

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖNDEN YÜKLEMELİ BİR ÇAMAŞIR MAKİNESİNİN DİNAMİK OLARAK
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ÖZER

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖNDEN YÜKLEMELİ BİR ÇAMAŞIR MAKİNESİNİN DİNAMİK OLARAK
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet ÖZER
(503121233)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121233 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet ÖZER** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÖNDEN YÜKLEMELİ BİR ÇAMAŞIR MAKİNESİNİN DİNAMİK OLARAK MODELLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mahmut Cüneyt FETVACI
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışması boyunca yardımını eksik etmeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Atakan ALTINKAYNAK ve Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ'e, bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan BSH Çamaşır Makinesi Grubu'ndan Mert ALPAYA, Tuğba DİŞPINAR, Hüseyin Caner DURAN, Gencer ÖZKAZMAN, Turhan MUTLU ve Murat YÜCEL'e, çalışma süresince desteğini esirgemeyen ablam Ceren ÖZER'e teşekkür ederim. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar 5130073 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir.

Mayıs 2015

Mehmet ÖZER
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	1
1.3 Patent Araştırması	7
2. DENEYSEL MODELİN OLUŞTURULMASI	11
2.1 Deney Şartları.....	11
2.2 Ölçüm Cihazları ve Enstrümantasyon.....	11
2.3 Deney Sonuçları	12
3. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI	13
3.1 Mevcut Sistem Çalışma ve Test Parametrelerinin Belirlenmesi	13
3.2 Esas Çevre Büyüklüklerinin Tespiti.....	13
3.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	14
3.4 Mevcut Tasarımın Modellenmesi.....	16
3.5 Mevcut Tasarıma Ait Sonlu Elemanlar Ağ Yapısının Oluşturulması.....	18
3.5.1 Mil – rulman grubu	19
3.5.2 Tambur grubu.....	20
3.5.3 Kazan grubu	21
3.5.4 Bağlantı grubu.....	22
3.6 Modelde Yapılan Sadeleştirme ve Varsayımlar	23
3.7 Numerik Analiz Sonuçları.....	27
4. İMALAT ANALİZLERİ.....	31
4.1 Rulmanlar İçin Tolerans Değerleri.....	32
4.1.1 İç bilezikler için rulman yüzey basıncı hesabı	32
4.1.1.1 Küçük rulman iç bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı	33
4.1.1.2 Büyük rulman iç bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı	34
4.1.2 Dış bilezikler için rulman yüzey basıncı hesabı.....	34
4.1.2.1 Küçük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı.....	35
4.1.2.2 Büyük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı.....	36
4.2 İmalat Parametreleri Belirlenmesi.....	36
4.3 İmalat Analizi İçin Ağ Örgüsünü Oluşturulması	40
4.4 Bir Çevrim İçin İşlem Adımları	40
4.5 İmalat Analizi Sonuçları.....	42
5. RULMAN BÖLGESİ YENİ TASARIM ÖNERİLERİ	47
5.1 Birinci Model Önerisi.....	47

5.1.1 Birinci model önerisi için rulmanlar tolerans değerleri	49
5.1.1.1 Küçük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı	49
5.1.1.2 Büyük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı	49
5.1.2 Birinci model önerisi için dinamik analiz sonuçları	50
5.1.3 Birinci model önerisi için imalat analizi sonuçları	53
5.2 İkinci Model Önerisi	55
5.2.1 İkinci model önerisi için rulman tolerans değerleri	57
5.2.2 İkinci model önerisi için dinamik analiz sonuçları	57
5.2.3 İkinci model önerisi için imalat analizi sonuçları	60
5.2.3.1 Burcun plastik enjeksiyon ile imalatının modellenmesi	60
5.2.3.2 Kazanın plastik enjeksiyon ile imalatının modellenmesi	67
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
6.1 Mevcut Model ve Yeni Model Önerilerinin Karşılaştırılması	70
6.2 Gelecek Çalışmalar ve Öneriler	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	77

KISALTMALAR

BSH	: Bosch ve Siemens Ev Aletleri Grubu
Tria3	: 3 düğüm noktalı 2 boyutlu lineer üçgen eleman
Tetra4	: 4 düğüm noktalı 2 boyutlu lineer dörtgen eleman
Penta6	: 6 düğüm noktalı 3 boyutlu lineer üçgen prizma eleman
Hex8	: 8 düğüm noktalı 3 boyutlu lineer dörtgen prizma eleman
Gap	: 1 boyutlu lineer olmayan yay eleman
Elas	: 1 boyutlu lineer yay eleman
Damp	: 1 boyutlu lineer sönüm elemanı
PP	: Polipropilen
PA	: Poliamid
WLF	: Williams-Landel-Ferry Modeli

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Parçaların grup bilgisi ve malzeme özellikleri	19
Çizelge 3.2 : Parçalar için eleman sayıları ve özellikleri.....	26
Çizelge 6.1 : 1,2'nci saniye sonrası kazan ve tambur için maksimum ve minimum yer değiştirme aralıkları	70
Çizelge 6.2 : Belirlenen beş noktanın 1,465'inci saniyedeki gerilme değerleri.....	71
Çizelge 6.3 : Rulmanlar için temas yüzeyindeki basınç değerleri.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Marmara Pantent tarafında alınan burç patenti [15].....	7
Şekil 1.2 : Arçelik tarafında alınan burç patenti [16]	8
Şekil 1.3 : Whirlpool tarafından alınan burç patenti [17].....	9
Şekil 2.1 : Dengesiz kütle ve lazer deplasman sensörü konumları.....	12
Şekil 3.1 : Giriş ve çıkış parametrelerinin gösterimi	14
Şekil 3.2 : Motor ile tambur arasında kayış açıları.....	15
Şekil 3.3 : BSH tarafından sağlanan geometri.....	16
Şekil 3.4 : Modelleme aşamasına esas alınacak sadeleştirilmiş geometri	16
Şekil 3.5 : Boyut düşürülmesi sonrası modelin genel görünümü	17
Şekil 3.6 : İki boyutlu modellenmeyecek üç boyutlu olarak bırakılan parçalar.....	17
Şekil 3.7 : Analiz için adım adım oluşturulan modeller	18
Şekil 3.8 : Mil – rulman grubu genel görünümü	20
Şekil 3.9 : Boşluk eleman için örnek rijitlik grafiği	20
Şekil 3.10 : Tambur grubu genel görünümü.....	21
Şekil 3.11 : Kazan gurubu genel görünümü	21
Şekil 3.12 : Bağlantı grubu genel görünümü	22
Şekil 3.13 : a) İki boyuta indirgenmiş parçalar, b) üç boyutlu olarak modellenmiş parçalar, c)Arka kazanda kısmen	23
Şekil 3.14 : Beton blok ve motor içeren model, b) noktasal kütleler içeren model...	24
Şekil 3.15 : Bir boyutlu boşluk elemanlar ve dış bilezik modeli.....	25
Şekil 3.16 : Boşluk (sarı) ve rbe3 (mavi) elemanlar ile tambur içinde kuvvet dağılımı	26
Şekil 3.17 : Kazan ve tambur üzerinde seçilen noktaların zamana göre yer değişimleri.....	27
Şekil 3.18 : Tambur üzerinde seçilen noktanın kazan üzerinde seçilen noktaya göre zamana bağlı yer değişimi.....	28
Şekil 3.19 : Dinamik analiz için 1,465'nci saniyedeki deplasman sonucu	29
Şekil 3.20 : Dinamik analiz için 1,465'nci saniyedeki Von Mises gerilme sonucu a) metal kısımlar için b) plastik kısımlar için.....	30
Şekil 4.1 : Rulman bölgesi kesit görünümü.....	32
Şekil 4.2 : Tolerans hesabı için gerekli rulman iç bilezik boyutları [18]	33
Şekil 4.3 : Tolerans hesabı için gerekli rulman dış bilezik boyutları [18].....	35
Şekil 4.4 : PP TV20 için Farklı sıcaklık değerleri için viskozite - kayma hızı değerleri.....	38
Şekil 4.5 : Plastik enjeksiyon analizi için kullanılan kazan geometrisi	39
Şekil 4.6 : Kalıp besleme noktalarında basınç - zaman grafiği	41
Şekil 4.7 : Denge durumu için enjeksiyon öncesi kalıp boşluğu ve insert yüzey sıcaklıkları	43
Şekil 4.8 : Malzemenin kalıp boşluğunu doldurma süresi.....	44
Şekil 4.9 : Enjeksiyon fazı sonrası parça ve insert sıcaklık dağılımları	44
Şekil 4.10 : Soğutma fazı sonrası parça ve insert sıcaklık dağılımları	45

Şekil 4.11 : İmalat sonrasında parçada meydana gelen çarpılmalar	46
Şekil 5.1 : Birinci model önerisi kesit görünümü	48
Şekil 5.2 : Birinci model önerisi 3 boyutlu görünümü	48
Şekil 5.3 : Birinci model için kazan ve tamburun zamana göre yer değişimi	51
Şekil 5.4 : Birinci model için tamburun kazana göre yer değiştirmesi.....	51
Şekil 5.5 : Birinci model önerisi için 1,465'inci saniyedeki yer değiştirme	52
Şekil 5.6 : Birinci model önerisi için 1,465'nci saniyedeki Von Mises gerilme sonucu a) metal kısımlar için b) plastik kısımlar için.....	52
Şekil 5.7 : Enjeksiyon fazı sonrası parça ve insert sıcaklıkları.....	53
Şekil 5.8 : Soğutma fazı sonrası parça ve insert sıcaklıkları	54
Şekil 5.9 : İmalat sonrası parçada meydana gelen çarpılmalar	54
Şekil 5.10 : İkinci model önerisi için genel görünüm a) üstten b) kesit	56
Şekil 5.11 : İkinci model önerisi 3 boyutlu görünümü	57
Şekil 5.12 : İkinci model için kazan ve tamburun zamana göre yer değişimi	58
Şekil 5.13 : İkinci model için tamburun kazana göre yer değiştirmesi.....	58
Şekil 5.14 : İkinci model önerisi için 1,465'inci saniyedeki yer değiştirme	59
Şekil 5.15 : İkinci model önerisi için 1,465'nci saniyedeki Von Mises gerilme sonucu a) metal kısımlar için b) plastik kısımlar için.....	59
Şekil 5.16 : Özgün ısı - sıcaklık değişimi	60
Şekil 5.17 : Isıl iletim katsayısı - sıcaklık değişimi	61
Şekil 5.18 : PA66 GF30 için farklı sıcaklıklarda viskozite - kayma hızı grafiği.....	62
Şekil 5.19 : Plastik enjeksiyonla üretilcek burç geometrisi ve besleme noktası.....	63
Şekil 5.20 : Besleme noktalarındaki basınç - zaman grafiği.....	64
Şekil 5.21 : Burcun plastik enjeksiyon ile imalatında kalıp dolma süresi	64
Şekil 5.22 : Enjeksiyon sonrasında burç içerisindeki fiber yönelimi	65
Şekil 5.23 : Enjeksiyon aşaması sonrası burçtaki sıcaklık dağılımı	66
Şekil 5.24 : Soğutma aşaması sonrası burçtaki sıcaklık dağılımı	66
Şekil 5.25 : Plastik enjeksiyon ile imalat sonrasında burçta oluşan çarpılma	67
Şekil 5.26 : Soğutma fazı sonrası parça ve insert sıcaklıkları	68
Şekil 5.27 : Plastik enjeksiyon ile imalat sonrası kazanda oluşan çarpılma	68
Şekil 6.1 : Gerilme karşılaştırması için seçilen 5 noktanın konumu	71
Şekil 6.2 : Plastik enjeksiyon analizinde parçanın kalıptan çıkış sıcaklıkları a) Mevcut model b) Birinci model önerisi c) İkinci model önerisi	72
Şekil 6.3 : Plastik enjeksiyon sonrası parçada olması öngörülen çarpılmalar a)Mevcut model b) Birinci model önerisi c) İkinci model önerisi	73

ÖNDEN YÜKLEMELİ BİR ÇAMAŞIR MAKİNESİNİN DİNAMİK OLARAK MODELLENMESİ

ÖZET

Son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ile beyaz eşya sektörü eskisine nazaran daha rekabetçi bir hal almıştır. Yeni imalat yöntemleri ve yeni malzemeler ile üretim maliyetleri azalmakta; böylece üreticiler daha iyi ürünleri daha ucuza tüketiciye sunabilmektedir. Tüketiciye ulaşan son mamulün giderek ucuzlaması, üreticilerin karlarını düşürmekte; bu da firmaların bu rekabet içerisinde etkinliklerini sürdürebilmeleri için üretim maliyetlerini düşürmeye itmektedir. Maliyetlerin düşürülebilmesi için söz konusu sistem incelenmeli; verimsiz bulunan kısımlar değiştirilmelidir.

Bu çalışmada, önden yüklemeli bir çamaşır makinesi sistemi incelenerek yapılabilecek iyileştirmelerin öngörülmesi amaçlanmıştır. Bahsedilen bu öngörünün yapılabilmesi için, çamaşır makinesinin çalışma aşamasının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle modellenmesi fikri doğmuştur.

Çalışma kapsamında ilk olarak literatür araştırması yapılmış ve literatürde birçok çamaşır makinesi sayısal modeline rastlanmıştır. Ancak bu modellerin bir çoğu çoklu kütle dinamiği (multibody dynamics) ile modellenmiş sistemler olup, bütünü oluşturan parçaların ilişkisi tekil noktalar üzerinden verilmiştir. Bu model sistemin salınım karakteristiğini tayin ederken başarılı olsa da parçalar arası temas ilişkisi için yeterli değildir. Parçalar arası temasın tanımlandığı modeller ise zamandan bağımsız olarak çözülmüştür. Bu durum çamaşır makinesindeki sönüm elemanlarının etkisinin yok sayılması demektir. Ayrıca araştırma kapsamında rulman modellemesi için kullanılan yöntemler incelenmiş, çamaşır makinesi modelinde kullanılabilecek basit sistemler üzerine durulmuştur. Son olarak fiber katkılı malzemeler ve fiber yönelimine göre değişen malzeme özellikleri incelenerek olası malzeme ve tasarım değişiklikleri için fikir vermesi sağlanmıştır.

Yapılan araştırma sonunda oluşturulan modelde, çamaşır makinesinin sıkma aşaması zamana bağlı olarak modellenmiştir. Modelde: mil, rulmanlar, kazan, tambur gibi yapısal elemanlar ağ örgüsü oluşturularak modellenirken, beton blok ve motor gibi taşıyıcı özelliği olmayan elemanlar noktasal kütle olarak sisteme dahil edilmiştir. Çamaşır makinesi dış gövdesi modellenmemiş ve kazanı taşıyan yay ve damperlerin ucunda yer değiştirme sıfır olarak tanımlanmıştır. Sıkma sırasında çamaşırın tambur yüzeyinde birikmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvveti, tambur yüzeyine zamana bağlı olarak etkilmiştir. Son olarak, motor kayışından kaynaklanan kuvvetler mil yüzeyine etkililerek sistem çözüm için hazır hale getirilmiştir. Elde edilen yer değiştirme sonuçları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve tutarlı olduğu görülmüştür. Modelin kullanılabilir olduğu kabulü ile sistem üzerinde değişimi öngörülen bölgeler için zamana bağlı gerilme değişimleri incelenmiştir.

Sonraki aşamada, tasarım değişikliği öngörülen burç ve temasta olduğu parçalar için imalat analizleri yapılmıştır. Öncelikle burç ile sıkı geçme temas durumundaki

rulmanlar için yüzey basınçları incelenmiştir. Daha sonrasında burç ile temasta olan diğer parça, kazan için, plastik enjeksiyonla imalatı modellenmiştir. Kazanın burç ile temas durumu incelendiği için, modeli sadeleştirmek adına, gerekli sınır koşulları verilerek kazanın yalnızca merkez kısmı için imalat modellemesi yapılmıştır. Bu aşamada, çevrimi oluşturan fazlar ve süreleri, giriş parametreleri, malzeme özellikleri ve çözüm yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda kalıp dolma süresi, zamana bağlı soğuma davranışı, kalıptan çıktıktan sonra çarpılma durumu gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Çamaşır sıkma ve imalat analizlerinden elde edilen bilgiler ile rulman bölgesi için iki yeni tasarım önerisi sunulmuştur. Sunulan bu öneriler yine benzer analizler ile çalışma ve imal edilebilirlik yönünden incelenmiştir.

İlk tasarım önerisinde dökme demir ile imalat edilmiş burç yerine imalatı nispeten daha kolay üç parçalı burç kullanılmıştır. Bu parçalar temini kolay standart parçalar üzerinde yapılan basit talaş kaldırma işlemleriyle elde edilebilecek çelik parçalardır. Yeni tasarımda burç malzemesi ve cidar kalınlığı değiştiği için rulmanlar temasında oluşan yüzey basınçları tekrar incelenmiştir.

İkinci tasarım önerisinde ilk modelin iyi yanları korunmuş, sorunlu kısımlarda ise değişikliğe gidilmiştir. İlk modelde burcu oluşturan üç metal parçadan ikisi bu tasarım için de kullanılmıştır. Bu modelde rulmanlar ile temastaki iki metal parçayı birbirine bağlamak için plastik enjeksiyon kullanılmıştır. Bu iki parçanın insert olarak yerleştirildikleri kalıba fiber katkılı PA enjeksiyonu ile yeni burç montaj için hazır hale gelmektedir. Önceki durumlarda olduğu gibi, ikinci tasarım için sıkma aşaması sayısal olarak modellenmiş ve kazan ile tambur arasındaki boşluk değerlerinin mevcut tasarımdaki değerlerle oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Aynı durum, gerilme bakımında kritik olarak kabul edilen mil ve rulman bölgeleri için de geçerlidir. Rulmanların temasta oldukları parçalar birinci model önerisindekiler ile aynı oldukları için yüzey basınçları bu değerler kullanılmıştır. İmalat analizleri kısmında plastik enjeksiyon analizleri iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada iki metal standart parçanın insert olarak kullanıldığı plastik enjeksiyonda fiber katkılı PA kullanılarak burcun imalatı modellenmiştir. İkinci aşamada, burcun insert olarak yer aldığı, kazanın plastik enjeksiyon ile imalat modellemesi yapılmıştır. PA fiber içeren bir malzeme olduğu için, imalat sırasında oluşan fiber yönelimi, yöne bağlı malzeme özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Fiber yönelimine bağlı olan ısı genleşme katsayısı ve elastisite modülü gibi değerler, parçanın soğuması sırasında çarpılma ve çalışması sırasında birim şekil değişimi gibi parametrelerde etkin rol oynamaktadır. Bu nedenle, malzeme içindeki fiberlerin davranışı da modele dahil edilmiştir. Akışkan içerisindeki fiberlerin davranışını öngören Folgar – Tucker modelinden kısaca söz edilmiştir. Model için besleme noktası ve kaburga sistemi değiştirilerek malzeme yönelimi kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, parçanın imalat sırasında zamana bağlı sıcaklık değerleri ve kalıptan çıktıktan sonraki çarpılma değerleri incelenmiştir. Kazanın imalat analizlerinde, PA burcun insert olarak kullanıldığı model için soğuma dağılımının daha dengeli olduğu görülmüştür.

Bu model dahilinde sistemde ve bazı seçilen parçalarda: yer değiştirme, gerilme, rulman temas basınçları, kalıp dolma süreleri, enjeksiyon malzemesi soğuma hızları ve kazanın imalat sonrasında çarpılması gibi durumlar incelenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda bir rulman bölgesi için iki yeni tasarım önerisi sunulmuş ve bu önerilerin avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir.

Tez çalışmasının sonucunda, testlerle tutarlı bir çamaşır makinesinin sıkma aşaması sayısal modeli elde edilmiştir. Sistemde yapılması düşünülen değişikliklerin öncelikle bu model dahilinde denenerek tasarım aşamasında yapılabilecek hatalar azaltılabilir. Bu sayede zaman, emek ve para kaybı önlenebilecektir. Ayrıca tasarım değişikliği öngörülen bir bölge için yapılan imalat analizleri ise, farklı bölgelerin tasarım değişikliği için kullanılabilecek örnek bir yöntem içermektedir.

DYNAMIC MODEL OF A FRONT LOADING WASHING MACHINE

SUMMARY

Home appliance industry has become more competitive than ever in recent years because of the technological development. Production expenditures are reduced with the new manufacturing systems and advancement in material science. Thus, consumers can purchase these goods cheaper than it was before. Balance between production cost and price competition, decreases company profits. This situation forces companies to reduce manufacturing costs even more by keeping their production system up to date and modifying poor part designs. To accomplish this goal, the current system should be examined to determine possible improvements and simplifications.

The main objective of this thesis is creating a front loading washing machine model in order to examine and predict several poorly-designed-locations and improvable sections. The washing machine model is built by using Finite Element Method, because it is cheap, easy to create and less time consuming than other evaluation systems. Using numerical method also allows analyzing different designs by making a few extra changes.

First, a literature is study carried out to review any standards or related studies for creating numerical model. Although there are many studies, which contain numerical model and test system couples, there are a few standards related to washing machine modelling and testing process. During the spin phase non-fixed clothes pushed away from the rotation axis by the centrifugal effect. These standards specifies some norms about modelling unbalanced clothes. According to norms, unbalanced textile can be modelled as a sheet metal fixed to the inner surface of drum. Its mass and dimensions varies depending on washing machine type and loading capacity. The studies related to washing machine modelling mostly base on multibody dynamics, thus all parts are connected other parts with singular nodes. Although this numerical modelling format is efficient to determine system oscillation characteristic, it is insufficient representing contact behavior between parts. On the other hand, better contact behaviors have released by other studies, however this type of relation between parts accomplished only in steady state solutions. Without time variable, the effect of two damper is neglected from the system. In addition, a literature study is also carried out for building a numerical model of roller bearing. Studies mostly focus on ball-race contact behavior; these bearing models are too large to integrate to another numerical models. Therefore, simplifications in bearing modelling is investigated to reduce numerical model size. Lastly, fiberglass contained polymers are examined in terms of mechanical, thermal and rheological properties for possible design and material changes.

In the thesis, a numerical model for a front loading washing machine during its spin phase is released. This model assembled by structural parts like: shaft, bearings, tub and drum. Non-load-bearing parts like: concrete blocks and motor are attached to the

system as concentrated masses. Since these parts do not carry or transmit any forces this simplification lessens total solving time for the model. As boundary conditions, two spring and two damper elements are used to fix tub at the global coordinate system. In addition, a centrifugal force, due to unbalanced mass, is applied to the drum inner surface to simulate washing machine spin phase. Normally, drum spins inside the tube and textile causes centrifugal force as unbalanced force during spin. To create an actual system like it is described, multibody dynamic procedure should be used. However, with its poor contact behavior, it would be insufficient for some components. On the other hand, building entire system with drum spin motion and contact behavior would require much more computation power. In order to simplify numerical model, forces on the drum surface spin instead of drum itself. As last boundary condition, engine belt forces are acted at the end of shaft.

After solving numerical problem, displacement results at certain locations are compared with experimental results, and it is observed that these two results collected from different models are similar. This similarity between two results proves that numerical model is accurate enough to be used in future work. In addition, stress results are examined in numerical model for predict future changes. While screening spin results, generally focused on bearing and bush region.

At the next stage, manufacturing analysis is carried out for bush and component related to it. Firstly, contact pressure between bearing races and related components. Although contact surfaces have similar tolerance clearances, surface pressures also depend on part geometry and material. After that, a thermo plastic injection molding model is built to simulate the contact behavior between bush and tube during injection molding and afterwards. There have been some simplifications at injection molding model of tub. Since these analyses conducted to study and examine the contact area, tub geometry reduced to a local geometry by applying proper boundary conditions. After tub model built, plastic injection molding analysis is performed 4 phases. These phases are: Fill, the phase that polymer fills cavity. Pack, which is material continues to fill cavity slowly to prevent shrinkage. Cool, the phase that temperature of the polymer reduces. Warp, the phase that product deforms at ejected from cavity. In addition, material viscosity calculation models are discussed to use in cavity fill phase.

Two new models have been suggested in order to reduce production costs and manufacturing by taking consideration of spin phase analysis results and thermoplastic injection molding analysis results. These new models are also tested for spin phase and manufacturability.

In the first model, bush divided into three separate parts to assemble from more standardized and easy-to-manufacture components. These three parts can be produced by applying machining operations on standard steel parts. Contact surface pressure that occurs in bearing – bush interaction are recalculated since bush design and material has changed. Considering spin phase results at current model and first model suggestion, it is observed that displacement at the control location (between drum and tub) and stress distribution at bearing-area-parts are almost identical. Then, plastic injection molding analysis is carried out for certain section of tub. Center of the tub geometry has changed with the new design of bush. These changes cause cooling problems during plastics injection cooling phase because of its thick material regions at the center of the tub. In addition, first bush suggestion requires extra surface

tolerances at the contact surfaces of three busher components for reliable assembling, and this increases manufacturing cost and time.

For the second model, while strong sides of first model conserving, weak sides are modified for improvements. Two metal components of the first busher design are kept, and one in the middle is replaced with polymer part. After two metal component are shaped to their final form by machining process, they are used as inserts in thermoplastic injection molding to manufacture second busher model. As fill material, fiber reinforced polyamide is used in injection molding. First, a numerical spin phase model is established for the second design, and considering this model, displacement results between tub and drum are almost same in current model and second model suggestion. For the stress distribution, similar results applies for bearing and shaft region. Contact region pressure are identical with the first model suggestion, since surrounding component are the same for bearing races. Manufacturing analysis are conducted in two steps as thermoplastic injection molding of busher with fiber reinforced PA material and thermoplastic injection molding of tub with PP material. For the first step, two metal busher component is placed in cavity as inserts to simulate molding with PA material. Fiber reinforced PA shows different mechanical and thermal properties like; thermal expansion coefficient and modulus of elasticity, based on its fiber orientation. By controlling fiber orientation, modulus of elasticity can be increase in desired direction, thus busher can be more stiff in certain directions. Similar to this, by controlling fiber orientation, thermal expansion coefficient can be controlled, thus large warpage values can be prevented. The fiber orientation of the part defined by the fill phase of the plastic injection molding. Folgar – Tucker is used to predict fiber motion in molten polymer during fill phase and determine fiber orientation after it solidified. In addition, these material properties are controlled and reoriented by changing rib placement on the busher. In addition, second model suggestion promises better cooling results with the help of increased total surface area. The changes in busher design also favor cooling rates during tub injection molding because of its rib placement and total busher – tub contact area.

In this study, washing machine spin phase model and several manufacturing model are built in order to examine displacement and stress results for the system during spin and cavity fill time, cooling time and warpage results for certain parts during thermoplastic injection molding. Considering these results, two model suggestion are given in this study, then tested for spin phase and manufacturability. Lastly, all there models are evaluated for strong and weak sides in terms of analysis results.

As a result, a numerical model is established for a front loading washing machine. This system can be used for predict possible improvable regions and inspire future work. With the help of this model, system modifications can be analyzed before prototyping step, and this reduces research and development expenses dramatically. In addition, a modification model is explained step by step to guide future studies.

1. GİRİŞ

Son yıllarda malzeme teknolojileri ve imalat yöntemlerindeki gelişmeler birçok makinede tasarım ve malzeme değişikliklerine olanak sağlamıştır. Özellikle beyaz eşya sanayi gibi rekabetin yoğun olduğu alanlarda firmalar yenilikçi tasarım ve imalat maliyetinin azaltılması alanlarında birbirleriyle yarışmaktadırlar. Her ne kadar yenilikçi tasarım geliştirmek firmalar için önemli olsa da asıl amaç genel olarak imalat maliyetinin düşürülmesidir. Fakat imalat maliyetleri düşürülürken belirli standartların da yerine getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca ürünün pazara çıkış süresinin rekabet dolayısıyla kısalmasıyla oluşan baskılar tasarımda hata yapma ihtimalini arttırarak, firmalar için zarar etme riski doğurmaktadır. Bunun önüne geçilebilmesi için yapılacak çalışmanın metodolojik bir şekilde planlanması ve yapılan plana titizlikle uyulması gerekmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu projede çamaşır makinalarında rulman bölgesinin yeniden tasarımı ile ürün maliyetinin azaltılması amaçlanmaktadır. Tasarım sürecinde sonlu elemanlar modeli oluşturularak sayısal çözümleme ile ideal geometri elde edilmeye çalışılacaktır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak çamaşır makinasının dinamik modeli oluşturulacaktır. Bu model sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri, deneysel değerler ile karşılaştırılacaktır. Bu modelden elde edilen şekil değiştirme ve gerilme sonuçlarına göre rulman bölgesinin yeniden tasarımı yapılacak ve sistemin farklı senaryolar için gerilme durumları incelenecektir. Son olarak ise imalat modellemesi sonucunda en uygun imalat parametreleri belirlenerek prototip imalat için hazır hale getirilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Genel olarak çamaşır makinesi ve diğer ticari ürünler için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgilerin büyük bir kısmı üretici firmalar tarafından koruma altına alındığından bu konularda yapılmış çalışmalara erişim kısıtlı olmaktadır. Çamaşır

makinasının dinamik davranışının deneysel ve teorik olarak incelenmesi Bayraktar [1] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, “Sonlu Elemanlar Yöntemi”, “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” ve “Bileşen Mod Sentezi Yöntemi” (multibody system dynamics) kullanılmıştır. Oluşturulan çamaşır makinası modeli 0-400 Hz için sınanmıştır. Öncelikle çamaşır makinesini oluşturan parçaların elastisite modülü ve yoğunluk gibi malzeme özellikleri standart deneyler ile ölçülmüştür. Daha sonrasında sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapının ilk titreşim modu hesaplanmıştır. Sonrasında deneysel düzenek ile gövde üzerinden işaretlenmiş noktalardan tahrik kuvvetine karşılık titreşim ivmesi alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda sayısal model sonuçları ile deneysel model sonuçlarının ilk mod frekansı için benzerlik gösterdiği görülmüştür. Sonraki aşamada ise monte edilecek yay ve damperlerin ölçümleri yapılmıştır. Bunun için bağlantı elemanının bir ucuna sabit genlikli yer değiştirme sinyali farklı frekanslarda uygulanırken diğer ucundan yay sabiti ölçülmüştür. Ölçümler sonucu farklı devirler için farklı yay katsayıları elde edildiği görülmüştür. Sonraki aşamada çamaşır makinesinin tüm modeli ADAMS programı kullanılarak kurulmuş ve “Bileşen mod sentezi yöntemi” kullanılmıştır. Bu yöntemde her bir bileşenin doğal frekans modları bulunarak montaj halinde genel sistem modellenmektedir. Her parça için düşük değerlerdeki frekans değerleri dikkate alındığı için modelin serbestlik derecesi azalmakta, böylece çözüm süresi ve karmaşıklığı azalmaktadır. Ardından çamaşır makinası tamburuna dengesiz yük yerleştirilerek zorlanmış titreşim ile 0-400 Hz arasında ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan değişiklikler ile çamaşır makinesi gövde grubundaki ilk doğal frekansının 26 Hz’den 71 Hz’e yükselmesi sağlanmıştır. Titreşim düzeyi ise 2.9 m/s^2 ’den 0.97 m/s^2 ’ye düşmüştür.

Wanger ve diğerleri [2] tarafından yapılan çalışmada Rayleigh Ritz Metodu hakkında bilgi verilmiş ve çamaşır makinesinin modellenmesi açıklanmıştır. Bu model ile çamaşır makinesi gibi çok bileşenli sistemlerde yapılabilecek sadeleştirmeler ve modelleme ipuçları verilmiştir. Ayrıca bu çalışma dahilinde sistem için hareket incelenmiş, yer değiştirme ve birim şekil değişimi olarak ayrıntılı ifade edilmiştir.

Benzer bir şekilde çamaşır makinasının çoklu gövde analizi ve deneysel çalışması Agnani ve diğerleri [3] tarafından yapılmıştır. İlk çalışmaya nazaran çalışmanın üzerinde durduğu öncelikli konu, gürültünün azaltılması olmuştur. Bu çalışmada devir sayısı motor titreşimleri gibi model giriş verileri deneysel çalışma sonucunda elde

edilmiştir. İlk çalışmada olduğu gibi yay ve damperlerin modellenmesinde gerekli bilgiler deneyler sonucunda belirlenmiştir. Ayrıca motor titreşimi de deneyler ile ölçülerek sisteme dışardan giriş olarak verilmiştir. İlk çalışmaya benzer olarak gruplar halinde modelleme yapılırken bu çalışmada, bileşenler rijit olarak modellenmiştir. Diğer bir deyişle: sistem yay, damper ve kütle bileşenleriyle basitçe modellenmiştir. Böylelikle çoklu gövde analizinin çözümleme süresi kısaltılmıştır. Model sonuçlarında elde edilen veriler deneysel veriler ile karşılaştırılarak modelde yay/damper bağlantı yerleri, katsayıları gibi verilerin güncellenmesi sağlanmıştır. Son aşamada sistemin doğal frekansı ve ivmelenmesi gibi değerler bulunup deneysel sonuçlarla olan yakınlığı karşılaştırılmıştır.

Namara ve diğerleri [4] ise çamaşır makinasında tekstil hareketinin dinamiği hakkında bir çalışma yapmıştır. Burada yapılan çalışma yalnızca deneysel bir çalışma olup herhangi bir matematiksel model oluşturulmamıştır. Fakat bu çalışma sonucu elde edilen deneysel sonuçlar, sayısal modelde giriş verisi olarak kullanılması gereken bazı parametrelerin belirlenmesinde yol gösterici olmuştur.

Kim ve Yoo [5] çoklu kütle analizinin temelleri hakkında bilgi vermiş, farklı sektörlerdeki farklı yapılar için örnekler ile açıklamıştır. Kütleler arasındaki bağlantı karakteristiği ile ilgili sorunlara açıklık getirmiştir. Ayrıca çamaşır makinesi ile yapılan çalışmalardan da bahsederek, makine içerisindeki çamaşırın modellenmesinin zorluğundan dolayı bu alanda yapılan çalışmaların genellikle deneysel çalışmalar olduğundan bahsetmiştir.

Mitsuishi ve Nagao [6] çamaşır makinelerinde sıkma aşamasını sonlu elemanlar ile modelleyerek sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Çamaşır makinesini modeller iken iki bölümde incelemişler ve öncelikle hareketsiz parçalar (dönmeyen) için frekans cevabı analizi yapmışlardır. İkinci olarak ise, hareketli parçalar için lineer statik yapısal gerilme analizi yapılmıştır. Bu aşamada hareketsiz parçaların temasta olduğu yüzeyler için ilk analizlerden elde edilen sonuçlar sınır koşullarını oluşturmaktadır. Çamaşırların sıkılması esnasında dengesiz yükün dengeleyicisi rolündeki su için ise hesaplanan kuvvet modele etkitilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve frekans cevabı için oldukça benzer sonuçlar elde edilirken, gerilme analizi sonuçlarının deneysel verilere göre daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise kullanılan eleman boyutu ile açıklanmıştır.

Weili ve diğeri [7] yaptıkları çalışmada çamaşır makinesinde mil ve tambur destek parçası için gerilme durumunu incelemişlerdir. Sıkma sırasındaki çamaşır ve suyun oluşturduğu dengesizlik etkisini basitleştirerek eksenden kaçık kütle olarak kabul etmişler ve bu doğrultuda hesaplar yaparak merkezkaç kuvvetini tambur destek parçasına etkitmişlerdir. Motor kayışı gibi parçaların etkisini ihmal ederek, mil için iki rulman ile desteklenecek şekilde sınır şartları vermişlerdir. Çözümlemede statik model kullandıkları için tambur destek parçasında dönme sırasında farklı açılarda oluşabilecek kuvvetleri hesaplamak için analizi farklı açılarda yükleme koşulları ile tekrarlamışlardır. Çalışma sonunda dinamik olan bir sistemi çeşitli indirgemeler ve kabuller ile modellemişlerdir.

Kurvinen ve diğeri [8] çalışmalarında bilezik ile bilya arasındaki sürtünme kuvveti ve elasto-hidrokinamik etkiyi göz ardı ederek rulman modelleri oluşturmuştur. Modellerde bilyalar üç boyutlu olarak sisteme dahil edilmiş ve bilya bilezik arasında lineer olmayan Hertz teması tanımlanmıştır. Birinci rulman modelinde merkezkaç ve jiroskopik etki göz önünde bulundurulmaz iken, ikinci modelde bu etkiler sisteme dahil edilmiştir. Sistemler farklı dönme hızlarında bilya rijitlikleri için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda 2000 devir/dak altındaki hızlarda rijitlik değerlerinin iki model için de aynı olduğu görülmüştür.

Chunjun [9] yaptığı çalışmada bilyalı rulmanların modellenmesi ve analizi ile ilgili çalışmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde eksenel yüklü bilyalı rulmanın, radyal rijitliğine etki eden faktörleri incelemiştir. Ayrıca rulmanlarda boyutların tepki kuvvetlerine etkisini incelemiştir. Bunu yaparken kontrollü deneye başvurmuş, standart bir rulman seçerek bilya boyutu, iç ve dış bilezik çapları gibi parametrelerini değiştirerek bu parametrelerin etkilerini gözlemlemiştir. Çalışmasının ikinci bölümünde ise bilyalı rulmanların farklı şekillerde modellenmesi üzerinde durmuştur. İlk olarak rulmanı herhangi bir indirme veya kabul yapmaksızın bütün olarak modellemiştir. Ardından tek bir bilya üzerine yoğunlaşarak eksenel simetriden yararlanmıştır. Bu aşamada bilya ile bilezik arasındaki temas parametrelerini değiştirerek sistemin durumunu incelemiştir. Bir sonraki adımda ise bilyaları katı olarak modellemek yerine aynı rijitlik değerlerine sahip olarak bir dizi tek boyutlu eleman ile modellemiştir. Eleman sayısını değiştirerek elde edilen sonuçları katı model ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmış, bunun sonucunda birkaç geliştirme ile efektif çalışabilen basitleştirilmiş bir rulman modeli elde etmiştir.

Molnar ve diğlerleri [10] yaptıkları çalışmada iğneli rulman tipi için inceleme yapmışlardır. Matematik modeli oluşturmada Palmgren, A; Kovalszkej, B ve EscHamann, P.'nin çalışmalarından yararlanmışlardır. Kullandıkları matematik modeller ile iğne için şekil değişimi ve rijitlik değlereri elde etmişlerdir. Daha sonrasında rulmanı sonlu elemanlar yöntemi ile 3 farklı şekilde modelleyerek sonuçları matematiksel model ile karşılaştırmışlardır. Yapılan ilk modellemede rulman olduğu gibi modellenmiş ve bilezikler ile iğneler arasına temas tanımlanmıştır. Fakat bu model için Hertz basınçlarını yeterli doğrulukta elde edebilmek için kendini güncelleyen ağ yapısı (adaptive mesh) kullanılmıştır. Fakat bu yöntem hesap süresini çok uzatmakta ve bu şekilde modellenen bir rulmanın büyük sistemlere entegre edilmesini imkansız hale getirmektedir. İkinci yapılan modelde ise rulman iğneleri iki bilezik arasında yay elemanlar olarak tanımlanmıştır. Burada eleman rijitlikleri için matematiksel modelden elde edilen değlerer kullanılmıştır. Bu yapılan modellemede işlem süresi daha kısa ve elde edilen sonuçlar tatmin edici düzeyde olmasına rağmen, modelleme ve sistem tasarımı olarak diğler yöntemlere göre daha çok zaman alan bir yöntem olarak belirlenmiştir. Son olarak ise iki bilezik arasındaki alan tamamen ağ örgüsü ile doldurulmuştur. Burada malzeme özelliğı olarak yalnızca harekete başlama esnasında direnç gösteren hiperelastik bir malzeme kullanılmıştır. Son durum modelleme açısından diğlerlerine göre daha kolay olsa da sonuçlar diğler modeller kadar iyi olmamıştır.

Kagan ve diğlerleri [11] ise cam elyafı takviyeli PET için tekrar eden yükleme altında yorulma durumunu incelemiştir. Malzemenin yorulma grafiklerini elde ederken diğler bir yandan farklı şekillerde deney numuneleri için hasar görme şekillerini de incelemektedir. Buna ek olarak plastik parça tasarımında oldukça sık kullanılan kaburga ve benzeri yapıların etkileri kısaca incelenmiştir.

Klimkeit ve diğlerleri [12] de önceki çalışmada yapıldığı gibi %30 cam elyafı takviyeli PET'in yanı sıra %35 cam elyaf takviyeli PA için yorulma karakteristiğı üzerine odaklanmıştır. Fakat bu çalışmada daha çok malzeme içindeki fiberlerin yönelimine bağılı olarak farklı yönlerde uygulanan tekrar eden yüklemeler için yorulma karakteristiğı incelenmiştir. Plastik parçaların imalatı aşamasında fiber yönelimi oldukça fazla önem arz etmektedir.

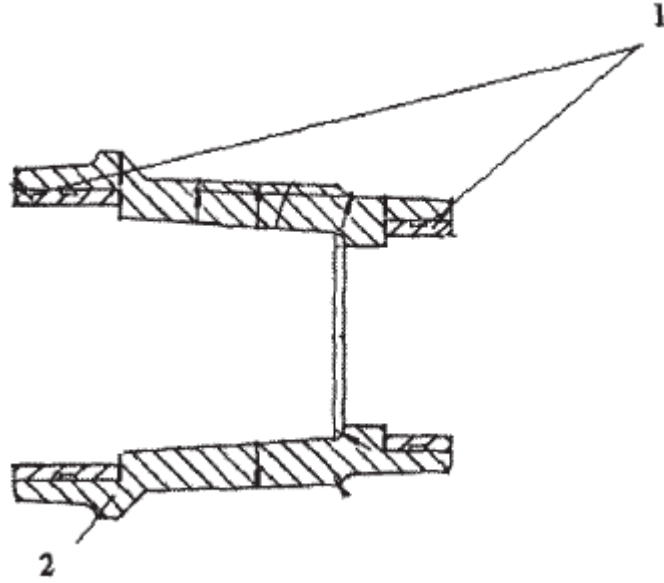
Basf Şirketi [13] yaptıkları çalışmada kısa cam fiber destekli PA6 ve PA66 malzemelerinde kısa ve uzun zamanlı ömür incelemesi yapmışlardır. Deneylerde

plastik enjeksiyon ile üretilen I profil -40°C , 23°C ve 121°C gibi farklı sıcaklık değerleri için tekrarlayan çekme kuvveti altında yorulma değeri için test edilmiştir. Ayrıca numuneler frekansı $f = 5 \text{ Hz}$ ve minimum gerilme ile maksimum gerilme oranı $R = 0,1$ olan tekrar eden yükler ile 0, 100, 500 ve 1000 saat yaşlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, yaşlandırma olmaksızın en yüksek ömür -40°C sıcaklıkta elde edilmiştir. Sıcaklığın yükselmesi ile 23°C ve 121°C 'de ömür değerlerinin ani bir şekilde düştüğü görülmüştür. Yaşlandırma olmaksızın 10^5 çevrimde yorulma ömürleri: -40°C için 53MPa, 23°C için 41MPa ve 121°C için 24MPa'dır. Ayrıca yaşlandırma uygulanan numunelerde ömür artışı gözlemlenmiştir. Yaşlandırılmış numuneler özellikle yüksek sıcaklıklarda daha büyük oranda ömür artışı sergilemektedir.

Bellenger ve diğerleri [14] polimerlerin visko-elastik davranışlarından dolayı dinamik yükler altında mekanik enerjinin ısı enerjisi dönüşmesi ve yorulma ile ilgili çalışmışlardır. Yapılan testlerde plastik enjeksiyon ile üretilen PA66 malzemeli numune, tekrar eden eğilme momenti altında zorlanmaktadır. Yapılan yorulma testinde dinamik yükleme tam değişken olup ($R = -1$), 2 Hz ve 10 Hz'lik frekanslar için uygulanmıştır. Ayrıca yapılan yükleme, birim şekil değişimi kontrollü olup, 0,0116 ve 0,0223 arasında değerler için farklı değerler için testler yürütülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda testlerin karşılaştırılması ile yükleme genliğinin artması ile parça ömründe ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, çalışma kapsamında 2 farklı frekanstaki dinamik yükleme durumu karşılaştırıldığında ise yüksek frekanslarda parçanın daha hızlı ısındığı, daha yüksek sıcaklıklar çıktığı ve yorulma dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. PA66 malzemesinin camsı geçiş sıcaklığının oda sıcaklığına yakın olmasından dolayı sıcaklık yükselmesi ile numunedeki gerilme dayanımı ve buna bağlı olarak yorulma dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Böylece polimerlerin visko-elastik davranışı ile oluşan birim şekil değişimi, sıcaklık, frekans ve ömür arasındaki ilişki hakkında bilgi verilebilmiştir.

1.3 Patent Araştırması

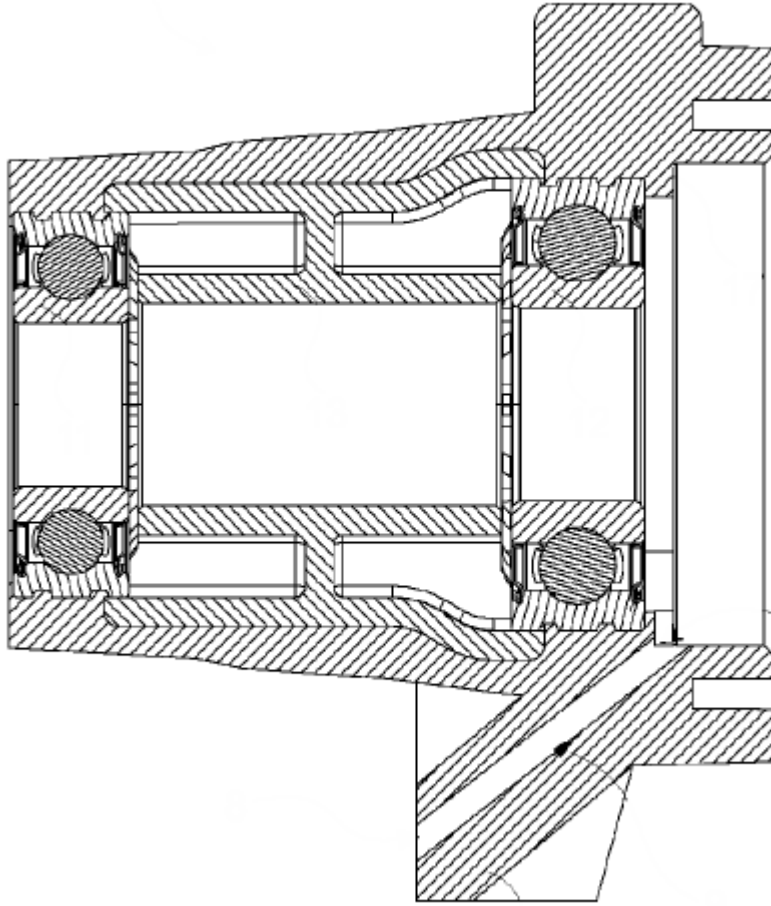
Bu bölümde proje kapsamında tasarımı yapılacak olan rulman bölgesi ile ilgili önceden alınmış patentlerle ilgili bilgi verilecektir. Marmara Patent Danışmanlık Ltd. Şti. tarafından alınan patentte [15] rulmanları kazan merkezinde sabitlemek için yekpare döküm bir burç kullanmak yerine kompozit bir yapı kullanımı öngörölmüştür. Rulmanlarla temasta olan bölgelerde iki adet metal halka kullanılırken, bu iki halkanın birbirini ile temasını sağlamak ve bağıl konumunu belirlemek için plastik malzeme kullanılmıştır. Fakat bu konulan halkalar özel yüzey işleme yöntemleri gerektirdiğı için maliyette azalmadan ziyade artışlara neden olabileceğı düşünölmektedir. Ayrıca yapılan testlerde çalışma sırasında rulman bölgesinde sıcaklığın arttığı gözlemlenmiştir. Sıcaklığın değışkenlik gösterdiği kısımlarda temas halindeki kompozit yapılarda şekil bağı kurmak gerekmektedir. Buradaki tasarımda sıcaklık değışiminin etkisiyle metal ile plastik arasındaki temasın zayıflaması söz konusu olabilir. Şekil 1.1’de ilgili patent için eskiz çizimi verilmiş olup, 1 numaralı parçalar metal rulman yataklarını, 2 numaralı parça ise burcun ana gövdesini oluşturan plastik kısmı göstermektedir.



Şekil 1.1 : Marmara Patent tarafından alınan burç patenti [15]

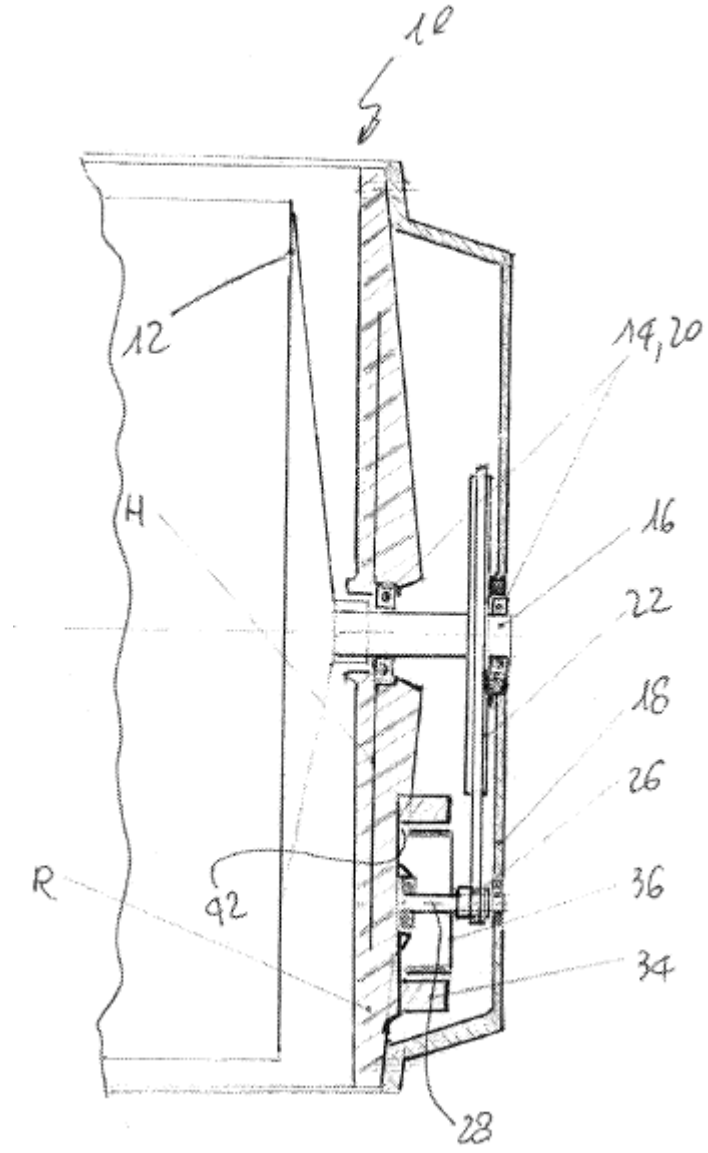
Arçelik tarafından alınan bir patentte ise [16] burç yine tek parça olarak tasarlanmıştır. Fakat kullanılan malzemeden tasarruf sağlamak için burcun içerisi boşaltılmıştır. Tasarım genel olarak H profilin bir eksen etrafında döndürölmesi ile elde edilen bir

geometriye sahiptir. Burç iki tarafındaki rulmanları birbirine göre sabitlemektedir. Fakat rulmanların plastik malzeme ile olan temasını tamamen önlememektedir. Bunun sonucunda ortaya çıkabilecek olumsuz bir etki, plastik enjeksiyon işlemi sırasında sıcaklığı artan dış bileziğin rulman içindeki yağın yapısını bozabilme ihtimalidir. Diğer bir olumsuz sayılabilecek özellik ise kullanılan rulmanlarda dış bileziklerin özel şekillere sahip olmasıdır. Bu da maliyet artışını beraberinde getirmektedir. Patentlenmiş burcun Şekil 1.2’de montaj halindeki durumu verilmiştir.



Şekil 1.2 : Arçelik tarafında alınan burç patenti [16]

Whirlpool tarafından alınan patentte [17] burç kaldırılarak rulmanların tek bir parça ile sabitlendiği tasarım değiştirilmiştir. Yeni tasarımda rulmanlar farklı parçalara sabitlenmiştir. Ayrıca tamburun tahrik edildiği kasnak, makina arkasındaki konumundan kaldırılarak iki rulman arasına konumlandırılmıştır. Bu tasarım, çamaşır makinesi genelinde bir değişiklik gerektirmektedir. Bölgesel değişiklikler için pek uygun bir tasarım değildir. Şekil 1.3’de, patent alınan geometri için eskiz çizim yer almaktadır.



Şekil 1.3 : Whirlpool tarafından alınan burç patenti [17]

2. DENEYSEL MODELİN OLUŞTURULMASI

Yapılan deneysel çalışmada çamaşır makinesinin sıkma aşaması modellenmiş ve çeşitli bölgelerden yapılan ölçümlerle davranışı incelenmiştir. Yapılacak deneylerle, tamburun kazana göre konumunun zamana bağlı değişiminin ölçülmesi amaçlanmaktadır.

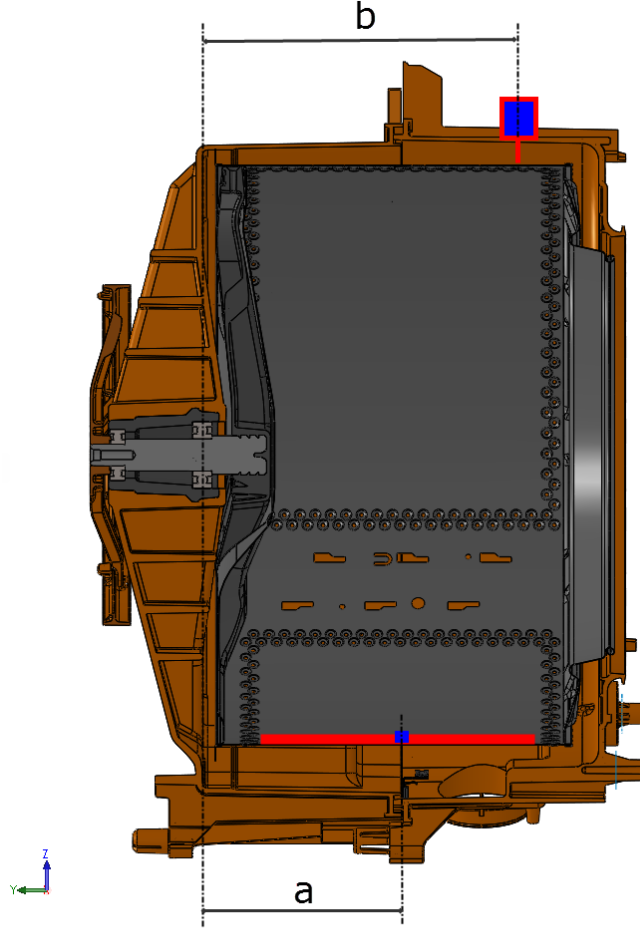
2.1 Deney Şartları

Çamaşır makinesinin sıkma programı sırasında merkezkaç etkiden olayı tambur yüzeyine kütle kuvvetleri etkimektedir. Fakat tamburun eksenel simetrik yapısı göz önüne alındığında, oluşacak kütle kuvvetleri mil üzerinde herhangi bir gerilmeye neden olmamaktadır. Fakat sıkma sırasında çamaşırların tambur yüzeyinde toplanması ile dönme ekseninden kaçık çamaşır kütlesi oluşmasına neden olmaktadır. Bu kütle, yüksek hızlarda mil üzerinde eğilme gerilmesine ve hatta kazan grubunun titreşimine neden olmaktadır. Yapılan deneylerde, bu kütle standartlaştırılmış, bilinen konum ve büyüklük değerlerinde tambur yüzeyine konumlandırılmıştır. Deneylerde dengesiz kütle olarak 1 kg ağırlığında ve 230x60 mm boyutlarında kurşun levha kullanılmıştır. Tambur yüzeyine konumlandırılan levhanın kütle merkezinin konumu, büyük rulman merkezinden eksenel yönde $a = 154 \text{ mm}$ öndedir. Dengesiz kütlenin konumu Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Çamaşır makinesi tamburunun sıkma sırasında dönme hızı 0’dan başlayıp 1100 *dev/dak*’ya kadar artmaktadır. Deneyler makine içerisinde su olmadan yapılmıştır. Ayrıca yapılan deneyler için ortam sıcaklığı 22° C’dir.

2.2 Ölçüm Cihazları ve Enstrümantasyon

Oluşturulan deney düzeneğinde yapılan testlerde tamburun salınımı gözenmek istenmektedir. Kazan, dış sac gibi hareketsiz parçaların deplasman ölçümünde ivme ölçerler kullanılabilirken tambur gibi hareketli parçaların ölçümünde temassız ölçüm cihazları gerekmektedir. Testlerde kullanılan lazer deplasman sensörler, kazan üzerine konumlandırılarak, tamburun kazana göre bağlı yer değişimini, yani kazan ile tambur arasındaki boşluğun değişimini ölçmektedir. Kazan üzerine iki parça arasındaki

boşluğu ölçen bir adet lazer deplasman sensörü bulunmaktadır. Deplasman sensörünün kazan üzerindeki konumu, büyük rulmanın merkezinden $b = 240\text{ mm}$ öndedir. Sensörün konumu Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Dengesiz kütle ve lazer deplasman sensörü konumları

2.3 Deney Sonuçları

Deneylerde çamaşır makinesi durağan halde hızlanmaya başlamakta ve 100’üncü saniyede en yüksek devir hızı olan 1100dev/dak açısal hıza ulaşmaktadır. Daha sonrasında yavaşlayarak 120’nci saniyede tekrar durağan hale gelmektedir. Bu süre içerisinde lazer deplasman sensöründen okunan en büyük değer, sistemin maksimum dönme hızına ulaştığı 100’ncü saniyede $\delta = 7,67\text{ mm}$ olarak okunmuştur. Burada okunan değer tambur ile kazan arasındaki mesafeyi değil, aralarında mesafenin ilk duruma göre ne kadar değiştiğini göstermektedir.

3. SAYISAL MODELİN OLUŞTURULMASI

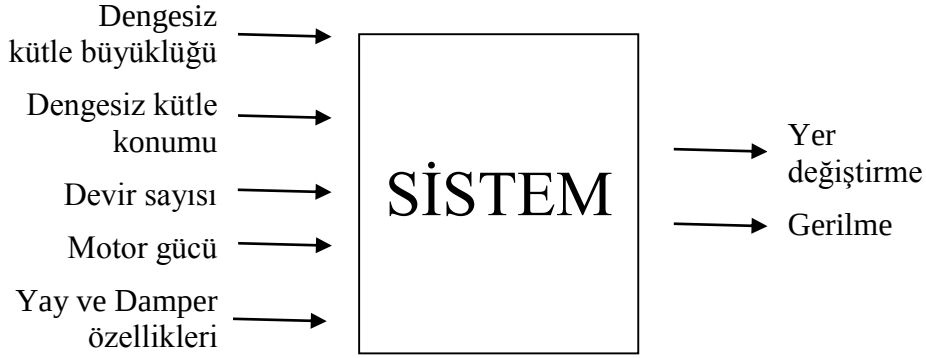
3.1 Mevcut Sistem Çalışma ve Test Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında amaçlanan tasarım ve çözüm önerilerinin mevcut durum ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu mukayese ile elde edilen sonuçların tutarlılığı hakkında bilgi sahibi olunacak, ayrıca çözüm önerilerinde farklı parametreler için iyileşme ve kötüleşme durumları sayısal olarak ifade edilebilecektir. Bosch ve Siemens Ev Aletleri Grubu (BSH) tarafından daha önce yapılan testler doğrultusunda mevcut sistem çalışma ve test parametreleri belirlenerek tarafımıza bildirilmiştir.

Testler F03 1400 kazana sahip çamaşır makinesi için yapılmış olup çamaşır makinesinin sıkma aşaması modellenmiştir. Bu aşama sırasında tambur dakikada 1100 devir ile dönmektedir. Sıkma sırasında dengesizlik yaratan çamaşırın etkisini yaratmak için tambur içine 1000 gr kütleli cisim, dönme ekseninden kaçık olarak konumlandırılmıştır. Sıkma sırasında, eksen kaçık kütle, tambur yüzeyine radyal yönde 3130 N kuvvet uygulanmaktadır.

3.2 Esas Çevre Büyüklüklerinin Tespiti

Esas çevre büyüklüklerinin belirlenmesi kısmında deney ve sayısal model için elimizde olan bilgiler giriş büyüklüklerini gösterirken, yapılan işler sonucunda elde edilmesi amaçlanan büyüklükler çıkış büyüklükleridir. Bu çalışma için giriş büyüklükleri; çamaşır makinası geometrisi, dengesiz kütlenin büyüklüğü, dengesiz kütlenin konumu, tamburun birim zamandaki devir sayısı, motor gücü, yay ve damper özellikleridir. Bu proje kapsamında elde edilmesi amaçlanan çıkış büyüklükleri ise; model genelindeki yer değiştirmeler, model genelinde gerilmeler ve seçilen bölgeler için bağıl yer değiştirmelerdir. DeneySEL düzenek için ise çıkış büyüklükleri, yine aynı bölgelerdeki bağıl yer değiştirmelerdir. Şekil 3.1’de sisteme giriş ve sistemden çıkış büyüklükleri ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 3.1 : Giriş ve çıkış parametrelerinin gösterimi

3.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi

İlk sınır şartı, çamaşır makinesi kazanının gövdeye bağlandığı noktalardadır. İki adet yay ve iki adet damper ile kazan toplam dört noktadan gövdeye sabitlenmiştir. Gövdenin rijit olduğu kabulü yapılarak bu bağlantı noktalarının üç eksen yönünde de yer değiştirmesi kısıtlanmıştır. Çamaşır makinesinde eksenel yöndeki (Şekil 3.2’de gösterilen y-ekseni) yer değiştirmeler ihmal edilerek yay ve damperler diğer iki boyuttaki yer değiştirmelere tepki verecek şekilde modellenmiştir. Böylece kazan için dört noktadan yay ve damperin izin verdiği mertebede yer değiştirmeler gerçekleşmektedir.

İkinci sınır şartı, sıkma sırasında dengesiz kütle tarafından tambura etkiyen kuvvettir. Üretici firma standartlarına göre yapılan deneylerde 1000 *gr* kütleli bir cismin 1100 *dev/dak* ile dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvvet tambura etkimektedir. Oluşturulan sayısal modelde bu kuvvet tambur yüzeyine hareketli şekilde etkilmiştir. Bunu yapmak için, birbirine ve tambur dönme eksenine dik iki kuvvet sinüs ve kosinüs fonksiyonu ile değişecek şekilde tanımlanmıştır. F_d dengesiz kütleden kaynaklanan kuvvet, ω tamburun açısal hızı, t zaman olmak üzere; birbirine dik iki kuvvetin ilişkisi Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$F_x = F_d \cdot \sin \left[\omega \cdot \frac{t}{60} \right] \quad (3.1)$$

$$F_z = F_d \cdot \cos \left[\omega \cdot \frac{t}{60} \right] \quad (3.2)$$

Tambur merkezinde, bu iki kuvvetin bileşkesi olan zamana bağlı döner kuvvet, bir boyutlu elemanlar yardımıyla tambur yüzeyine etkililmektedir.

Üçüncü sınır şartı, kayış tarafından mile etkiyen kuvvetin modellenmesidir. Kayışın iki ucundaki F_{k1} ve F_{k2} kuvvetleri Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanabilir.

$$P = (F_{k1} - F_{k2}) \cdot V \quad (3.3)$$

$$\frac{F_{k1}}{F_{k2}} = e^{\mu \cdot \beta} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte Motor gücü $P = 1000 \text{ W}$, tambur dönüş hızı $w = 1100 \text{ dev/dak}$, mile bağlı kasnak çapı $d = 265 \text{ mm}$, kasnağa temas halindeki kayış sarım açısı $\beta = 221^\circ$, sürtünme katsayısı $\mu = 0,3$ olarak alınmıştır. Elde edilen kayış kuvvetleri F_{k1} ve F_{k2} :

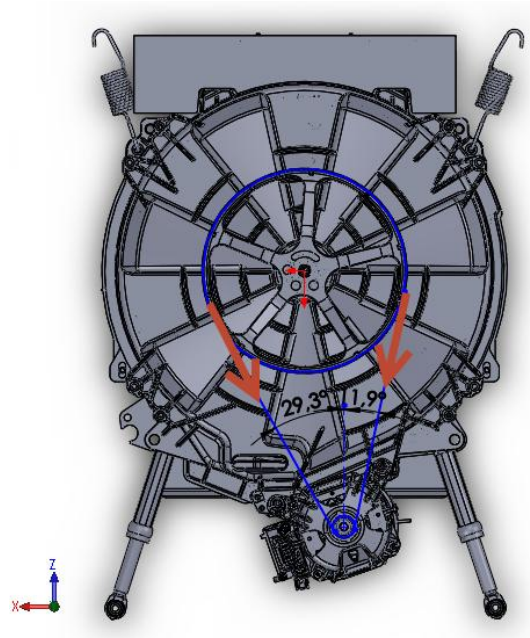
$$F_{k1} = 95,38 \text{ N}$$

$$F_{k2} = 29,86 \text{ N}$$

Şekil 3.2’de gösterilen kayış açılarını kullanarak kuvvetler global koordinat sistemine göre ifade edilirse:

$$F_{kx} = -5,82 \text{ N}$$

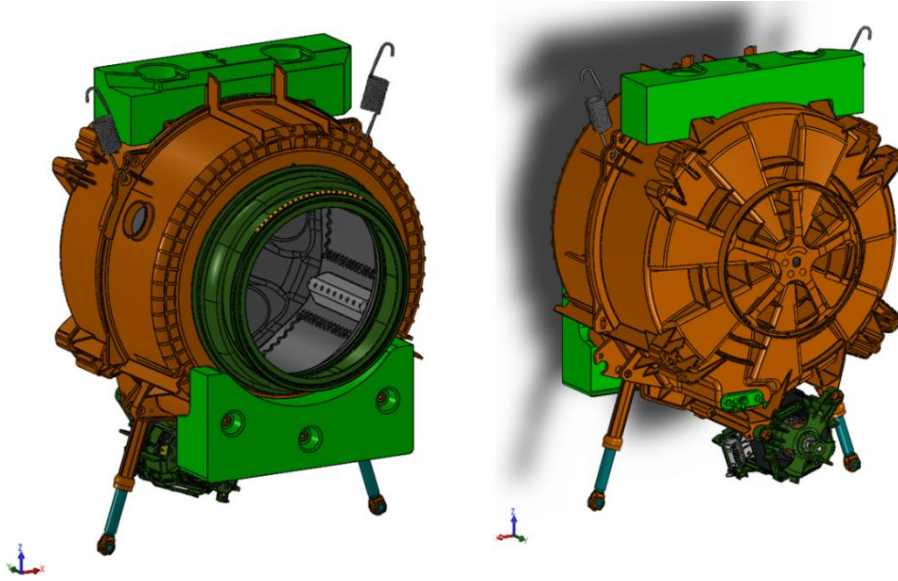
$$F_{ky} = -119,17 \text{ N}$$



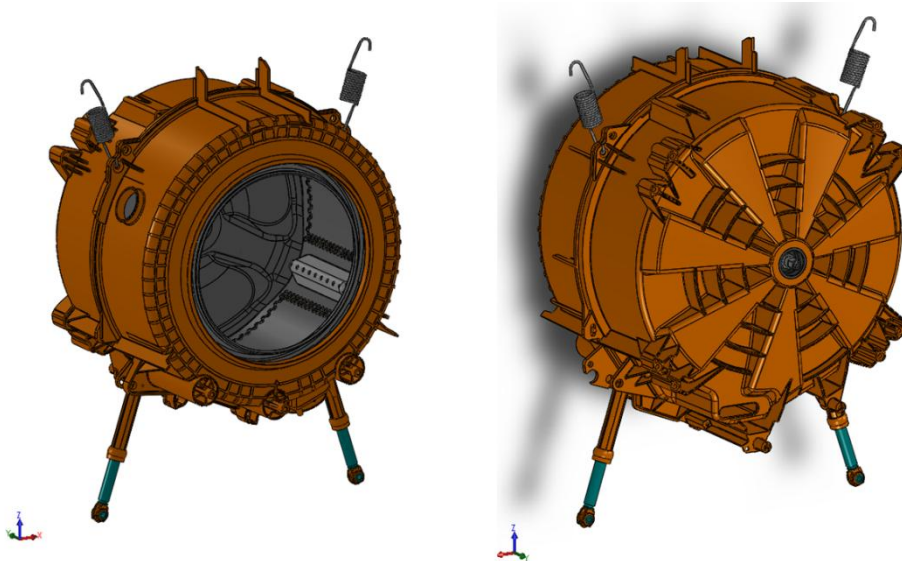
Şekil 3.2 : Motor ile tambur arasında kayış açıları

3.4 Mevcut Tasarımın Modellenmesi

Bu aşamada mevcut çamaşır makinesi üç boyutlu modeli BSH tarafından sağlanması olup, sonlu elemanlar modeli için bazı basitleştirmeler yapılmıştır. BSH tarafından gönderilen tüm model şekil 3.3’de görülmektedir. Model; motor, beton bloklar ve bazı bağlantı elemanlarından soyutlanmış ve şekil 3.4’de görülen haline getirilmiştir. Modelde; motor, beton bloklar ve bazı bağlantı elemanları noktasal kütleye indirgenmiştir. Böylece hem modelleme kolaylığı sağlanmış, hem de çözüm süresinde azalma ngrlmştr.

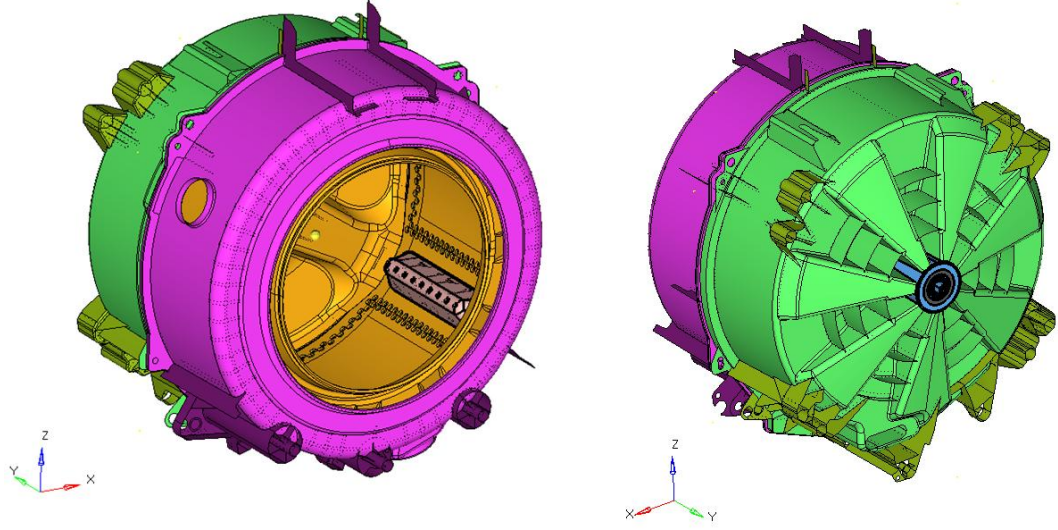


şekil 3.3 : BSH tarafından sağlanan geometri

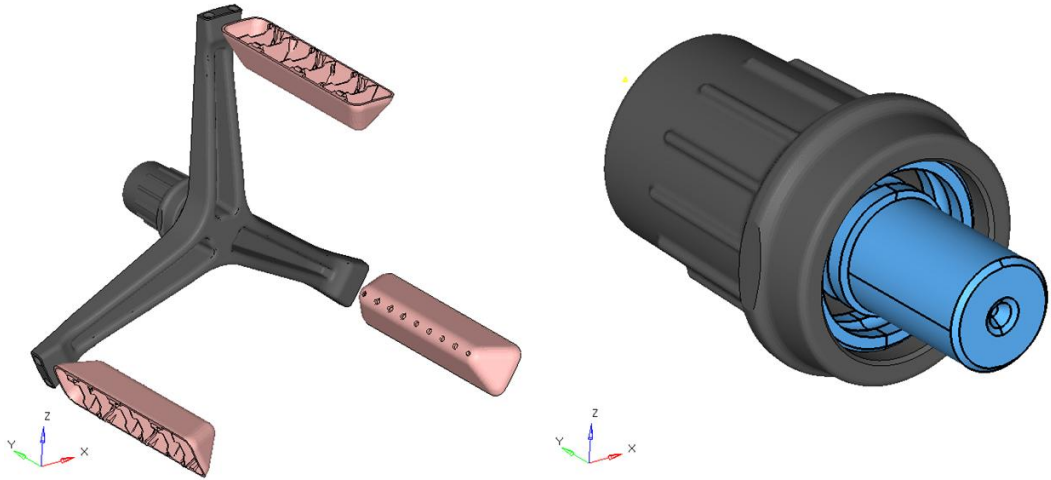


şekil 3.4 : Modelleme aşamasına esas alınacak sadeleştirilmiş geometri

Sonraki aşamada üç boyutlu geometri basitleştirilip orta düzlem haline getirilerek modellenmiştir. Böylelikle sonlu elemanlar modeli oluşturulurken kabuk eleman kullanılarak eleman sayısında azalma sağlanacaktır. Fakat bazı parçalar iki boyutlu modellemek için uygun değildir. Örneğin mil, rulmanlar ve burç gibi parçalar üç boyutlu olarak korunmuştur. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da iki boyutlu model ayrıntılı bir biçimde görünmektedir.



Şekil 3.5 : Boyut düşürülmesi sonrası modelin genel görünümü

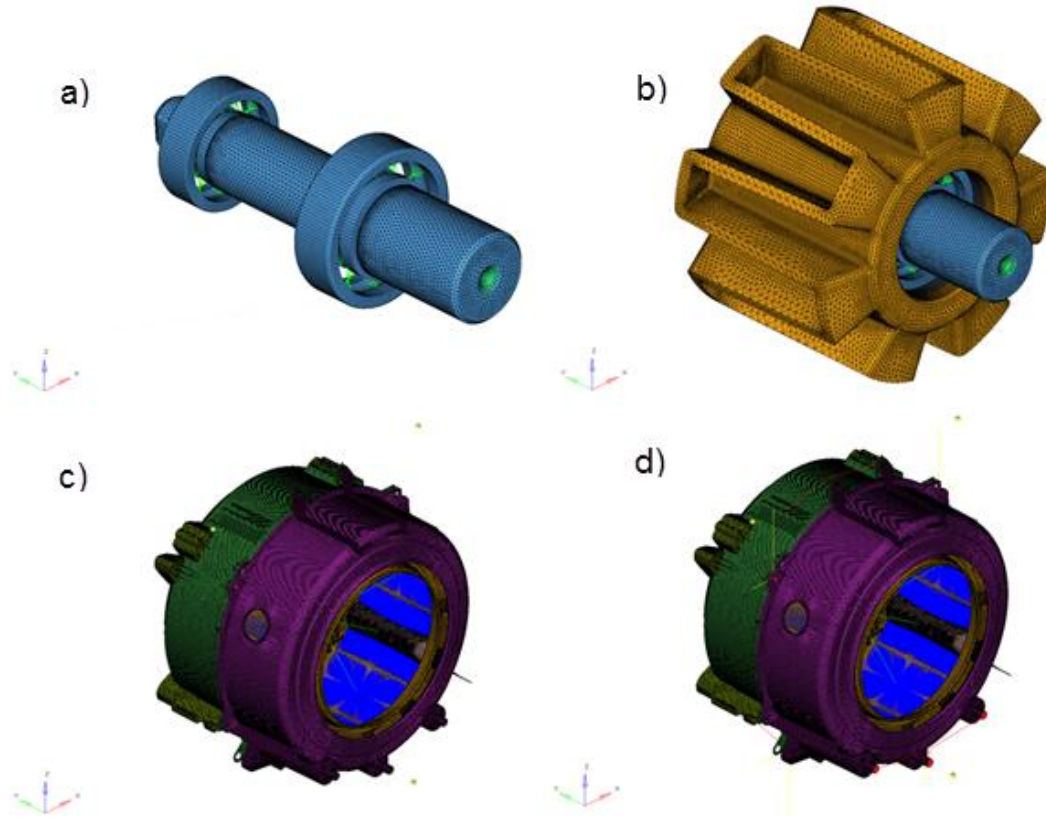


Şekil 3.6 : İki boyutlu modellenmeyerek üç boyutlu olarak bırakılan parçalar

İki boyutlu modellenen parçalar için bir kalınlık ataması yapılması gerekmektedir. Çamaşır makinesinin tamburunda kullanılan sac metal için kalınlık değeri 0,4 mm olarak belirlenmiştir. Plastik enjeksiyonla imal edilen kazan kısmı ise sabit bir kalınlığa sahip olmadığından dolayı çoğunlukla sahip olunan 4 mm değeri analizler için kullanılmıştır.

3.5 Mevcut Tasarıma Ait Sonlu Elemanlar Ağ Yapısının Oluşturulması

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında bir paket program kullanılmıştır. Aynı zamanda iki boyutlu modelin oluşturulması sırasında da ilgili programdan faydalanılmıştır. Ağ örgüsü oluşturulurken aşama aşama ilerleyip, çamaşır makinesi modelinin tümüne varılmıştır. İlk olarak Şekil 3.7.a’da görüldüğü gibi rulmanlar ile mil modellenmiş ve uygun sınır koşullarıyla analiz edilmiştir. Şekil 3.7.b’de, mil, rulmanlar, burç ve kazanın bir kısmı analize dahil edilmiştir. Şekil 3.7.c’de mevcut parçalara kazan grubu ve tambur grubu eklenerek yeni bir analiz yapılmıştır. Son olarak Şekil 3.7.d’de motor ve beton bloklar gibi çevre büyüklükleri noktasal kütle olarak eklenmiş, yay ve damper ise kazanın bağlantı noktalarını konumlandırılarak model son halini almıştır.



Şekil 3.7 : Analiz için adım adım oluşturulan modeller

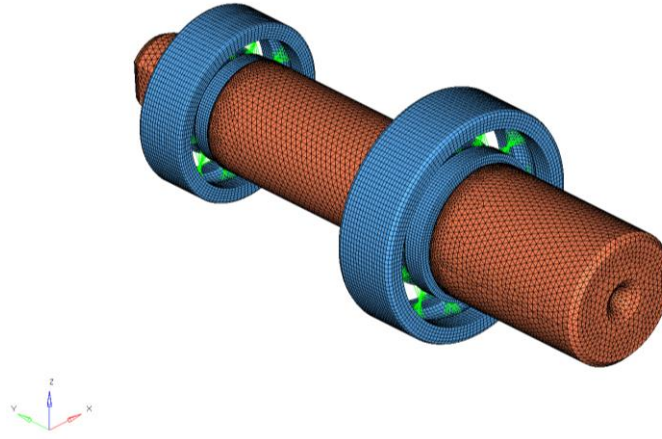
Ağ örgüsünün oluşturulması sırasında çamaşır makinesini; mil – rulman, kazan, tambur ve bağlantı bölgeleri olmak üzere 4 ana kısımda incelemek mümkündür. Tüm parçaların hangi bölüme ait olduğu ve malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Parçaların grup bilgisi ve malzeme özellikleri

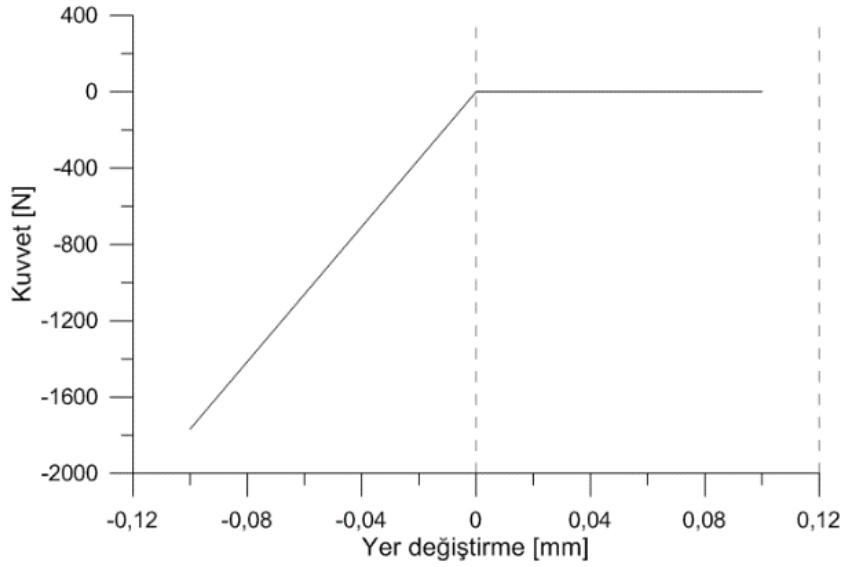
	Parça	Malzeme	Elastisite modülü [MPa]	Yoğunluk [kg/mm ³]	Isı iletim katsayısı [W/mm·C]
Mil- Rulman Grubu	Mil	Çelik	210000	$7,9 \times 10^{-6}$	0,029
	Rulman (52mm)	-	210000	$7,9 \times 10^{-6}$	0,029
	Rulman (40mm)	-	210000	$7,9 \times 10^{-6}$	0,029
Tambur Grubu	Yıldız destek	Alüminyum	69000	$2,7 \times 10^{-6}$	0,19
	Tambur	Çelik	210000	$7,9 \times 10^{-6}$	0,029
	Karıştırıcılar	PP-TV20	2700	1×10^{-6}	0,000277
Kazan Grubu	Burç	Dökme demir	90000	$7,9 \times 10^{-6}$	0,029
	Kazan (arka)	PP-TV20	2700	1×10^{-6}	0,000277
	Kazan (ön)	PP-TV20	2700	1×10^{-6}	0,000277
Bağlantı Grubu	Yay	-	-	-	-
	Damper	-	-	-	-

3.5.1 Mil – rulman grubu

Mil – rulman bölgesinin genel bir görünümü Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu bölgenin modellenmesi sırasında mil için dörtyüzlü (tetrahedra) elemanlar kullanılmıştır. Rulmanın iç ve dış bileziklerinde ise eksenel simetri sayesinde beşyüzlü üçgen prizma (triangular prism pentahedra) ve altıyüzlü (hexahedra) eleman kullanılabilmiştir. Rulman bilyalarının modellenmesi için ise bir boyutlu boşluk (gap) elemanlar kullanılmıştır. Bu boşluk elemanlar farklı konumlarda farklı rijitliğe sahiptir. Böylelikle iki rulman arasındaki bilyaların hangisinin baskı altında olup olmadığını boylarındaki değişime göre karar vererek bilezikler arasında kuvvet iletimi sağlanmakta veya sağlanamamaktadır. Boşluk elemanların bu lineer olmayan davranışı sayesinde gerçekçi bir rulman modeli yapılabilmektedir. Boşluk elemanların rijitlik davranışı örnek olarak Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : Mil – rulman grubu genel görünümü

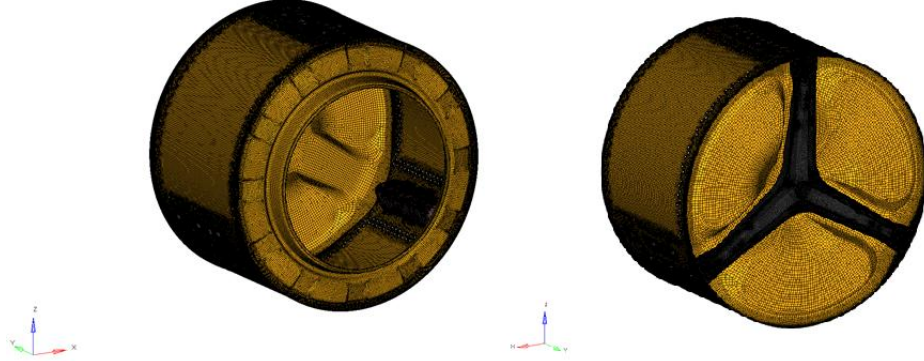


Şekil 3.9 : Boşluk eleman için örnek rijitlik grafiği

3.5.2 Tambur grubu

Tambur bölgesi genel görünümü Şekil 3.10’da verilmiştir. Tambur bölgesi üç adet 0,4 mm kalınlığında sac levhadan, destek parçası ve tam içinde yer alan 3 adet plastik karıştırıcıdan oluşmaktadır. Sac parça iki boyutlu üçgen ve dörtgen elemanlardan oluşurken, destek parçası ve karıştırıcılar dörtyüzlü elemanlar tarafından oluşturulmuştur. Sac parçalar birbirlerine şekil bağı ile bağlanmışlardır. Destek parçası ise tamburun arka kısmına kaynak ile bağlanmıştır. Bu bağlantılar için karşılıklı iki yüzeyin birlikte hareket etme şartı verilmiştir. Karıştırıcılar ise tambura sadece

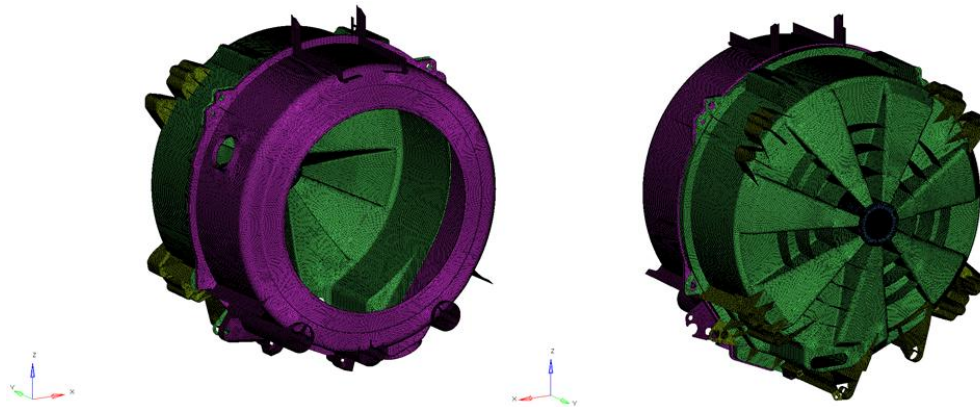
tırnakların bulunduğu yüzeylerden temasta olup, bu bölgelerde tambur yüzeyi ile birlikte edecek şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 3.10 : Tambur grubu genel görünümü

3.5.3 Kazan grubu

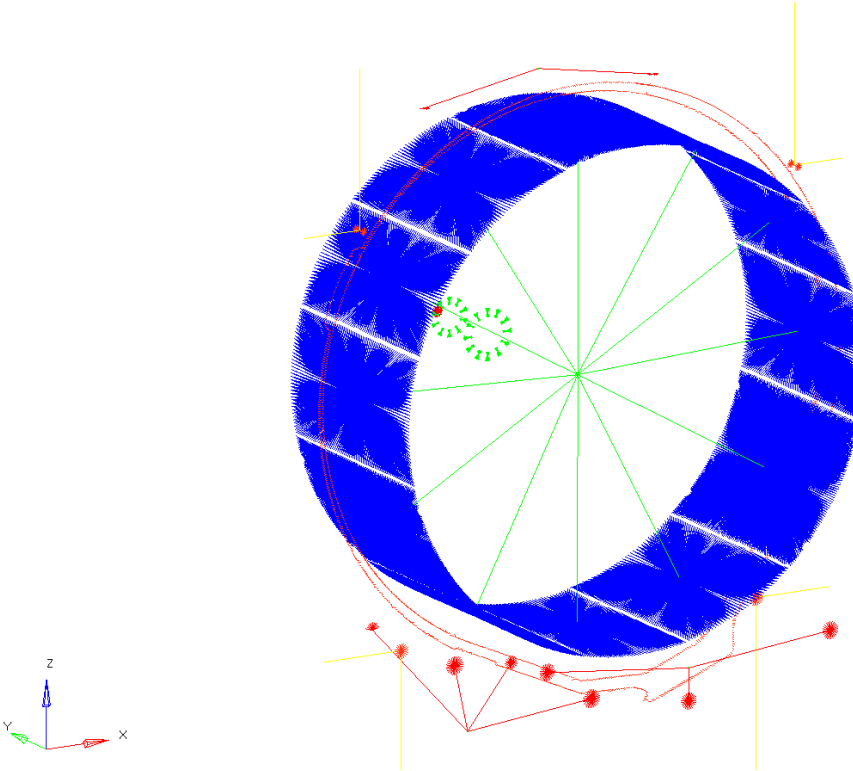
Kazan bölgesi genel görünümü Şekil 3.11’de verilmiştir. Kazan bölgesi; burç, ön ve arka kazan parçaları olmak üzere 3 parçadan oluşmaktadır. Burç, tasarım değişikliğinin yapılacağı esas bölge olduğu için eleman boyutu olabildiğince küçük tutulmaya çalışılmıştır. Bu parça dört yüzü elemanlar ile üç boyutlu olarak modellenmiştir. Burcun temasta olduğu arka kazan parçasının merkezi, temasın gerçekçi olabilmesi için üç boyutlu olarak modellenmiştir. Geri kalan kısımları çözüm süresini kısaltmak, modeli sadeleştirmek ve et kalınlığı az olan yerlerde daha iyi sonuç vermesi amacıyla iki boyutlu olarak modellenmiştir. Ön ve arka kazan parçalarının birbirine temas ettikleri kısımlar noktalar arası bir boyutlu rijit elemanlar olarak oluşturulmuştur. Böylece bağlantıdaki iki noktanın global koordinat sistemindeki hareketleri birbirlerine bağlı izafi olarak kısıtlanmıştır. Ayrıca kazan üzerinde analize etkisi olmayacak gereksiz kısımlar çıkarılarak model sadeleştirilmiştir.



Şekil 3.11 : Kazan grubu genel görünümü

3.5.4 Bağlantı grubu

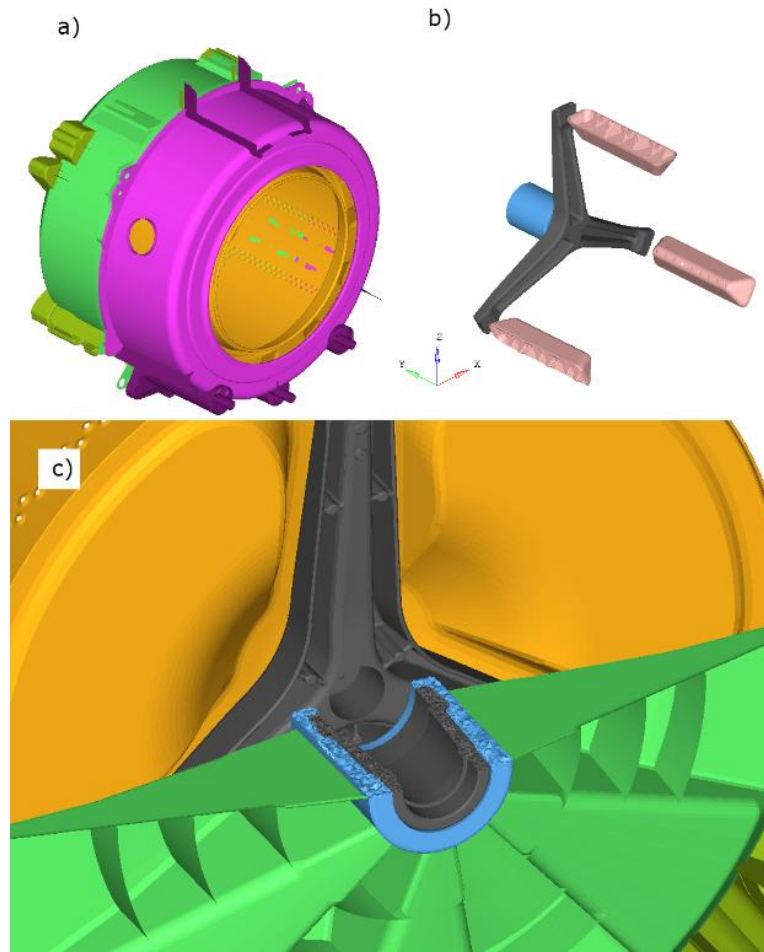
Bağlantılar, modelde birden fazla parçanın birbirine bağlanması, noktasal kütlelerin modelde sabitlenmesi, dış yüklerin modele dağıtılması gibi kısımlarda görev yaparken, aynı zamanda damper ve yay modellenmesi kısmında da kullanılmaktadır. Şekil 3.12’de görüleceği üzere kırmızı elemanlar rijit eleman olup, motor, beton bloklar gibi noktasal kütleleri kazana sabitlemekte kullanılmaktadır. Bu elemanlar kuvvet ve moment taşıyan bir boyutlu elemanlardır. Yeşil elemanlar ise boşluk elemanlar olup, mil – rulman bölümünde anlatıldığı üzere farklı boylara göre farklı rijitlik özelliği göstermektedirler ve tambur dönmeksizin yükün dönüşünü modellemek için kullanılmıştır. Merkezdeki kuvvet, tamburun açısal hızına eşit hızda doğrultu değiştirerek, dengesiz yüke eşdeğer kuvveti tamburun farklı bölgelerine etkitmektedir. Mavi elemanlar ise rijit olup boşluk elemandan gelen yükün tambura düzgün bir şekilde yayılması için kullanılmaktadır. Buna ek olarak parçaların birleştirilmesi için rijit, moment taşımayan elemanlar kullanılmıştır. Sarı renkteki elemanlar ise, kazanın çamaşır makinesi gövdesine sabitlenmesini sağlayan yay ve damper elemanları temsil etmektedir ve yay ve sönüm katsayılarını içermektedirler.



Şekil 3.12 : Bağlantı grubu genel görünümü

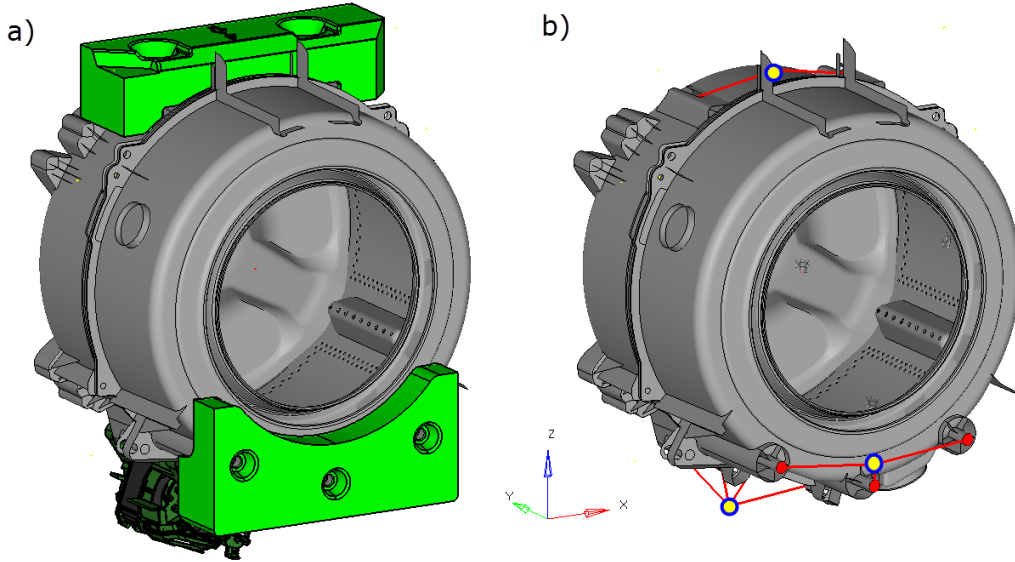
3.6 Modelde Yapılan Sadeleştirme ve Varsayımlar

Modelin oluşturulması sırasında birçok sadeleştirme yapılarak modelin daha kısa sürede yeterli doğrulukta sonuç vermesi amaçlanmıştır. Çözüm süresinin azaltılması ve yakınsama probleminin aşılması için yapılan en büyük sadeleştirme boyut indirgemesi olmuştur. Üçüncü boyutu diğer iki boyutuna göre çok daha küçük olan parçalar kabuk olarak modellenmiş ve ağ örgüsü, oluşturulan geometriye uygun olarak tanımlanmıştır. İki boyuta indirgenmiş parçalar; tambur, ön ve arka kazandan oluşmaktadır. Diğer parçalar ise üç boyutlu olarak modellenmiştir. İki boyuta indirgenen parçaların tamamına yakını kabuk olarak modellenirken daha hassas sonuç istenen ve et kalınlığının değiştiği arka kazanın burç ile temasta olduğu bölge üç boyutlu olarak modellenmiştir. Böylece bu kısımda meydana gelen büyük miktardaki gerilme değişimleri hassas olarak öngörülebilmiştir. Şekil 3.13’de iki boyuta indirgenen ve üç boyutlu olarak modellenen parçalar gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : a) İki boyuta indirgenmiş parçalar, b) üç boyutlu olarak modellenmiş parçalar, c)Arka kazanda kısmen

Diğer bir sadeleştirme, beton blokların ve motorun taşıyıcı etkisi bulunmadığı için noktasal kütle olarak modellenmesidir. Noktasal kütlelerin konumu seçilirken, indirgenen parçanın geometrik merkezi esas alınmıştır. Oluşturulan kütlelerin sisteme entegrasyonu ise, kuvvet ve moment taşıyan 1 boyutlu rijit (rbe2) elemanları ile sağlanmıştır. Oluşturulan noktasal kütlelerin yerleri ve kazana bağlanma noktaları Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.14 : Beton blok ve motor içeren model, b) noktasal kütleler içeren model

Rulman bölgesinin daha efektif modellenebilmesi için de birkaç değişiklik yapılmıştır. Rulman bilyalarının katı olarak modellenmesi daha çok eleman ve temas yüzeyi oluşturacağı için çözüm süresini ve model oluşturma süresini arttırmaktadır. Bilyaların modellenmesi için bir boyutlu elemanlar kullanılmış ve bu elemanların rijitliği ise Palmgren Modeli [10] kullanılarak belirlenmiştir. Q rulmandaki radyal basma kuvveti, L rulmanda iki bileziğin etkin uzaklığı, E_b temastaki çelik için elastisite modülünü temsil ederken, iki bileziğin bağıl yer değiştirmesi veya bir bilyadaki şekil değiştirme miktarı olan δ , Denklem 3.5 ile hesaplanabilir.

$$\delta = 1,360 \frac{1}{L^{0.8} E_b^{0.9}} Q^{0.9} \quad (3.5)$$

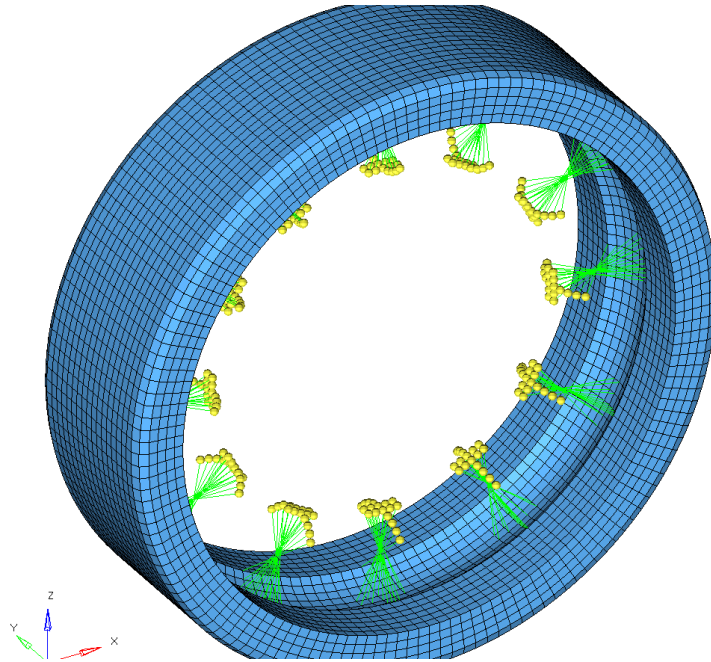
Temasta olan bilya ve bilezik için eşdeğer elastisite modülü $E_b = 109\,890 \text{ MPa}$ [10] olarak belirlenmiştir.

Sistemde kullanılan iki rulmandan daha büyük radyal yüke maruz kalan rulman, tek sıra sabit bilyalı rulmandır. Bu rulman için iki bileziğin etkin uzaklığı olan $L =$

8,65 mm'dir. Yapılan hesap sonucunda bilyadaki şekil değişimi Denklem 3.5 kullanılarak $\delta = 9,84 \times 10^{-3} \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.5'teki ifadenin türevi alınırsa, bir bilya için rijitlik değeri olan S_b , Denklem 3.6'daki gibi ifade edilebilir.

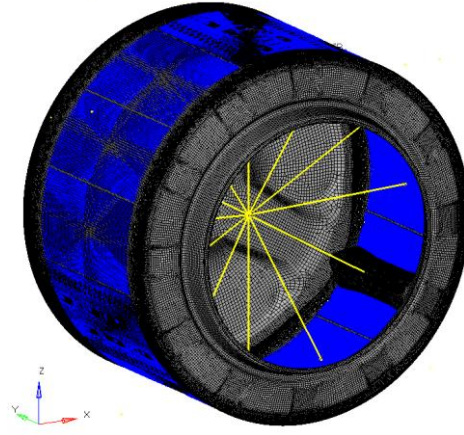
$$S_b = \frac{\partial Q}{\partial \delta} = 0,817L^{0.8}E_b^{0.9}\delta^{0.1} \quad (3.6)$$

Eşitlik sonucunda tek bir bilya için hesaplanan rijitlik değeri $S_b = 318\,046 \text{ N/mm}$ 'dır. Rulman içindeki bir bilya 18 adet bir boyutlu eleman olarak modellendiğinden dolayı her bir bilyadaki tek bir eleman için rijitlik değeri $S_e = 17669 \text{ N/mm}$ olarak belirlenmiştir. Bilyalarının bir boyutlu elemanlar ile modellenmesi Şekil 3.15'de gösterilmektedir.



Şekil 3.15 : Bir boyutlu boşluk elemanlar ve dış bilezik modeli

1000 gr kütleli dengesiz yükün 1100 dev/dak ile tambur yüzeyinde radyal yönde 3130 N kuvvet oluşturduğundan “Sınır şartları” bölümünde bahsedilmişti. Bu kuvvetin tek bir noktadan tambur yüzeyine yayılmasında boşluk elemanlar ve bağlandıkları noktaların bağıl yer değiştirmesine izin veren (rbe3) elemanlar kullanılmıştır. Tambur merkezindeki noktadan etkiyen kuvvet, aralarında 30° açı bulunan 12 boşluk eleman vasıtasıyla 12 ayrı noktaya dağıtılmıştır. Daha sonra 12 ayrı noktaya dağıtılan kuvvet rbe3 elemanlar kullanılarak tambur yüzeyine dağıtılmaktadır. Kuvvetin dağıtılması için oluşturulan bu yerleşim Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : Boşluk (sarı) ve rbe3 (mavi) elemanlar ile tambur içinde kuvvet dağılımı

Rbe3, bağlı oldukları noktaların birbirlerine göre hareketlerini kısıtlamadığı için tambur yüzeyinde rijitlik oluşmaz, dolayısıyla dengesiz kütle etkisinde tambur üzerinde meydana genel şekil değişimleri daha rahat gözlenebilir.

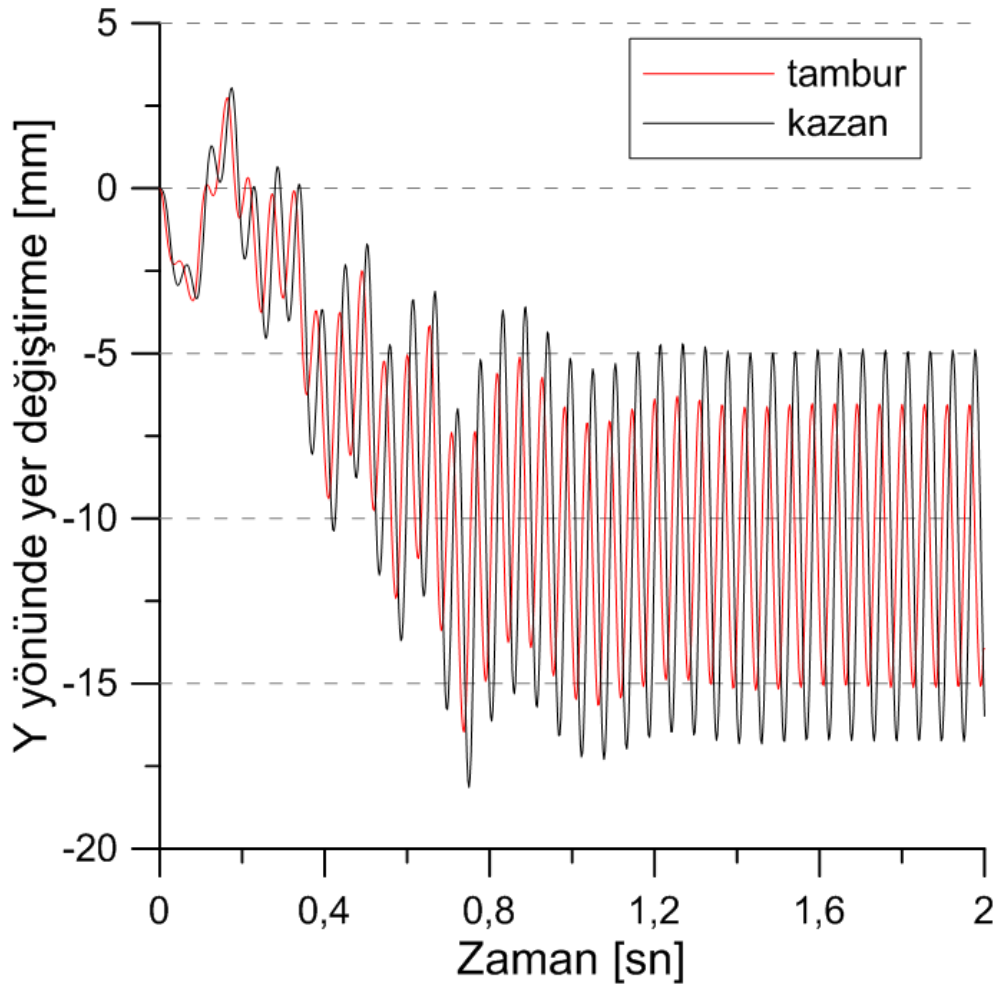
Modeli oluşturan eleman sayısı, tipleri ve en büyük eleman boyutları, her bir bölge için ayrı olarak Çizelge 3.2’de verilmiştir. Eleman boyutu seçiminde, daha hassas sonuç istenen burç ve rulman gibi bölgelerde kısmen küçük eleman boyları seçilmiştir.

Çizelge 3.2 : Parçalar için eleman sayıları ve özellikleri

Grup Adı	Parça Adı	Eleman Boyut Tipi	Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Maksimum Eleman Boyutu [mm]
Mil-Rulman Grubu	Mil	3D	tetra4	182757	7,36
	Rulman (52mm)	1D-3D	penta6-hex8-gap	29232	1,10
	Rulman (40mm)	1D-3D	penta6-hex8-gap	24642	1,10
Tambur Grubu	Yıldız destek	3D	tetra4	274442	5,08
	Tambur	2D	tria3-quad4	240621	7,82
	Karıştırıcılar	3D	tetra4	281327	5,83
Kazan Grubu	Burç	3D	tetra4	534961	3,15
	Kazan (arka)	2D-3D	tria3-quad4-tetra4	453202	4,67
	Kazan (ön)	3D	tria3-quad4	125514	4,97
Bağlantı Grubu	Yay	1D	elas		
	Damper	1D	damp		

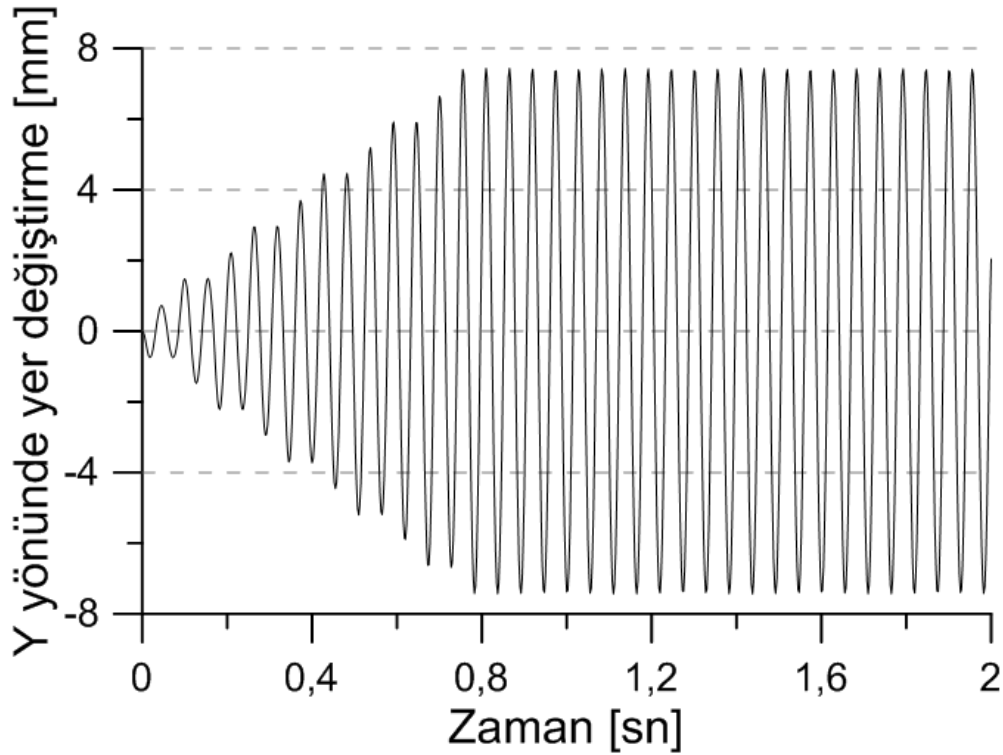
3.7 Numerik Analiz Sonuçları

“Sayısal Model” bölümünde bahsedilen model, şartlar ve kabuller kullanılarak deplasman ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Fakat elde edilen değerler global eksen takımına göre hesaplanmış sonuçlar olup, deneysel sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için kazan-tambur bağıl yer değiştirmelerin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 3.17’de, deplasman sensörü bağlanan bölge için global ekseninde elde edilen tambur(kırmızı renk ile belirtilmiş) ve kazan (siyah renk ile belirtilmiş) yer değiştirme sonuçları verilmektedir. Deneylerde tamburun, ölçüm cihazının bağlı bulunduğu kazana göre bağıl yer değişimi ölçüldüğünden dolayı sayısal modelde referans koordinat sistemi kazan üzerine yerleştirilerek tamburun bu eksene göre yer değişimi belirlenmiştir. Tamburun kazana göre izafi hareketini zamana bağlı olarak gösteren grafik Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.17 : Kazan ve tambur üzerinde seçilen noktaların zamana göre yer değişimleri

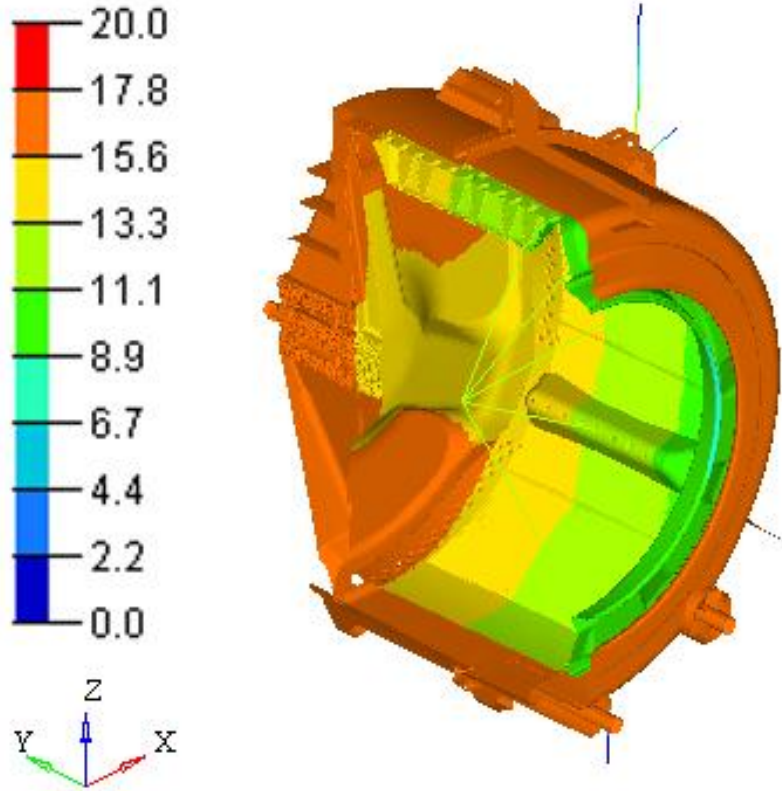
Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de görüldüğü üzere sistem 1.2’nci saniyeden sonra dengeye ulaşmaktadır. Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’te sistemin dengeye ulaştıktan sonraki bir an için yer değiştirme ve Von Mises gerilme sonuçları verilmektedir. Şekilde verilen sonuçlar, bir tam devir içerisinde en kritik an olarak seçilen 1,465’inci saniyedir. Bu an seçilirken tambur ve kazan üzerinden ölçüm yapılan iki noktanın bağıl yer değiştirmelerinin en büyük olduğu an seçilmiştir. En kritik an her devirde tekrarlanmaktadır. Örneğin 1,465’inci saniyedekine benzer sonuçlar 1,520’nci, 1,575’inci ve 1,63’üncü saniyelerde de elde edilmektedir. Ayrıca Şekil 3.20’te metal ve plastik parçalar ayrı olarak verilmiştir. Böylelikle farklı gerilme skalaları ile parça üzerindeki sonuçları daha ayrıntılı verilebilmiştir.



Şekil 3.18 : Tambur üzerinde seçilen noktanın kazan üzerinde seçilen noktaya göre zamana bağlı yer değişimi

Mil kesitinde de görüldüğü gibi gerilme değerleri tarafsız eksenin altı ve üstü için zıt yönlüdür. Bu sonuçlar dengesiz yükten dolayı beklenen sonuçlardır. Ayrıca mil için eksenel yöndeki konuma göre gerilmelerin değiştiği gözlemlenmektedir. Milin büyük rulman ile temasta olduğu bölgede gerilmeler, küçük rulman ile temasta olduğu bölgedekine nazaran daha yüksek değerlere sahiptir. Bunun nedeni ise tambur içindeki radyal yüklemeyi daha çok büyük rulmanın taşıyor olmasıdır.

Yer değiştirme [mm]



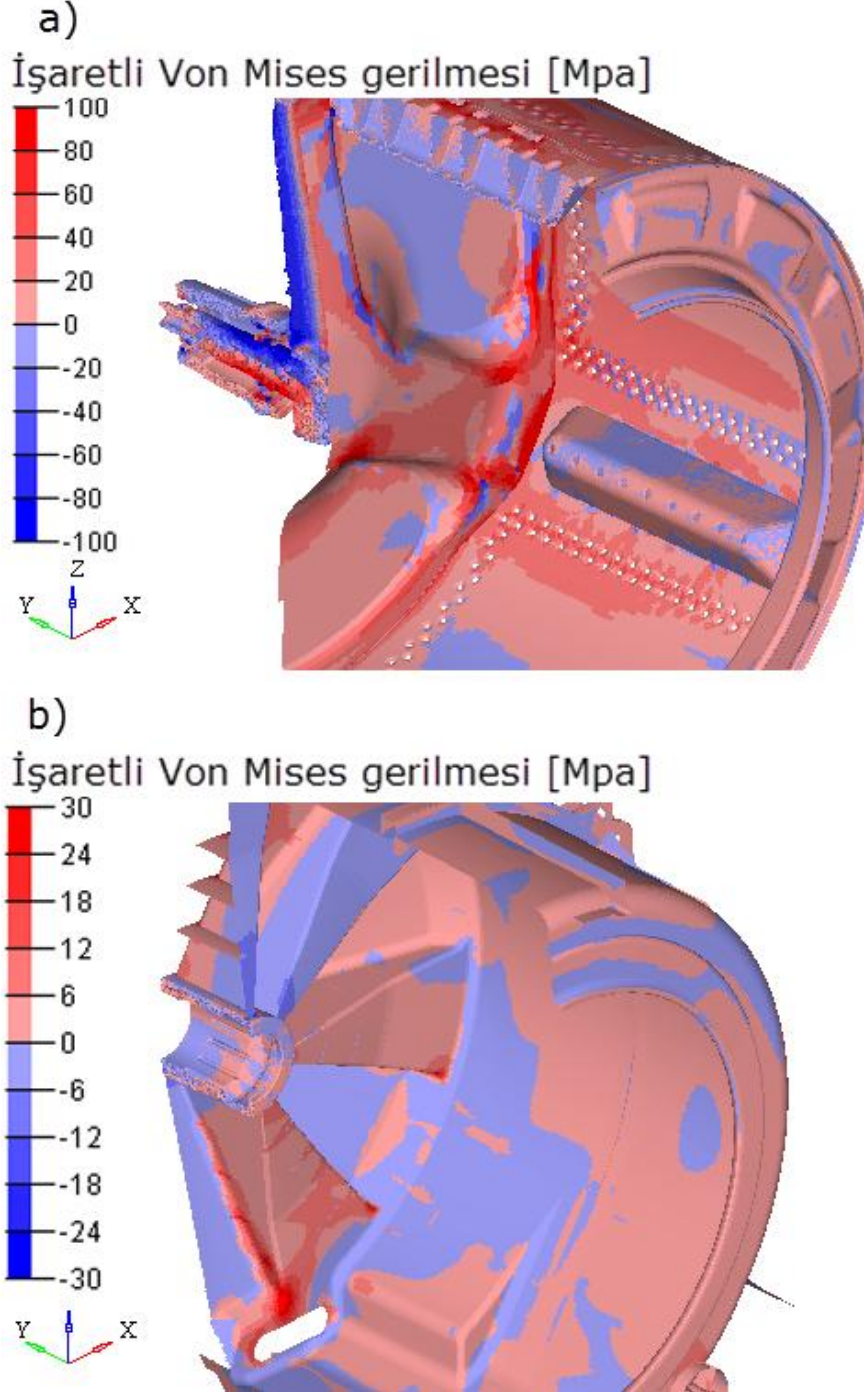
şekil 3.19 : Dinamik analiz için 1,465'nci saniyedeki deplasman sonucu

Dikkat çeken diğer bir husus ise, tambur arka sacında bazı bölgelerde gerilmelerin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğudur. Özellikle tambur arka sacının yıldız destek ile bağlantı bölgeleri ve çevresinde bu duruma rastlanmıştır. İnce sac levha ile kalın cisim kaynak çiftinde, katı cismin daha rijit olmasından dolayı sac yüzeyinde ani gerilme değişimleri olabilmektedir. Bu durum sürekli kullanım sonucunda sacda yırtılmalara neden olabilmektedir.

Kazan ile burcun temas yüzeyindeki gerilmelere bakacak olursak burç tarafındaki gerilmelerin kazan tarafındakilere göre daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bunun nedeni, burcun malzemesi olan dökme demir, kazan malzemesi PP'e göre daha yüksek elastisite modülüne sahiptir. Her iki yüzeyin de birim şekil değiştirme miktarlarının eşit olduğu göz önünde bulundurulursa, elastisite modülü daha büyük olan dökme demir burçta gerilmelerin daha yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

Sistem dengeye ulaştıktan sonra, ölçüm yapılan noktada kazan ve tambur deplasman değerleri incelendiğinde, en büyük deplasman kazan için 16,7 mm iken tambur için

15,2 mm'dir. Ancak bu salının sırasında kazan ile tambur arasında oluşan faz farkı ölçüm yapılan noktada bağıl deplasman değeri en fazla 7,44 mm değerini almaktadır. Şekil 3.17 incelendiğinde bu durum daha açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 3.20 : Dinamik analiz için 1,465'nci saniyedeki Von Mises gerilme sonucu a) metal kısımlar için b) plastik kısımlar için

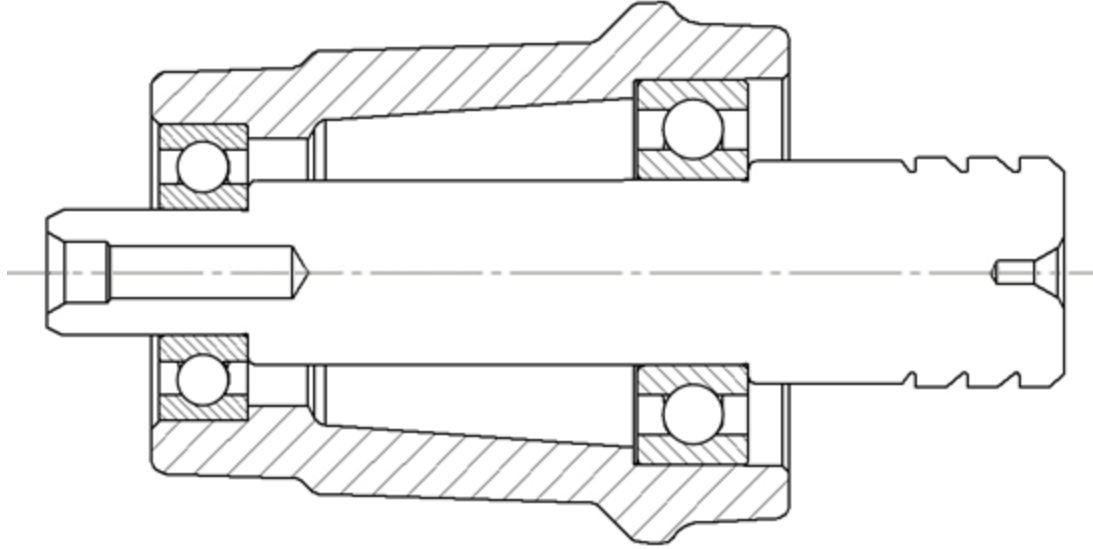
4. İMALAT ANALİZLERİ

Çamaşır makinesi dinamik modelinden elde edilen bilgiler sonucunda rulman bölgesinde bazı değişiklikler amaçlanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi yapılan tasarım değişikliğiyle yeni üretilen parça veya parçalarda sistemin genel yeterliliklerini kaybetmeden ucuzlaması ve hafiflemesi ve üretim hızının artması planlanmaktadır. Fakat rulman bölgesinde yapılan değişiklikler ile kazan bölgesi ve yakındaki benzer parçalarda değişiklik yapılmamasına özen gösterilmiştir. Bunun nedeni, yapılan modifikasyonlar kazan bölgesi imalatında değişiklik gerektirmesi durumunda yeni kalıp maliyetleri bu değişikliğin uygulanabilirliğini azaltmaktadır. Örneğin burç için yapılacak değişikliklerin halihazırda kullanılan burç geometrisi sınırlarını aşmaması amaçlanmakta, böylece kazanın plastik enjeksiyon ile üretimi sırasında insert, burç kalıp içinde değişiklik gerektirmeden konumlanabilecektir.

Mevcut tasarımda motor kayışı ile tambur arasında bulunan yüksek karbonlu C45 çeliğinden üretilmiş mil iki kademeli olarak oluşturulmuştur. Bu kademeler iki rulmanın konumunun tayin edilmesi ve sabitlenmesi için tasarlanmıştır. Milin rulmanlarla temasta olduğu iki yüzey için R6 tolerans kullanılmıştır. Mil üzerindeki bilyalar ise mil çapları 17 ve 25 mm olan derin yivli tek sıra bilyalı rulmanlarıdır. Rulmanların çamaşır makinesi ön yüzüne bakan iki alın yüzeyi arasındaki mesafe 67,5 mm'dir. Rulman genişlikleri sırasıyla 12 ve 15 mm'dir. Rulmanların dışında, dökme demir burç bulunmaktadır. Burç, karmaşık geometrisinden dolayı döküm ile üretilmiştir. Ancak, rulman ile bağlantıda olduğu yüzeylerde teması iyileştirmek ve tolerans verebilmek için talaş kaldırılmıştır. Çamaşır makinesi rulman bağlantı bölgesinde bulunan parçaların montaj hali ve birbirlerine göre konumları Şekil 4.1 ile verilmiştir. Döküm, diğer imalat yöntemlerine göre daha pahalı ve yavaş bir imalat yöntemidir. Burç üzerinde yapılacak değişikliklerle, parça imalat şeklinde veya geometrisinde farklılaşma oluşturarak kullanılan malzeme tipi ve miktarını değiştirilebilir ve maliyetlerde azalma sağlanabilir.

Bu bölümde burcun temasta olduğu parçalarla etkileşimi incelenecektir. Öncelikle rulmanlarla olan sıkı geçme bağlantısı incelenecek ve yüzey basınçları

hesaplanacaktır. Daha sonrasında mevcut tasarım için burcun temasta olduğu kazanın bir bölümünün, plastik enjeksiyon ile imalatı numerik olarak modellenecektir. Verilen imalat parametreleriyle elde edilen sonuçlar tartışılacak ve yeni tasarımlar için referans ve yol gösterici bir veri olacaktır.



Şekil 4.1 : Rulman bölgesi kesit görünümü

4.1 Rulmanlar İçin Tolerans Değerleri

Çamaşır makinesine konumlandırılan rulmanlar hem mil hem burç tarafında sıkı geçme olup, tolerans değerleri ile yüzey basınçlarının hesaplanması gerekmektedir. Böylece yapılan malzeme değişikliğinde durağan halde oluşacak yüzey gerilme değerleri daha rahat karşılaştırıla bilinecektir. Yapılan hesaplarda toleranslar için ortalama değerler yerine maksimum değerler kullanılmıştır. Bu sayede yüzeylerde oluşabilecek en yüksek basınçlar hesaplanmıştır. Rulmanda tolerans hesapları iç ve dış bilezikler için ayrı ayrı yapılmaktadır.

4.1.1 İç bilezikler için rulman yüzey basıncı hesabı

Rulmanların temasta oldukları yüzeye farklı sıkılıklarla bağlanma durumları söz konusudur. Bu bağlantının tipini belirleyen temel unsur, rulmanlarla temasta olan yüzeylerin tolerans değerleridir. Bu sıkılık ile oluşan yüzeydeki basınç değeri P_1 , Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$c_{y1} = \frac{d}{d_e} \quad (4.1)$$

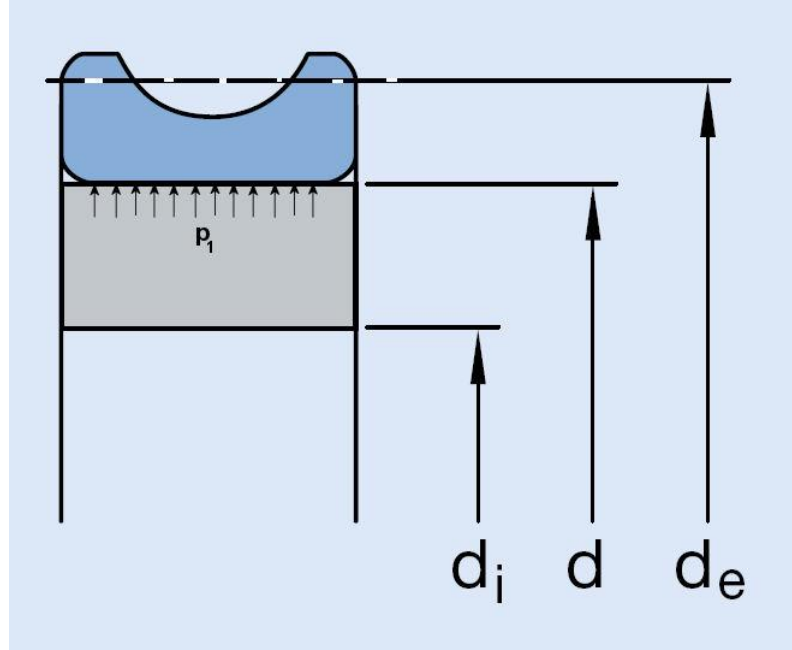
$$c_m = \frac{d_i}{d} \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta_1}{P_1} = \frac{d}{E_y} \left(\frac{1+c_{y1}^2}{1-c_{y1}^2} + V_y \right) + \frac{d}{E_m} \left(\frac{1+c_m^2}{1-c_m^2} - V_m \right) \quad (4.3)$$

Bu eşitlik aynı malzemeye sahip içi dolu mil – rulman çifti için yazılırsa:

$$\frac{\Delta_1}{P_1} = \frac{d}{E} \left(\frac{2}{1-c_{y1}^2} \right) \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde: E_y rulman iç bileziği için elastisite modülü, E_m mil için elastisite modülü, E temastaki iki yüzeyin aynı malzemeden yapılması durumunda ortak elastisite modülü, V_y rulman iç bileziği için poisson oranı, V_m mil için poisson oranı, Δ_1 temas boşluğu, P_1 yüzey basıncı, d , d_e ve d_i ise Şekil 4.2’de gösterilen rulman ve mil boyutlarını belirtmektedir.



Şekil 4.2 : Tolerans hesabı için gerekli rulman iç bilezik boyutları [18]

4.1.1.1 Küçük rulman iç bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı

Küçük rulman – mil çiftinde mil için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -17 ve -6 μm ’dir. Tek sıralı derin yivli bilyalı rulman iç bilezik için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -8 ve 0 μm ’dir. Yapılacak hesaplarda yüzeydeki maksimum gerilmenin bulunması amaçlandığı için rulman üst sınır toleransı 0 μm ile mil alt sınır toleransı -17 μm kullanılarak temas boşluğu $\Delta_1 = -17 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Bağlantıdaki rulman ve mil için kullanılan malzeme aynı (çelik) ve içi dolu mil kullanıldığı için

Denklem 4.4 kullanılabilir. Çelik için elastisite modülü $E = 210\,000\text{ MPa}$ olarak alınmıştır. Rulman boyutları için SKF Genel Rulman Kataloğu'ndan [18] yararlanılmış, boyutlar $d = 17\text{ mm}$ ve $d_e = 24,5\text{ mm}$ olarak alınmıştır.

Bu değerler ile Denklem 4.1 ve Denklem 4.4 ortak olarak çözüldüğünde mil ile küçük rulman iç bileziği arasındaki yüzey basıncı değeri $P_1 = 54,4\text{ MPa}$ olarak hesaplanır. Bulunan bu basınç değeri verilen toleranslar arasında oluşabilecek en yüksek basınç değeridir.

4.1.1.2 Büyük rulman iç bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı

Büyük rulman – mil çiftinde mil için alt ve üst tolerans değeri -20 ve $-7\text{ }\mu\text{m}$ 'dir. Tek sıralı derin yivli bilyalı rulman iç bilezik için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -10 ve $0\text{ }\mu\text{m}$ 'dir. Hesaplarda tekrar maksimum yüzey gerilmesi değeri elde edilmesi amaçlandığı için rulman üst sınır toleransı $0\text{ }\mu\text{m}$ ile mil alt sınır toleransı $-20\text{ }\mu\text{m}$ kullanılarak temas boşluğu $\Delta_1 = -20\text{ }\mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Yine küçük rulman – mil bağlantısında mevcut durumların aynısı geçerli olduğu için Denklem 4.4 ve $E = 210\,000\text{ MPa}$ kullanılabilir. Kullanılan derin yivli tek sıra bilyalı rulman için SKF Genel Rulman Kataloğu'ndan [18] okunan boyut değerleri $d = 25\text{ mm}$ ve $d_e = 34,3\text{ mm}$ 'dir.

Değerlerin Denklem 4.1 ve Denklem 4.4'te yerine konulmasıyla mil ile küçük rulman iç bileziği arasındaki yüzey basıncı değeri $P_1 = 39,4\text{ MPa}$ olarak hesaplanır.

4.1.2 Dış bilezikler için rulman yüzey basıncı hesabı

Dış bileziklerde de iç bileziklerdekine benzer bir formülasyon kullanılmaktadır. Fakat iki durum arasında küçük değişiklikleri bulunmaktadır. Dış bilezik ile burç arasında oluşan yüzey basıncı değerleri P_2 , Denklem 4.5, Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanabilir.

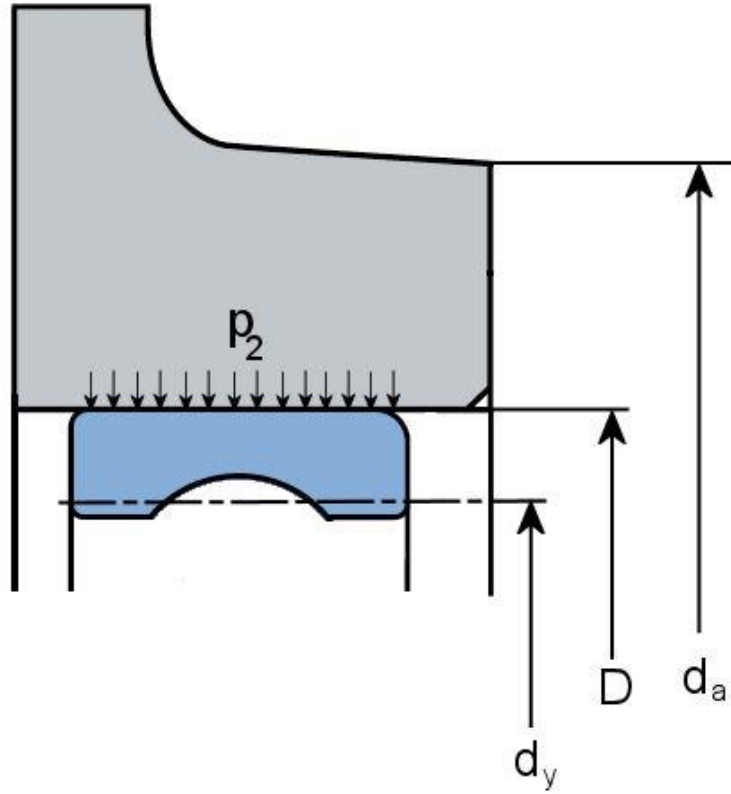
$$c_a = \frac{D}{d_a} \quad (4.5)$$

$$c_{y2} = \frac{d_y}{D} \quad (4.6)$$

$$\frac{A_2}{P_2} = \frac{D}{E_y} \left(\frac{1+c_{y2}^2}{1-c_{y2}^2} + V_y \right) + \frac{D}{E_a} \left(\frac{1+c_a^2}{1-c_a^2} - V_a \right) \quad (4.7)$$

İç bileziklerde olduğu gibi dış bileziklerde de denklemde benzer bir basitleştirme yapılabilir. Ancak bu basitleştirmenin yapılabilmesi için burcun rijit kabul edilebilir olması gerekmektedir. Burada burç rijit kabul edilemeyeceği için basınç değeri Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanacaktır.

Bu eşitliklerde: E_y rulman dış bileziği için elastisite modülü, E_a mil için elastisite modülü, V_y rulman iç bileziği için poisson oranı, V_a mil için poisson oranı, Δ_2 temas boşluğu, P_2 yüzey basıncı, D , d_a ve d_y ise Şekil 4.3’de gösterilen rulman ve mil boyutlarını belirtmektedir.



Şekil 4.3 : Tolerans hesabı için gerekli rulman dış bilezik boyutları [18]

4.1.2.1 Küçük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı

Küçük rulman – burç çiftinde burç için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -45 ve -29 μm ’dir. Kullanılan tek sıralı derin yivli bilyalı rulman iç bilezik için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -11 ve 0 μm ’dir. Bu yüzey çifti teması için rulman üst sınır toleransı 0 μm ile mil alt sınır toleransı -45 μm kullanılarak maksimum temas boşluğu $\Delta_1 = -45 \mu m$ olarak hesaplanmıştır. Rulman malzemesi olan çelik için elastisite modülü $E_y = 210\,000\,MPa$, poisson oranı $V_y = 0,3$ olarak alınmıştır. Burç malzemesi dökme demir için elastisite modülü $E_a = 88\,000\,MPa$, poisson oranı $V_a =$

0,26 olarak alınmıştır. Buradaki derin yivli tek sıra bilyalı rulman için SKF Genel Rulman Kataloğu'ndan [18] okunan boyut değerleri $D = 40 \text{ mm}$ ve $d_y = 32,7 \text{ mm}$ 'dir. Burç et kalınlığı kesit boyunca değişmektedir. Fakat küçük rulman ile temasta olduğu bölge için 7 mm 'dir. Bu değer doğrultusunda Şekil 4.3'de de görülen burç dış çapı $d_a = 54 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Bu değerler ile Denklem 4.5, Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 ortak olarak çözüldüğünde mil ile küçük rulman iç bileziği arasındaki yüzey basıncı değeri $P_2 = 9,9 \text{ MPa}$ olarak hesaplanır. Burada daha küçük tolerans değerlerine rağmen burcun dökme demir olması yüzeyde oluşan basınç değerlerini bir miktar azaltmıştır.

4.1.2.2 Büyük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı

Büyük rulman – burç çiftinde de burç için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -54 ve $-35 \text{ }\mu\text{m}$ 'dir. Kullanılan tek sıralı derin yivli bilyalı rulman iç bilezik için alt ve üst tolerans değerleri sırasıyla -13 ve $0 \text{ }\mu\text{m}$ 'dir. Maksimum temas boşluğu $\Delta_1 = -54 \text{ }\mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Tekrar, rulman malzemesi olan çelik için elastisite modülü $E_y = 210\,000 \text{ MPa}$, poisson oranı $V_y = 0,3$ olarak alınmıştır. Burç malzemesi dökme demir için elastisite modülü $E_a = 88\,000 \text{ MPa}$, poisson oranı $V_a = 0,26$ olarak alınmıştır. Buradaki derin yivli tek sıra bilyalı rulman için SKF Genel Rulman Kataloğu'ndan [18] okunan boyut değerleri $D = 52 \text{ mm}$ ve $d_y = 67,3 \text{ mm}$ 'dir. Burcun büyük rulman ile temasta olduğu bölgede cidar kalınlığı $7,6 \text{ mm}$, Şekil 4.3'de görülen burç dış çapı $d_a = 67,2 \text{ mm}$ 'dir.

Bu değerler ile Denklem 4.5, Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 ortak olarak çözüldüğünde mil ile küçük rulman iç bileziği arasındaki yüzey basıncı değeri $P_2 = 14,8 \text{ MPa}$ olarak hesaplanır. Burcun dökme demirden olması yine buradaki basınç değerini azaltıcı etki göstermiştir.

4.2 İmalat Parametreleri Belirlenmesi

Bu aşamada kazanın plastik enjeksiyon ile imalatının modellenebilmesi için gerekli parametrelerden bahsedilecektir. Bu analizin yapılmasındaki amaç, enjeksiyon sırasında parçadaki sıcaklık değişimi ve çarpılmaların incelenmesi ve yapılan tasarım değişikliklerinde bu sonuçların karşılaştırılmasıdır.

İmalat aşamasında yapılan çalışmada kazanın, termoplastik enjeksiyon ile üretilmesi modellenmiştir. Plastik enjeksiyonda Targor tarafından üretilen polipropilen (PP TV20) kullanılmıştır. Malzeme $230^{\circ} C$ 'de iken özgül ısı $C_p = 4125 \text{ J/kg} \cdot C$ ve ısı iletkenlik katsayısı $k = 0,166 \text{ W/m} \cdot C$ 'dır. Malzeme işlem sıcaklığı, yani kalıba giriş sıcaklığı $T = 230^{\circ} C$ 'dır. Bu malzeme özellikleri üretici firma tarafından yapılan testler ile belirlenmiştir. Özgül ısı ve termal iletkenlik katsayısı gibi değerler sıcaklık ile değişen değerlerdir, yukarıda verilen malzemeye ait ısı özellikler, kalıba giriş sıcaklığı için geçerli özelliklerdir. Malzemenin viskozitesinin hesaplanmasında Williams-Landel-Ferry Modeli [20] kullanılmıştır. Bu model genellikle akışkan polimerler veya camsı geçiş sıcaklığı bulunan akışkanlar için kullanılmaktadır. Viskozite, sıcaklık, kayma hızı ve basınç arasındaki ilişki Denklem 4.8 ile verilmiştir.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (4.8)$$

Bu denklemde: Malzeme için viskozite η , kayma hızının sıfır iken viskozite değeri η_0 , kayma hızı $\dot{\gamma}$, kayma incelmeleri sırasında kritik gerilme $\tau^* = 24500 \text{ Pa}$ ve yüksek kayma hızında eğri türetme ile elde edilen katsayı $n = 0,3126$ 'dır.

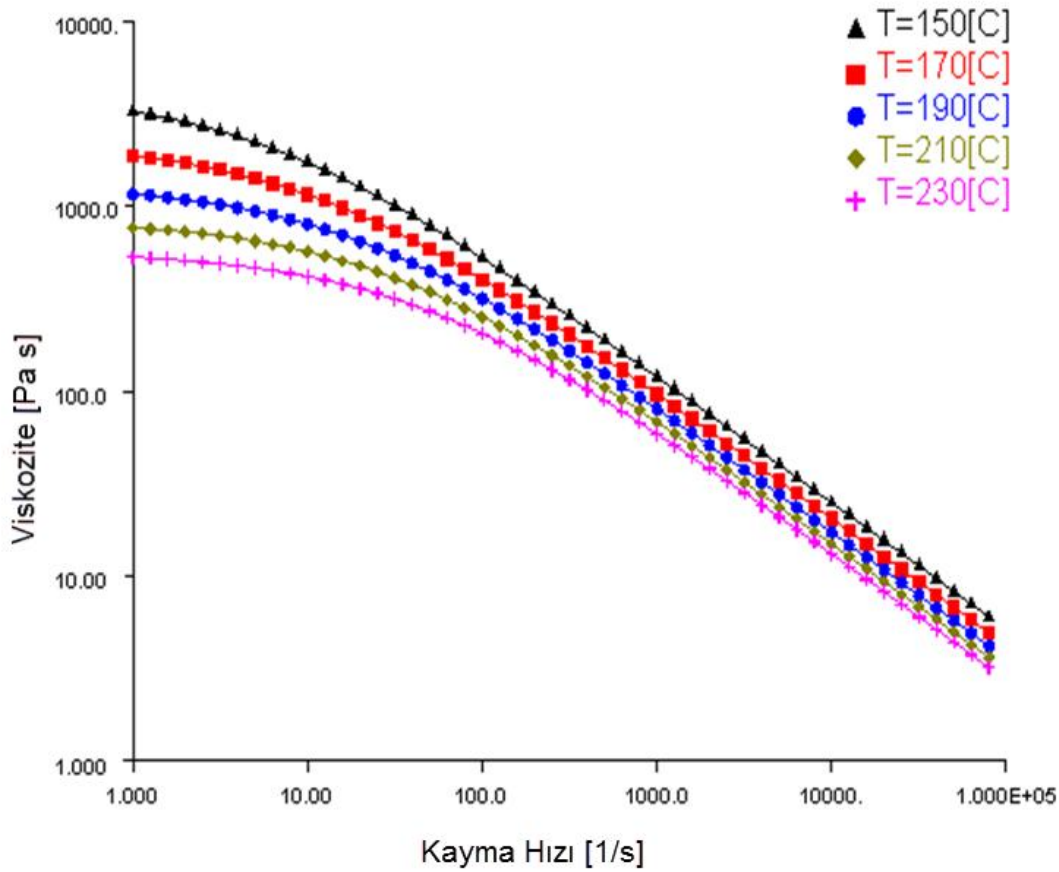
Kayma hızının sıfır olduğu durumdaki viskozite değerinin hesaplanması için Denklem 4.9, Denklem 4.10 Denklem 4.11 kullanılabilir:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)} \right] \quad (4.9)$$

$$A_2 = A_3 + D_3 p \quad (4.10)$$

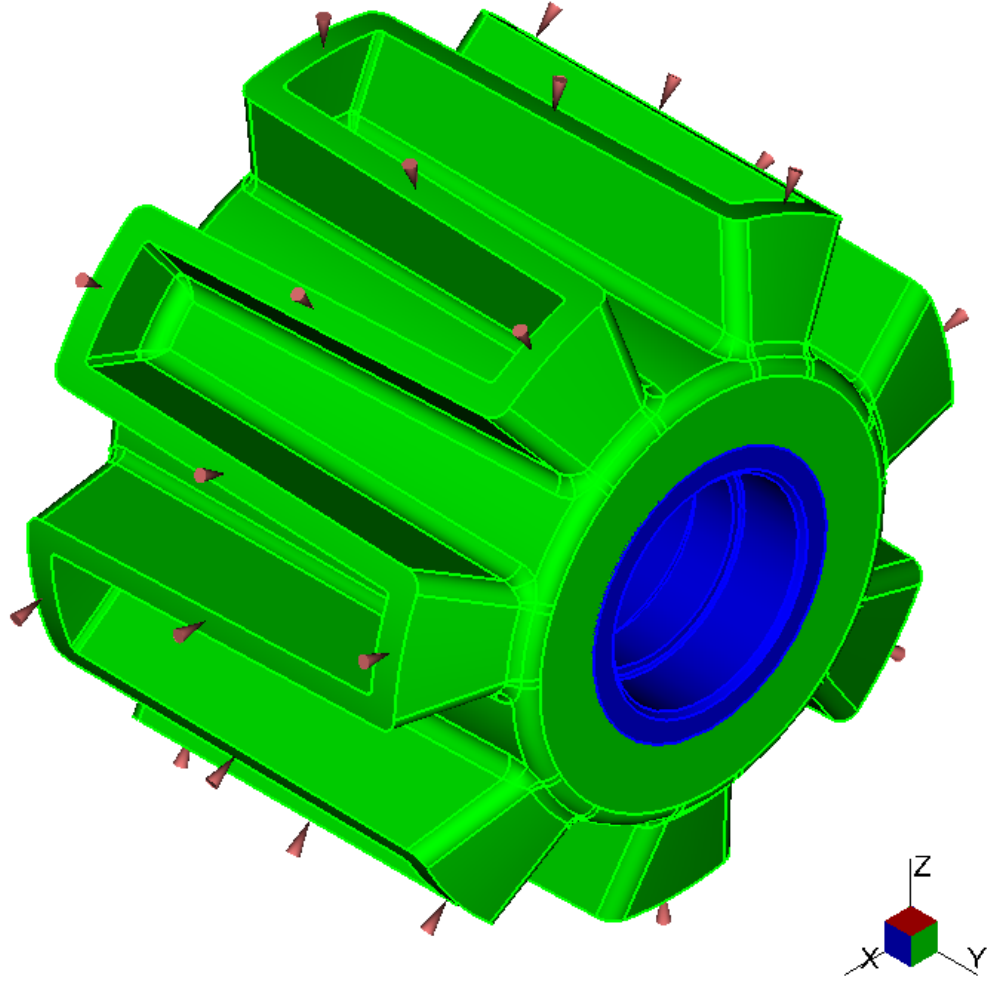
$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (1.11)$$

Denklemde: malzeme için mevcut sıcaklık değeri T , eğri türetme ile elde edilen malzeme camsı geçiş sıcaklığı $T^* = -20^{\circ} C$, akışkan malzemedeki basınç değeri p , kullanılan katsayı değerleri ise $A_1 = 29,827$, $A_3 = 51,6 \text{ K}$, $D_1 = 2,6 \times 10^{13} \text{ Pa} \cdot sn$, $D_2 = 263,15 \text{ K}$ ve $D_3 = 0$ 'dır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Denklem 4.8'deki viskozite – kayma hızı ilişkisi farklı sıcaklık değerleri için Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekilde verilen kayma hızına bağlı olarak değişen viskozite değerleri, malzeme kalıba giriş sıcaklığı olan $230^{\circ} C$ ve altındaki sıcaklık değerleri için verilmiştir.



Şekil 4.4 : PP TV20 için Farklı sıcaklık değerleri için viskozite - kayma hızı değerleri

Kazanın plastik enjeksiyon ile üretiminin modellenmesinde, kazanın tüm geometrisinin kullanılması yerine, kazanın merkezindeki burç ile temasta olduğu bölge ve çevresi modellenmiştir. Sadeleştirme sonucu oluşturulan modelde; yeşil bölge polimer, mavi bölge dökme demir insert olmak üzere, Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu sayede model oluşturulacak geometri hacim olarak azaldığı için daha küçük eleman boyutlarına inilebilmiş ve böylece model kabuk elemanlarla oluşturulmak yerine 3 boyutlu elemanlarla oluşturulabilmiştir. Parçanın bu şekilde modellenmiş olması, parça yüzeyindeki besleme noktalarında değişiklik yapılmasını gerektirmiştir. Kazan parçası tüm olarak düşünüldüğünde besleme noktaları kazan merkezinden uzakta kalmaktadır. Sadeleştirilmiş model ele alındığında ise, malzeme akışı dış kısımdan merkeze radyal yönde olmaktadır. Bu nedenle, kalıp boşluğuna malzeme girişi, Şekil 4.5’de gösterilen pembe besleme noktaları ile sağlanmaktadır.



Şekil 4.5 : Plastik enjeksiyon analizi için kullanılan kazan geometrisi

Diğer giriş parametreleri ise, başlangıçtaki kalıp yüzey ve burç giriş sıcaklıklarıdır. Plastik enjeksiyon ile imalat, tekrarlı bir imalat yöntemi olduğu için kalıp yüzeyindeki sıcaklığın giderek yükselmesi ve belirli bir çevrim sayısından sonra dengeye oturması beklenmektedir. Ancak gerekli çevrim sayısına ulaşıldıktan sonraki kalıp yüzey sıcaklığı, imalat analizi için kalıp yüzeyi başlangıç şartı olarak verilebilir. Bu başlangıç koşulunun elde edilmesiyle ilgili bilgiler plastik enjeksiyon işlem adımları kısmında verilecektir.

Kazana bütünleşik olarak imalat edilen burç için sıcaklık başlangıç değerleri, kalıpta olandan daha farklıdır. Her çevrim sonrasında insert burç yenisi ile değiştirildiği için, sisteme giriş sıcaklığı 25° C olarak sabit kalmaktadır. Ayrıca bu yapılan çalışmada, kazan için kalıp bilgilerine sahip olunmadığı için kalıp içerisinde soğutma kanalları bulunmamaktadır.

4.3 İmalat Analizi İçin Ağ Örgüsünü Oluşturulması

Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, burçtaki geometri değişiklikleri, burç ile temasta olan kazan şeklini de değiştirdiği için bu bölgenin plastik enjeksiyon ile imalatı modellenmektedir. Ancak kazan merkezindeki bu değişikliklerin, geri kalan kazan bölümlerine etkisi az olacağı için, kazan, kısmi olarak modellenmiştir. Yapılan bu değişiklik, model hacmini azalttığı için, modelin üç boyutlu elemanlarla oluşturulabilmesine olanak sağlamıştır. Ağ örgüsü katı elemanlarla oluşturulduğunda, malzeme akış hızının kalıp yüzeyinde sıfır olduğu düşünülürse, bu akış hızının cidar kesiti boyunca sıfırdan farklı bir değer alabilmesi için, karşılıklı iki kalıp yüzeyi arasında en az 3 düğüm noktası bulunmalıdır. Bu düğüm noktası sayısı, 2 veya daha üst dereceli eleman kullanılarak azaltılabilir. Ancak düğüm noktasının artması, modeli büyütme ve çözüm süresinde artışı da beraberinde getirmektedir. Mevcut modelde, polimer parça için en ince cidardaki nokta sayısı 7'dir. Bu sayede cidarda, gerçeğe daha yakın bir hız profili oluşmaktadır.

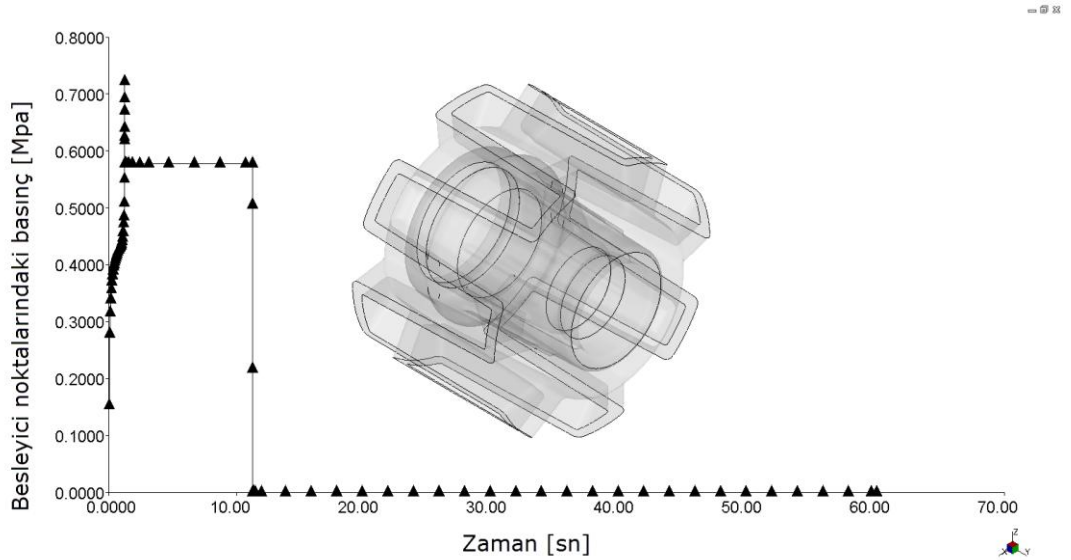
Burç ve kazan için ağ örgüsünün oluşturulmasında birinci derece dörtyüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Model, burç kısmı için 1 003 288, kazan kısmı için 3 155 127 olmak üzere, toplam 4 158 415 elemandan oluşturulmuştur. Bu iki parçanın temasta oldukları noktalarda düğüm noktaları birbirini tutmamaktadır. Ancak temastaki yüzeyler için, iki parça arasında iletim ile ısı geçişi ve global eksen takımı için yer değiştirmelerin eşitliği tanımlanmıştır.

4.4 Bir Çevrim İçin İşlem Adımları

Plastik enjeksiyonda bir çevrim: kalıp açılma ve bir sonraki işlem için kapatılma süresi 5saniye, kalıba malzemenin doldurulma süresi yaklaşık 1,2 saniye, ütüleme süresi 10 saniye ve soğuma süresi yaklaşık 48,8 saniye olmak üzere toplam 65 saniyeden oluşmaktadır. Devam eden imalatı bu dört aşama birbirini takip ederek devam etmektedir. Ancak sistem ilk üretime başladığında kalıp sıcaklıkları sürekli artacağı için birbirini takip eden iki çevrim mamulü ürün arasında fark bulunabilmektedir. Söz konusu durumdan kaçınabilmek için, kalıp sıcaklığı, enjeksiyonun dengeye ulaştığı bir çevrim için seçilmelidir. Bunu yapabilme için bu dört aşamanın önüne kalıp sıcaklığının dengeye ulaştığı bir ısı analiz yapılmıştır.

Yapılan bu analizde kalıp sıcaklığının dengeye gelmesi için iki çevrim arasındaki kalıp yüzey sıcaklığı toleransının 0,1’den küçük olması şartı aranmıştır. Isıl analizde kalıp yüzey sıcaklığı başlangıç şartı oda sıcaklığı olan 25° C olarak seçilmiştir. Isıl analiz sonuçlarında dengeye ulaşan ortalama kalıp yüzey sıcaklığı 131,4° C’dir.

Kalıp sıcaklığı dengeye ulaştıktan sonra, polipropilen malzeme, giriş sıcaklığı olan 230° C ile kalıp boşluğunu doldurmaya başlamıştır. Malzemenin kalıbı doldurması için geçen süre yaklaşık 1,2 saniyedir. Bu süre boyunca kazan çevresindeki besleme noktalarındaki basıncın zamana göre değişimi Şekil 4.6’nın ilk 1,2 saniyesinde gözlemlenebilir. Enjeksiyon fazı için yapılan çözümlemede, yakınsama toleransı %1 ve bu toleransa ulaşamaması durumunda uygulanacak maksimum iterasyon sayısı 50 olarak seçilmiştir. Çözümün zamana bağlı olduğu göz önünde bulundurulursa, bir çözüm adımı için, kalıp içine doldurulacak maksimum malzeme miktarı, tüm kalıp boşluğunun %4’ünden fazla olmaması kısıtı belirlenmiştir.



Şekil 4.6 : Kalıp besleme noktalarında basınç - zaman grafiği

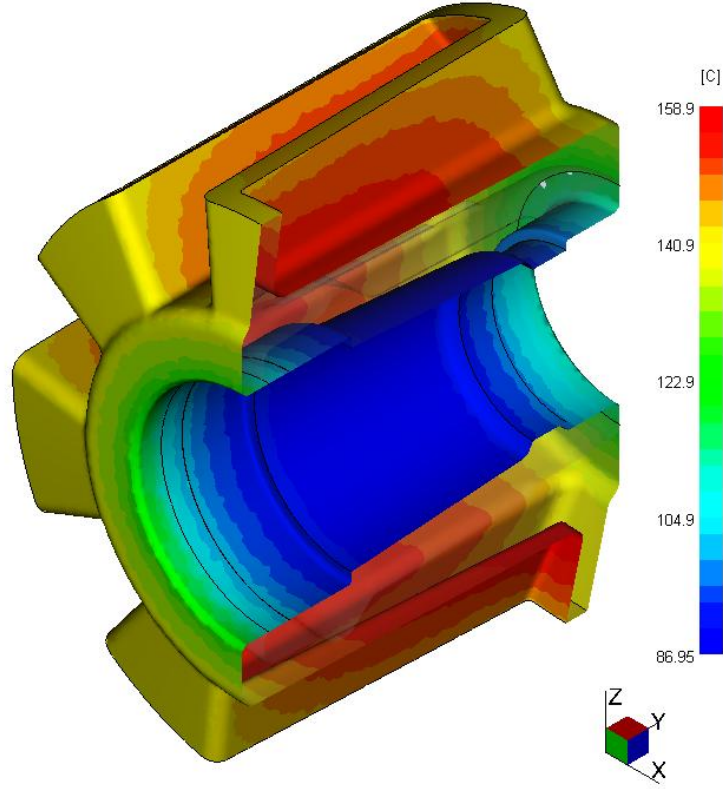
Enjeksiyon aşamasında sonra 10 saniye boyunca ütüleme aşaması sürmektedir. Bu aşamada besleme noktasındaki malzeme basıncı enjeksiyon sırasındaki basıncın %80’idir. Burada sağlanan bu basınç ile kalıp içine bir miktar daha malzeme girişi sağlanarak malzemenin paketlenmesi sağlanır. Böylece ısıl genleşme katsayısı oldukça yüksek olan polipropilen malzemesinin soğuması ile oluşabilecek çökme ve kendini çekme davranışının önüne geçilmiş olur. Ütüleme aşamasında yakınsama

tolerans yine %1 ve maksimum iterasyon sayısı ise 50 olarak seçilmiştir. Bu faz boyunca oluşacak en büyük çözüm adımı süresi 2 saniye ile kısıtlanmıştır.

Sonraki aşama plastik enjeksiyon ile üretim yönteminde çevrim süresinde en fazla zamana sahip olan ve böylece çevrim sürelerinin belirlenmesinde en etkili aşama olan soğutma aşamasıdır. Bu aşamada kalıp boşluğuna doldurulmuş olan malzemenin sıcaklığı kalıp üzerinden iletilerek uzaklaştırılır ve parka yüzeylerinde malzeme geçiş sıcaklığının altına inmeye çalışılır. Kalıp içerisindeki soğutma kanallarından geçen akışkan, kalıba geçen ısıyı daha hızlı uzaklaştırarak bu aşamanın hızlanmasını sağlayabilir. Ancak yapılan imalat analizlerinde kalıp içerisine soğutma kanalları yerleştirilmemiştir. Olası yapılacak tasarım değişikliklerinde kalıp boşluğunun soğutma kanallarına olan uzaklığı değişebilir, hatta soğutma kanallarında değişiklik yapılması gerekebilir. Bu faktörün imalat analizleri üzerindeki etkisi yok sayılmak istendiği için soğutma kanalları modele dahil edilmemiştir.

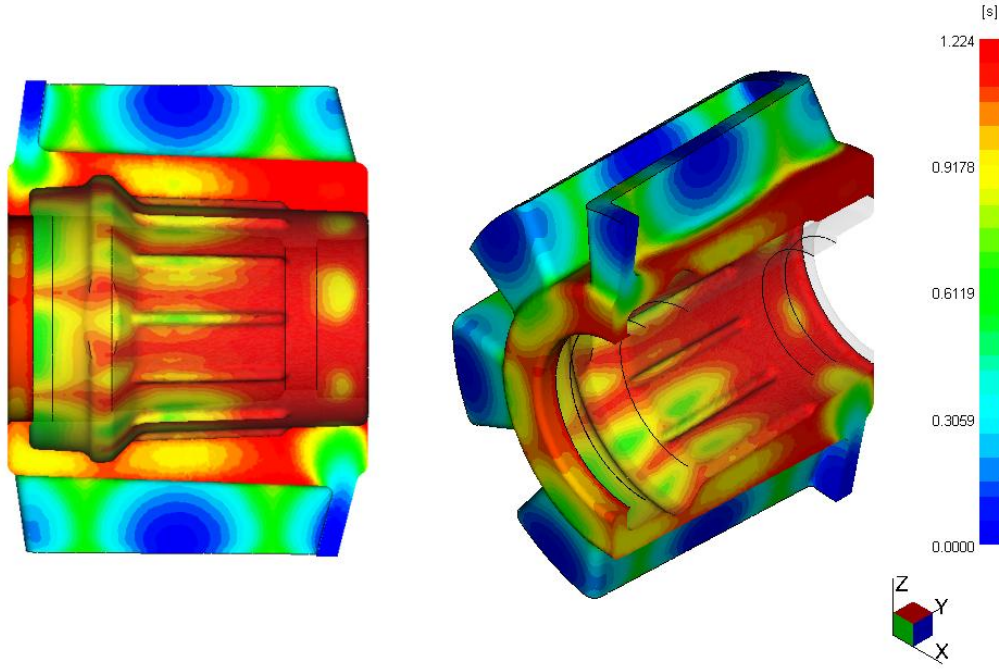
4.5 İmalat Analizi Sonuçları

Oluşturulan modelin çözülmesi ile, malzemenin kalıbın farklı bölgelerine ulaşma süreleri, çevrim boyunca burçta ve kazandaki sıcaklık değişimleri, kalıptan çıkarıldıktan sonra parçanın tamamen soğumasıyla oluşan çarpılma değerleri elde edilebilmektedir. Bir çevrim için işlem adımları bölümünde de anlatıldığı gibi, sistemin ısıl dengeye ulaştıktan sonraki çevrimleri modellenmek istendiği için soğutma fazı modellenmiş ve denge durumunda kalıp yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. Denge durumunda, yeni bir çevrime başlamadan hemen önceki (enjeksiyon fazı öncesinde kalıbın kapatıldığı andaki) kalıp yüzeyi sıcaklık dağılımı Şekil 4.7’de görülmektedir. Bu dağılımında, kalıbın burç ile temasta olduğu bölgelerdeki sıcaklık değerleri, kalıp boşluğu yüzeyi sıcaklık değerlerine göre daha düşüktür. İnsert konumundaki burç, her çevrim öncesinde yine 25° C’deki bir burç ile değiştirildiği için kalıp yüzeyinde lokal sıcaklık düşmelerine neden olmaktadır. Bu durum, kazan merkezinde cidarın diğer bölgelere göre daha kalın yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Sıcaklığı kalıba göre daha düşük olan burç ile enjeksiyon malzemesi arasındaki sıcaklık farkının, diğer bölgelere nazaran daha büyük olmasından mütevellit temas yüzeyinde birim zamandaki ısı geçişi kalıp yüzeyindeki geçişe kıyasla daha büyüktür. Bu sayede kalın cidarlı bölgelerde bile ısının yeterince hızlı uzaklaştırılması sağlanabilmektedir.



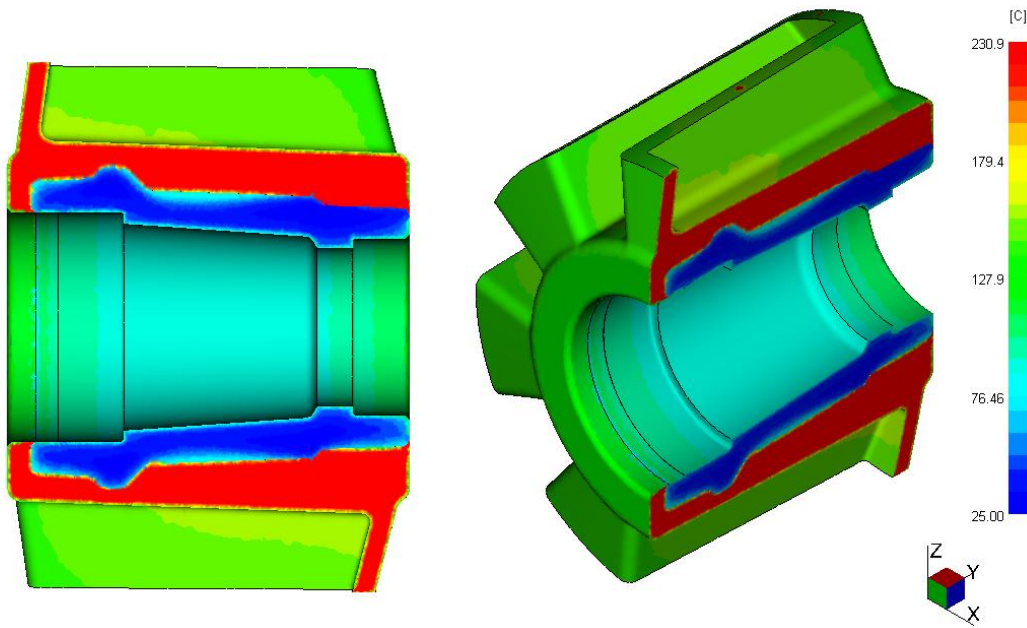
Şekil 4.7 : Denge durumu için enjeksiyon öncesi kalıp boşluğu ve insert yüzey sıcaklıkları

Kalıp kapatıldıktan sonraki ilk faz olan enjeksiyon fazında, kalıp boşluğu enjeksiyon malzemesi ile doldurulmuş ve temastaki yüzeyler arasında ısı geçişi başlamıştır. Tüm çevrim içerisinde en kısa zamana sahip olmasına rağmen, enjeksiyon, fazlasıyla üzerinde durulması gereken bir kısımdır. Kalıp boşluklarının doldurulması, kompozit malzemeler için malzeme yönelimi gibi sonuçlar bu faz ile doğrudan ilişkilidir. Enjeksiyon besleme noktaları Şekil 4.5’de gösterildiği gibi konumlandırılarak, kalıp boşluğuna malzemenin dışarıdan içeriye homojen bir şekilde yayılması amaçlanmıştır. Yapılan bu varsayım ile elde edilen kalıp boşluğu dolma süresi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Malzeme girişi yapılan yüzeyde besleyici noktalarının arasındaki mesafelerden dolayı, merkezden uzak kısımlarda dolma süresinde eşitsizlik oluşmuştur. Fakat burç ile temasta olan kalıp boşluğu dolma süreleri, 0,3 saniye gibi bir farkla, yeterince dengeli olmuştur. Kazanın imalatı için kullanılan PP TV20, fiberli bir malzeme olmadığı için, enjeksiyon aşamasında malzeme yöneliminden çok kalıp dolma sürelerine dikkat edilmiştir.

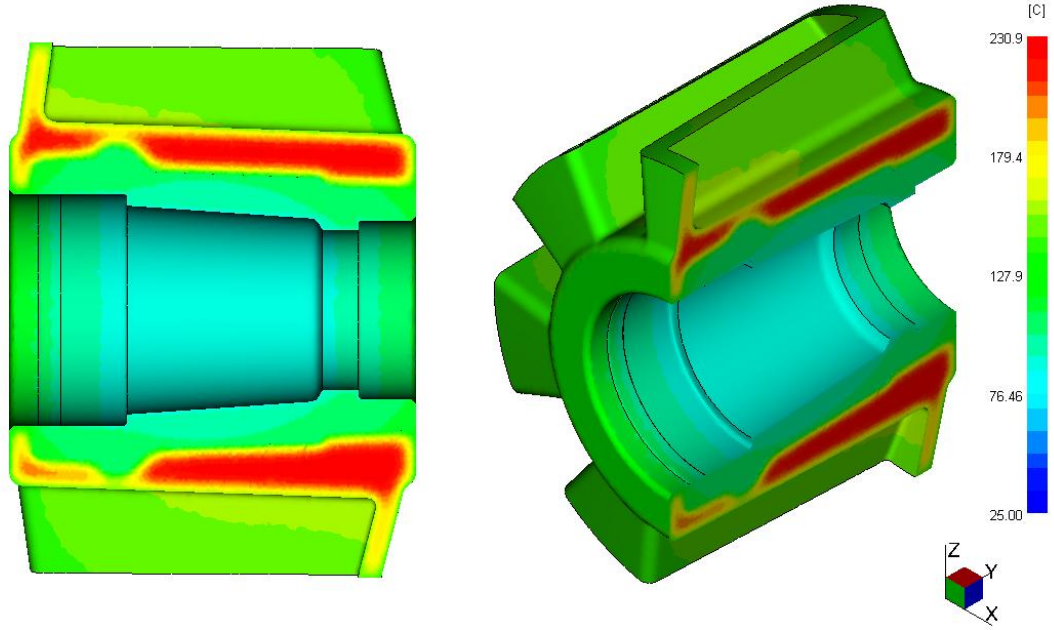


Şekil 4.8 : Malzemenin kalıp boşluğunu doldurma süresi

Enjeksiyon aşamasında kalıp boşluğu tamamen doldurulduktan sonra, 10 saniye sürecek ütüleme aşamasına geçilmiştir. Bu andan itibaren, malzeme, insert ve kalıp arasında iletim ile ısı geçişi başlamış, çevrimin yaklaşık 1,2'nci saniyesi ile 60'ıncı saniyesi arasında devam etmiştir. Parça ve insert sıcaklıkları 1,2'nci saniye için Şekil 4.9'da, 60'ıncı saniye için Şekil 4.10'da verilmiştir.



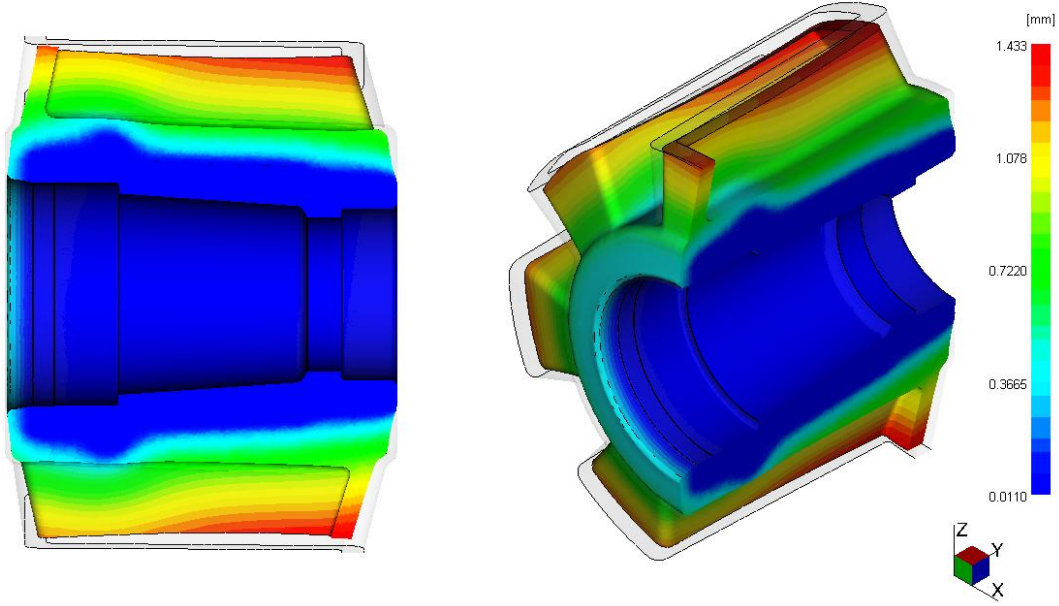
Şekil 4.9 : Enjeksiyon fazı sonrası parça ve insert sıcaklık dağılımları



Şekil 4.10 : Soğutma fazı sonrası parça ve insert sıcaklık dağılımları

Soğutma fazı bittikten sonra kalıp, parçayı kalıp boşluğundan dışarı çıkarmak için açılır ve yeni çevrime başlamak üzere tekrar kapanır. Plastik enjeksiyon makinesi için bir çevrim tamamlanmış olsa da, kalıptan çıkan parça oda sıcaklığına ulaşana dek soğumaya devam eder. Parça içindeki malzeme sıcaklığı, geçiş sıcaklığının altına inmemiş olabilir. İç kısımdaki polimer, sahip olduğu yüksek ısıl genleşme katsayısı nedeniyle soğuma sırasında hacim olarak küçülerek, daha önce soğumuş dış yüzeyi kendine doğru çeker. Bu mekanizma ile, simetrik olmayan soğuma profilleri sonucunda parçada çarpılmalar görülebilmektedir. Bu çarpılmaları önlemek için, kalıba konumlandırılan soğutma kanalları, parçanın kalıptan çıkmadan önce homojen olarak soğutulmasını sağlayabilir. Uygulanabilecek bir diğer çözüm ise, parça yüzeyinde kaburga yapısının değiştirilmesi ile parçanın rijitliğinin artırılmasıdır. Her ne kadar çarpılmaların azaltılmasında soğutma kanalları kadar etkili olsa da, bazı durumlarda parça için gerekli tasarım değişimi istenen geometriye uygun olamamaktadır. Parçanın soğutma kanalı olmaksızın üretilmesi sonucunda oluşan çarpılmalar Şekil 4.11’de verilmiştir. Plastik kısımdaki şekil değişimlerinin daha iyi gözlemlenebilmesi için 3 kat büyütme faktörü kullanılmıştır. Metal burç ile bütünleşik olarak üretilmiş kazanda, çarpılmaların merkezden uzaklaştıkça arttığı gözlemlenmiştir. Isıl genleşme katsayıları: dökme demir burç için $\alpha_{dd} = 10 - 15 \times 10^{-6} C^{-1}$ [21], PP TV20 için $\alpha_{pp} = 70 \times 10^{-6} C^{-1}$ [22] şeklindedir. İki malzeme çifti arasındaki bu büyük fark, sıcaklık değişimlerinde burcun kazana göre daha az

şekil değiştirme eğiliminde olmasına yol açar. Bu nedenle, kazan merkezindeki yer değiştirme miktarı dış kısımlara göre çok daha azdır. İki parçanın temas bölgesinde, yer değiştirme değerleri konusunda metalin baskın olmasının nedeni ise, dökme demir elastisite modülünün, polipropilen malzemeye göre daha yüksek olmasıdır.



Şekil 4.11 : İmalat sonrasında parçada meydana gelen çarpılmalar

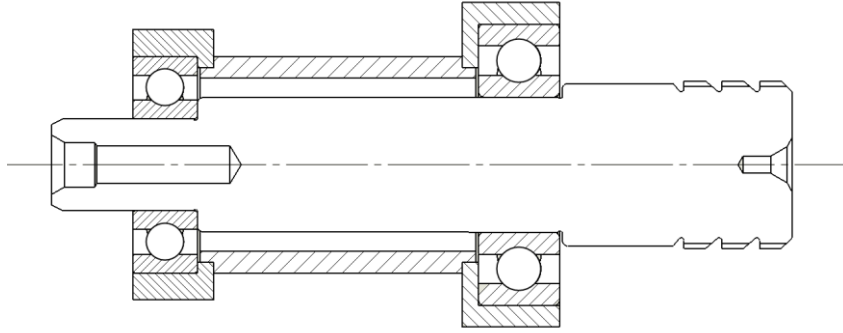
5. RULMAN BÖLGESİ YENİ TASARIM ÖNERİLERİ

Bundan önceki bölümlerde çamaşır makinesinin mevcut çalışma durumu dinamik olarak modellenmiş, ardından rulman bölgesinin imalatı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu kısımda, rulman bölgesi için geometri veya malzeme değişikliği önerileri sunulurken bu sunulan öneriler için numerik modeller oluşturularak aynı şekilde test edilecektir. Sunulacak yeni tasarım önerilerinde amaçlanan, parça üretim maliyetinde azalma, imalat yönteminin değiştirilmesi ile üretim hızının artması gibi konulardır. Amaçlananların sağlanabilmesi için birden farklı yol izlenebilir. Bunlardan ilki kullanılan parçaları olabildiğince standartlaştırmaktır. Seri üretim sayesinde, standartlaştırılan parçaların maliyetleri, özel üretim parçalara nazaran çok daha aşağıda kalmaktadır. Ayrıca standart parçalar için daha geniş bir üretici yelpazesi olduğu için ürün tedarik süreleri de nispeten kısalabilmektedir. Fakat parçaların standartlaşma, parça sayısının artması sonucunu da beraberinde getirebilir. Bu artış montaj süresini arttırdığı için, ek maliyet anlamına gelebilmektedir. Diğer bir izlenebilecek yol ise, parça malzemelerinde değişiklik yapılarak hammadde ve üretim maliyetleri düşürülebilir. Örneğin kimi polimerler yüksek gerilme dayanımlarına rağmen maliyet olarak metallerin altında kalmaktadır. Ayrıca parça imalatı sırasında, polimerleri yeniden şekillendirme için gereken ısı, metaller için gerekli olandan çok daha azdır. Çözüm önerileri oluşturulurken bu gibi faktörler göz önünde bulundurularak gerekli değişiklikler yapılmıştır.

5.1 Birinci Model Önerisi

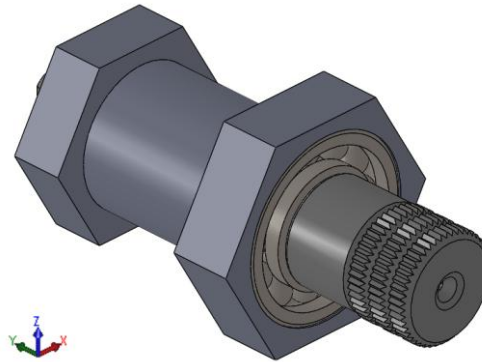
İlk yapılan model önerisinde tek parça olan burç, üç ayrı parça olarak yeniden tasarlanmıştır. Yeni burç önerisinde, parçaların geometrileri olabildiğince basitleştirilmiş, böylece mevcut durumda döküm ile üretilen parça, standart profillerden basit talaş kaldırma işlemleri ile üretilebilecek parçalara dönüştürülmüştür. Şekil 5.1’de birinci burç model önerisinin mil ile montaj hali verilmiştir. Burcun oluşturulması için iki adet farklı boyutlarda altıgen ve bir adet boru profil kullanılmıştır. İki paralel kenarı arası 60 mm olan büyük altıgen profil içerisine

52 ve 36 mm çaplarında iki kademeli delik açılmaktadır. İki paralel kenarı arası 50 mm olan k altıgen profil içine ise 40 ve 36 mm çaplarında kademeli delik açılmıştır. Bu iki altıgen profil, 36 mm çapındaki kademe yzeylelerinden, dış çapı 40 mm et kalınlığı 4 mm olan bir boru ile bir birbirine bağlanmaktadır. Daha büyük olan kademelere ise önceki tasarımı da olduğu gibi derin yivli tek sıra bilyalı rulmanlar yerleşmektedir. Tasarım sırasında rulman tipleri ve aralarındaki mesafe korunduğu için, milde herhangi bir değişiklik yapılması gerekmemiştir.



şekil 5.1 : Birinci model nerisi kesit görünümü

Rulmanlar ile temastaki burç parçalarının altıgen seçilmesinin nedeni, sistemin eksenel simetrik olmayan temaslarda aynı eksendeki burulma momentine daha iyi direnç göstermesidir. Diğer bir deyişle kazan ile burç arasında, mil dönme durumu için şekil bağı oluşturulmuştur. Benzer bir durum döküm yöntemiyle üretilen mevcut burçta da görülmektedir. Burç yüzeyindeki mil dönme eksenine paralel uzanan kaburgalar, aynı şekilde kazan ile burç arasında mil dönme yönünde şekil bağı oluşturmaktadır. Rulman ile temastaki altıgen burçların geometri ve konumlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, yeni burç tasarımı şekil 5.2’de 3 boyutlu olarak verilmiştir.



şekil 5.2 : Birinci model nerisi 3 boyutlu görünümü

5.1.1 Birinci model önerisi için rulmanlar tolerans değerleri

Rulman bölgesinde yapılan değişiklikler sonucunda, mevcut temas çiftlerinde değişiklikler olmuştur. Kullanılan rulmanlarda herhangi bir değişiklik olmamasına rağmen, temasta oldukları yüzeylerdeki malzeme veya cidar kalınlığı değişimleri yüzeyde oluşan basıncı değiştirebilmektedir. Birinci modelde, mil için herhangi bir değişiklik yapılmadığından dolayı iç bilezik – mil çiftinde yüzey basıncı değerleri değişmemektedir. Küçük rulman için iç bilezik yüzey basıncı $P_1 = 54,4 \text{ MPa}$, büyük rulman için iç bilezik basıncı $P_1 = 39,4 \text{ MPa}$ 'dır. Fakat kullanılan burç malzeme ve geometri değiştirildiği için, dış bilezik – burç yüzey gerilme değerlerinin tekrar hesaplanması gerekmektedir.

5.1.1.1 Küçük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı

Yeni model önerisinde küçük rulman dış bileziği yüzey basıncı hesabı yapılırken kullanılan değerler çoğunlukla aynıdır. Fakat burç malzemesi ve cidar kalınlığı değiştiği için, Denklem 4.5 ve Denklem 4.7'de bulunan elastisite modülü, poisson oranı ve bazı boyut değerleri değişebilmektedir. Birinci model önerisi için kullanılacak değerler; maksimum temas boşluğu $\Delta_1 = -45 \mu\text{m}$, rulman ve burç malzemesi olan çelik için elastisite modülü $E_y = E_a = 210\,000 \text{ MPa}$, poisson oranı $V_y = V_a = 0,3$, boyut değerleri $D = 40 \text{ mm}$ ve $d_y = 32,7 \text{ mm}$ 'dir. Kullanılan altıgen profilden dolayı, burç et kalınlığı sürekli değişmektedir. Değişim boyunca aldığı en küçük değer 5 mm 'dir. Bu değer doğrultusunda Şekil 4.3'de de görülen burç dış çapı $d_a = 50 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Bu değerler ile Denklem 4.5, Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 ortak olarak çözüldüğünde mil ile küçük rulman iç bileziği arasındaki yüzey basıncı değeri $P_2 = 14,9 \text{ MPa}$ olarak hesaplanır. Burç cidar kalınlığı azalmış olmasına rağmen malzeme değişiminden dolayı elastisite modülü artmış ve bu da yüzey basıncının yükselmesine neden olmuştur.

5.1.1.2 Büyük rulman dış bileziği temas yüzeyi basıncı hesabı

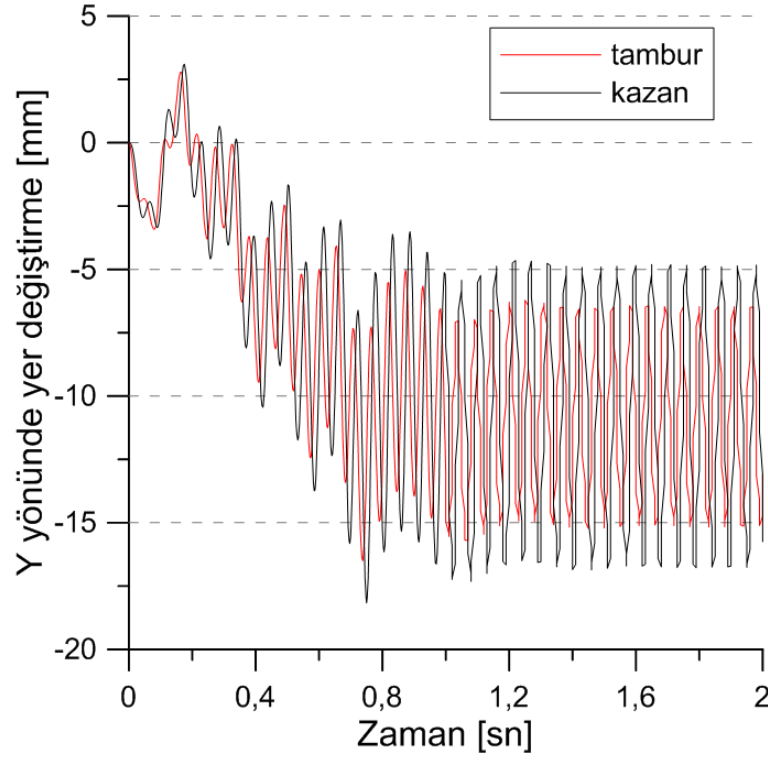
Birinci model önerisinde büyük rulman dış bileziği yüzey basıncı hesabı sırasında kullanılacak değerler; maksimum temas boşluğu $\Delta_1 = -45 \mu\text{m}$, rulman ve burç malzemesi olan çelik için elastisite modülü $E_y = E_a = 210\,000 \text{ MPa}$, poisson oranı $V_y = V_a = 0,3$, boyut değerleri $D = 52 \text{ mm}$ ve $d_y = 44 \text{ mm}$, burç dış çapı $d_a =$

60 mm olarak belirlenmiştir. Mevcut değerler ile yüzey basıncı değeri $P_2 = 17,5 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştır. Diğer durumda olduğu gibi, cidar kalınlığı azalmasına rağmen burç elastisite modülünün artmasıyla yüzey basıncında artış gözlemlenmiştir.

5.1.2 Birinci model önerisi için dinamik analiz sonuçları

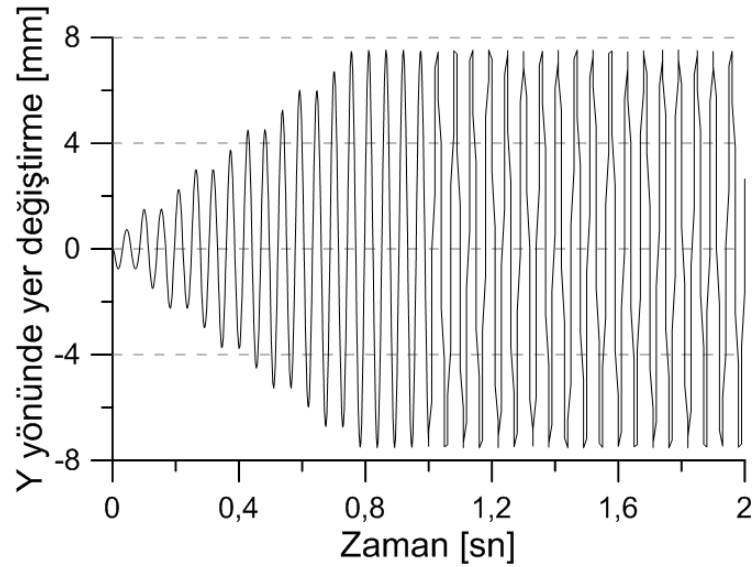
Bu kısımda, yeni oluşturulan burç için sıkma aşaması modellenmiştir. Mevcut burcun test edilmesi için kullanılan tüm sınır ve yükleme koşulları yeni model için de uygulanmıştır. Yeni oluşturulan burç üç ayrı parçada olduğu için, numerik model oluşturulurken parçaların ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Parçalar için çözüm ağı oluşturulurken bu durum gözetilerek temas bölgelerinde eleman boyutları küçültülmüştür. Burç parçaları modellenmesi için kullanılan en büyük eleman boyutu 2 mm iken, temas bölgesinde bu değerler 0,4 mm'ye kadar azalmaktadır. Burç için çözüm ağının oluşturulmasında yine 3 boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Burcu oluşturan parçaların temasta oldukları yüzeylerin birlikte hareketi tanımlanmıştır.

Modeller arası karşılaştırmanın yapılabilmesi için, tıpkı mevcut sistemin analizi sırasında kazan ve tambur üzerinden zamana bağlı yer değiştirme ölçümü yapılan iki noktadan yer değiştirme ölçümleri bu sistem için de tekrarlanmıştır. Sıkma aşaması sırasında, tambur üzerinde seçilen noktanın zamana bağlı yer değişimi kırmızı, kazan üzerinden seçilen noktanın zamana bağlı yer değişimi ise siyah renk ile Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen süre, ilk durumdakine çok benzer bir şekilde 1,2 saniyeyi bulmaktadır. Dengeye ulaştıktan sonra kazan, düşey yönde, durağan haldeki konumuna göre -4,9 ile -16,8 mm arasında salınım yapmaktadır. Bu salınım, mevcut durum için -4,9 ile -16,7 mm arasında gerçekleşmektedir. 1,2'nci saniye sonrasında tambur ise, ilk konumuna göre düşey yönde -6,5 ile -15,2 mm arasında salınım yapmaktadır. Tambur için mevcut durum incelendiğinde, bu salınımın -6,6 ile -15,1 mm arasında olduğu gözlemlenmektedir. İki nokta için elde edilen bu yer değiştirme değerlerinin benzerliği, yapılan değişikliğin çamaşır makinesi sıkma aşamasında sistemin sönüm, yay ve kütle karakteristiğini değiştirmediğini göstermektedir.



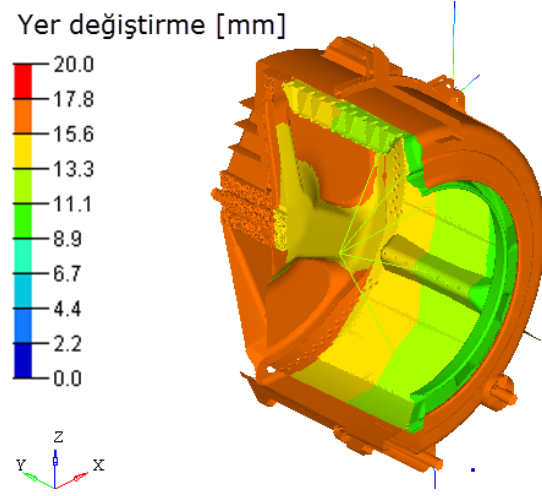
Şekil 5.3 : Birinci model için kazan ve tamburun zamana göre yer değişimi

Ölçüm yapılan nokta için, tamburun kazana göre yer değiştirmesi Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Yukarıdaki sonuçlardan da beklendiği gibi tamburun bağıl yer değiştirmesi, mevcut durumda elde edilen değerlerle oldukça yakınlık göstermektedir. Sistem dengeye geldikten sonra, tambur ile kazan arasındaki boşluğun en büyük değişim miktarı 7,54 mm'dir.

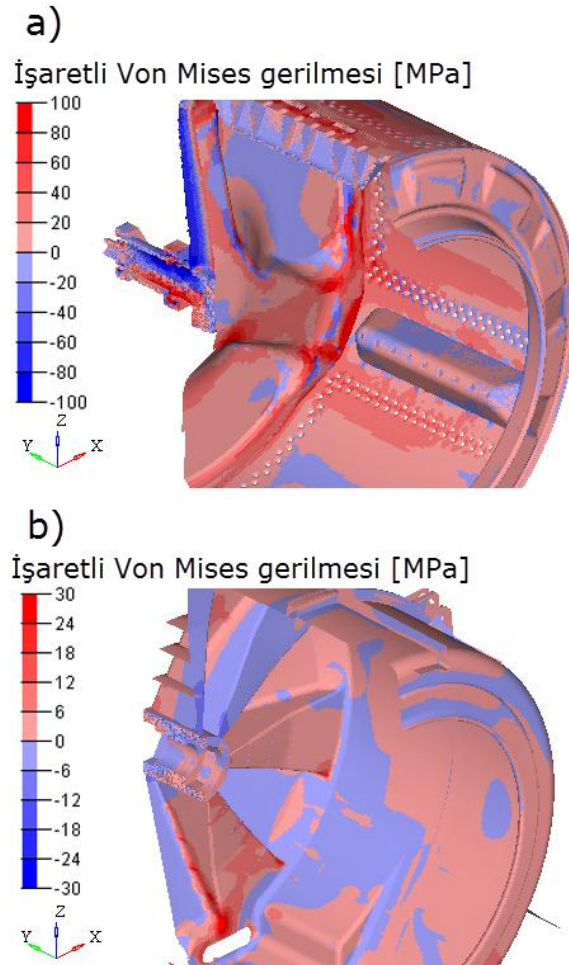


Şekil 5.4 : Birinci model için tamburun kazana göre yer değiştirmesi

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da birinci model önerisi için yer değiştirme ve Von Mises gerilme sonuçları verilmiştir. İlgili şekillerdeki sonuçlar mevcut durum analiz sonuçlarında olduğu gibi 1,465’inci saniyedeki yer değiştirme ve gerilme sonuçlarıdır.



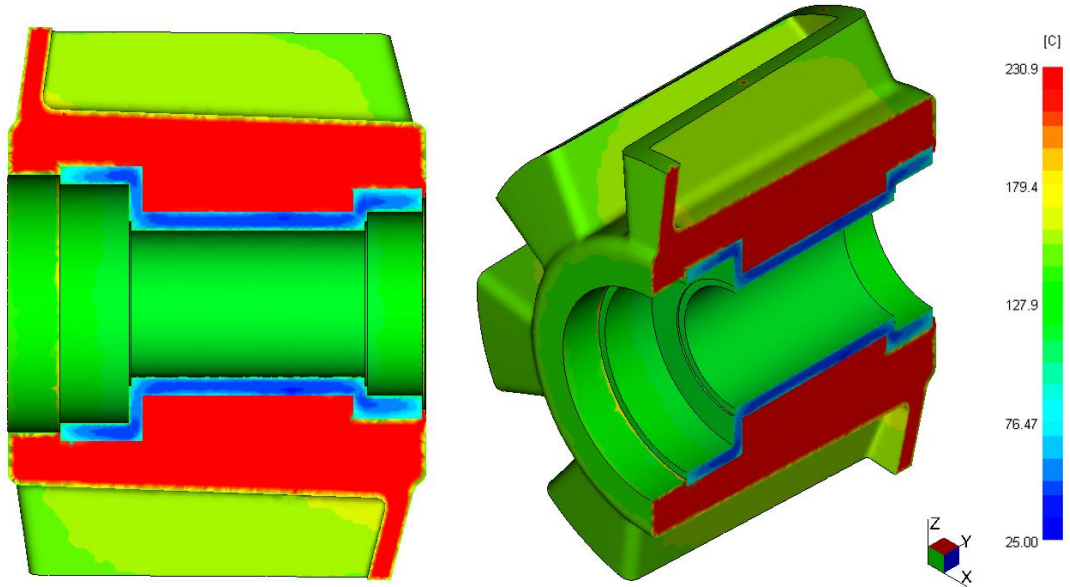
Şekil 5.5 : Birinci model önerisi için 1,465'inci saniyedeki yer değiştirme



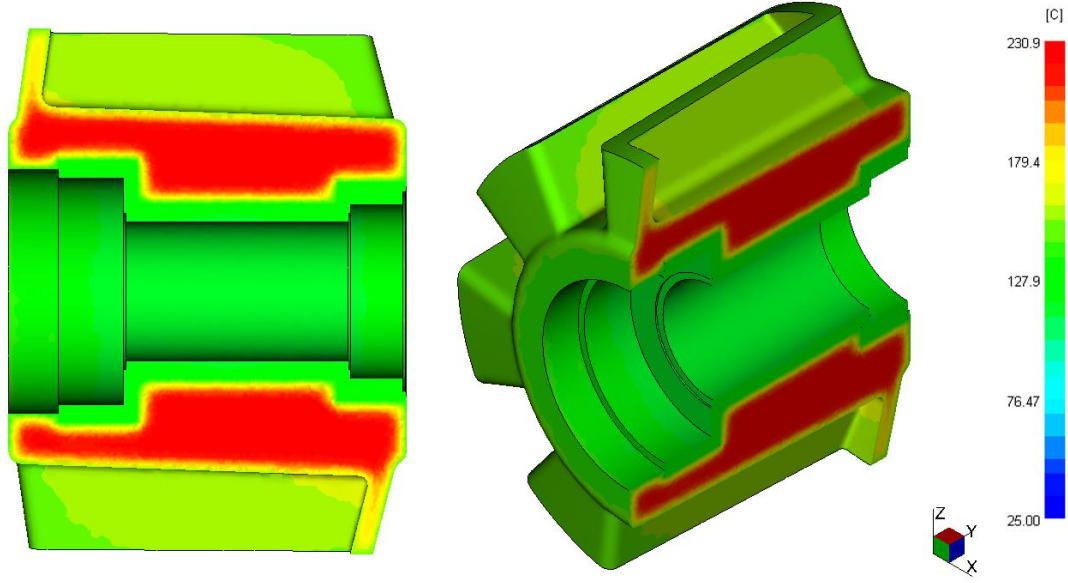
Şekil 5.6 : Birinci model önerisi için 1,465'inci saniyedeki Von Mises gerilme sonucu
a) metal kısımlar için b) plastik kısımlar için

5.1.3 Birinci model önerisi için imalat analizi sonuçları

İlk model önerisinde yapılan değişiklikler yalnızca burçta geometri değişikliği öngörüyor olsa da, burç ile temastaki kazan da bu durumdan etkilenmektedir. Kazanın plastik enjeksiyon ile üretiminde burç, kalıba insert olarak yerleştirilmektedir. Burç geometrisinin değiştirilmesiyle kalıp boşluğu geometrisi değiştirilmiş, kalıp boşluğunu doldurmak için gerekli malzeme ve kazan merkezindeki malzeme cidar kalınlıkları mevcut durumdan farklı değerler almıştır. Malzeme ve cidar boyutlarındaki bu farklılık, soğuma hızlarında farklılıklar yaratabilmektedir. Farklı soğuma hızları ise kalıptan çıktıktan sonra çarpımalara neden olabilmektedir. Yeni model önerisinde, burcun orta kısmındaki inceltme ile oluşan boşluğun yerini enjeksiyon malzemesi doldurmaktadır. Burada biriken malzemenin yeterli seviyeye soğutulabilmesi için çevrim süresinin, mevcut durumdakine göre daha uzun tutulması hatta kazan dış geometrisinde değişiklik yapılması gerekebilir. Şekil 5.7’de kalıp dolduğu anda, Şekil 5.8’de soğutma fazı sonundaki parça ve insert sıcaklıkları verilmiştir. Soğutma sonrasındaki sıcaklık dağılımına bakıldığında, parça iç kısımlarında sıcaklığın geçiş sıcaklığı üzerinde olan büyük bölümler gözlemlenmektedir.

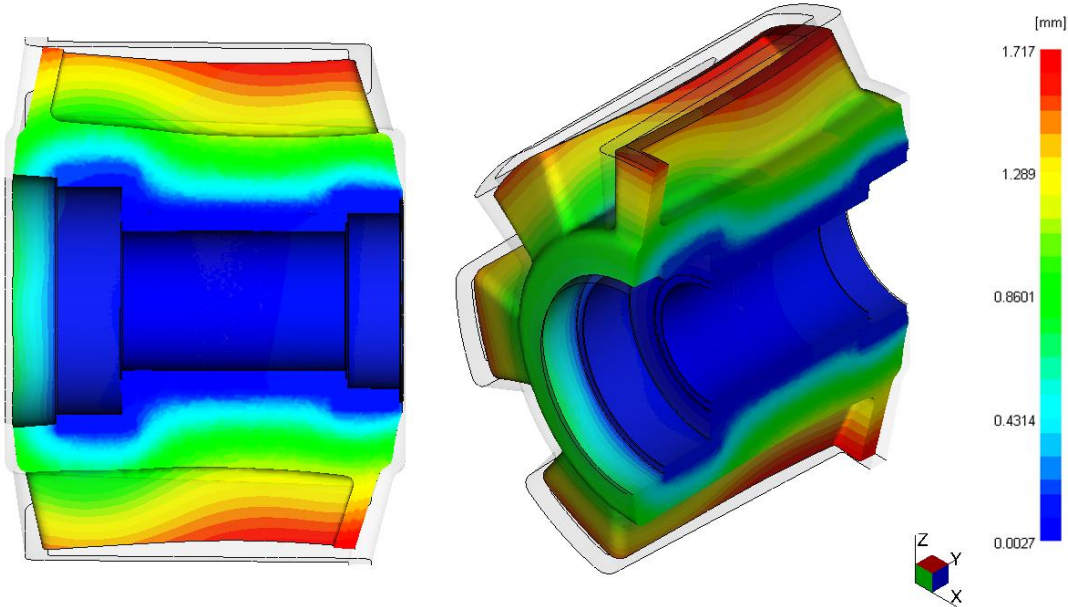


Şekil 5.7 : Enjeksiyon fazı sonrası parça ve insert sıcaklıkları



Şekil 5.8 : Soğutma fazı sonrası parça ve insert sıcaklıkları

Soğutma aşaması sonrası parça içi sıcaklıklara bakılarak, parça genelinde faz geçişinin kalıptan çıktıktan sonra gerçekleştiği görülmektedir. Faz değişiminde gerçekleşen büyük hacim değişimleri nedeniyle parça içerisinde kalıntı gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler, parçada geometri bozuklukları meydana gelmesine neden olur. Şekil 5.9’da parça üzerinde oluşması öngörülen çarpılmalar daha iyi gözlemlenebilmesi için 3 kat büyütme faktörü ile verilmiştir.



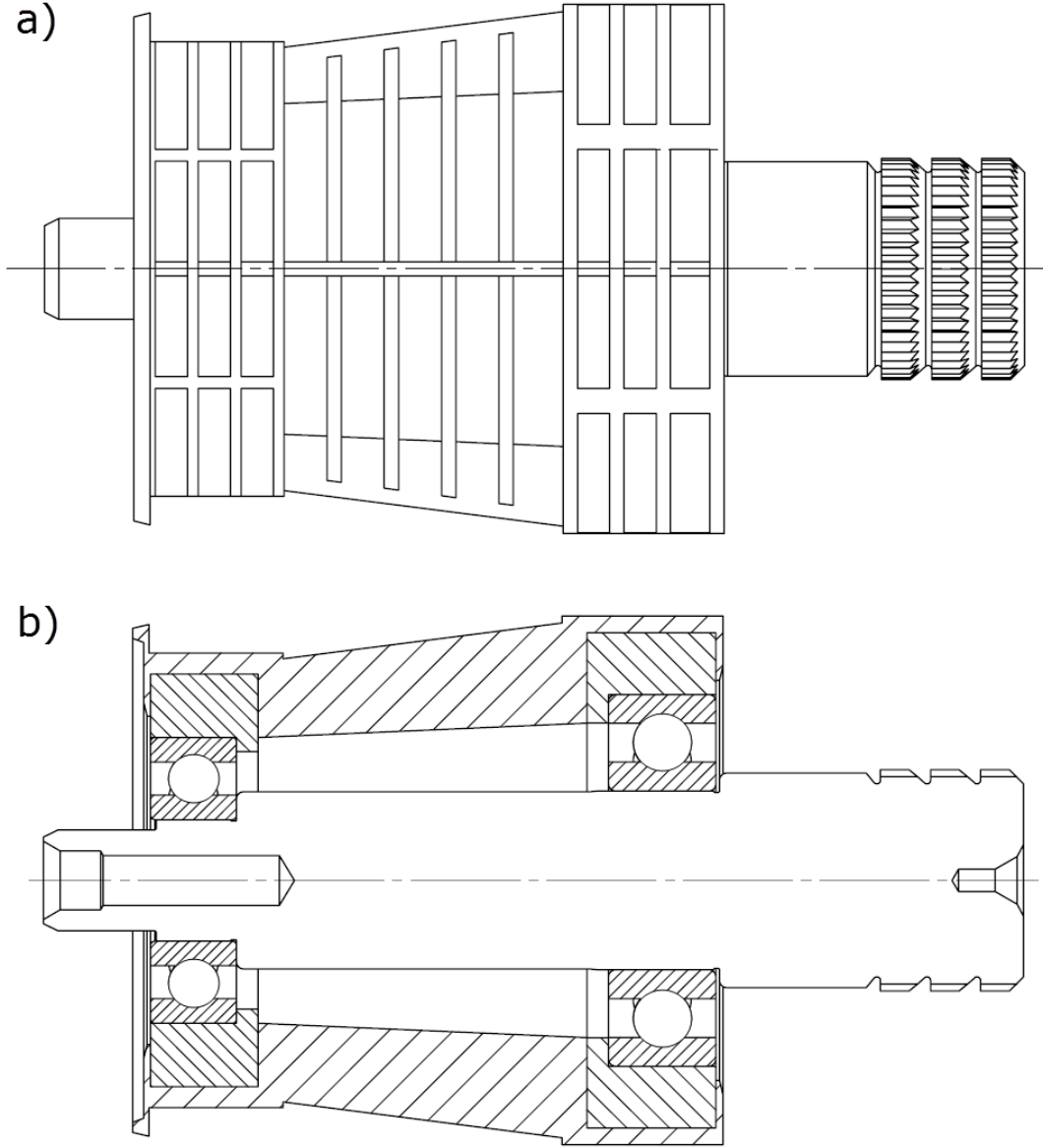
Şekil 5.9 : İmalat sonrası parçada meydana gelen çarpılmalar

5.2 İkinci Model Önerisi

İkinci tasarım önerisinde, ilk tasarımda olumlu olan kısımlar korunmuş, olumsuz kısımlar için ise tasarım değişikliğine gidilmiştir. Parçalarda yapılan standardizasyon parça maliyetleri ve tedarik için iyileşme sağlarken, burç yapısının mevcut şeklinin büyük ölçüde değiştirilmesi kazan kalıp sisteminin değiştirilmesi ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Ayrıca sıkı geçme olarak montaj edilecek 3 burç parçası için yüzeylerde toleranslı işleme yapılması gerekliliği, yine maliyet arttırıcı bir faktördür.

Yeni öneride, iki altıgen profil parça arasındaki boru çıkarılarak, bu parçaların arasına cam fiber destekli poliamid (PA GF30) malzemeli bir parça konumlandırılmıştır. Burç, ilk tasarımda bulunan iki adet altıgen parçanın arasına, seçilen malzemenin plastik enjeksiyon ile doldurulmasıyla üretilmektedir. Böylelikle burç montajı için gerekli olan yüzey toleransları bu tasarım önerisi için ekarte edilmiştir. İkinci model önerisi için burcun mil ile montaj durumu Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Çamaşır makinesi burcu, temasta olduğu iki adet rulman vasıtasıyla tambura uzanan mili taşımaktadır. Sıkma aşaması sırasında çamaşırların toplanması ile oluşan tambur yüzeyindeki dengesiz kütle, merkezkaç etki ile milde eğilme gerilmesi oluşturmaktadır. Kuvvetler rulmanlar yardımıyla burca da taşındığı için, benzer bir eğilme gerilmesi burç üzerinde de oluşmaktadır. Bu zorlanma durumunda burcu daha rijit hale getirebilmek için atalet momentinin arttırılması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için burç yüzeyine, dönme ekseninde uzakta ve eksene paralel olarak destek kiriş yapıları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu destek kirişlerinin diğer bir katkısı ise kazanın imalatı sırasında oluşabilecek soğutma problemlerini ortadan kaldırmasıdır. Bir önceki burç önerisinde, kazanın merkezinde gerçekleşen cidar artışı bu parçanın imalat aşamasında düzgün soğutulmasını güçleştirmektedir. Şekil 5.10'da görülen burçta orta bölümdeki destek kirişleri sayesinde, kazanın enjeksiyonu sırasında oluşan kalın cidarlı bölgenin etkisi azaltılmıştır.

Ayrıca burç yüzeyindeki bu kiriş sistemi, burç ile kazan arasında temas yüzeyinin artmasını sağlamaktadır. Temas yüzeyinin artması iki olumlu sonucu beraberinde getirir. Bunlardan ilki, çamaşır makinesi çalışırken sistemde oluşan zorlanma durumlarında, kazan ile burcun ayrılması temas yüzeyi arttıkça güçleşir. Diğer bir olumlu sonuç, kazanın plastik enjeksiyon ile üretiminde soğutma aşamasında ısının uzaklaştırılması kolaylaşır.



Şekil 5.10 : İkinci model önerisi için genel görünüm a) üstten b) kesit

Bu model önerisinde de kullanılan rulmanlar ve milde değişiklik yapılmamıştır. Plastik enjeksiyon ile üretilen burcun 3 boyutlu görünüşü Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11 : İkinci model önerisi 3 boyutlu görünümü

5.2.1 İkinci model önerisi için rulman tolerans değerleri

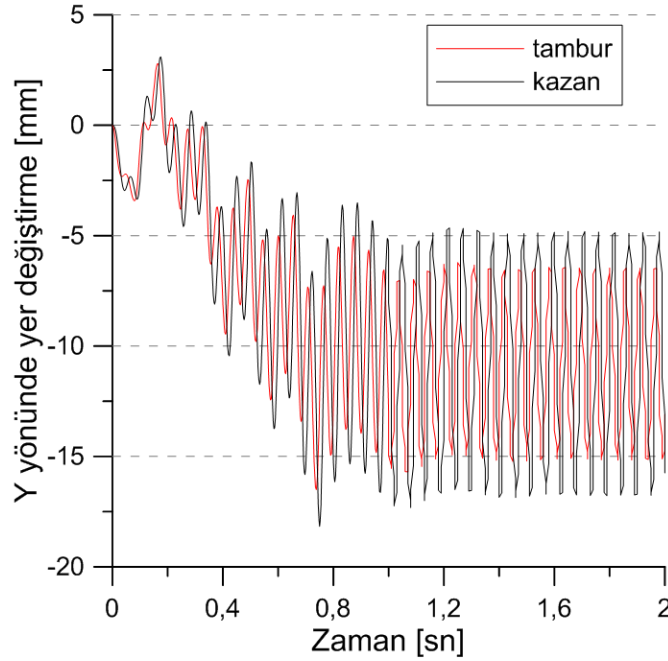
Kullanılan rulmanlarda, temasta oldukları parçalarda ve toleranslarında ilk model önerisine göre bir değişiklik yapılmamıştır. Bu nedenle metal burç ile rulmanlar arasında sıkı geçme bağlantısında oluşan yüzey basınç değerleri ilk model önerisiyle aynıdır. Küçük rulman iç bilezik için $P_1 = 54,4 \text{ MPa}$, dış bilezik için $P_2 = 14,9 \text{ MPa}$, büyük rulman iç bilezik için $P_1 = 39,4 \text{ MPa}$, dış bilezik için $P_2 = 17,5 \text{ MPa}$ 'dır.

5.2.2 İkinci model önerisi için dinamik analiz sonuçları

Bu kısımda, ikinci model önerisi için sıkma aşaması modellenmiştir. Mevcut burcun test edilmesi için kullanılan tüm sınır ve yükleme koşulları bu modelde de uygulanmıştır. Burç için çözüm ağının oluşturulmasında yine 3 boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Burcu oluşturan parçalar arasındaki temas plastik enjeksiyon ile sağlandığından ötürü burç içindeki parçalar temas yüzeylerinde birlikte hareket edecek şekilde modellenmiştir.

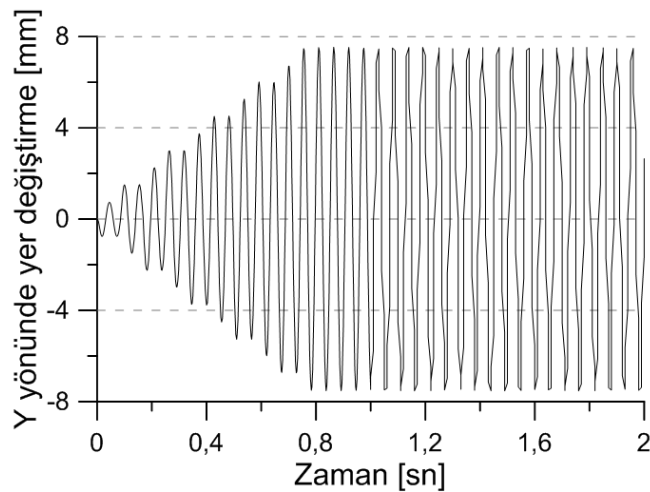
Tambur ve kazan üzerinde aynı noktalardan yapılan ölçümlerde zamana bağlı yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Sıkma aşaması sırasında, tambur üzerinde seçilen noktanın zamana bağlı yer değişimi kırmızı, kazan üzerinden seçilen noktanın zamana bağlı yer değişimi ise siyah renk ile Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Sistemin dengeye gelmesi için geçen süre, ilk durumdakine çok benzer bir şekilde 1,2 saniyeyi bulmaktadır. Dengeye ulaştıktan sonra kazan, düşey yönde, durağan haldeki konumuna göre -4,9 ile -16,8 mm arasında salınım yapmaktadır. Bu salınım, mevcut

durum için -4,9 ile -16,7 mm arasında gerçekleşmektedir. 1,2'nci saniye sonrasında tambur ise, ilk konumuna göre düşey yönde -6,5 ile -15,2 mm arasında salınım yapmaktadır. Tambur için mevcut durum incelendiğinde, bu salınımın -6,6 ile -15,1 mm arasında olduğu gözlemlenmektedir.



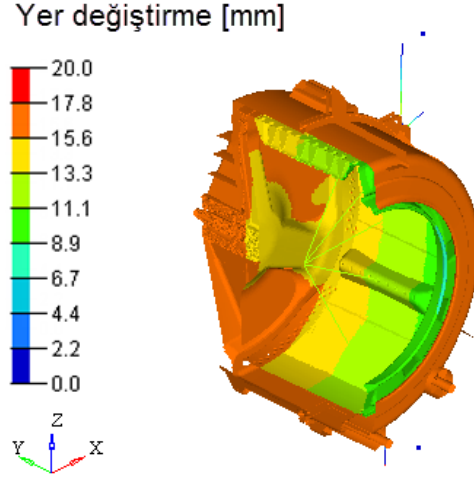
Şekil 5.12 : İkinci model için kazan ve tamburun zamana göre yer değişimi

Ölçüm yapılan iki noktanın düşey konumlarının zamana bağlı farkı alınarak tamburun kazana göre yer değiştirme değeri Şekil 5.13’de verilmiştir. İki parça arasındaki bu boşluğun zamanla değişim grafiği önceki durumlara benzerlik göstermektedir. Sistem dengeye geldikten sonra, tambur ile kazan arasındaki boşluğun en büyük değişim miktarı 7,54 mm’dir.

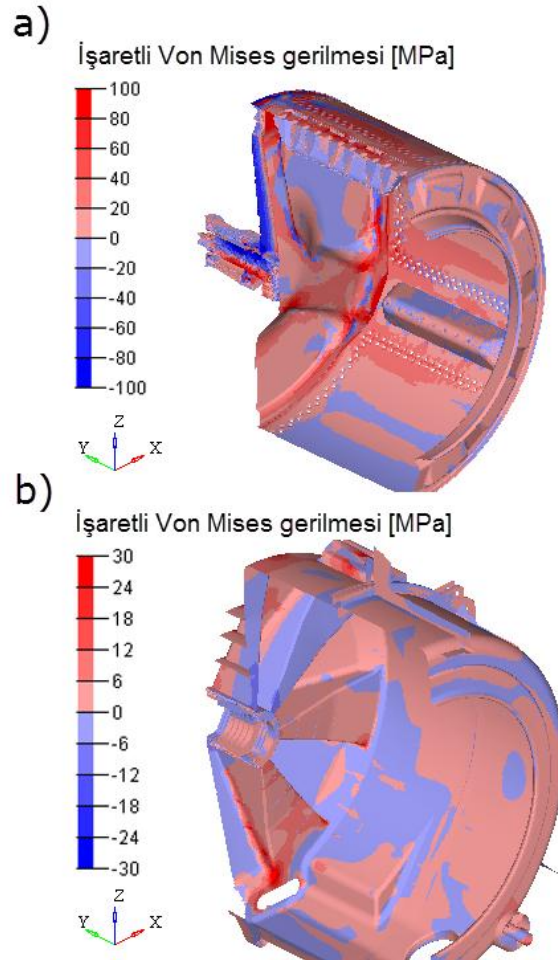


Şekil 5.13 : İkinci model için tamburun kazana göre yer değiştirmesi

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’da birinci model önerisi için yer değiştirme ve Von Mises gerilme sonuçları verilmiştir. Şekillerdeki sonuçlar, daha önceki analizlerde de olduğu gibi 1,465’inci saniyedir. Böylelikle karşılaştırma daha kolay yapılabilmektedir.



Şekil 5.14 : İkinci model önerisi için 1,465’inci saniyedeki yer değiştirme



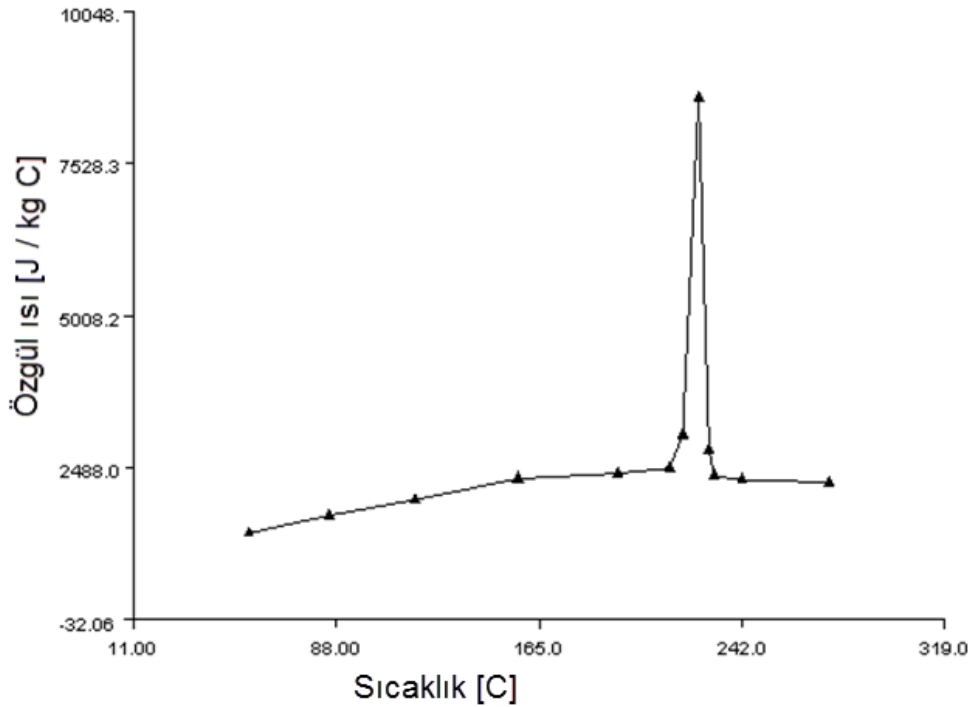
Şekil 5.15 : İkinci model önerisi için 1,465’inci saniyedeki Von Mises gerilme sonucu
a) metal kısımlar için b) plastik kısımlar için

5.2.3 İkinci model önerisi için imalat analizi sonuçları

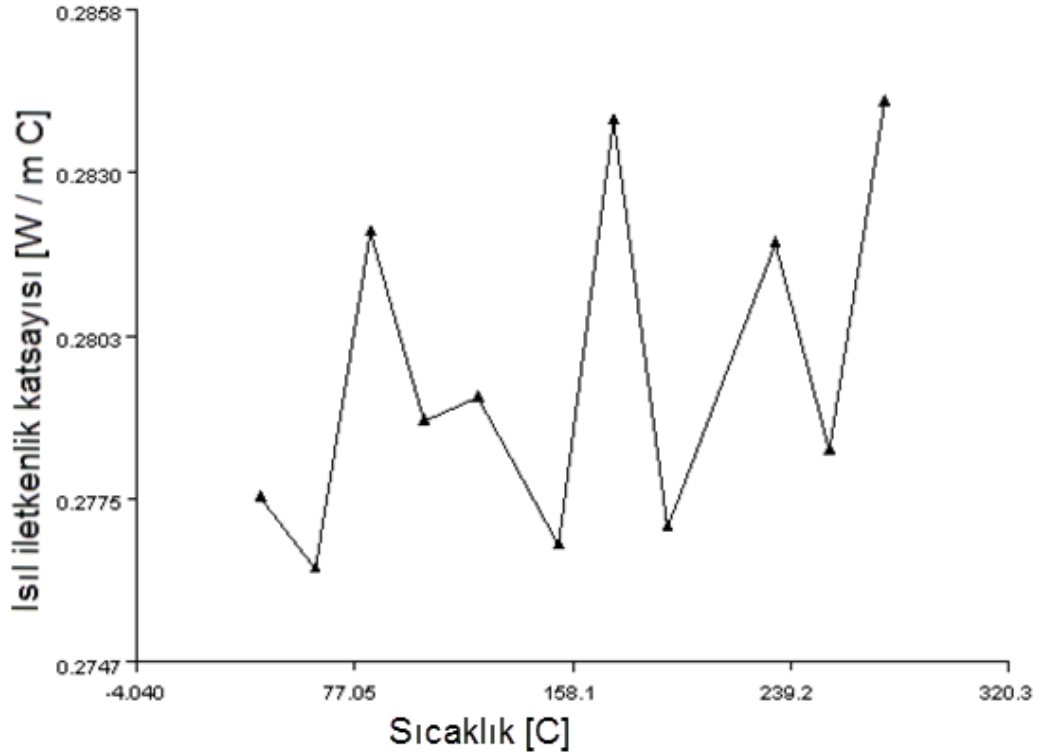
İkinci burç tasarımının imalat analizleri iki aşamada incelenecektir. İlk olarak burcun PA66 GF30 malzemesi kullanılarak plastik enjeksiyon ile imalatı modellenecektir. Kullanılan malzeme cam fiber içerdiği için mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle kalıp dolma süresi, soğuma hızı, çarpılma gibi sonuçlara ek olarak fiber yönelimi de incelenecektir. İkinci aşamada ise, daha önceki kısımlarda olduğu gibi kazanın plastik enjeksiyon imalatı modellenecek ve sonuçlar incelenecektir.

5.2.3.1 Burcun plastik enjeksiyon ile imalatının modellenmesi

Burcun imalatı için kullanılan PA66 GF30 malzemesi Radici Plastics tarafından üretilmektedir. Bu malzeme için özgül ısı ve ısı iletkenlik katsayıları sıcaklığa bağlı olarak ani değişimler gösterebilmektedir. Dolayısıyla bu parametrelerin soğuma sırasında değişimlerini dikkate alarak yapılan çözümleme sonuçların doğruluğunu arttırmaktadır. Özgül ısı – sıcaklık değişimi Şekil 5.16, ısı iletim katsayısı – sıcaklık değişimi Şekil 5.17’de verilmiştir. Malzemenin işlem sıcaklığı 280° C olduğu için, şekillerde yer alan değerler, bu ve altındaki sıcaklık değerlerine göre değişimi kapsamaktadır.



Şekil 5.16 : Özgül ısı - sıcaklık değişimi

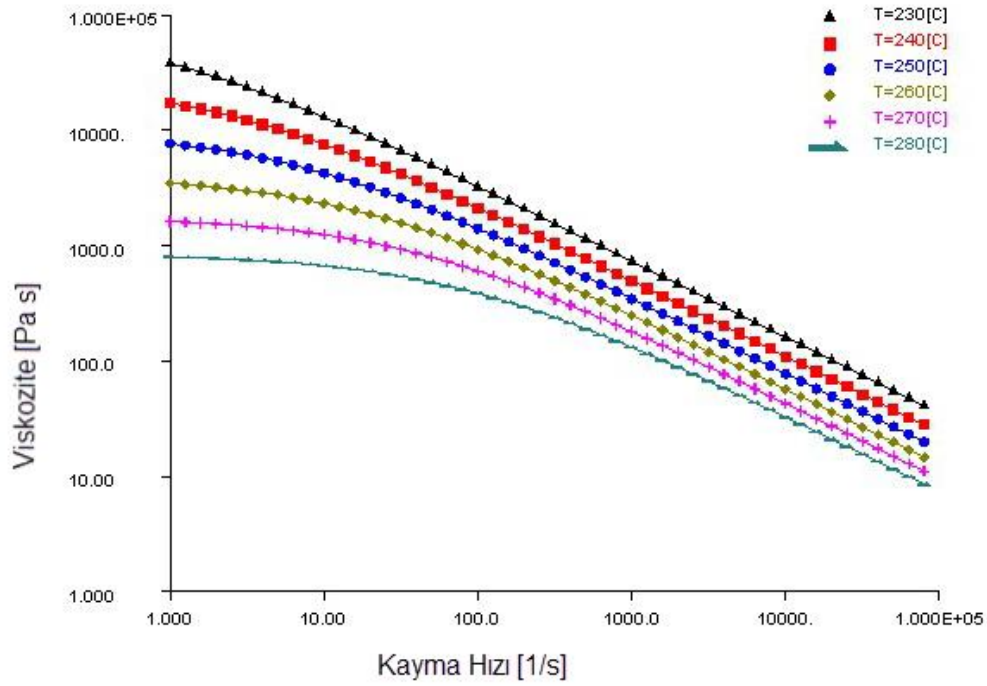


Şekil 5.17 : Isıl iletim katsayısı - sıcaklık değişimi

Viskozite modeli olarak yine WLF Modeli [19] kullanılmıştır. Denklem 4.8'deki: Malzeme için viskozite η , kayma hızının sıfır iken viskozite değeri η_0 , kayma hızı $\dot{\gamma}$, kayma incelmeleri sırasında kritik gerilme $\tau^* = 64993 \text{ Pa}$ ve yüksek kayma hızında eğri türetme ile elde edilen katsayı $n = 0,3399$ 'dır. Denklem 4.9, Denklem 4.10 Denklem 4.11'de yer alan, PA66 GF30 için: eğri türetme ile elde edilen malzeme camsı geçiş sıcaklığı $T^* = 60^\circ \text{ C}$, akışkan malzemedeki basınç değeri p , kullanılan katsayı değerleri ise $A_1 = 67,413$, $A_3 = 51,6 \text{ K}$, $D_1 = 2,4 \times 10^{25} \text{ Pa} \cdot \text{sn}$, $D_2 = 383,15 \text{ K}$ ve $D_3 = 0$ 'dır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Denklem 4.8'deki viskozite – kayma hızı ilişkisi farklı sıcaklık değerleri için Şekil 5.18'de verilmiştir. Şekilde verilen kayma hızına bağlı olarak değişen viskozite değerleri yine, malzemenin kalıba giriş sıcaklığı olan 280° C ve altındaki sıcaklık değerleri için verilmiştir.

Ayrıca kullanılan malzemenin fiber içermesinden dolayı enjeksiyon ile oluşacak fiber yöneliminin de tahmin edilmesi gerekmektedir. Malzemenin yöne bağımlı olması, ısıl genleşme katsayısı ve elastisite modülü gibi özelliklerin de yön ile değişmesine neden olmaktadır. Bu durum, farklı fiber yönelimleri parçada farklı çarpılma şekilleri ve

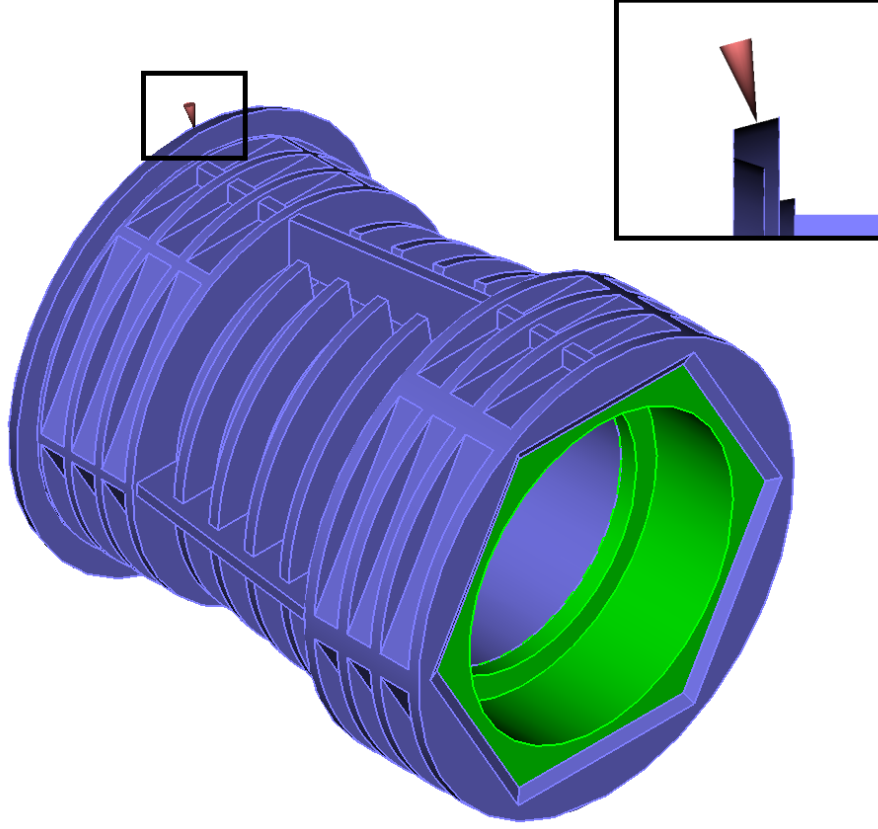
farklı dayanımlara neden olmaktadır. Fiberlerin yönelimleri tahmin edilebilmesi için Jeffery Modeli [23] esas alınmıştır. Bu modele göre, model içerisinde serbest haldeki katıların hareketi tahmin edilmektedir. Fakat yapılan çalışmada bu modelin geliştirilmiş şekli olan Folgar-Tucker Modeli [24] kullanılmıştır. Folgar-Tucker Modeli, akışkan içindeki katı partiküllerin etkileşimlerinin de modele dahil edilmiş şeklindedir. Bu model kullanıldığında sayısal çözümlemenin, deneysel sonuçlar ile daha iyi örtüştüğü gözlemlenmiştir [24].



Şekil 5.18 : PA66 GF30 için farklı sıcaklıklarda viskozite - kayma hızı grafiği

Burcun modellenmesi için daha önce olduğu gibi 3 boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Çelik insertler 394 530, poliamid burç 1805064 olmak üzere toplam 2 199 594 eleman ile model oluşturulmuştur.

Parça tek noktadan beslenmesine rağmen, halka besleyici kullanarak malzemenin kalıbı simetrik şekilde doldurması amaçlanmıştır. Böylece soğuma sırasında meydana genel çarpılmalar en aza indirilebilecektir. Bu besleme şeklinin diğer bir avantajı ise, burç üzerine konumlandırılan destek kirişlerde malzeme akışının burç dönme eksenine paralel olmasını sağlamaktadır. Akış yönünde uzanan fiber oryantasyonu ile bu yönde daha yüksek elastisite modülü ve gerilme dayanımı elde edilmektedir. Plastik enjeksiyon için seçilen besleme noktası ve halka besleyici kesit görünüşü Şekil 5.19'da verilmiştir.

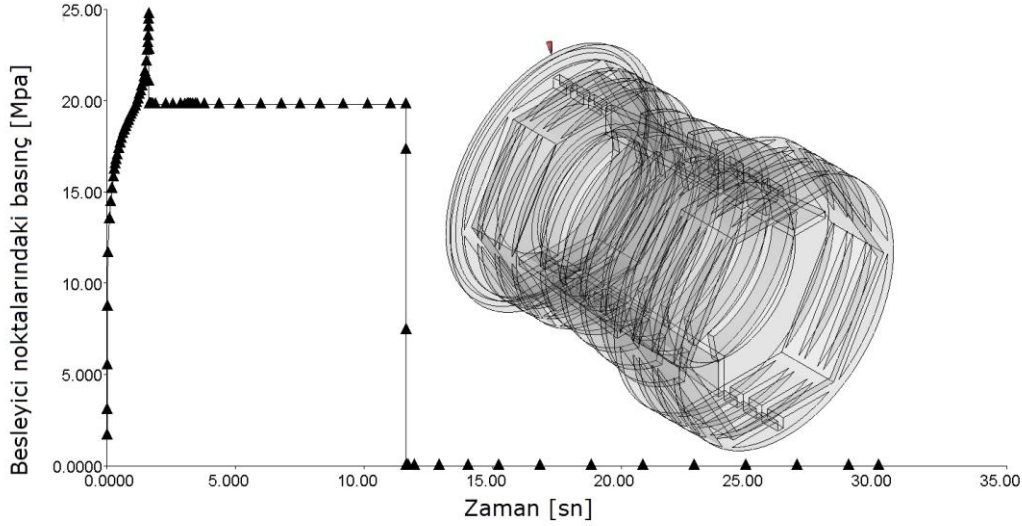


Şekil 5.19 : Plastik enjeksiyonla üretilecek burç geometrisi ve besleme noktası

Burç için imalat aşamaları, kazan ile benzerlik göstermesine rağmen çevrim süreleri farklıdır. İmalat için çevrim süresi: kalıp açılma ve bir sonraki işlem için kapatılma süresi 5 saniye, kalıba malzemenin doldurulma süresi yaklaşık 1,6 saniye, ütüleme süresi 10 saniye ve soğuma süresi yaklaşık 18,4 saniye olmak üzere toplam 35 saniyeden oluşmaktadır.

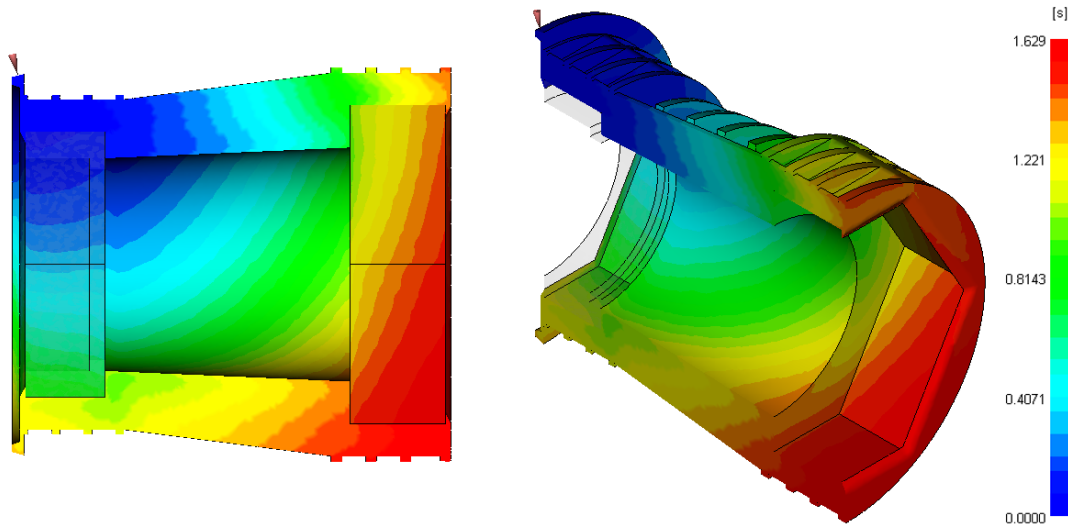
Daha önceki analizlerde olduğu gibi kalıbın yüzey sıcaklığının dengeye gelmesi için ısı analizler yapılmaktadır. Kalıp için başlangıç sıcaklığı 25° C ve yakınsama toleransı 0,1 olarak verildiğinde, kalıp yüzey sıcaklığı ortalaması 166° C olarak elde edilmektedir. Bu yüzey sıcaklığı, insert giriş sıcaklığı 25° C ve malzemenin kalıba giriş sıcaklığı 280° C olarak kabul edildiğinde elde edilmiştir.

Enjeksiyon, ütüleme ve soğutma aşamalarının çözümünde kullanılan yakınsama parametreleri, 4.4 Bir Çevrim İçin İşlem Adımları bölümündekiler ile aynı tutulmuştur. Bir çevrim boyunca besleme noktalarında oluşan enjeksiyon basıncı Şekil 5.20’de verilmiştir. Enjeksiyon aşamasında basınç, sıfırdan başlayarak 25 MPa’a kadar yükselmektedir. Sonrasında, ütüleme aşaması için, basınç maksimum değerinin %80’ine düşmektedir.



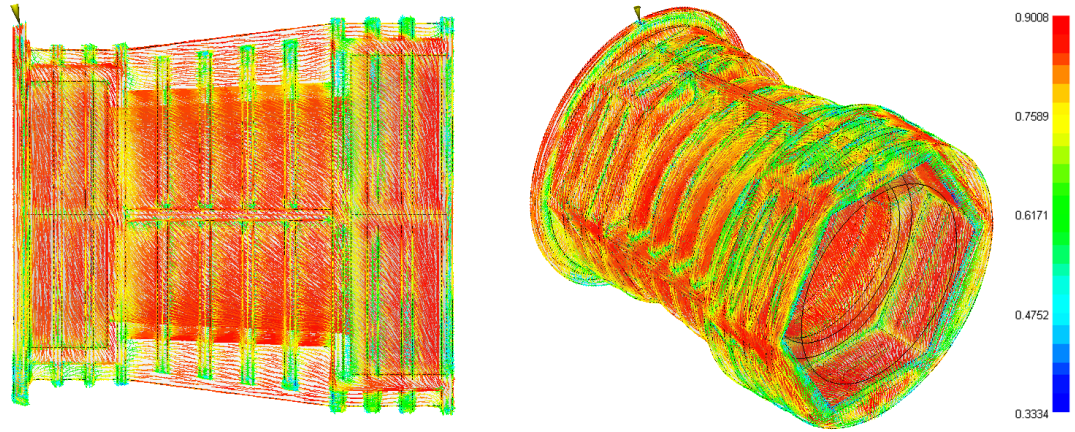
Şekil 5.20 : Besleme noktalarındaki basınç - zaman grafiği

Şekil 5.19’da verilen besleme noktasından yapılan enjeksiyonda kalıp içi dolma süresi Şekil 5.21’de verilmiştir. Burcun üst yüzeyinden yapılan enjeksiyonda, öncelikle burcun arka yüzeyi dolmakta, malzemenin ön kısma ilerlemesi ile büyük rulman kısmı en son dolmaktadır. Parça boyunca uzanan halka şeklindeki destek kirişleri malzemenin aksel yönde ilerleme eğilimini azaltıp, teğetsel yönde ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Buradaki kirişlerin asıl görevi, aksel yönde uzanan kirişlere destek olmak iken, enjeksiyon sırasında kalıp dolma şeklini değiştirerek çarpılmayı da azaltmaktadır.



Şekil 5.21 : Burcun plastik enjeksiyon ile imalatında kalıp dolma süresi

Daha önce de bahsedildiği gibi, burcun imalatında kullanılan PA66 GF30 cam fiber katkılı bir malzemedir. Enjeksiyon sırasında farklı dolma şekillerine göre üretilen parça içerisindeki fiber yönelimi değişebilmektedir. Şekil 5.19’da gösterilen besleme noktasından malzeme girişi ile yapılan analizlerde parça içerisinde oluşan fiber yönelimi Şekil 5.22’de verilmiştir. Şekilde fiber yönelimini sergileyebilmek için fiber yönelim tansörleri kullanılmıştır. Bu tansör değerleri, fiberlerin kalıp yüzeyine göre yönelimlerine göre değerlendirilmektedir. Basitçe açıklanırsa, kalıp yüzey düzlemine paralel veya paralele yakın yönelen fiber tansörleri yüksek, paralelden uzak veya yüzeye dik yönelen fiber tansörleri düşük değerler almaktadır. Bu değer aralığı 0 ile 1 arasında değişmektedir.

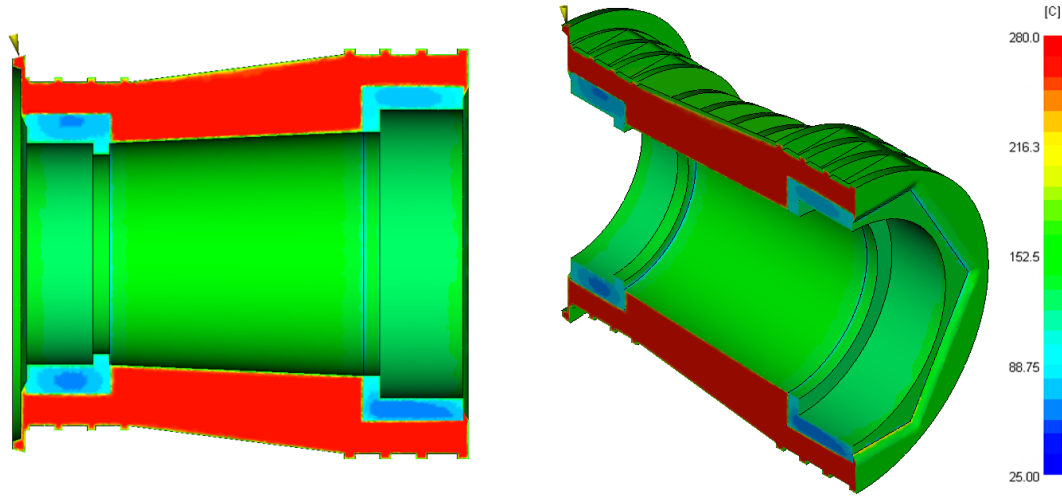


Şekil 5.22 : Enjeksiyon sonrasında burç içerisindeki fiber yönelimi

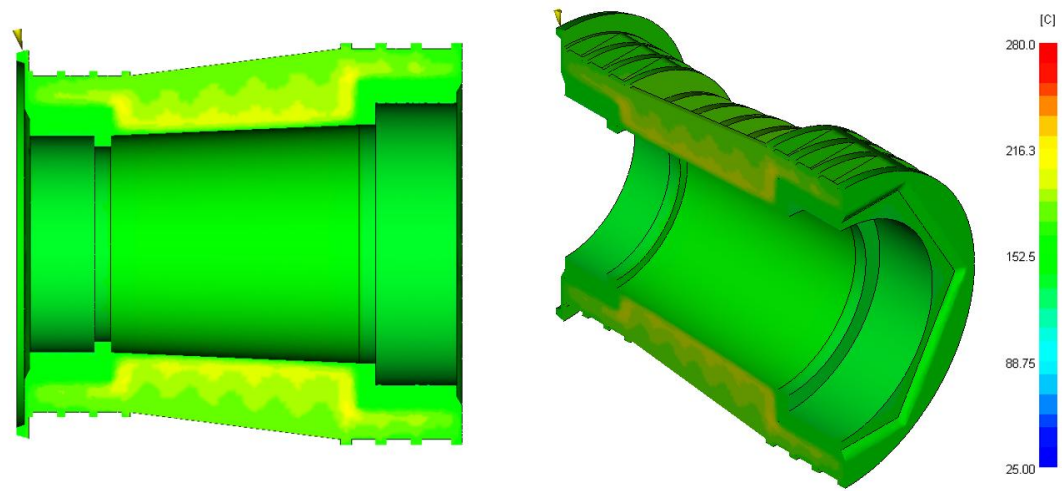
Burçtaki yönelim incelendiğinde, parça ortasında bulunan ve dönme eksenine paralel uzanan destek kirişlerindeki tansör değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Parça kalıptan çıkarıldıktan sonra soğumaya devam ettiği için parça üzerinde bir takım şekil değişimleri gerçekleşmektedir. PA 66 GF30 için ısı genleşme katsayıları fiber yönünde $\alpha_1 = 2,7 \times 10^{-5} C^{-1}$, fibere dik yönde $\alpha_2 = 6,5 \times 10^{-5} C^{-1}$ 'dir. Diğer bir deyişle sıcaklık değişimleri sırasında parça, fiber yönelim doğrultusunda daha az şekil değiştirecektir. Burç orta kısmında bulunan ve dönme eksenine paralel uzanan 4 adet destek kirişi için fiber yönelimi kalıp yüzeyine paralel uzanmaktadır. Bu sayede parça imalat sonrasında soğurken, iki rulman arasındaki mesafenin korunmasında olumlu etki sağlanacaktır. Diğer bir yandan, malzeme için elastisite modüllerine bakılacak olursa; fiber yönünde $E_1 = 7500 MPa$, fibere dik yönde $E_2 = 5000 MPa$ 'dır. Çamaşır makinesi çalışma aşamasında, burç üzerine gelen eğilme momenti, destek kirişleri içerisinde bulunan fiber yönünde basma ve çekme gerilmeleri

oluşturmaktadır. Fiber yönündeki elastisite modülü daha büyük olduğu için, bu yönelim durumunda burç, eğilme momenti etkisinde daha rijit davranacaktır.

Parçanın çarpılmasında fiber yöneliminin yanı sıra soğuma hızları da etkilidir. Tasarım sırasında malzeme cidar kalınlığı tüm parça için benzer değerlerde tutularak, soğumanın her kısımda eşit olması amaçlanmıştır. Şekil 5.23’de enjeksiyon aşaması sonrası, Şekil 5.24’de soğutma aşaması sonrası parça ve insert sıcaklıkları verilmiştir. Burç boyunca konumlandırılan kaburga yapısı parça yüzey alanını arttırarak soğuma süresini kısaltmıştır. Ayrıca malzeme cidar kalınlığının tüm parça boyunca benzer mertebelerde olması, soğutma aşaması sonunda parça genelinde düzgün bir sıcaklık dağılımı oluşmasını sağlamıştır.

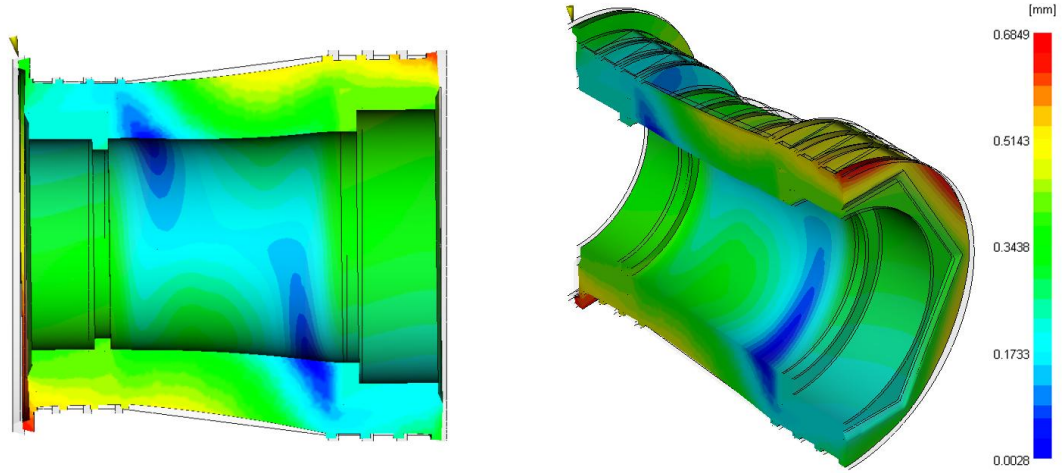


Şekil 5.23 : Enjeksiyon aşaması sonrası burçtaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.24 : Soğutma aşaması sonrası burçtaki sıcaklık dağılımı

Burç kalıptan çıkarıldıktan ve oda sıcaklığına soğutulduktan sonra parçada oluşan çarpılmalar 3 kat büyütme faktörüyle Şekil 5.25’de gösterilmiştir. Tüm parça genelinde oluşan çarpılmalar 1 mm’nin altındadır. Bu konuda dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, rulmanların birbirine göre konumlarının burç ile tayin ediliyor oluşudur. Rulmanların dönme eksenlerinde oluşacak kaçıklık, sistem içi ek gerilmelere neden olacaktır. Burçtaki çarpılmanın üç eksen yönündeki bileşenleri incelenerek rulman yatakları arasında eksen kaçıklığı yaratacak bir yer değişimi olmadığı görülmüştür.

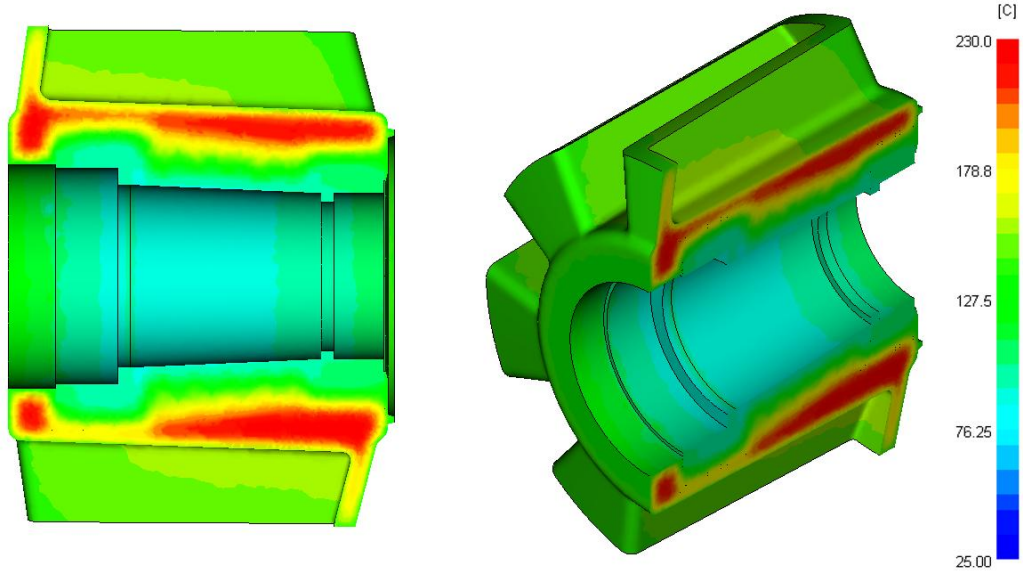


Şekil 5.25 : Plastik enjeksiyon ile imalat sonrasında burçta oluşan çarpılma

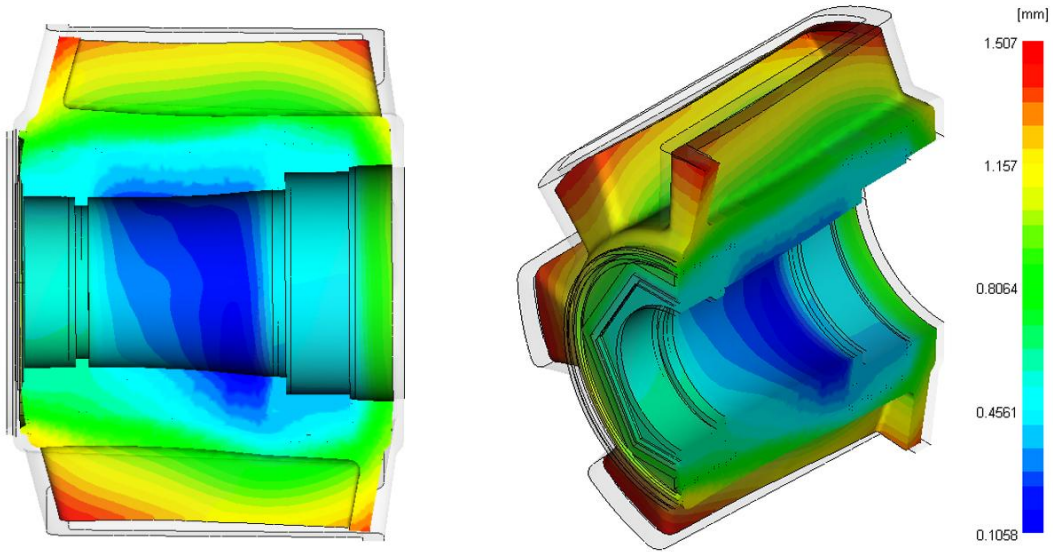
5.2.3.2 Kazanın plastik enjeksiyon ile imalatının modellenmesi

Burç için yapılan imalat analizlerine ek olarak kazanın da plastik enjeksiyon ile imalatı modellenmelidir. İki insert parça üzerine plastik enjeksiyon ile üretilen burç, kazanın imalatı sırasında insert olarak kullanılacaktır. Burç tasarımında yapılan değişiklik kazan geometrisini de etkilediği için kazan için imalat analizleri de yinelenmelidir. Kazan imalatı için tanımlanan tüm sınır ve başlangıç şartları tekrarlandığında, dangedeki çevrim öncesi kalıp yüzey sıcaklığı ortalaması 140,1° C olarak bulunmuştur. Çevrime başlamadan önce, yeni burç tasarımı kalıp içine insert olarak yerleştirilmiştir. Enjeksiyon tamamlandıktan sonra, soğutma aşamasının sonundaki kazan ve burç sıcaklıkları Şekil 5.26’da verilmiştir. Burç üzerine yerleştirilen kaburga yapısı, kazanın imalatı sırasında oluşabilecek kalın cidarları elimine ederek, soğumanın dengeli olmasını sağlamıştır. Çevrim sonunda parça üzerinde elde edilen sıcaklık dağılımının dengeli olması, parça oda sıcaklığına indiğinde oluşacak

arpılmaların azalmasına olumlu yönde etki etmektedir. İmalat sonrasında oluşması öngörülen çarpılmalar, şekil 5.27’de verilmiştir.



şekil 5.26 : Soğutma fazı sonrası parça ve insert sıcaklıkları



şekil 5.27 : Plastik enjeksiyon ile imalat sonrası kazanda oluşan arpılma

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada önden yüklemeli bir çamaşır makinesinin sıkma aşaması dinamik olarak modellenmiştir. Modelleme aşamasında yapılabilecek sadeleştirmeler, varsayımlar ve kısıtlarda bahsedilmiştir. Ayrıca rulman modellemesinde kullanılabilecek farklı yollar ve bunlar arasındaki farklar açıklanmıştır. Modelin çözülmesi ile parça genelindeki yer değiştirme sonuçlarına ek olarak, belirlenen noktalar için global ve bağıl yer değiştirme sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırma için kullanılmıştır. Ayrıca yine parça geneli ve belirlenen bölgelerde (çoğunlukla rulman bölgesi) zamana bağlı gerilme sonuçları elde edilmiştir.

İkinci aşamada rulmanlar, burç ve kazan arasındaki ilişki incelenmiştir. Sıkı geçme olarak birbirine bağlı rulmanlar ve burç arasındaki tolerans değerlerine bağlı olarak yüzey basıncı hesaplanmıştır. Daha sonrasında kazan geometrisinin bir kısmı için imalat analizi yapılmıştır. Bunun için kazanın burç ile temasta olduğu merkez bölgesinin plastik enjeksiyon ile üretimi modellenmiştir. Yapılan analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ve viskozite modeli hakkında bilgi verilmiştir. Analiz sonucunda: kalıp dolma hızı, enjeksiyon ve soğuma aşamaları sonrasında parça sıcaklıkları ve imalat sonrasında parçada meydana gelmesi öngörülen çarpılma şekilleri elde edilmiştir.

Üçüncü aşamada ise, iki farklı burç tasarım önerisi sunulmuş ve mevcut durum için gerçekleştirilen dinamik sıkma modeli ve imalat analizleri bu öneriler için de tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, seçilen aynı noktalar için deplasman değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca yeni tasarım önerilerinde mil ve burç üzerinde oluşan gerilmeler karşılaştırılmıştır. İmalat modellemesinde ise, rulmanların temasta olduğu burç malzemesi ve geometrisi değiştiği için dış bileziklerde basınç hesabı tekrarlanmıştır. Birinci model önerisinde burç geometrisinin değişmesi ile burç ile temastaki kazan için plastik enjeksiyon analizleri tekrarlanmıştır. İkinci model ise, burç malzemesinin plastik seçilmesi ile, imalat iki aşamalı olarak modellenmiştir. Öncelikle iki altıgen profil arasına plastik enjeksiyon ile fiber takviyeli poliamid

doldurularak burç üretilmiş, ardından üretilen burç kazan imalatında insert olarak kalıp içine yerleştirilmiş ve üzerine polipropilen doldurularak kazan üretimi modellenmiştir. Analizlerde; kalıp dolma hızı, enjeksiyon süresince sıcaklık dağılımı, fiber yönelimi ve çarpılma gibi sonuçlar elde edilmiştir. Bu bilgiler ışığında önerilen modellerin olumlu ve olumsuz tarafları karşılaştırılabilecektir.

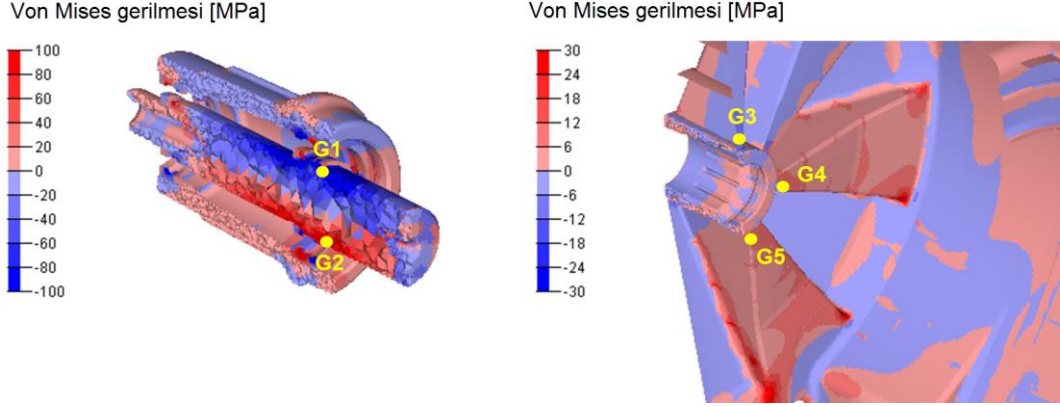
6.1 Mevcut Model ve Yeni Model Önerilerinin Karşılaştırılması

Yapılan çalışmada mevcut modele ek olarak iki tasarım önerisinde bulunulmuş ve tüm modeller için çalışma ve imalat aşamaları numerik olarak modellenmiştir. Çamaşır sıkma aşaması için yapılan sayısal çözümlemede, sistemdeki tüm parçaların zamana göre konumları incelenmiştir. Şekil 2.1’de verilen sensör konumunda; tambur, kazan ve ikisi arasında boşluğun zamana göre değişimleri incelenmiştir. Sistem 1,2’nci saniyeden sonra dengeye geldiğinde, bu parçaların ilk konumlarına göre hangi aralıklarda salınım yaptıkları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelgeden gözlemlenebileceği gibi üç modelde de salınım aralıkları ve aradaki boşluğun ilk konumuna göre aldığı değerler birbirine oldukça yakındır.

Çizelge 6.1 : 1,2’nci saniye sonrası kazan ve tambur için maksimum ve minimum yer değiştirme aralıkları

Model Numarası	Tambur [mm]		Kazan [mm]		Aradaki boşluk [mm]	
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
Mevcut model	-6.30	-15.20	-4.70	-16.83	7.44	-7.44
Birinci model önerisi	-6.22	-15.23	-4.65	-16.86	7.53	-7.53
İkinci model önerisi	-6.23	-15.99	-4.62	-16.90	7.55	-7.55

Sıkma aşamasının modellenmesi sırasında elde edilen diğer bir veri ise, makine bileşenlerinin zamana bağlı gerilme sonuçlarıdır. Modellerin daha kolay karşılaştırılabilmesi için, Şekil 6.1’de görülen ikisi mil üzerinde üçü kazan üzerinde toplam beş noktadan gerilme ölçümü yapılmıştır.



Şekil 6.1 : Gerilme karşılaştırması için seçilen 5 noktanın konumu

Verilen sonuçlar, en kritik an olan 1,465'inci saniyedeki sonuçlardır. Daha önceki kısımlarda bu anın nasıl belirlendiği açıklanmıştır. Üç farklı model için elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2'de karşılaştırılmıştır. Yer değiştirme karşılaştırmasında olduğu gibi, bu bölümde de üç model için yapılan gerilme ölçümleri benzerlik göstermektedir. Dinamik analiz sonuçları doğrultusunda, burç bölgesinde yapılacak tasarım değişikliklerinin sıkma aşamasında değişiklik yaratmadığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.2 : Belirlenen beş noktanın 1,465'inci saniyedeki gerilme değerleri

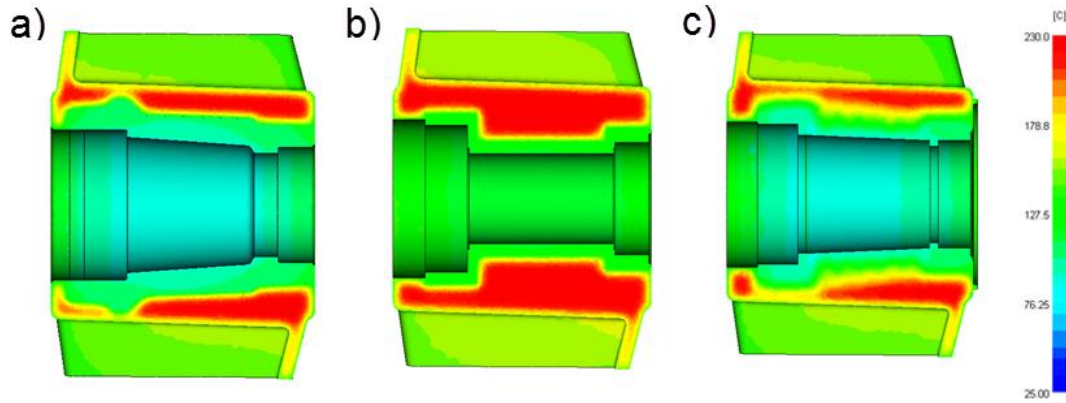
Model Numarası	G1 [MPa]	G2 [MPa]	G3 [MPa]	G4 [MPa]	G5 [MPa]
Mevcut model	-125	123	-9	8	9
Birinci model önerisi	-131	130	-8	9	7
İkinci model önerisi	-124	117	-8	9	7

Tüm tasarımlar için rulmanlar sıkı geçme olarak montajlanmıştır. Rulman temas yüzeyleri için tolerans değerleri aynı kalmasına rağmen malzeme ve geometri değişimi yüzeyde basınç değişimine neden olabilmektedir. Yapılan hesaplar sonucunda bu yüzeyler için basınç değerleri Çizelge 6.3'te verilmiştir. İç bilezik ile temastaki milde herhangi bir değişim olmadığı için, üç modelde de basınç değerleri aynı kalmıştır. Fakat dış bileziğin temasta olduğu burçta malzeme ve geometri değişimi, basınç değerlerinde değişimlere neden olmuştur. Temastaki yüzeyin cidar kalınlığındaki azalma, basıncı azaltıcı etki; malzeme elastisite modülündeki artış, basıncı arttırıcı etkide bulunmaktadır. Ters etkiler altında yüzey basınç değeri, mevcut basınç değerine yakın bir değer almıştır. Fakat istenirse yüzey toleransları değiştirilerek basınç değerleri mevcut durumdakine daha da yaklaştırılabilir.

Çizelge 6.3 : Rulmanlar için temas yüzeyindeki basınç değerleri

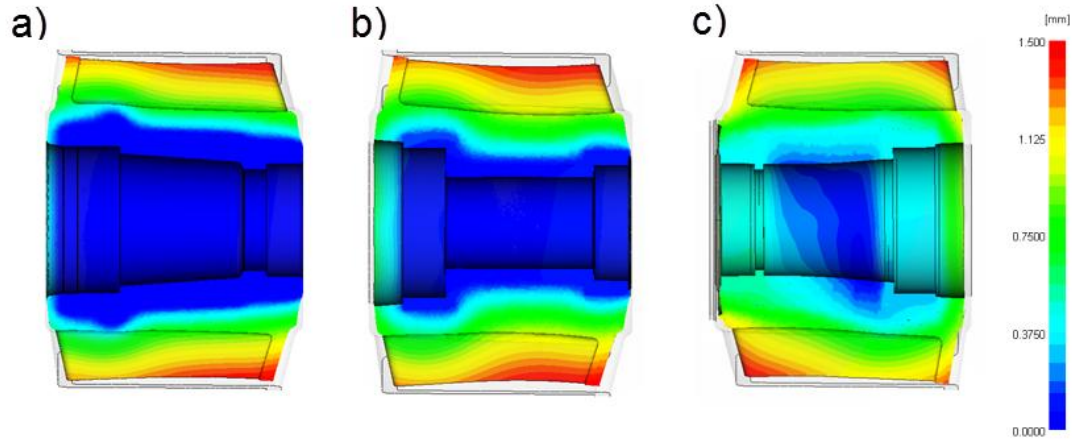
Model Numarası	Büyük rulman		Küçük rulman	
	İç bilezik [MPa]	Dış bilezik [MPa]	İç bilezik [MPa]	Dış bilezik [MPa]
Mevcut model	39.4	14.8	54.4	9.9
Birinci model önerisi	39.4	17.5	54.4	14.9
İkinci model önerisi	39.4	17.5	54.4	14.9

Şu ana kadar yapılan karşılaştırmalarda üç model de oldukça yakın değerler sergilemektedir. Önerilen modellerin üretilebilirliğini test etmek için kazanın plastik enjeksiyon imalatı modellenmiştir. Şekil 6.2’de kazanın kalıptan çıkış sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Birinci model önerisinde, kazanın merkezindeki cidar kalınlığı parçanın kalıptan çıkmadan önce yeterince soğuyamamasına neden olmaktadır. İkinci tasarım önerisinde eklenen kaburga sistemi kazan cidarını incelterek, kazanın kalıptan çıkış sıcaklığını makul değerlere indirmiştir.



Şekil 6.2 : Plastik enjeksiyon analizinde parçanın kalıptan çıkış sıcaklıkları a) Mevcut model b) Birinci model önerisi c) İkinci model önerisi

Farklı soğuma hızları için parça içinde oluşan iç gerilmeler, parça kalıptan çıktıktan sonra çarpılmalara neden olabilmektedir. Şekil 6.3’te kısmi olarak modellenen kazanda, kalıptan çıktıktan sonra meydana gelebilecek çarpılmalar farklı modeller için verilmiştir.



Şekil 6.3 : Plastik enjeksiyon sonrası parçada olması öngörülen çarpılmalar
a)Mevcut model b) Birinci model önerisi c) İkinci model önerisi

Son olarak, ikinci model önerisi için burcun plastik enjeksiyon imalatı modellenmiş ve fiber yönelimi incelenmiştir. Bu yönelim iyileştirilerek hem imalat aşamasında parçanın çarpılması önlenmiş hem de çalışma sırasında parçanın eğilme momentine karşı daha rijit olması sağlanmıştır.

6.2 Gelecek Çalışmalar ve Öneriler

Yapılan çalışma ile önden yüklemeli çamaşır makinesinin dinamik modellenmesi yapılmıştır. Burç bölgesi için yeni tasarım önerisi, yapılabilecek değişimlerden yalnızca birisidir. Örneğin tambur arka sacında elde edilen yüksek gerilmeler, yeni tasarım önerisi veya diğer saclarla olan şekil bağının değiştirilmesiyle çözülebilir. Bu model, makine genelinde uygulanabilecek iyileştirmeler için yol gösterici olabilir. Ayrıca çalışma dahilinde yapılan imalat analizleri, benzer çalışma alanları için parça tasarımı ve imalatı için çıkış noktası olabilecek niteliktedir. İleride yapılacak çalışmalarda, çamaşır makinesi dinamik modelinde burç malzeme özellikleri fiber yönelimi dikkate alınarak oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Bayraktar, F. ve Belek, H. T.** (2006). Çamaşır makinası dinamik davranışının deneysel ve teorik incelenmesi. itüdergisi.
- [2] **Wagner, F.** (2000). Dynamics of washing machine. PhD thesis, Munich Technical University, Munich. Germany.
- [3] **Agnani, A.** (2008). Dynamic Characterization of a Washing Machine: Numerical Multi-body Analysis and Experimental Validation.
- [4] **Namara, C. M.** (2012). Dynamics of textile motion in a front-loading domestic washing machine. Chemical EngineeringScience.
- [5] **Kim, H. W. ve Yoo, W. S.** (2013). MBD applications in design. International Journal of Non-Linear Mechanics
- [6] **Mitsubishi, M. ve Nagao, Y.** (2002). Washing Machine Dehydration Dynamics Analysis.
- [7] **Weili, S.** (2013). Structure analysis of inner cylinder components of drum washing machine based on Ansys/Workbench. Applied Mechanics and Materials.
- [8] **Kurvinen, E., Sopanen, J. ve Mikkola, A.** (2015). Ball Bearing Model Performance on Various Sized Rotors with and without Centrifugal and Gyroscopic Forces
- [9] **Chunjun, P.** (2009). Static Analysis of Rolling Bearings Using Finite Element Method.
- [10] **Molnar, L.** (2011). Simplified modeling for needle roller. Periodica Polytechnica.
- [11] **Kagan, V. A.** (2004). Plastics Part Design: Low Cycle Fatigue Strength Of Glass-Fiber Reinforced Polyethylene Terephthalate (PET). Journal of Reinforced Plastics and Composites.

- [12] **Klimkeit, B.** (2010). Multiaxial fatigue life assessment for reinforced polymers. International Journal of Fatigue
- [13] **Basf Şirketi.** (2003). Effects of time and temperature conditions on the tensile-tensile fatigue behavior of short fiber reinforced polyamides
- [14] **Bellenger, V., Tcharkhtchi, A. ve Castaing Ph.** (2006). Thermal and mechanical fatigue of a PA66/glass fibers composite material
- [15] **Marmara Patent Danışmanlık,** (2008). Çamaşır makinesi tambur mili yatağı, Türk Patent Enstitüsü, No: 07553
- [16] **Arçelik Anonim Şirketi,** (2012). A washing machine comprising a plastic bearing sleeve, World Intellectual Property Organization. No: WO 2012/089472 A1 Tarih: 05.07.2012
- [17] **Whirlpool Corporaton,** (2012). Washing machine with compact drum driving system, European Patent Application. No: 10183966.0 Tarih: 04.04.2012
- [18] **SKF Şirketi.** (2013) Rolling Bearing Catalogue
- [19] **Christopher, J.** (2006). Viscosity-temperature correlation for liquids, Tribology Letters
- [20] **Williams, M. L., Landel, R. F. ve Ferry, J. D.** (1955). The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids.
- [21] **ASM International.** (2000). ASM Ready Reference: Thermal Properties of Metals
- [22] **Maier, C. ve Calatuf, T.** (2008). Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook
- [23] **Autodesk Moldflow Kullanıcı Rehberi,** Alındığı tarih 15.04.2015
<http://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-50FF496F-0E3E-43CE-B30B-4B12CC24F7DE-htm.html>
- [24] **Autodesk Moldflow Kullanıcı Rehberi,** Alındığı tarih 15.04.2015
<http://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-6B3A7386-DE57-450E-BF94-B10BD629EC9B-htm.html>

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mehmet ÖZER
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyon /Sandıklı 17.11.1988
E-Posta :ozermehmet88@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Telnik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği