS} = P_{SS} \cdot t_{İLETİM} = 1020 \cdot 98.3 \cdot 10^{-6} = 100.3 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 100.3 \text{ mJ} \quad (2.3)$$

2.2.1.3 Anahtarlama Kayıplarının Hesaplanması

Akımın 300 ns'de 600 A kadar yükselmesi ve gerilimin 300 V'dan 1.7 V'a düşmesi açma anahtarlama enerji kaybını oluşturur, ters işlem, kapama anahtarlama enerji kaybını oluştur.

Anahtarlama kayıpları iki yöntemle hesaplanmıştır. Birinci yöntemde, Mitsubishi firmasının CM600DY-12NF IGBT modülü için yayınladığı teknik veriler kullanılmıştır. İkinci yöntem, anahtarlama şeklinin Şekil 2.6'daki gibi olduğu kabul edilmiştir ve geometrik olarak akım-gerilim doğrularının oluşturduğu üçgensel alanın hesabı yapılmıştır. Mitsubishi firmasının verdiği IGBT modülüne ait anahtarlama süreleri kullanılmıştır.



Şekil 2.9: Kapı Direncine Bağlı Anahtarlama Kaybı

Şekil 2.9’da 300 V besleme geriliminde maksimum yükleme durumunda, kullanılan kapı direncine bağlı olarak açma-kapama enerjilerinin değişimi verilmiştir. Sistemde kullanılması düşünülen kapı direnci 6.6 ohm’dur. Birinci yöntemle anahtar açma kaybı bir anahtarlama periyodu için 42 mJ, anahtar kapama kaybı bir anahtarlama periyodu için 34 mJ’dür. Toplam anahtarlama kaybı, 76 mJ’dür.

İkinci yöntemle anahtarlama enerji kaybı, anahtar açma ve kapama süreleri ile, akım-gerilim doğrularının altındaki üçgensel alanın çarpımıyla hesaplanmıştır.

$$E_{SW(on)} = \frac{1}{2} \cdot V_D \cdot I_O \cdot t_{C(on)} = \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 600 \cdot 0.6 \cdot 10^{-6} = 54 \cdot 10^{-3} J = 54 mJ \quad (2.4)$$

$$E_{SW(off)} = \frac{1}{2} \cdot V_D \cdot I_O \cdot t_{C(off)} = \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 600 \cdot 0.6 \cdot 10^{-6} = 54 \cdot 10^{-3} J = 54 mJ \quad (2.5)$$

$$E_{SW} = E_{SW(on)} + E_{SW(off)} = 54 + 54 = 108 mJ \quad (2.6)$$

Tablo 2.2: Anahtarlama Kayıplarının Karşılaştırılması

	Anahtarlama Açma Kaybı (mJ)	Anahtarlama Kapama Kaybı (mJ)	Toplam Anahtarlama Kaybı (mJ)
Kapı Direncine Bağlı Anahtarlama Enerjisi Kaybı Grafiğinden	42	34	76
Akım-Gerilim Eğrilerinin Altında Kalan Alanın Hesabından	54	54	108

2.2.1.4 İletim ve Anahtarlama Kayıplarının İncelenmesi

İletim enerjisi kayıpları 100.3 mJ'dür. İletim kayıplarına, iki farklı yöntemle hesaplanmış olan anahtarlama kayıpları eklenerek, bir periyot süresi içerisinde ortalama güç kaybı bulunur.

Güç kaybı olarak periyot içerisine bakıldığında, anahtarlama sırasında oluşan ısı enerjisi, iletim sırasında oluşan ısı enerjisine oranla çok kısa bir sürede açığa çıktığı için anahtarlama güç kaybı yüksektir. Toplam enerjiden; ortalama güç kaybı, anahtarlama zamanından bulunur. Güç kaybı elde edilen iki farklı anahtarlama enerjisi değerinden, 1763 W ve 2083 W olarak hesaplanmıştır.

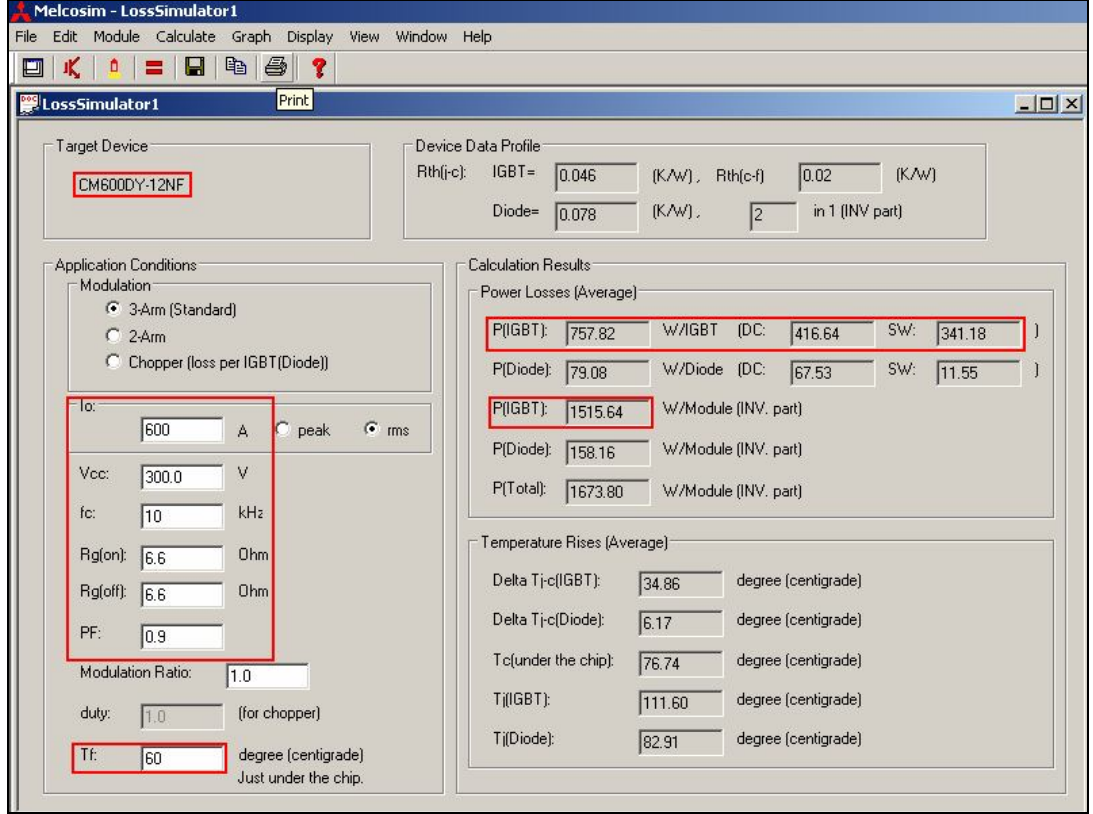
$$P = \left(\frac{E_{SS} + E_{SW}}{T_S} \right) = \frac{(100.3 + 76)mJ}{100 \mu s} = \frac{176.3 \cdot 10^{-3} J}{100 \cdot 10^{-6} s} = 1763 Watt \quad (2.7)$$

$$P = \left(\frac{E_{SS} + E_{SW}}{T_S} \right) = \frac{(100.3 + 108)mJ}{100 \mu s} = \frac{208.3 \cdot 10^{-3} J}{100 \cdot 10^{-6} s} = 2083 Watt \quad (2.8)$$

2.2.2 Melcosim Yazılımı İle IGBT Isıl Kayıplarının Analizi

Melcosim yazılımı, seçilen IGBT modülü için çalışma akım, gerilim ve frekans değerlerine göre güç kaybını hesaplayan bir yazılımdır. Kullanılan IGBT modülü, CM600DY-12NF serisidir.

Yüklenme durumu 600 A, besleme gerilimi 300 V, anahtarlama frekansı 10 kHz ve kullanılan kapı dirençleri 6.6 Ohm'dur.



Şekil 2.10: Melcosim Program Görüntüsü

Programın sonuç verileri Şekil 2.10'da görülmektedir. Çerçeve ile işaretlenen sağ üst kısımda, 341.18 W güç kaybı anahtarlama sırasında IGBT transistöründe meydana gelmektedir. İletim kaybı 416.64 W'dır. Yazılım IGBT modülü içerisindeki her bir transistör için hesap yapmaktadır. Bir modül içerisinde iki IGBT transistörü vardır. Bir IGBT transistöründe meydana gelen toplam kayıp 757.82 W'dır, bir modülde oluşan toplam güç kaybı 1515.64 W değerindedir.

Bir IGBT modülü için; iletim enerjisi ve kapı direncine bağlı anahtarlama enerjisi kaybı grafiğinden elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı, iletim enerjisi ve akım-gerilim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı ve Melcosim yazılımı ile hesaplanan toplam güç kaybı Tablo 2.3'de gösterilmiştir.

Melcosim yazılım sonucu ile hesaplanan değerler arasındaki fark yüzde olarak verilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.3: Isıl Kayıpların Karşılaştırılması

İletim enerjisi ve kapı direncine bağlı anahtarlama enerjisi kaybı grafiğinden elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Akım-gerilim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Melcosim Sonucu
1763 W	2083 W	1516 W
%16	%37	-
Ortalama Güç Kaybı	1787 W	

Toplam güç kaybı hesaplarında, diğer yöntemler ile Melcosim programı sonuçları arasında %16 ve %37 fark vardır. Ortalama ısı gücü kaybı, Tablo 2.3’de görülen üç değer ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir.

Kontrol sistemi, üç IGBT modülü içermektedir. Sistemde oluşan toplam güç kaybı, maksimum yükte sürekli çalışma durumunda 5361 W’dır.

3. SEMİKRON SOĞUTMA SİSTEMİ

Semikron firması kontrol sistemleri üretimi yapan bir firmadır. Çeşitli ürünleri elektrik motor uygulamalarında kontrol alanında kullanılmaktadır. Bu ürünlerin satış fiyatları 1000 €'lardan başlayıp kapasite ve istenen özelliklere göre artmaktadır. Enerji enstitüsü tarafından alınan sistemin tamamı 5000 €'dur. Kontrol kartı, IGBT modülleri ve modüllerin soğutma sistemi tek bir paket olarak alınmıştır ve incelenmiştir.

SEMIKRON kontrol sistemi, soğutma sistemi ile birlikte Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Semikron Kontrol Sistemi

3.1 Semikron Soğutma Sisteminin Yapısı

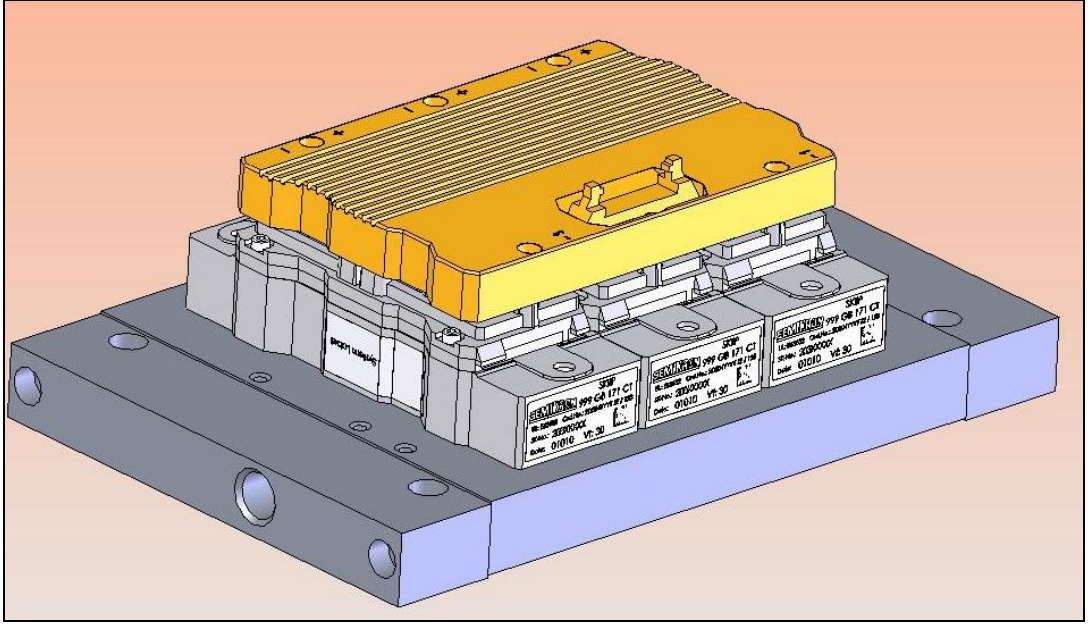
Alüminyum gövde üzerinde yer alan bölümde IGBT modülleri bulunmaktadır. Su-glikol karışımı, Şekil 3.1'de görülen kırmızı kapaklı girişten blok içerisine girmektedir. Akışkan, dikdörtgen kesitli bu bölümden, 6 adet kanala sahip orta bloğa geçer. Orta blok içerisindeki kanallar 11.5 mm çapında 150 mm uzunluğundadır. Bloğun girişinden gelen akışkan, bloğun eni boyunca yayılarak orta blok içerisindeki

kanallara dağılmaktadır. Sistem demonte edilince orta blok içerisindeki kanallardan kanal uzunluğunca yay çıkmıştır. Şekil 3.2’de soğutma bloğunun demonte edilmiş hali görülmektedir. Yaylar akışın daha türbülanslı olmasını sağlamaktadır ve duvar yüzeyleriyle akışın, türbülans ve vorteks etkisi ile daha fazla temas sebep olmaktadır. Isı taşınım katsayısını artırmak ve kanal yüzeylerinde oluşan sıcaklık değerini düşürmek amaçlı konulmuştur. Kanallara akışkanın ayrılması ve kanal içerisindeki debi hesabında yayların etkisi ihmal edilmiştir.



Şekil 3.2: Semikron Soğutma Bloğu-Ön ve Orta Blok

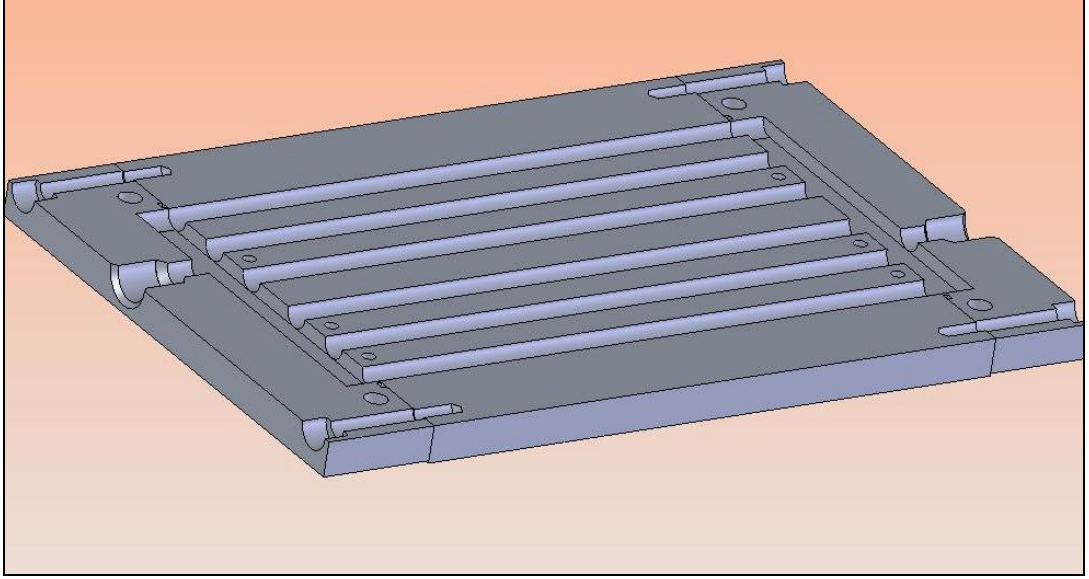
Orta bloktan çıkan akışkan, giriş bloğunun aynı olan bir başka bloktan sistemi terk eder. Çıkış bloğu, birebir giriş bloğunun aynısıdır, fakat giriş kanalına anti simetrik olarak bağlanmıştır. Şekil 3.3’de sistemin üç boyutlu CAD modeli ile Şekil 3.4’de demonte edilmiş orta blok ve blok içerisindeki yaylar görülmektedir.



Şekil 3.3: Semikron Kontrol Sistemi CAD Modeli



Şekil 3.4: Semikron Soğutma Bloğu-Orta Blok ve Kanal İçerisindeki Yaylar



Şekil 3.5: Semikron Soğutma Bloğu CAD Modeli-Orta Kesit

Şekil 3.5’de ön ve arka blokların aynı olduğu ve orta bloğa giriş-çıkış kanalları birbirine çapraz gelecek şekilde yerleştirildiği görülmektedir. Giriş ve çıkış blokları aynı olmakla birlikte anti simetrik bir şekilde yerleştirilip, akışın kanallara eşit debili dağılmasını sağlamak Semikron tarafından amaçlanmış olmalıdır.

3.2 Semikron Soğutma Bloğunun Malzemesi

Soğutma bloğunun malzemesi alüminyumdur, alüminyum serileri 1000’den başlayarak 7000’li serilere kadar gitmektedir ve her bir serinin alaşım metalleri ve karışım oranları farklı olduğundan ısı iletim katsayıları da farklıdır. Semikron tarafından kullanılan soğutma bloğu, malzeme enstitüsünde analiz ettirilmiştir. Kullanılan malzeme alüminyum 6000 serisinden, alüminyum 6063’tür. Bu malzemenin ısı iletim katsayısı 193 W/m.K’dir [9]. Bu değer ağırlık optimizasyonlu karşılaştırmada saf bakırın önüne geçmektedir [10], şu şekilde açıklanabilir:

6063 alüminyum:

$$\frac{193 \text{ W/m.K}}{2.7 \text{ g/cm}^3} = 71.4 \text{ Wg/m.K.cm}^3 \quad (3.1)$$

Saf bakır için:

$$\frac{385 \text{ W/m.K}}{8.9 \text{ g/cm}^3} = 43.2 \text{ Wg/m.K.cm}^3 \quad (3.2)$$

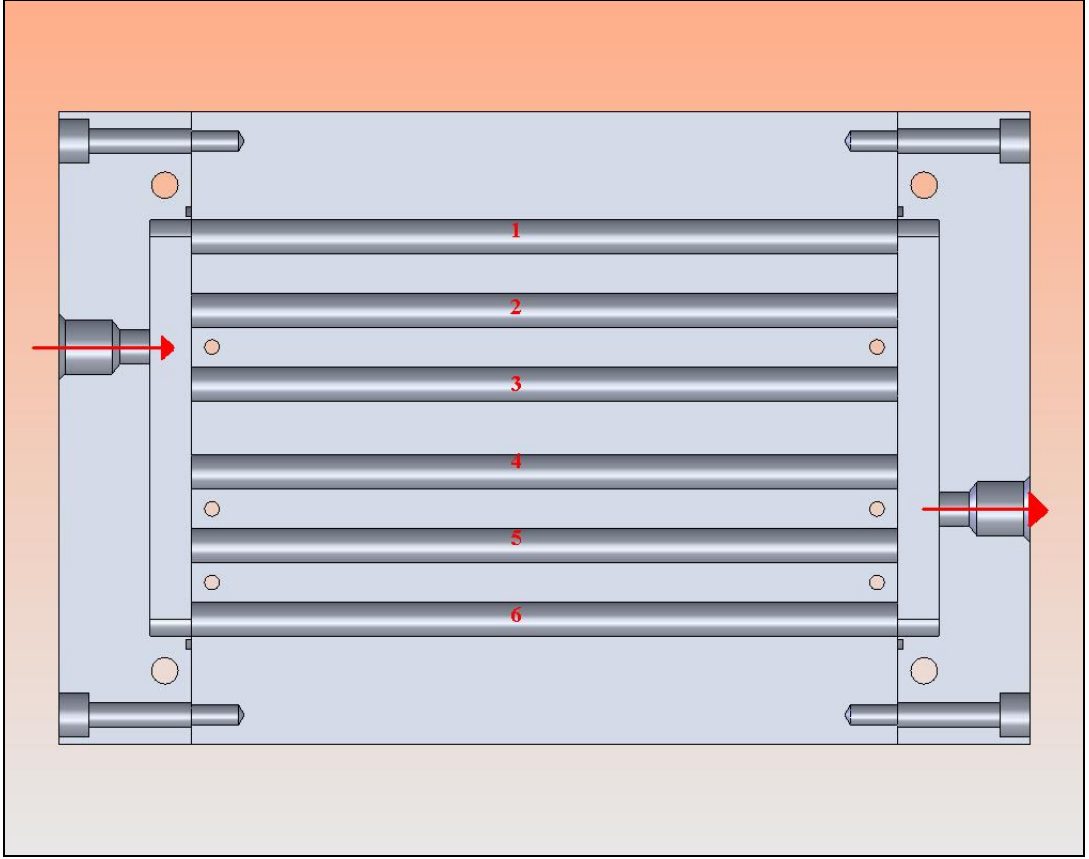
Ağırlığın önemli olduğu sistemlerde, özellikle taşımacılık gibi, soğutma malzemesi olarak genelde alüminyum kullanılmaktadır.

Prototip üretimi çalışmasında piyasa alüminyumu olarak ifade edilen, etial 53 adıyla bilinen 5154 serisi alüminyum kullanılmıştır. 5154 serisi alüminyumun ısı iletim katsayısı 125 W/m.K'dir [9].

3.3 Semikron Soğutma Bloğunun Akış Analizleri

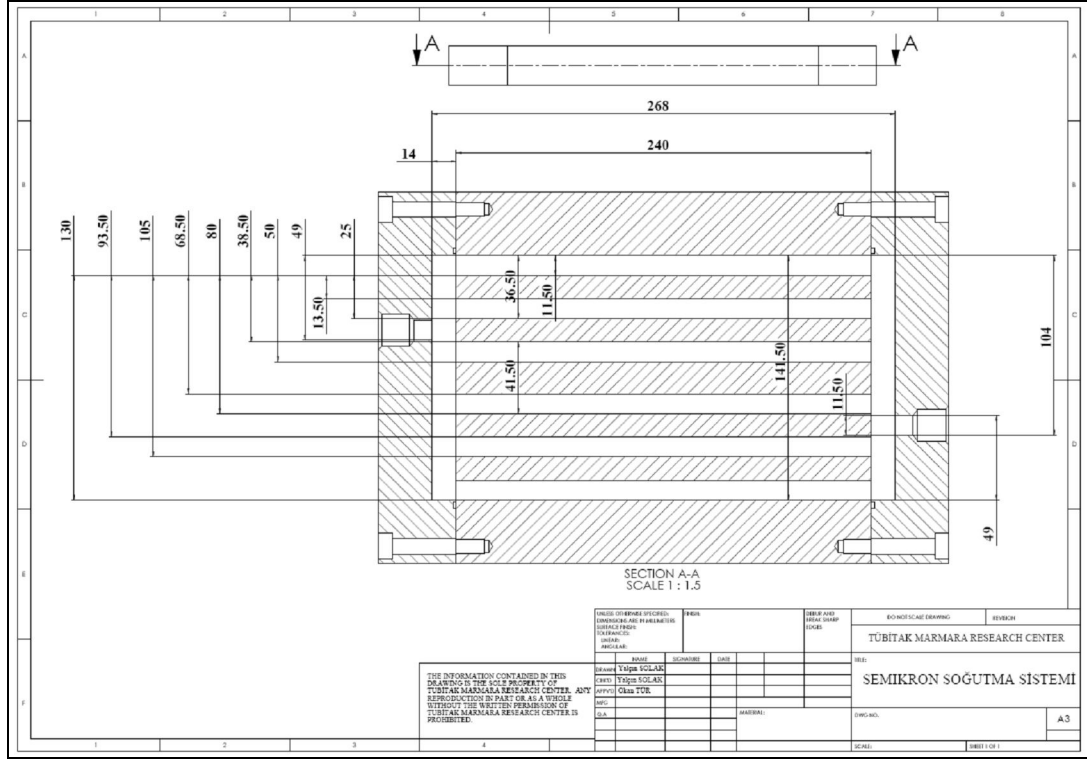
Bu bölümde, iki ve üç boyutlu kanal geometrileri modellenerek farklı türbülans modelleri ile akış analizi yapılmıştır. Türbülans modellerinin birbirleri arasındaki fark ve sistemin üç boyutlu geometrisinin analizi ile iki boyutlu geometrisinin analizi arasındaki fark ortaya konmuştur. Akış analiz sonuçlarıyla test sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırmalar, iki boyutlu analizlerde ve üç boyutlu analizlerde orta kesitte akışın debi değerlerinin test sonuçlarıyla karşılaştırılmasıdır.

Semikron soğutma bloğunun katı modelinin orta kesiti Şekil 3.6'da görülmektedir. Blok içerisinde 6 adet 11.5 mm'lik su kanalı bulunmaktadır. Su girişi ve çıkışı çapraz olarak karşılıklıdır. Şekil 3.6'da, orta blok içerisindeki kanallar, su giriş tarafının yakın olduğu bölümden başlayarak numaralandırılmışlardır. Yer çekim kuvveti, sayfa düzlemine diktir, giriş kanalından çıkış kanalına doğru akışta yerçekimin etkisi ihmal edilmiştir.



Şekil 3.6: Semikron Soğutma Bloğu-Orta Kesit-Kanalların Gösterimi

Bu sistemden elde edilen teknik resimden kanalların koordinatları çıkarılmıştır. Kanallar, orta bölüm dışında eşit aralıklı yerleştirilmişlerdir. Soğutma bloğunun orta kesit geometrisinin ölçüleri Şekil 3.7’de görülmektedir.

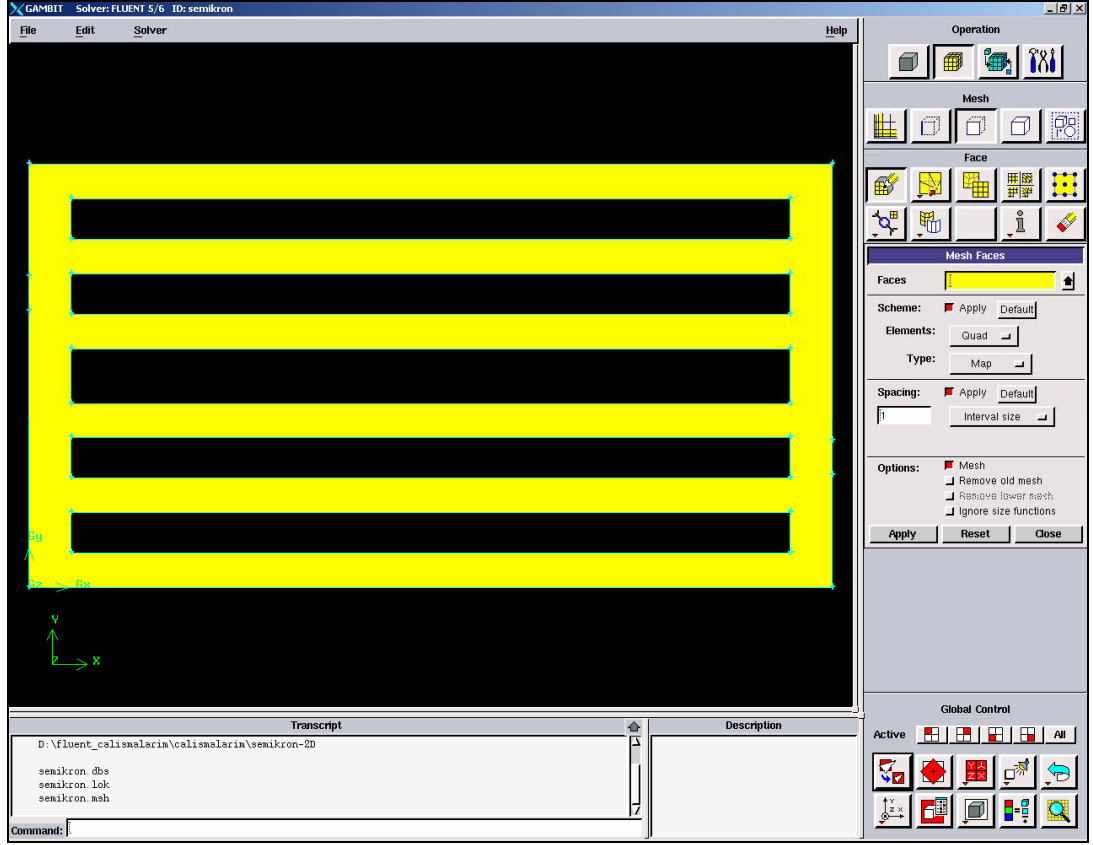


Şekil 3.7: Semikron Soğutma Bloğu-Orta Kesit Teknik Resmi

3.3.1 İki Boyutlu Geometrinin Modellenmesi ve Akış Analizi

Sistemin katı modelinin orta kesit geometrisinin ölçüleri, su giriş ve su çıkış kesitleri arasında kalan bölümler Gambit programında modellenmiştir ve iki boyutlu akış analizi yapılacak geometri elde edilmiştir.

Bloğun tüm kanalları üç boyutlu olarak düşünüldüğünde orta blok kanalları dairesel, giriş ve çıkış blok kanalları köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgenel kesitlere sahiptir. Sistemin Gambit programında oluşturulan modeli Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8: Gambit Programında Oluşturulan İki Boyutlu Model

İki boyutlu akış analizleri dört türbülans modeli ile aynı sınır koşulları altında incelenmiştir. İncelen türbülans modellerinin temel denklemleri ile sonuçlar bu bölümde verilecektir. Türbülans kinetik enerjisini ve özgül türbülans yayılım oranını (k – turbulence kinetic energy, ω – specific dissipation rate) içeren model ile bu modelin türbülans viskozitesi tanımının türbülans kayma gerilmesini de içerdiği model (k - ω sst – shear stress transport), türbülans kinetik enerjisini ve türbülans yayılım oranını (k - turbulence kinetic energy, ε - turbulence dissipation rate) içeren model ve Reynolds gerilme modeli (RSM – Reynolds Stres Model) kullanılan türbülans modelleridir.

3.3.2 Türbülans Modelleri

Türbülans dalgalanan hız alanları ile karakterize edilir. Hız alanlarının zaman ortalamalarının alınması ile türbülansı karakterize eden denklemler bilgisayar ortamında sayısal çözülemeye hazır hale getirilir. Fakat orijinal denklemlerin ortalamalarının alınmasıyla gerçekleştirilen basitleştirmeler, yeni bilinmeyen ifadeleri de beraberinde getirir. Bilinmeyenlerin, bilinen ifadeler ile çeşitli yollar ile modellenmesi türbülans modellerini oluşturur.

Kompleks geometrilerde yüksek Reynolds sayıları için akışı modelleyen Navier-Stokes denklemlerinin tam çözümü ulaşılabılır olmayabilir. Navier-Stokes denklemlerine çözüme yönelik küçük seviyeli türbülans dalgalanmalarının direkt olarak modellenmediği bir dönüştürme yöntemi uygulanır: Reynolds ortalaması.

Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri (RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes), ortalama akış özellikleri için dönüşüm denklemlerini ifade eder [11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (3.3)$$

RANS denkleminde (3.3), türbülansı ifade eden terim en sonda yer almaktadır.

$-\rho \overline{u_i u_j}$ terimi, denklemini çözmek için k-ε, k-ω, k-ω sst modelleri Boussinesq yaklaşımını kullanır. RSM modeli, türbülans terimini, iki boyutlu denklemler için beş, üç boyutlu denklemler için yedi denklem ile ifade eder ve denklemleri tanımlar.

Tüm modeller dikkate alınsa bile, her çeşit problemi çözen evrensel tek bir türbülans modeli yoktur. Bu çalışmada bu sebeple, incelenen geometride birden fazla türbülans modeli ile çalışılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3.2.1 k-ω Türbülans Modeli ile Çözüm

Bu ve anlatılacak diğer modellerdeki sınır koşulları şu şekildedir: Akışkanın kanal içerisindeki temas ettiği tüm yüzeylerin kenarları duvar (wall) sınır koşulu atanmıştır. Akışkanın katı yüzeye temas eden kısmı katı yüzeye aynı hıza sahip olur. Bu sistemde duvarlar durağandır, duvarla temas noktasında akış hızı sıfırdır. Akışkanın bloğa girdiği kenara akış hızı sınır koşulu atanmıştır. Kanal girişindeki akış hızı sistemin debisinden elde edilir. Debi değeri, IGBT modüllerinin ısı kayıplarına göre, su giriş-çıkış sıcaklık farkı dikkate alınarak 12.45 lt/dk alınmıştır. Ortalama hız, hacimsel debinin 11.5 mm çaplı dairesel alana bölünmesiyle 2 m/s'dir. Çıkış sınır koşulu, akışkanın soğutma bloğunu terk ettiği yüzeydedir. Akış, çıkıştan sonra hortum vs. gibi bir yapı içerisinde akmaya devam eder. Sistemin giriş hattındaki basınç yaklaşık 2 bar civarındadır. Bu blok ve akışkanın dolaştığı hat kapalı bir sistem olmakla beraber, sistemde biriken havanın alındığı, sistemden yüksek atmosfere açılan bir yüzey vardır. Bu serbest yüzeyin sistemin çıkış yüzeyine uzak olması, çıkış yüzeyinin atmosfer basıncından etkilenmemesine sebep olmaktadır. Bu

sebeple çıkış sınır koşuluna atmosfer basınç şartları verilmemiştir. Bu sebeplerden dolayı, çıkış kenarına türbülans özelliklerinden; türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap sınır koşulları girilir. Türbülans yoğunluğu %5, hidrolik çap 0.0115 'dir.

Türbülans yoğunluğu, türbülansın seviyesini gösterir ve denklem (3.4) ile ifade edilir [11]. u' , türbülans hız değerlerinin salınımlarının kareleri toplamının ortalamasının kareköküdür ve U ortalama hız değeridir.

$$I = \frac{u'}{U} \quad (3.4)$$

$$u' = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot (u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)\right)} \quad (3.5)$$

Sınır koşulu olarak türbülans yoğunluğunun kullanılması için, salınımların tahmin edilmesi gerekir. Deneysel verilere dayanılarak borularda iç akışlarda geçerli ve kullanılan yaklaşım şu şekildedir [12]:

$$I = 0.16 \cdot \text{Re}_{Dh}^{-\frac{1}{8}} \quad (3.6)$$

Reynolds sayısı, boru içersindeki hidrolik çap değerine göre ortalama hızdan hesaplanır. Ortalama hız, yaklaşık 2 m/s'dir. Hidrolik çap, dairesel kesitlerde çapa eşittir [12].

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{\zeta} = \frac{4 \cdot \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D = 0.0115 \text{ m} \quad (3.7)$$

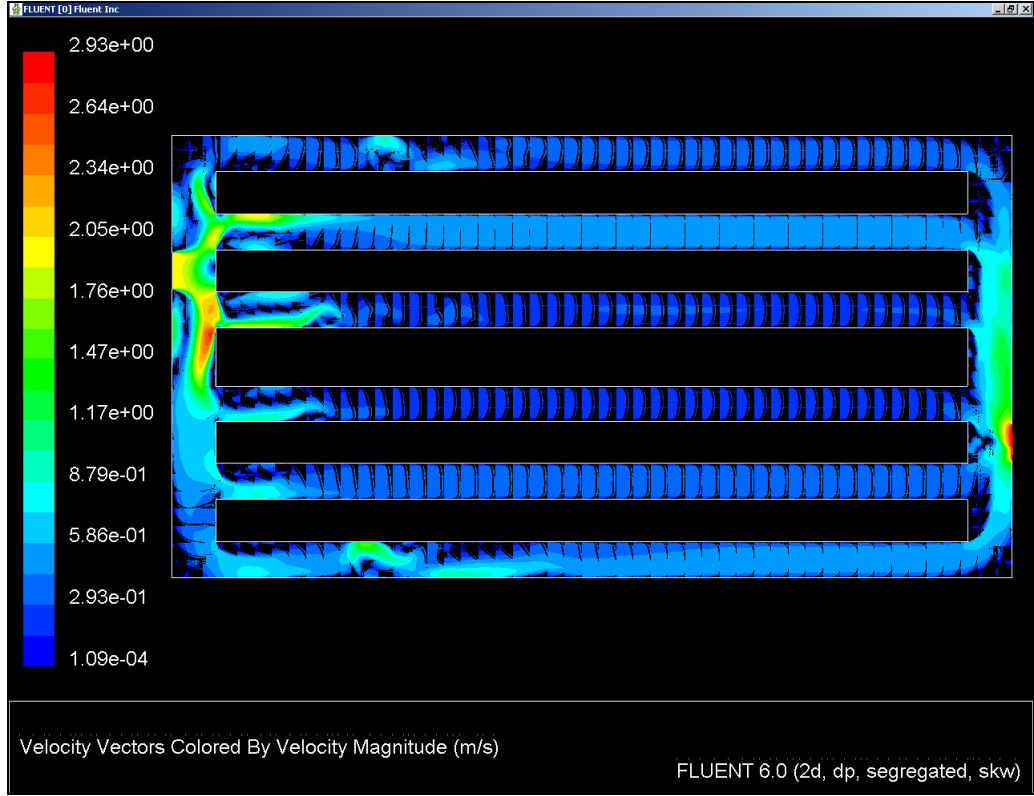
$$\text{Re} = \frac{U \cdot D_h}{\nu} = \frac{2 \cdot 0.0115}{1 \cdot 10^{-6}} = 23000 \quad (3.8)$$

$$I = 0.16 \cdot \text{Re}_{Dh}^{-\frac{1}{8}} = 0.16 \cdot 23000^{-0.125} = 0.045 \quad (3.9)$$

yüzde olarak % 4.5'dir.

Sınır koşulu olarak, soğutma bloğu çıkışına girilen türbülans yoğunluğu % 5'dir ve kabul edilebilir bir değerdir.

Yakınsama koşulları, süreklilik denklemi için kalan hata miktarının 0.0001'den küçük olmasıdır. Aksenal hızlar, k ve ω içinde aynı yakınsama koşulu geçerlidir. Basınç değişimi yoğunluk farkı yaratmayacak kadar azdır, akış boyunca akışkanın sabit yoğunluğa sahip olduğu kabul edilmiştir. k - ω türbülans modeli ile elde edilen kanallardaki hız profili Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9: k - ω Türbülans Modeli ile Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız Vektörleri

İki boyutlu geometrinin, orta kesitinde hesaplanan ağırlıklı ortalama hız değerlerine göre 11.5 mm çaplı dairesel alandan geçen debi miktarı hesaplanmıştır. Tablo 3.1'de sonuçlar görölmektedir.

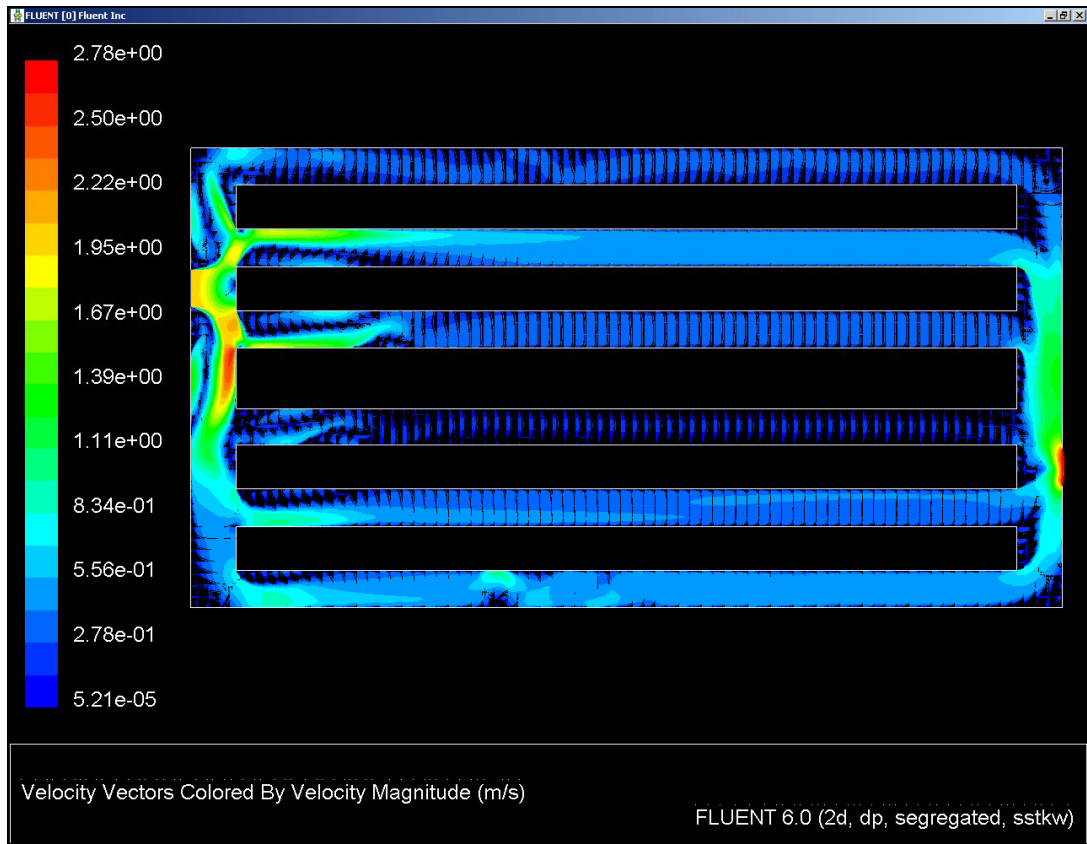
Tablo 3.1: k - ω Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model

	Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri (m/s)	Debi (lt/dk)	% Kanal Debisi / Toplam Debi
kanal-1	0.30	1.84	14.78
kanal-2	0.44	2.77	22.21
kanal-3	0.24	1.51	12.14
kanal-4	0.23	1.42	11.41
kanal-5	0.35	2.18	17.50
kanal-6	0.44	2.74	21.97
			100

3.3.2.2 k- ω sst Türbülans Modeli ile Çözüm

k- ω sst türbülans modeli, k- ω türbülans modelinin bir varyantıdır. Türbülans viskozitesinin tanımı, kayma gerilmesi transport denklemi ile yapılır. k- ω sst, duvar yakınlarda k- ω türbülans modeline göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

k- ω sst türbülans modeli, k- ω türbülans modeli ile aynı sınır koşulları, aynı yakınsama şartları altında çalıştırılmıştır. k- ω sst türbülans modeli ile elde edilen kanallardaki hız profili Şekil 3.10'de görülmektedir.



Şekil 3.10: k- ω sst Türbülans Modeli ile Kanal İçerisinde Çözömlenen Hız Profilleri

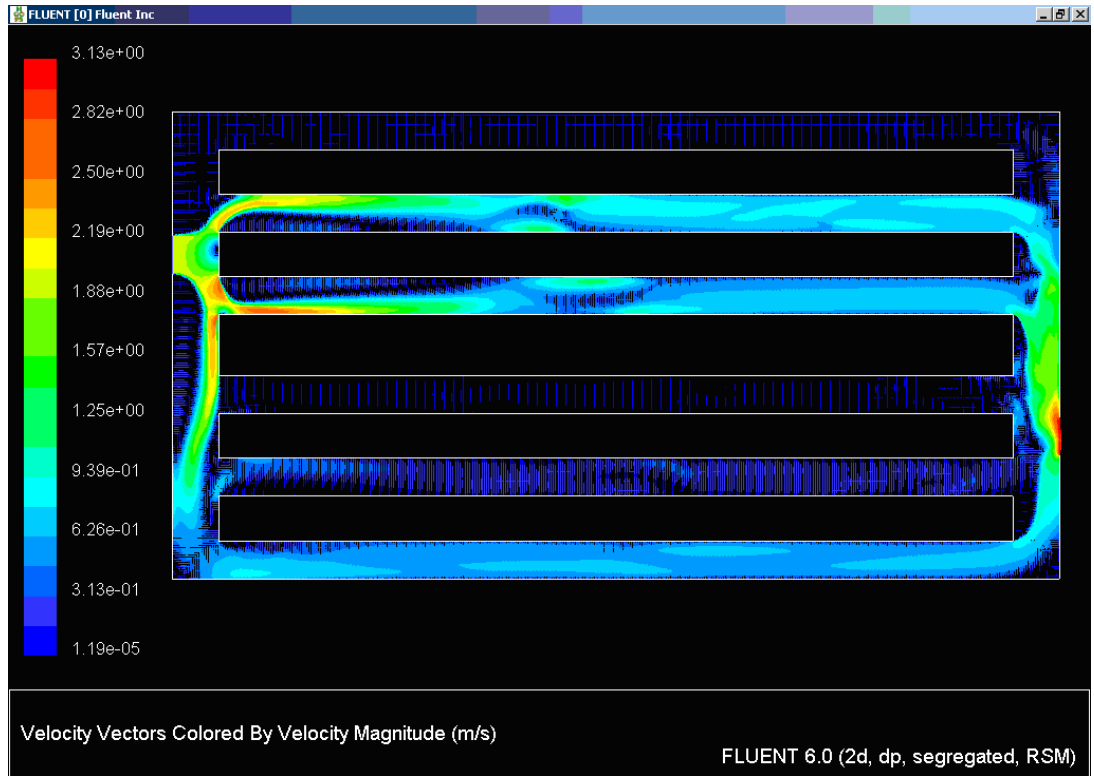
İki boyutlu geometrinin, kanal ekseni boyunca orta kesitinde hesaplanan ağırlıklı ortalama hız değerlerine göre 11.5 mm çaplı dairesel alandan geçen debi miktarı elde edilir. Tablo 3.3'de sonuçlar görölmektedir.

Tablo 3.2: k- ω sst Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model

	Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri (m/s)	Debi (lt/dk)	% Kanal Debisi / Toplam Debi
kanal-1	0.26	1.62	12.96
kanal-2	0.49	3.06	24.46
kanal-3	0.30	1.89	15.10
kanal-4	0.10	0.60	4.83
kanal-5	0.38	2.39	19.15
kanal-6	0.47	2.94	23.50
			100

3.3.2.3 RSM Türbülans Modeli ile Çözüm

RSM türbülans modeli aynı sınır koşullar altında, aynı model üzerinde çalıştırılmıştır. Şekil 3.11’de RSM türbülans modeli ile elde edilen kanallardaki hız profilleri görülmektedir.



Şekil 3.11: RSM Türbülans Modeli İle Kanal İçerisinde Çözümlenen Hız Profilleri

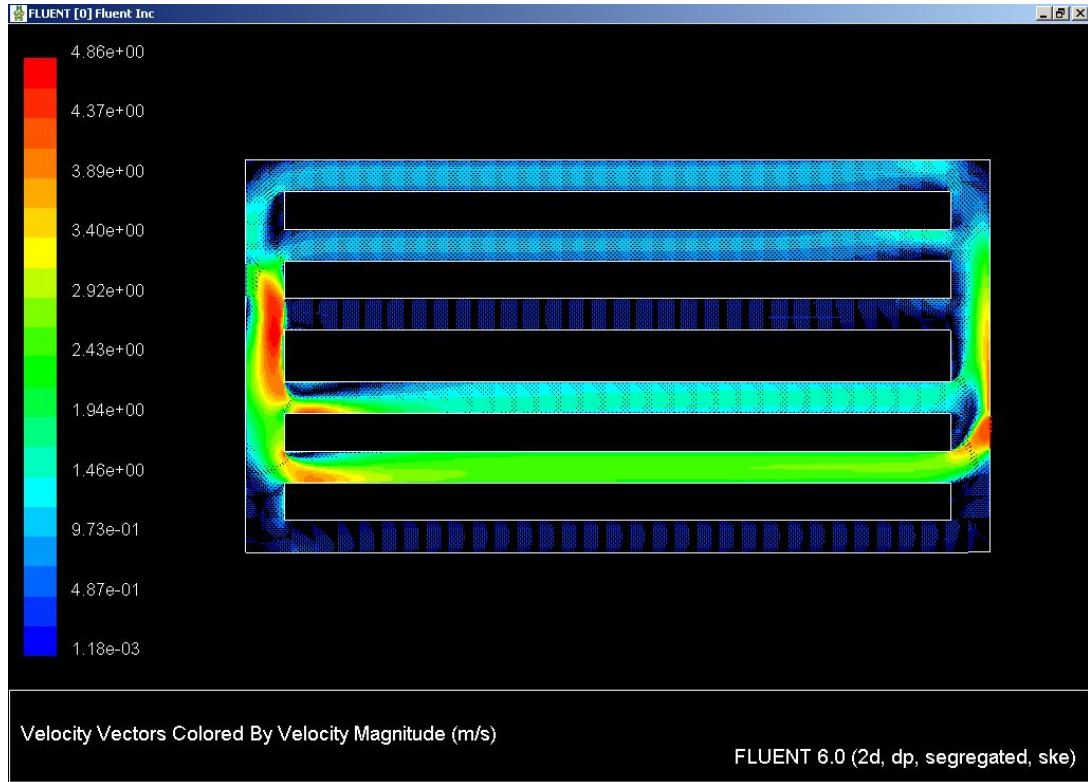
İki boyutlu geometrinin, kanal eksenine boyunca orta kesitinde hesaplanan ağırlıklı ortalama hız değerlerine göre 11.5 mm çaplı dairesel alandan geçen debi miktarı elde edilir. Tablo 3.3’de sonuçlar görülmektedir.

Tablo 3.3: RSM Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model

	Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri (m/s)	Debi (lt/dk)	% Kanal Debisi / Toplam Debi
kanal-1	0.05	0.34	2.38
kanal-2	0.72	4.50	31.88
kanal-3	0.62	3.87	27.39
kanal-4	0.04	0.24	1.67
kanal-5	0.21	1.29	9.17
kanal-6	0.56	3.48	24.63
			100

3.3.2.4 k-ε Türbülans Modeli İle Çözüm

Literatürde ve son yıllarda bilgisayar çözümlenmeli akışkanlar dinamiği (CFD – Computational Fluid Dynamics) ile uğraşan araştırmacılar arasında popüler olan k-ε türbülans modeli, aynı sınır şartları ile tüm modellerdeki yaklaşımlar korunarak Fluent programında çözdürülmüştür. Şekil 3.12’de k-ε türbülans modeli ile elde edilen kanallardaki hız profilleri görülmektedir.



Şekil 3.12: k-ε Türbülans Modeli İle Kanal İçerisinde Çözümlenen Hız Profilleri

Akış analizi yapıldığında, diğer modellere göre 1. 2. ve 3. kanalda ters akış göstermesi ve akışın, giriş kenarından sonra sağa doğru yönelmesi k-ε türbülans modelinde farklılık olarak görülmüştür.

Tablo 3.4: k-ε Türbülans Modeli Sonuçları-İki Boyutlu Model

	Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri (m/s)	Debi (lt/dk)	% Kanal Debisi / Toplam Debi
kanal-1	0.97	6.08	43.04
kanal-2	0.92	5.76	40.79
kanal-3	0.33	2.03	14.37
kanal-4	1.42	8.88	62.88
kanal-5	2.51	15.67	110.97
kanal-6	0.25	1.55	10.95
			283 (Ters Akış)

3.3.3 İki Boyutlu Modelin Akış Analiz Sonuçları

Tablo 3.5’de, modelin orta kesitinde hesaplanan alan ağırlık ortalamalı hızlar görülmektedir. Türbülans modelleri arasında, k-e modelinin sonuçları çok farklıdır.

Tablo 3.5: Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri

Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri (m/s)				
	Türbülans Modelleri			
	k-ω	k-ω sst	RSM	k-ε
kanal1	0.30	0.26	0.05	0.97
kanal2	0.44	0.49	0.72	0.92
kanal3	0.24	0.30	0.62	0.33
kanal4	0.23	0.10	0.04	1.42
kanal5	0.35	0.38	0.21	2.51
kanal6	0.44	0.47	0.56	0.25

Tablo 3.5’de görülen verilerin, kesit alanı ile çarpılması sonucu elde edilen kanal içerisindeki debi değerleri Tablo 3.6’da görülmektedir.

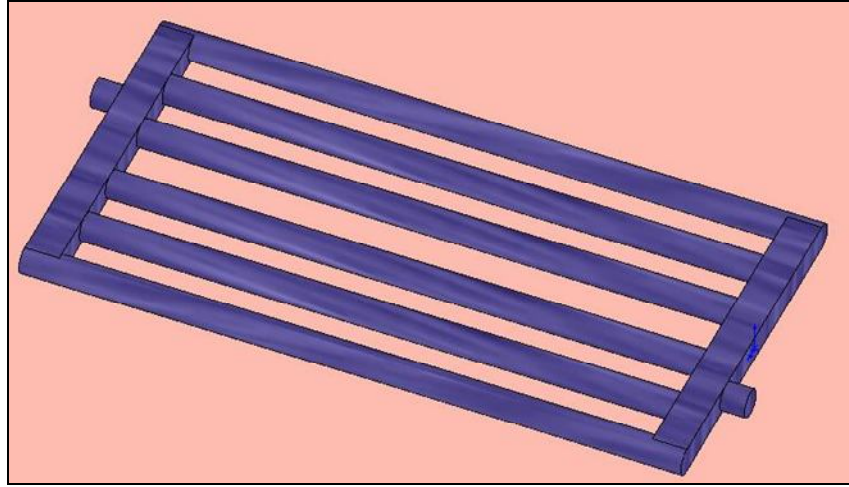
Tablo 3.6: Akış Debi Değerleri

Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerlerinden Hesaplanan Akış Debi Değerleri (lt/dk)				
	Türbülans Modelleri			
	k-ω	k-ω sst	RSM	k-ε
kanal1	1.84	1.62	0.34	6.07
kanal2	2.77	3.06	4.49	5.75
kanal3	1.51	1.89	3.86	2.03
kanal4	1.42	0.60	0.24	8.86
kanal5	2.18	2.39	1.29	15.64
kanal6	2.74	2.94	3.47	1.54

k-ε modelinde 1., 2. ve 3. kanalda akış ters yönlü olduğundan, belli bir m kütleli debisi bu kanallarda dairesel olarak dolmaktadır. k-ε modeli dışındaki tüm türbülans modellerinde görülen ortak nokta, 2 numaralı kanalın en fazla debiye sahip olması ve 4 numaralı kanalın en düşük debiye sahip olmasıdır.

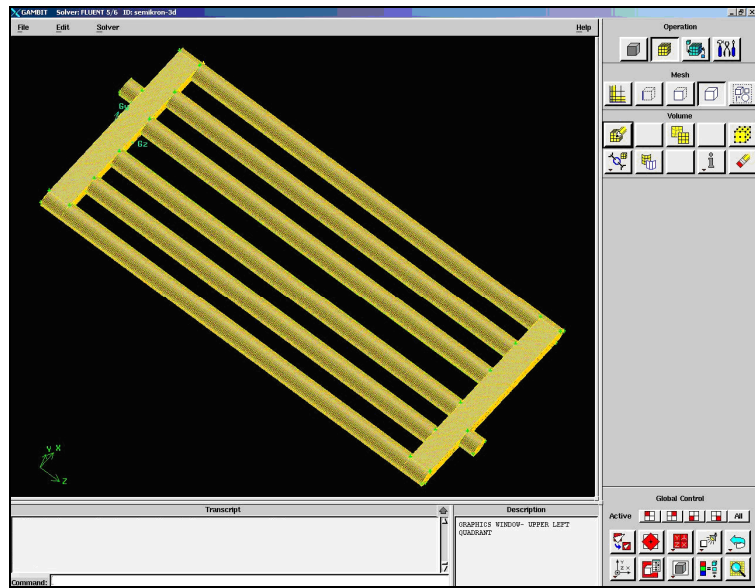
3.3.4 Üç Boyutlu Geometrinin Modellenmesi

Üç boyutlu geometrinin modeli, akışın geçtiği hacimleri içermektedir. Solidworks programında oluşturulan üç boyutlu katı model, Şekil 3.13’de görülmektedir.



Şekil 3.13: Üç Boyutlu Akış Analizi İçin Akış Kanallarının Katı Modeli

Üç boyutlu katı modelin Gambit programında oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.14’de görülmektedir. Ağ yapısı altı yüzlü hacim elemanları (hexahedral – altı yüzlü hacimsel ağ yapısı elemanı) kullanılarak oluşturulmuştur.

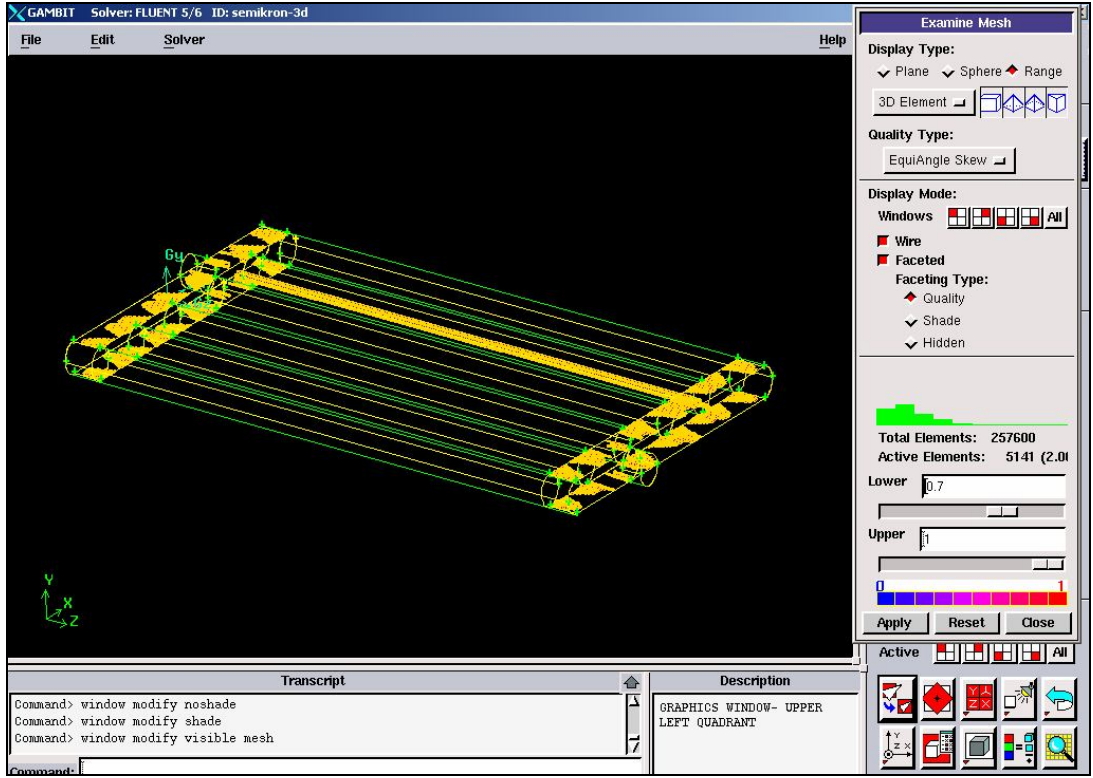


Şekil 3.14: Gambit Programında Oluşturulan Ağ Yapısı

3.3.4.1 Üç Boyutlu Modelin Ağ Yapısının İncelenmesi

İki boyutlu modelde oluşturulan ağ yapısı, kare elemanlar ile oluşturulduğundan ve model eğri kenarlara sahip olmadığı için, düzgündür. Üç boyutlu modelde ise, silindirik kanal yapısı ve dış yüzeyin uçları yuvarlatılmış dikdörtgenel bir yüzey olması sebebiyle oluşturulan ağ yapısı, eş açılı eğrilik (equiangle skew – eş açılı eğrilik) yöntemi ile incelenmiştir.

Üç boyutlu model toplam 257600 ağ yapısı elemanı içermektedir. 0.7 “equiangle skew” seviyesine göre, bu değerinin dışında kalan 5141 eleman bulunmaktadır. Toplam eleman sayısının % 2’sini oluşturmaktadır. Şekil 3.15’de 0.7 değeri üzerinde şekil değiştiren hacimsel ağ yapısı elemanlarının model içerisinde buldukları yerler görülmektedir.



Şekil 3.15: Gambit Programında Üç Boyutlu Modelin Ağ Yapısının İncelenmesi

Şekil 3.15’de görülen ağ yapısı elemanları, yuvarlak geometriye sahip yerler ile düz kenarların kesişim noktalarında oluşmakta ve her kanal giriş yüzeyinin çevresinde bulunmaktadır.

3.3.4.2 Eş Açılı Eğrilik Yönteminin Açıklanması

Ağ yapısının kalitesinin ölçülmesi genellikle, eş açılı eğrilik yöntemi ile yapılır. Eş açılı eğrilik yöntemi, altı yüzlü ağ yapısı elemanı için, yüzeydeki veya eleman içerisindeki açılara bağlı olarak denklem (3.10) ile tanımlanır.

$$\max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (3.10)$$

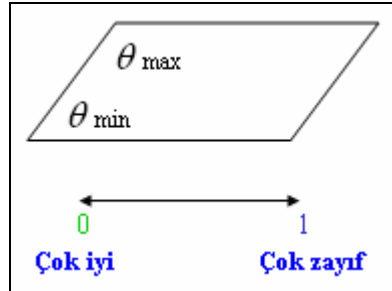
Bu ifade de;

θ_{\max} , yüzeydeki veya eleman içerisindeki en büyük açıdır.

θ_{\min} , yüzeydeki veya eleman içerisindeki en küçük açıdır.

θ_e , eş açılı yüzeyin veya elemanın standart açısıdır. Üçgen yüzeyler için 60° , dikdörtgen yüzeyler için 90° dir.

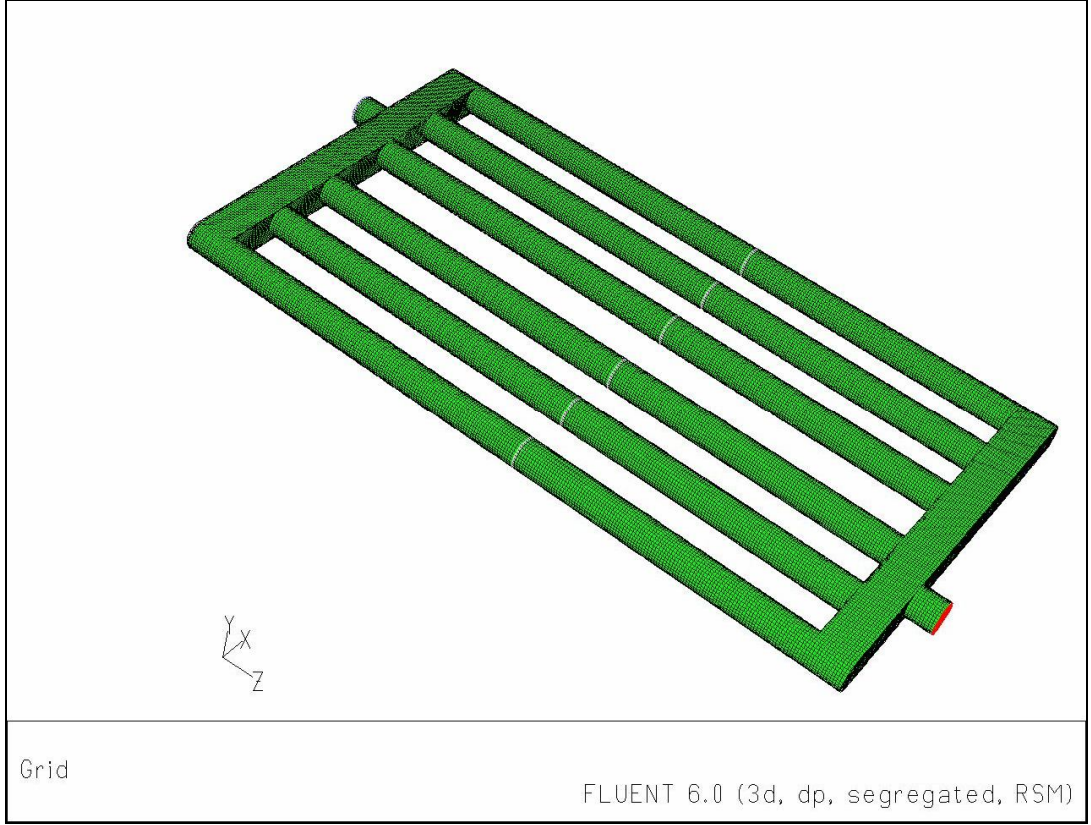
Şekil 3.16'da görüldüğü gibi, üç boyutlu model üzerindeki her eleman için, eş açılı eğrilik yöntemi uygulanır ve elemanın sahip olduğu maksimum-minimum açı değerlerine göre, denklem (3.10) ifadesinden bir oran elde edilir. Elde edilen oransal değer, 0-0.7 aralığında ise, ağ yapısı kalitesi iyidir, 0.7 üzerindeki oranlar düzgün olmayan ağ yapısı elemanlarını gösterir.



Şekil 3.16: Eş Açılı Eğrilik Yönteminin Açıklanması

3.3.5 Üç Boyutlu Modelin Akış Analizleri

Fluent programına görüntülenen üç boyutlu model ve bu model üzerinde kanallarda debi değerinin ölçüleceği yüzeyler Şekil 3.17'de görülmektedir.



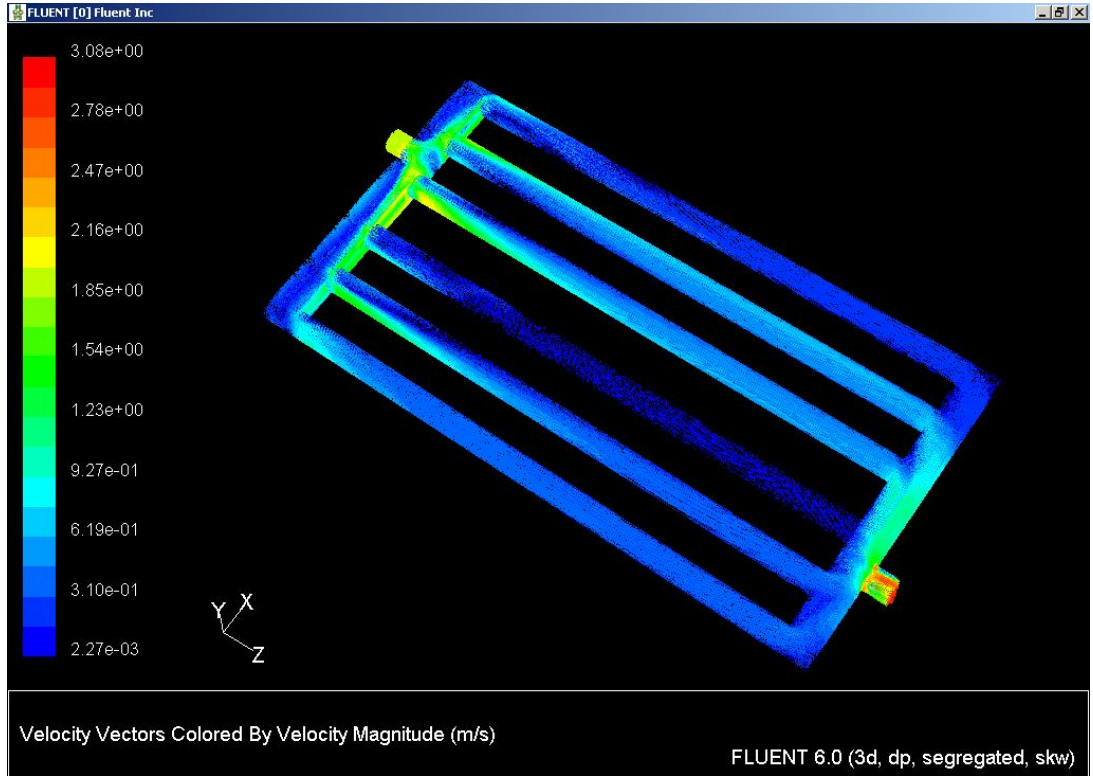
Şekil 3.17: Debi değerlerinin Hesaplandığı Yüzeylerin Kanallar Üzerindeki Yeri

Üç boyutlu model üzerinde yapılmış CFD analizleri, iki boyutlu modellerdeki sınır şartlarını sağlar. Aynı sınır koşulları, yakınsama koşulları üç boyutlu modeller içinde geçerlidir.

3.3.5.1 $k-\omega$ Türbülans Modeli İle Çözüm

Sınır koşulları kanal giriş yüzeyinde, yüzey normaline dik 2 m/s akışkan hızıdır, çıkış yüzeyinde %5 türbülans yoğunluğudur ve 0.0115 m hidrolik çap değeridir. Soğutma bloğunun iç yüzeylerine duvar yüzey sınır şartı atılmıştır. $k-\omega$ standart türbülans modelinin özellikleri kullanılmıştır, model sabitleri değiştirilmemiştir. Çalışma koşullarında akışkanın ağırlığı etkisi ihmal edilmiştir.

Yakınsama koşulları aynıdır. Sonuçlar; süreklilik denklemi, analiz edilen modele göre, türbülans kinetik enerjisi veya türbülans yayılım oranı ve hızlar girilen göreceli hata değeri 0.0001'den küçük olduğunda; tüm modellerde iterasyonlar yakınsadığı zaman alınmıştır.



Şekil 3.18: $k-\omega$ Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız Profilleri

Şekil 3.18’de $k-\omega$ türbülans modeliyle elde edilmiş hız profili görülmektedir. 4. kanaldaki debi değeri, diğer kanallara göre oldukça azdır. Tablo 3.7’de, kanallar içerisindeki ortalama hızlar ve debi değerleri görülmektedir. Tablonun son sütununda, her kanalın debi değerinin, toplam debiye oranı yüzde olarak verilmiştir. 2. ve 3. kanallardaki debiler birbirine yakındır ve toplam debinin %27 ile %25’i bu kanallardan geçmektedir. 4. kanal, %2.9 ile en düşük akış debisine sahip kanaldır. Şekil 3.18’de görülen hız profilleri, görsel olarak Tablo 3.7’i yansıtmaktadır.

Tablo 3.7: $k-\omega$ Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri

	Hız	Debi	% Kanal Debisi / Toplam Debi
	(m/s)	(lt/dk)	
kanal-1	0.220	1.36	10.97
kanal-2	0.550	3.41	27.44
kanal-3	0.513	3.18	25.59
kanal-4	0.057	0.35	2.86
kanal-5	0.310	1.92	15.48
kanal-6	0.354	2.19	17.66
			100

Yakınsama koşulu, süreklilik denklemi için, giriş ve çıkış yüzeyleri arasındaki kütleli farkın, yakınsama değeri ile karşılaştırılması sonucu kontrol edilmiştir.

Tablo 3.8: k- ω Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü

Kütleli Debi	(kg/s)
Çıkış Yüzeyi	-0.20631416
Giriş Yüzeyi	0.20631273
Net	-1.43E+01

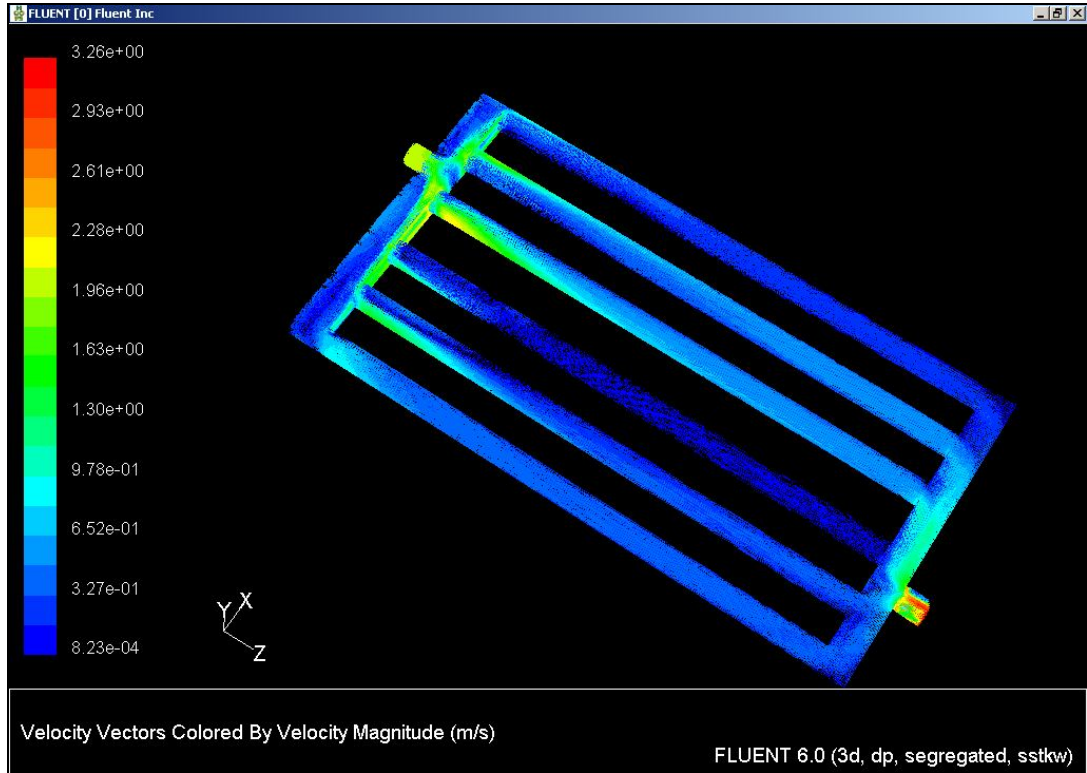
$$kalan\ hata\ miktarı = \frac{|0.20631273 - 0.20631416|}{0.20631273} = 0.00000693122 < 0.0001 \quad (3.11)$$

$$6.9 \cdot 10^{-6} < 10 \cdot 10^{-5}$$

Kalan hata miktarı, yakınsama kriterinden daha küçüktür.

3.3.5.2 k- ω sst Türbülans Modeli

k-w sst Türbülans modeli, aynı sınır şartlar altında Fluent programında çalıştırılmış ve Şekil 3.19'da görülen hız profili elde edilmiştir.



Şekil 3.19: k- ω sst Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız Profilleri

Tablo 3.9’da görüldüğü üzere, 2 ve 3 numaralı kanallar, k- ω türbülans modeli sonuçlarına benzer şekilde, %25 ve %26 ile en fazla debiye sahip olan kanallardır. 4 numaralı kanal, en az debi değerine sahipken, 1., 5. ve 6. kanalların debi değerleri birbirine yakındır.

Tablo 3.9: k- ω sst Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri

	Hız	Debi	% Kanal Debisi / Toplam Debi
	(m/s)	(lt/dk)	
kanal-1	0.227	1.41	11.38
kanal-2	0.503	3.12	25.20
kanal-3	0.523	3.25	26.24
kanal-4	0.084	0.52	4.19
kanal-5	0.291	1.81	14.60
kanal-6	0.367	2.28	18.41
			100

Tablo 3.10: k- ω sst Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü

Kütlesel Debi	(kg/s)
Çıkış Yüzeyi	-0.2065143
Giriş Yüzeyi	0.20631273
Net	-0.00020156587

$$kalan\ hata\ miktarı = \frac{|0.20631273 - 0.2065143|}{0.20631273} = 0.000977011 < 0.0001$$

(3.12)

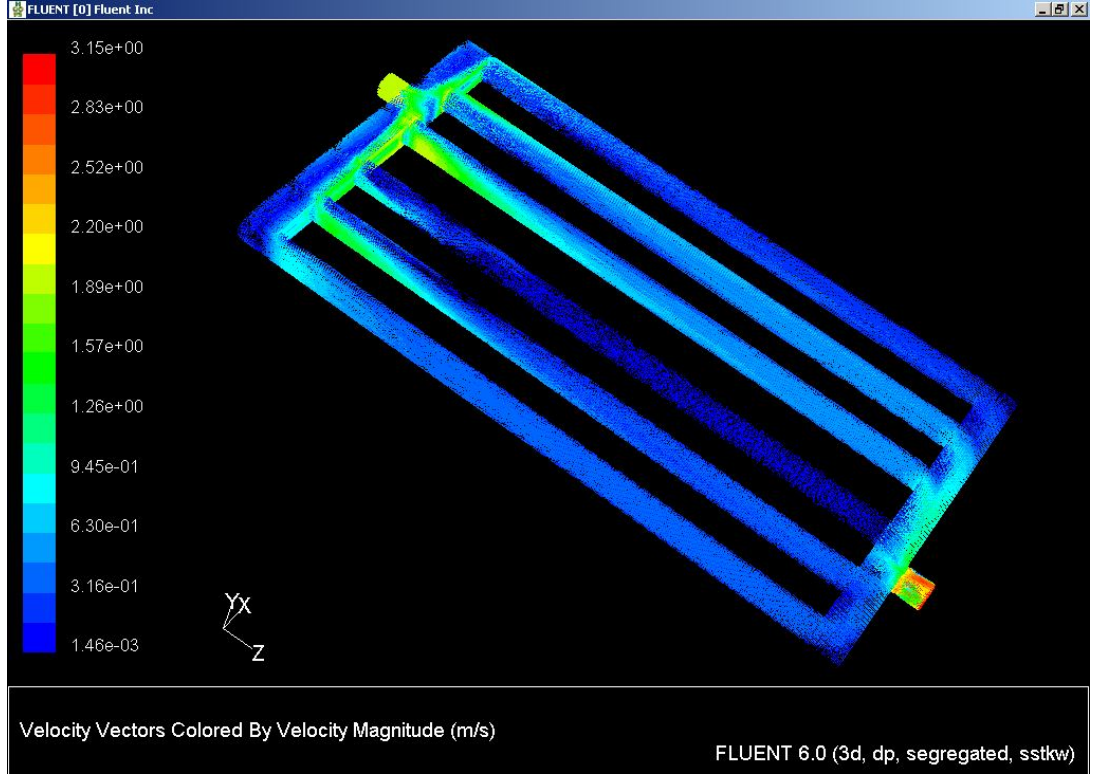
$$9.7 \cdot 10^{-4} > 10 \cdot 10^{-5}$$

k- ω sst modelinin çözdürülmesi sırasında iterasyonun sabit bir hata değerine oturması ve hata miktarının iterasyon sayısından bağımsız olması sebebiyle çözüm sona erdirilmiştir. Çözüm sona erdirildiği sırada, süreklilik denklem hatası yukarıda açıklandığı değerdedir. Diğer yakınsama kriterlerinden bazıları da istenen yakınsama koşulunu sağlayamamış, süreklilikten kalan hata miktarlarında bulunmuşlardır.

3.3.5.3 k- ω sst Türbülans Modeli-Farklı Çıkış Sınır Koşulu

k- ω sst modelinde çıkış sınır koşulları değiştirilerek akış analizi yapılmıştır. Sınır koşullarındaki değişimin sonuçlara nasıl etkilediğini görmek amacıyla, sistem üzerinde, çıkış yüzeyindeki sınır koşulu olan türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap

sınır koşulu farklı bir koşulla değiştirilmiştir. Tüm modellerde çıkış yüzeyine atılan sınır koşulu türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap değeridir. Bu model de çıkış yüzey koşulları, ters akış türbülans kinetik enerjisi ile türbülans özgül yayılma hızıdır (k ve ω). Türbülans kinetik enerjisi $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ve türbülans özgül yayılma hızı 1 1/sn değerleri girilmiştir.



Şekil 3.20: k- ω sst Farklı Çıkış Sınır Koşullu Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız Profilleri

Tablo 3.11: k- ω sst Farklı Çıkış Sınır Koşullu Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri

	Hız	Debi	% Kanal Debisi / Toplam Debi
	(m/s)	(lt/dk)	
kanal-1	0.252	1.56	12.59
kanal-2	0.512	3.17	25.58
kanal-3	0.479	2.97	23.95
kanal-4	0.084	0.52	4.18
kanal-5	0.321	1.99	16.03
kanal-6	0.353	2.19	17.64
			100

Tablo 3.11, çıkış sınır koşullarının türbülans kinetik enerjisi ve türbülans özgül yayılma hızı olduğu durumda elde edilen hız ve debi değerlerini göstermektedir.

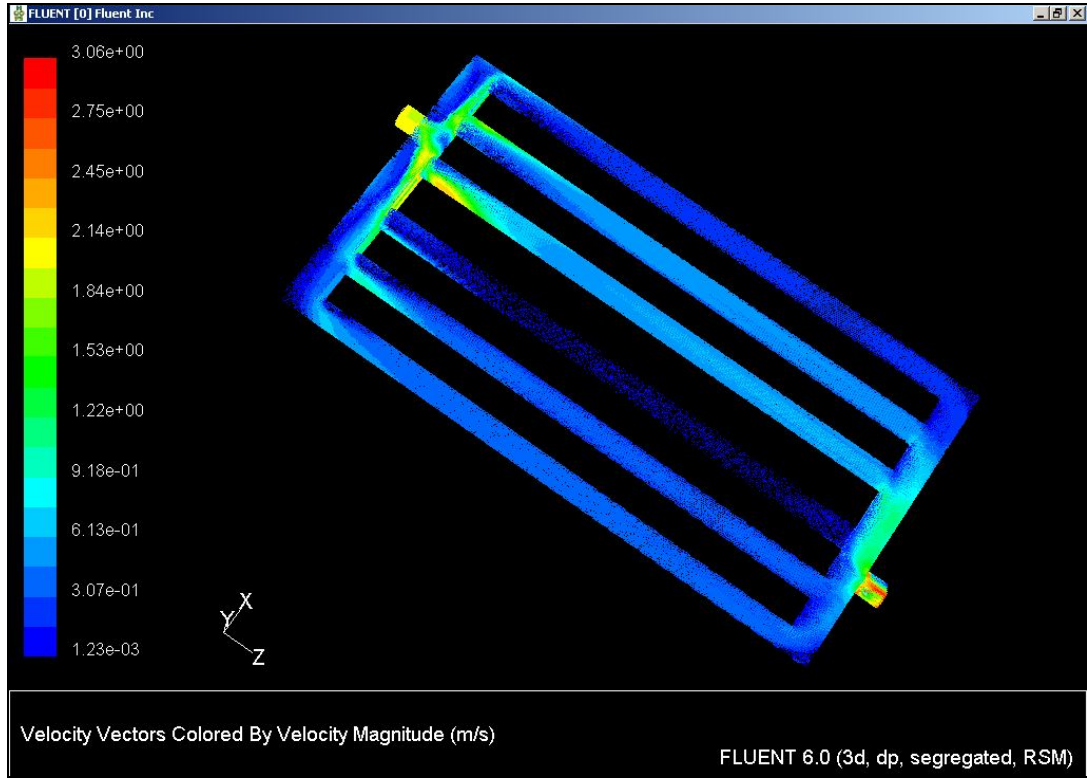
Tablo 3.12: Farklı Çıkış Sınır Şartlarına Sahip k- ω sst Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması

	Çıkış Sınır Koşulu	Çıkış Sınır Koşulu	
k- ω sst Türbülans Modeli	I=0.05 D=0.0115 m	k=1 m ² /s ² w=1 1/s	
	Debi	Debi	% Fark
	(lt/dk)	(lt/dk)	
kanal-1	1.41	1.56	10.6
kanal-2	3.12	3.17	1.6
kanal-3	3.25	2.97	8.6
kanal-4	0.52	0.52	0
kanal-5	1.81	1.99	9.9
kanal-6	2.28	2.19	3.9

Tablo 3.12, akış analizlerinde, farklı çıkış sınır koşuluna sahip aynı modelin bile, Fluent programında aynı geometri için çalıştırıldığında farklı debi değerlerine ulaşabileceğini göstermektedir. Tek bir çıkış sınır koşulunun etkisi, 1. kanal sonucunu %10 değiştirmiştir. Bundan sonraki modeller de; bilinen ve hesaplanan türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap değeri çıkış sınır koşulu olarak kullanılmaya devam edilmiştir.

3.3.5.4 RSM Türbülans Modeli

RSM Türbülans modeli, aynı sınır şartlar altın Fluent programında çalıştırılmış ve Şekil 3.21’de görülen hız profili elde edilmiştir.



Şekil 3.21: RSM Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız Profilleri

Şekil 3.21’de 4. kanalda akış hız vektörleri zayıf olarak görünmektedir. Tablo 3.13’den RSM Türbülans modelinin 4. kanalda 0.14 lt/dk debi değeri hesapladığı ve bu değer toplam akış yüzdesinin %1.1’i olduğu görülmektedir. 2. ve 3. kanallar, RSM Türbülans modelinin sonuçlarında da en yüksek debi değerine sahip olan kanallardır.

Tablo 3.13: RSM Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri

	Hız (m/s)	Debi (lt/dk)	% Kanal Debisi / Toplam Debi
kanal-1	0.210	1.30	10.50
kanal-2	0.501	3.11	25.06
kanal-3	0.576	3.57	28.80
kanal-4	0.022	0.14	1.10
kanal-5	0.311	1.93	15.57
kanal-6	0.380	2.35	18.98
			100

Tablo 3.14: RSM Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü

Kütleli Debi	(kg/s)
Çıkış Yüzeyi	-0.20630401
Giriş Yüzeyi	0.20631273
Net	8.72E+01

$$kalan\ hata\ miktarı = \frac{|0.20631273 - 0.20630401|}{0.20631273} = 0.0000422659 < 0.0001$$

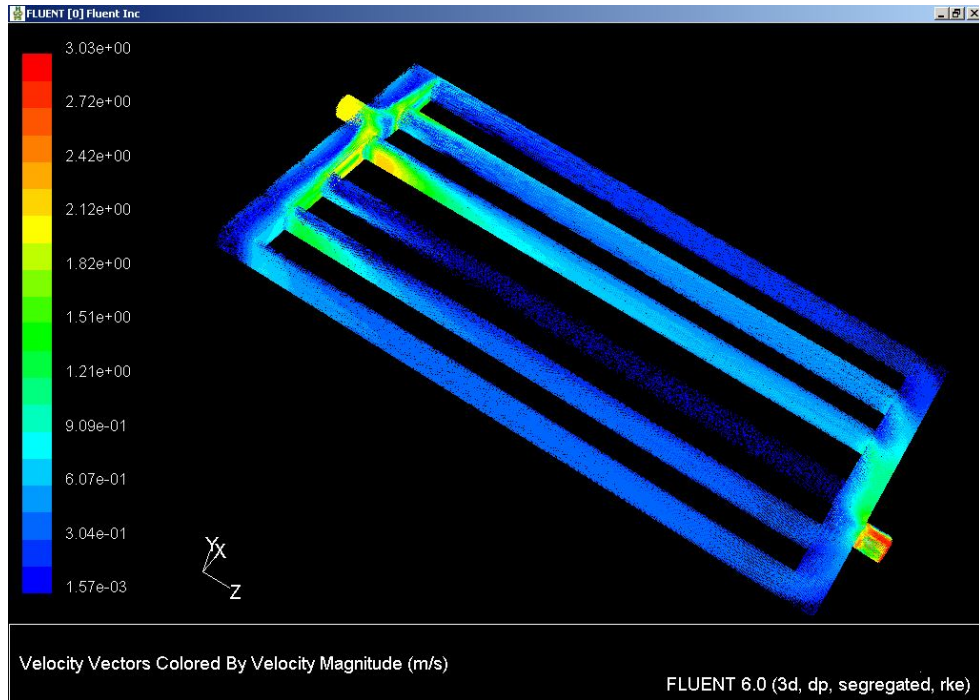
(3.13)

$$4.2 \cdot 10^{-5} < 10 \cdot 10^{-5}$$

Kalan hata miktarı, yakınsama kriterinden daha küçüktür.

3.3.5.5 k-ε Türbülans Modeli

k-ε Türbülans modeli, aynı sınır şartlar altın Fluent programında çalıştırılmış ve Şekil 3.22’de görülen hız profili elde edilmiştir. İki boyutlu analizlerde, çok farklı sonuçlar bulan k-ε türbülans modeli, üç boyutlu analizlerde, diğer türbülans modellerinin yakaladığı ortak noktaları yakalayabilmiştir. Ortak noktalar, Şekil 3.22’de görüldüğü gibi, 2. ve 3. kanalların en fazla debiye sahip olması ve 4. kanalın en düşük debiye sahip olmasıdır.



Şekil 3.22: k-ε Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız Profilleri

Tablo 3.15’de, 2. ve 3. kanalların sayısal olarak toplam akışın yarısından fazlasını taşıdığını göstermektedir. 4. kanalda, k-ε türbülans modeli 0.20 lt/dk debi değeri hesaplamıştır.

Tablo 3.15: k-ε Türbülans Modeli İle Üç Boyutlu Model İçerisinde Elde Edilen Hız ve Debi Değerleri

	Hız	Debi	% Kanal Debisi / Toplam Debi
	(m/s)	(lt/dk)	
kanal-1	0.217	1.35	10.87
kanal-2	0.514	3.19	25.69
kanal-3	0.561	3.48	28.04
kanal-4	0.032	0.20	1.61
kanal-5	0.311	1.93	15.55
kanal-6	0.365	2.26	18.26
			100

Tablo 3.16: k-ε Türbülans Modeli Yakınsama Koşulunun Süreklilik Denklemi Yönünden Kontrolü

Kütleli Debi	(kg/s)
Çıkış Yüzeyi	-0.20632304
Giriş Yüzeyi	0.20631273
Net	-1.03E+02

$$kalan\ hata\ miktarı = \frac{|0.20631273 - 0.20632304|}{0.20631273} = 0.0000499726 < 0.0001 \quad (3.14)$$

$$4.9 \cdot 10^{-5} < 10 \cdot 10^{-5}$$

k-ε Türbülans modelinde de, kalan hata miktarının yakınsama koşulu ile karşılaştırılması kontrol edilmiştir ve giriş-çıkış yüzeylerindeki kütleli debi farkları, analizin başlangıcında girilen yakınsama şartlarını sağlamaktadır.

3.3.6 Üç Boyutlu Modelin Akış Analiz Sonuçları

Çalıştırılan tüm türbülans modellerinin ortak özelliği; 2. ve 3. kanalda en fazla debiyi hesaplamaları ve 4. kanalda en düşük debiyi hesaplamalarıdır. Türbülansın üç boyutlu etkisi, k-ε modelinde kendisini hissettirmiştir.

Tablo 3.17’de, modelin orta kesitinde hesaplanan alan ağırlık ortalamalı hızlar görülmektedir.

Tablo 3.17: Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri

Alan Ağırlık Ortalamalı Hız Değerleri (m/s)				
	Türbülans Modelleri			
	k-w	k-w sst	RSM	k-e
kanal1	0.220	0.227	0.210	0.217
kanal2	0.550	0.503	0.501	0.514
kanal3	0.513	0.523	0.576	0.561
kanal4	0.057	0.084	0.022	0.032
kanal5	0.310	0.291	0.311	0.311
kanal6	0.354	0.367	0.380	0.365

Soğutma bloğunun orta kesitinde Fluent programının kanalın dairesel kesiti içerisinde hesapladığı hız vektörlerinin, daire kesiti boyunca integre edilmesiyle akışın debi değerleri bulunmuştur. Tablo 3.18’de her türbülans modelinin, her kanalda hesapladığı debi değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.18: Akış Debi Değerleri

Akış Debi Değerleri (lt/dk)				
	Türbülans Modelleri			
	k-w	k-w sst	RSM	k-e
kanal1	1.36	1.41	1.30	1.35
kanal2	3.41	3.12	3.11	3.19
kanal3	3.18	3.25	3.57	3.48
kanal4	0.35	0.52	0.14	0.20
kanal5	1.92	1.81	1.93	1.93
kanal6	2.19	2.28	2.35	2.26

Üç boyutlu akış analiz sonuçlarının, toplam giriş debisine oranlanarak boyutsuz ve yüzde değerleri Tablo 3.19’da görülmektedir.

Tablo 3.19: Kanallardaki Yüzde Akış Debi Değerleri

% (Kanal Debisi / Toplam Giriş Debisi)				
	Türbülans Modelleri			
	k-w	k-w sst	RSM	k-e
kanal1	10.97	11.38	10.50	10.87
kanal2	27.44	25.20	25.06	25.69
kanal3	25.59	26.24	28.80	28.04
kanal4	2.86	4.19	1.10	1.61
kanal5	15.48	14.60	15.57	15.55
kanal6	17.66	18.41	18.98	18.26

Farklı Türbülans modellerinin analiz sonuçlarının ortak özellikleri deneysel çalışmalar ile değerlendirilmiştir. Tablo 3.19’da, tüm türbülans modellerinin birbirleriyle uyumlu sonuçlara sahip olduğu görülmektedir. Birinci kanalda, tüm türbülans modelleri %10-11 civarında akış yüzdesi hesaplamışlardır. İkinci ve

üçüncü kanallarda, en fazla akış yüzdesi yine tüm modellerde ortaya çıkmıştır. Beşinci ve altıncı kanallarda, tüm türbülans modellerinin sonuçları birbirine çok yakındır. Modeller arasında, sadece dördüncü kanalda belirgin bir fark olduğu görülmüştür.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR-AKIŞ TESTLERİ

Deneysel çalışmalarda amaçlanan; incelenen ve akış analizleri yapılan Semikron soğutma sisteminin her kanalı içerisindeki debi değerlerinin ölçülmesidir. Soğutma bloğu içerisindeki kanallarda, soğutma sisteminin geometrisinden dolayı farklı debilerin oluşacağı düşünülmüştür. Testler ile ilk önce bu düşüncenin doğruluğunu analiz etmek amaçlanmıştır. Ölçülen debi değerleri, CFD ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.1 Test Sisteminin Oluşturulması

Semikron soğutma sisteminden kanal içerisinden hız ölçümü alınabilmesi sisteme fiziksel bir müdahale yapmadan mümkün değildir. Sistem bloğunun üst kısmında IGBT modülleri vardır, altı akış kanalına sistem bloğunun altından birer kanalla ulaşmak mümkündür. Bu kanallar için ölçüm sistemine göre gerekli çapta delikler açmak ve aynı zamanda delikler çevresinde sızdırmazlık sağlamak da gerekir. Test amaçlı kullanım dışında orijinal sistemin normal motor sürme işlerinde de kullanılması sistem üzerinde fiziksel bir değişiklik yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple bu sistemin birebir boyutlarında kanal içerisindeki akış bölümü, CAD ortamında modellenip prototip üretimi deneysel çalışma amaçlı yapılmıştır.

4.2 CAD Tasarımı Ve Prototip Üretimi

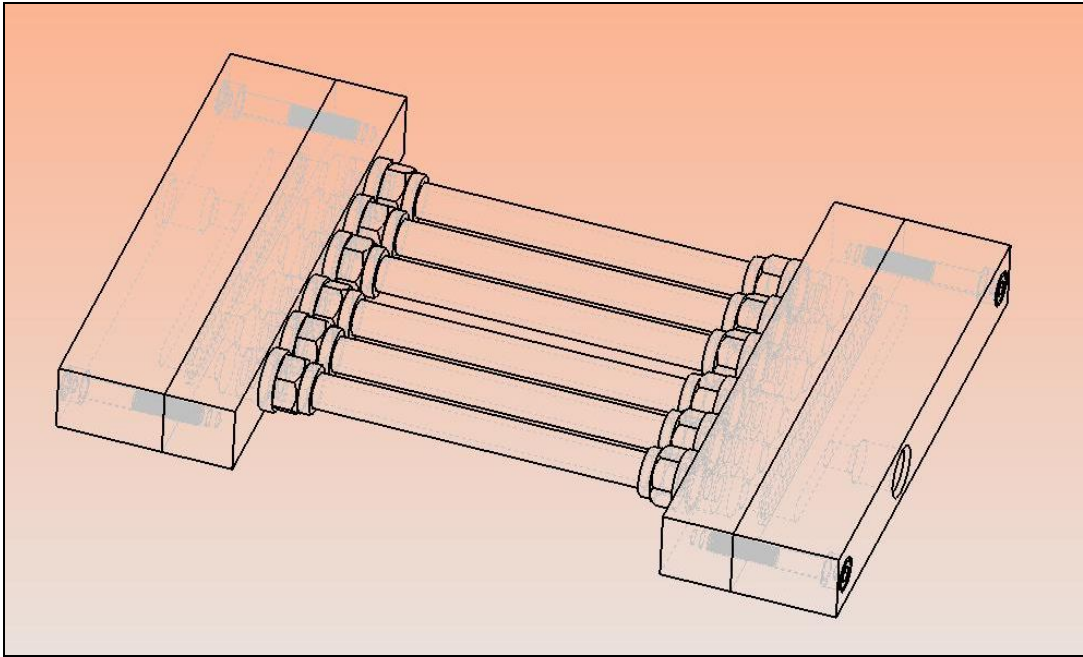
Seçilen hız ölçüm sensörüne göre, bu sensörün kanallara bağlanabilmesini mümkün kılan ve gerçek sistemin kanal yapısını ve akış yapısını bozmayacak şekilde modelleyebilen bir prototip hedeflenmiştir.

Bu noktada en önemli parametre ölçüm cihazı, boyutları ve kanallara bağlantı şeklidir. Kanallara bağlantı önemlidir, kanallar içerisindeki basınç 1-2 bar değerinde olduğundan sızıntı olması istenmemektedir, herhangi bir sızıntı akış yapısını ve debi değerlerini de değiştirecektir.

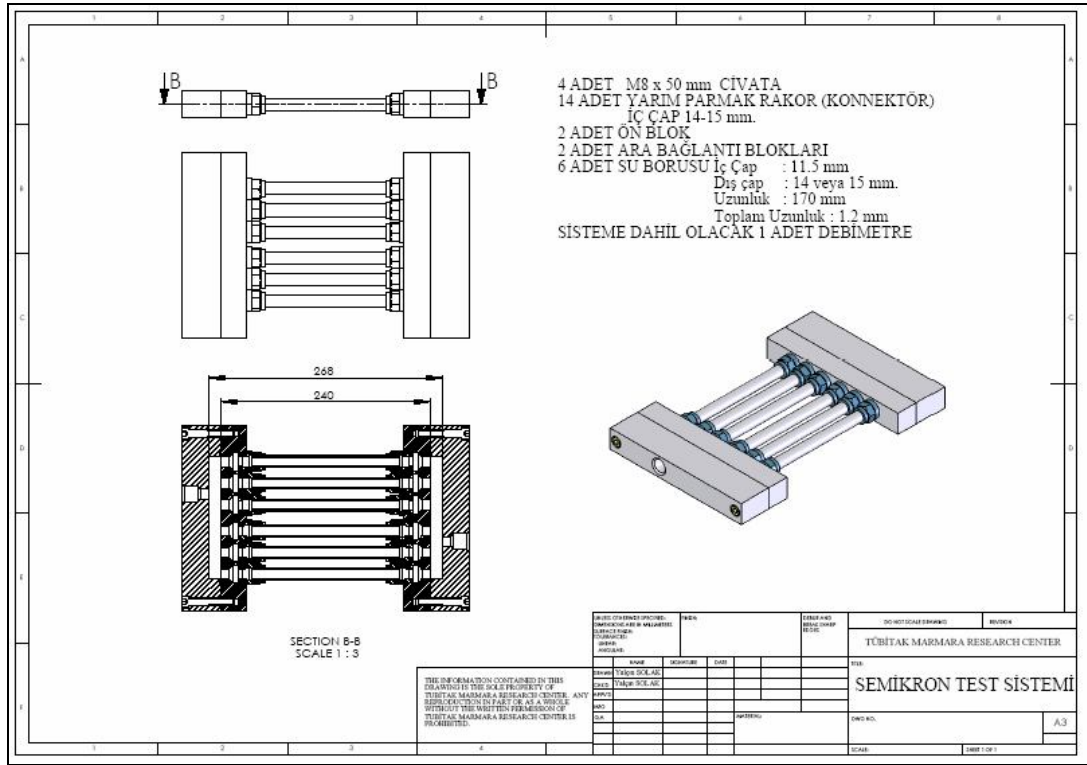
Semikron soğutma bloğu 3 temel bloktan oluşmaktadır. Giriş ve çıkış aynıdır, fakat köşegen doğrultusunda simetrik yerleştirilmiş parçalardır. Orta blok akışkanın dağıldığı kanalları içermektedir.

Tasarlanan deney prototipi için, giriş ve çıkış bloklarının prototip modeli ve orta bloğun prototip modeli oluşturulmuştur. Semikron üzerindeki giriş ve çıkış bloklarının geometrisi aynı şekilde korunmuştur, malzeme olarak şeffaf plexi glass malzemeden prototip üretimi yapılmıştır. Semikron üzerindeki orta bloğun prototip modeli üç parça halinde tasarlanmıştır. Orta blok içerisindeki kanallar; iç çap değeri 11.5 mm değerindeki borular ile modellenir. Borular hazır olarak temin edilir. Boruların, giriş ve çıkış parçalarına bağlanabilmesi için konektörlerin bağlı olduğu iki adet ara parça tasarlanmıştır. Ara parçalardan bir tanesi giriş parçası ile borular arasında, diğeri borular ile çıkış parçası arasındadır.

Tasarlanan test prototipinin katı modeli Şekil 4.1’de ve teknik çizimi Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.1: Test Prototipinin Katı Modeli



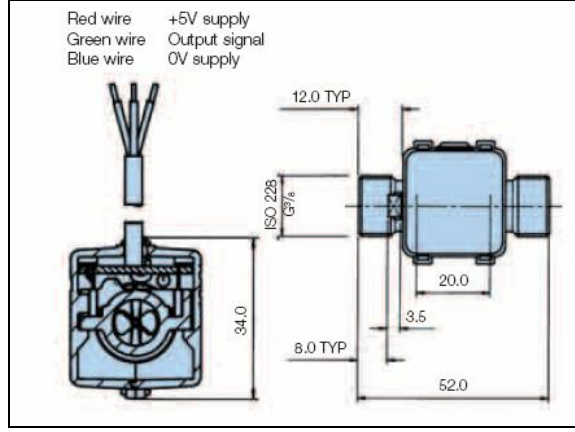
Şekil 4.2: Test Prototipinin Teknik Resmi

“Quick Connect” ismiyle bilinen, dış çapı 14 mm olan borulara sıkı geçme bağlantıyla takılan konektör ara parçalara bağlanmış ve borular bu konektörlere bağlanmıştır. Sistemin demontesi çok kolaydır, her kanala bu şekilde erişmek mümkündür.

Kanallar arasındaki mesafenin az olması, sistem için uygun akış sensörlerinin ve transdüserlerinin seçimini kısıtlamaktadır. Akış transdüserinde sisteme bağlanabilirlik, direnç etkisinin düşük olması (basınç düşüşü), ölçüm doğruluğu ve ekonomiklik göz önünde bulundurularak seçim yapılmıştır. Akış transdüserinin özellikleri Tablo 4.1’de, boyutları Şekil 4.4’de görülmektedir [13].

Tablo 4.1: Akış Transdüserinin Özellikleri

Uygulama	Kızılötesi
Maksimum Çalışma Basıncı	20 bar
Basınç Düşümü	Maksimum 0.1 bar 15 lt/dk’da
Akış Aralığı	1-25 lt/dk
Kalibrasyon	K faktörü 752 sinyal 1 litrede. *uygulamaya bağlı.
Ölçüm Doğruluğu	±2%
Tekrar edilebilirlik	±1%
Boyutları	52mm x 29mm x 27mm
Besleme Kaynağı	5V DC
Çıkış Sinyali	5V DC kare dalga



Şekil 4.3: Akış Transdüserinin Boyutları

4.3 Akış Transdüserinin Çalışma Yapısı

Akış transdüserinin içerisinde bir türbin ve iki optik transistör yer almaktadır. Akış transdüseri, debi ölçülecek kanala direkt bağlanır. Akışın, cihazın içerisinden geçmesi ve türbini döndürmesi gerekir. Türbin, akışın debisiyle belli bir hızda döner; akışın debisi ile türbinin dönüş hızı doğru orantılıdır. Türbinin üzerine ve altına karşılıklı olarak yerleştirilen iki foto transdüser sürekli bir sinyal yayar. Türbinin rotoru akışın etkisiyle döndükçe her kanat kızılötesi sinyali kesmeye başlar. Bu kesme frekansı, standart kare dalga çıkış sinyali olarak cihazdan alınır. Şekil 4.4’de prototip üzerinde kullanılan akış transdüseri görülmektedir.



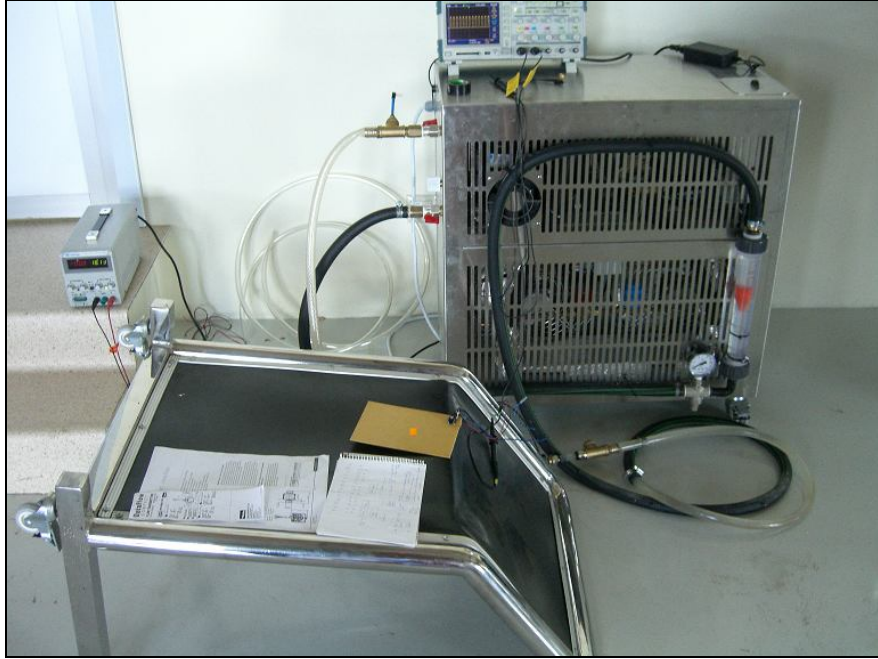
Şekil 4.4: Test Prototipinde Kullanılan Akış Transdüseri

Akış transdüseri, verilen bir frekans sabitine göre kalibre edilmiştir. Frekans sabiti, cihazın teknik verilerinde k faktörü olarak geçmektedir ve cihazın verdiği kare dalga sinyal frekansının debiye dönüştürülmesi noktasında gereklidir. K faktörü, 752 kare dalga sinyali bir litre, olarak tanımlanmıştır.

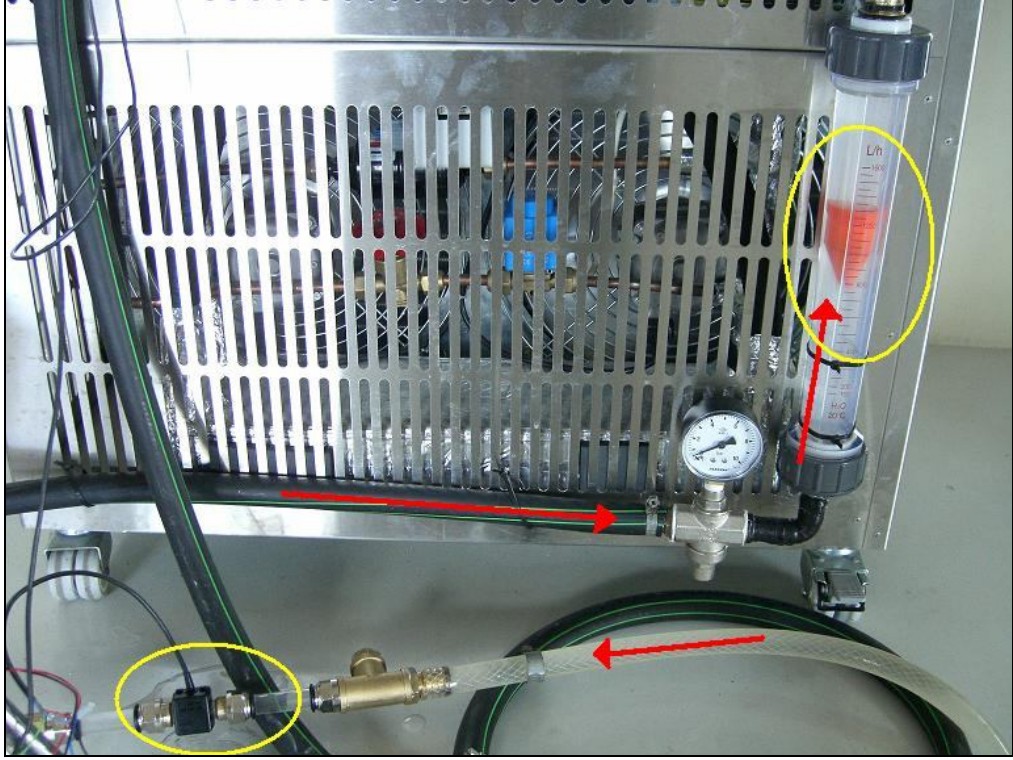
4.4 Ana Hat Debimetresinin Ölçüm Doğruluğunun İncelenmesi

Test sistemi içerisinde, akış transdüseri soğutma sisteminin kanallarına bağlıyken, ana hat debisi 12.5 lt/dk değerinde (750 lt/h) şamandıralı debimetre ile ayarlanır. Akış transdüseri, şamandıralı debimetre ile aynı hatta bağlanmış ve çeşitli debi değerlerinde ölçüm alınarak şamandıralı debimetrenin teknik verileri ile karşılaştırılmıştır.

Akış transdüseri ile şamandıralı debimetrenin oluşturduğu test sistemi Şekil 4.5 ve 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.5: Ana Hat Debimetresinin Ölçüm Doğruluğunun İncelenmesi için Kurulan Test Sistemi

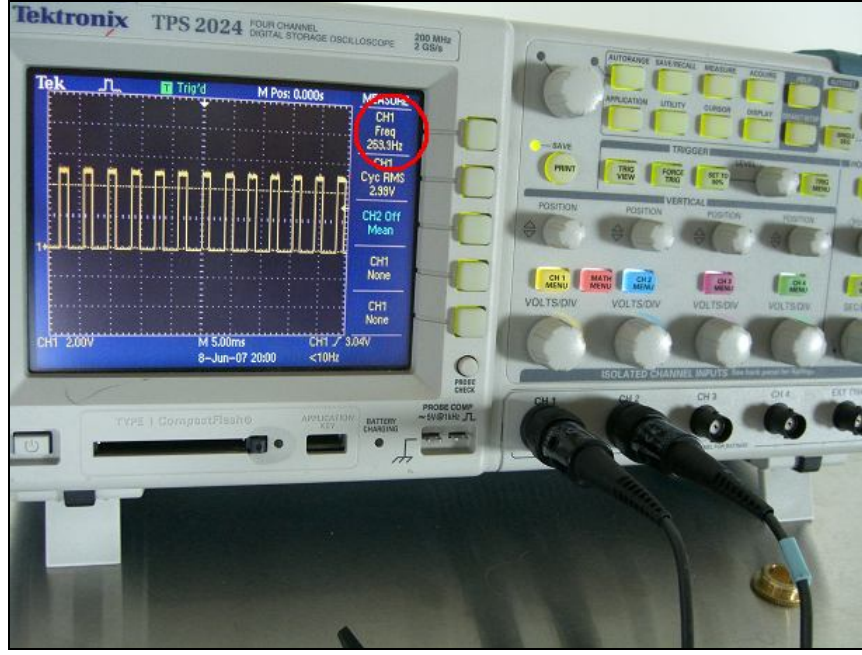


Şekil 4.6: Ana Hat Debimetresi Test Sistemi

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, akış transdüserinden geçen hat üzerinde şamandıralı debimetre de vardır. Bağlanan debimetrenin akış debisi ölçüm aralığı 160 lt/h-1600 lt/h'dir.

Akış transdüseri, dijital kare sinyal çıkışı verir, sinyalin osiloskopta frekans olarak görüntülenmesi bir elektronik devre üzerinden geçirilmesi ile olur. Akış transdüserinin beslenmesi 24V DC kaynak üzerinden 5V DC gerilim ile gerçekleştirilmiştir.

Osiloskop üzerinden okunan frekans değeri, k faktörü ile debi değerine dönüştürülür. Görüntülenen frekans değerlerinden biri Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7: Ölçüm Sırasında Görüntülenen Frekans Değeri

Ölçümler, vana yardımıyla debinin ayarlanması ile yapılır. Vana tam açıkken pompanın basabildiği debi değeri 21.67 lt/dk'dır. Bu pompa, prototipin testi sırasında da kullanılmıştır. 21.67 lt/dk, 1300 lt/h' karşılık gelmektedir. Şamandıralı debimetre üzerindeki debi skalasından ölçümler 100 lt/h aralıklarla kaydedilmiştir. Belirlenen bu noktalarda, her debi için, aynı zamanda akış transdüserin okuduğu frekans değerleri de kaydedilmiştir.

Değerlendirme yapmadan önce akış transdüserinin k faktörünü ve şamandıralı konik debimetrenin ölçüm doğruluk değerlerini açıklamak gereklidir. Akış transdüserinin k faktörü için verilen bilgi; 752 kare sinyalin 1 litreye denk geldiği bilgisidir. Bu değerlerin frekans ve debiye dönüştürülmesi denklem (4.1) ile denklem (4.6) arasında ifade edilmiştir.

$$752 \text{ pulse} \Leftrightarrow 1 \text{ litre} \quad (4.1)$$

$$752 \frac{\text{pulse}}{\text{saniye}} \Leftrightarrow 1 \frac{\text{litre}}{\text{saniye}} \quad (4.2)$$

$$752 \text{ Hz} \Leftrightarrow 1 \frac{\text{litre}}{\text{saniye}} \cdot \frac{60 \text{ saniye}}{\text{dakika}} \quad (4.3)$$

$$752/60 \text{ Hz} \Leftrightarrow 1 \text{ lt/dk} \quad (4.4)$$

$$12.53 \text{ Hz} \quad \Leftrightarrow \quad 1 \text{ lt/dk} \quad (4.5)$$

$$K = \frac{1}{12.53} \text{ lt/dk/Hz} \quad \text{veya} \quad 12.53 \text{ Hz/lt/dk} \quad (4.6)$$

Şamandıralı konik debimetrenin ölçüm doğruluğu değerleri Tablo 4.2’de görülmektedir. Ölçüm doğruluğu, kullanılan debimetrenin ölçüm aralığına ve bu aralıkta geçen akışkanın debi değerine bağlıdır. Test sisteminin ana hattında kullanılan debimetrenin skalası 160-1600 l/h’dir. 750 L/h debinin (12.5 L/dk) debimetrenin skalasına göre akış yüzdesi, % 47’dir. Bu debi değerinde şamandıralı debimetrenin ölçüm doğruluğu %5 ile %5.5 arasındadır [14].

Tablo 4.2: Ana Hat Debimetresinin Ölçüm Doğruluk Değerleri

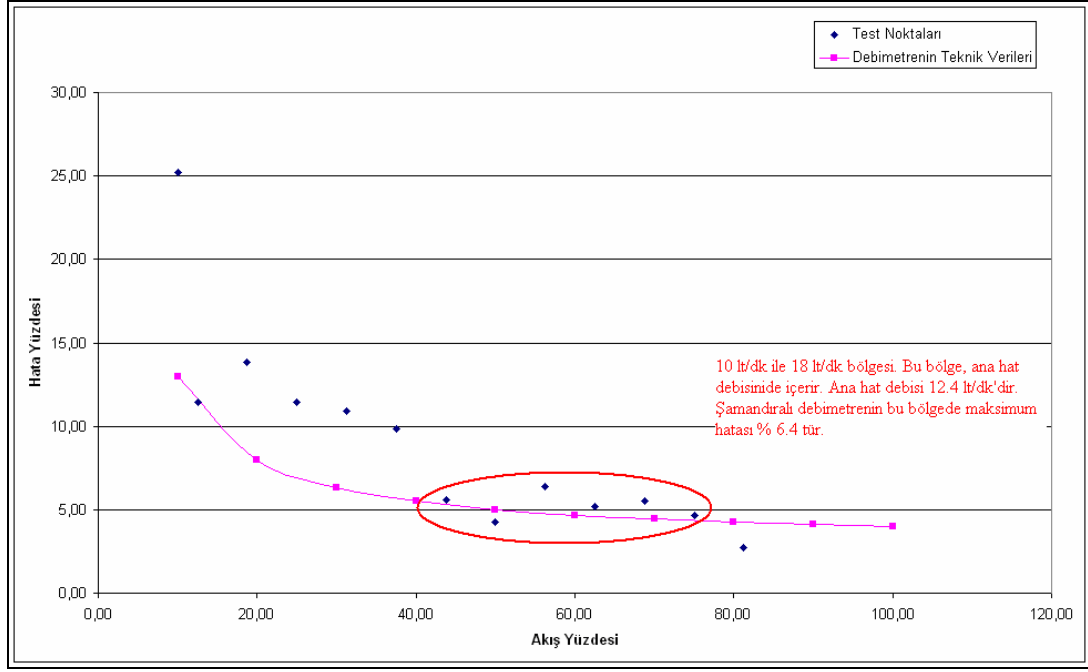
Kesinlik Sınıfı 4. VDE/DIN 3513 Blatt 2'e göre (Accuracy class 4 with VDE/DIN 3513 Blatt 2)										
Akış %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Öçülen değerden olan toplam fark %	4	4.111	4.25	4.429	4.667	5	5.5	6.333	8	13

Ölçümler ile elde edilen veriler Tablo 4.3’de görülmektedir. 1. sütun; su hattında debinin vana yardımıyla ayarlanması ile şamandıralı debimetrede ölçüm alınan noktalardır. 2. sütun, debi değerlerinin L/h’den L/dk’ya çevrilmiş halleridir. 3.sütun, şamandıralı debimetrede akış yüzdesini gösteren sütundur, karşılaştırma için gereklidir. 4. ve 5. sütunlar akış transdüseri ile alınan frekans verileri ve debiye çevrilmiş değerleridir. Son sütun, şamandıralı debimetrenin akış transdüserine göre hata yüzdesidir.

Tablo 4.3: Ana Hat Debimetresinin Okuduğu Değerler ile Akış Transdüserinin Okuduğu Değerlerin Karşılaştırılması

Akış Yönü Doğrultusu (Kullanılan)					
Ana Hat debimetresinde okunan değer		Akış Yüzdesi	Akış transdüserinin okuduğu frekans değeri	K=12.53 Hz/(lt/dk)	Ölçümdeki Fark
L/h	L/dk	%	Hz	L/dk	%
1300	21.67	81.25	264	21.07	2.76
1200	20.00	75.00	239	19.07	4.63
1100	18.33	68.75	217	17.32	5.54
1000	16.67	62.50	198	15.80	5.19
900	15.00	56.25	176	14.05	6.36
800	13.33	50.00	160	12.77	4.23
700	11.67	43.75	138	11.01	5.60
600	10.00	37.50	113	9.02	9.82
500	8.33	31.25	93	7.42	10.93
400	6.67	25.00	74	5.91	11.41
300	5.00	18.75	54	4.31	13.81
200	3.33	12.50	37	2.95	11.41
160	2.67	10.00	25	2.00	25.18

Akış yüzdesi ve hata yüzdesine göre çizdirilen eğri ile üretici firmanın verdiği değerlerden çizdirilen eğri aynı grafikte gösterilmiştir. Grafik, Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8: Ana Ha Debimetresinin Akış Yüzdesine Bağlı Hata Yüzdesi Eğrisi

Ana hat debisi, CFD analizlerinde 12.45 lt/dk'dır. Şamandıralı debimetrede, skalanın ölçeklendirilmesi lt/h biriminde 10'ar 10'ardır. 700 lt/h ile 800 lt/h debi aralığı 10 eşit parçaya bölünmüş ve işaretlenmiştir. Şamandıralı debimetrenin okunabilirliği 10 lt/h'dir. Ana hat debisi, 750 lt/h debiye ayarlanmıştır, akış yüzdesi % 47'dir. Şamandıralı debimetrenin ölçtüğü değerler ile akış transdüserin ölçtüğü değerler karşılaştırıldığında, % 40 akış yüzdesi ile % 60 akış yüzdesi arasında şamandıralı debimetrenin doğruluğunun en kötü % 6.4 olduğu görülmüştür.

12.5 lt/dk debide, ± 0.8 lt/dk hata payı vardır.

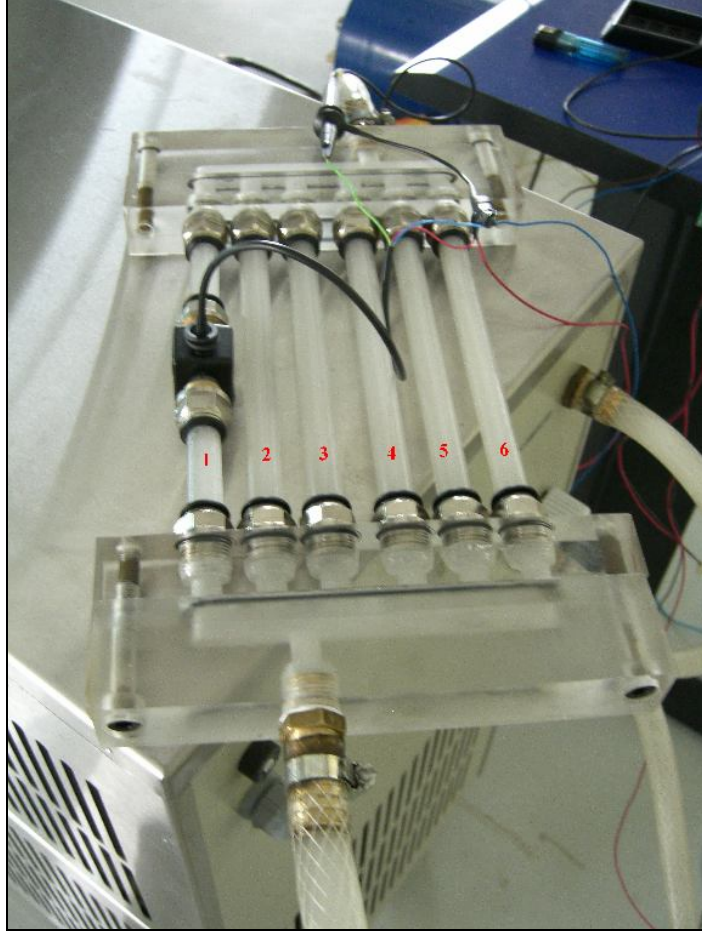
4.5 Test Sistemi ve Kanallarda Debi Ölçümü

Test sistemi; Semikron soğutma bloğu ile akış yönünden aynı ölçülerde geometriye sahip deney prototipinden, akış transdüserinden, güç kaynağından, güç kaynağından gelen gerilimi besleme gerilimine düşüren bir elektronik devreden, akış transdüserinin verdiği sinyal çıkışını görüntüleyen osiloskoptan ve su devir daimini sağlayan soğutma ünitesinden oluşur. Soğutma ünitesi üzerinde ana hat akış debisini ayarlayan bir şamandıralı debimetre ve pompa bulunur. Test sistemi Şekil 4.9'da görülmektedir.



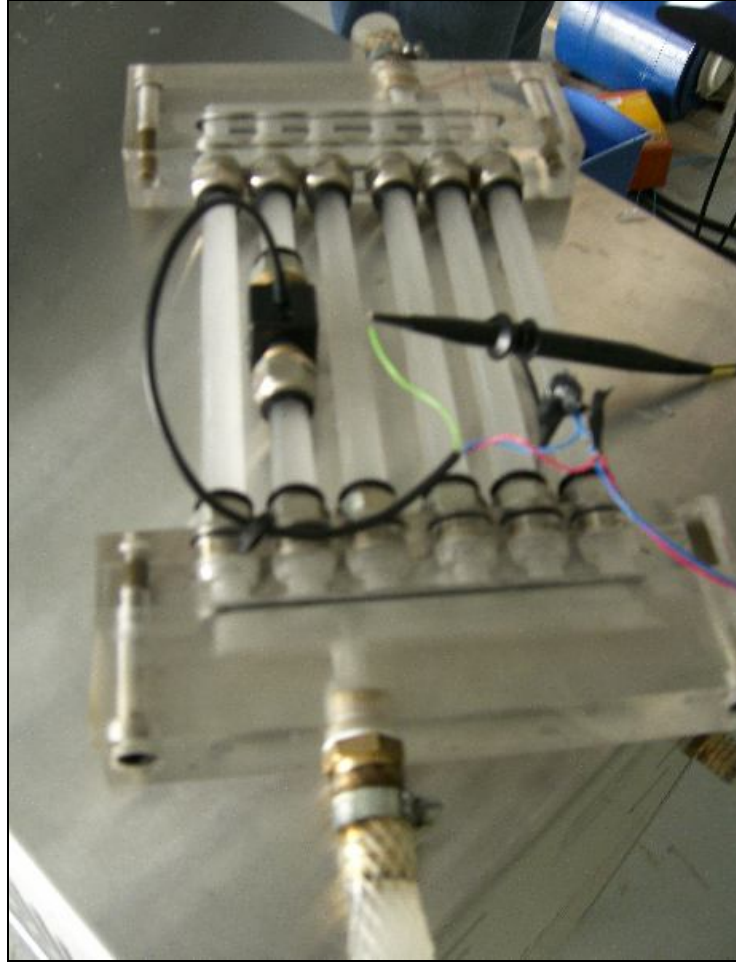
Şekil 4.9: Semikron Soğutma Bloğu Prototipi Test Sistemi

Deneysel çalışmalar, ana hat debisinin 12.5 lt/dk debiye ayarlanmasıyla başlar. Akış transdüseri, Şekil 4.10'da görüldüğü gibi 1 numaralı kanala takılıdır. Sistemin, sürekli rejime girmesinden sonra ölçümler alınmaya başlanır. Sistemin sürekli rejime oturması çok kısa bir süredir, bu zaman dilimi osiloskopta okunan frekansın değişmemesinden anlaşılır.



Şekil 4.10: Test Prototipi-Akış Transdüseri Birinci Kanala Takılı

Birinci kanaldan ölçüm alındıktan sonra, akış transdüseri diğer kanallara takılarak ölçüm alınmaya devam edilmiştir. Şekil 4.11’de akış transdüseri 2. kanala takılıdır.



Şekil 4.11: Test Prototipi-Akış Transdüseri İkinci Kanala Takılı

Her kanaldan alınan frekans sinyalleri, osiloskopta görüntülenmiştir ve k faktörü ile debiye çevrilmiştir. Test sonuçları Tablo 4.4’de görülmektedir.

Tablo 4.4: Test Sonuçları

Kanallar	Frekans	Debi	% değerleri
	kHz	Lt/dk	
kanal-1	18.4	1.46	11.6
kanal-2	36.8	2.94	23.3
kanal-3	39.2	3.13	24.9
kanal-4	10.9	0.87	6.9
kanal-5	26.7	2.13	16.9
kanal-6	25.8	2.06	16.3
			100

Test sonuçları tezin başlangıcında soğutma sistemin yapısından dolayı kanallarda farklı debileri oluşacağı düşüncesi doğrulanmıştır. Kanallar arasında en yüksek debiye 3. kanal, en düşük debiye 4. kanal sahiptir. Kanallar arasında farklı debilerin olması, kanallar içerisinde ısı dengenin farklı film sıcaklıklarında oluşmasında ve IGBT modüllerinin alt yüzeylerinde sıcaklık dağılımların bölgesel olarak farklılık göstermesinde önemlidir. Bu açıdan, 1. ve 4. kanal üzerindeki yüzeylerde diğer yüzeylere göre ısı denge daha yüksek sıcaklıkta oluşur.

Test sonuçları, akış analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İki boyutlu akış analiz sonuçları ile test sonuçları Tablo 4.5’de birlikte verilmiştir.

Tablo 4.5: İki Boyutlu Akış Analiz Sonuçları ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

	İki Boyutlu Akış Analiz Sonuçları				Test Sonuçları
	k- ω	k- ω sst	RSM	k- ϵ	
	Debi	Debi	Debi	Debi	Debi
	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk
kanal-1	1.84	1.62	0.34	6.07	1.46
kanal-2	2.77	3.06	4.49	5.75	2.94
kanal-3	1.51	1.89	3.86	2.03	3.13
kanal-4	1.42	0.60	0.24	8.86	0.87
kanal-5	2.18	2.39	1.29	15.64	2.13
kanal-6	2.74	2.94	3.47	1.54	2.06

İki boyutlu akış analiz sonuçlarının, test sonuçlarından olan farkının, denklem (4.7) ile test sonuçlarına bölünmesiyle elde edilen göreceli hata yüzde olarak Tablo 4.6’da görülmektedir.

$$\% \text{ hata} = \frac{(Test - CFD)}{Test} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Tablo 4.6: İki Boyutlu Akış Analiz Sonuçlarının Test Sonuçlarına Göre Hata Yüzdeleri

	k- ω hata %	k- ω sst hata %	RSM hata %	k- ϵ hata %	TEST
kanal-1	25.66	10.58	77.07	314.13	-
kanal-2	5.91	3.93	52.85	95.53	-
kanal-3	51.70	39.74	23.28	35.31	-
kanal-4	63.28	30.72	72.96	918.25	-
kanal-5	2.17	12.14	39.42	633.17	-
kanal-6	32.93	42.59	68.61	25.02	-

Test sırasında da görülen az debi geçen 4. kanala, modeller en iyi % 30 mertebelerinde hata değeriyle yaklaşmışlardır. Diğer kanallarda, % 20 civarında hata değerleri görülmektedir, fakat genel olarak iki boyutlu akış analizleri test sonuçlarına yakınsayamamıştır. k- ϵ modeli, ters akış gösterdiğinden, gerçek değerler ile ilgisi olmayan sonuçları elde etmiştir.

Test sonuçlarının üç boyutlu akış analiz sonuçları ile karşılaştırılması Tablo 4.7’de yer almaktadır.

Tablo 4.7: Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçları ve Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçları				Test Sonuçları
	k-w	k-w sst	RSM	k-e	
	Debi	Debi	Debi	Debi	Debi
	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk
kanal-1	1.36	1.41	1.30	1.35	1.46
kanal-2	3.41	3.12	3.11	3.19	2.94
kanal-3	3.18	3.25	3.57	3.48	3.13
kanal-4	0.35	0.52	0.14	0.20	0.87
kanal-5	1.92	1.81	1.93	1.93	2.13
kanal-6	2.19	2.28	2.35	2.26	2.06

Akış analiz sonuçlarının, test sonuçlarından olan farkının, test sonuçlarına bölünmesiyle elde edilen göreceli hata yüzde olarak Tablo 4.8’de görülmektedir.

$$\% \text{ hata} = \frac{(|Test - CFD|)}{Test} \cdot 100 \quad (4.8)$$

Tablo 4.8: Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçlarının Test Sonuçlarına Göre Hata Yüzdeleri

	Üç Boyutlu Akış Analizleri % Hata				TEST
	k- ω hata %	k- ω sst hata %	RSM hata %	k- ϵ hata %	
kanal-1	7.02	3.89	11.10	7.99	-
kanal-2	15.91	6.01	5.71	8.34	-
kanal-3	1.50	3.65	14.07	11.05	-
kanal-4	59.25	40.43	84.31	77.08	-
kanal-5	9.89	15.37	9.51	9.60	-
kanal-6	6.48	10.57	14.28	9.93	-

Üç boyutlu analizlerde ilk fark edilen, analiz sonuçlarının test sonuçlarına 4. kanal dışında oldukça iyi yakınsamış olmalarıdır. Türbülans modellerinin, türbülansın üçüncü boyutunu da denklemlere katarak çözüm yaptıklarında daha iyi sonuçlara ulaştıkları görülmektedir. Özellikle iki boyutlu k- ϵ modeli çözümleri ile üç boyutlu k- ϵ modeli çözümleri arasındaki fark dikkate değerdir.

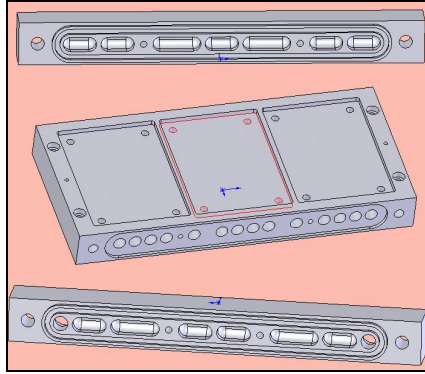
Bu tabloda görülen önemli bir özellikte, gerçek sistemde en az debiye sahip 4. kanalda, türbülans modellerinin maksimum hataya düşmesidir. Bu şekilde ve genel hata değerleriyle değerlendirildiğinde en başarılı türbülans modeli k- ω sst modelidir.

5. YENİ SOĞUTMA SİSTEMİ TASARIMI

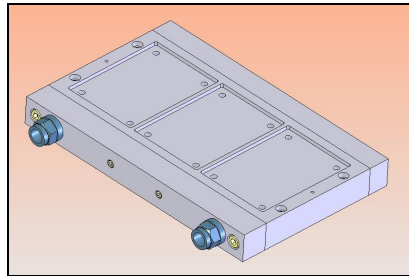
Yeni bir soğutma sistemin tasarlanmasında en önemli faktör, Semikron soğutma sisteminin prototipinin akış kanalları içerisinde farklı debilere sahip olmasıdır. Bu durum, soğutma sistemi yüzeyinde farklı sıcaklıklara yol açar. IGBT modülleri üzerinde oluşan sıcaklık değerleri de farklı olur. Kanallar içerisinde farklı debilerin oluşmasını önlemek ve eşit debili sistemi kurmak için, tek kanaldan akışkanın tüm sistemi dolaşmasına çalışılmıştır. Yapılabilirlik kısmı CAD tasarımını oluşturmuştur.

5.1 Soğutma Sisteminin CAD Tasarımı

CAD tasarımı Solidworks programı ile yapılmıştır. Soğutma sistemi üç bloktan oluşmaktadır: IGBT modüllerini taşıyan orta blok, su girişinin olduğu ön blok ve su çıkışının olduğu arka blok. Şekil 5.1’de, soğutma sistemin; arka bloğunun, orta bloğunun ve su giriş-çıkış yerlerinin bulunduğu ön bloğunun katı modelleri görülmektedir. Şekil 5.2’de, soğutma bloklarının montaj edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 5.1: Soğutma Sistemi Parçaları-Arka Blok-Orta Blok-Ön Blok



Şekil 5.2: Tasarlanan Yeni Soğutma Sistemin Katı Modeli

Bu sistemde su giriş ve çıkış kanalları aynı yüzdedir. Su, su giriş kanalından sonra orta bloktan geçerek arka bloktan dönüp tekrar aynı Şekilde orta blokta su çıkış kanalına kadar dolaştırılmaktadır. Su sızdırmazlığı o-ring'ler ile sağlanmıştır.

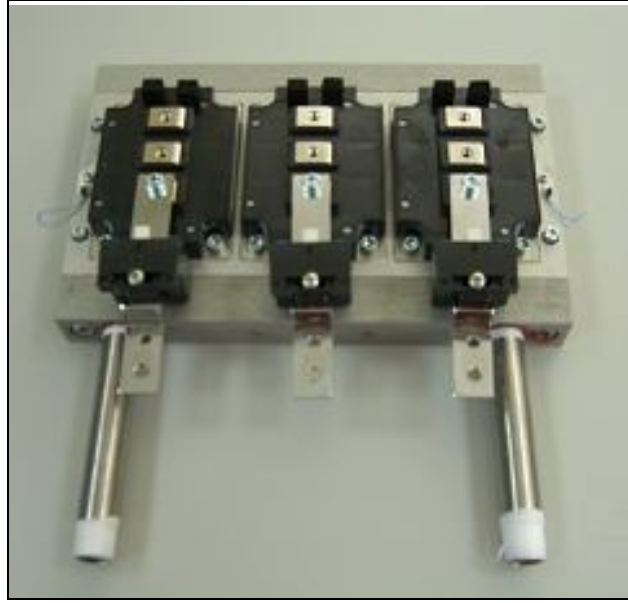
5.2 Soğutma Sisteminin retimi

Katı modelleri Solidworks programı ile CAD ortamında tasarlanan bloklar, alüminyum malzemeden CNC'de işlenerek üretilmişlerdir. Üretilen parçalardan; arka blok, orta blok ve n blok Şekil 5.3'de görülmektedir. Arka ve n blokta, su sızdırmazlığını sağlayacak contaların (o-ring) yerleri mevcuttur. Şekil 5.3'de contalardan biri arka blok üzerinde takılı halde görülmektedir.



Şekil 5.3: Arka Blok-Orta Blok-n Blok

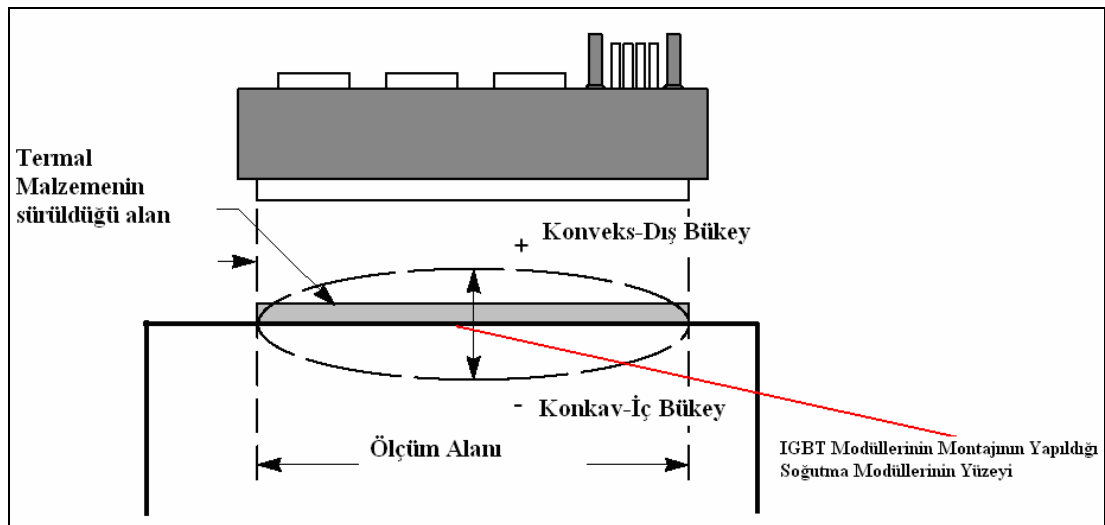
Parçaların birbirine monte edilmiş hali Şekil 5.4'de görülebilir. Şekil 5.4'de Mitsubishi firmasının CM600DY-12NF numaralı IGBT modülleri de soğutma sistemi bloğu üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.4: Yeni Soğutma Sisteminin ve IGBT Modüllerinin Montaj Edilmiş Görüntüsü

5.3 IGBT Modüllerinin Sisteme Montajı

Üç IGBT modülü M6 civatalarla soğutma bloğuna monte edilir. Modüllerin, soğutma bloğu üzerine montajı sırasında; civataların yanlış sırayla bağlanması ve eşit torkla sıkılmaması, soğutma bloğu yüzeyinin belli bir eğrilik değerinden daha fazla eğrilğe sahip olması sebebiyle istenmeyen montaj gerilmeleri meydana gelebilir. Montaj gerilmeleri, IGBT modülleri içerisindeki devre elemanlarına, seramik esaslı malzemelere zarar verebilir, prototip üretimi sırasında bu hususlar dikkate alınmıştır, soğutma bloğunun imalatı sırasında, yüzey eğriliğinin istenen aralıkta olmasına çalışılmıştır.



Şekil 5.5: Soğutma Bloklarının Yüzeylerinin İşlenme Kalitesi-Yüzey Eğriliğinin Önemi

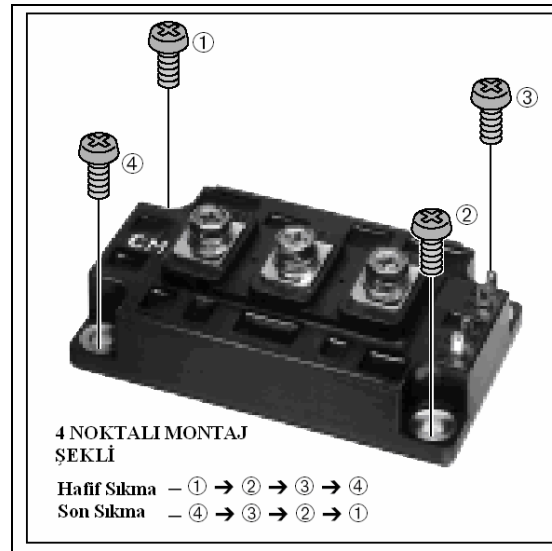
Tablo 5.1: Orta Blok IGBT Modül Yüzeylerinin Eğrilik Gerekleri

Soğutma Bloğu Yüzeyi Eğrilik (Flatness) Gerekleri	
Modül Alt (base) Plaka Malzemesi	Soğutma Bloğu Yüzey Eğriliği
Bakır Plakalı Modüller	-100 µm ile + 100 µm (Konveks-Konkav)
Alüminyum Plakalı Modüller	-50 µm ile + 100 µm

Kullanılan IGBT modülleri bakır plakalı modüllerdir. Orta blok üzerinde, IGBT modüllerinin yerleştiği yüzeylerin eğrilik limitleri Tablo 5.1’de verilmiştir [6]. Soğutma bloğu yüzey eğriliğinin, iç bükey kısmında maksimum 100 µm, dış bükey kısmında maksimum 100 µm değerlerini geçmemesi Mitsubishi firması tarafından önerilmiştir. Kullanılan CNC tezgahının standart ivmesi $1m/s^2$ ’dir. Bir satır bloğunun 10 ms işleme alınma süresi içerisinde (saniyede 10 mm parça işleyerek), 5-10 mikron tolerans bandı içinde kalarak doğru koordinatlarda pozisyonlama yapabilmektedir.

Civataların montaj sırası ve montaj torku üretici firma tarafından verilmiştir, montaj sırasında bu sıralamaya uyulmuştur ve Şekil 5.6’da civataların montaj sırası gösterilmiştir. Montaj torku ayarlanabilir bir matkap motoru ile montaj yapılmıştır. Montaj torku 40 in-lb’dir.

$$T_{MONTAJ} = 40 \text{ lb.in} = 40 \cdot \frac{0.4535 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} \cdot \frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \cdot \frac{0.0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} = 4.5 \text{ Nm} \quad (5.1)$$

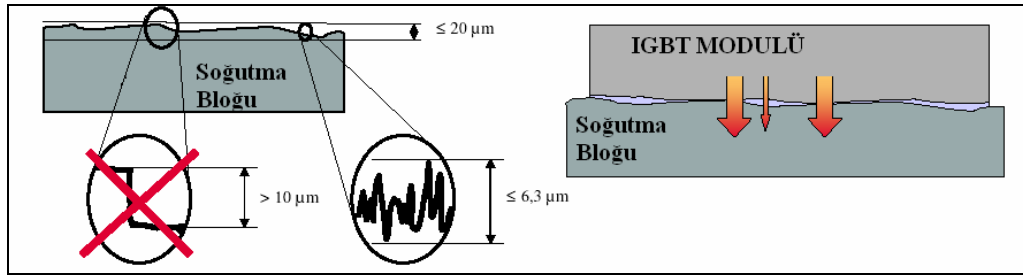


Şekil 5.6: IGBT Modüllerin Soğutma Bloğuna Montajı-Civataların Montaj Sıralaması

Mekanik açıdan, IGBT modülleri içerisinde bulunan seramik yalıtıma zarar vermemek için civataların montaj sırası, montaj torku ve soğutma bloğunun yüzey eğriliği önemliken; ısııl açıdan IGBT modüllerinin montajından sonra, modüllerin bakır plaka yüzeyi ile soğutma bloğunun yüzeyi arasında oluşan termal direnç önemlidir.

Termal direnç, iki metal yüzeydeki pürüzlülüklerden dolayı yüzeylerin birbirine her noktada temas etmemesi ve arada durağan hava boşluklarının olması sebebiyle oluşur. IGBT modüllerinden su kanallarına ısı aktarımı sırasında, sistem genelinde direncin en yüksek olduğu bölge, modül yüzeyleri ile soğutma bloğu yüzeyleri arasındır. Bu sebeple, IGBT modüllerinin montajı yapılmadan, termal direnci azaltıcı, hava boşluklarını doldurması amaçlı termal ısı iletim malzemesi yüzeylere sürülür.

Yüzey pürüzlülüğünün seviyesi-yüzeyin işleme kalitesi, termal direncin yüksekliğini belirler. Şekil 5.7’de IGBT modülünün pratikte, soğutma bloğunun yüzeyi ile nasıl birleştiğini ve soğutma bloğunun yüzey kalitesinin limitlerini göstermektedir.



Şekil 5.7: Termal Direncin IGBT Modülleri Yüzeyi ve Soğutma Yüzeyi Arasında Oluşması
Modüllerin soğutma bloğu üzerinde montaj yapıldıkları alanda, eşitsizliğin (unevenness) maksimum değeri 20 µm’dir. Yüzey pürüzlülüğünün 6.3 µm’den küçük olması istenmektedir. Eşitsizlik olarak verilen bilgi, yüzey pürüzlülüğünden daha geniş bir alanda olan, alan pürüzlülüğüdür. Pürüzlülük bölgesel olarak 6.3 µm’den küçük olabilir, fakat yüzey üzerinde mil yüzeylerinde olduğu gibi kademe olması istenmemektedir. Bu sebeple adım yüksekliğinin 10 µm’den küçük olması istenmektedir [6].

Pürüzlülük sebebiyle, oluşan termal direnci azaltmanın yollarından biri, yüzeyler arasına viskozitesi yüksek macun kıvamında bir akışkan olan termal ısı iletim malzemesi sürmek, hava boşluklarını doldurmak ve iki metal yüzeyin birbirine daha iyi temas etmesini sağlamaktır.

IGBT modülleri, soğutma bloğu yüzeyine monte edilmeden önce, yüzeylere termal ısı iletim malzemesi sürülmüştür.

Termal ısı iletim malzemelerinin genel özellikleri aşağıda yer almaktadır:

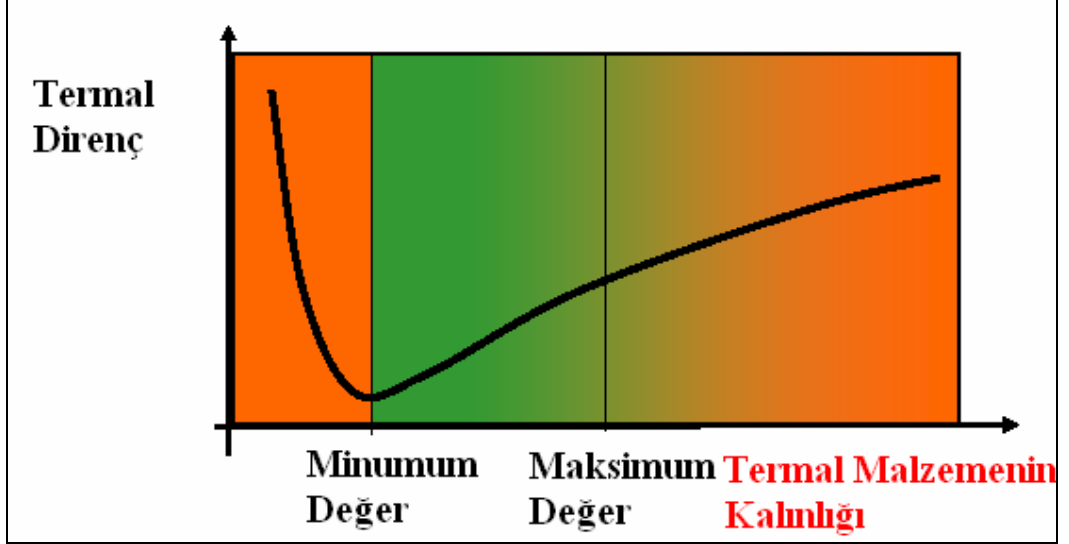
- Silikon esaslı malzemelerdir. Silikon, çevre koşullarından az etkilenen bir malzeme olduğundan, yüzeyler arasında bozulmadan, oksitlenmeden, değiştirilme ve bakım ihtiyacı duymadan ısı iletimini gerçekleştirir.
- Yüksek ısı iletim katsayısına sahiplerdir. Isı iletim katsayısı, metal-hava-metal yüzey birleşimine göre oldukça yüksektir. Geniş bir sıcaklık aralığında, silikon malzeme sabit ısı iletim katsayısına sahiptir.
- Yüksek dielektrik (izolasyon) yalıtımına sahiplerdir. Elektronik cihazların soğutulması amaçlı kullanılan tipleri, cihazın metal plakasıyla ve soğutma bloğuyla temasta olduğundan herhangi bir kaçak akımın cihazın plakasından soğutma bloğuna geçmesine izin vermez.
- En önemli özellikleri, düşük yüzey gerilmesine sahip olmalarıdır. Sürüldükleri yüzeyin daima ıslak kalmasını sağlarlar. Temas yüzeyini artırır.

Soğutma bloğu üzerinde kullanılan termal ısı iletim malzemesinin özellikleri Tablo 5.2’de görülebilir [15].

Tablo 5.2: TC 5021 Termal Isı İletim Malzemesi Fiziksel Özelliklerinin Değerleri

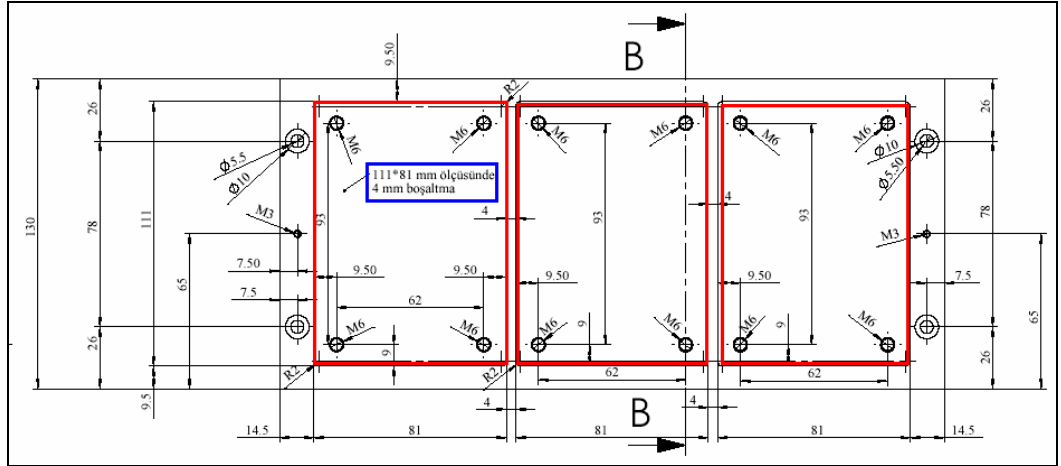
TC 5021 Termal Isı İletim Malzemesi	
Isı İletim Katsayısı	3.3 W/mk
Yoğunluğu	3.5 g/cm ³
Hacim Özdirenci	3.7E+11 ohm-cm
Dielektrik Gücü	5 kV/mm

Termal ısı iletim malzemesi, iki metal yüzey arasındaki hava boşluklarını doldurmak ve yüzeylerin birbirine daha iyi temas etmesi sağlamak için yüzeylere uygulanır. Isı iletim yeteneği-ısı iletim katsayısı metallere göre çok düşüktür ve gereğinden fazla miktarda yüzeylere sürülmesi, yüzeyde istenmeyen bir kalınlıkta termal malzemenin bulunmasına sebep olur. Yüzeyde fazla miktarda bulunan termal malzeme, ısı iletimini değil, ısı yalıtımı yapar. Şekil 5.9’da, termal ısı iletim malzemesinin, yüzey üzerinde sürülme kalınlığına bağlı olarak oluşturduğu direnç görülmektedir.



Şekil 5.8: Termal ısı iletim malzemesinin, yüzey üzerinde sürülme kalınlığına bağlı olarak oluşturduğu direnç

Mitsubishi tarafından önerilen minimum değer, 0.1 mm; maksimum değer 0.2 mm'dir. Ortalama değer 0.15 mm termal malzeme kalınlığı hedeflenerek, kımızı dikdörtgen çerçeveli IGBT modüllerinin yerleşim alanlarına sürülecek termal malzeme miktarı hacim olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9: Termal Malzemenin Sürülme Yüzeyleri

Şekil 5.9'da, termal ısı iletim malzemesinin sürüldüğü yüzeyler gösterilmiştir. Bir modül yüzeyi için hesaplanan ısı iletim malzemesi hacmi aşağıda yer almaktadır.

$$V_{\min} = 111 \cdot 81 \cdot 0.1 = 899 \text{ mm}^3 = 0.9 \text{ cm}^3 \quad (5.2)$$

$$V_{\max} = 111 \cdot 81 \cdot 0.2 = 1798 \text{ mm}^3 = 1.8 \text{ cm}^3 \quad (5.3)$$

Termal ısı iletim malzemesi yüzeylere sürüldükten sonra IGBT modüllerinin montajı yapılmıştır.

IGBT modüllerinin girişlerinde üç akım sensörü vardır. Sistemin araka tarafında IGBT modüllerine gerilimi sabit bir değerde verebilmek için yerleştirilmiş bara grubu bulunur. Elektronik devreler, kontrol edilen elektrik motorundan gelen yer bilgisine göre anahtarlama yapan ve sistemi kontrol eden kartlardır. Elektrik motor sürücüsünün son hali Şekil 5.10'da görülmektedir.

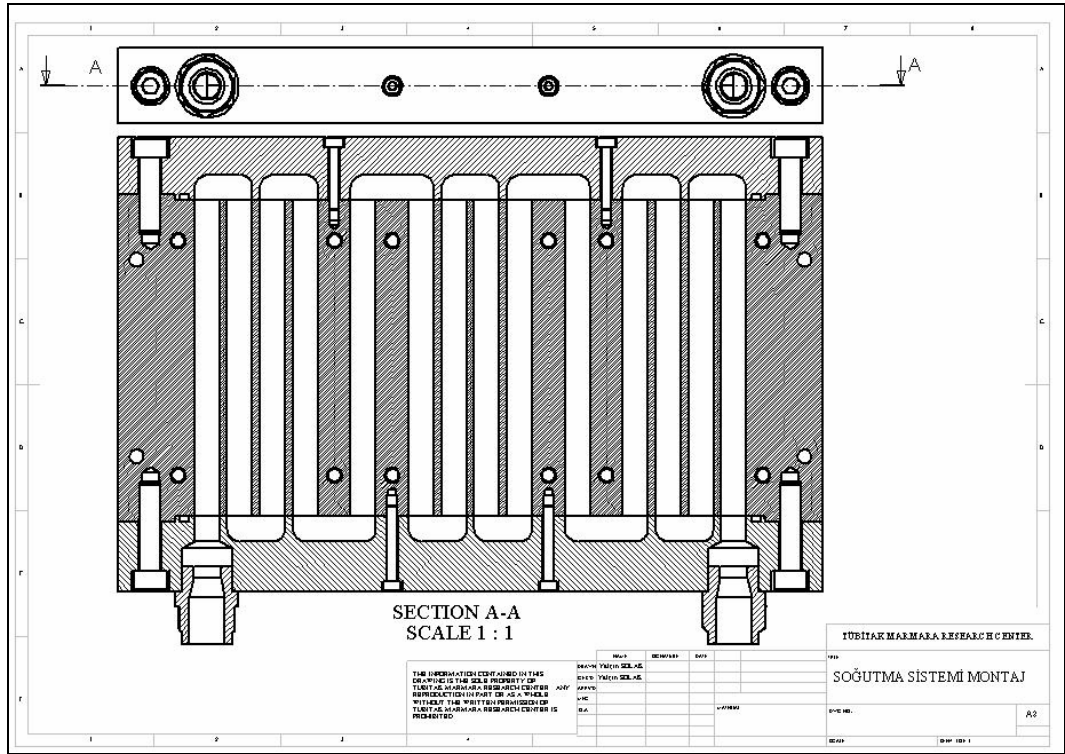


Şekil 5.10: Soğutma Sistemi, IGBT Modülleri, Kartları Monte Edilmiş Elektrik Motor Sürücüsü

5.4 Soğutma Sisteminin Kanal Yapısı

Tasarlanan ve üretilen soğutma sisteminin su kanallarının çapı 10 mm'dir. Orta blokta her IGBT modülünün altında, simetrik olarak 4 kanaldan oluşan 12 kanal, aralarda 2 kanal, toplam 14 soğutma kanalı vardır. Orta blok uzunluğu (kanal uzunluğu) 130 mm'dir.

Soğutma sistemi kanal yapısı Şekil 5.11'de görülmektedir. Kesit, soğutma bloğu sistemin orta düzleminde alınmıştır.



Şekil 5.11. Soğutma Sisteminin Kanal Yapısı

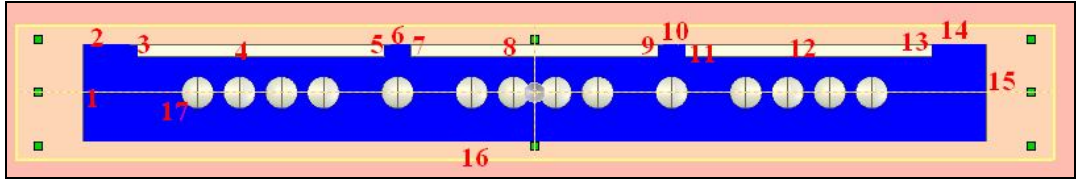
5.5 Isıl Analizler

Isıl analizler, ilk önce sistemin orta kesiti üzerinde iki boyutlu olarak, sonra sistemin genelinde üç boyutlu olarak yapılmıştır. Fluent programında enerji denkleminin çözülmesiyle elde edilen sonuçlar, elektrik motor sürücüsünün bir elektrik motorunu dinamometre üzerinde sürmesi ile gerçekleştirilen testin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

5.5.1 İki Boyutlu Isıl Analizler

Isıl analizler, enerji denkleminin Fluent programında çözülmesi ile yapılmıştır. Sistemin modellenmesinde, IGBT modüllerinin soğutma sistemi yüzeyine montaj şekli önemlidir. Termal ısı iletim malzemesi modellerde yer almaktadır. Modelin orta kesit geometrisi ve ağ yapısı Gambit programında oluşturulmuştur.

5.5.1.1 Sistemin Modellenmesi Ve Sınır Şartların Belirlenmesi



Şekil 5.12: Sınır Koşullarının Girildiği İki Boyutlu Modelin Kenarları

Soğutma bloğu, motor kontrol sürücüsü içerisinde kapalı bir hacimde yer almaktadır. 16 numaralı kenar, çevreyle temastadır, zeminle temasta olan bir yüzeye oturmaktadır. 16 numaralı kenar ile çevre arasında ısı taşınımı vardır. Çevre sıcaklığı 40°C olarak analizlerde alınmıştır. 16 numaralı kenar ile çevresindeki havada hız gradyeni yoktur. Doğal taşınım ile ısı çevreye geçmektedir. Bu yüzey üzerindeki ısı taşınım katsayısı, taşınım katsayılarının belirlenmesi bölümünde anlatılmıştır.

4,8,12 ve 17 numaralı kenarlar dışında kalan kenarlar durgun hava ile temasta olan kenarlardır. Işıma ile ısı geçişinin ihmal edildiği bu yüzeylerde, yan alanların 16 numaralı taban alanına oranla çok küçük olması sebebiyle taşınım da ısı geçişi ihmal edilmiştir.

Işınım ve taşınım, soğutma bloğundan çevreye olan ısı gücü 16 numaralı uzun kenar dışındaki kenar ve oluşturdukları yüzeylerde, ihmal edilmiştir. Bu durumda bu kenarlardan ortama ısı geçişi olmadığı kabulü ile bu kenarlarda sınır koşulu yalıtımdır.

Durgun havanın ısı taşınım katsayısı 7 W/m²K civarındadır. Soğutma bloğunun yanal alanı 0.0045 m²'dir ve maksimum yüzey ile ortam sıcaklığı arasındaki fark 100 °C olsa, bu durumda ısı geçişi 3 W mertebelerindedir, bu ısı bu değerde veya daha az da olsa çevreye yüzeyden geçecektir, modelde kenarların yalıtım olması; analizde bu ısınmada blok içersinden su ile çekilmesine sebep olur, soğutma kanalları daha fazla ısı yükü ile modellenmiş olur. Soğutma kanallarının soğutma kapasitesi yalıtım gibi istenmeyen durumları da karşılayacak kapasite de tasarlanmıştır.

IGBT modüllerinin ısı kayıplarının analizinde hesaplanan ısı gücü kaybının; 4, 8 ve 12 numaralı kenarların olduğu dikdörtgen kesitli alana homojen yayıldığı kabul edilmiştir. Bu kenarlara etki eden ısı yükü, ısı gücü kaybının etki ettiği alana

bölünmesiyle elde edilir. Isı gücü kaybı, üç farklı yöntemle hesaplanmıştır, üç farklı değerlerin ortalaması 1787 W analizlerde kullanılmıştır. Tablo 5.3’de görülmektedir.

Tablo 5.3: Ortalama Isı Gücü Kaybı ve Isı Akısı Sınır Şartı

İletim enerjisi ve kapı direncine bağlı anahtarlama enerjisi kaybı grafiğinden elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Akım-gerilim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Melcosim Sonucu
1763 W	2083 W	1516 W
Ortalama Güç Kaybı	1787 W	

Isı akısı denklem (5.4) ile hesaplanır.

$$q'' = \frac{1787}{A} = \frac{1787}{0.11 \cdot 0.08} = 203000 \text{ W/m}^2 = 203 \text{ kW/m}^2 \quad (5.4)$$

Sınır koşulu olarak 4,8 ve 12 numaralı kenarlara girilmiştir.

17 numaralı kenarlar, su kanalının yüzey kenarlarıdır. Bu yüzeylerde ısı geçişi, taşınım olur, bu kenarlara atanacak sınır koşulu çok hassastır. Bu yüzeylerde ısı geçişinin bağlı olduğu iki önemli parametre vardır. Bunlardan birincisi suyun ısı taşınım katsayısıdır, ikincisi suyun film (ortalama) sıcaklığıdır.

5.5.2 Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması

Yazılım temelli programlarda, sonlu elemanlar yöntemi ile parça küçük elemanlara ayrılır ve enerji denklemi yazılım tarafından çözülerek ısıl analiz yapılır. Enerji denklemi diferansiyel bir denklemdir, çözüm için sınır şartlarının girilmesi gerekir. Sınır şartları, yüzeylere olan ısı geçişi-ısı akısı, bilinen yüzey sıcaklıkları, soğutucu akışkanın ortalama sıcaklığı ve ısı geçiş katsayısı bilinmesi gereken parametrelerdendir.

Bir katı cidar üzerinde, farklı sıcaklıkta bir akışkanın bulunması durumunda, yüzey üzerindeki herhangi bir noktada, cidar ile akışkan arasındaki ısı geçişi, Newton’un soğuma kanuna göre denklem (5.5)’den hesaplanır [16].

$$q'' = h \cdot (T_o - T_\alpha) \quad (5.5)$$

q'' , ısı akısı cidardan akışkana birim alandan geçen ısı miktarıdır. h , ısı taşınım katsayısıdır. T_o , cidar sıcaklığıdır. T_a , akışkanın sıcaklığıdır.

\bar{h} , ortalama ısı taşınım katsayısı; akışkan cinsine, akış şekline ve geometriye bağlı bir büyüklüktür. Akışkanın soğutma bloğunun yüzeyinden aldığı ısı miktarı (ısı çekebilme yeteneği), akışkanın ısı taşınım katsayısına, ortalama akış sıcaklığına, cidar sıcaklığına ve boru ıslak yüzey alanına bağlıdır. Bu parametreler arasında büyüklük olarak alınan ısı miktarını belirleyen en önemli faktör ısı taşınım katsayısıdır.

$$q_{TOP} = \bar{h} \cdot A_{YÜZEY} \cdot (T_{cidar} - T_{akis}) \quad (5.6)$$

5.5.2.1 Kanal İçerisinde Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması

Akışkanın fiziksel özellikleri-ısı taşınımında etkili olan akış özellikleri; dinamik viskozitesi, yoğunluğu sıcaklıkla değişir. Akışkana; boru içersinde ısı enerjisi geçtikçe sıcaklığı artar, aksel doğrultudaki sıcaklık değişiminin giriş ve çıkış sıcaklıkları tahmin edilerek film sıcaklığı denilen ortalama sıcaklık tanımı yapılır ve akışkan özellikleri film sıcaklığında alınır.

IGBT modüllerine giren suyun giriş sıcaklığı, radyatörde soğuyan suyun çıkış sıcaklığıdır. Gerçek sistemde tüm soğutma sistemi araç içerisindeki araç radyatörüdür ve soğutmayı fan ile zorlanmış hava taşınımıyla yapar. Soğutulan sistemden alınan ısının atıldığı yer, çevre ortamıdır ve bu ortamın o anki sıcaklığına göre, çevre sıcaklığına göre, radyatörde soğuyan akışkanın sıcaklığı belli olur. Hava sıcaklığı 25°C ise, radyatör akışkanı ideal olarak maksimum 25 °C'ye kadar soğutabilir, burada ısı geçişinin olabilmesi için sıcaklık farkının olması gerektiği düşünülürse, akışkanın sıcaklığının 30 °C civarında olması mümkündür. Araçların yaz günlerinde 40°C çevre ortamı içerisinde çalışmaları durumunda, radyatör ısınan suyun sıcaklığını 40°C'nin altına düşüremeyecektir. Bu durum dikkate alınarak, radyatörden çıkıp IGBT soğutma bloğuna giren suyun sıcaklığın 47 °C alınması uygun bulunmuştur.

Suyun çıkış sıcaklığı, IGBT modüllerinin ısı yükünün soğutma kanalları vasıtasıyla suya aktarılacağı kabulü ile, denklem (5.7) ile hesaplanır.

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (5.7)$$

$Q_{ORTALAMA} = 1787 \text{ W}$ değerindedir. Üç IGBT modülünün sisteme verdiği ısı gücü denklem (5.8) ile hesaplanır.

$$Q_{Sistem} = 1787 \cdot 3 = 5361 \text{ W} \quad (5.8)$$

$$\dot{m} = \Phi \cdot \rho \quad (5.9)$$

$\rho = 988 \text{ kg/m}^3$ 50°C 'de akışkanın yoğunluğudur.

$\Phi = 12.5 \text{ lt/dk} = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ akışkanın hacimsel debisidir. Kütleli debi, denklem (5.9)'dan hesaplanır.

$$\dot{m} = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 988 = 197.6 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (5.10)$$

$$\Delta T = T_{cikis} - T_{giris} \quad (5.11)$$

$$T_{cikis} - T_{giris} = \frac{Q}{\dot{m} \cdot c} \quad (5.12)$$

$\dot{m} = 197.6 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$, $c_p = 4181 \text{ J/kg.K}$ ve ısı enerjisi denklem (5.12)'de yerine konulduğunda, giriş-çıkış sıcaklık farkı elde edilir.

$$T_{cikis} - T_{giris} = \frac{5361}{197.6 \cdot 10^{-3} \cdot 4181} = 6.4^\circ\text{C} \quad (5.13)$$

$T_{giris} = 47^\circ\text{C}$ akışkanın soğutma sistemine giriş sıcaklığıdır.

$$T_{cikis} = 47 + 6.4 = 53.4^\circ\text{C} \quad (5.14)$$

$$T_{film} = \frac{T_{cikis} + T_{giris}}{2} = \frac{47 + 53.4}{2} = 50.2^\circ\text{C} \approx 50^\circ\text{C} \quad (5.15)$$

Suyun çıkış sıcaklığı 53.4 °C'dir. Film sıcaklığı 50 °C'dir. Zorlanmış, türbülanslı iç akışlarda teorik olarak ısı taşınım katsayısını veren bağıntılar bulunmamaktadır. Literatürde, silindirik bir boru içersindeki türbülanslı akışlarla ilgili ısı taşınım katsayısı veren deneysel bağıntılar vardır. Colburn benzeşimi, Dittus ve Boelter benzeşimi, dinamik viskozite değişimini dikkate alan Sieder ve Tate benzeşimi, Prandtl-Taylor benzeşimi ve Von Karman benzeşimi bunlardan bazılarıdır [16]. Benzeşim ifadelerin temelinde, Nusselt sayısının, Reynolds ve Prandtl sayısı ile ifade edilmesi sonucunda, Nusselt sayısından ısı taşınım katsayısına geçme yöntemi vardır.

$T_{film} = 50$ °C akışkanın ortalama sıcaklığıdır. Akışkanın fiziksel özellikleri, ortalama sıcaklığında alınır.

D, soğutma kanallarının iç çapıdır. Soğutma kanalları 10 mm çapındadır.

$\Phi = 12.5$ lt/min akışkanın hacimsel debi değeridir.

\dot{m} , akışkanın kütleli debisi olmak üzere, denklem (5.10) ile hesaplanan değerdir.

$\dot{m} = 197.6 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s} \approx 0.2 \frac{kg}{s}$ benzeşim ifadelerinde kullanılmıştır.

5.5.2.2 Colburn Benzeşimi

Colburn benzeşimi, denklem (5.16) ile ifade edilir.

$$Nu_d = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (5.16)$$

$$Re_d = \frac{U_{ort} \cdot D}{\nu} = \frac{4 \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (5.17)$$

$$\dot{m} = 0.20 \frac{kg}{s}$$

$$D = 0.01 \text{ m}$$

$\mu_{50C} = 528 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$, suyun film sıcaklığındaki dinamik viskozite katsayısıdır.

$$Re_d = \frac{4 \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 0.20}{\pi \cdot 0.01 \cdot 528 \cdot 10^{-6}} = 48229 \quad (5.18)$$

Silindir içindeki akışta, kritik Reynolds sayısı 2300'dür, bu değerden sonra artık akış laminer değildir, akışın tam gelişmiş türbülanslı akış haline gelmesi ise $Re=10000$ civarındır. $Re=48229$ olduğundan akış türbülanslıdır, benzeşimlerde boru içindeki türbülanslı akışlar için geçerlidir.

Prandtl sayısı, Pr ; denklem (5.19) ile ifade edilir.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (5.19)$$

Suyun fiziksel özelliklerinden, $50\text{ }^\circ\text{C}$ 'de; $Pr = 3.42$ 'dir.

Denklem (5.20)'de, Reynolds ve Prandtl sayısı ile Nusselts sayısı hesaplanır.

$$Nu_d = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^{1/3} = 0.023 \cdot 48229^{0.8} \cdot 3.42^{1/3} = 193 \quad (5.20)$$

Nusselt sayısı, denklem (5.21) ile ifade edilir, bu ifadeden ısı taşınım katsayısı denklem (5.22) ile çekilir ve hesaplanır.

$$Nu_d = \frac{h \cdot D}{k} \quad (5.21)$$

Suyun $50\text{ }^\circ\text{C}$ 'deki ısı iletim katsayısı $0,645\text{ W/m.C}$ 'dir.

$$h = \frac{Nu_d \cdot k}{D} = \frac{193 \cdot 0,645}{0,01} = 12448 \frac{W}{m^2 C} \quad (5.22)$$

5.5.2.3 Dittus ve Boelter Benzeşimi

Dittus ve Boelter, benzeşimi denklem 5.23 ile ifade edilir.

$$Nu_d = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^n \quad (5.23)$$

n , akışkanın ısınması halinde $0,4$; soğuması halinde $0,3$ alınan bir katsayıdır. Denklem (5.23); Prandtl sayısının denklem (5.24) ile gösterilen aralıkta, Reynolds sayısının denklem (5.25) ile sağlanması durumunda ve denklem (5.26) ile ifade edilen kanal uzunluğunun kanal çapına oranının belli bir değerden büyük olması durumunda geçerlidir. Bu ifadeler, aslında, Dittus ve Boelter benzeşiminin, akışkanın sıvı fazında olmasını, kaynama veya yoğuşma hallerinde olmamasını, akışın kanal

içerisinde türbülanslı akış olmasını ve ifadeden elde edilen ısı taşınım katsayısının kanal girişlerinden uzakta faydalı olacağını anlatmaktadır.

$$0.7 < Pr < 160 \quad (5.24)$$

Akışın Prandtl sayısı 3.42'dir.

$$10^4 < Re_d \quad (5.25)$$

Akışın Reynolds sayısı 48229'dur.

$$10 < \frac{L}{D} \quad (5.26)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{130 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 13 \quad (5.27)$$

Kanalın sonlarına doğru benzeşim kabul edilebilir.

$$Nu_d = 0.023 \cdot 48229_d^{0.8} \cdot 3.42^{0.4} = 210 \quad (5.28)$$

Denklem (5.28) ile hesaplanan Nusselt sayısından, denklem (5.29) ile ısı taşınım katsayısı hesaplanır.

$$h = \frac{Nu_d \cdot k}{D} = \frac{210 \cdot 0.645}{0.01} = 13545 \frac{W}{m^2 C} \quad (5.29)$$

5.5.2.4 Sider ve Tate Benzeşimi

Dittus ve Boelter benzeşiminde kullanılan bağıntıda, denklem (5.23)'de, akışkanın viskozite değişimleri göz önüne alınır; Sider ve Tate benzeşimi denklem (5.30) ile ifade edilir.

$$Nu_d = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{0.14} \quad (5.30)$$

$\mu_{50^\circ C}$, akışkanın 50°C'deki dinamik viskozitesidir, $528 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$ değerindedir.

μ_0 , akışkanın cidar sıcaklığındaki dinamik viskozitesidir; cidar sıcaklığı, yaklaşık ısı taşınım katsayısının yaklaşık değerleri ile, denklem (5.31) ile hesaplanır. T_F , akışkanın ortalama sıcaklığıdır, 50°C'dir. h , akışkanın ısı taşınım katsayısıdır, Dittus-Boelter benzeşim ifadesi ile hesaplanan değerdir. A , akışkanın kanal yüzey alanıdır, kanal uzunluğu ile kanal çevresinin çarpımına eşittir. Q_{sistem} , IGBT modüllerinin toplam ısı gücü kaybıdır. n , soğutma bloğu içerisindeki kanal sayısıdır, 14 kanal vardır. Elde bulunan bilgiler ile yaklaşık cidar sıcaklığı denklem (5.31) ile hesaplanmıştır.

$$T_C = T_F + \frac{Q_{sistem}}{h \cdot A \cdot n} \quad (5.31)$$

$$T_C = 50 + \frac{5361}{13545 \cdot (\pi \cdot 0.01 \cdot 0.13) \cdot 14} = 57^\circ C$$

57°C'de suyun dinamik viskozitesi $453 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$ 'dir. Denklem (5.32) ile Nusselt sayısı hesaplanır. Denklem (5.33) ile Nusselt sayısından ısı taşınım katsayısı hesaplanır.

$$Nu_d = 0.023 \cdot 48229_d^{0.8} \cdot 3,42^{0.4} \cdot \left(\frac{528 \cdot 10^{-6}}{453 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.14} = 232 \quad (5.32)$$

$$h = \frac{Nu_d \cdot k}{D} = \frac{232 \cdot 0,645}{0,01} = 14964 \frac{W}{m^2 C} \quad (5.33)$$

5.5.2.5 Von Karman Benzeşimi

Von Karman benzeşimi, boru yüzey pürüzlülüğünü de dikkate alan bir benzeşimdir. Von Karman benzeşimde, Nusselt sayısı denklem (5.34) ile ifade edilmektedir.

$$Nu_d = \frac{\lambda_s}{8} \cdot Re_d \cdot Pr \cdot \frac{1}{1 + 5 \sqrt{\frac{\lambda_s}{8}} \cdot \left[(Pr - 1) + \ln \left(\frac{5 \cdot Pr + 1}{6} \right) \right]} \quad (5.34)$$

Türbülanslı bölgede, alüminyum borular içindeki akış için, Reynolds sayısına bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğünü veren bağıntı;

$2.10^4 < Re_d < 2.10^6$ için denklem (5.35)'de yer almaktadır.

$$\lambda_s = \frac{0.184}{Re_d^{0.2}} = \frac{0,184}{48229^{0.2}} = 0.0213 \quad (5.35)$$

Denklem (5.36) ile Nusselt sayısı hesaplanır. Denklem (5.37) ile Nusselt sayısından ısı taşınım katsayısı hesaplanır.

$$Nu_d = \frac{0.0213}{8} \cdot 48229 \cdot 3,42 \cdot \frac{1}{1 + 5 \sqrt{\frac{0.0213}{8} \cdot \left[(3.42 - 1) + \ln \left(\frac{5.3,42 + 1}{6} \right) \right]}} = 230 \quad (5.36)$$

$$h = \frac{Nu_d \cdot k}{D} = \frac{230 \cdot 0,645}{0,01} = 14835 \frac{W}{m^2 C} \quad (5.37)$$

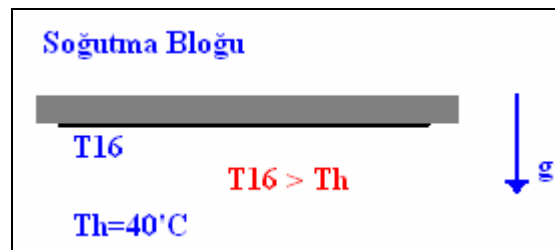
5.5.2.6 Kanal İçerisinde Isı Taşınım Katsayısı Belirlemede Sonuçlar

Isı taşınım katsayısı, Colburn benzeşimi ile $12248 \frac{W}{m^2 C}$, Dittus ve Boelter benzeşimi ile $13545 \frac{W}{m^2 C}$, Sider ve Tate benzeşimi ile $14964 \frac{W}{m^2 C}$, Von Karman Benzeşimi ile $14835 \frac{W}{m^2 C}$ olarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki değerlerin ortalaması, modellerde kanal içerisinde ortalama ısı taşınım katsayısı olarak kullanılmıştır. Ortalama ısı taşınım katsayısı, $13898 \frac{W}{m^2 C}$ 'dir.

5.5.2.7 Yatay Levhadan Olan Doğal Isı Taşınım ve Isı Taşınım Katsayısının Belirlenmesi

Yatay levhalarda ısı geçişinin karakteri sıcak veya soğuk yüzeyin aşağıda olmasına göre değişir.



Şekil 5.13: Yatay Levhadan Doğal Taşınım İle Isı Geçiş

Sabit sıcaklıkta, yatay levhalardan ısı geçişinin aşağı doğru olması halinde Nusselt sayısı, Rayleigh sayısının belirli bir aralığında denklem (5.38) ile ifade edilmektedir [16].

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \Leftrightarrow 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{11} \quad (5.38)$$

L karakteristik uzunluktur, dikdörtgen biçimli yüzeylerde iki kenarın ortalamasıdır. Soğutma sistemi orta bloğunun alt yüzeyi 130 x 280 mm ölçülerindedir.

$$L = \frac{0.130 + 0.280}{2} = 0.205 \text{ m} \quad (5.39)$$

Rayleigh sayısı, denklem (5.40) ile, Nusselt sayısı denklem (5.41) ile ifade edilir.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{16} - T_h) \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (5.40)$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} \cdot L}{k} \quad (5.41)$$

Denklem (5.42) ile Rayleigh sayısı bulunup, denklem (5.43) ile Nusselt sayısı hesaplanır. Nusselt sayısından denklem (5.44) ile ısı taşınım katsayısı hesaplanır. Rayleigh sayısının bulunabilmesi için tahmini bir kenar sıcaklığı gereklidir. Alt kenarın sıcaklığının, su giriş sıcaklığına yakınsayacağı kabul edilerek, T_{16} sıcaklığı 45°C alınmıştır.

$T_f = (40 + 45)/2 = 42.5 \text{ C} = 315.5 \text{ K}$ sıcaklığında atmosferik basınçtaki havaya ait fiziksel özellikler:

$$\nu = 19.24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.0289 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 0.7$$

$$\beta = 1/315.5 \text{ K}$$

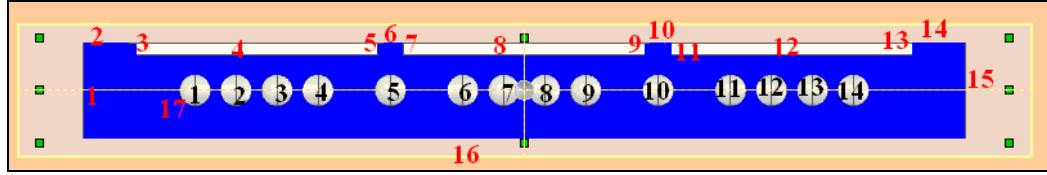
$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{16} - T_h) \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr = \frac{9.81 \cdot (1/315.5) \cdot (45 - 40) \cdot 0.2^3}{(19.24 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.7 = 2.4 \cdot 10^6 \geq 10^5 \quad (5.42)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.27 \cdot (2.4 \cdot 10^6)^{0.25} = 10.6 \quad (5.43)$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} \cdot L}{k} \Rightarrow \bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} = \frac{10.6 \cdot 0.0289}{0.2} = 1.5 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (5.44)$$

5.5.2.8 İki Boyutlu Modelin Sınır Şartları

Şekil 5.14 ile, su kanalları numaralandırılmış ve eşit ortalama sıcaklık artışları, giriş kanalından çıkış kanalına doğru, giriş kanal sıcaklığına eklenerek ortalama kanal sıcaklıkları analizde kullanılmıştır.



Şekil 5.14: Kanal Numaralarını İçeren Sınır Şartları

Şekil 5.14'de görülen iki boyutlu modelin sınır şartlarının değerleri, Tablo 5.4'de görülmektedir.

Tablo 5.4: İki Boyutlu Modelin Sınır Şartlarının Değerleri

İKİ BOYUTLU MODEL SINIR ŞARTLARI							
	W/m ²		W/m ²				
1 Numaralı Kenar	q''=0	9 Numaralı Kenar	q''=0	17 No.lu Kenar		13898 W/m ² C	
2 Numaralı Kenar	q''=0	10 Numaralı Kenar	q''=0	T1	47°C	T8	50.43 °C
3 Numaralı Kenar	q''=0	11 Numaralı Kenar	q''=0	T2	47.49 °C	T9	50.92 °C
4 Numaralı Kenar	q''=203	12 Numaralı Kenar	q''=203	T3	47.98 °C	T10	51.41 °C
5 Numaralı Kenar	q''=0	13 Numaralı Kenar	q''=0	T4	48.47 °C	T11	51.9 °C
6 Numaralı Kenar	q''=0	14 Numaralı Kenar	q''=0	T5	48.96 °C	T12	52.39 °C
7 Numaralı Kenar	q''=0	15 Numaralı Kenar	q''=0	T6	49.45 °C	T13	52.88 °C
8 Numaralı Kenar	q''=203	16 Numaralı Kenar	40°C. h=1.5 W/m ² K	T7	49.94 °C	T14	53.4 °C

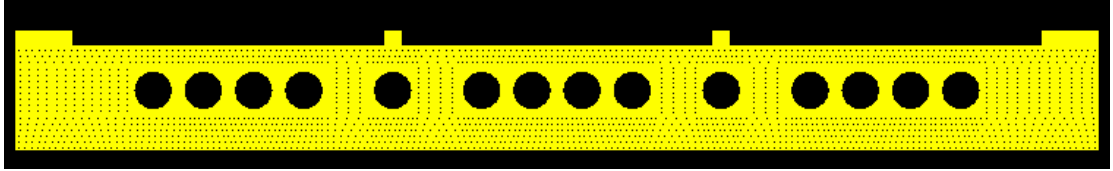
Suyun giriş sıcaklığı, 47°C, çıkış sıcaklığı 53.4°C'dir. Su, sisteme giriş kanalından girdikten sonra çıkış kanalına doğru ısınmaktadır. Her kanal farklı ortalama sıcaklığa

sahiptir. Gerçek sistemde akışkanın sıcaklığı, kanal içerisinde silindirik koordinatlarda; z ekseninde (kanal uzunluğu), r ve Φ koordinatlarında değişmektedir. Isı akısı, kanal yüzeylerine IGBT modüllerine bakan üst yüzeylerden ulaştığından, r ve Φ koordinatlarında sıcaklık değerleri, sabit z değerinde farklıdır. İki boyutlu modelde, 3. boyutun etkisi her kanalda farklı ortalama akışkan sıcaklık değeri olarak girilmiştir. r ve Φ koordinatlarında sıcaklığın değişmediği kabul edilmiştir.

Birinci kanalda, kanalı modelleyen dairesel kesit üzerindeki her noktada akışkanın sıcaklığı 47°C'dir. 2 kanalın sıcaklığı 47.49°C'dir ve kanalın üzerindeki her noktada aynıdır. 14. kanala kadar, her kanala eşit sıcaklık artışı girilmiştir.

5.5.2.9 Termal Isı İletim Malzemesinin Modellenmesi

Geometri, sınır şartlarında verilen geometridir. Model termal iletim malzemesini de içerir. Isı akısının uygulandığı kenar silikon malzemedir. 0.2 mm kalınlığında soğutma bloğu üzerinde yer almaktadır. Montaj sırasında termal malzeme kalınlığı 0.15 mm olarak hedeflenmiştir, analizlerde yüzey üzerinde izin verilen maksimum kalınlık kullanılmıştır. Şekil 5.15'de termal ısı iletim malzemesinin de modellendiği geometrinin Gambit programında oluşturulmuş ağ yapısı görülmektedir.

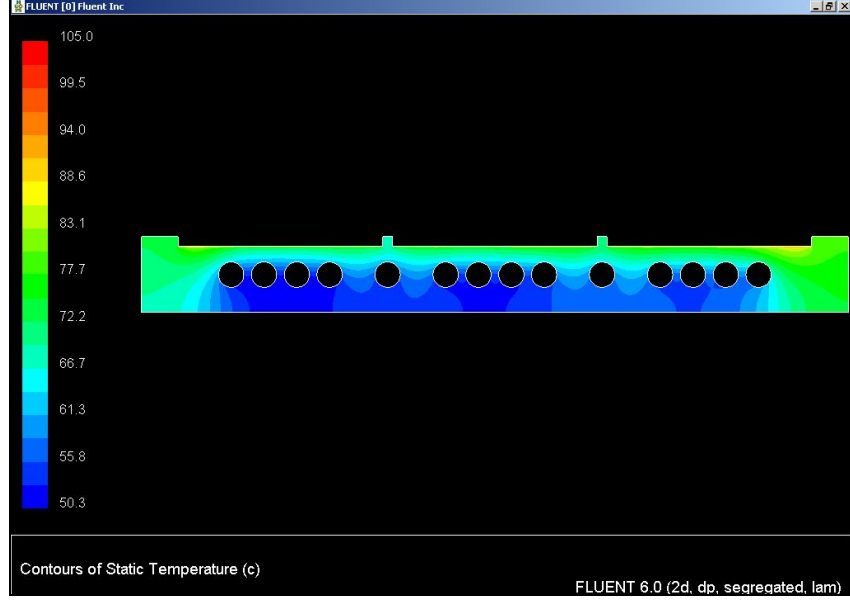


Şekil 5.15: Gambit Programında Oluşturulan Ağ Yapısı

0.2 mm kalınlığındaki yüzeyde ve su kanallarının çevresinde sık aralıklı ağ yapısı oluşturulmuştur. "Equiangle skew" parametresine göre toplam 60560 ağ yapısı elemanı içerisinde, 0.5 oranı üzerinde 11 eleman vardır. Toplamın % 0.02'sine karşılık gelmektedir.

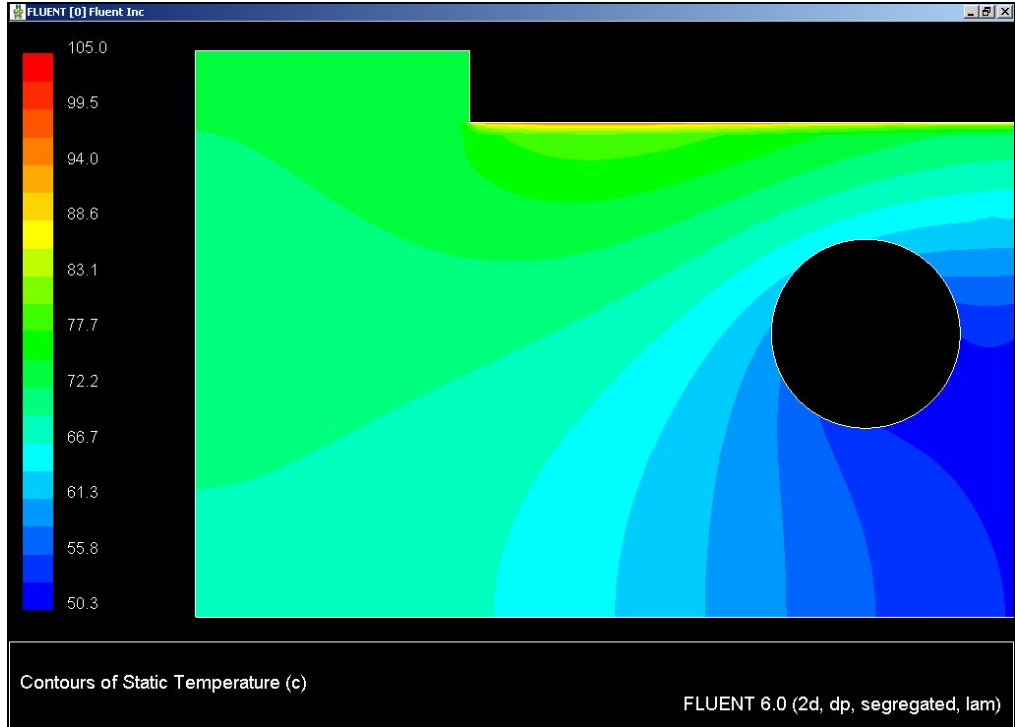
5.5.3 İki Boyutlu Modelin Isıl Analiz Sonuçları

Fluent programında verilen sınır koşulları ile enerji denklemi çözdürülmüştür. Malzeme kısmında, iki yeni malzeme tanımlanmıştır. Prototip soğutucu bloğun malzemesi, Etial 53 adıyla bilinen 5154 serisi alüminyumdur. 5154 alüminyumun ısı iletim katsayısı 125 W/m.K'dir. Termal ısı iletim malzemesi 3.3 W/m.K ısı iletim katsayısı sahiptir. Şekil 5.16'da soğutma sistemi orta kesit üzerinde sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.16: Soğutma Sistemi Orta Kesit Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

Soğutma sistemi yüzeyinin IGBT modülleri ile temas ettiği bölge termal direncin en yüksek olduğu bölgedir. Sıcaklık değerleri, termal direncin olduğu bölümde soğutma bloğu üzerinde ortalama 15°C artmıştır. Isı iletim malzemesinin olmaması durumunda bu artışın yaklaşık 3-4 kat daha fazla olması beklenir. Şekil 5.17’de soğutma bloğunun orta kesitinin sol köşesindeki sıcaklık dağılımı ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.17: Soğutma Sistemi Orta Kesit Üzerinde Sıcaklık Dağılımı-Sol Köşe

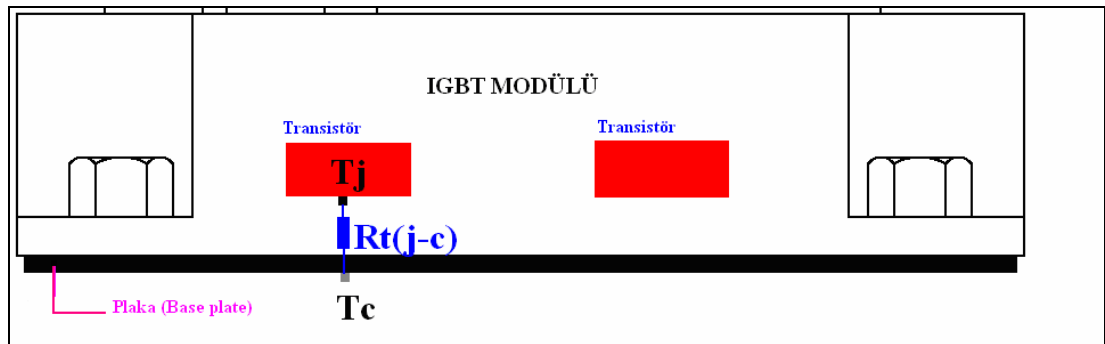
Elektrik motor sürücüsünün 600 A akımı 10 kHz frekansla anahtarlamasıyla oluşan ısı kaybının tasarlanan soğutma sisteminde, 12.5 lt/dk su debisiyle soğutulması sonucu bloğun modelinin orta kesitinde meydana gelen sıcaklık dağılımı Şekil 5.17’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Maksimum sıcaklık IGBT yüzeyleri altındadır ve 105°C’dir.

Mitsubishi firması tarafından IGBT transistörleri altında izin verilen maksimum sıcaklık 150 °C olarak verilmiştir. Güvenli sıcaklık limitinin 125 °C alınması önerilmiştir. Mitsubishi firmasının verdiği sıcaklık limiti transistör çipinin altındaki sıcaklık değeridir ve modülün (base plate) bakır plaka sıcaklığından çip altı sıcaklığına ulaşmak için termal direnç değeri gereklidir. Termal direnç değeri, modüllere ve modüllerin iç yapısına bağlı bir değerdir. Her modülün çipten bakır plakaya (junction to base plate) kadar olan termal direnci farklıdır. Kullanılan IGBT modülü CM600DY-12NF modülüdür ve bu modül için Mitsubishi firması tarafından verilen termal direnç 0.046 K/W’dir ve teknik dokümanından alınan bilgi Şekil 5.18’de görülmektedir [6].

Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{th(j-c)}$ °C	Per IGBT 1/2 Module,	—	—	0.046	°C/W
T_C Reference Point Under Chips						

Şekil 5.18: CM600DY-12NF IGBT Modülünün Termal Direnci

Termal direnç değeri kullanılarak, transistör çipinin altındaki sıcaklık değerine, transistörden yayılan ısı gücü ile termal direncin çarpılması ve bakır plaka sıcaklığına ilave edilmesi ile ulaşılır. Şekil 5.19’da bahsedilen sıcaklık noktaları ve termal direncin oluştuğu kısım görülmektedir.



Şekil 5.19: IGBT Modülü İçerisinde Isı Geçişinin Modellenmesi

IGBT modülünden yayılan toplam ısı gücü, 3 farklı yöntemle hesaplanmış, 3 yöntemin ortalaması analizde kullanılmıştır. Ortalama ısı kaybı bir modülden 1787

W'dır. Bir modül içerisinde 2 transistör vardır ve ısı gücünü eşit olarak verdikleri kabulü ile, bir transistörden yayılan ısı gücü 893.5 W'dır.

$$T_J = T_C + P_{TRANSISTOR} \cdot R_{t(j-c)} \quad (5.45)$$

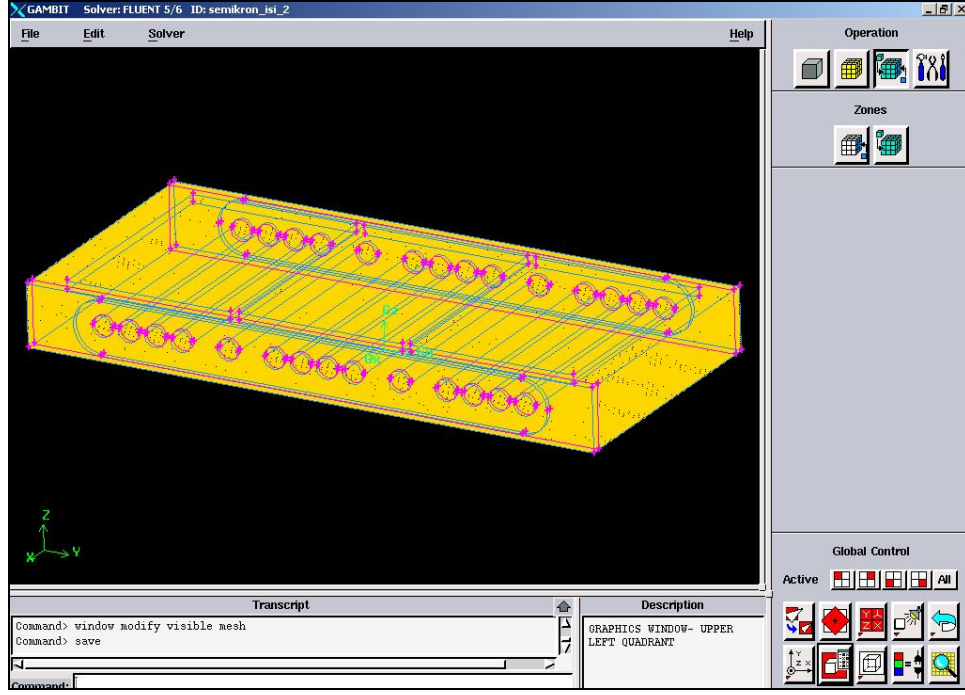
T_c , soğutma bloğu üzerinde bakır plaka altındaki sıcaklıktır. Analizler sonucu, bu bölgede elde edilen maksimum sıcaklık 105°C'dir.

$$T_J = 105 + 893.5 \cdot 0.046 \quad (5.46)$$
$$T_J = 146^\circ C$$

Verilen termal direnç kullanılarak transistör altında elde edilen sıcaklık değeri denklem (5.46) ile 146 °C hesaplanır. Güvenli sıcaklık limiti 125°C'yi geçen, fakat kullanılabilir maksimum sıcaklık değeri 150°C'nin altında kalan bir değerdir. Prototip olarak yapılan ilk üründe, seri imalat yöntemleri kullanılmamıştır. Seri imalat yöntemleri kullanılarak, 0.15 mm kalınlığında, ısı iletim katsayısı daha yüksek bir termal malzeme sürülebilir. Bu işlem, IGBT modüllerinin plakaları altındaki sıcaklık değerini oldukça düşürecektir.

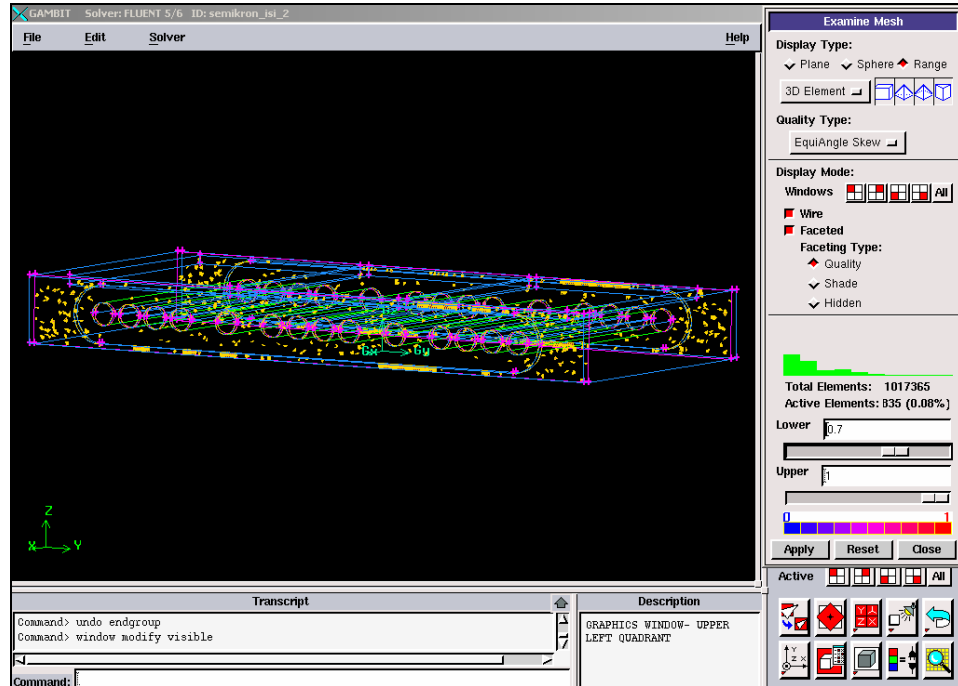
5.5.4 Üç Boyutlu Isıl Analizler

Üç boyutlu analizlerde, prototipin CAD ortamında tasarlanan orta bloğunun katı modelinin geometrik olarak aynısı kullanılmıştır. İki boyutlu analizlerde kullanılan sınır şartlar, üç boyutlu modelde de aynı şekilde kullanılmıştır. Üç boyutun etkisi, sonuçlarda daha belirgin şekilde görülmektedir. Gambit programında üç boyutlu model üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.20'de görülmektedir.



Şekil 5.20: Gambit Programında Oluşturulan Üç Boyutlu Modelin Ağ Yapısı

“Equiangle skew” parametresine göre, 0.7 oranı üzerinde 835 eleman vardır. Toplam hacimsel ağ elemanların % 0.08’sine karşılık gelmektedir. Şekil 5.21’de, 0.7 oranı üzerinde bulunan ağ elemanların yerleri görülmektedir. Genellikle, dairesel yüzeylerin çok kısa mesafede dikdörtgensel yüzeyler ile buluştuğu hacim içerisinde yer almaktadırlar.



Şekil 5.21: Model Üzerindeki Ağ Elemanlarının İncelenmesi

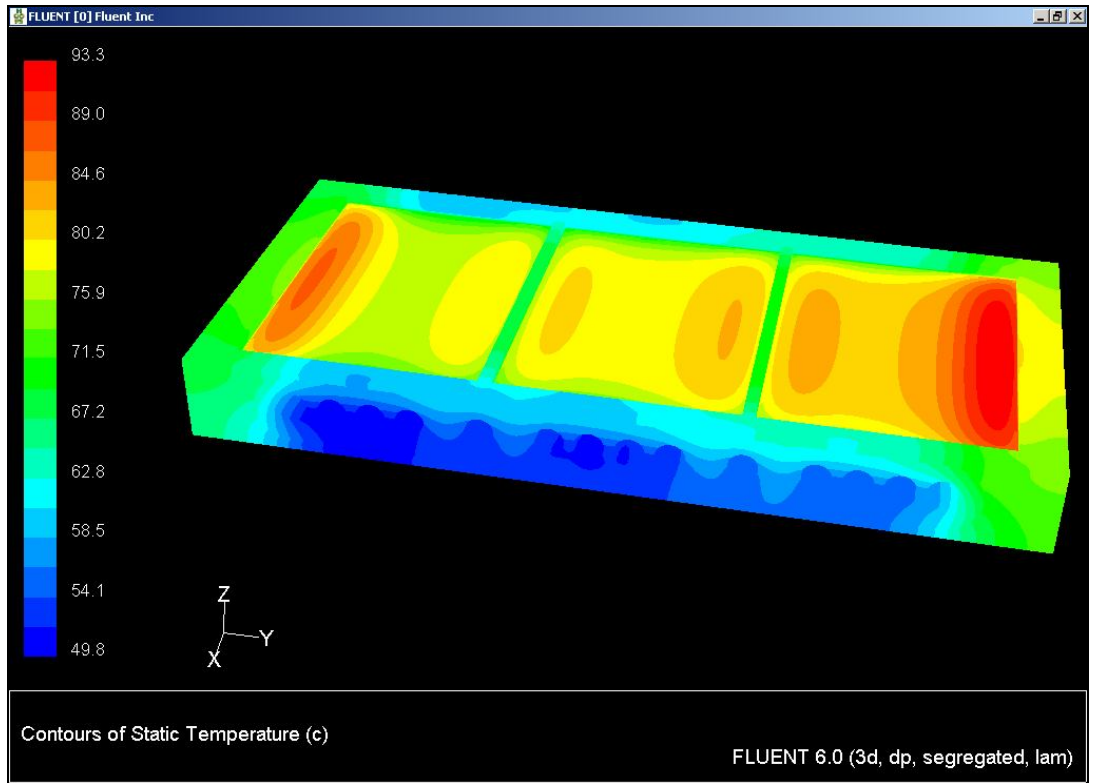
5.5.5 Üç Boyutlu Modelin Isıl Analiz Sonuçları

Üç boyutlu modelde, IGBT modüllerinin alt yüzeyinde çıkan maksimum sıcaklık 93.3°C'dir. Suyun girişten çıkışa doğru ısınması ile, soğutma bloğu üzerinde çıkış kanalları üzerinde bulunan IGBT modülünün yerleştiği yüzeyin ortalama sıcaklığı diğer modül yüzeylerine göre daha fazladır. Modül yüzeylerinde sıcaklık artışı 5-6 °C'dir.

Aynı termal direnç değeri kullanılarak, modülün alt plakasından transistör sıcaklığı denklem (5.47) ile hesaplanmıştır.

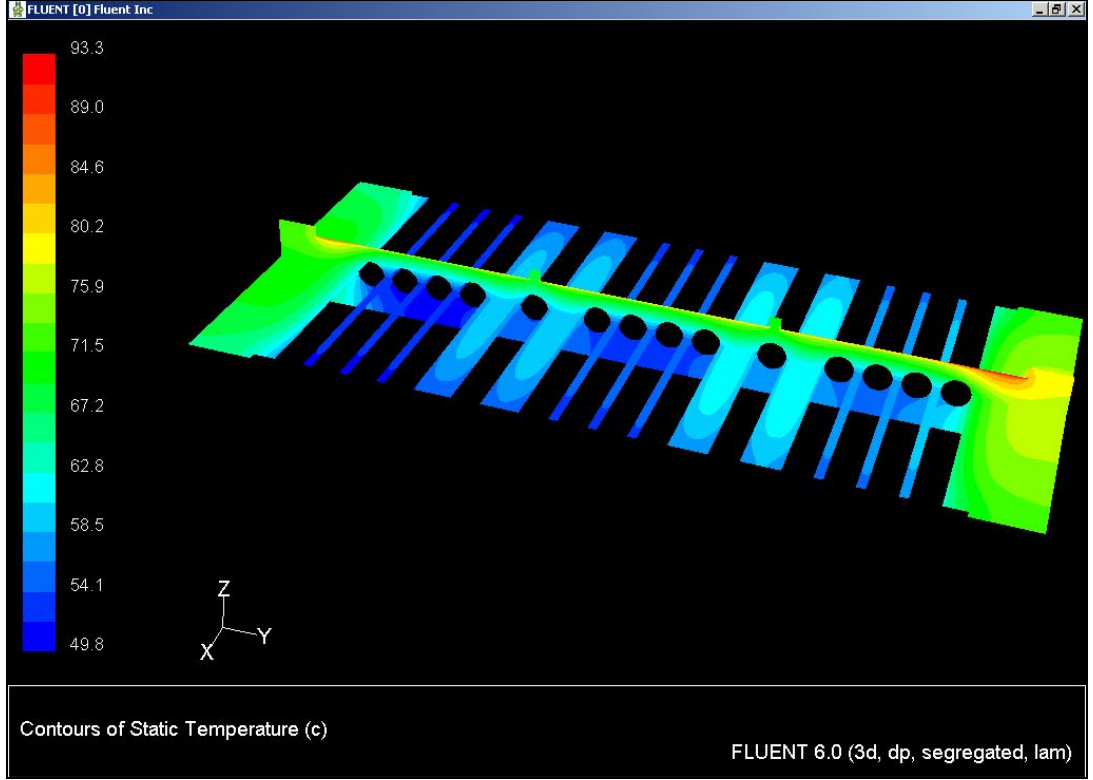
$$\begin{aligned} T_j &= 93.3 + 893.5 \cdot 0.046 \\ T_j &= 134.4^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (5.47)$$

Üç boyutlu model üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 5.22'de görülmektedir.



Şekil 5.22: Soğutma Sistemi Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

Şekil 5.23'de, soğutma bloğunun iki orta düzlemi üzerindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.23: İki orta düzlem Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı

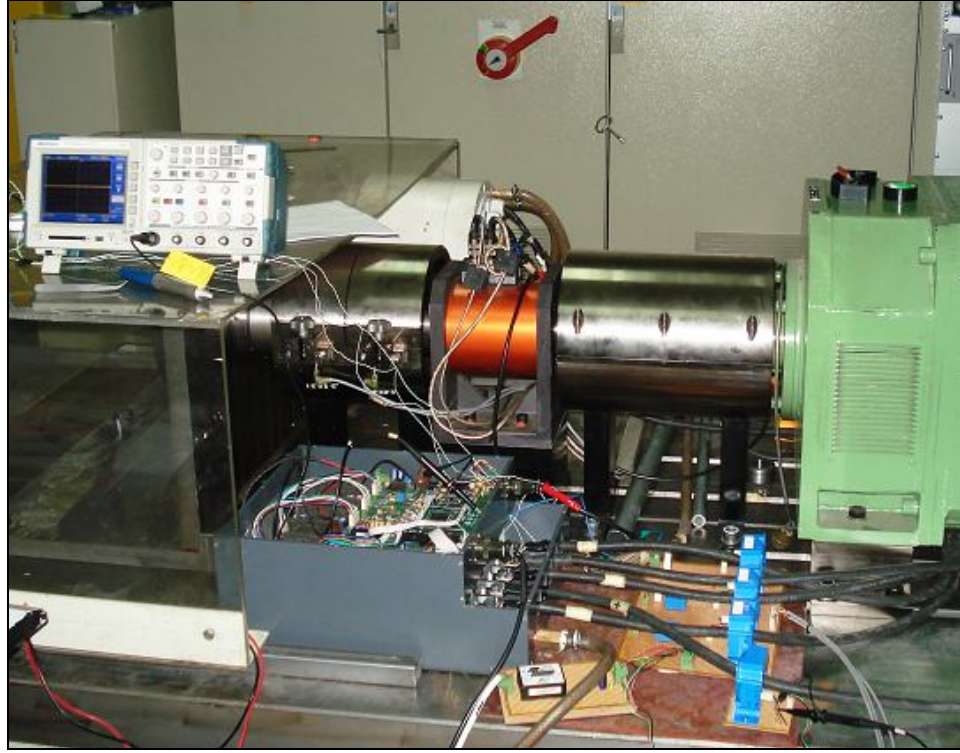
İki boyutlu ve üç boyutlu ısıl analizler ile soğutma sistemi tasarımının, geometrisinin, kanal sayısının, kanal çapının, akışın debisinin, kullanılan ısıl termal malzemenin, kullanılan alüminyum serisinin yeterli ve uygun olduğu görülmüştür. Tasarım, maksimum şartlar altında sürekli rejimde kullanılan IGBT modüllerini soğutabilecek kapasitedir.

6. ELEKTRİK MOTOR SÜRÜCÜSÜNÜN TESTLERİ

Testler, DC fırçasız elektrik motorunun dinamometre üzerinde yüklenmesi ile yapılmıştır. Elektrik motorunun yüksek akım çekmesi ve akımın kontrolcü tarafından anahtarlabilmesi için, dinamometre belli bir yükte ve hızda motoru yükler. Dinamometrenin moment ve hız olarak çalıştırıldığı nokta, elektrik motorunda herhangi bir redüksiyon olmaksızın aynı hız ve momente denk gelen akımın çekilmesine sebep olur. Akımın çekildiği hat, 300 V DC beslemeden, baralardan ve sürücünün IGBT modüllerinin üzerindedir. Üç IGBT modülüne, motorun üç fazı bağlanır. Test sistemi şekil 6.1’de görülmektedir. Test edilen sürücü prototipi Şekil 6.2’de daha ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.

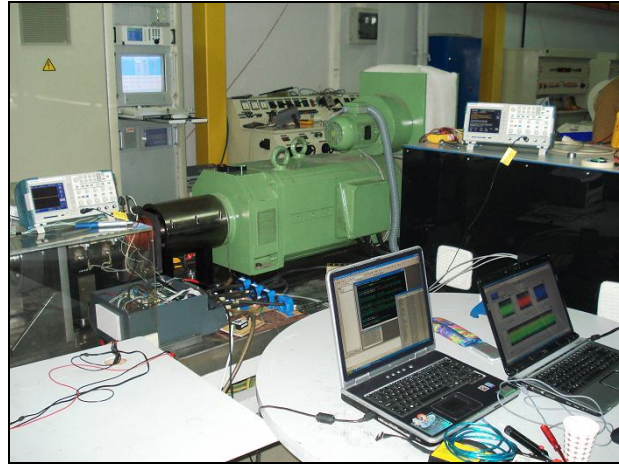


Şekil 6.1: Elektrik Motor Sürücüsü Test Sistemi



Şekil 6.2: Test Edilen Elektrik Motor Sürücüsü

Elektrik motor sürücüsünün kontrolü, Şekil 6.3’de solda görülen dizüstü bilgisayar üzerinden yazılımla gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3’de sağda görülen dizüstü bilgisayar da ise sistem üzerinden faz akımları okunmaktadır.

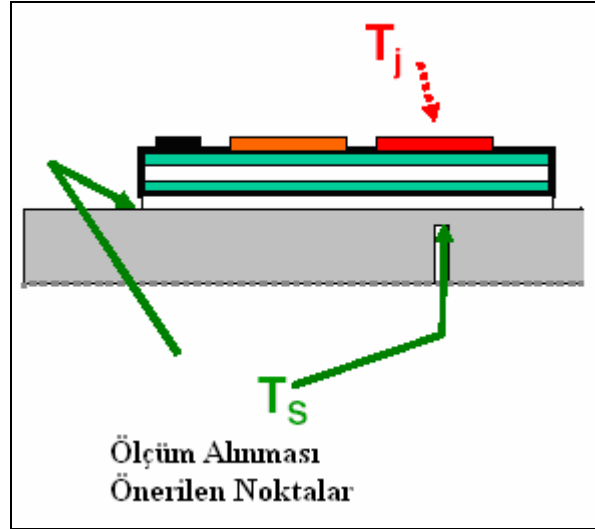


Şekil 6.3: Faz Akımlarının Okunması ve Kaydedilmesi

Testler sırasında sıcaklık ölçümü soğutma bloğuna bağlanan iki adet NTC termistör ile yapılmıştır. Bu bölümde NTC termistörün sistem üzerindeki yeri, çalışma yapısı, NTC termistör ile sistem üzerinden okunan sıcaklık değerleri ve testin yapılma koşulları anlatılmıştır.

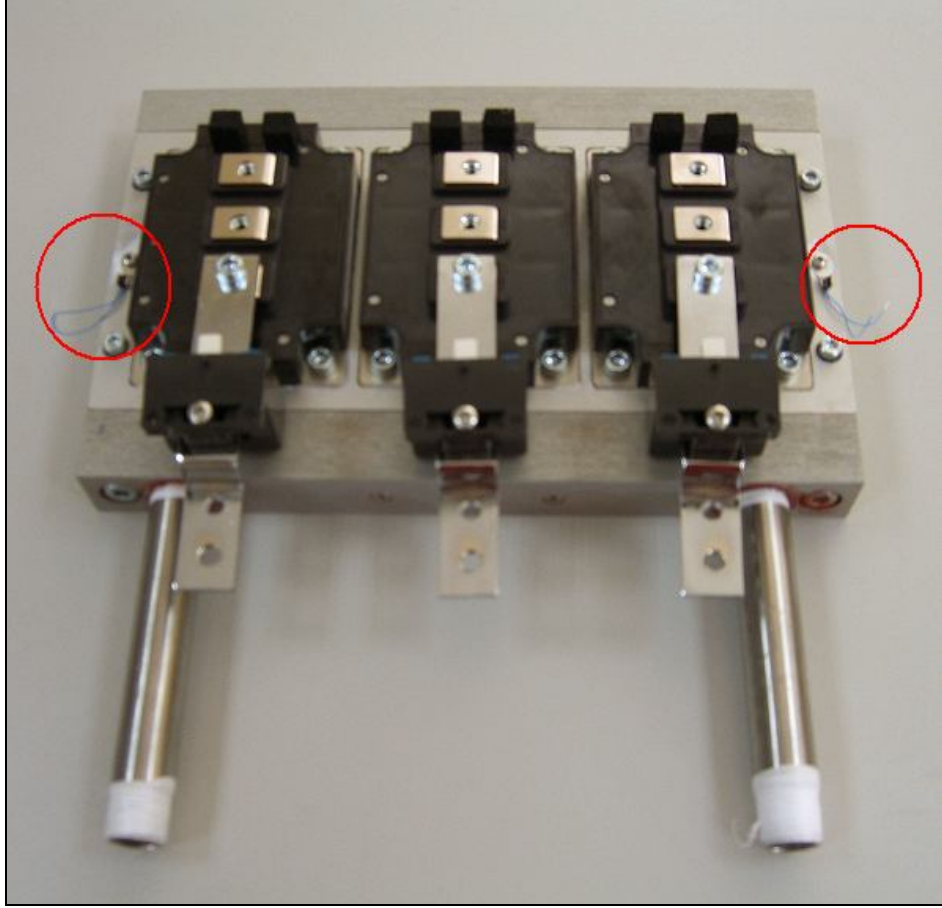
6.1 NTC Termistörün Bağlantı Noktasının Belirlenmesi

NTC termistörünün bağlantı noktası önemlidir, sıcaklık değerlerinin çip sıcaklığı ile olan ilişkisinin doğru yapılabilmesi için, IGBT modülünün bakır plakasına mümkün olan en yakın yerden sıcaklık ölçüm bilgisi alınmalıdır.



Şekil 6.4: Sıcaklık Ölçümleri İçin Önerilen Noktalar

Mitsubishi firması tarafından önerilen sıcaklık ölçümleri direkt ve indirekt olmak üzere iki şekildedir [6]. Direkt ölçüm transistör çip sıcaklığının ölçülmesidir ki bunu yapmak mümkün değildir, güvenlik açısından riskli bir yöntemdir. İkinci yöntem, ısı analizlerde de kullanılmış olan indirekt yöntemdir, Şekil 6.4 indirekt yöntemi göstermektedir. Bu yöntemin temeli, soğutma bloğu üzerinde ölçülen sıcaklık değerine, IGBT modülünün direnci ve yayılan ısı gücünden kaynaklanan sıcaklık artışı eklenip transistör çip sıcaklığının bulunmasıdır. İndirekt yöntem, sıcaklığın soğutma bloğu üzerinden okunma yerine göre ikiye ayrılır. İlk önerilen, IGBT modüllerinin en alt kısmına yakın bir noktaya ulaşmaktır. Ölçümler, soğutma bloğu altından 2 mm çaplı bir kanaldan alınır. Soğutma bloğu altında su kanallarının olması sebebiyle, tercih edilmemiştir. Diğer sıcaklık ölçüm noktası, blok üzerinde IGBT modüllerinin kenarında bulunan bloğun orta noktasıdır. Test sırasında sürekli ölçülen sıcaklıklar bu noktalardan NTC termistörleri ile alınmıştır, Şekil 6.5’de NTC termistörlerinin soğutma bloğu üzerinde bağlandıkları nokta görülmektedir.



Şekil 6.5: NTC Termistörlerinin Soğutma Bloğu Üzerindeki Yeri

6.2 NTC Termistörleri ile Sıcaklık Ölçümü

Birçok güç modülü uygulamasında sıcaklık sensörü kullanılır, sıcaklık bilgisi sürücünün kontrol kartında bir güvenlik limitidir. Genellikle negatif sıcaklık katsayılı (NTC-Negative Temperature Coefficient) termistör bu alanda tercih edilir. Sıcaklık arttıkça, termistörün direnci azalır.

Sıcaklık arttıkça direnci artan termistörlerde vardır. Pozitif sıcaklık katsayılı termistör olarak bilinen bu tip termistörler, belli bir sıcaklık artış değerine kadar direnç artışı göstermezler, belli bir sıcaklık noktasında aşırı bir direnç artışı gösterirler. PTC'lerin (positive temperature coefficient) bu özellikleri, sıcaklık değeri okumaktan çok, belirli bir sıcaklık değerinde sistemi açma veya kapamaya yöneliktir.

NTC'ler, PTC'lerin aksine geniş bir ölçüm aralığında sıcaklık ölçmek için kullanılırken, PTC'ler belirlenen sıcaklık noktalarında açma-kapama (on-off) elemanı olarak kullanılırlar.

6.2.1 NTC Termistörlerin Özellikleri

- NTC'ler 25- 100 °C arası gibi geniş bir ölçüm aralığına sahiptir.
- Küçük sıcaklık değişimlerine termo elemanlardan daha duyarlıdırlar.
- Kablo izolasyonu ile gürültüden etkilenmezler.
- En önemli özelliği ise ölçüm yaptığı sıcaklık aralığı, güç modülleri için çok uygundur. Güç modüllerinde de soğutma bloğu sıcaklığı 30 ile 100 °C arasındadır.

NTC termistörün zaman sabiti 5-10 saniyedir, yani modül içindeki sıcaklık değişimlerine 10 saniye içerisinde cevap verebilmektedir. Zaman sabiti termistörün sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık arttıkça cevap süresi uzamaktadır. Bu sebeple çok hızlı sıcaklık artışı olan sistemlerde, örnek olarak elektrik motoru sargı sıcaklığı ölçme durumunda, ani yük artışlarında akımın ani artması ve sıcaklığın 10 saniyede 10 °C yükselmesi durumlarında kullanılması uygun değildir. Soğutma bloklarında, yavaş ısınma meydana gelmektedir.

NTC termistörün sıcaklıkla direncinin değişimi üsteldir.

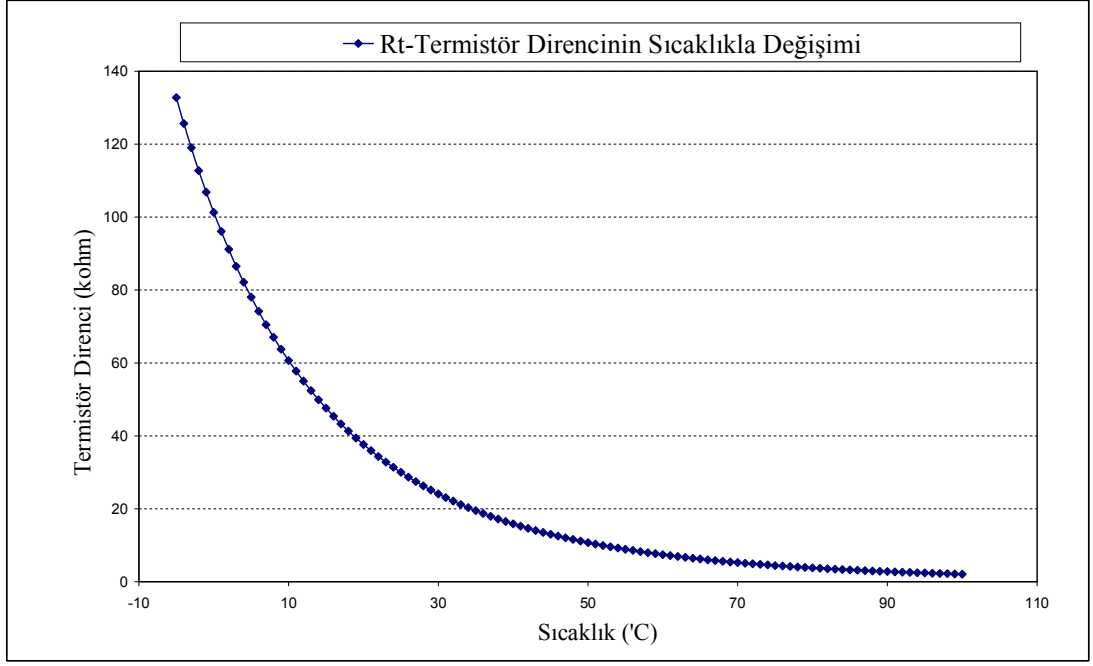
$$R_T = \frac{R_{25}}{\exp\left[B_{25/100} \cdot \left(\frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (6.1)$$

$$R_T = R_{25} \cdot \exp\left[B_{25/100} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}}\right)\right] \quad (6.2)$$

Sıcaklıklar Kelvin cinsindedir. R_T , termistörün sıcaklığa bağlı; T sıcaklığındaki direncidir. R_{25} , termistör firması tarafından verilen 25 °C de termistör direncidir.

$$R_T = R_{25} \cdot \exp\left[B_{25/100} \cdot \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{25}\right)\right] \quad (6.3)$$

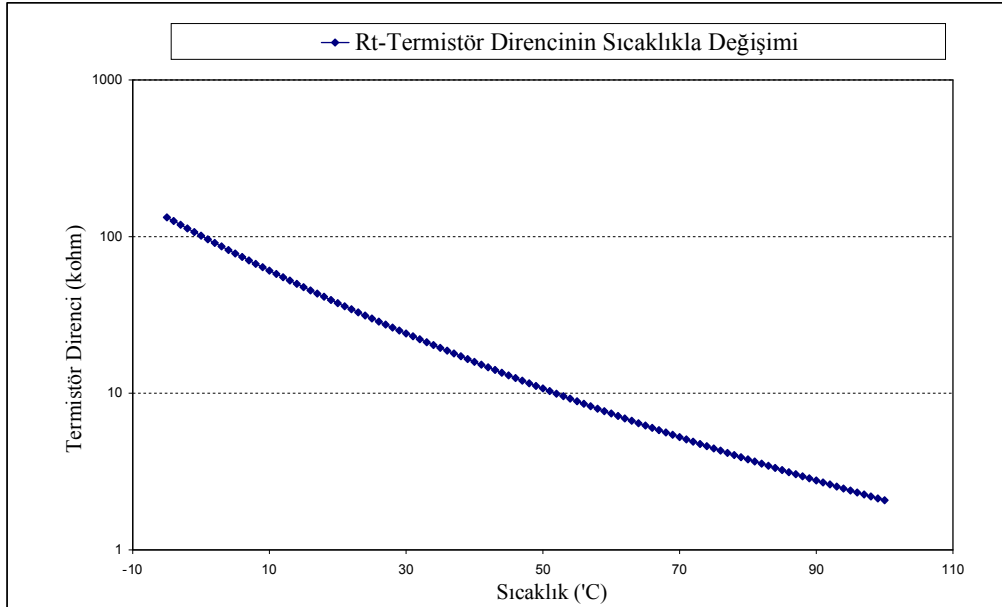
$R_T = R_{25} = 30 \text{ k}\Omega$ 'dur. 25°C'de nominal direnci 30 k Ω NTC kullanılmıştır. β , termistörün Kelvin cinsinden malzeme sabitidir, "Epcos" üretici firmanın verdiği değer 3964 (1/K)'dir. Kullanılan NTC termistörün verilerinden, denklem (6.2) ile elde edilen sıcaklık ile değişen direnç eğrisi Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6: NTC Termistörlerin Sıcaklığa Bağlı Direnç Değişimleri

$$\ln R_T = \left[B_{25/100} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right) \right] + \ln R_{25} \quad (6.5)$$

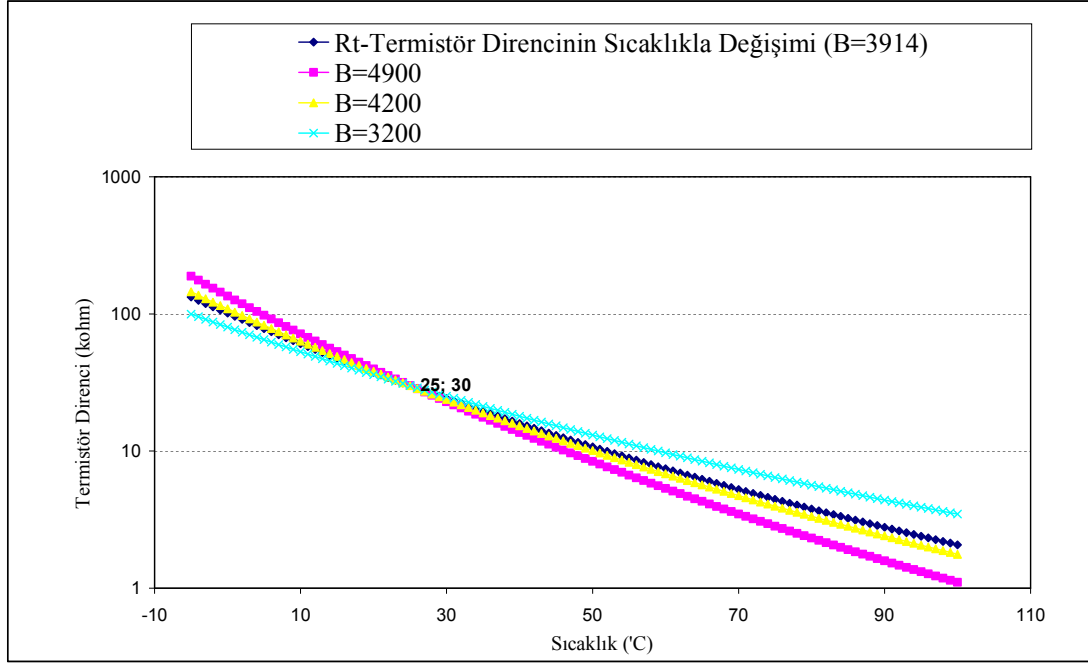
Denklem (6.5)'de β ve R_{25} sabittir. Logaritmik skalada verilen grafik Şekil 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.7: Logaritmik Skalada Sıcaklık-Direnç Değişimi

Yukarıda bahsedildiği gibi, β , termistörün Kelvin cinsinden malzeme sabitidir, 3200 ile 5000 değerleri arasında değişebilir. Şekil 6.8'de verilen grafikte, bir tanesi

kullanılan NTC termistörün β değeri olmak üzere, üç farklı β değeri için termistör direncinin sıcaklıkla değişimi logaritmik skalada verilmiştir.



Şekil 6.8: Farklı B değerlerinin Termistör Direncine Etkisi

25°C'de 30 k Ω değerine ayarlanan termistörlerin farklı β değerleri, termistör direncinin sıcaklık ile değişimini etkiler. Şekil 6.8'de görüldüğü gibi, termistörün referans noktası olan 25°C değerinin solunda ve sağında farklı eğimler mevcuttur.

Yüksek β değerleri, 25 °C değerinin sağında, 25°C üstü sıcaklık ölçümlerinde, sıcaklık artışına daha duyarlıdır ve dar sıcaklık aralığında yapılacak ölçümlerde yüksek çözünürlük sağlamaktadırlar. Aynı sıcaklık artışına karşı verdikleri direnç düşümü daha fazladır. NTC termistörü seçme sürecinde, termistörün β değeri ve fiyatı etkili olmuştur.

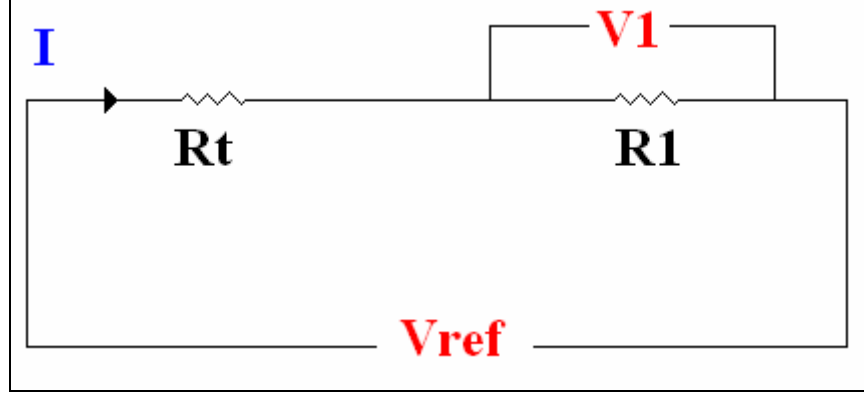
Denklem (6.6)'dan sıcaklık ifadesi çekilerek denklem (6.7) elde edilir.

$$T = \frac{B_{25/100} \cdot T_{25}}{B_{25/100} - T_{25} \cdot \ln\left(\frac{R_{25}}{R_T}\right)} \quad (6.7)$$

Denklem (6.7)'de görülen R_T değeri okunabilirse, karşılık gelen sıcaklık değeri elde edilir.

6.2.2 Termistör Direncinin -R_t Değerinin Okunması

Sıcaklıkla değişen NTC termistörünün direncini okumak için Şekil 6.9’da görülen devre oluşturulmuştur.



Şekil 6.9: Termistör Direncini Ölçmek İçin Oluşturulan Devre

NTC termistörün besleme uçlarından birine değeri bilenen bir direnç takılmıştır. Bu direncin uçlarından direnç üzerindeki gerilim okunmaktadır. NTC termistörünün direnci sıcaklıkla değiştiğinden, sabit gerilimle beslemeli devrede oluşan akımda sürekli değişir. NTC termistörüne seri bağlanan R_1 direnci üzerinden aynı değişken I akımı geçmektedir. I akımı değişimi, R_1 direnci üzerinden gerilim değişimi V_1 olarak okunur.

Seri bağlanan direnç üzerindeki potansiyel farkı V_1 olmak üzere; devre üzerinde akım, denklem (6.8) ile ifade edilebilir.

$$I = \frac{V_{REF}}{R_T + R_1} = \frac{V_1}{R_1} \quad (6.8)$$

Denklem (6.8)’den termistör direnci için çözüm yapılır.

$$R_T = \frac{R_1 \cdot (V_{REF} - V_1)}{V_1} \quad (6.9)$$

Denklem (6.9), (6.7) numaralı denklemde yerine konur ve denklem (6.11) elde edilir.

$$T = \frac{B_{25/100} \cdot T_{25}}{B_{25/100} - T_{25} \cdot \ln\left(R_{25} \cdot \frac{V_1}{R_1 \cdot (V_{REF} - V_1)}\right)} \quad (6.11)$$

R_1 üzerindeki gerilim, V_1 , okunarak sıcaklık Kelvin cinsinden elde edilmiştir.

$$T = \frac{B_{25/100} \cdot T_{25}}{B_{25/100} - T_{25} \cdot \ln\left(R_{25} \cdot \frac{V_1}{R_1 \cdot (V_{REF} - V_1)}\right)} - 273.15 \quad (6.12)$$

$$T_{25} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$$

$$R_{25} = 30 \text{ k}\Omega$$

$$B_{25/100} = 3964 \text{ } 1/\text{K}$$

$V_{REF} = 5 \text{ V}$ ile devre beslenmiştir.

$R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ devrede kullanılmıştır.

V_1 değeri okunarak sıcaklık hesaplanmıştır. Denklem (6.13), elektrik motoru sürücüsünde soğutma bloğu yüzeyi sıcaklığını ölçmek için kullanılan denklemdir.

$$T = \frac{3964 \cdot 298.15}{3964 - 298.15 \cdot \ln\left(30 \cdot \frac{V_1}{5 \cdot (5 - V_1)}\right)} - 273.15 \quad (6.13)$$

6.3 Test Koşulları

Hibrid elektrikli araç uygulamalarına yönelik geliştirilen DC elektrik motoru ve sürücüsü, bu alanda Türkiye’de üretilen ilk ürünlerdir. Çeşitli DC motor uygulamaları önceden olsa da, fırçasız sürekli mıknatıslı, yüksek güçlü ve düşük ağırlıklı araç için tasarlanmış bir ürün seri olarak Türkiye’de üretilmemektedir. Motor sürücüsü ise, tamamen yurtdışından alınan bir üründür. Bu anlamda, dinamometre üzerinde test edilmiş ürünler bir ilki temsil etmektedir.

Tez çalışmasında, soğutma sistemi, maksimum yüklenme durumuna göre, en zorlu şartlarda IGBT modüllerini soğutabilecek kapasitede tasarlanmıştır. En zorlu şartlar,

tez içeriğinde belirtildiği gibi motorun 600 A akım çekmesi, dış ortam sıcaklığının 40°C olması ve sisteme giren su sıcaklığının 47°C olması durumudur. Fakat testler, sadece soğutma sisteminin kapasitesini test etme amaçlı değildir. Tüm sisteminin parçaları; kontrol kartlarından, yazılımdan, yer belirleme sensörlerinden, akım değerlerinden, akım şekillerine kadar kontrollü bir planlama ile test edilmiştir.

Bu noktada, yapılmış en son testlerde, elektrik motoru 3000 rpm'de 70 Nm ile yüklenmiş ve baralardan ortalama 200 A akım çekmiştir. Elektrik motor sürücüsü de 200 A akımı 10 kHz frekansla anahtarlayarak motoru sürmüştür.

Test laboratuvarın ortalama sıcaklığı 26 °C, sisteme giren suyun sıcaklığı 32°C'dir.

Test sistemi verileri Tablo 6.1'de görülmektedir.

Tablo 6.1: Test Sistemi Verileri

Moment	70 Nm
Hız	3000 rpm
Akım	200 A rms
Dış Ortam Sıcaklığı	26 °C
Su giriş Sıcaklığı	32 °C

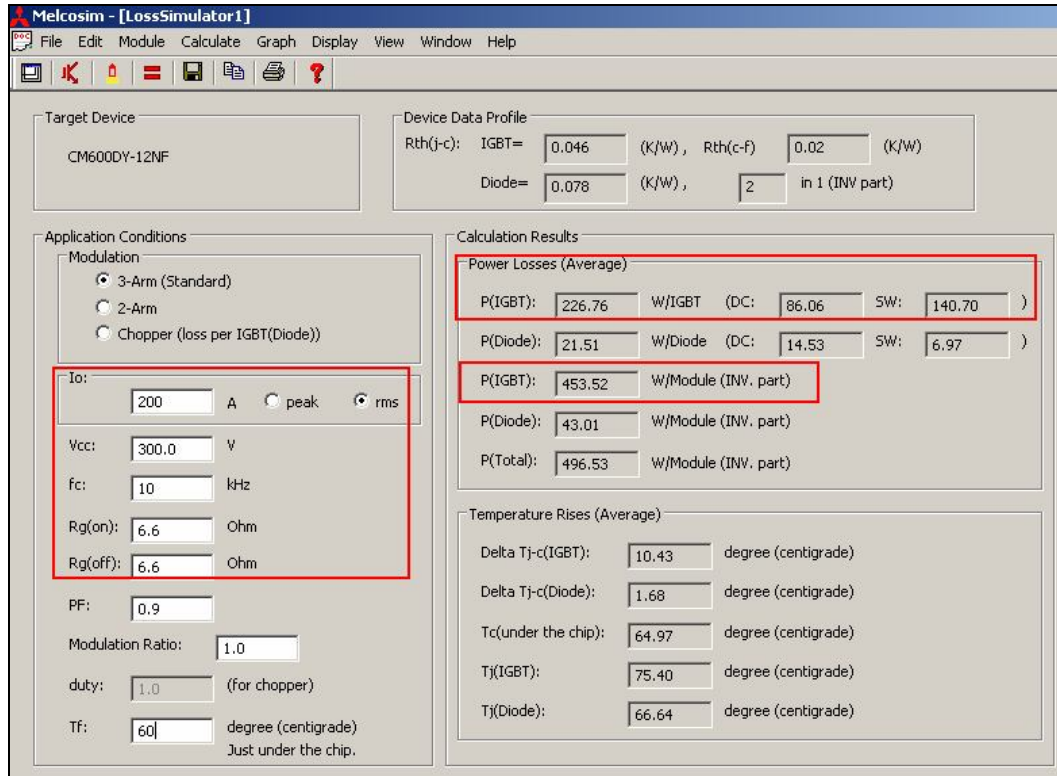
Testin yapılma süresi 30-40 dakika arasındadır. Bu süre içerisinde, sıcaklığın zamanla değişmediği görülmüştür ve soğutma bloğu üzerindeki iki NTC termistörü ile sıcaklık değerleri okunmuştur.

Tablo 6.2: NTC Termistörleri İle Okunan Sıcaklık Değerleri

NTC 1	41.4 °C
NTC 2	42.2 °C

Test sonuçları ile maksimum yüklenme durumuna göre modellenmiş sistemi karşılaştırabilmek için, model sistemi üzerinde uygulanan sınır koşullarını test sırasında uygulanan sınır koşullar ile değiştirmek gereklidir. Burada amaçlanan, ısı modelin doğruluğunu, test sonuçları ile değerlendirmektir. Maksimum yüklenme durumunda analizlerde ortaya çıkan sıcaklık değerleri için yorum yapma imkanı sağlamaktır.

Test sırasında çekilen 200 A akımın ve 10 kHz anahtarlama frekansı ile oluşan ısı gücü kaybı Melcosim programı ile hesaplanmıştır. Melcosim programının çıktısı Şekil 6.10'da görülmektedir.



Şekil 6.10: IGBT Modüllerin Isı Gücü Kaybı

Bir IGBT modülünden yayılan ısı gücü 453.52 W'dır. Diğer yöntemler ile hesaplamada kullanılan grafikler ve bu grafiklerden alınan değerler, 600 A akım ve 300 V besleme için verilmiştir. Test sırasında çekilen akım 200 A rms olduğundan, grafik verileri kullanılmamıştır. 600 A akım için farklı yöntemler ile ısı gücü kaybı hesaplamalarında ortaya çıkan ortalama ısı gücü kaybının, MELCOSIM programının hesaplandığı değere oranı, 200 A akım için kullanılmıştır ve ortalama ısı gücü kaybı hesaplanmıştır.

Tablo 6.3: Ortalama Isı Gücü Kaybı-600 A

600 A	İletim enerjisi ve kapı direncine bağlı anahtarlama enerjisi kaybı grafiğinden elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Akım-gerilim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Melcosim Sonucu
	1763 W	2083 W	1516 W
	Ortalama Güç Kaybı	1787 W	
	(Ortalama / Melcosim) Oranı	1.18	

Tablo 6.4: Ortalama Isı Gücü Kaybı-200 A

200 A	İletim enerjisi ve kapı direncine bağlı anahtarlama enerjisi kaybı grafiğinden elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Akım-gerilim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Melcosim Sonucu
	-	-	453.5 W
	(Ortalama / Melcosim) Oranı	1.18	
	Ortalama Güç Kaybı	535 W	

535 W ısı gücü kaybı bir modül için ortalama ısı gücü kaybı olarak alınmıştır. IGBT plakalarından yayılan sabit ısı akısı denklem (6.14) ile elde edilir.

$$q'' = \frac{Q_{ortalama}}{A} = \frac{535}{0.11 \cdot 0.08} = 60795 \text{ W/m}^2 = 61 \text{ kW/m}^2 \quad (6.14)$$

61 kW/m^2 , ısı akısı sınır koşulu olarak 4,8 ve 12 numaralı kenarlara girilmiştir.

Ortalama kanal sıcakları, çıkış sıcaklığının bulunmasıyla, giriş-çıkış kanalları arasındaki sıcaklık farkının, orta blok içerisindeki 14 kanala giriş kanalından itibaren eşit sıcaklık artışları eklenmesi ile hesaplanır.

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (6.15)$$

$Q_{ORTALAMA}$,535 W değerindedir, üç modülün toplam ısı kaybı denklem (6.16)'da yer almaktadır.

$$Q_{sistem} = 535 \cdot 3 = 1605 \text{ W} \quad (6.16)$$

Kütleli debi, denklem (6.17) ile ifade edilir.

$$\dot{m} = \Phi \cdot \rho \quad (6.17)$$

35'C de, $994 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ akışkanın yoğunluğudur.

$\Phi = 12.5 \text{ lt/dk} = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ akışım hacimsel debisidir. Akışım, kütleli debisi, hacimsel debi ve yoğunluk değerlerinin denklem (6.17)'de yerine konulmasıyla elde edilir.

$$\dot{m} = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 994 = 198.8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (6.18)$$

Giriş-çıkış akışkan sıcakları arasındaki fark, denklem (6.15)'in düzenlenmesiyle, denklem (6.19)'da ifade edilir.

$$T_{\text{çıkı}} - T_{\text{giriş}} = \frac{Q}{\dot{m} \cdot c} \quad (6.19)$$

c_p , akışkanın özgül ısıdır, 35°C ortalama akışkan sıcaklığında 4178 J/kg.K 'dir. Toplam ısı gücü kaybı, kütleli debi ve akışkanın özgül ısı değeri, denklem (6.19)'da yerine konularak, sıcaklık farkı elde edilir.

$$T_{\text{çıkı}} - T_{\text{giriş}} = \frac{1605}{198.8 \cdot 10^{-3} \cdot 4178} = 1.9^\circ\text{C} \quad (6.20)$$

$T_{\text{giriş}}$, akışkanın soğutma bloğuna giriş sıcaklığıdır, deneysel çalışmada, soğutma bloğuna girişte su 32°C ölçülmüştür. Çıkış sıcaklığı, denklem (6.21) ile hesaplanır.

$$T_{\text{çıkış}} = T_{\text{giriş}} + \Delta T = 32 + 1.9 = 33.9^\circ\text{C} \quad (6.21)$$

Tablo 6.5: Kanal İçerisindeki Akışkanın Ortalama Sıcaklık Değerleri

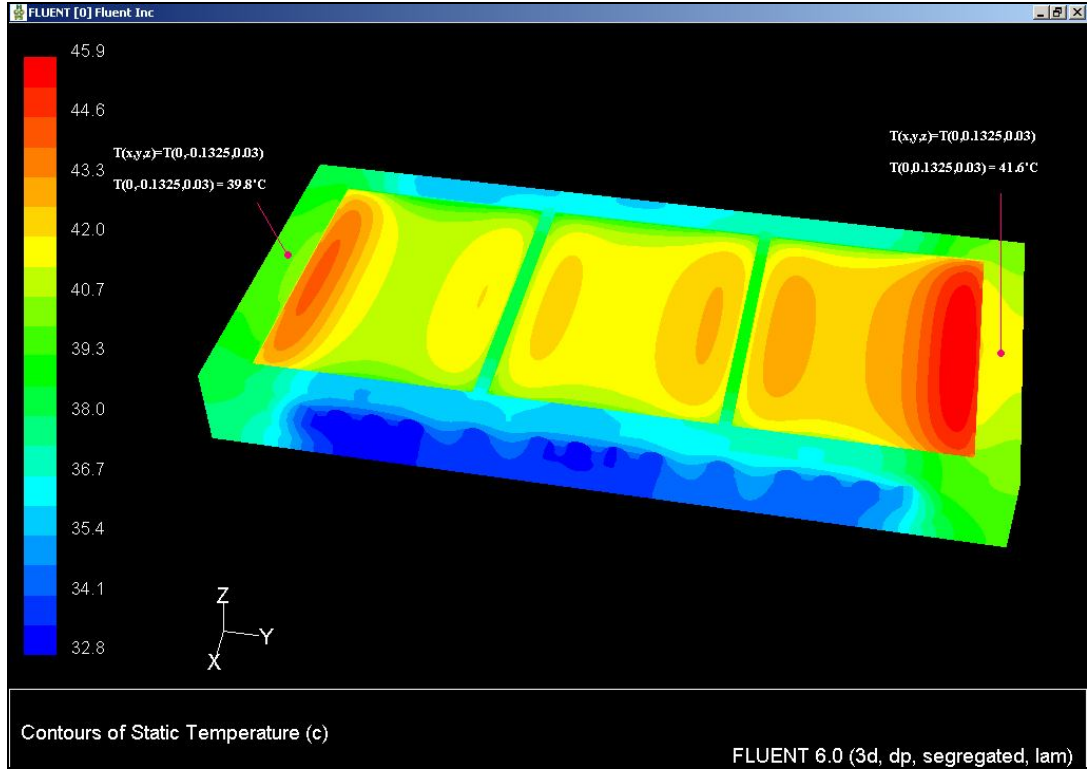
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
32.00	32.15	32.29	32.44	32.58	32.73	32.88	33.02	33.17	33.31	33.46	33.61	33.75	33.90

Isıl analiz sınır şartları Tablo 6.6'da görülmektedir. Suyun fiziksel özellikleri, dinamik viskozitesi, ısı iletim katsayısı gibi özellikleri ortalama film sıcaklığının değişmesi sebebiyle değişir. Bu değişim hesaplarda ısı taşınım katsayısı değerini etkiler. Fiziksel özelliklerdeki değişimin, ısı taşınım katsayısında önemli bir değişiklik yapmadığı kabul edilmiştir ve aynı geometride, aynı hacimsel debi değerinde hesaplanmış olan $13898 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri kullanılmıştır.

Tablo 6.6: Test Koşullarının Isıl Sınır Şartları

İKİ BOYUTLU MODEL SINIR ŞARTLARI							
	W/m ²		W/m ²				
1 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	9 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	17 No.lu Kenar, Yüzey		13898 W/m ² C	
2 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	10 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	T1	32°C	T8	33.02 °C
3 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	11 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	T2	32.15 °C	T9	33.17 °C
4 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=61	12 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=61	T3	32.29 °C	T10	33.31 °C
5 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	13 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	T4	32.44 °C	T11	33.46 °C
6 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	14 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	T5	32.58 °C	T12	33.61 °C
7 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	15 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=0	T6	32.73 °C	T13	33.75 °C
8 Numaralı Kenar, Yüzey	q''=61	16 Numaralı Kenar, Yüzey	26°C h=1.5 W/m ² K	T7	32.88 °C	T14	33.90 °C

6.4 Test Sonuçları ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

**Şekil 6.11:** Test Koşulları Altında Soğutma Sistemi Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

(0,-0.1325,0.03) ve (0,0.1325,0.03) model üzerindeki noktalar, NTC termistörlerin bağlandığı noktalardır. Bu noktalarda hesaplanan sıcaklıklar, 39.8°C ve 41.6 °C'dir. Test ile elde edilen değerler ile karşılaştırması Tablo 6.7'de görülmektedir.

Tablo 6.7: Test Sonuçları ile Isıl Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

TEST DEĞERLERİ & ISIL ANALİZ DEĞERLERİ			
	TEST	ANALİZ	% HATA
NTC 1	41.4°C	39.8 °C	3.8
NTC 2	42.2 °C	41.6 °C	1.4

7. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu tez çalışmasında IGBT modüllerinin soğutma sistemi tasarlanmıştır.

Tez çalışmasının başlangıcını, incelenen yurtdışı kontrol sistemlerinden Semikron firmasına ait soğutma bloğunun daha iyisinin yapılabileceği düşüncesi oluşturmuştur. Semikron firmasının ürünü demonte edilmiştir, soğutma bloğu kanal yapısı incelenmiştir.

Soğutma sisteminin kanal yapısı; iki boyutlu ve üç boyutlu modellenmiştir. Modelin akış analizleri yapılmıştır. Akış analizleri sonucunda soğutma kanallarındaki debi değerleri hesaplanmıştır.

Akış analizlerinin gerçek sonuçlara ne kadar yakınsadığını görmek amaçlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gerçek sistemde fiziksel olarak kanallar içersinden akış ölçebilmek mümkün olmadığından soğutma sisteminin akış yapısını birebir modelleyen bir prototip deney bloğu yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, soğutma bloğu içersindeki her kanaldan geçen debi değeri ölçülmüştür.

Modellenen ve deneysel çalışmalar ile incelenen soğutma sisteminden farklı, blok içersinde akış bölünmesine sebep olmayan yeni bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Yeni tasarlanan soğutma bloğunda, akış bölünmesi ile farklı debilerin kanallar içersinde oluşmamasını sağlamak amaçlanmıştır.

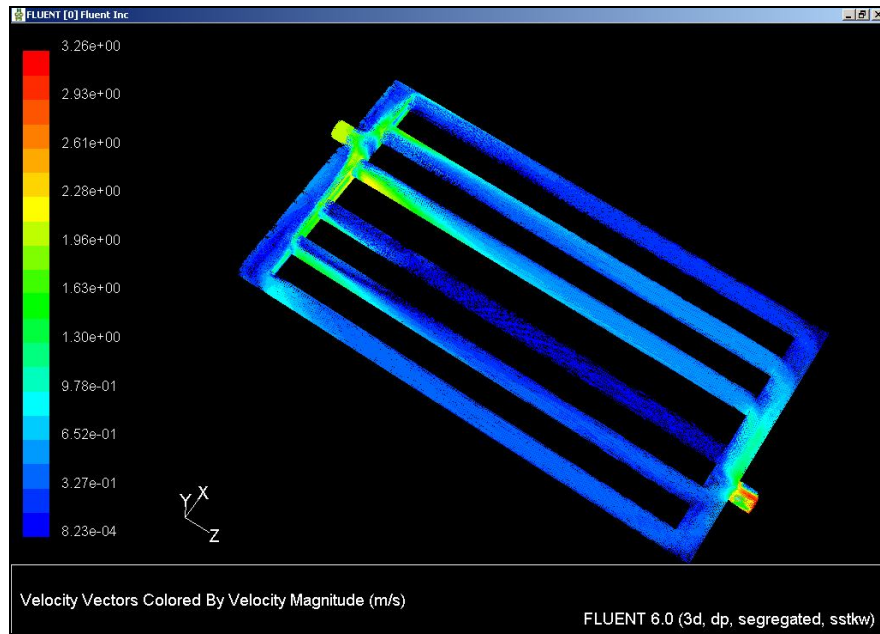
Tasarlanan yeni soğutma sistemi ile hesaplanan ısı yükü altında yazılımsal ve deneysel çalışılmıştır. Fluent programında enerji denklemi çözdürülerek bloğun iki boyutlu olarak orta kesitinde, üç boyutlu olarak tüm yüzeylerinde ve iç hacminde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Yeni soğutma sistemi, elektrik motor sürücüsünün içersinde IGBT modüllerinin soğutulması amaçlı kullanılmıştır. Elektrik motor sürücüsünün deneysel çalışmaları Arçelik Çerkezköy işletmesinde, elektrik motorunun elektrik motor dinamometresi üzerinde 70 Nm moment değerinde yüklenmesi ve elektrik motor sürücüsü ile 3000 rpm hızda sürülmesiyle sürekli çalışma eğrisi üzerinde yapılmıştır. Sıcaklık değerleri, sistem yüzeyine bağlı iki NTC termistöründen test süresi boyunca okunmuştur.

Noktasal olarak ölçülen deneysel sıcaklık değerleri ile yazılım ile hesaplanan yüzey üzerindeki aynı noktadaki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu yüksek lisans tez çalışması dahilinde ulaşılan sonuçlar ve yorumlar şu şekilde özetlenebilir:

- Semikron kontrol sistemi demonte edildiğinde soğutma bloğu içerisinde bir kanaldan altı kanala ayrılan akış sisteminin mevcut olduğu görülmüştür, bu durumun her kanalda farklı debilere sebep olacağı düşünülmüştür.
- $k-\omega$, $k-\omega$ sst, RSM ve $k-\epsilon$ türbülans modelleri ile akış analizleri yapılmıştır ve her kanalda farklı debi değerleri elde edilmiştir. Çalışılan türbülans modellerinden $k-\omega$ sst'nin grafiksel sonuçları Şekil 7.1'de görülmektedir.



Şekil 7.1: $k-\omega$ sst Türbülans Modeli ile Kanal İçerisinde Çözümlenen Hız Profilleri

Şekil 7.1'de açık olarak fark edilen, 4. kanaldan az debi geçtiğidir. 2. ve 3. kanallardaki debi değerleri ise diğer kanallara göre fazladır.

- Grafiksel sonuçla birlikte, farklı türbülans modelleri ile bulunan her bir kanaldaki akış yüzdesi Tablo 7.1'de görülmektedir. Üç boyutlu modelin analizinde tüm türbülans modelleri ile birbirine uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Birinci kanalda, tüm türbülans modelleri %10-11 civarında akış yüzdesi hesaplamışlardır. İkinci ve üçüncü kanallarda, en fazla akış yüzdesi yine tüm modellerde ortaya çıkmıştır. Beşinci ve altıncı kanallarda, tüm

türbülans modellerinin sonuçları birbirine çok yakındır. Modeller arasında, sadece dördüncü kanalda belirgin bir fark olduğu görülmüştür.

Tablo 7.1: Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması

% (Kanal Debisi / Toplam Giriş Debisi)				
	Türbülans Modelleri			
	k- ω	k- ω sst	RSM	k- ϵ
kanal1	10.97	11.38	10.50	10.87
kanal2	27.44	25.20	25.06	25.69
kanal3	25.59	26.24	28.80	28.04
kanal4	2.86	4.19	1.10	1.61
kanal5	15.48	14.60	15.57	15.55
kanal6	17.66	18.41	18.98	18.26

- Deneysel çalışmalar ile kanalların farklı debi değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Başlangıçta beklenen farklı debisel değerlerin olacağı düşüncesi doğrulanmıştır. Semikron soğutma sisteminde, kanallar arasında %6.9 ile %24.9 arasında değişen debi farklılıkları vardır. En az debi, dördüncü kanalda ölçülmüştür. Tablo 7.2’de deneysel çalışmaların sonuçları görülmektedir.

Tablo 7.2: Deneysel Çalışmalar-Akış Testleri

Kanallar	Frekans (KHz)	Debi (lt/dk)	% değerleri
kanal-1	18.4	1.46	11.6
kanal-2	36.8	2.94	23.3
kanal-3	39.2	3.13	24.9
kanal-4	10.9	0.87	6.9
kanal-5	26.7	2.13	16.9
kanal-6	25.8	2.06	16.3
			100

- Deneysel çalışmalar ile akış analizleri karşılaştırıldığı zaman, en belirgin sonuç olarak dördüncü kanalda, türbülans modellerinin en fazla hataya sahip

olduklarıdır. Karşılaştırmalardaki hata, denklem (7.1) ile hesaplanmıştır; sonuçlar Tablo 7.3’de görülmektedir. Diğer kanallarda, tüm türbülans modelleri, %16’nın altında bir hata yüzdesine sahiptirler. Dördüncü kanalda en az hata değerine sahip olan k- ω sst türbülans modelidir.

$$\% \text{ hata} = \frac{(|Test - CFD|)}{Test} \cdot 100 \quad (7.1)$$

Tablo 7.3: Üç Boyutlu Akış Analiz Sonuçlarının Test Sonuçlarına Göre Hata Yüzdeleri

Üç Boyutlu Akış Analizleri % Hata					
	k- ω hata %	k- ω sst hata %	RSM hata %	k- ϵ hata %	TEST
kanal-1	7.02	3.89	11.10	7.99	-
kanal-2	15.91	6.01	5.71	8.34	-
kanal-3	1.50	3.65	14.07	11.05	-
kanal-4	59.25	40.43	84.31	77.08	-
kanal-5	9.89	15.37	9.51	9.60	-
kanal-6	6.48	10.57	14.28	9.93	-

- Yeni soğutma sistemi tasarlanmıştır. Tek bir kanalı soğutma bloğu içinde dolaştırmak tasarımın ilk düşüncesidir. Bu amaçla yeni soğutma sistemi üç parçadan üretilmiştir, Şekil 7.2’de görülmektedir. Ön ve arka bloklar u şeklinde dönüş bölümlerini içermektedir ve orta blok ısı yükünün akışkana aktarıldığı bloktur.



Şekil 7.2: Yeni Soğutma Sistemi-Ön Blok-Orta Blok-Arka Blok

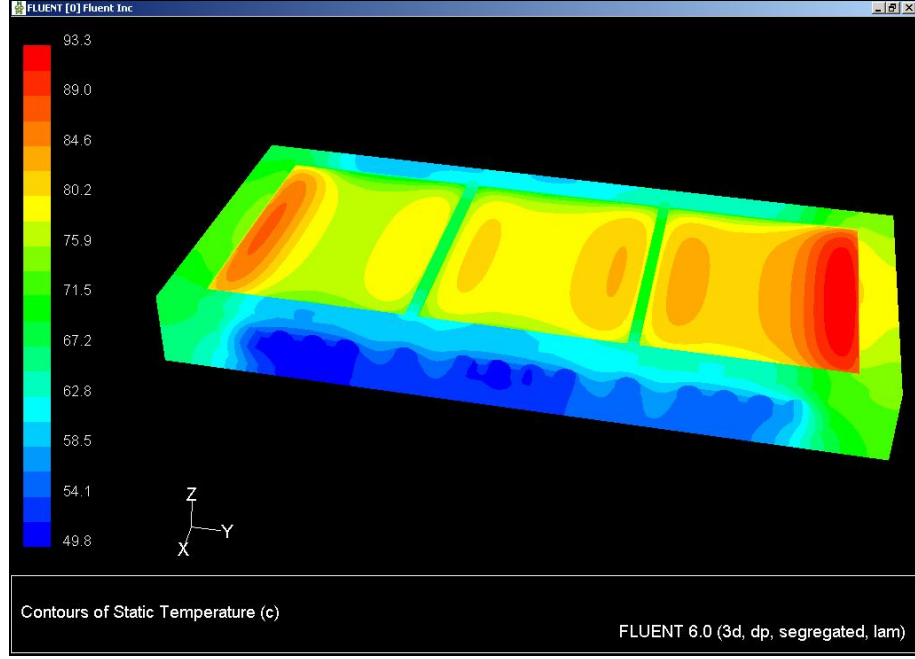
- Soğutma sisteminin verimli çalışmasında, yüzey kalitesinin ve temas direncinin sistem genelinde en önemli noktalar olduğu anlaşılmıştır. Yeterli yüzey kalitesi, CNC tezgahında soğutma bloğunun işlenmesiyle elde edilmiştir. Temas direnci, IGBT modülü ile soğutma bloğu yüzeyi arasında termal ısı iletim malzemesi sürülerek azaltılmaya çalışılmıştır. Sürülen termal ısı iletim malzemesinin kalınlığının, seri imalata uygun bir yöntem ile sürülmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Önerilen kalınlık değeri 0.1 mm ile 0.2 mm arasındadır.
- Yeni soğutma sistemiyle beraber kullanılacak IGBT modüllerinin ısı gücü kaybı analizi yapılmıştır. Bir anahtarlama periyodu içerisinde, anahtarlama kayıplarının çok küçük zaman aralıklarında (nano saniye mertebelerinde) meydana geldiği görülmüştür. Motorun fazlarının, 10 kHz anahtarlama frekansı ile sürekli anahtarlama durumunda, bu kayıpların iletim kayıpları ile beraber önemli bir ısı gücü kaybı meydana getirdiği görülmüştür. Melcosim programı, Mitsubishi firmasının ürünlerinin teknik verileri ve gerilim-akım anahtarlama şekline göre üç farklı yöntemle ısı gücü kaybı hesaplanmıştır, sonuçlar Tablo 7.4’de görülmektedir.

Tablo 7.4: IGBT Modüllerinin Isı Gücü Kayıp Analizi-600 A

İletim enerjisi ve kapı direncine bağlı anahtarlama enerjisi kaybı grafiğinden elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Akım-gerilim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen anahtarlama enerjisi ile hesaplanan ortalama güç kaybı	Melcosim Sonucu
1763 W	2083 W	1516 W
%16	%37	-
Ortalama Güç Kaybı	1787 W	

- Isıl analizler, soğutma sistemi bloğu üzerinde, oluşabilecek en zorlu durumları içeren sınır şartları altında yapılmıştır. IGBT modülünün ısı gücü kaybı, modülün anahtarlayabileceği maksimum akım değerinde hesaplanmıştır. Çevre ortamının sıcaklığı 40°C alınmıştır. Sınır şartlarında, kanallardaki akışkanın ısı taşınım katsayısı çeşitli benzeşim yöntemleri ile hesaplanmış ve ortalama 13898 W/m²C değeri elde edilmiştir. Isı taşınım katsayısı, blok üzerindeki sıcaklık dağılımını etkileyen önemli parametrelerden birisidir.
- Isıl analizlerin, sonuç açısından kontrol noktası, IGBT modülünün üretici firmasının (Mitsubishi) verdiği maksimum kullanılabilir transistör çip sıcaklığıdır. Maksimum kullanılabilir çip sıcaklığı 150°C'dir. Soğutma sistemi yüzey sıcaklığından, çip altı sıcaklığına modülün termal direnci ile ulaşılmıştır.
- IGBT modülünün 600 A akımı 10 kHz anahtarlama durumunda, tasarımı yapılan soğutma bloğu üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 7.3'de görülmektedir. Blok üzerindeki maksimum sıcaklık 93.3°C'dir. Çip altı sıcaklığına denklem (7.2) ile ulaşılır.

$$T_j = 93.3 + 893.5 \cdot 0.046 \quad (7.2)$$
$$T_j = 134.4^\circ C$$



Şekil 7.3: Soğutma Sistemi Yüzeyinde Sıcaklık Dağılımı-600 A

Soğutma sistemi; kanal yapısı, akışkanın debisi, blok malzemesi, termal ısı iletim malzemesi ve tasarım geometrisi açısından maksimum yüklenme durumunda dahi IGBT modülleri için maksimum kullanılabilir sıcaklık değerinin altında bir sıcaklık sağladığından ısıl analizlere göre kullanılabilir bir sistemdir.

- Elektrik motor sürücüsünün deneysel çalışmaları Arçelik Çerkezköy işletmesinde, elektrik motorunun elektrik motor dinamometresi üzerinde 70 Nm moment değerinde yüklenmesi ve elektrik motor sürücüsü ile 3000 rpm hızda sürülmesiyle sürekli çalışma eğrisi üzerinde yapılmıştır. Testler, sadece soğutma sisteminin kapasitesini test etme amaçlı değildir. Tüm sisteminin parçaları; kontrol kartlarından, yazılımdan, yer belirleme sensörlerinden, akım değerlerinden, akım şekillerine kadar kontrollü bir planlama ile test edilmiştir.
- Bu noktada, yapılmış en son testlerde, elektrik motoru 3000 rpm’de 70 Nm ile yüklenmiş ve baralardan ortalama 200 A akım çekmiştir. Elektrik motor sürücüsü de 200 A akımı 10 kHz frekansla anahtarlayarak motoru sürmüştür. Test laboratuvarın ortalama sıcaklığı 26°C, sisteme giren suyun sıcaklığı 32°C’dir.

Test sistemi verileri Tablo 7.5’de görülmektedir.

Tablo 7.5: Elektrik Motor Sürücüsü Testinin Çalışma Koşulları

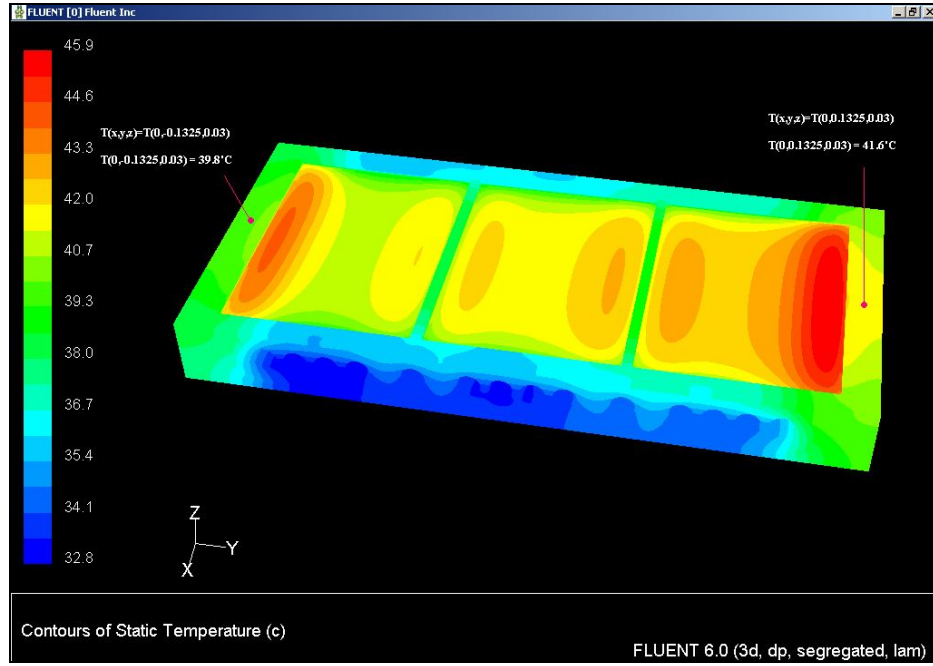
Moment	70 Nm
Hız	3000 rpm
Akım	200 A rms
Dış Ortam Sıcaklığı	26 °C

- Testin yapılma süresi 30-40 dakika arasındadır. Bu süre içerisinde, sıcaklığın zamanla değişmediği görülmüştür ve soğutma bloğu üzerindeki iki NTC termistörü ile sıcaklık değerleri okunmuştur, değerler Tablo 7.6'da görülmektedir.

Tablo 7.6: NTC Termistörleri İle Okunan Sıcaklık Değerleri

NTC 1	41.4 °C
NTC 2	42.2 °C

- IGBT modüllerinin 600 A akımı 10 kHz'de anahtarlamasına ve farklı çevre şartlarına göre analizi yapılan ısıl modelin, model olarak doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, bahsedilen modelin ısıl analizinin, sadece sınır şartları test şartlarına çevrilerek tekrarı yapılmıştır. Şekil 7.4'de deney çalışmalarında soğutma bloğu yüzeyinden sıcaklık ölçümü alınan noktalarının yeri ve ısıl analiz sonuçları ile bu noktalarda hesaplanan sıcaklık değerleri gösterilmiştir.



Şekil 7.4: Soğutma Sistemi Yüzeyinde Sıcaklık Dağılımı-200 A

- $(0,-0.1325,0.03)$ ve $(0,0.1325,0.03)$ model üzerindeki noktalar, NTC termistörlerin bağlandığı noktalar. Bu noktalarda hesaplanan sıcaklıklar, 39.8°C ve 41.6°C 'dir. Test ile elde edilen değerler ile karşılaştırması Tablo 7.7'de görülmektedir.

Tablo 7.7: Test Sonuçları ile Isıl Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

TEST DEĞERLERİ & ISIL ANALİZ DEĞERLERİ			
	TEST	ANALİZ	% HATA
NTC 1	41.4°C	39.8°C	3.8
NTC 2	42.2°C	41.6°C	1.4

- Isıl modelin, deney çalışması sonuçlarıyla karşılaştırılmasında sonuçlar arasında %3.8 ile %1.4 fark görülmüştür.

Bu çalışmanın, aşağıdaki öneriler ile geliştirilebileceği düşünülmektedir:

i-) Semikron kontrol sistemi, anahtarlayabileceği maksimum akım değerinde çalıştırılabilir ve blok üzerinde yüzey sıcaklık haritası çıkarılabilir. Farklı kanal debilerinin, yüzeyler üzerinde farklı sıcaklık değerleri oluşturacağı düşüncesi test edilebilir.

ii-) Akış analizlerinin sonuçlarındaki hata miktarı, daha iyi bir model oluşturarak ve prototip test düzeneğinden daha fazla veri alınarak azaltılabilir. Örnek olarak, debilerin ölçülmesi için tasarlanan prototipin üzerinde daha kompakt akış transdüserleri her kanala yerleştirilerek debi değerleri bir test ile okunabilir. Aynı zamanda bu işlem test tekrarında zamandan kazandıracaktır. Kanal çıkışlarına, basınç transdüserleri yerleştirilebilir ve akış analizlerinde türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap sınır şartı yerine basınç sınır şartı değerleri kullanılabilir.

iii-) Yerleştirilecek basınç transdüserleri ile, Semikron soğutma bloğunun akış hattı üzerinde oluşturduğu direnç ve tasarlanan soğutma bloğunun oluşturduğu direnç ölçülebilir. İki sistemin aynı debi değerinde meydana getirdikleri basınç düşümünden enerji verimlilikleri karşılaştırılabilir.

iv-) IGBT modüllerinden olan ısı gücü kaybı, deneysel olarak hesaplanabilir. Dinamometre üzerinde yapılan testlerde, 10 kHz'de anahtarlanan akım 30kHz okuma frekansına sahip bir cihaz tarafından dizüstü bilgisayara kaydedilmektedir. Faz gerilimleri içinde aynı okuma hassasiyeti kurulabilir ve elde edilen akım-gerilim eğrilerinden ısı gücü kaybı hesaplanabilir.

v-) Tasarımı yapılan soğutma bloğunun geliştirilmesi ve yüzey üzerinde daha düşük sıcaklıklar elde edilmesi açısından seri üretiminde daha kaliteli, ısı iletim katsayısı daha yüksek bir alüminyum serisi kullanılabilir.

vi-) Termal ısı iletim malzemesinin, soğutma sistemi yüzeyine eşit ve istenen kalınlıkla sürülebilmesi soğutma sistemi yüzeyi ve IGBT modül yüzeyi arasında oluşan termal direnci azaltır. IGBT modüllerinin soğutma sistemi yüzeyine bağlanması sırasında, termal ısı iletim malzemesinin kalınlığına ve hassas bir şekilde sürülmesine dikkat edilmiştir, ancak bu işlem, istenen kalitede seri üretim hattında yapılabilir.

vii-) Isıl analizlerde, kanallar içerisindeki akışkanın sıcaklığı kanal boyunca değişken olarak bir formülasyon ile Fluent programına girilebilir. Kanal boyunca sabit kanal sıcaklığı yerine, değişken kanal sıcaklığı ile ısıl model, gerçek modele daha yakınlaşacaktır.

viii-) Test koşullarında oluşturulan ısıl modelin test sonuçlarına maksimum %3.8 hatayla yakınsadığı görülmüştür. Testlerin farklı yükleme durumlarına göre tekrar

edilmesi ve maksimum yükleme şartlarında da yapılması ısı modelin daha ayrıntılı incelenmesini sağlayabilir.

ix-) Elektrik motoru dinamometresinin elektrik motorunu yüklemesi ile yapılan testlerde, sürücü üzerinden ve soğutma bloğu üzerinden daha fazla sıcaklık bilgisi alınabilir ve kaydedilebilir. Sürekli çalışma koşullarının değerlendirilmesinde faydalı olacağı gibi, zamana bağlı akım değişimlerinin soğutma sistemi yüzeyinde meydana getirdiği sıcaklık değişiklikleri gözlenebilir.

x-) Tasarlanan soğutma bloğunun geliştirilmesi için, soğutma sistemine akışkanı basan pompanın DC elektrik motoru, yüzeyde oluşan sıcaklık değerine göre çeşitli noktalarda çalıştırılabilir, enerji daha verimli kullanılabilir.

xi-) Tasarlanan soğutma bloğunun geliştirilmesi için, soğutma sistemi kanallarında yiv açılması gibi, türbülansı ve ısı taşınım katsayısını artırıcı fiziksel yöntemler incelenebilir. İleriki çalışmalarda yapılması planlanmaktadır.

xii-) Soğutma kanalları içerisinde, akışkan olarak su ile yapılan bu çalışmalar; su-glikol iki fazlı akış modeli için, hem yazılımsal hem deneysel olarak çalışabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kaytaz, V.G.**, 2005. A New Simulation Model Coupled Electro-Thermal Performance for MOSFET Devices, *PhD Thesis*, SMU Mechanical Engineering Department, USA.
- [2] *Semikron International Power Modules Manufacturing Company*. 2007. [online] [Erişim Tarihi 15 Ocak 2007]. İnternet Adresi:
<<http://www.semikron.com/>>
- [3] **Hermwille, M.**, 2007. Cooling of Power Semiconductors and Their Characteristics, Istanbul, Ekim 21-22, 5-6.
- [4] **Campbell, J.R., Rajashekara, M.K.**, 2004. Evaluation of Power Devices for Automotive Hybrid and 42V Based Systems, *SAE World Congress*, Detroit, Michigan, USA, Mart 8-11.
- [5] **Motto, E.R.**, 1999. Trench-Gate Technology For The Next Generation of MOS Power Devices, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) APEC Conference*, Dallas, Texas, USA, Mart 14-18.
- [6] *Global Power-Semiconductor Solution Provider Powerex Company*. 2007. [online] [Erişim Tarihi 18 Mart 2007]. İnternet Adresi:
<<http://www.pwr.com/>>
- [7] **Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins. W.P.**, 1995. Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons Ltd., Canada.
- [9] *Online Materials Information Resource*. 2007. [online] [Erişim Tarihi 3 Mart 2007]. İnternet Adresi: <<http://www.matweb.com/>>
- [10] **Shackelford, J.F.**, 1998. Introduction to Materials Science for Engineers, Prentice Hall International, Inc., London.
- [11] **Ching, J.C., Shenq-Yuh, J.**, 1998. Fundamentals Of Turbulance Modeling, Taylor&Francis, USA.
- [12] **White, F.M.**, 2004. Akışkanlar Mekaniği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

- [13] *Farnell International Distribution Centre*. 2007. [online] [Erişim Tarihi 22 Haziran 2007] İnternet Adresi:
<<http://www.farnell.com/datasheets/94038.pdf>>
- [14] *Yortan Akışkan Kontrol Teknolojileri A.ř.* 2007 [online] [Erişim Tarihi 18 Eylöl 2007] İnternet Adresi:
<http://www.yortan.com/image_upp/PSDB.pdf>
- [15] *Dow Corning Corporation*. 2007. [online] [Erişim Tarihi 07 Temmuz 2007] İnternet Adresi: <<http://www.dowcorning.com/>>
- [16] **Genceli, O.F.**, 2002. Çözömlöl Isı Taşınımı Problemleri, Birsen Yayınevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Yalçın SOLAK, 1982 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Beykoz Ziya Ünsel ortaokulunda, lise öğrenimini Sakıp Sabancı Süper Lisesi'nde 2000 yılında tamamladıktan sonra aynı yıl İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği bölümüne girdi. 2005 yılında İTÜ Makina Fakültesi'nden Makina Mühendisi olarak onur listesinde mezun oldu. Aynı yıl başladığı İTÜ Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isı Akışkan Yüksek Lisans programında, yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

2006 yılında çalışmaya başladığı TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde, Enerji Enstitüsü Araç Teknolojileri bölümünde Makina Mühendisi olarak çalışmaktadır.