KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREN DİSKLERİNE UYGULANAN KAPLAMALARIN FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Otomotiv Yük. Tek. Öğrt. Abdullah DEMİR

Anabilim Dalı: Makine Eğitimi

Danışman: Prof.Dr. İbrahim KILIÇASLAN

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREN DİSKLERİNE UYGULANAN KAPLAMALARIN FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Otomotiv Yük. Tek. Öğrt. Abdullah DEMİR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01/12/2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 30/01/2009

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Prof.Dr. İbrahim KILIÇASLAN	Prof.Dr. H.İbrahim SARAÇ	Prof.Dr. Abdul Kadir EKŞİ
(.....)	(.....)	(.....)

Üye	Üye
Doç.Dr. Mehmet UÇAR	Doç.Dr. Mustafa ÇANAKCI
(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüz otomobillerinde sürüş güvenliği çok büyük önem taşımaktadır. Aktif sürüş güvenliğinde taşıtın kumandası ve frenleme yetenekleri önemli bir yer tutar. Frenler; hareket halindeki taşıtı yavaşlatmak ve durdurmak, taşıtın hızını kontrol altında bulundurmak ve diğer taraftan duran taşıtı yerinde tespit etmek üzere kullanılır. Frenler; frenleme momentinin oluşturulması ve kinetik veya potansiyel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesinin (enerji değişiminin) gerçekleştirilmesi ve oluşan bu ısının atılması gibi iki ana işlevi yerine getirir. Frenleme sırasında, fren diski ve balata malzemesi için belirlenmiş termik stabilite sıcaklığının üzerine çıkıldığında balatadaki sürtünme katsayısı düşmekte, diskte mikro ve makro değişmeler, termik yorulma odaklı çatlaklar ve deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu durum frenleme performansındaki düşmeyi de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada 4 adet 2001 model Toyota Corolla'nın orijinal ön fren diskine yüzey kaplama yöntemleriyle; metalik, sermet ve seramik kaplamalar uygulandı. Kaplama uygulanan disklerde; disk-balata çiftinin sürtünme katsayısında iyileşme; ısı oluşumunu azaltma, darbe mukavemetini artırmanın yanı sıra, adezyon, erozyon, abrazyon, korozyon ve yüzey yorulma aşınmalarının azaltılması ve termik açıdan kritik hız sınırının yükseltilmesi hedeflendi. Kaplanmış ve kaplanmamış orijinal disklerden alınan numunelerin metalografik incelesi yapıldı. Ayrıca orijinal disk ile kaplanmış diskler Link Engineering Company test laboratuarında (Detroit, USA) SAE'nin J2522 standardına uygun olarak atalet dinamometresinde "kapsamlı fren etkinlik testine" tabii tutuldu. Bu testlerde disk-balata ikilisinin aşınma, sürtünme ve sıcaklığa bağlı fren zayıflaması gibi özellikleri incelendi. Diğer yandan bu teste ek olarak tüm diskler SAE J2334 test standardına göre hızlandırılmış korozyon testine de tabii tutuldu.

Bu çalışmanın yapılmasında değerli fikirlerinden istifade ettiğim danışmanım Prof. Dr. İbrahim KILIÇASLAN'a, Prof. Dr. H. İbrahim SARAÇ'a, değerli fikirleri ve çabaları ile destekleyen Yrd. Doç. Dr. Ramazan SAMUR'a, Doç. Dr. Mehmet UÇAR'a, Yrd. Doç. Dr. Metin GÜMÜŞ'e, Prof. Dr. Abdul Kadir EKŞİ'ye, Doç. Dr. Mustafa ÇANAKCI'ya, Dr. Ahmet BAĞIŞ'a ve Mehmet Akif AKBULUT'a, Dimacom Otomotiv End. Genel Müdür Yardımcısı Ömer Sait ARSLAN'a, Arş. Gör. Ali ÇAVDAR'a, Toyota Servis Mühendisi İbrahim UĞUR'a, Toyota Gedizler Dolapdere Servis Müdürü Yusuf ÇİLO'ya, Link Engineering Company test laboratuarının değerli direktörü Carlos AGUDELO ve test koordinatörü Adam ZELESKE'ye, özellikle özverili çalışmam karşısında sabır ve desteğini esirgemeyen eşim ve oğluma da teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak, 2009

Otomotiv Yüksek Teknik Öğretmeni

Abdullah DEMİR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER v
TABLOLAR viii
SEMBOLLER, ALT İNDİSLER VE KISALTMALAR ix
ÖZET xii
ABSTRACT xiii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 6
3. MATERYAL VE METOT 14
3.1 Disklerin Seçimi 14
3.2 Kaplama Kalınlıklarının, Tozlarının ve Yöntemlerinin Seçilmesi 15
3.2.1 Kaplama tozlarının seçilmesi 15
3.2.1.1 Metco 19E kaplama tozu 15
3.2.1.2 Metco 18C kaplama tozu 16
3.2.1.3 Cr_3C_2-NiCr kaplama tozu 16
3.2.1.4 Al_2O_3-TiO_2 kaplama tozu 17
3.2.2 Kaplama Yöntemleri 19
3.2.2.1 Alevle toz püskürtme ve ergitme işlemi 21
3.2.2.2 Yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme yöntemi 22
3.2.2.3 Plazma püskürtme ile kaplama yöntemi 23
3.3 Isıl Püskürtme ile kaplanacak yüzeylerin hazırlanması 24
3.3.1 Alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle kaplanacak diskin yüzeyinin hazırlanması 25
3.3.2 HVOF yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplanacak diskin yüzeyinin hazırlanması 25
3.3.3 Plazma püskürtme yöntemiyle Al_2O_3-TiO_2 kaplanacak diskin yüzeyinin hazırlanması 25
3.4 Metalografik İnceleme 26
3.4.1 Numune hazırlama esasları 26
3.4.1.1 Kesme makinesi 27
3.4.1.2 Kesilen numunelerin soğuk bakalite alınması 27
3.4.1.3 Kaba ve ince zımparalama işlemi 27
3.4.1.4 Nihai parlatma işlemi 28
3.4.1.5 Dağlama işlemi 28
3.4.2 Kaplanan tabakanın içyapısının incelenmesi 29
3.4.2.1 Taramalı elektron mikroskop (SEM) 29
3.5 Numunelerin Mikrosertliklerinin Ölçülmesi 30
3.6 Disklerin Yanal Salgısının Ölçülmesi 30
3.7 Tartma İşlemi 31
3.8 Disk Kalınlığının Ölçülmesi 31
3.9 Test Standardı ve Fren Test Düzeneği 31
3.9.1 Fren test standartları 32
3.9.2 Testlerde kullanılan atalet dinamometresi 33
3.10 DTV'nin Ölçülmesi 36
3.11 Konikliğin Hesaplanması 36
3.12 Fren Tork Değişimi (BTV) 37

3.13 Aşınmanın Ölçülmesi....38
3.13.1 Yüzey pürüzlülük ölçümü....38
3.14 Korozyon Testi....39
3.14.1 Korozyon testi solüsyonu....40
4. KAPLAMALARIN MİKROYAPI VE MİKROANALİZLERİ....41
4.1 Dökme demir numunenin metalografik incelenmesi....41
4.2 Metco 19E kaplama numunesinin incelenmesi....42
4.3 Metco 18C kaplama numunesinin incelenmesi....48
4.4 Cr_3C_2-NiCr kaplama numunesinin incelenmesi....51
4.5 Al_2O_3-TiO_2 kaplama numunesinin incelenmesi....55
4.6 Numunelerin mikrosertlikleri....57
5. DENEYSEL ÇALIŞMA....58
5.1 Dinamometre Testi....58
5.1.1 Ön alışma (Green) etkinliği....59
5.1.2 Alışma evresi (Burnish)....59
5.1.3 Karakteristik kontrol - I....61
5.1.4 Hız/Basınç hassasiyeti....61
5.1.4.1 Hız/Basınç hassasiyeti (40 km/h)....62
5.1.4.2 Hız/Basınç hassasiyeti (80 km/h)....62
5.1.4.3 Hız/Basınç hassasiyeti (120 km/h)....63
5.1.4.4 Hız/Basınç hassasiyeti (160 km/h)....64
5.1.4.5 Hız/Basınç hassasiyeti (200 km/h)....65
5.1.5 Karakteristik kontrol - II....65
5.1.6 Soğuk frenleme kontrolü....66
5.1.7 Otobanda frenleme kontrolü I-II....67
5.1.8 Karakteristik kontrol - III....68
5.1.9 Sıcaklıkla fren zayıflaması (Fade I)....68
5.1.10 Kararlılık (Recovery) testi....69
5.1.11 Basınç hassasiyeti (~ 100 °C'de)....70
5.1.12 Artan sıcaklık hassasiyeti....70
5.1.13 Basınç hassasiyeti (~ 500 °C'de)....71
5.1.14 Karakteristik kontrol - IV....71
5.1.15 Sıcaklıkla fren zayıflaması II (Fade 2)....72
5.1.16 Karakteristik kontrol - V....73
5.1.17 Sabit frenleme ivmeli test prosedüründeki basınç değişimi....75
5.2 Disk Kalınlık Değişimi ve Koniklik İncelemesi....76
5.2.1 Disk kalınlık değişimi....76
5.2.1.1 DTV - hız hassasiyeti (160-130 km/h)....76
5.2.1.2 DTV - sıcaklıkla fren zayıflaması I....82
5.2.2 Disklerde koniklik incelemesi....87
5.2.2.1 Koniklik incelemesi - hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h)....87
5.2.2.2 Koniklik incelemesi - sıcaklıkla fren zayıflaması I (Fade I)....92
5.3 Fren Tork Değişimleri (BTV)....96
5.3.1 Alışma (Burnish) test prosedüründe BTV incelemesi....96
5.3.2 Kararlılık (Recovery) test prosedüründe BTV incelemesi....97
5.3.3 Hız basınç hassasiyeti test prosedüründe BTV incelemesi....98
5.4 Aşınma Miktarlarının Tespiti....99
5.4.1 Disklerin boyutsal aşınma miktarı....101
5.4.2 Balataların boyutsal aşınma miktarı....102
5.4.3 Disklerin kütlesel aşınma miktarı....103
5.4.4 Balataların kütlesel aşınma miktarı....104
5.4.5 Yüzey pürüzlülük ölçümü....105
5.5 Korozyon Testinin Değerlendirilmesi....106
5.6 Hata Analizi....108

5.6.1 Disk kalınlıklarındaki sapmalar 108
5.6.1.1 Disk kalınlıklarındaki sapmaların BTV'ye etkisi 108
5.6.2 Disklerin salgılarındaki sapmalar 111
5.6.3 Aşınma ölçümünde hata analizi 111
5.6.4 Testlerdeki lineerlik, tekrarlanabilirlik, hassasiyet ve belirsizlik oranları 112
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 113
KAYNAKLAR 119
EKLER 125
ÖZGEÇMİŞ 139

ŞEKİLLER

Şekil 1.1: Basit bir diskli frenin kesit resmi 1
Şekil 1.2: Çeşitli diskli fren tipleri 2
Şekil 2.1: Fren tork değişimini oluşturan faktörler ve insan-taşıt etkileşimi 7
Şekil 3.1: 2001 model Toyota Corolla'nın ön fren diski ve balatası 14
Şekil 3.2: Isıl püskürtme işlem sırası 20
Şekil 3.3: Püskürtme ünitesi 21
Şekil 3.4: HVOF püskürtme prosesi 22
Şekil 3.5: Plazma püskürtme kaplama yöntemi 24
Şekil 3.6: Metalografik inceleme için kaplanmış disklerden alınan numuneler 26
Şekil 3.7: Mecatome kesme makinesi 27
Şekil 3.8: Metkon Gripo 2 zımpara çarkı 28
Şekil 3.9: Struers Dap-7 marka parlatma çarkı 28
Şekil 3.10: Bakalite alınmış ve dağlanmış numune örnekleri 29
Şekil 3.11: Jeol JSM-5910 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) 29
Şekil 3.12: Mikrosertlik ölçme cihazı 30
Şekil 3.13: Disklerin komparatörle salgılarının ölçülmesi 30
Şekil 3.14: Testlerde kullanılan LINK marka tam ölçekli atalet dinamometresi 34
Şekil 3.15: DTV ve koniklik ölçümünde kullanılan kapasitif propların konumlandırılması 37
Şekil 3.16: Orijinal diskin test sonrası aşınma ölçümü konumları 38
Şekil 3.17: SAE J2334 Korozyon Test Döngüsü - Otomatik operasyon (1 gün) 39
Şekil 4.1: Gri dökme demir altlık malzemenin enine kesitinin SEM mikrografı 41
Şekil 4.2: Gri dökme demir altlık malzemenin EDS analizi 42
Şekil 4.3: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin SEM mikrografı 42
Şekil 4.4: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin EDS analizi (Kaplama Bölgesi - 1. Bölge) 43
Şekil 4.5: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin EDS analizi (2.Bölge) 43
Şekil 4.6: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin EDS analizi (Altlık malzemenin kaplamaya yakın kısmı - 3. Bölge) 44
Şekil 4.7: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan diğer SEM mikrografları 44
Şekil 4.8: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografı 45
Şekil 4.9: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 1 numaralı bölgesinin EDS analizi 46
Şekil 4.10: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 2 numaralı bölgesinin EDS analizi 46
Şekil 4.11: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 3 numaralı bölgesinin EDS analizi 46
Şekil 4.12: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 1 numaralı bölgesinin EDS analizi 47

Şekil 4.13: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan diğer SEM mikrografları 47
Şekil 4.14: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinden yapılan genel EDS analizi 47
Şekil 4.15: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan SEM mikrografları 48
Şekil 4.16: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinin 1 numaralı bölgesinin EDS analizi 49
Şekil 4.17: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinin 2 numaralı bölgesinin EDS analizi 49
Şekil 4.18: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinin 3 numaralı bölgesinin EDS analizi 49
Şekil 4.19: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan diğer SEM mikrografları 50
Şekil 4.20: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografları 50
Şekil 4.21: HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin SEM mikrografı 51
Şekil 4.22: HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin diğer SEM mikrografları .. 52
Şekil 4.23: HVOF yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplamanın parlatılmış enine kesitinin ve altlık gri dökme demirden arabağlayıcı NiCr tabakaya Mn ve Si difüzyonunun EDS analizi 52
Şekil 4.24: HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin NiCr arabağlayıcı merkezinden alınmış EDS analizi 53
Şekil 4.25: NiCr arabağlayıcı ile Cr_3C_2-NiCr arayüzeyinden alınmış EDS analizi 53
Şekil 4.26: Gri dökme demir altlık malzemenin EDS analizi 54
Şekil 4.27: Cr_3C_2-NiCr kaplamanın parlatılmış yüzeyden alınan SEM mikrografları 54
Şekil 4.28: Plazma püskürtme yöntemiyle gri dökme demir üzerine kaplanmış NiCr arabağlayıcı ve Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın enine kesitinin SEM mikrografları 55
Şekil 4.29: Plazma püskürtme yöntemiyle kaplamış Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın parlatılmış yüzeyden alınan SEM mikrografları 56
Şekil 4.30: Plazma püskürtme yöntemiyle kaplamış Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın yüzeyinden EDS analizi 56
Şekil 4.31: Plazma püskürtme yöntemiyle kaplamış NiCr arabağlayıcının parlatılmış enine kesitinden EDS analizi 57
Şekil 4.32: Mikrosertlik ölçme cihazı 57
Şekil 5.1: Deney disklerinin ön alışma (green) etkinliği değişiminin incelenmesi 60
Şekil 5.2 Deney disklerinin alışma (burnish) davranışı 60
Şekil 5.3: Deney disklerinin karakteristik kontrolü I 61
Şekil 5.4: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (40 km/h) kontrolü 62
Şekil 5.5: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (80 km/h) kontrolü 63
Şekil 5.6: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (120 km/h) kontrolü 64
Şekil 5.7: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (160 km/h) kontrolü 65
Şekil 5.8: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (200 km/h) kontrolü 66
Şekil 5.9: Deney disklerinin karakteristik kontrolü II 66
Şekil 5.10: Deney disklerinin soğuk frenleme kontrolü 67
Şekil 5.11: Deney disklerinin otoyol frenleme kontrolü I-II 67
Şekil 5.12: Deney disklerinin karakteristik kontrolü III 68
Şekil 5.13: Deney disklerinin sıcaklıkla fren zayıflaması I (Fade I) kontrolü 69
Şekil 5.14: Deney disklerinin kararlılık (Recovery) testi 69
Şekil 5.15: Deney disklerinin basınç hassasiyeti kontrolü 70
Şekil 5.16: Deney disklerinin artan sıcaklık hassasiyeti kontrolü 71
Şekil 5.17: Deney disklerinin basınç hassasiyeti (500 °C) kontrolü 72
Şekil 5.18: Deney disklerinin karasteristik kontrolü 72

Şekil 5.19: Deney disklerinin sıcaklıkla fren zayıflaması II (Fade II) kontrolü 73
Şekil 5.20: Deney disklerinin karakteristik kontrolü - V 74
Şekil 5.21: Sabit frenleme ivmesine sahip test prosedürlerindeki basınç değişimi ... 75
Şekil 5.22: Tüm disklerin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) ortalama DTV değerleri 76
Şekil 5.23: D1 diskinin DTV'si - Hız hassasiyeti (160-130 km/h) 77
Şekil 5.24: D2 diskinin DTV'si - Hız hassasiyeti (160-130 km/h) 78
Şekil 5.25: D3 diskinin DTV'si - Hız hassasiyeti (160-130 km/h) 79
Şekil 5.26: D4 diskinin DTV'si - Hız hassasiyeti (160-130 km/h) 80
Şekil 5.27: D5 diskinin DTV'si - Hız hassasiyeti (160-130 km/h) 81
Şekil 5.28: Sıcaklıkla fren zayıflaması I prosedüründeki ortalama DTV'leri 82
Şekil 5.29: D1 diskinin DTV'si - Sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürü 83
Şekil 5.30: D3 diskinin DTV'si - Sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürü I 84
Şekil 5.31: D4 diskinin DTV'si - Sıcaklıkla fren zayıflaması I 85
Şekil 5.32: D5 diskinin DTV'si - Sıcaklıkla fren zayıflaması I 86
Şekil 5.33: D1 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi 88
Şekil 5.34: D2 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi 88
Şekil 5.35: D3 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi 89
Şekil 5.36: D4 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi 90
Şekil 5.37: D5 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi 91
Şekil 5.38: D1 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi 92
Şekil 5.39: D3 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi 93
Şekil 5.40: D4 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi 94
Şekil 5.41: D5 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi 95
Şekil 5.42: Alışma (Burnish) test prosedüründe diskin son sıcaklığı ve BTV değişimi 96
Şekil 5.43: Alışma test prosedüründe BTV'nin ort. sürtünme katsayısı ile değişimi . 97
Şekil 5.44: Kararlılık testinde diskin sıcaklığı ve BTV değişimi 97
Şekil 5.45: Kararlılık testinde BTV'nin OSK ile değişimi 98
Şekil 5.46: Hız hassasiyeti prosedüründe BTV'nin diskin son sıcaklığına bağlı değişimi 98
Şekil 5.47: Hız hassasiyeti bölümünde BTV'nin OSK'ye bağlı değişimi 99
Şekil 5.48: Tüm disklerin test sonrası aşınma durumu 100
Şekil 5.49: Testler sonrası tüm balataların aşınma durumları 101
Şekil 5.50: Disklerin mm cinsinden aşınma miktarları 102
Şekil 5.51: Disklerin mm cinsinden kayıp miktarları 102
Şekil 5.52: Balataların mm cinsinden aşınma miktarları (artçı/dış) 103
Şekil 5.53: Balataların mm cinsinden aşınma miktarları (öncü/iç) 103
Şekil 5.54: Disklerin kütlesel aşınma miktarları 104
Şekil 5.55: Balataların kütlesel aşınma miktarları 105
Şekil 5.56: Surfometre ile disklerin 4 konumundan ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri 105
Şekil 5.57: SAE J2334 korozyon testi sonucunda disklerdeki kütle değişimi 106
Şekil 5.58: SAE J2334 korozyon testi sonucunda disklerdeki kütle artış miktarı 106
Şekil 5.59: SAE J2334 korozyon testi sonucunda disklerdeki korozyon durumu ... 107
Şekil 5.60: Diskin iç ve dış yüzeylerinde sapma miktarları 108
Şekil 5.61: Fren tork değişiminin incelenmesi 110
Şekil 5.62: Disklerdeki yanal salgılardaki sapmalar 111

TABLOLAR

Tablo 3.1: Deney disk-balatasının geometrik boyutları 14
Tablo 3.2: Deney diskinin ve kaplamaların özellikleri 18
Tablo 3.3: Oksijen-asetilen gazının özellikleri 22
Tablo 3.4: Metco 19E ve 18C tozlarının alevle püskürtmeyle kaplama parametreleri 22
Tablo 3.5: Cr_3C_2-NiCr tabakası oluşturmak için kullanılan püskürtme parametreleri 23
Tablo 3.6: Seramik kaplamanın plazma püskürtme parametreleri 23
Tablo 3.7: Isıl püskürtme tekniklerinin özellikleri 24
Tablo 3.8: Disklerin iç ve dış çalışma yüzeyinden ölçülen yanal salgı miktarları 31
Tablo 3.9: 293-344 seri numaralı Mitutoyo mikrometrenin teknik özellikleri 31
Tablo 3.10: Testlerde kullanılan atalet dinamometresinin teknik spesifikasyonları ve ölçüm parametreleri 35
Tablo 3.11: DTV ölçümünde kullanılan kapasitif propların teknik özellikleri 36
Tablo 3.12: Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan Pocket Surf®'un teknik özellikleri 39
Tablo 3.13: ESX-3CA marka 408 litrelik aşırı-soğutma sıcaklık ve nem odası 40
Tablo 3.14: Disklere uygulanan korozyon testi solüsyonu 40
Tablo 5.1: SAE J2522 dinamometre genel fren etkinlik testi 58
Tablo 5.2: Disk kalınlık değişiminin BTV'ye etkisinin incelendiği testi prosedürleri 109
Tablo 5.3: Hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) test prosedürünün beşinci frenlemesinde diskin bir devrindeki ölçüm sayısı 109
Tablo 5.4: Birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürünün onuncu frenlemesinde diskin bir devrindeki hesaplamalar 110
Tablo 5.5: Disk kalınlık değişiminin fren tork değişimine etkisi 110
Tablo 5.6: Tartı cihazı hassasiyetinden kaynaklanan ölçüm hatası 111
Tablo 5.7: Ölçümlerde lineerlik, tekrarlanabilirlik, hassasiyet ve belirsizlik oranları 112

SEMBOLLER, ALT İNDİSLER VE KISALTMALAR

Semboller

f	: Lastik Tekerleğin Tutunma (Aderans) Katsayısı
α	: Eğim, Termik Difüzifite, Orantı Faktörü (Proportionality Factor)
δ	: Kalınlık (Balatanın ve Balata Destek Plakasının)
ε	: Emisivite
γ	: Oransal Isı Faktörü (Rölatif Frenleme Enerjisi - Relative Braking Energy)
μ	: Sürtünme Katsayısı
ν	: Kayma Hızı, Taşıt Hızı
ρ	: Yoğunluk
σ	: Stefan-Boltzman Sabiti, Sapma
Σ	: Toplam
ω	: Dönen Parçaların Açısal Hızı
Δt	: Fark Zaman
∂	: Diferansiyel Operatör
ρ	: Yoğunluk
A	: Süpürülen Yüzey Alanı, Yüzey Alanı
a	: "g" Biriminde Yavaşlama İvmesi, İvme
B	: Boy
c	: Özgül Isı
D	: Fren Diskinin Dış Çapı, Genişlik
D1	: Orijinal Disk
D2	: Metco 19E Kaplı Disk
D3	: Metco 18C Kaplı Disk
D4	: Krom Karbür-Nikel Krom Kaplı Disk
D5	: Alümina-Titanya Kaplı Disk
E	: Enerji, Kinetik Enerji, En
F	: Kuvvet
g	: Yerçekimi İvmesi
h	: Yükseklik, Işınım ve Taşınım Transfer Katsayısı
H	: Yüksek - High
I	: Dönen Parçaların Kütlesel Atalet Momenti
k	: Dönen Kütleler için Düzeltme Faktörü, Isı İletim Katsayısı
L	: Taşıtın Yokuş Üzerinde Kat Ettiği Mesafe, Uzunluk, Düşük - Low
m	: Taşıtın Kütlesi
n	: Devir Sayısı
p	: Uygulanan Basınç, Normal Basınç
P	: Güç
q	: Isı Akısı
r	: Yarıçap, Lastik Yarıçapı
R	: Termik Direnç
s	: Yol
t	: Zaman
y	: Ölçüm Değerleri
Y	: Yükseklik
Z	: Ölçüm Sayısı
Al_2O_3-TiO_2	: Alümina-Titanya
Al_2O_3-TiO_2	: Alümina-Titanya
$CaCl_2$	: Kalsiyum Klorür
Cr_3C_2-NiCr	: Krom Karbür-Nikel Krom

HNO_3	: Nitrik Asit
NaCl	: Sodyum Klorür
$NaHCO_3$	: Sodyum bikarbonat
NiCr	: Nikel Krom
SiC	: Silikon Karbit
WC	: Volfram/Tungsten Karbür

Alt İndisler

∞	: Çevre
1, i	: İlk/Başlangıç
2	: Son
c	: Taşınım
f	: Fren[leme]
mak	: Maksimum
ort	: Ortalama
P	: Balata
R	: Disk, Yuvarlanma, Isı Işınımı
s	: Destek Plakası, Son
top	: Toplam
y	: Y Ekseni
z	: Z Ekseni

Kısaltmalar

AK	: Avrupa'daki Otomotiv Mühendisleri Tarafından Geliştirilen Bir Dinamometre Testi
Al-MMK	: Alüminyum Metal Matriks Kompozit
ASME	: Amerikan Makine Mühendisleri Derneği
BEEP	: Fren Değerlendirme Prosedürü - Brake Effectiveness Evaluation Procedure
BPV	: Fren Basınç Değişimleri
BTV	: Fren Tork Değişimi
CGI	: Kompakt Grafitli Gri Dökme Demir
DIN	: Alman Endüstri Normu (Deutsche Industrie-Norm)
DTV	: Disk Kalınlık Değişimi
ECE	: Avrupa Birleşmiş Milletler Ekonomik Komisyonu - United Nations: Economic Commission for Europe)
EDS	: Enerji Dispersif Spektrometresi
FGM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme - Functionally Gradient Material
FMVSS	: Federal Motorlu Taşıtlar Emniyet Standartları (Federal Motor Vehicle Safety Standards)
GI	: Gri Dökme Demir
GI250Ti	: Titanyum Alaşımlı Gri Dökme Demir
GIHC	: Yüksek Karbonlu Gri Dökme Demir
HRC	: Rockwell Sertlik Değeri
HV	: Vickers Sertlik
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtıyla Püskürtme - High Velocity Oxygen Fuel
IP	: Uluslararası Koruma Kodu - International Protection Rating
ISO	: Uluslararası Standartlar Organizasyonu - International Organization for Standardization
JASO	: Japon Otomotiv Standartlar Organizasyonu - Japan Automobile Standards Organization
JIS	: Japon Endüstri Standardı - Japanese Industrial Standard
LCD	: Sıvı Kristal Ekran - Liquid Cristal Display
METCO 18C	: Co-27Ni-18Cr-6Mo-3.5Si-3B-2.5Fe-0.2C
METCO 19E	: Ni-16Cr-4Si-4B-4Fe-2.4Cu-2.4Mo-2.4W-0.5C

NAO	: Asbest İçermeyen Organikler - Non-Asbestos Organic
NHTSA	: Ulusal Otoyol Trafik Güvenliği Kurumu - National Highway Traffic Safety Administration
OEM	: Orijinal Ekipman Üreticileri
OSK	: Ortalama Sürtünme Katsayısı
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
RH	: Bağıl Nem (Relative Humudity)
SAE	: Amerikan Otomotiv Mühendisler Birliği (Society of Automotive Engineers)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu - Scanning Electron Microscope
SK	: Sürtünme katsayısı - Coefficient of Friction
Stellite	: Co-30Cr-12W-2,4C
TE	: Termo-Elastik
TEI	: Termo-Elastik Karasızlık
TÖ	: Tam Ölçek
UNECE	: Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomi Komisyonu Yönetmeliği – United Nations Economic Commission for Europe
USA	: Amerika Birleşik Devletleri (ABD) - United States of America

FREN DİSKLERİNE UYGULANAN KAPLAMALARIN FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Abdullah DEMİR

Anahtar Kelimeler: Kaplanmış disk, frenleme performansı, frenlemenin tribolojisi, disk-balata arayüzü, disk kalınlık değişimi (DTV), fren tork değişimi (BTV), sürtünme katsayısı, sıcaklıkla fren zayıflaması (fading), SAE J2522, kapsamlı fren etkinlik testi, SAE J2334 korozyon testi.

Özet: Bu çalışmada 5 adet 2001 model Toyota Corolla'nın orijinal ön fren diski kullanıldı. Bu disklerden 4 tanesi; metalik (Metco 19E ve 18C), sermet ve seramik ile kaplandı. İki disk, sırası ile 1'er mm kalınlığında alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak Metco 19E ve Metco 18C metalik tozlarla kaplandı. Diğer iki diske de NiCr arabağlayıcı kaplandıktan sonra; birincisinde plazma sprey yöntemiyle Al_2O_3-TiO_2, diğerine de HVOF (Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtıyla Püskürtme) yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplandı. Çalışmada yapılan tüm kaplamalardan ve orijinal diskten alınan numuneler standart metalografik incelemeye tabii tutuldu. Ayrıca orijinal ve kaplanmış diskler Link Engineering Company test laboratuarında (Detroit, USA) tam ölçekli atalet dinamometresi ile SAE'nin J2522 fren etkinlik testine alındı. Tüm testlerde; frenleme sayısı, çevrim zamanı, frenleme başlangıç hızı, bırakma hızı, frenleme süresi, frenleme ivmesi, frenleme torku, uygulama basıncı, sürtünme katsayısı, diskin sıcaklığı, iç ve dış balata sıcaklığı gibi parametreler toplam 276 frenleme ile kaydedildi. Her bir diskin toplam test süresi yaklaşık 41.400 saniye tutmuştur. Bu sürenin ortalama 39.600 saniyesi diskin rejim haline getirilmesi için harcanmıştır. Geri kalan ortalama 1770 saniye de etkin frenleme testine harcanmıştır. Bu parametrelere ek olarak bazı test bölümlerinde ise koniklik, frenleme tork değişimi ve disk kalınlık değişimi de ölçülmüştür. Ayrıca testler başlamadan önce ve testler tamamlandıktan sonra disk ve balataların aşınma oranları hem boyutsal hem de kütlesel olarak tespit edilmiştir. Daha sonra tüm diskler SAE J2334 test standardına göre hızlandırılmış korozyon testine tabii tutulmuştur. Yapılan tüm testlerde; kaplamalı diskler hem korozyon direnci hem de sürtünme katsayısı (seramik disk hariç) açısından orijinal diskten daha iyi performans göstermiştir.

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BRAKING PERFORMANCE OF COATED BRAKE DISCS/ROTORS

Abdullah DEMİR

Keywords: Coating disc/rotor, braking performance, tribology of braking, rotor-pad interface, disc thickness variation (DTV), brake torque variation (BTV), coefficient of friction, fade, SAE J2522, global brake effectiveness, SAE J2334 Cosmetic Corrosion Test.

Abstract: In this study five front brake rotors of the car, 2001 model Toyota Corolla, has been used. Four of these has been coated with metallic (Metco 19E and 18C), sermet and ceramics by using various coating methods. Two rotors have been coated respectively with Metco 18C and Metco 19E metallic powder at 1 mm thickness using flame spray and melting method. After the other two rotors were coated with NiCr layer; by using plasma spray method, the first one has been coated with Al_2O_3-TiO_2 and the second one has been coated with Cr_3C_2-NiC using HVOF method. Samples taken from all coatings made in this study and OEM rotor have been subjected to metallographic investigation. Furthermore, OEM discs and coated discs have been subjected to J2522 global brake effectiveness test of SAE with full-scale inertia dynamometer in Link Testing Laboratory (Detroit, USA). In all tests; parameters as braking number, cycle time, brake speed, release speed, stop time, deceleration, braking torque, pad actuator pressure, coefficient of friction, rotor temperature, and inpad/outpad temperature have been saved for 276 brakings. While total test time of each disc was 41400 s, averagely 1770 seconds of this time was determined as effective braking time. In addition to these parameters, in some test sections, coning, brake torque variation and disc thickness variation were also measured. Furthermore, before and after tests, abrasion rate of rotors and pads were measured in “mm” and “g”. Additionally, all rotors were subjected to cosmetic corrosion test according to SAE J2334 test standards. In all tests; coated rotors showed higher performance than OEM rotor in respect of corrosion resistance and coefficient of friction (except of ceramics disc).

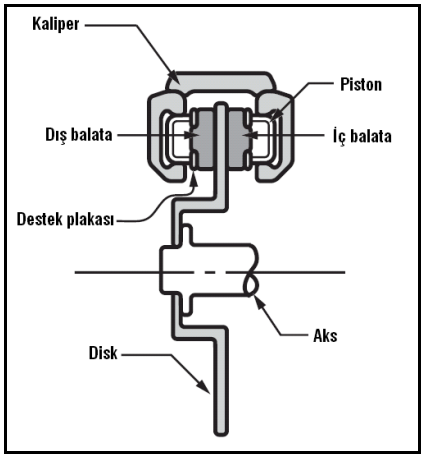
1. GİRİŞ

Frenler, güvenli sürüş için taşıtlarda bulunan en önemli aktif emniyet donanımdır. Hareket halindeki taşıtı yavaşlatmak, durdurmak, taşıtın hızını kontrol altında tutmak ve duran taşıtı yerinde sabit tutmak amacıyla kullanılır.

Taşıtlarda tekerlek freni olarak sürtünmeli frenler kullanılmaktadır. Genel olarak doğrudan doğruya tekerleğe bağlı olan bu frenler iki ana fonksiyonu yerine getirirler.

- Fren momentinin oluşturulması,
- Enerji değişiminin gerçekleştirilmesi (kinetik veya potansiyel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi) ve oluşan ısının atılması [1].

Diskli frenlerde, prensip olarak tekerlekle eş eksenli olarak monte edilmiş olan metal bir disk, tekerlekle birlikte dönmektedir. Kaliper adı verilen ve tekerlek askı kollarına bağlı olan U biçimli parça diski Şekil 1.1'deki gibi kavrar. Kaliperin iç kısımlarında diskin iki yüzeyine yaslanan balatalar frenleme sırasında hidrolik basınç ile diski her iki yönden eşit kuvvetle sıkarlar.



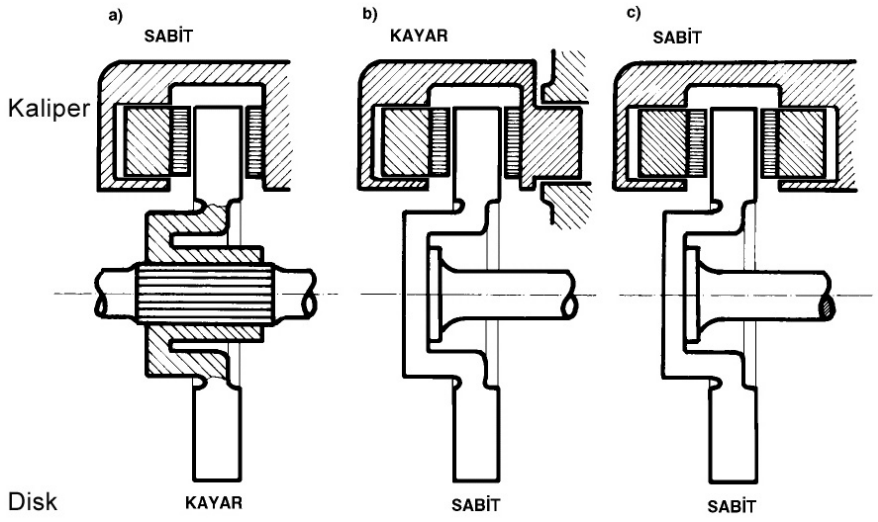
Şekil 1.1: Basit bir diskli frenin kesit resmi [2]

Balataların diski her iki yandan eşit kuvvetle sıkıştırabilmesi için diskin, kaliperin, veya her iki balatanın eksenel yönde hareketli olması gerekir. Hareketlilik açısından konstrüktif yapılara göre farklılıklar gösteren diskli frenlerin üç değişik tipi Şekil

1.2'de gösterilmiştir. Taşıt tekniğinde diskli frenlerin gelişmesi sabit kaliperli tiple başlamıştır. Eksenel yönde hareketsiz olarak monte edilmiş olan kaliperin her iki yanında karşılıklı duran fren silindirlerindeki hidrolik basınçları eşittir. Diskin eksenel yöndeki balanssızlığı pistonların eksenel serbestlik hareketleri ile dengelenir. Günümüzde Şekil 1.2-b'deki kayar kaliperli konstrüksiyon, kayma bölgelerinin korozyon ve kirden iyi korunabiliyor olması nedeniyle daha çok kullanılmaktadır. Kayar kaliperli konstrüksiyonun avantajları:

- Fren hidroliği ile dolu bir adet hücre, seyir rüzgarıyla soğutulabilmektedir. Bu sayede ısınma ile ortaya çıkabilecek hidrolik akışkanın buharlaşma tehlikesinin önüne geçilmiştir.

- Fren, taşıtın daha dışına doğru yerleştirilebildiğinde ön aksta direksiyon pimi de daha dışa doğru eğilebilmekte ve negatif yuvarlanma yarıçapı elde edilebilmektedir.



Şekil 1.2: Çeşitli diskli fren tipleri

Günümüzdeki bütün sürtünmeli frenlerde, balataların aşınmasından kaynaklanan boşluklar otomatik boşluk ayarlayıcısı ile giderilir. Bu sayede balatanın diske her zaman çok yakın durması sağlanır. Boşluğun küçük olması fren pedalındaki boşluğun da azalmasını ve gecikme sürelerinin kısalmasını sağlar [1].

Diskin kaliper tarafından örtülü olmayan kısımları hava akımlarına açık olduğundan kolayca soğutulmaktadır. Çamur ve balata tozları merkezkaç kuvvetle ya da hava akımı ile temizlenir. Fren etki süresini uzatan nem oldukça hızlı buharlaştığından frenleme etki süresi çabuklaşır.

Fren sistemi elemanlarının çok çabuk ısınmasını önlemek için ısı depolama kapasitelerinin büyük olması gerekmektedir. Bu kapasite özgül ısı kapasitesi ile fren ağırlığının çarpımı ile elde edilir. Bu durumda fren sisteminin büyük ve özgül ısı kapasitesinin de yüksek olması uygundur. Ancak taşıt konstrüksiyonu ile ilgili sınırlayıcı faktörler nedeniyle özellikle otomobillerde fren sistemleri fazla büyük seçilememektedir. Böylece alüminyum alaşımları kullanılarak bu malzemenin demire oranla üç katı daha yüksek olan ısı kapasitelerinden yararlanılabilmektedir. Ayrıca ısı iletim katsayısı da büyük olan alüminyumun kullanımında sıcaklık dağılımı daha dengeli olabilmektedir. Ancak sürtünme elemanı olarak alüminyum fazla yumuşak olduğundan sürtünme yüzeyinin kaplanması yoluna gidilmelidir. Fren sistemlerinde, frenleme esnasında oluşan ısının mümkün olduğunca hızlı bir şekilde sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Böylece frenleme sırasında sistemin sıcaklığının hızlı artması önlendiği gibi frenleme işlemi tamamlandığında sistemde hızlı bir soğuma sağlanmış olur. Bu nedenle fren sistemlerinin yerleştirildiği bölgenin kapalı olmaması gerekir. Isı transferinin artırılabilmesi için fren sistemleri seyir rüzgârına maruz kalacak şekilde yerleştirilmelidirler. Ayrıca ısı transfer yüzey alanının arttırılması ısının sistemden hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar. Bu amaçla diske ve kaliper sistemine soğutma kanalları ve kanatçıkları uygulanmaktadır.

Frenleme esnasında disk ve balata arayüzünde oluşan yüksek sıcaklıklar; frenlerin zayıflamasına, erken aşınmalara, fren sıvısının buharlaşmasına, yatak arızalarına, termik çatlaklara, termik olarak uyarılmış titreşimlere ve gürültüye sebep olmaktadır [3]. Bu gibi mahsurların önüne geçmenin en uygun yöntemi frenleme esnasında oluşan ısının mümkün mertebe en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılması ya da disk-balata ikilisinin daha yüksek sıcaklıklara dayanımının sağlanmasıdır. Frenleme esnasında oluşan yüksek sıcaklıkların ortaya çıkaracağı mahsurları azaltmak ve frenleme performansını artırmak amacıyla fren sistemine hem konstrüktif hem de metalürjik bazı uygulamalar yapılmaktadır. Bu amaçla disklere; delik, kanatçık, kanal, delik-kanal kombinasyonu ve dört soğutma yüzeyli disk gibi konstrüktif uygulamalar yapılabilmektedir. Ayrıca bazı farklı metalürjik ve kimyasal uygulamalar da yapılmaktadır. İnce grafit tabakalı dökme demir, yüksek karbonlu grafit tabakalı

dökme demir [4], alüminyum metal matriksli kompozit (Al-MMK) [5-13], dökme çelik [4], SiC içeren alüminyum metal matriksli kompozit [14], karbon-karbon kompozit [15], karma (mixed) yapı [16], seramikler [15,17] ve metalik kaplamalar [18] bu uygulamalardandır.

Günümüze kadar bu alanda yapılan çalışmalarda, ağırlıklı olarak disk-balata ikilisinin sürtünme davranışı incelemelerinde disk ile balatanın kimyasal kompozisyonu üzerine odaklanılmış ve bu doğrultuda çalışmalar yapılmıştır. Disklere uygulanan kaplamalara yönelik çalışmalarda ise özellikle farklı kaplama metodu ve değişik kaplama malzemeleri üzerine çalışmalar yapılmasına rağmen; alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak Metco 19E ve 18C metalik tozlarla fren disk yüzeylerinin kaplanması alanında detaylı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Aynı şekilde dökme demir üzerine NiCr arabağlayıcısı kullanılarak plazma sprey yöntemiyle Al_2O_3-TiO_2 ve HVOF yöntemiyle de Cr_3C_2-NiCr kaplama uygulaması alanında da detaylı bir çalışma görülememiştir. Metco 19E sert yüzey kaplama tozu; aşınma ve korozyonun birlikte görüldüğü yerlerde, aşınmış parçaların yeniden kazanılmasında ve orijinal parçaların aşınmalarını önlemek amacıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir. Metco 18C kaplama tozu ise; yüksek sıcaklıklarda iyi derecede aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir. Cr_3C_2-NiCr (Krom karbür-nikel krom) kaplama tozu ise yüksek sıcaklıkta; kayma, kazımalı aşınma (fretting), abrazyon ve erozyon aşınmalarına karşı dirençlidir. Al_2O_3-TiO_2 (Alümina-titanya) kaplama tozu ile yapılan kaplamalar; yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısısal kararlılık ve korozyon direnci iyi olan uygulamalardır. Bu çalışmanın gayesi yukarıda özellikleri bahsedilen kaplama metotları ve malzemelerinin fren disklerine uygulanması ile frenleme performansına etkisini incelemektir.

Bu çalışmada disk-balata çiftinin hem sürtünme ve termik davranışını iyileştirmek hem de frenleme performansını arttırmak için 4 adet 2001 model Toyota Corolla'nın orijinal ön fren diski; metalik, sermet ve seramik tozlarla kaplanmıştır. Orijinal disk ve dört adet kaplanmış disk SAE J2522 test standardına göre fren test dinamometresinde fren etkinlik testine tabii tutulmuştur. Bu testlerde disk-balata ikilisinin; ön alışma etkinliği (green effectiveness), hız duyarlılığı (speed sensitivity), sıcaklığa bağlı fren zayıflaması direnci (fade resistance), sürtünmenin iyileştirilmesi (friction recovery), sürtünme kararlılığı (friction stability), fren tork değişimleri (BTV) ve disk kalınlık değişimleri (DTV) incelenmiştir. Bu teste ek olarak; tüm diskler SAE J2334 standardına göre hızlandırılmış korozyon testide uygulanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünü literatür araştırması oluşturmaktadır. Bu bölümde hem disk-balata ikilisinin BTV, DTV, sürtünme, aşınma ve korozyona direnci gibi özellikleri hem de disklere uygulanan kaplamalar üzerinde yapılan araştırmalar incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; kullanılan metotlar ve materyaller tanıtıldı. Disklerin seçimi, kaplama malzemelerinin seçimi, kaplama yöntemleri ve püskürtme parametrelerinin tespiti, metalografik inceleme için numune hazırlamanın esasları, kaplamaların metalografik incelenmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu, numunelerin sertlik ölçümü, diskin yanal çarpıklığının (salgısının) ölçülmesi, tartma işlemi, fren test standartları ve SAE J2522 test standardının seçilmesi, atalet dinamometresi, dinamometrenin teknik spesifikasyonları ve ölçüm parametreleri, DTV, BTV, koniklik ve yüzey pürüzlülüğünün tespitinde kullanılan materyal ve metotlar tanıtılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde; kaplanan disklerin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobuyla (Scanning Electron Microscope-SEM) incelenip, mikroanalizleri ise enerji dispersif spektrometresi (EDS) ile yapılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde; SAE J2522 test standardına göre yapılan testlerdeki verilerin grafiklenmesi ve yorumlanması yapıldı. Bu bölümde diskin son sıcaklığı ile sürtünme katsayısı değişimleri, DTV, koniklik, BTV, yüzey pürüzlülüğü, korozyon testleri, disk-balata çiftinin hem kütlesel hem de boyutsal aşınma miktarları incelenmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde, çalışmadan elde edilen sonuçlar izah edilerek, çalışmanın devamı olabilecek araştırmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

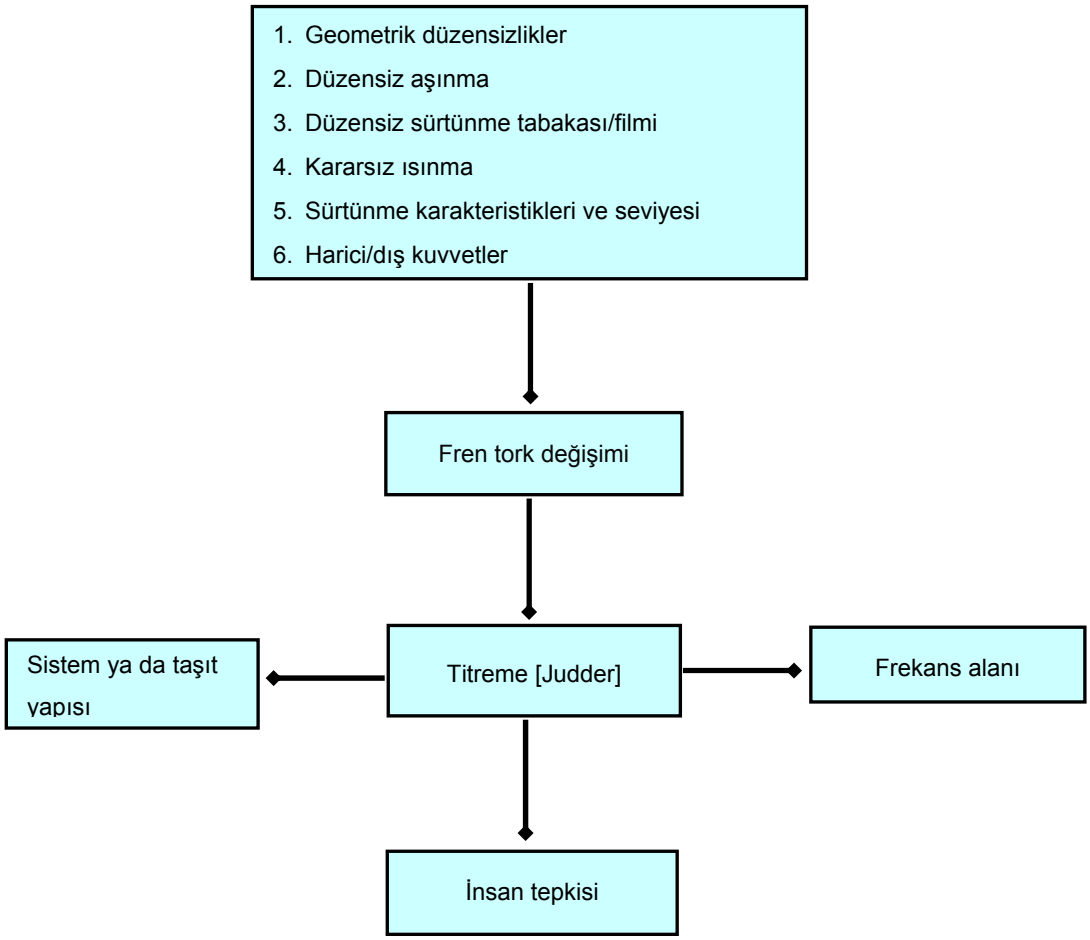
Çalışmanın ekler bölümünde ise; frenleme mesafesinin taşıtın hızına, yüküne, yol ve lastik durumuna ve fren zayıflamasına bağlı olduğuna değinildi. Literatürdeki bazı kabullere dayalı olarak gerçek taşıt verileriyle, “sıcaklıkla fren zayıflaması-I” test verileri kullanılarak; taşıtın kinetik enerjisi, tek tekerleğin kinetik enerjisi, ısı akısı, orantısal ısı faktörü, taşınımla ve ışınımla ısı transferi, diskin orta noktasının sıcaklığı gibi parametreler hesaplandı.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde hem disk-balata ikilisinin BTV, DTV, sürtünme, aşınma ve korozyon direnci hem de disklere uygulanan kaplamalar üzerinde yapılan araştırmalar incelenmiştir.

Eggleston tarafından yapılan çalışmada, üniform olmayan çevresel disk kalınlığının, mekanik odaklı (termik odaklı olmayan) düşük frekanslı titreşimlere (cold judder) dolayısıyla fren torkunda değişimlere neden olacağı belirtilmiştir. Disk kalınlığındaki mikroskobik değişikliklerin imalat esnasında oluşabileceğine de değinilmiştir. Yine aynı çalışmada çevresel DTV'nin temel sebebi olarak; disk-balata arayüzünde çevresel ve kesintili abrasif temasın neden olabileceği ifade edilmiştir. Yan yüzey çarpıklığı da, fren diskinin kenardan-kenara eksenel doğrultuda yer değiştirmesi olarak tanımlanmıştır [19]. Leslie tarafından yapılan bir çalışmada, DTV'nin BTV'ye sebep olan mekanik etkenlerden biri olduğu ifade edilmiştir [20].

Jacobsson tarafından yapılan çalışmada, fren tork değişimlerinin (BTV), titreşimler için ana uyarıcı olduğu belirtilmiştir. Aynı çalışmada, BTV'yi oluşturan mekanik etkilerin sadece imalat toleranslarından değil aynı zamanda tribolojik sebeplerden de kaynaklandığına vurgu yapılmıştır. Termoelastik karasızlık (TEI) ve düzensiz disk ısınması, diskte üniform olmayan boyutsal değişimlere neden olmaktadır. Bu durumun disk kritik hız sınırını aştığında, termik titreşimlere (judder) ve kaliper titreşimlerine neden olacağı ifade edilmiştir (Şekil 2.1). Frenleme esnasında oluşan gürültü ve titreşimler üç gruba ayrılmıştır. Bunlar; düşük frekanslı titreşimler (judder), inleme (groan) ve ötmedir (squeal). Yürütülen araştırmada, mutlak sıcaklığın değil sıcaklık gradyentinin fren tork değişimine neden olduğu ve bundan dolayı termik titreşimlerin oluştuğu saptanmıştır. Ayrıca daha büyük sıcaklık gradyentlerinin de disk malzemesinin düzensiz termik genleşmesinden dolayı geçici DTV'ye neden olduğu belirtilmiştir [21]. Yine Jacobsson tarafından yapılan bir diğer çalışmada BTV'nin, fren basınç değişimleri (BPV) ile doğru orantılı olduğu da belirtilmiştir [22].



Şekil 2.1: Fren tork değişimini oluşturan faktörler ve insan-taşıt etkileşimi [21]

Jimbo ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada; yüksek hızlarda tekrarlı frenlemeler yapıldığında diskin yüzeyinde kılcal çatlakların oluşabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada yüksek karbonlu ve düşük silisyumlu disk malzemesi seçilerek, diskteki termik iletkenlik ve çatlak oluşum direnci incelenmiştir. Diskteki silisyum içeriğinin azaltılması ile hem termik iletkenliğin hem de disk mukavemetinin artması sağlanmıştır. Aynı çalışmada diske, dökme demirin dayanımını arttırmak için vanadyum, krom ve çatlak oluşumuna karşı çok iyi direnç gösteren molibden katılmıştır. Kullanılan diskin temel kompozisyonu; yüksek karbon, düşük silisyum ve molibden ilavesidir. Diskin karbon ve molibden içeriğine bağlı olarak çatlak uzunluğunda düşme olduğu görülmüştür [23].

Kao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kızgın noktalardaki sıcaklıkların 800 $^{\circ}$C'yi aştığı tespit edilmiştir. Aynı çalışmada bu tür yüksek sıcaklıkların iki tür etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. İlk etki olarak dökme demirde sıcaklık 700 $^{\circ}$C'yi

aştığında ve ardından hızlı bir soğuma olduğunda perlitten martenzite dönüşümün (martenzit, hem perlitten daha farklı bir sürtünme katsayısı özelliği gösterir hem de daha büyük hacim kaplayarak sürekli faz değişiminde disk kalınlık değişimine neden olur) gerçekleşmesidir. İkinci etki olarak ta kızgın noktalara yakın bölgelerde diskin yüzey tabakalarında atık gerilmelerin oluşmasıdır. Bu durumların hem plastik akmaya hem de diskte radyal çatlaklara neden olabileceği belirtilmiştir [24].

Ellis yaptığı çalışmada, dört farklı malzemeden imal edilmiş diskleri [GG20'ye eşdeğer orta bir karbon derecesine sahip disk (A), GG25'e eşdeğer ve titanyum içerikli disk (B), bakır içeren yüksek karbonlu yarış otomobil diski (C) ve GG35'e eşdeğer molibden ve krom içeren disk (D)] sürtünme testine tabii tutmuştur. Testler ataletli dinamometre test cihazında ve ECE 90 Test Regülasyonuna uygun olarak yapılmıştır. Diskler; aşınma, sürtünme ve kararlılık (integrity)[1] açısından değerlendirilmiştir. Tip I fren zayıflaması testinde (fade testing); B diski genellikle daha yüksek sürtünme sağladı. Hız duyarlılık testinde ise daha düşük negatif ivmelenme göstermiştir. Aşınma testlerinde sıcaklık artışı B ve D disklerinin aşınma oranını artırdı ancak genel aşınma oranı açısından D diski en düşük aşınma (D için 400 ^{o}C'de 28,5 mm^{3}/MJ ve 500 ^{o}C'de 53,8 mm^{3}/MJ) gösterdi. Aynı çalışmanın kararlılık testinde titanyum alaşımlı disklerin en yüksek termik odaklı titreşim direnci göstermelerine rağmen en düşük kararlılığa sahip olduğu saptanmıştır. Yüksek karbonlu yarış otomobili diski mükemmel kararlılık sağlarken zayıf bir aşınma direnci göstermiştir. Düşük ve orta karbonlu molibden alaşımlı diskler, iyi düzeyde aşınma direnci göstermesine rağmen zayıf bir kararlılık sağladığı tespit edilmiştir [25].

Yamabea ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; termik yorulma mukavemetinin diskin mikroyapısındaki grafit sayısının arttırılmasıyla iyileştiği tespit edilmiştir. Diske nikel ilavesi ve seryum aşılaması ile orantılı olarak termik yorulma mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. Testlerde pin-on disk tipi aşınma cihazı kullanılmıştır. Çalışmada çatlak gelişme oranının grafit sayısıyla çok yüksek oranda bir korelasyon (çatlak gelişim oranı grafit miktarındaki artışla azalır) gösterdiği, mikroyapıdaki grafit sayısının nikel ilavesi ve seryum aşılamasıyla arttığı tespit edilmiştir [26].

[1] Yapısal kararlılığın (çatlama olmaksızın tamamlanan frenleme sayısı) ölçüldüğü bir test uygulamasıdır.

Cueva ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada üç farklı gri dökme demirin (gri dökme demir-GI250, yüksek karbonlu gri dökme demir-GIHC ve titanyum alaşımlı gri dökme demir-GI250Ti) aşınma dirençleri ölçülmüştür. Bu gri dökme demirler, kompakt grafitli dökme demir (CGI) ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada dökme demirlerdeki grafitin profil oranı, L/D (L = grafit uzunluğu, D = grafit genişliği) ile tanımlanmıştır. Deneylerde genel olarak diske uygulanan basıncın düşmesi ile aşınma oranının azaldığı görülmüştür [27].

Seong ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, disk-balata çiftinin sürtünme filmindeki sürtünme, aşınma ve gürültü davranışı atalet dinamometresinde incelenmiştir. Bu incelemede 1300 kg'lık taşıtın bir ön tekerlek yükünün 460 kg olacağı kabul edilmiştir. Yürütülen testlerde başlangıç fren sıcaklığı 370 $^{\circ}$C'ye kadar arttırılan durumlarda sürtünme katsayısının (SK) sürekli düştüğü gözlenmiştir. Aynı çalışmada ötmenin (squeal) 100 ile 300 $^{\circ}$C arasındaki frenleme sıcaklıklarında geliştiği belirtilmiştir. Bu aralıkta, disk ve balatanın iyi bir sürtünme davranışı geliştirdiği ve SK'sinin de kararlı olduğuna dikkat çekilmiştir. Ayrıca diskin yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışında önemli bir etken olduğu da tespit edilmiştir [28].

Jang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada; sürtünme yüzeyinin sıcaklığı, temassız enfraruj termometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Testler; düşük sıcaklık testi (hız ve basınç hassasiyetlerinin tespiti), sabit aralık modunda yüksek sıcaklık testi (fade) ve aşınmanın değerlendirilmesi olarak üç aşamada yapılmıştır. Aynı çalışmada statik SK ile dinamik SK arasındaki farkın büyük olmasının tutunma-kayma (stick-slip) davranışının normal olmasına yol açacağı da belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek arayüz sıcaklıklarında sürtünme kuvvetinin artmasının ve azalmasının sebebi olarak ta dökme demirden yapılan diskin mikroyapısının homojen olmaması gösterilmiştir [29].

Lee ve Barber yaptıkları çalışmada, kayma hızının yeteri derecede büyük olması durumunda, balata-disk etkileşiminin kararsızlık olacağını belirtmişlerdir. TEI ile ilişkili yüksek lokal sıcaklıkların; malzemede bozulmaya, termik çatlak oluşumuna ve olumsuz frenleme performansına (fade) neden olduğu belirtilmiştir. Deneylerde oda sıcaklığı ve nem gibi çevresel koşullar mümkün mertebe sabit tutulmaya çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada TEI, dönme hızına ve fren basıncına bağlı olarak araştırılmıştır. Çalışmada balata konfigürasyonu gibi diğer değişkenler sabit

tutulmuştur. Ayrıca 250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sıcaklığa bağlı fren zayıflamasının oluştuğu görülmüştür. Özellikle uzun süreli frenlemelerde sürtünme yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin, sürtünme katsayısının azalmasına ve artmasına sebep olduğu saptanmıştır [30].

Lee tarafından yapılan bir başka çalışmada frenleme esnasında fren sıvısının sıcaklığında oluşan değişmelerin nümerik olarak incelenmesi ve ısının soğurulması araştırılmıştır. Uzun süreli frenlemelerde fren sıvısının sıcaklığı artmakta ve bu durum fren sıvısının buharlaşmasına neden olmaktadır. Bu olay tekerlek fren sisteminde sınırlı hava akışının olduğu durumlarda ve alüminyum kaliperli otomobillerde söz konusu olabilmektedir. Yapılan bu çalışmada, hem fren sıcaklık artışı hem de frenleme ve ısının soğurulması esnasında diğer fren parçalarındaki sıcaklıkları hesaplamak için bilgisayar modelleme tekniklerini tanıtılmıştır. Testlerde değişik disk-balata kombinasyonları kullanılmıştır. Bu kombinasyonlar; alüminyum kaliperli ve yarı metalik sürtünme elemanı, alüminyum kaliperli ve asbest içermeyen organiklerden yapılan sürtünme elemanı (non-asbestos organic (NAO) friction material), alüminyum kaliperli ve üçte ikisi aşınmış asbest içermeyen organiklerden oluşan sürtünme elemanlarıdır. Bu çalışmada diskli fren sisteminin modellenmesinde hesaplamaya çeşitli frenleme elemanları (disk, balatalar, kaliper, aks ve tekerlek) dahil edilmiştir. Ayrıca taşıtın frenlenmesi esnasında sürtünmeye dayalı ısı üretiminin ikincil frenleme faktörleri; lastikteki kaymalar, lastik yuvarlanma, güç aktarma organları ve aerodinamik dirençler göz önüne alınmıştır [3].

Thuresson tarafından yapılan bir çalışmada; kaymalı temasta, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin, sistemin geometrisinden, malzeme özelliklerinden ve sınır koşullarından etkilendiği belirtilmiştir. Frenlemelerde temas basıncı ve sıcaklık değişimleri, frenleme esnasında termik genleşme, aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan ısıyla sürekli olarak değişir. Bu çalışmada disk ve tekerlek rijit olarak kabul edilmiştir. Aşınma katsayısı sıcaklığa bağlı olarak değerlendirilmiş ve 600 ^{o}C'ye kadar lineer ve bu sıcaklığın üzerinde eksponansiyel artan bir fonksiyon olarak modellenmiştir. Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısının azalması fren zayıflamasının ana nedeni olduğu ifade edilmiştir. Aynı çalışmada aşınma davranışı Archard'ın aşınma yasasıyla incelenmiştir [31].

Bijwe ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada; sıcaklıkla fren zayıflamasının, (fade) 300-400 °C arasındaki fren arayüz sıcaklılarında kinetik sürtünme katsayısındaki

düşmeden kaynaklandığı belirtilmiştir. Frenleme elemanlarının işletme esnasında maruz kaldığı tribolojik durumun sıcaklıkla fren zayıflaması üzerinde dominant bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada Suzuki Maruti otomobilin ön fren diski ile farklı reçine kompozisyonları kullanılan beş balatanın sıcaklıkla fren zayıflaması (fade) ve kararlılık (recovery) özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada binek otomobillerin frenlemesi için gerekli SK'nin 0,3 ile 0,35 arasında olduğu da belirtilmiştir [32]. Dmitriev ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise; sürtünme çiftleri arasındaki SK'nin binek otomobiller için 0,45, spor otomobiller için 0,5'in üzerinde ve raylı taşıtlar için ise 0,35 düzeylerinde olacağı bilgisi verilmiştir [33].

Roubicek ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SAE J2430 sürtünme test standardına göre Link Engineering laboratuarında tam ölçekli atalet dinamometresinde gri dökme demir bir diskle üç farklı balata kompozisyonu test edilmiştir. Bu testlerde ölçülen maksimum sıcaklık 350 $^{\circ}$C civarında gerçekleşmiştir. Yürütülen bu çalışmada balata malzemesinin aşınması ile CO_2 yayılım miktarının arasında güçlü bir korelasyon olabileceği belirtilmiştir [34].

Stanford ve Jain tarafından yapılan bir çalışmasında, şu bilgilere yer verilmiştir. Bazı sert frenleme koşullarında, yüksek arayüz sıcaklıkları oluşabilmektedir. Yüksek arayüz sıcaklıklarında organik bileşiklerin özelliği bozulur, sürtünme katsayısı düşer ve aşınma oranı eksponansiyel olarak artar. Bu olay sıcaklıkla fren zayıflaması (fade) olarak isimlendirilir. İdeal fren balataları, herhangi bir sıcaklıkla fren zayıflaması (fading) oluşmaksızın bütün çalışma koşullarında üniform ve kararlı sürtünmeyi sağlamalıdır. Yaygın olarak fren sistemlerinde dört çeşit balata kullanılmaktadır. Asbestli organik balatalar, yarı metalik ya da reçineli metalik balatalar (metal içeriği %50'den daha büyük), düşük metalik balatalar (metal içeriği %50'den daha küçük) ve metalik olmayan balatalardır. Sabit duran balataların hareketli karşı çalışma yüzeyi disklerdir. Gri dökme demir, hem fren diskleri hem de silindir gömlekleri için yaygın bir malzeme uygulamasıdır. Dökme demirin mikroyapısındaki grafit tabakalar bu malzemeye yüksek termik iletkenlik ve iyi bir aşınma direnci kazandırır. Ancak dökme demirin korozyon direnci ise oldukça düşük düzeydedir. Bu durum disk için aracın bulunduğu ya da kullanıldığı yerlerde/bölgelerde suyun, nemin ve tuzun bulunması halinde ciddi sorun oluşturur. Bu problem alıcısını araç parkında bekleyen yeni araçlar için daha da büyük bir sorundur. Korozyonu azaltmak için normalde diskler yumuşak kaplamaya tabii tutulur. Ancak bu kaplama çok hızlı aşınır ve aracın frenleme davranışını değiştirir [18].

Yine aynı çalışmada sistemlerin termal verimliliğini arttırmak, çalışma sıcaklığını yükseltmek, korozyon, oksidasyon veya aşınma davranışını iyileştirmek amacıyla uygulanan termal sprey kaplamaların yüzey bileşen özellikleri için iyi bir mühendislik yaklaşımı sunduğu belirtilmiştir. Bu amaçla diskler ticari olarak uygulanabilecek sert kaplamalarla kaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada, Fe–3,45C–2,15Si–0,5Mn–0,25Cr–0,2Cu kompozisyonuna sahip bir diskin sürtünme, aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için dört çeşit sert kaplama yöntemi [Ni–17Cr–2,5Fe–2,5Si–2,5B–0,15C (Metco), Fe–30Mo–2C (Diamalloy), Co–30Cr–12W–2,4C (Stellite), and Zn–50SiC (Zn–SiC)] uygulanmıştır. Yapılan testlerde; en iyi korozyon direncini stellite kaplamalı disk göstermiştir. Tüm kayma hızlarında en düşük aşınma oranını stellite kaplamalı disk ile dökme demir disk sağlamıştır. Çalışmada genel olarak sürtünme katsayısının kayma hızının artışıyla azaldığı da tespit edilmiştir. Bununla birlikte en kararlı sürtünme davranışını yine stellite kaplamalı disk ile dökme demir disk göstermiştir. Ayrıca çalışmada Metco kaplamanın, sıcaklıkla fren zayıflamasına daha yatkın olabileceği üzerinde durulmuştur [18].

Jang ve Ahn tarafından yapılan bir çalışmada sonlu eleman simülasyonunda arayüzde sürtünme odaklı ısıdan dolayı TEI'yı incelemek için kayar yüzeyler arasında sabit bir fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (Functionally Gradient Material - FGM) düşünülerek iki boyutlu termoelastik kontak problemi geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, FGM kaplı disklerin kritik hızının konvansiyonel çelik disklerden daha büyük olduğunu göstermiştir. FGM'deki homojen olmayan parametre etkisi araştırılmış ve optimum bir homojen olmayan parametrenin, belirli bir kaplama tabaka kalınlığı ile maksimum kritik hızı sağladığı görülmüştür [35].

Blau ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada; iki adet ticari Ti alaşım, dört adet Ti sert toz kompozitleri ve bir adet termal sprey kaplamalı Ti alaşımının sürtünme katsayıları ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Karşı parça olarak birkaç tane ticari amaçlı üretilmiş balata kullanılmıştır. Bu deney diskleri içerisinde, 0,6 mm kalınlığındaki termal sprey kaplamalı Ti diski (Ti–6Al–4V ThSp) en az aşınma değeri göstermiştir. Ayrıca aynı çalışmada hem hafif olması hem de sağladığı korozyon direncinden dolayı Ti kaplamalı diskin tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir [36].

Günümüze kadar bu alanda yapılan çalışmalarda, ağırlıklı olarak disk-balata ikilisinin sürtünme davranışı incelemelerinde disk ile balatanın kimyasal kompozisyonu üzerine odaklanılmış ve bu doğrultuda çalışmalar yapılmıştır. Disklere uygulanan

kaplamalara yönelik çalışmalarda ise özellikle farklı kaplama metodu ve değişik kaplama malzemeleri üzerine çalışmalar yapılmasına rağmen; alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak Metco 19E ve 18C metalik tozlarla fren disk yüzeylerinin kaplanması alanında detaylı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Aynı şekilde dökme demir üzerine NiCr arabağlayıcısı kullanılarak plazma sprey yöntemiyle Al_2O_3-TiO_2 ve HVOF yöntemiyle de Cr_3C_2-NiCr kaplama uygulaması alanında da detaylı bir çalışma görülememiştir. Metco 19E sert yüzey kaplama tozu; aşınma ve korozyonun birlikte görüldüğü yerlerde, aşınmış parçaların yeniden kazanılmasında ve orijinal parçaların aşınmalarını önlemek amacıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir. Metco 18C kaplama tozu ise; yüksek sıcaklıklarda iyi derecede aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir. Cr_3C_2-NiCr kaplama tozu ise yüksek sıcaklıkta; kayma, kazımalı aşınma, abrazyon ve erozyon aşınmalarına karşı dirençlidir. Al_2O_3-TiO_2 kaplama tozu ile yapılan kaplamalar; yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısısal kararlılık ve korozyon direnci iyi olan uygulamalardır. Bu nedenle yukarıda özellikleri bahsedilen kaplama metotları ve malzemelerinin fren disklerine uygulanması ile frenleme performansına etkisinin incelenmesine gerek duyulmuştur. Bu amaçla orijinal disk ve 4 adet kaplanmış disk SAE J2522 test standardına göre atalet dinamometresinde fren etkinlik testine tabii tutulmuştur. Bu testlerde frenleme parametrelerinden disk-balata ikilisinin; ön alışma etkinliği, hız duyarlılığı, sıcaklığa bağlı fren zayıflaması, sürtünmenin iyileştirilmesi, sürtünme kararlılığı, aşınma, fren tork ve disk kalınlık değişimleri incelenmiştir. Bu testlere ek olarak; tüm diskler SAE J2334 standardına göre hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

Çalışmanın bu bölümü; deney disklerinin seçimi, kaplama malzemeleri, kaplama yöntemleri ve üniteleri, metalografik inceleme için numune hazırlama, atalet dinamometresi, testlerde kullanılan cihaz ve ünitelerden oluşmaktadır.

3.1 Disklerin Seçimi

Bu çalışmada 2001 model Toyota Corolla'nın OEM (orijinal) ön fren diski kullanılmıştır. Bu seçimde testlerin yapılacağı dinamometrenin sabitleme (fikstür) parçalarının hazır olması en önemli seçim kriteri olmuştur. Ayrıca diskin kanatçıklı disk seçilmesinde ise günümüzdeki diskli fren trendinin etkisi de belirleyici olmuştur. Tablo 3.1'de disk-balata ikilisinin temel özellikleri ve malzeme bileşenleri ile Şekil 3.1'de ise OEM disk ve balata çifti gösterilmiştir. Kaliper; diske saat 9 pozisyonunda montajlı, tek silindirli ve yüzer tiptir.

Tablo 3.1: Deney disk-balatasının geometrik boyutları

	1.6 lt. ZZE112 - 1.4 lt. ZZE111	
	Disk	**Balata**
Parça No	43512-12550	04465-12593 (02050)
Kalınlık (mm)	22	12
Minimum kalınlık sınırı (mm)	20	1,0
Disk çapı (mm)	255	-
Kütle (g)	5004	292,2
Diskin çarpılma limiti (mm)	0,05	-
Disk malzemesi[2]	3,58C2,28Si0,572Mn0,02P	PN529H-FF NAC



Şekil 3.1: 2001 model Toyota Corolla'nın ön fren diski ve balatası

[2] KOSGEB laboratuarında Spectrolab M5 Optik Emisyon Spekrometre cihazıyla yapılan analizde (Rapor No: 2169) diskin kimyasal kompozisyonunun 3,58C2,28Si0,572Mn0,02P0,03S0,057Cr0,047Cu0,01Ti olduğu tespit edilmiştir.

3.2 Kaplama Kalınlıklarının, Tozlarının ve Yöntemlerinin Seçilmesi

Yüzey kaplama, yeni bir yüzey tabakası elde etmek amacıyla kaplama yöntemleri kullanılarak ana malzemeden farklı özellikte ve kimyasal bileşimi bilinen bir metal veya alaşımın ana malzeme yüzeyine kaplanması işlemidir. Yüzey kaplama; aşınmayı, yıpranmayı, darbeyi, erozyonu ve oyulmayı azaltmak için orijinal parçalara uygulandığı gibi bozulan parçaların tamiri amacıyla da uygulanır. Yüzey kaplama işlemi ergitme kaynak yöntemleri ile yapılabildiği gibi, ısıl püskürtme, lazer, kaynak yöntemi vs. kullanılarak da gerçekleştirilebilmektedir [37]. Belli başlı kaplama uygulama yöntemleri, sert yüzey kaplama, takviye kaplama (dolgu kaplama) ve giydirme kaplama (koruyucu kaplama) olarak sıralanmaktadır [38]. Bu çalışmada disk-balata çiftinin termal verimliliğini arttırmak, korozyon, oksidasyon ve aşınma davranışını iyileştirmek amacıyla 4 adet ön fren diski; metalik, sermet ve seramikle kaplandı. Kaplama öncesi belirlenen kaplama kalınlıkları ölçüsünde orijinal disklerden talaş kaldırıldı. Sonra iki disk, alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak Metco 19E ve Metco 18C metalik tozlarla, diğer ikisi de NiCr arabağlayıcı kaplandıktan sonra; birincisinde plazma sprey yöntemiyle Al_2O_3-TiO_2 ve diğerine de HVOF yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplandı. Kaplanmış ve orijinal deney disklerinin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

3.2.1 Kaplama tozlarının seçilmesi

Bu çalışmada, disklerin termik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek suretiyle frenleme performansını arttırmak için; Ni (Metco 19E) ve Co esaslı (Metco 18C gibi) metalik, krom karbür esaslı (Cr_3C_2-NiCr) sermet ile alümina-titanya (Al_2O_3-TiO_2) seramik tozlar seçilmiştir. Metalik tozların seçiminde, sert metalik kaplamaların ticari olarak uygulanabilecek olması, sermet ve seramik tozların seçiminde ise aşınma davranışı ile ısıl dayanımın iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

3.2.1.1 Metco 19E kaplama tozu

Sert yüzey kaplama işlemleri aşınma ve korozyonun birlikte görüldüğü yerlerde, aşınmış parçaların yeniden kazanılmasında ve orijinal parçaların aşınmalarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır [39]. Ayrıca parçaların kritik aşınma bölgelerine de uygulanabildiği ifade edilmiştir [40].

Ni esaslı alaşımlar, aşınma direnci ile birlikte sıcak korozyon ya da oksidasyona karşı direncin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Ni esaslı alaşımlar, ısıl püskürtme teknolojisinde püskürtme-ergitme tozları olarak bilinir. Kaplama sonrası ergitme işlemi, alaşımın katı-sıvı sıcaklıkları arasında (927-1127 °C) oksi-asetilen başlığı veya fırın yardımı ile yapılır. Böylelikle kaplama tabakası ile ana malzeme arasında kaplamanın difüzyonu ve bağ mukavemeti arttırılmış olur [41].

Metco 19E -Ni16Cr4Si4B4Fe2.4Cu2.4Mo2.4W0.5C-; korozyon, yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve bu faktörlerin bileşkesinden oluşan çalışma koşullarındaki yapı parçalarının kaplanmasında kullanılırlar. Metco 19E diskin her iki yüzeyine 1'er mm kalınlığında alevle püskürtme ve ergitme yöntemi ile uygulanmıştır. Metco 19E kaplama tozunun özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

3.2.1.2 Metco 18C kaplama tozu

Kobalt esaslı sert yüzey kaplama alaşımları yüksek sıcaklıklarda, iyi derecede aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci özellikleri gerektiren uygulamaların tümünde kullanılmaktadır [42-44]. Bu alaşımlar aynı zamanda jet motorlarında, rotor, türbin kanatları, valfler, dişçilik ve cerrahi takımlar, egzoz çıkış boruları ve benzeri yerlerde kullanılırlar. Co-Cr esaslı süper alaşımlar imalat malzemesi olarak günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [45]. Çeşitli karbür içerikli kobalt esaslı alaşımlar arasındaki temel fark karbon içeriğidir.

Metco 18C -Co27Ni18Cr6Mo3,5Si3B2,5Fe0,2C-, kobalt esaslı metalik kompozit bir kaplama tozudur. 1120 $^{\circ}$C ergime derecesine, 50 HRC Rockwell sertlik (500-550 HV) değerine ve 8350 kg/m^3 yoğunluğa sahip bir tozdur. Metco 18C diskin her iki yüzeyine 1'er mm kalınlığında alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle kaplanmıştır. Metco 18C kaplama tozunun özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

3.2.1.3 Cr_3C_2 - NiCr kaplama tozu

Krom karbür esaslı malzemeler genellikle kayma, kazımalı aşınma (fretting), abrazyon ve erozyon gibi durumları içeren yüksek sıcaklık aşınma uygulamalarına yönelik sert kaplama oluşturmak için kullanılırlar [46]. Ancak yaygın olarak aşınma ve korozyonu minimize etmek için uygulanır [47]. Cr_3C_2-NiCr (Krom karbür-nikel

krom), oda sıcaklıklarından 850 °C'ye kadar düşük sürtünme katsayısı ve abrazyon aşınmasına karşı yüksek dirence sahiptir. Temelde karbür, seramik fazdan dolayı aşınmaya dirençli iken NiCr matriks ile de korozyon direnci sağlar [48].

Diskin her iki yüzeyi HVOF yöntemi ile 45 μm kalınlığında NiCr arabağlayıcı üzerine yaklaşık 300'er μm kalınlığında %75 Cr_3C_2-%25 NiCr ile kaplandı. Cr_3C_2-NiCr kaplamalar nükleer reaktörler ve uçak sanayi başta olmak üzere abrazyon ve kazımalı (fretting) aşınmada, maksimum 850 °C'ye kadar partikül erozyonuna ve 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar oksidasyon ve kimyasal etkilere karşı direncin istendiği uygulamalarda kullanılır [49]. HVOF prosesli kaplamalar plazma spreyle karşılaştırıldığında; matriksde bıraktıkları daha fazla karbür partikülü ile yüksek yoğunluk, düşük porozite ve mükemmel adezyon dayanım gösterirler [50-51]. Cr_3C_2-NiCr kaplama tozunun özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

3.2.1.4 Al_2O_3 - TiO_2 kaplama tozu

Alümina, oksit temelli seramik hammaddeleri arasında geniş uygulama alanına sahiptir. Yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısısal kararlılık ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri yanında düşük maliyeti ile de dikkati çekmektedir. Doğada en fazla boksit cevherinde bulunan alüminanın %90'ı alüminyum üretiminde kullanılmaktadır. Kalan kısım ısıya dirençli dolgu malzemeleri, pigment, katalizör, refrakter, aşındırıcı ve diğer cam ile seramik malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır [52].

Al_2O_3-TiO_2 (Alümina-titanya) kaplamalar; abrazyon, korozyon, oksidasyon ve erozyon aşınmalarına karşı direncin istendiği uygulamalarda kullanılır [49]. Al_2O_3-TiO_2 kaplama tozunun özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Deney diskinin ve kaplamaların özellikleri

	Orijinal Disk	**Metco 19E**	**Metco 18C**	**Cr_3C_2-NiCr**	**Al_2O_3-TiO_2**
Markalama	1	2	3	4	5
Ağırlık (kg)	5,0000	4,9205	4,9880	5,0145	4,9670
Sertlik (HV_{200})	222	630	510	766	643
Disk kalınlığı (mm)	22,05	21,90	22,25	22,34	22,23
Orijinal disk malzemesi ve kaplama tozlarının bileşenleri	3,58C2,28Si0,572Mn0,02P 0,03S0,057Cr0,047Cu0,01Ti	Ni 16Cr 4Si 4B 4Fe 2,4Cu 2,4Mo 2,4W 0,5C	Co 27Ni 18Cr 6Mo 3,5Si 3B 2,5Fe 0,2C	%75 (Cr_3C_2) + %25 NiCr NiCr[3] arabağlayıcı	%87 (Al_2O_3) + %13 (TiO_2) NiCr arabağlayıcı
Kaplamayı uygulayan firma	-	Sermet Firması Kaplama Atölyesi - İstanbul	Sermet Firması Kaplama Atölyesi - İstanbul	Senkron Firması Kaplama Atölyesi - Gebze	Senkron Firması Kaplama Atölyesi - Gebze
Kaplama türü	-	Alevle püskürtme ve ergitme	Alevle püskürtme ve ergitme	HVOF	Plazma püskürtme yöntemi
Kaplama kalınlığı (mm)	-	1	1	≈ 50+300 µm	≈ 30 + 550 µm
Ergime sıcaklığı (°C)	-	1160	1120	1250	2072
Yoğunluk (kg/m^3)	7228	-	8350	6500-7000	3900
Özgül ısı (J/kgK)	419	-	442	-	-
Isı iletim katsayısı (W/mK)	48	30	40[4]	14	<2
Resimler					

[3] NiCr'un ısı iletim katsayısı 11,3 W/m.K'dir.
[4] Co'ın ısı iletim katsayısı 69,1, Ni'in 90,7 ve Cr'un ise 93,7'dir [53].

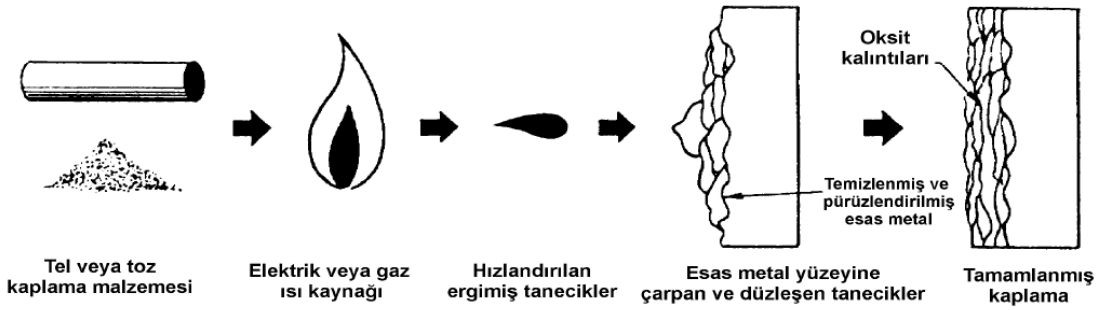
3.2.2 Kaplama Yöntemleri

Kaplama, metalik makine parçalarının yüzeyinin teknik özelliklerini iyileştirmek gayesi ile kimyasal bileşimi bilinen bir metal veya alaşımın ısıl püskürtme yöntemleri kullanılarak yüzeye uygulanması işlemidir. Kaplama işlemi; ergitme kaynak yöntemleri, metal püskürtme veya lazer yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Kaynak ve termal püskürtme ile kaplanmış yüzeylere alevle sertleştirme, endüksiyonla sertleştirme, nitrürasyon ve sementasyon gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulanamaz. Kaplama malzemesinin ana metalden daha üstün korozyon, mukavemet ve aşınma direncine sahip olması gerekir. Günümüzde sert yüzey kaplama, dolgu kaplama, koruyucu kaplama ve kademeli kaplama olarak tanımlanan dört çeşit yüzey kaplama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır [54].

Isıl püskürtme, kaplama oluşturmak amacıyla önceden hazırlanmış olan esas metale çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökelten bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan jenerik bir terimdir. Kaplama malzemesi toz, çubuk ya da tel biçiminde olabilir. Isıl püskürtme tabancası, kaplama malzemesini ergitmek için gerekli olan sıcaklığı yanıcı gazlar, elektrik arkı veya plazma arkı ile elde eder [55]. Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan parçanın soğuk olan yüzeyine püskürtülür. Yüzeye yüksek hızla çarpan tanecikler, düzleşir ve esas metale olan ısı transferi ile soğuyarak, katılaşarak ve birbirleri ile temas haline gelerek tabaka meydana getirirler. Ergiyen kaplama malzemesinin esas metal ile birleşmesi ve birbirleri ile tabaka oluşturması difüzyon veya kaynak kabiliyetine bağlıdır. Kaplamalar, genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır [56]. Isıl püskürtme yöntemleri ile elde edilen kalınlıklar 0,025 mm'den 3 mm'ye kadar veya daha fazla kalınlıklarda olabilmektedir ve uygulama alanları da; aşınmış olan makine parçalarının tamiri, parçaların yüzey özeliklerinin iyileştirilmesi ve konstrüktif parçaların yüzeyleri için servis koşullarına uygun kaplamalar oluşturulması şeklinde belirtilebilir. Günümüze kadar bir seri ısıl püskürtme yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemler, birbirlerine göre ısı kaynağı, tel ya da toz biçiminde olabilen püskürtme malzemesi şeklinde iki temel değişken ile farklılık göstermektedir [57].

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi ısıl püskürtme yöntemleri; enerji kaynağı (yanıcı gaz veya elektrik), kaplama malzemesi (tel veya toz) ve atmosfer (hava, düşük basınç veya soy gaz) bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. Isıl püskürtme yöntemleri; yanıcı gaz ile püskürtme, elektrik arkı ile püskürtme ve plazma

püskürtme yöntemleri şeklinde genel olarak 3 ayrı gruba ayrılmaktadır [59]. Alev ile püskürtme yönteminde toz, tel veya çubuk biçiminde olabilen kaplama malzemelerini ergitmek için gerekli olan ısı kaynağı yanıcı gazlar ile elde edilmektedir. Yanıcı gaz genellikle asetilen olup düşük ergime noktasına sahip malzemeler için bazen propan ve ince tozların püskürtülmesi durumunda hidrojen de kullanılmaktadır [58-60].



Şekil 3.2: Isıl püskürtme işlem sırası [58]

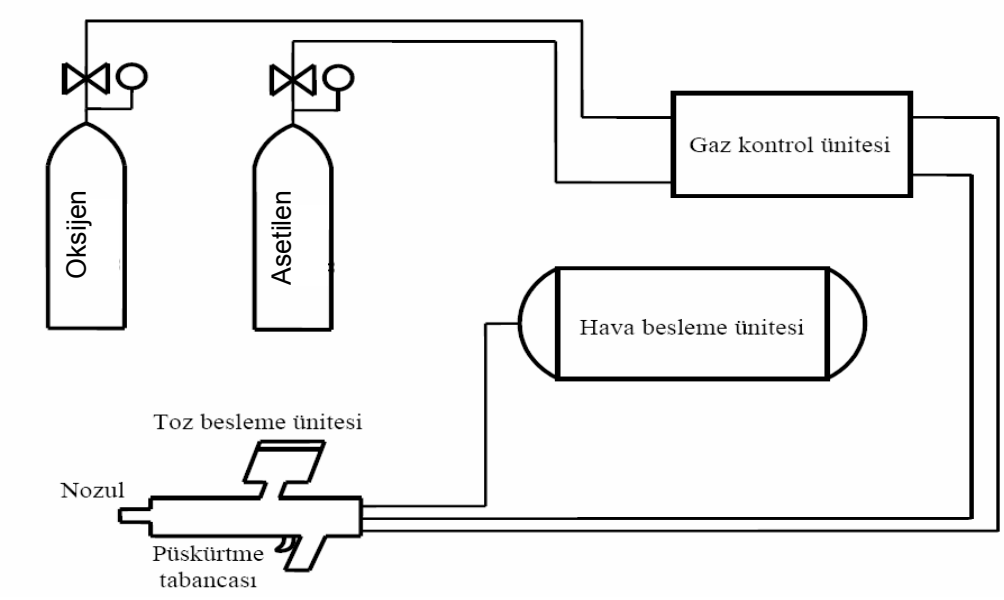
Metal püskürtme yönteminde toz veya tel halindeki kaplama maddeleri, bir püskürtme tabancasından yanıcı, yakıcı ve taşıyıcı gazların eşliğinde plazma sıcaklığında püskürtülerek iş parçasının yüzeyine yığıntı ile oluşturulur. Bu gurupta yer alan teknikler; toz, alev püskürtme, tel püskürtme, plazma püskürtme gibi sıralanabilir [61]. Toz metalürjisinde kullanılan metal tozları 200 μm'den daha küçüktür ve her geçen yıl daha da küçülmektedir. Metal tozlarının üretiminde kullanılan teknikler metale göre değişmektedir. Başlıca kullanılan metal tozu üretim teknikleri; atomizasyon, doğrudan indirgeme, elektroliz, çökertme ve öğütmedir [62].

Metallerin yüzeylerini metalik, sermet ve seramik tozlarla kaplamak için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, kullanım amaçlarına uygun olarak kaplanacak tozun özelliğine göre değişir. Bu çalışmada; Ni esaslı Metco 19E, Co esaslı Metco 18C metalik tozları seçilmiş ve bu tozlar alevle püskürtme ve ergitme yöntemi ile disklerin kaplanmasında kullanılmıştır. Bir diğer diske HVOF termal püskürtme yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr ve sonuncu diske ise plazma püskürtme yöntemiyle Al_2O_3-TiO_2 seramik uygulanmıştır.

3.2.2.1 Alevle toz püskürtme ve ergitme işlemi

Alev ile püskürtme yönteminde toz, tel veya çubuk biçiminde olabilen kaplama malzemelerini ergitmek için gerekli olan ısı kaynağı yanıcı gazlar ile elde edilmektedir. Yanıcı gaz genellikle asetilen olup düşük ergime noktasına sahip malzemeler için bazen propan ve ince tozların püskürtülmesi durumunda hidrojen de kullanılmaktadır [63]. Disklerin kaplanmasında kullanılan oksijen-asetilen gazının özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Mikro-pülverize toz alaşımları oksijen ile vakum yapılarak oksi-asetilen alevi ortasından kaplanacak yüzeye püskürtülür. Kaplama esnasında parçanın sıcaklığı 200 °C'yi geçmeyeceğinden soğuk sistem olarak adlandırılır. Alev sıcaklığı yaklaşık 3300 °C civarındadır. Yapışma mekaniktir. Kaplama kalınlığı püskürtülecek malzemenin ve iş parçasının şekline bağlı olarak 0,005 ile 2,5 mm arasında değişmektedir [64]. Ancak sıcak toz püskürtme tekniğinde ise kaplanacak parçaya 300 °C'yi bulan ön tav uygulanır. Metal tozları yüzeye püskürtüldükten sonra tekrar ısı uygulanarak ergitme ve difüzyon yolu ile kaplanacak malzemeye bağlanma sağlanır [65]. Şekil 3.3'de yöntemin şematik resmi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistem, yanıcı, yakıcı gazlar ve bu gazların kontrolünü sağlayan kontrol ünitesi, hava besleme ünitesi, toz besleme ünitesi, nozul (malzeme cinsine göre değişmektedir) ve püskürtme tabancasından oluşmaktadır. Kaplamalarda kullanılan alevle püskürtme parametreleri Tablo 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Püskürtme ünitesi [66]

Tablo 3.3: Oksijen-asetilen gazının özellikleri [65]

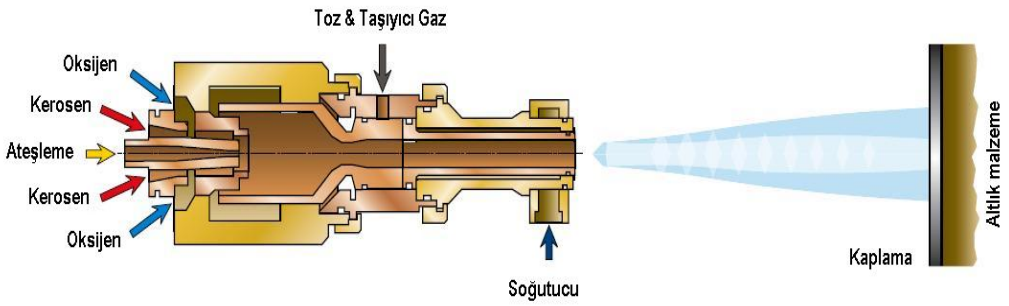
Gaz karışımı	Alev sıcaklığı (°C)	Isı değeri (kJ/m^3)	Tutuşma hızı (cm/s)	Alev verimi (kJ/cm)
Oksijen-asetilen	3300	56430	1350	45

Tablo 3.4: Metco 19E ve 18C tozlarının alevle püskürtme ile kaplama parametreleri

Parametre	Birim	Metco –19E	Metco – 18C
Kaplama tozu	-	Ni 16Cr 4Si 4B 4Fe 2,4Cu 2,4Mo 2,4W 0,5C	Co 27Ni 18Cr 6Mo 3,5Si 3B 2,5Fe 0,2C
Kaplanacak ana malzeme	-	Gri dökme demir (3,58C2,28Si0,572Mn)	
Püskürtme tabancası tipi	-	Duromet 560	Duromet 560
Püskürtme nozul tipi	-	MG-C 26	MG-C 26
Püskürtme mesafesi	mm	50-75	50-75
Püskürtme açısı	derece	90	90
Oksijen basıncı	bar	1,7-2,1	1,7-2,1
Asetilen basıncı	bar	1,1	1,1
Hava basıncı	bar	4,8-4,9	4,8-4,9
Oksijen akış hızı	m^3/s	1,7	1,7
Asetilen akış hızı	m^3/s	0,93-1,4	0,93-1,4
Püskürtme hızı	kg/s	0,7-0,9	0,7-0,9

3.2.2.2 Yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme yöntemi

Yüksek hızda oksijen yakıtlı püskürtme (High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Process- HVOF), bir çeşit ısıl püskürtme yöntemidir. HVOF, plazma spreyden daha hızlı püskürtme sağlar [67]. Sesüstü/Süpersonik hızlı HVOF tabancasının yanma odasında yakıt gaz halinde (propan, hidrojen, kerosen vs) oksijen ile devamlı yanar [48,68]. Yanıcı gaz basıncı 4,1 - 6,2 bar arasında değişebilir. Bunun sonucu olarak da püskürtme hızı da değişeceğinden kontrollü olarak sık dokulu ve sert kaplamalar yapmak mümkündür [64]. Şekil 3.4'de gösterilen HVOF prosesi ile püskürtülebilen çok farklı metal tozları vardır. Örneğin; saf metaller, metalik alaşımlar, seramikler, sermetler ve polimerler. Tablo 3.5'de ise Cr_3C_2-NiCr tabakası oluşturmak için kullanılan püskürtme parametreleri verilmiştir. HVOF yöntemi, düşük porozite, iyi oksidasyon direnci, mükemmel adezyon dayanımı ve yığıntı oranları ile metalik kaplama ve sermetler oluşturacak en iyi ısıl püskürtme tekniğidir [69-70].



Şekil 3.4: HVOF püskürtme prosesi [71]

Tablo 3.5: Cr_3C_2-NiCr tabakası oluşturmak için kullanılan püskürtme parametreleri

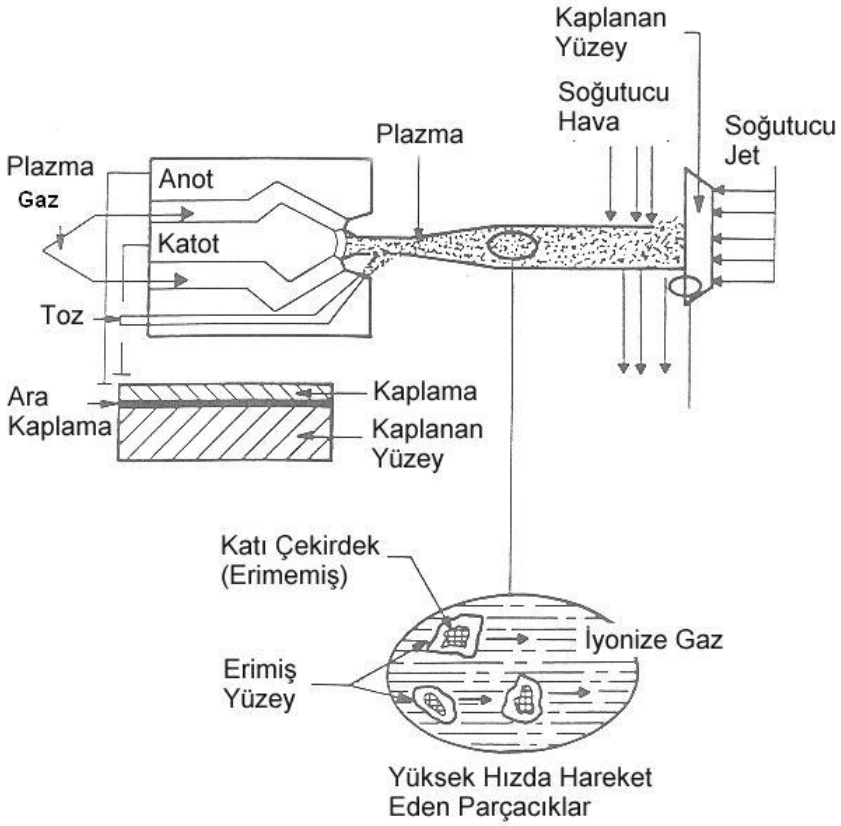
Parametreler	Birimler	Değerler
Yakıt (kerosen) miktarı	l/h	12
Hidrojen miktarı	m^3/h	6
Oksijen miktarı	m^3/h	45
N_2 tozu besleme debisi	m^3/h	0,8
Toz besleme miktarı	kg/h	4
Yığıntı verimi	%	53
Yoğunluk	g/cm^3	6,7

3.2.2.3 Plazma püskürtme ile kaplama yöntemi

Isıl püskürtme yöntemlerinden biri de plazma püskürtme yöntemidir. Plazma püskürtme yöntemiyle gerçekleştirilen seramik kaplamalar birçok metalden daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptirler ve dizel motorları da dahil erozyon ve aşınma dirençli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bununla beraber, alevle püskürtmedeki kadar olmasa da, poroziteler nedeniyle plazma püskürtmeyle oluşturulan kaplamalar korozyon için yetersiz kalabilmektedir. Toz formunda ve belirli tane boyutlarında üretilen tüm malzemeler bu işlemde başarıyla kullanılabilmektedir [63]. Şekil 3.5'de şematik olarak plazma püskürtme kaplama yöntemi gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan dökme demir disk malzemesi üzerine NiCr arabağlayıcı ve Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın plazma püskürtme parametreleri ise Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Seramik kaplamanın plazma püskürtme parametreleri

Değişkenler	Birim	NiCr tabaka	Al_2O_3-TiO_2 kaplama
Plazma Tipi	-	Ar + H_2	Ar + H_2
Plazma tabancası	-	3 MB	3 MB
Akım	A	500	500
Voltaj	V	65	70
Nozul çapı	mm	8	8
Gaz akış miktarı, Ar	l/dak	28	50
Gaz akış miktarı, He	l/dak	15	15
Püskürtme mesafesi	mm	110	110
Püskürtme açısı	derece	90	90
Toz besleme miktarı	g/dak	35	40
Taşıyıcı gaz akışı	l/dak	5	6



Şekil 3.5: Plazma püskürtme kaplama yöntemi

3.3 Isıl Püskürtme ile kaplanacak yüzeylerin hazırlanması

Yüzey pürüzlendirme tipi ve pürüzlendirme derecesi uygulanan kaplama tipine, kalınlığına ve servis koşullarına bağlıdır [65]. Isıl püskürtme ile kaplama öncesi kaplanacak yüzey kumlama ile pürüzlendirildi. Yüzey hazırlama öncesi yağ, boya vb. gibi istenmeyen maddelerden temizlendi. Tablo 3.7'de ısıl püskürtme tekniklerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.7: Isıl püskürtme tekniklerinin özellikleri [65]

Özellikler	Alevle toz püskürtme	Konvansiyonel plazma püskürtme	HVOF
Gaz akışı (m/s)	11	4,2	28-57
Alev ya da plazma sıc. (°C)	2200	5500	3100
Partiküllerin etrafındaki atmosfer	CO, CO_2, H_2O	N_2, Ar, H_2, O_2	CO, N_2, CO_2, H_2O
Partikül çarpma hızı (m/s)	30	240	610-1060
Rölatif adezyon mukavemeti (1 dak.)	3	6	8
Kohezif mukavemet	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Oksit %'si	6	0,5-1	0,2
Maksimum püskürtme oranı (kg/s)	7	5	14
Güç (kW)	25-75	30-80	100-270
Ergime enerjisi (kW/kg)	11-22	13-22	22-200

3.3.1 Alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle kaplanacak diskin yüzeyinin hazırlanması

Alevle püskürtme yöntemi uygulanan kaplamalarda ana malzeme ile kaplama tabakası arasındaki bağlanma çoğunlukla intermetalik ve kimyasal karakterli olduğu için, kaplama öncesi ana malzemenin yüzeylerinin hazırlığı yapıldı. Yüzey hazırlama esnasında yağ, pas ve kirden arındırılmış ana malzeme yüzeyleri, kuvars aşındırıcı tozlar kullanılarak 7 bar kumlama basıncı ile pürüzlendirilerek yüzey aktif hale getirildi. Böylece kaplamaya hazır hale getirilen yüzey, çevresel etkilerden (nem vb.) etkilenmemesi için derhal kaplama işlemine geçilmiştir.

3.3.2 HVOF yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplanacak diskin yüzeyinin hazırlanması

Kum püskürtülerek temizlenmiş ve pürüzlendirilmiş dökme demir altlık malzemesi yüzeyine NiCr arabağlayıcı yaklaşık 50 μm kalınlığında HVOF termal püskürtme yöntemi ile kaplandı. Servis koşullarında çalışacak Cr_3C_2-NiCr en üst kaplamanın NiCr arabağlayıcı ile kuvvetli bir bağ oluşturabilmesi için NiCr arabağlayıcı yüzeyinde yeterli ortalama pürüzlülük değeri (Ra= 9,8 μm) belirlendi. Oluşturulan pürüzlü yüzey üzerine yine HVOF termal püskürtme yöntemiyle Cr_3C_2-NiCr kaplama ortalama 300 μm kalınlığında kaplandı. Isıl püskürtme esnasında diskin aşırı ısınmasını önlemek için kaplama uygulanan yüzeyin tersinden basınçlı hava ile soğutma uygulandı.

3.3.3 Plazma püskürtme yöntemiyle Al_2O_3 - TiO_2 kaplanacak diskin yüzeyinin hazırlanması

Dökme demir disk malzemesi üzerine NiCr arabağlayıcının kuvvetli bağ oluşturabilmesi için disklerin yüzeyleri taşlanarak oksit tabakası uzaklaştırıldı. Seramik kaplama yüzeye mekanik bağlanma ile tutunacağından yüzey yeterince pürüzlü hale getirildi. NiCr arabağlayıcı kaplanmadan önce dökme demir disk yüzeyleri 35 grit alümina ile kumlanarak temizlendi ve Ra=13,4 μm ortalama pürüzlülük değeri elde edilerek yüzeyler bağ mukavemeti açısından aktif duruma getirildi. Plazma püskürtme yöntemiyle NiCr arabağlayıcı kaplama uygulanması esnasında diskte aşırı ısınmayı önlemek için diskin arkasından basınçlı hava ile

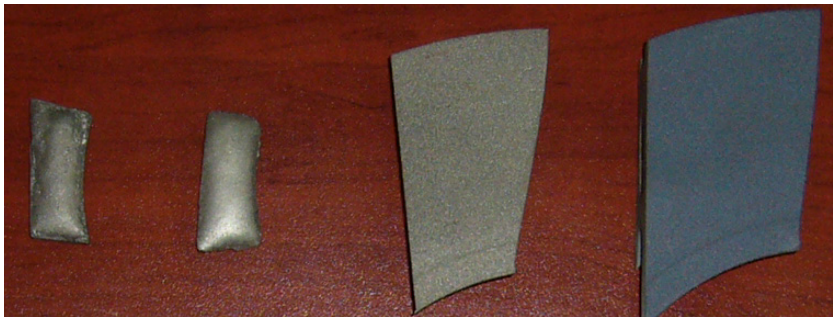
soğutma yapıldı. Disk yüzeylerine ortalama 30 μm kalınlığında kaplanan NiCr arabağlayıcı kaplamanın ortalama pürüzlülük değeri Ra= 12,7 μm değerinde perthometre (perthometer) ile ölçüldü.

3.4 Metalografik İnceleme

Malzemelerin fiziksel, kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri ile içyapıları arasında doğrudan bir ilişki vardır. Dolayısıyla malzemelerin mikroyapı ve mikroanalizleri ile; ilgili malzemenin imalat aşamaları, servis ömrü ve şartları gibi önemli konular hakkında bilgi edinilebilir. Bir malzemenin mikroyapısı, malzemeyi oluşturan bileşenlerin düzeni, geometrik oluşumunun kimyasal ve yapısal tabiatı ile tanımlanmakta ve bu şekilde, malzemenin bileşen fazlarını ve ihtiva ettiği kusurları kapsamaktadır. Bir malzemenin mikroyapısı onun özelliklerini önemli ölçüde belirlemektedir [72].

3.4.1 Numune hazırlama esasları

Metalografik incelemenin esası ve başarısı uygun numunenin alınmasına bağlıdır. Alınan numunenin bir değer taşıyabilmesi için, hem fiziksel hem de kimyasal bileşim yönlerinden numunenin esas malzemeyi temsil etmesi gerekir. Ana kriter, numunenin inceleme amacına uygun olmasıdır. Numune, ya genel mikroyapı incelenmesine veya sadece bir veya birkaç belirlenmiş parametrenin (tane boyutu, kırılma veya çatlama türü vb.) incelenmesine imkan verecek şekilde alınmalıdır. Mikroyapı incelemesine yönelik tüm numunelere sırasıyla; kesme, soğuk bakalite alma, kaba ve ince zımparalama, hassas parlatma ve son olarak da dağlama işlemleri uygulanır. Kaplanmış disklerden alınan ham numuneler Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Metco 19E Metco 18C Cr_3C_2 – NiCr Al_2O_3-TiO_2

Şekil 3.6: Metalografik inceleme için kaplanmış disklerden alınan numuneler

3.4.1.1 Kesme makinesi

Numuneler; incelenmek üzere Şekil 3.7'de gösterilen su sirkülasyonlu, abrazyon diskli, Mecatome T 255/300 kesme makinesi yardımıyla kesilerek kalıplamaya hazır hale getirildi.



Şekil 3.7: Mecatome kesme makinesi

3.4.1.2 Kesilen numunelerin soğuk bakalite alınması

Kesilen numuneler metalografik inceleme yapılmak üzere bakalite alındı. Bunun için reçine ve sertleştirici bulunan epoksi kaplama malzemesi ile numuneler soğuk plastik kalıba alındı ve katılaşmaya bırakıldı. Yaklaşık 6-8 saat sonra numuneler, kalıptan çıkarılarak metalografik inceleme için yüzeyin temizlenmesi ve parlatılması işlemine tabi tutuldu.

3.4.1.3 Kaba ve ince zımparalama işlemi

Bakalite alınan numuneler öncelikle SiC ve kumlu zımparalar ile kaba ve ince zımparalama kademesinden geçirildi. Bu işlemde kaba zımparadan başlanarak ince zımparaya doğru işlem yapıldı. Bunun için Şekil 3.8'de gösterilen Metkon Gripo 2 marka pinon disk ve sırasıyla 80, 150, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 nolu zımparalar kullanıldı. Zımparalama işlemi yapılırken, numunenin ısınmasını önlemek ve numune yüzeyi ile zımpara arasında homojen temasın sağlanması amacıyla bu aşamalar sürekli su ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8: Metkon Gripo 2 zımpara çarkı

3.4.1.4 Nihai parlatma işlemi

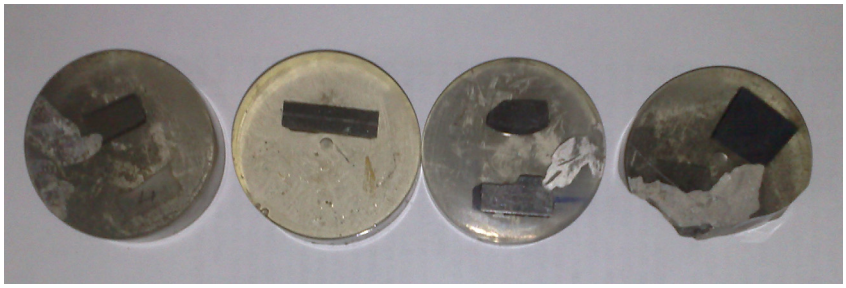
Bu işlem için Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 750 dev/dak dönme hızına sahip Struers Dap-7 marka parlatma çarkı kullanıldı. Enine kesit ve yüzeylerden hazırlanan kaplama numuneleri, yumuşak çuha takılan parlatma diski ile 3-6 μm'lik elmas pasta ile parlatıldı. Son hassas parlatma işlemi ise 1 μm'lik elmas pasta ile yapıldı. Sonra numuneler, 15 dakika süreyle trikloretilenle ultrasonik temizlemeye tabii tutuldu.

3.4.1.5 Dağlama işlemi

Nihai parlatmadan geçirilen numunelerin yüzeyi ışığı eşit bir şekilde dağıttığından, mikroskobik incelemelerde yapıdaki ayrıntılar kolayca belirlenememektedir. Bu sebeple yapıda kontrast oluşturmak amacıyla parlatılan numuneler dağlama işleminden geçirildi. Bu işlem için dağlama reaktifi olarak %95 HNO_3 ile %5 alkol karışımı kullanıldı. Kalıplanmış ve dağlanmış numune örnekleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Struers Dap-7 marka parlatma çarkı



Şekil 3.10: Bakalite alınmış ve dağlanmış numune örnekleri

3.4.2 Kaplanan tabakanın içyapısının incelenmesi

Kaplanan disklerden hazırlanmış olan numunelerin mikroyapısı, taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) ile incelenip enerji dispersif spektrometresi (EDS) ile analiz edildi.

3.4.2.1 Taramalı elektron mikroskop (SEM)

Şekil 3.11'de standart metalografik işlemlerden geçirilen numunelerin mikroyapı değişikliklerini incelemek için farklı büyütmelerde görüntü alabilen Jeol JSM–5910 LV marka SEM cihazı kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için soğuk bakalite alınmış numunelerin daha iyi incelenebilmesi için Palaron Range SC7620 marka fiziksel buhar çökeltme yöntemi ile 10 mA'de, 1 Pa basınçta, 2 dakika süreyle altın plaka katot[5] kullanılarak numunelerin üzeri altın kaplanmıştır.



Şekil 3.11: Jeol JSM–5910 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)

[5] Altın plaka katot: Bu sadece sermet ve seramik numuneler için geçerlidir. Metalik esaslı numunelerde kenara gümüş çözelti sürülmesi yeterlidir.

3.5 Numunelerin Mikrosertliklerinin Ölçülmesi

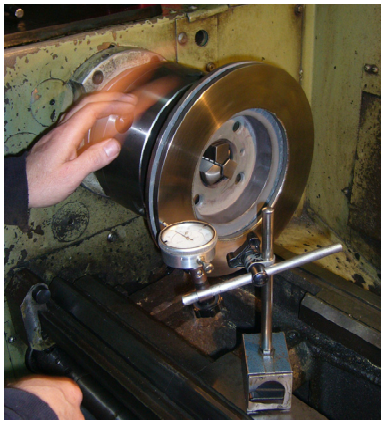
Deney numunelerinin mikrosertlik ölçümleri, Matsuzawa MHT-2 mikrosertlik ölçme cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 136° elmas piramit uç kullanılmıştır. Her bir sertlik ölçümünde numunelerin enine kesitinden yaklaşık 15 saniye süre ile 0,2 kg'lık yük altında sertlik ölçümü yapılmıştır.



Şekil 3.12: Mikrosertlik ölçme cihazı

3.6 Disklerin Yanal Salgısının Ölçülmesi

Disk üreticilerine bağlı olarak bir diskin maksimum yanal salgısı 0,05 ile 0,13 mm arasında olabilmektedir [73]. Aşırı salgı, diskin aşınmasına ve bu aşınmaya bağlı olarak disk kalınlık değişimine neden olabilir. Bu çalışmada kullanılan disklerin yanal salgıları diskin hem iç hem de dış çalışma yüzeyinden Şekil 3.13'de gösterilen 0,001 mm ölçme hassasiyetine sahip kadranlı komparatör ile ölçülmüş ve bu ölçüm değerleri Tablo 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Disklerin komparatörle salgılarının ölçülmesi

Tablo 3.8: Disklerin iç ve dış çalışma yüzeyinden ölçülen yanal salgı miktarları

	OEM Disk		**Metco 19E**		**Metco 18C**		**Cr_3C_2-NiCr**		**Al_2O_3-TiO_2**	
	İç	Dış	İç	Dış	İç	Dış	İç	Dış	İç	Dış
Salgı miktarı (mm)	0,02	0,03	0,05	0,02	0,07	0,02	0,20	0,17	0,18	0,26

Cr_3C_2-NiCr ve Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı disklerin salgı miktarları Tablo 3.8'de görüldüğü gibi üreticilerin belirtmiş olduğu limitlerin dışında olmasına rağmen düzeltilebilecek sınırlar [74] içerisindedir. Ancak salgı miktarlarının büyük olması BTV ve fren basınç değişimleri (BPV) üzerinde etkili olmaktadır.

3.7 Tartma İşlemi

Disklerin tartılmasında; EP-20KA model numaralı, maksimum 20 kg tartabilen ve ± 0,1 gram ölçüm hassasiyetinde tartı cihazı kullanılmıştır.

3.8 Disk Kalınlığının Ölçülmesi

OEM ve kaplanmış disklerin kalınlık değişimleri, dinamometre testinden önce hem diskin iç hem de dış kısmından 90'ar derecelik açılarda dört konumdan Mitutoyo 293 serisi bir dijital mikrometre ile ölçülmüştür. 293-344 seri numaralı Mitutoyo mikrometrenin teknik özellikleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9: 293-344 seri numaralı Mitutoyo mikrometrenin teknik özellikleri [75]

Teknik Özellikler	**Birim**	**Değer**
Hassasiyet	mm	0,001
Kararlılık (Flatness)	µm	0,3
Paralellik	µm	1
Toz/Su koruma seviyesi	-	IP65



3.9 Test Standardı ve Fren Test Düzeneği

Fren sistemlerinin etkinliği, taşıt hızına bağlı olarak durma mesafesi veya negatif ivme ve devreye girme zamanı ile ölçülmektedir. Bu etkinliğin belirlenmesi muhtelif deneylerle gerçekleştirilmektedir. Bir fren disk karakteristiğini belirlemek için genellikle sekiz parametre incelenir. Bunlar;

- Termik şok,
- Termik yorulma,
- Termik titreşimler (Judder),
- Mekanik titreşimler,
- Mekanik gerilmeler,
- Distorsiyonlar,
- Aşınma,
- Birleşik disk ve balata frenleme performansı (AK_1[6] ve AK_2) olarak verilmektedir [16].

3.9.1 Fren test standartları

Frenleme performansı, temel olarak durma mesafesine, fren çıkış torkuna ya da fren verimliliğine göre ölçülür. Frenleme performansını değerlendirmek için yapılan testler; farklı yük, hız, sıcaklık ve pedal kuvveti/fren basıncı uygulanarak ya ataletli dinamometrede ya da taşıt üzerinde gerçekleştirilir. Yaygın test prosedürleri; FMVSS (Federal Motorlu Taşıtlar Emniyet Standartları), SAE (Otomotiv Mühendisleri Birliği), ISO (Uluslararası Standartlar Organizasyonu) ve ECE (Avrupa Birleşmiş Milletler Ekonomik Komisyonu) tarafından oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, dinamometrede disk-balata ikilisinin sürtünme davranışını; ön alışma etkinliği, hız hassasiyeti, sıcaklığa bağlı fren zayıflaması direnci, etkin sürtünme davranışının yeniden oluşturulması ve sürtünme kararlılığı gibi aşamalarda kapsamlı bir biçimde incelemek için SAE J2522 test standardı seçildi. SAE J2522 Dinamometre Genel Fren Etkinlik Testi (AK Master Test); soğuk, ıslak etkinlik, park freni değerlendirmesi ve rampa uygulamalarına sahip çeşitli test versiyonları için ana hatları oluşturur [76]. Sürtünme davranışının değerlendirilmesinde aşağıda belirtilen kavramlar kullanılır:

- Ön alışma etkinliği (Green effectiveness)
- Hız hassasiyeti (Speed sensitivity)
- Sıcaklığa bağlı fren zayıflaması direnci (Fade resistance)
- Etkin sürtünme davranışının yeniden oluşturulması (Friction recovery)
- Sürtünme kararlılığı (Friction stability)

[6] Avrupa'daki otomotiv mühendisleri tarafından geliştirilen bir dinamometre testidir. Bu test, genel olarak balata performansının tespitinde kullanılır.

3.9.2 Testlerde kullanılan atalet dinamometresi

Hidrolik ya da havalı frene sahip binek taşıtların testlerinde kullanılan ataletli dinamometreler; kaplanmış disklerin hızlı sürtünme katsayısı analizlerinden FMVSS 105 ya da 135 simülasyonlarına kadar çeşitli testlerin yapılması için kullanılan bir fren test ekipmanıdır. Dinamometrelerde; performans, dayanıklılık, kapasite ve gürültü testleri yapılan en yaygın testlerdir. OEM balata tedarikçileri ve kompanent üreticileri tarafından kullanılan atalet dinamometre prosedürlerinin çoğu (SAE, JASO, ISO, AK, FMVSS, JIS ya da özel) tek-uçlu dinamometrelerde gerçekleştirilmektedir.

Atalet dinamometresi, değişken hızlı bir atalet volanının kontrolünü yapabilen bir elektrik motorundan (daha spesifik olarak frenleri test edilecek taşıtın maksimum hızı ile ilgili olarak dönme hızını üreten) oluşur. Atalet dinamometrelerinin miline sabitlenmiş volanlar taşıt kütlelerinin aks miline indirgenmiş halini temsil eder. Atalet dinamometreler; ana tahrik ünitesi, atalet uygulama kısmı, fren kısmı, soğutucu hava sistemi, bilgisayar kontrol konsolu, test için fren kompanentlerinden ve sabitleme parçalarından oluşur. Ana tahrik ünitesi, taşıtın kinetik enerjisini simüle eden kütle ataletlerini hızlandırmak ve akabinde kütlenin hızını azaltmak ya da durdurmak için uygulanan frenlemeyi sağlar. Motor, sabit hızlı yokuş aşağı inişleri simüle etmek için frenlemelerde de kullanılabilir [77]. Şayet fren dönmeksizin uygulanırsa, park freni kuvvetleri ölçülebilir. Ölçümlerde kullanılan sensörlerle; hız, tork, basınç, akışkanın yer değiştirmesi ve sıcaklık gibi parametreler ölçülebilir.

Bu çalışmada kullanılan tam ölçekli atalet dinamometresinin resmi Şekil 3.14'de, teknik özellikleri ile ölçüm hassasiyetleri ise Tablo 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.14: Testlerde kullanılan LINK marka tam ölçekli atalet dinamometresi

Tablo 3.10: Testlerde kullanılan atalet dinamometresinin teknik spesifikasyonları ve ölçüm parametreleri

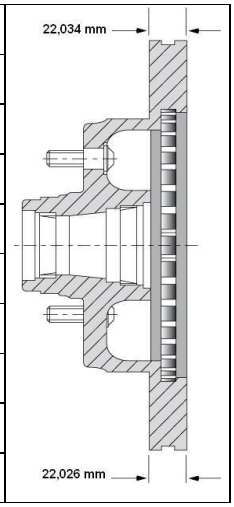
No	Tanımlamalar	Üretici	Modeli	Seri No	Tam ölçek standartları	Birimler	Belirsizlik (+%TÖ)	Belirsizlik (+Birim)	Tam ölçek metrik	Birim
1	Hava hızı	RM Young	27105R-2400 Jenerator	AS17A	55	m/h	% 1,44	0,79	88,55	km/h
2	Maksimum atalet	Link Engineering			68	slug ft²	% 0,44	0,30	92,82	kgm²
3	Baz atalet				8	slug ft²			10,20	kgm²
4	Atalet aralıkları				28 (2,2 de)	slug ft²			2,99	kgm²
5	Motor gücü	General Motors			100	hp			74,57	kW
6	Basınç	Sensotec	TJE-0743-03TJG-3000	478656	3.000	psi	% 0,31	9,33	206,70	bar
7	Açısal hız	SICK STEGMANN	DRS25-4F400512	71002439	2.000	rpm	% 0,29	5,79	2.000,00	dev/dak
8	Sıcaklık	Link Engineering Co.	1484 CAQ	TL17A	2.400	°F	% 0,54	13,07	1.315,56	°C
9	Tork	Siebe Lebow	2112-50K	332	4.167	ft.lbs	% 0,34	14,03	5.667,12	Nm
10	Aşınma	Mitutoyo	Çeşitli	Çeşitli	1	in	% 0,34	0,00	2,54	cm
11	Akışkan hacmi	Balluff	BTL-5-A21-M0102-2-532	FD17	2,4409	in³	% 0,30	0,01	40,00	cm³
12	Kapasitif prob	Capacitec	4008-P115		0,100	in	% 0,24	0,0002	2.540,00	mikron

3.10 DTV'nin Ölçülmesi

Üniform olmayan çevresel disk kalınlığı, mekanik odaklı (termik odaklı olmayan) düşük frekanslı titreşimlere (cold judder) ve fren torkunda değişimlere neden olur. Disk kalınlığındaki mikroskobik değişiklikler yüzey işlemleri esnasında oluşabilmektedir. Çevresel DTV'nin temel sebebi; disk-balata arayüzünde çevresel ve kesintili temastan kaynaklanır. Yan yüzey çarpıklığı da, fren diskinin kenardan-kenara eksenel doğrultuda yer değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır [19]. Yanal çarpıklıklar DTV'ye neden olur. DTV'li bir disk, balatada iç ve dış hareketler oluşturarak, değişen frenleme kuvvetine sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada testler esnasında disklerdeki kalınlık değişimlerinin ölçülmesinde 6 adet kapasitif prop kullanılmıştır. Bu propların teknik özellikleri Tablo 3.11'de gösterilmiştir.

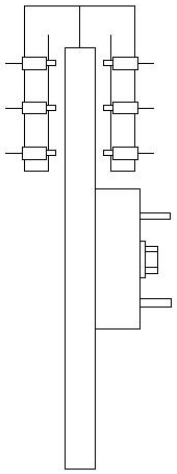
Tablo 3.11: DTV ölçümünde kullanılan kapasitif propların teknik özellikleri

Tanımlama		PR191 4100-SL	
Yer		Link	
Üretici		Capacitec	
Mevcut kanallar		3	
Kullanılan kanallar		16	
Model		4008-P115	
Seri		4.00E+06	
Tam ölçekli standart	inç	0,1	
Genişletilmiş belirsizlik (+birim)		0,0002	
Tam ölçekli metrik	mikron	2,540	

3.11 Konikliğin Hesaplanması

Konikliğin hesaplanmasında, ilk 5 saniyede diskin iç ve dış çapındaki okumaların ortalaması alındı. Sonra bu ilk ortalama değerler herhangi bir zamanda ölçülen değerlerden çıkarıldı. Dış çap değeri, iç çap değerinden çıkarılarak koniklik oranları tespit edildi. Diskin yüzeyi ile prop arasındaki mesafe başlangıçta ayarlandı. Proplar, diskin iç yüzeyinden 1000 mikron ve dış yüzeyinden 2000 mikron mesafeye Şekil 3.15'deki gibi yerleştirildi. Bunun sebebi diskin koniklik etkisinin, diskin dış yüzeyini

proplara doğru itecek ve iç yüzeyini proplardan uzaklaştıracak olmasındandır. Bu ayarlama ile diskin dış yüzeyinden ölçüm yapan propların diske zarar vermesi önlenmiş olmaktadır. Önemli olan proplarla disk arasındaki mesafe değişimidir. Şematik olarak Şekil 3.15'den görüldüğü üzere 6 propla diskin iç ve dış yüzeyinin koniklik değişimleri, hız/basınç hassasiyeti (160 km/h hızdan başlayan) ile birinci sıcaklıkla fren zayıflaması bölümünde incelendi.



Şekil 3.15: DTV ve koniklik ölçümünde kullanılan kapasitif propların konumlandırılması

3.12 Fren Tork Değişimi (BTV)

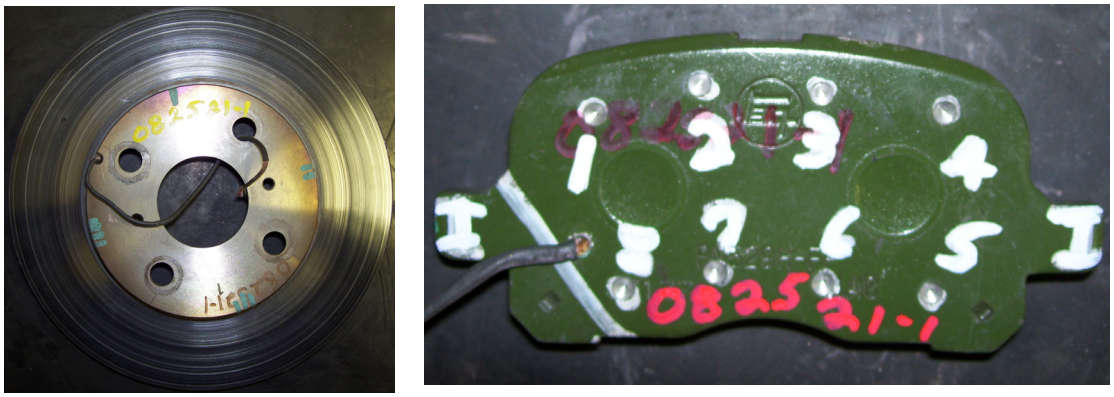
Geometrik düzensizlikler, düzensiz aşınma, sürtünme tabakası ve ısınma, sürtünme karakteristikleri ve sürtünme seviyesi gibi durumlar BTV'yi tetikleyen ana nedenlerdir. BTV'yi oluşturan mekanik etkiler, sadece imalat toleranslarına değil aynı zamanda tribolojik konulara da bağlıdır. Yüksek sıcaklık gradyentleri ile disk malzemesinin düzensiz termik genleşmesinden dolayı geçici DTV'ler oluşabilir. Yaklaşık saç teli kalınlığının yarısı kadar bir aralıktaki fren tork değişimi, aşağı yukarı 50 Nm'lik bir tork değişimine sebep olduğu ifade edilmektedir [78].

BTV temel olarak; balata sertliği, frenleme kuvveti, sürtünme katsayısı, uygulama basıncı ve DTV gibi parametrelerden etkilenir. BTV değişimleri titreşimler olarak ortaya çıkar. Yapılan bir çalışmada BTV'nin, fren basınç değişimleri (BPV) ile orantılı olduğu belirtilmiştir [22].

Bu çalışmada BTV; çeşitli basınçlarda 80 km/h'ten 30 km/h'e 64 frenleme ile gerçekleştirilen alışma (Burnish) ve 30 bar sabit basınçta yine aynı hız aralığında 18 frenleme ile gerçekleştirilen kararlılık (recovery) testlerinde incelendi.

3.13 Aşınmanın Ölçülmesi

Disk ve balatalardaki aşınma miktarı, anlık değil test öncesi ve sonrasında boyutsal (kalınlık) ve kütlesel ölçümlerle tespit edilmiştir. Şekil 3.16'dan gösterildiği üzere disklerdeki boyutsal aşınmalar diskin dört noktasından 90'ar derecelik aralıklarla ve balatalardan ise 8 noktadan yapılmıştır. Bu ölçümlerde kullanılan cihazların teknik özellikleri, bu bölümün tartma işlemi ve disk kalınlığının ölçülmesi kısımlarında anlatılmıştır.



Şekil 3.16: Orijinal diskin test öncesi ve sonrası aşınma ölçüm konumları

3.13.1 Yüzey pürüzlülük ölçümü

Yüzey pürüzlülük ölçümü[7], surfometre (surfometer- pürüzlülük ölçer) ile yapılmıştır. Surfometre ile 90'ar derecelik açılarda dört noktadan disklerin yüzey pürüzlülük değerleri mikron cinsinden hem test öncesi hem de test sonrası ölçüldü. Verilen değerler diskin ilgili bölgesindeki en yüksek ve en düşük pürüzlülük bölgesi arasındaki farktır. Tablo 3.12'de ise yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kullanılan taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçerin (Pocket Surf®) teknik özellikleri verilmiştir.

[7] Genellikle yeni disklerin ortalama pürüzlülük değeri (Ra) 45-60 μin. (1,125 – 1,5 μm) arasında olabilmektedir [73].

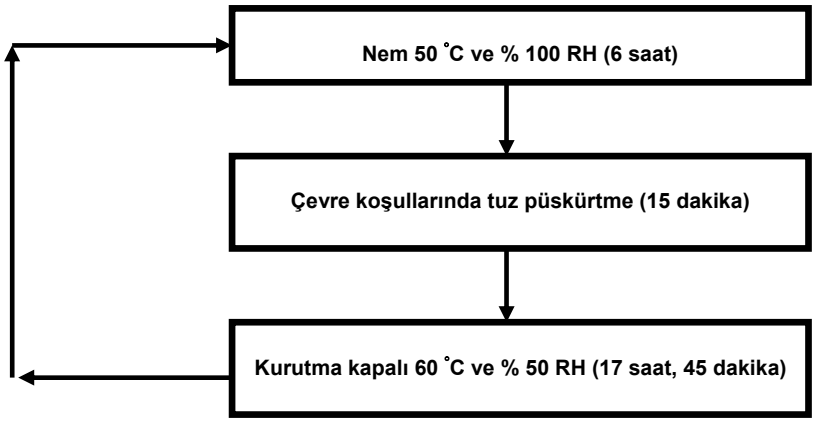
Tablo 3.12: Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan Pocket Surf®'un teknik özellikleri

Boyutları	mm	140 x 76 x 25
Ağırlık	g	435
Ölçüm aralığı	µm	Ra - 0,03 - 6,35
	µm	Ry - 0,2 - 25,3
	µm	Rmak - 0,2 - 25,3
	µm	Rz - 0,2 - 25,3
Ölçüm hassasiyeti	µm	0,01
Ölçüm hassasiyeti özellikleri	-	ASME-B46.1, ISO, DIN standartları
Dijital ekran	-	LCD; 3 dijit; "Şarj düşük" sinyali; "H" ve "L"

3.14 Korozyon Testi

Düşük korozyon direncine ve optimum düzeyde termik iletkenlik ile aşınma mukavemetine sahip olan gri dökme demir, fren disklerinin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak disk için aracın bulunduğu ya da kullanıldığı yerlerde/bölgelerde suyun, nemin ve tuzun bulunması halinde ciddi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu amaçla disklerin ısıl verimliliğini arttırmak, korozyon, oksidasyon veya aşınma davranışını iyileştirmek amacıyla kaplama uygulamaları tercih edilebilir.

Bu çalışmada orijinal ve kaplanmış disklerin korozyon direncini tespit etmek için hızlandırılmış SAE J2334 korozyon testi uygulandı. Ancak bu test, test prosedüründe bazı değişiklik yapılarak gerçekleştirildi. Bu değişiklikler; püskürtmede NaCl miktarının arttırılması, daha sık püskürtme, yaş ve kuruluk döngülerinin sırasının değiştirilmesidir. Şekil 3.17'de SAE J2334 test prosedürüne göre otomatik korozyon test döngüsü gösterilmiş ve Tablo 3.13'de ise ESX-3CA marka 408 litrelik aşırı-soğutma sıcaklık ve nem odasının özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.17: SAE J2334 Korozyon test döngüsü – Otomatik operasyon (1 gün) [79]

Tablo 3.13: ESX-3CA marka 408 litrelik aşırı-soğutma sıcaklık ve nem odası [80]

Özellikler	Birim	Değerler
İç Hacim	l	408
İç Boyutlar (E x B x Y)	mm	600 x 800 x 850
Dış Boyutlar (E x B x Y)	mm	1040 x 1430 x 2040
Sıcaklık Aralığı	°C	-70 to 150°C
Nem aralığı	%	10 - 98 RH
Ortalama değişim oranı	°C/dak	5,5°C/dak ısıtma ve 2,7°C/dak soğutma
Güç		208/230V 3ph
Maksimum hava soğutma kapasitesi	Btu/h	25.000
Maksimum gürültü seviyesi (1 metre uzakta)	dBA	72
Kontrol sensöründeki sıcaklık dalgalanması	°C	±0.3°C (100°C'ye kadar)
Kontrol sensöründeki nem dalgalanması		±2.5
Sıcaklık gradyenti	°C	±0.7°C (100°C'ye kadar)
Nem gradyenti	%	±3
Hava akışı	l/dak	11326,74



3.14.1 Korozyon test solüsyonu

Korozyon testlerinde tuz solüsyonu 3 yöntemle uygulanabilmektedir. Bunlar; daldırma, püskürtme ve hava atomizasyonlu sis yöntemleridir. Bu çalışmada korozyon test laboratuarının teknik imkanları tuz püskürtme yöntemine uygun olduğundan dolayı bu yöntem seçilmiş ve Tablo 3.14'de gösterilen H_2O solüsyonu kullanılmıştır.

Tablo 3.14: Disklere uygulanan korozyon testi solüsyonu

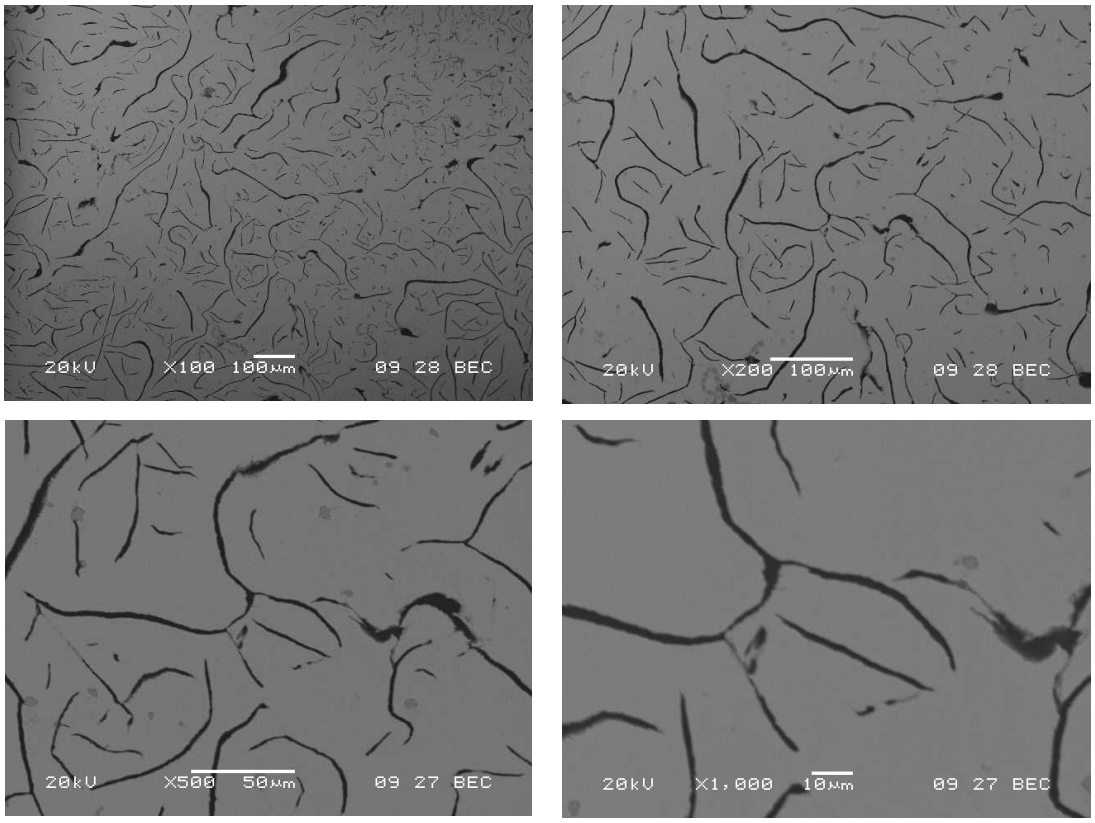
	Standart değerler [%]	**Test değerleri** [%]
NaCl	0,5	0,7
$CaCl_2$	0,1	0,1
$NaHCO_3$	0,075	0,075

4. KAPLAMALARIN MİKROYAPI VE MİKROANALİZLERİ

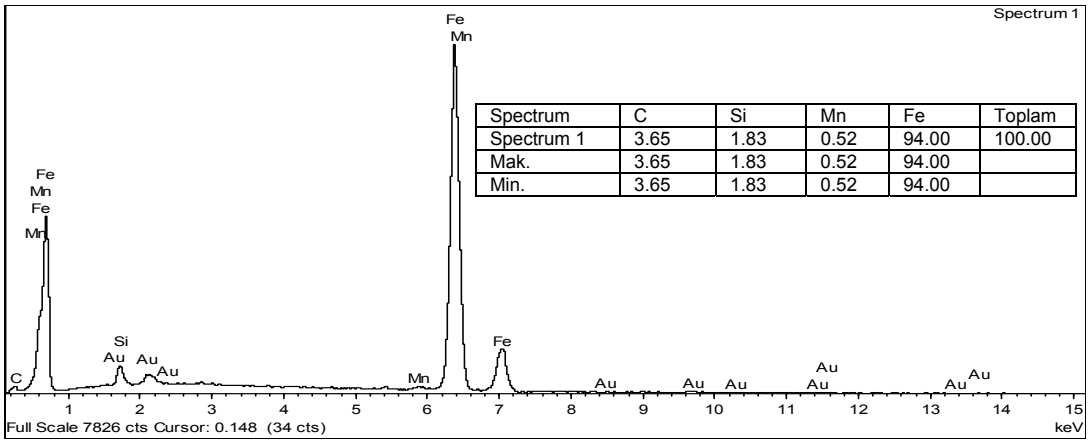
Kaplanan disklerin mikroyapısı, taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) incelenip enerji dispersif spektrometresi (EDS) ile analize tabii tutuldu. Yüzey kaplama işleminden sonra ana malzemeye göre daha sert ve dolayısıyla dış etkilere karşı daha dayanıklı bir yüzey tabakası elde edildi.

4.1 Dökme Demir Numunenin Metalografik İncelenmesi

Diskin yapısında, karasteritik boyutta grafit tabakalar, perlit ve az miktarda ferrit bulunmaktadır. Şekil 4.1'den ince grafit tabakaların morfolojisi, standart metalografik yöntemlerle parlatılmış gri dökme demirin SEM mikrografından görülebilmektedir. Şekil 4.2'de orijinal diskten alınan numunenin EDS analizi verileri (94Fe3,65C1,83Si0,52Mn) görülebilmektedir.



Şekil 4.1: Gri dökme demir altlık malzemenin enine kesitinin SEM mikrografı

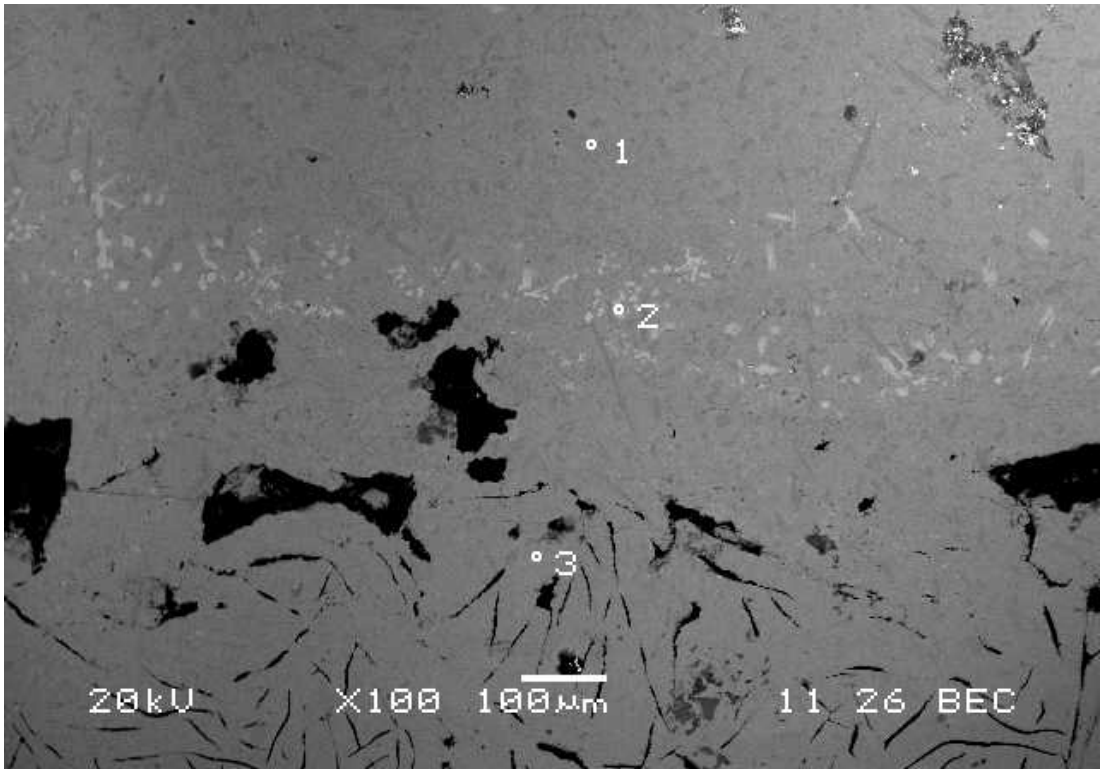


Spectrum	C	Si	Mn	Fe	Toplam
Spectrum 1	3.65	1.83	0.52	94.00	100.00
Mak.	3.65	1.83	0.52	94.00	
Min.	3.65	1.83	0.52	94.00	

Şekil 4.2: Gri dökme demir altlık malzemenin EDS analizi

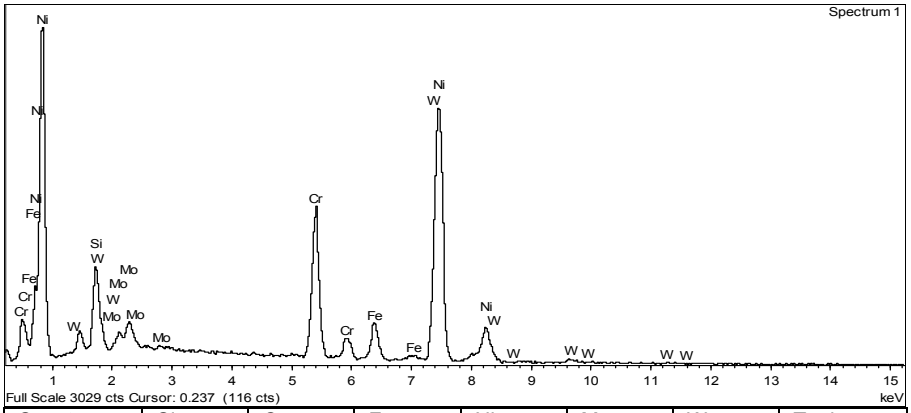
4.2 Metco 19E Kaplama Numunesinin İncelenmesi

Numuneler enine kesitinden ve yüzeyden standart metalografik tekniklerle hazırlanarak SEM ile mikroyapıları incelenerek mikrograflar alındı. SEM üzerindeki ünitesiyle, Şekil 4.3'deki 1, 2 ve 3 bölgelerinden noktasal analizler yapıldı.



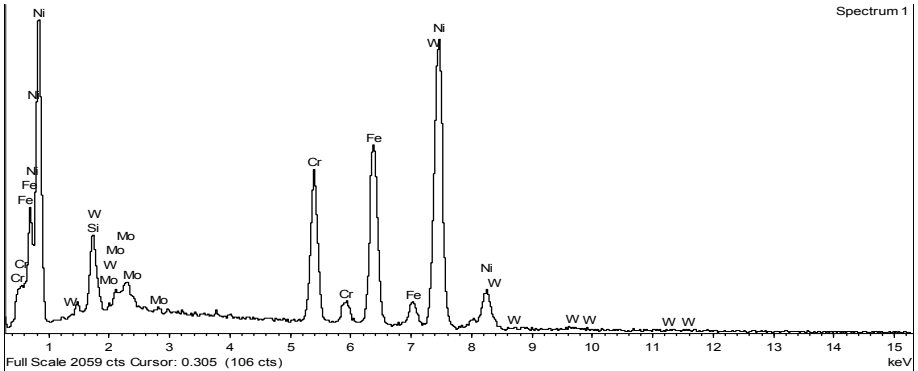
Şekil 4.3: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin SEM mikrografı

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi mikrograftaki koyu siyah bölgeler kaplamada bulunan porozitelerdir. Ayrıca aynı şeklin SEM mikrografındaki 1, 2 ve 3 nolu bölgelerin EDS analizleri Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir. Kaplamanın matriksini temsil eden 1 nolu bölgenin nikel ağırlıklı olduğu (%64.93) Şekil 4.4'de gösterilen EDS analiziyle belirlenmiştir. Kaplama içerisinde gözenekler açıkça görülebilmektedir. Alevle püskürtme, atmosferik ortamda uygulandığından dolayı oksitli bileşiklerin oluşması söz konusudur. Matriksin, oksitli bileşikler ve porozitelerin varlığından dolayı; başta aşınma mukavemetinin düşük olması ve nikel matriksin sürtünme katsayısının yüksek olması fren testlerinde diskin ve balataların kütlesel kayıplara maruz kalmasına sebep olmuştur.



Spectrum	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Toplam
Spectrum 1	4.52	17.82	5.80	64.93	2.79	4.14	100.00
Mak.	4.52	17.82	5.80	64.93	2.79	4.14	
Min.	4.52	17.82	5.80	64.93	2.79	4.14	

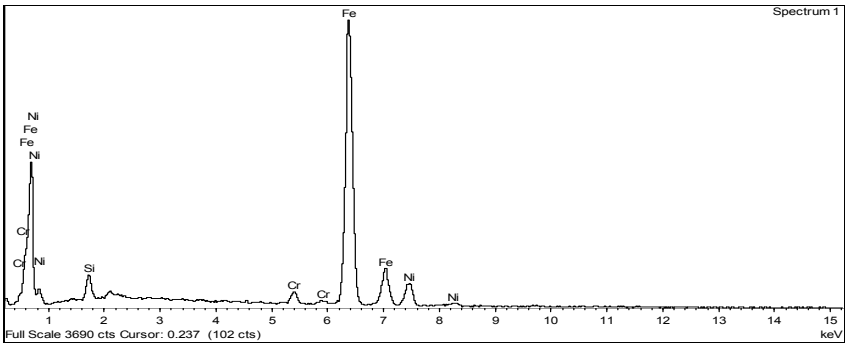
Şekil 4.4: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin EDS analizi (Kaplama bölgesi - 1. Bölge)



Spectrum	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Toplam
Spectrum 1	3.07	13.54	22.43	55.68	1.70	3.57	100.00
Mak.	3.07	13.54	22.43	55.68	1.70	3.57	
Min.	3.07	13.54	22.43	55.68	1.70	3.57	

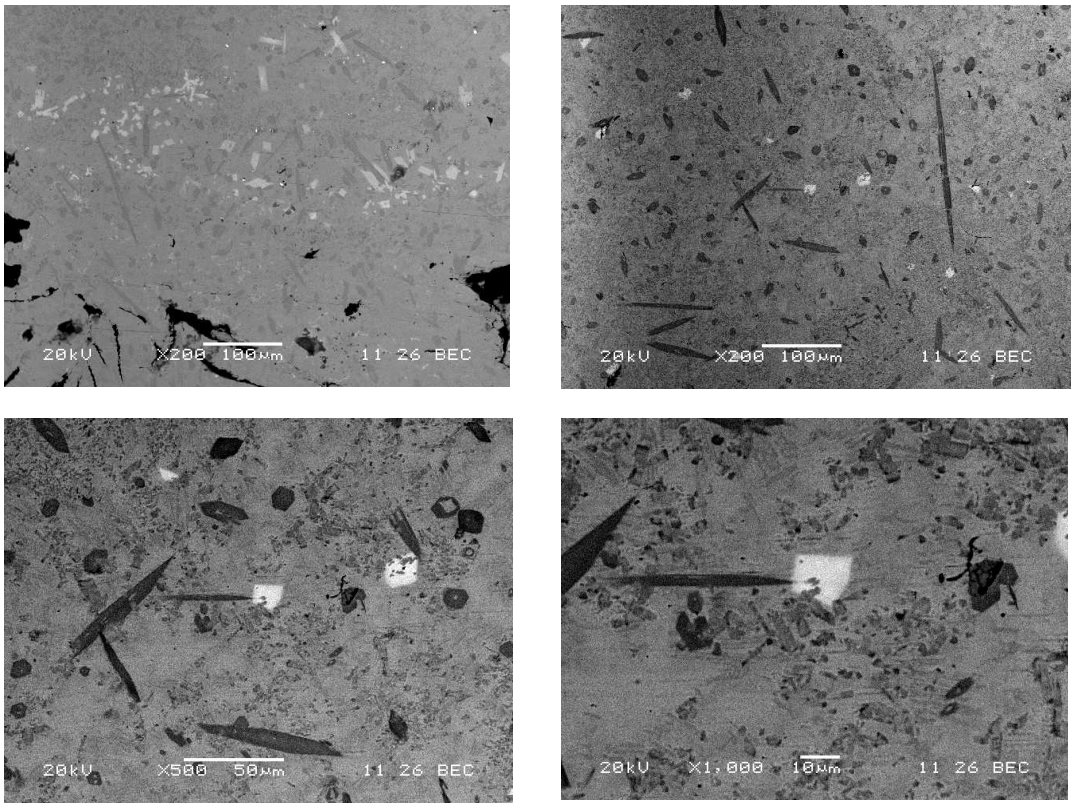
Şekil 4.5: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin EDS analizi (Altlık malzemeye yakın olan kısmı - 2. Bölge)

Sert partiküller, nikel matriks içerisine çökelerek çok iyi bir kompozit oluşturmuştur. Bu bölgeyi dökme demir altlık ve kaplama ara yüzeyi olarak tanımlayabiliriz. Altlık ve kaplamanın ergitilmesi esnasında ısının etkisi ile sert karbürlü partiküllerin yoğun olarak çökeldiği görülmektedir.



Spectrum	Si	Cr	Fe	Ni	Toplam
Spectrum 1	2.81	2.18	84.13	10.88	100.00
Mak.	2.81	2.18	84.13	10.88	
Min.	2.81	2.18	84.13	10.88	

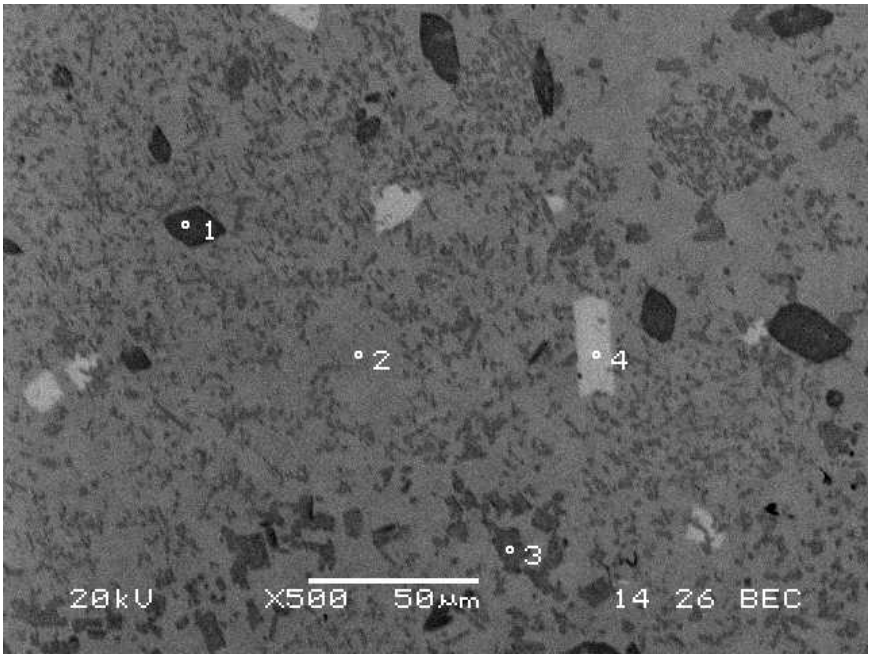
Şekil 4.6: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinin EDS analizi (Altlık malzemenin kaplamaya yakın kısmı - 3. Bölge)



Şekil 4.7: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan diğer SEM mikrografları

Şekil 4.3'de gösterilen SEM mikrografının 3 nolu bölgesindeki EDS analizi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 3 nolu bölgenin tipik grafitli dökme demir olduğu ve kaplamanın ergitilmesi sırasında yeterli sıcaklık ve süre sağlanabildiğinden kaplamadan altlık malzemeye Ni ve Cr difüzyonu[8] olduğu belirlenmiştir.

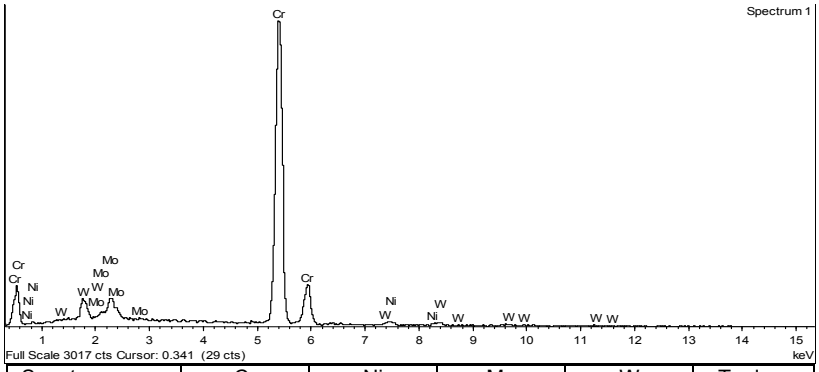
Şekil 4.7'den Ni esaslı Metco 19E sert kaplama tozunun alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle kaplanmış diskin enine kesitinden ve Şekil 4.8 ile 4.13'den ise parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografları gösterilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi SEM mikrografındaki 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerin EDS analizleri, Şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.14'de gösterilmiştir. Kaplama yüzeyinin hassas parlatılmış (SEM) mikrografı ve EDS analizlerinden matriksin Nikel ağırlıklı olduğu, Cr, Si, W, Mo elementlerinin karbürlü iri farklı morfolojik yapılı bileşiklerinin nikel matriks içine gömülmüş tipik mikrografı görülmektedir. İri karbürlü bileşikler oluşmasına rağmen, iri karbürlü bileşiklerin matriksle iyi ıslanma sağlayamaması ve nikelin karbür oluşturamamasından nikel matriksin sürtünme katsayısını arttırması ve aşınmanın yüksek olabileceği mikrograflardan ve EDS analizlerinden beklenen muhtemel deneysel sonuçlardır.



1- Cr yoğunluklu bölge, 2- Ni yoğunluklu, 3-NiCrMoW yoğunluklu, 4- 64,8Cr15,8W13,3Mo yoğunluklu

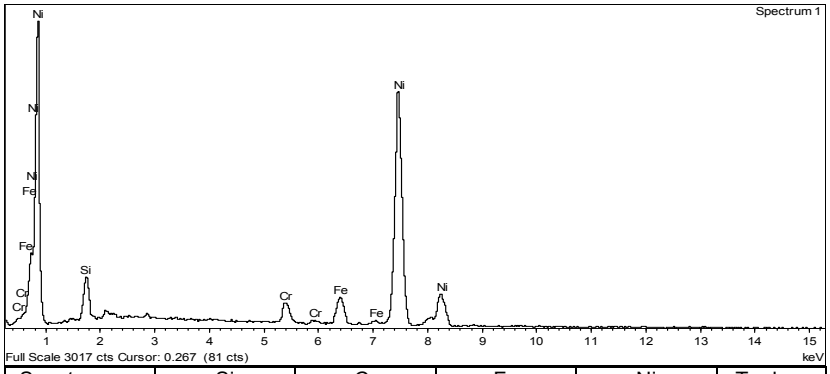
Şekil 4.8: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografı

[8] Difüzyon arayüzeylerdeki bağlanmanın en önemli öğelerinden biridir.



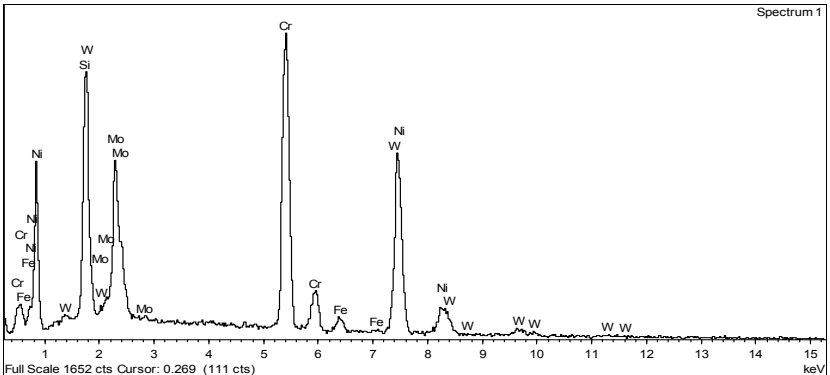
Spectrum	Cr	Ni	Mo	W	Toplam
Spectrum 1	86.18	2.12	5.39	6.31	100.00
Mak.	86.18	2.12	5.39	6.31	
Min.	86.18	2.12	5.39	6.31	

Şekil 4.9: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 1 numaralı bölgesinin EDS analizi



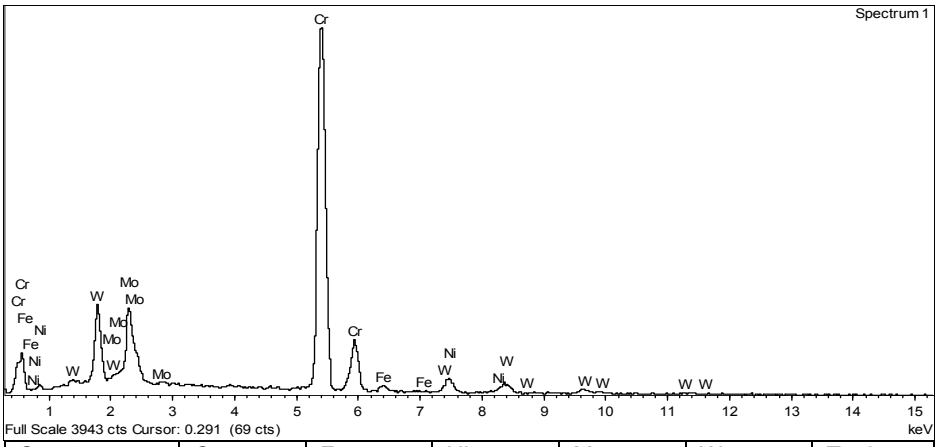
Spectrum	Si	Cr	Fe	Ni	Toplam
Spectrum 1	4.80	3.30	5.54	86.36	100.00
Mak.	4.80	3.30	5.54	86.36	
Min.	4.80	3.30	5.54	86.36	

Şekil 4.10: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 2 numaralı bölgesinin EDS analizi



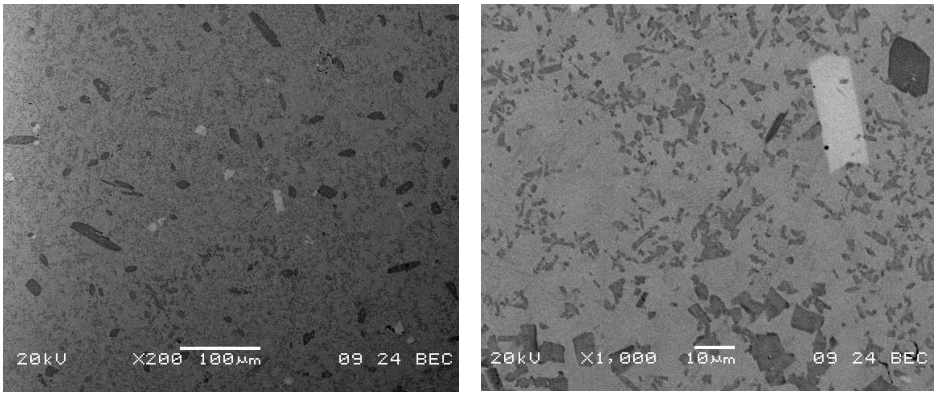
Spectrum	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Toplam
Spectrum 1	7.60	28.40	1.72	34.00	15.82	12.45	100.00
Mak.	7.60	28.40	1.72	34.00	15.82	12.45	
Min.	7.60	28.40	1.72	34.00	15.82	12.45	

Şekil 4.11: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 3 numaralı bölgesinin EDS analizi

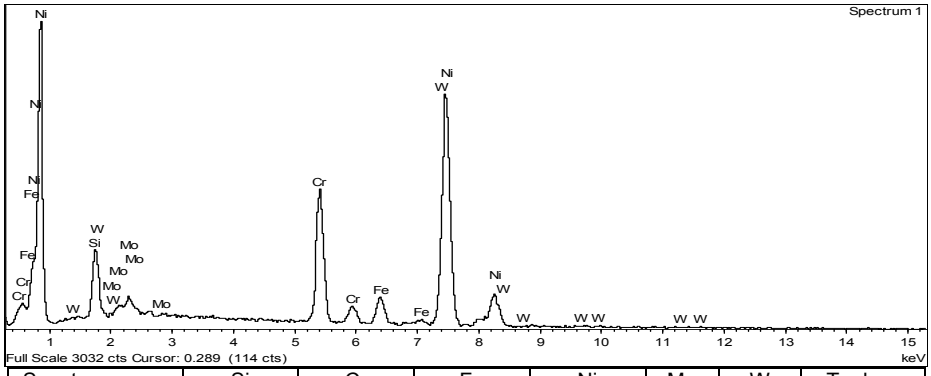


Spectrum	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Toplam
Spectrum 1	64.81	1.28	4.80	13.27	15.85	100.00
Mak.	64.81	1.28	4.80	13.27	15.85	
Min.	64.81	1.28	4.80	13.27	15.85	

Şekil 4.12: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinin 1 numaralı bölgesinin EDS analizi



Şekil 4.13: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan diğer SEM mikrografları

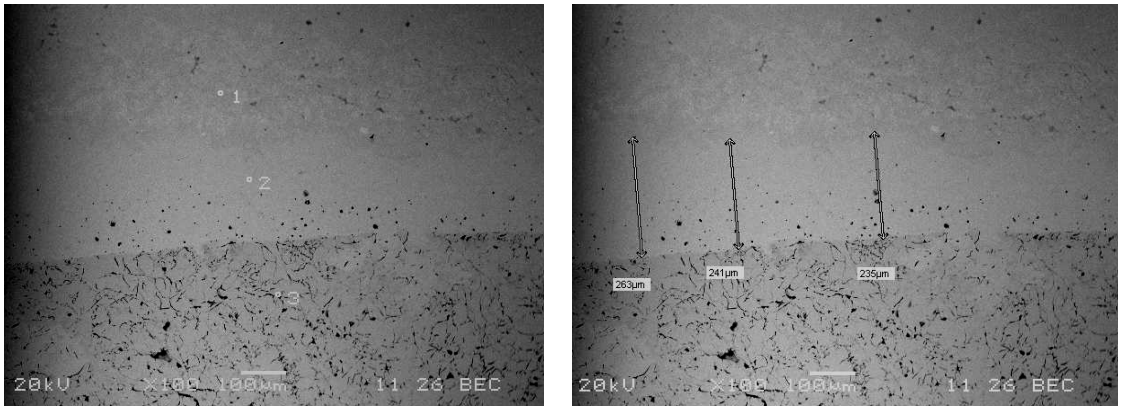


Spectrum	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Toplam
Spectrum 1	4.60	17.49	4.71	67.49	2.13	3.57	100.00
Mak.	4.60	17.49	4.71	67.49	2.13	3.57	
Min.	4.60	17.49	4.71	67.49	2.13	3.57	

Şekil 4.14: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 19E kaplamanın parlatılmış yüzeyinden yapılan genel EDS analizi

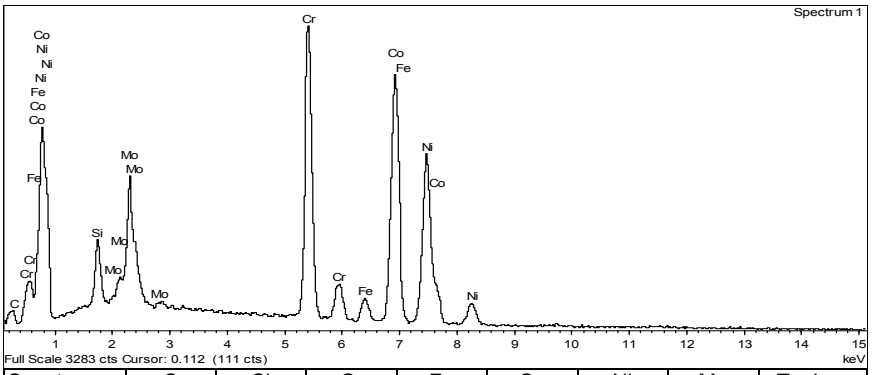
4.3 Metco 18C Kaplama Numunesinin İncelenmesi

Toz malzeme disk üzerine soğuk olarak püskürtüldükten sonra ergitme işlemi yapılmıştır. Tozun ergitme işlemi 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden, altlık ve kaplama arasında ısıdan etkilenmiş bir tabaka görülmektedir. Hatta bu tabaka içerisinde altlığa yakın kısımlarda altlık malzemeden kaplama malzemesine karbon difüzyonu için yeterli ısı ve süre sağlandığından kobalt esaslı kompozit malzemenin de altlık yüzeye difüzyonu olasıdır. Bu durum yüksek sıcaklıktan dolayı olmuştur. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan SEM mikrografı gösterilmiştir.



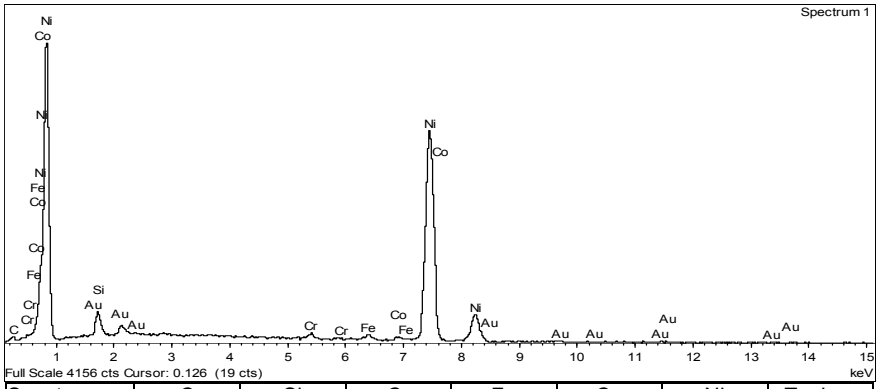
Şekil 4.15: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan SEM mikrografları

Şekil 4.15'de gösterilen SEM mikrografındaki 1, 2 ve 3 bölgelerinden yapılan EDS analizleri Şekil 4.16, 17 ve 18'de gösterilmiştir. Kaplamanın hassas parlatılmış enine kesitinin SEM mikrografı 1 nolu bölge mikroyapısında gözenekli bir yapı görülmektedir. Dökme demir altlık ve kobalt matriks ara yüzeyinde ısıdan etkilenmiş ve altlık malzemeye doğru nikel difüzyonuyla iyi bir bağ mukavemeti oluştuğu görülmektedir. İyi bir bağlanmanın oluştuğu 2 nolu bölgede yüksek ısı sebebiyle CO'nun gaz halinde bu bölgede hapsolmasıyla gözenekli bir yapı oluşturmuştur. 3 nolu bölgede tipik gri dökme demirin kimyasal bileşenlerin yanında yüksek sıcaklığın etkisiyle eser miktarda da olsa Cr ve dikkate değer miktarda nikel altlık dökme demire difüze olmuştur.



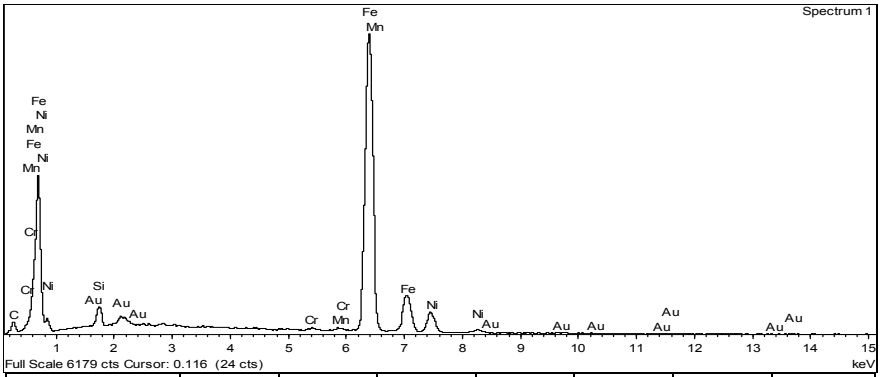
Spectrum	C	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Toplam
Spectrum 1	4.37	2.47	21.40	2.46	33.26	26.60	9.44	100.00
Mak.	4.37	2.47	21.40	2.46	33.26	26.60	9.44	
Min.	4.37	2.47	21.40	2.46	33.26	26.60	9.44	

Şekil 4.16: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinin 1 numaralı bölgesinin EDS analizi



Spectrum	C	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Toplam
Spectrum 1	4.19	2.78	0.99	1.12	1.08	89.84	100.00
Max.	4.19	2.78	0.99	1.12	1.08	89.84	
Min.	4.19	2.78	0.99	1.12	1.08	89.84	

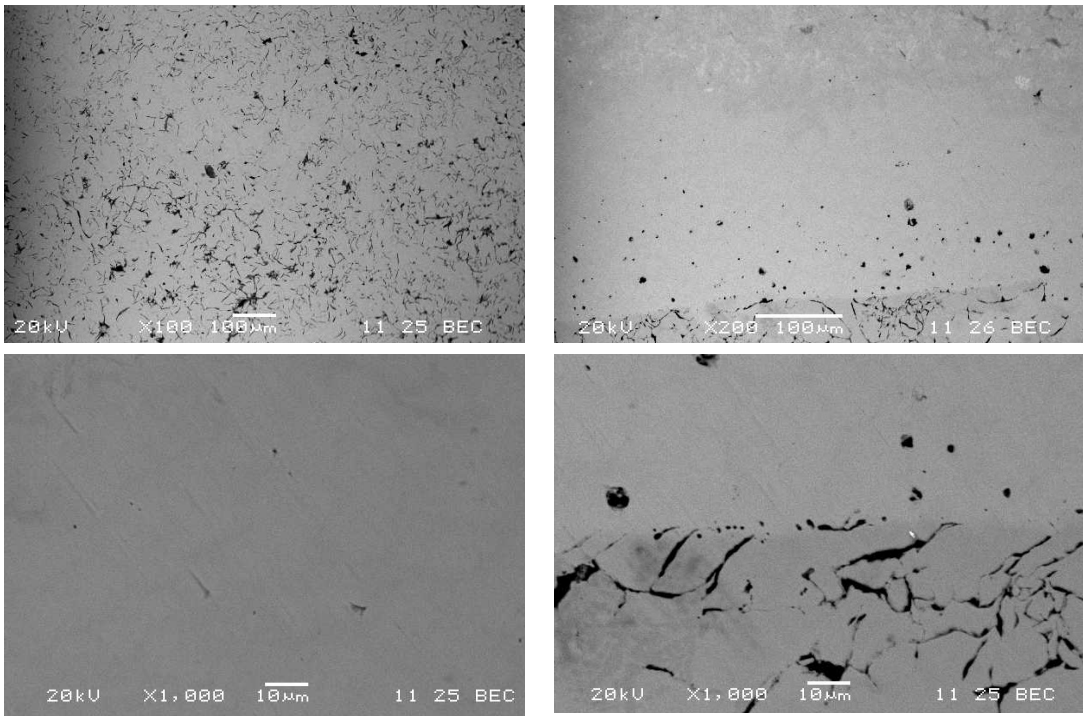
Şekil 4.17: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinin 2 numaralı bölgesinin EDS analizi



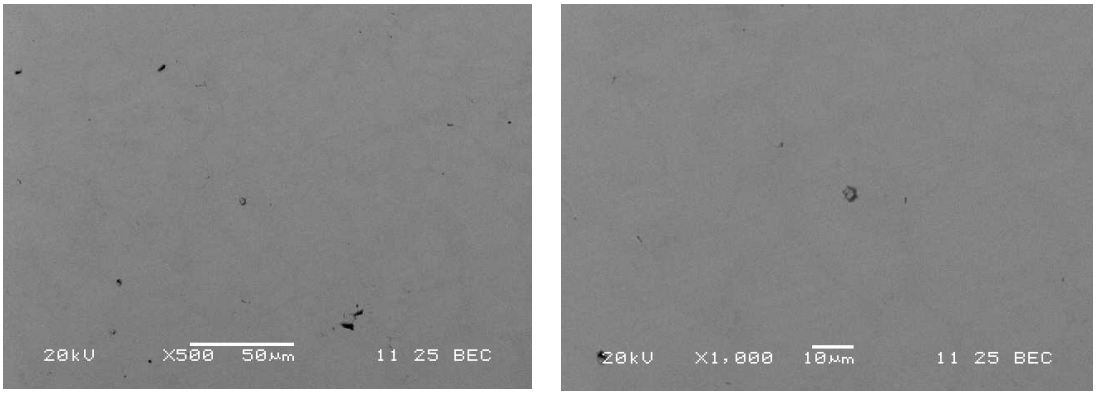
Spectrum	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Toplam
Spectrum 1	7.06	2.09	0.27	0.57	81.34	8.67	100.00
Mak.	7.06	2.09	0.27	0.57	81.34	8.67	
Min.	7.06	2.09	0.27	0.57	81.34	8.67	

Şekil 4.18: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinin 3 numaralı bölgesinin EDS analizi

Şekil 4.19'da alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinden ve Şekil 4.20'de ise kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografları gösterilmiştir. Kaplama yüzeyinin mikrografları ve analizlerinden; oksitli, gözenekli, iri karbürlü tanelerin kobalt matriksle çok iyi ıslanmamış genel durumunu gözlemek mümkündür. Alevle püskürtme yönteminin hızının düşük olması ve partiküllerin alev içinde uzun süre kalarak oksitli yapı oluşturmasından dolayı aşınma mukavemetlerinin bir miktar düşmesi beklenen bir durumdur.



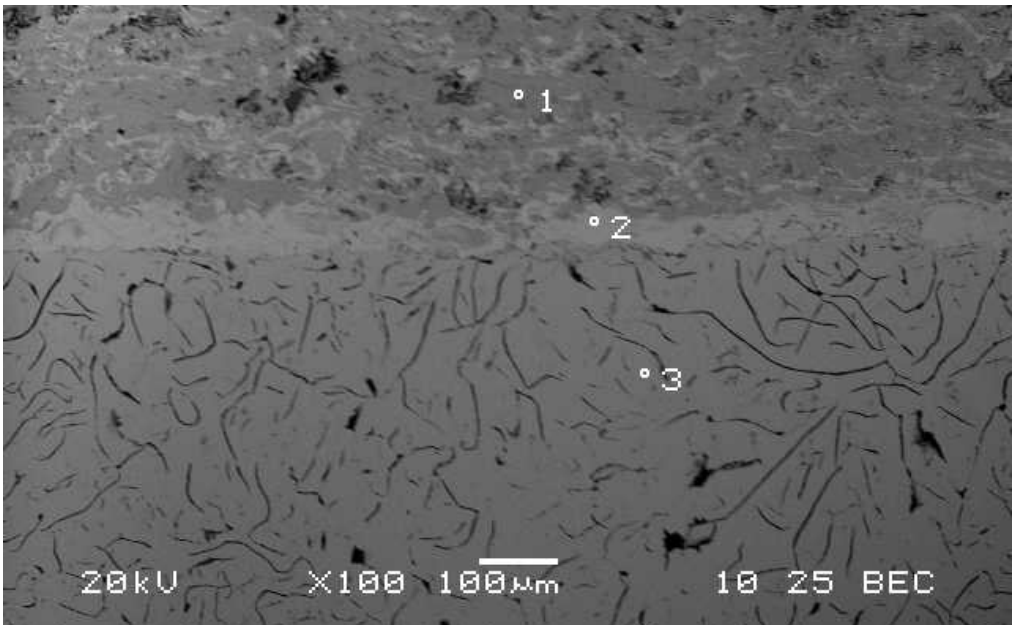
Şekil 4.19: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış enine kesitinden alınan diğer SEM mikrografları



Şekil 4.20: Alevle toz püskürtme ve ergitme yöntemiyle Metco 18C kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografları

4.4 Cr_3C_2 - NiCr Kaplama Numunesinin İncelenmesi

Numuneler enine kesitinden ve yüzeyden standart metalografik tekniklerle hazırlanarak taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) mikroyapılar incelenerek mikrograflar alındı. SEM üzerindeki EDS (Enerji dipersive spektrometre) ünitesiyle, Şekil 4.21'deki 1, 2 ve 3 bölgelerinden noktasal analizler yapıldı. Şekil 4.21 ve 22'deki mikrograftarda kaplamanın (gri dökme demir/NiCr arabağlayıcı/Cr_3C_2-NiCr kaplama) enine kesitindeki kimyasal kompozisyon farklılıkları incelenip altlık dökme demir, NiCr arabağlayıcı ve Cr_3C_2-NiCr bölgelerindeki farklılıklar EDS analizleri ile Şekil 4.23-26'da gösterilmiştir. Şekil 4.27'de ise yüzeyden HVOF termal püskürtme yöntemiyle yığıntılanmış Cr_3C_2-NiCr kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan SEM mikrografı gösterilmiştir. HVOF termal püskürtme yöntemi ile gri dökme demir altlık malzeme üzerine NiCr arabağlayıcı ve Cr_3C_2-NiCr en üst kaplama yığıntılanması Şekil 4.27'den görülmektedir. Kaplamanın mikroyapısından, uzun ve yassılaşmış lameler tanelerin kaplama yüzeyine paralel yönde olduğu açıkça görülmektedir. Aynı zamanda kaplamanın yoğun bir yapıya sahip olduğu ve gözle görülebilir çok küçük gözeneklerin varlığı söz konusudur.

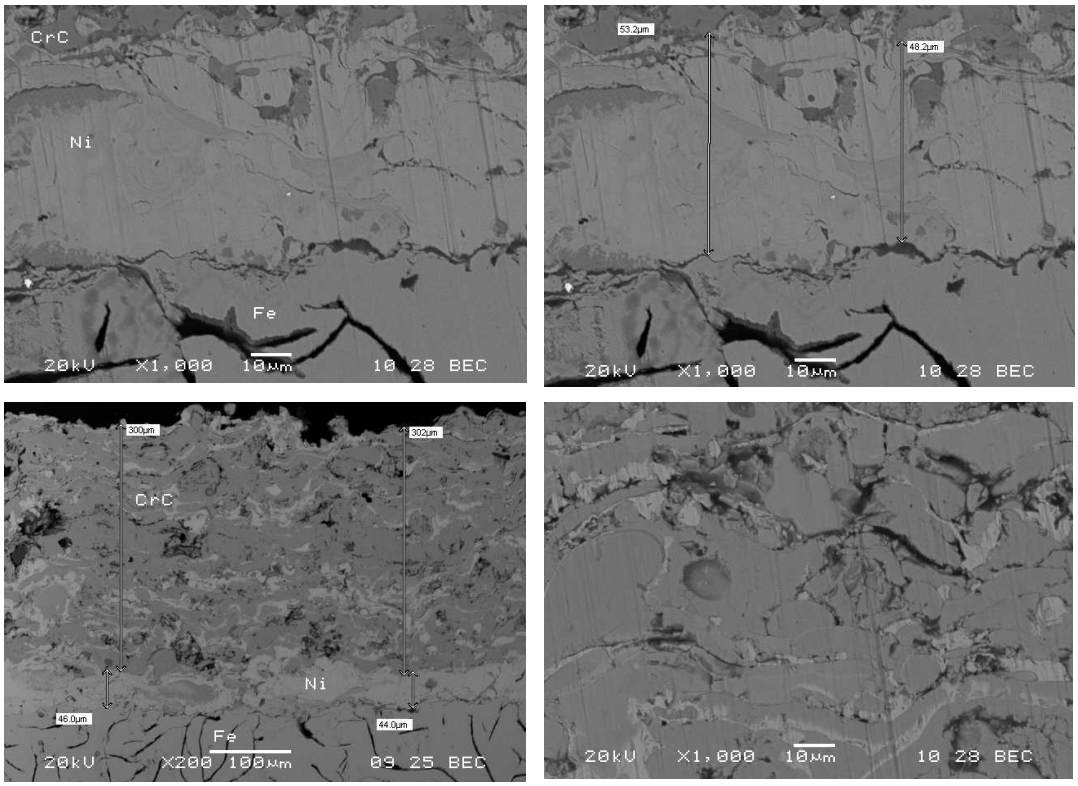


1) Kaplama Cr_3C_2-NiCr 2) Arabağlayıcı NiCr 3) Altlık gri dökme demir

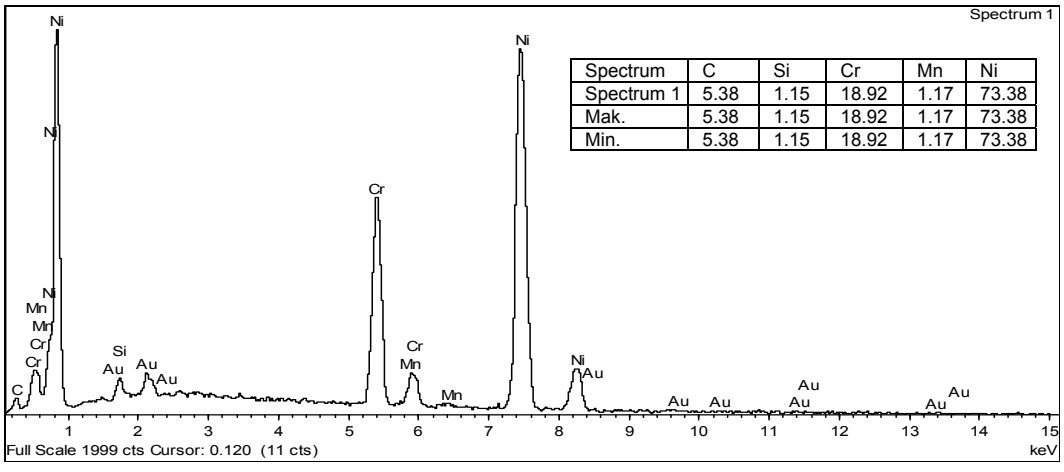
Şekil 4.21: HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin SEM mikrografı

Dökme demir altlık malzeme üzerine HVOF yöntemi ile kaplanan NiCr arabağlayıcı tabakanın EDS analizleri Şekil 4.23'de görülmektedir. Ni ve Cr beklenen değerlerde görülmesine rağmen EDS analizi içerisindeki C, Si ve Mn'ın arabağlayıcıya yüksek

ısıdan dolayı difizyon yolu ile geçtiği görülmektedir. Ayrıca bu durumlar püskürtme prosesi esnasında oluşan gözenekler (porlar) ve makro kusurlardan (macro-defect) da kaynaklanmaktadır. Buradaki altın, SEM mikrograflarını alabilmek için numune hazırlama esnasında kaplanan altındır. Şekil 4.24'den ise HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin tam NiCr arabağlayıcı merkezinden alınmış EDS analizinde ise arabağlayıcının %70 Ni ve %30 Cr'dan oluştuğu görülmektedir.

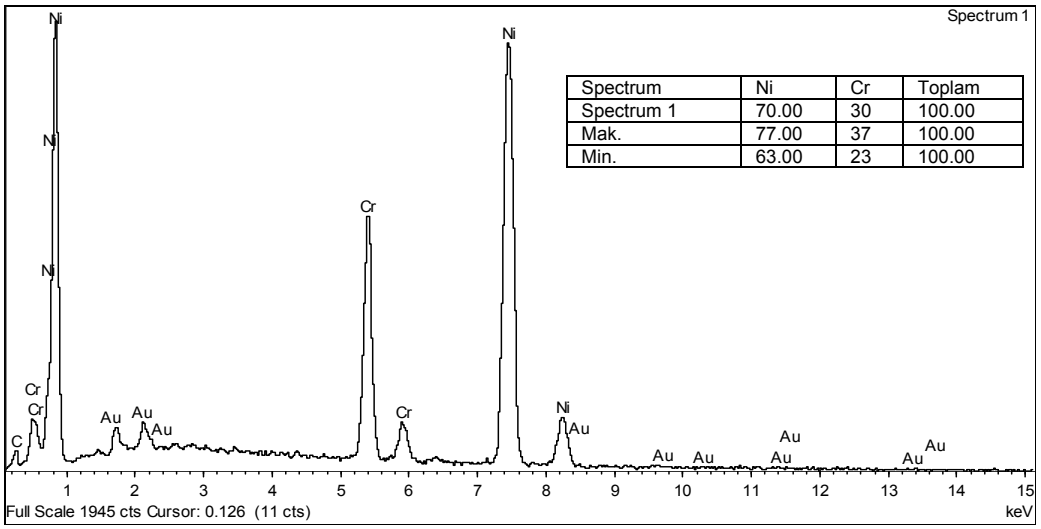


Şekil 4.22: HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin diğer SEM mikrografları



Spectrum	C	Si	Cr	Mn	Ni
Spectrum 1	5.38	1.15	18.92	1.17	73.38
Mak.	5.38	1.15	18.92	1.17	73.38
Min.	5.38	1.15	18.92	1.17	73.38

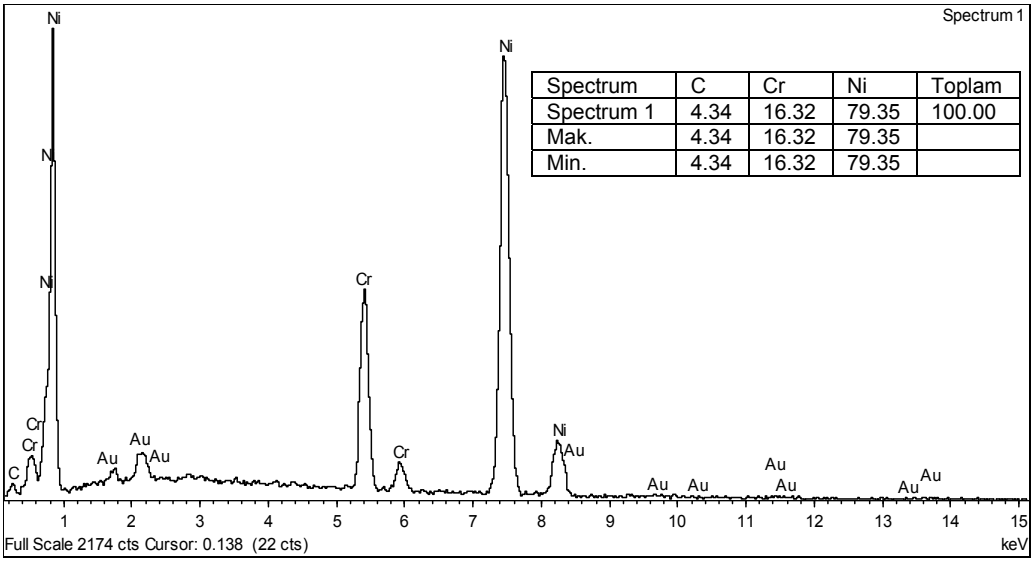
Şekil 4.23: HVOF yöntemiyle Cr_3C_2 - NiCr kaplamanın parlatılmış enine kesitinin ve altlık gri dökme demirden arabağlayıcı NiCr tabakaya Mn ve Si difüzyonunun EDS analizi



Spectrum	Ni	Cr	Toplam
Spectrum 1	70.00	30	100.00
Mak.	77.00	37	100.00
Min.	63.00	23	100.00

Şekil 4.24: HVOF kaplamanın parlatılmış enine kesitinin NiCr arabağlayıcı merkezinden alınmış EDS analizi

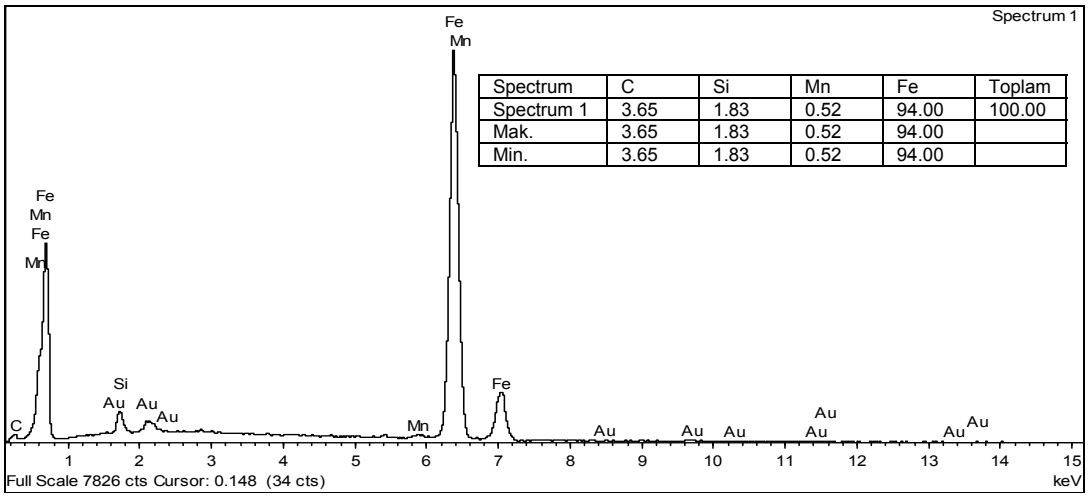
Şekil 4.25'de NiCr arabağlayıcı ile üst kaplama Cr_3C_2-NiCr arayüzeyinden alınmış EDS analizi gösterilmiştir. Bu analizin alındığı bölgede Nikel'in daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu durum heterojen yapıdan kaynaklanmaktadır.



Spectrum	C	Cr	Ni	Toplam
Spectrum 1	4.34	16.32	79.35	100.00
Mak.	4.34	16.32	79.35	
Min.	4.34	16.32	79.35	

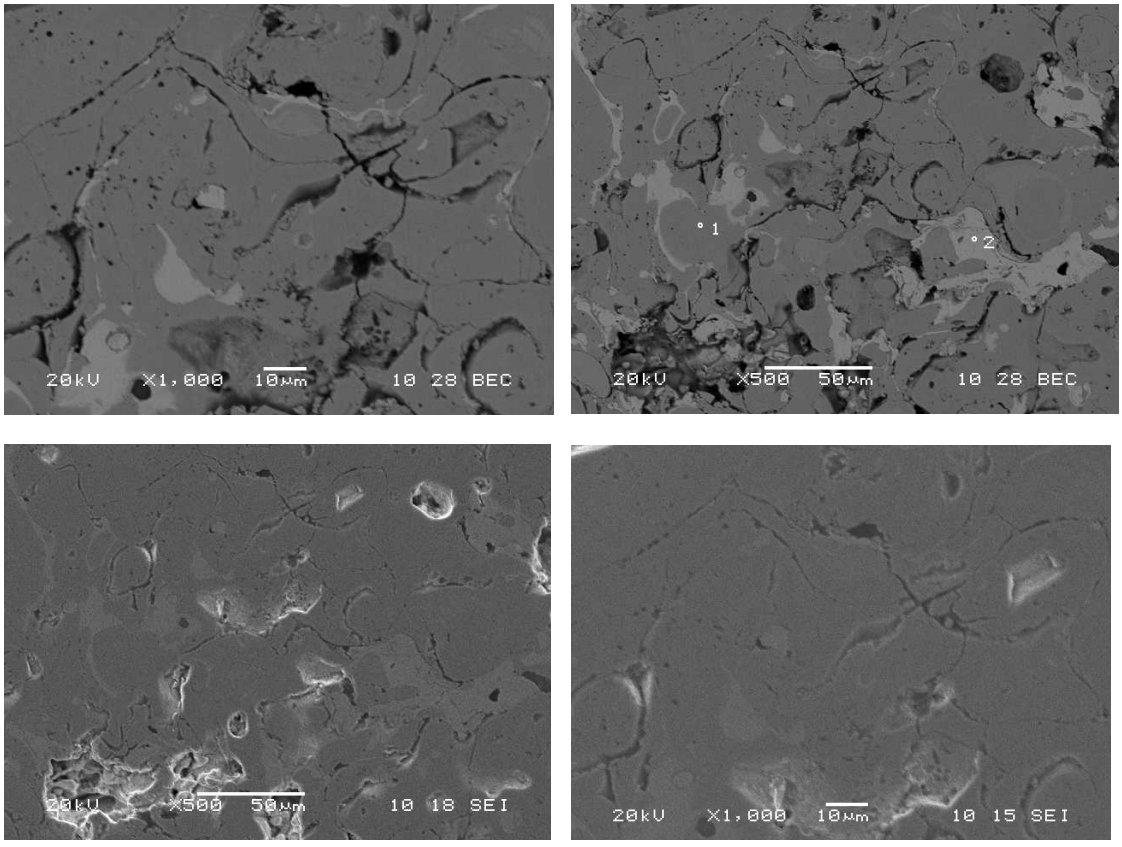
Şekil 4.25: NiCr arabağlayıcı ile Cr_3C_2-NiCr arayüzeyinden alınmış EDS analizi

Şekil 4.26'de HVOF termal püskürtme yöntemiyle yığıntılanmış Cr_3C_2-NiCr kaplamanın parlatılmış enine kesitinden gri dökme demir altlık malzemesi bölgesinden alınmış EDS analizi gösterilmiştir.



Şekil 4.26: Gri dökme demir altlık malzemenin EDS analizi

Şekil 4.27'den HVOF termal püskürtme yöntemiyle yığıntılanmış Cr_3C_2-NiCr kaplamanın parlatılmış yüzeyinden alınan diğer SEM mikrografları incelendiğinde yüzeyde gözeneklerin (porlar) ve mikro çatlakların olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi yapıda bulunan %25'lik Cr_3C_2'ün; iri, sert ve gevrek partiküllerinin tok olmayan doğasından kaynaklanmaktadır.

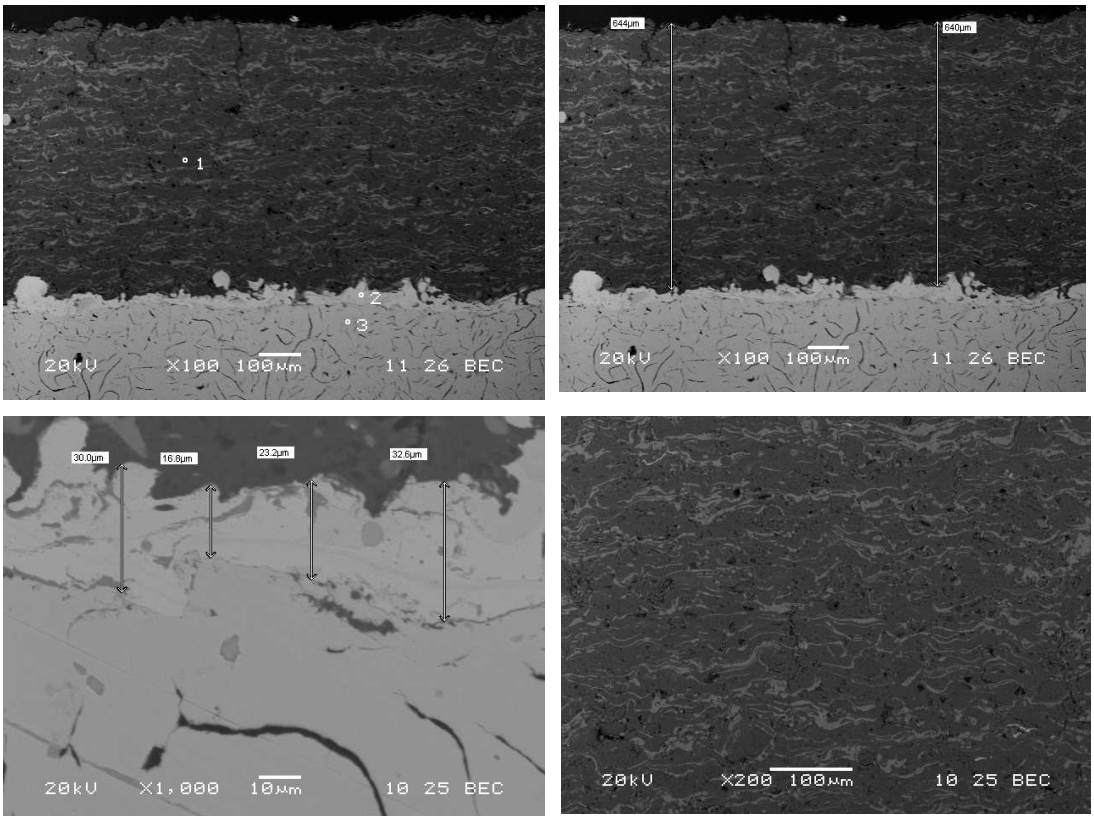


Şekil 4.27: Cr_3C_2-NiCr kaplamanın parlatılmış yüzeyden alınan SEM mikrografları

HVOF ile oluşturulan Cr_3C_2-NiCr kaplamaların sertliği genel olarak plazma püskürtme yöntemi ile oluşturulan kaplamalardan daha serttir. HVOF kaplama yöntemindeki alev sıcaklığı plazma sıcaklığından daha düşük olduğu için daha fazla karbür çökeltilerini kaplama içerisinde görmek mümkündür. Aynı zamanda karbonun daha az yandığı da burada görülmektedir. Bu sonuç Factor ve Roman'ın bulgusunu doğrulamaktadır [81].

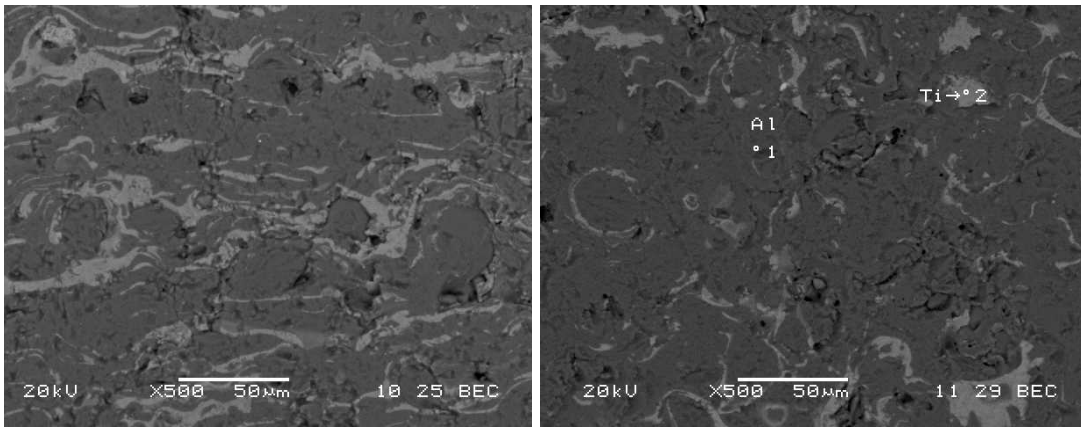
4.5 Al_2O_3-TiO_2 Kaplama Numunesinin İncelenmesi

Şekil 4.28'da plazma püskürtme yöntemiyle gri dökme demir üzerine kaplanmış NiCr arabağlayıcı ve Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın parlatılmış enine kesiti ve Şekil 4.29'den parlatılmış yüzeyden SEM mikrografları dikkatlice incelendiğinde kaplamada yoğun siyah bölgeler olduğu görülmektedir. Bu durum kaplama tozlarının nano yapılı olmamasından kaynaklanmaktadır. Nano yapılı kaplama tozları ile kaplanmış numunelerde daha az siyah bölgeler bulunacaktır. Bu siyah bölgeler, plazma püskürtme prosesinde kısmi erimiş tozlardır [82].



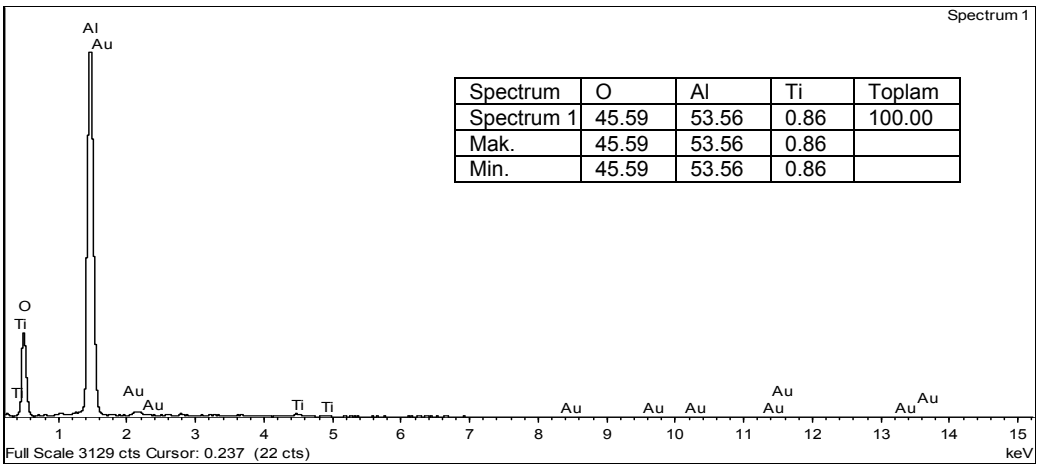
Şekil 4.28: Plazma püskürtme yöntemiyle gri dökme demir üzerine kaplanmış NiCr arabağlayıcı ve Al_2O_3-TiO_2 kaplamanın enine kesitinin SEM mikrografları

Al_2O_3-TiO_2 kaplamada kullanılan kaplama tozları konvansiyonel olduğundan dolayı Şekil 4.28 ve 29'dan kaplamadaki lamelar yapı oldukça belirgindir. Nano yapılı kaplama tozları ile kaplanmış numunelerde lamelar yapı da belirgin değildir.



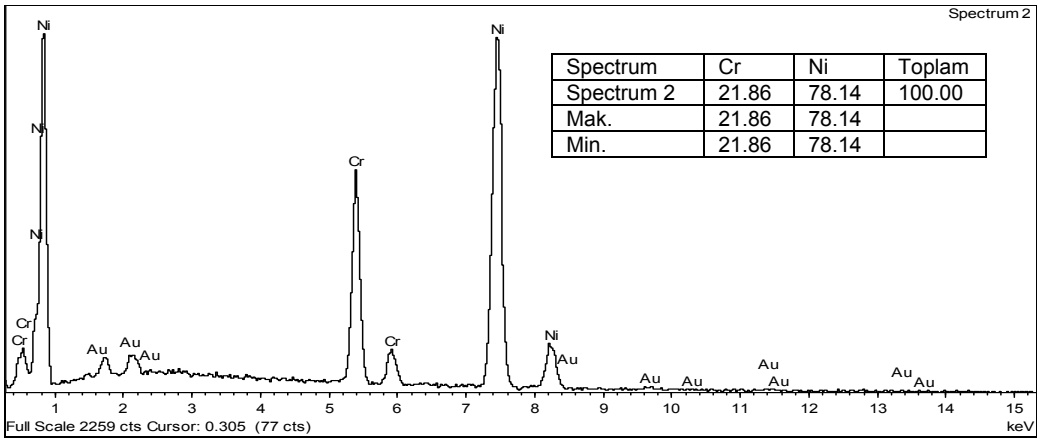
Şekil 4.29: Plazma püskürtme yöntemiyle kaplamış Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın parlatılmış yüzeyden alınan SEM mikrografları

Şekil 4.30 ve 31'de EDS analizleri gösterilmiştir. Görüntü analizi ile kaplama tabakaları ve Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın üst katmanlarındaki, faz fraksiyonlarında porozite oluşumu, ergimiş ve yarı ergimiş partiküller, inklüzyon ve oksitler Şekil 4.28 ve 29'daki mikrograflardan görülmektedir.



Spectrum	O	Al	Ti	Toplam
Spectrum 1	45.59	53.56	0.86	100.00
Mak.	45.59	53.56	0.86	
Min.	45.59	53.56	0.86	

Şekil 4.30: Plazma püskürtme yöntemiyle kaplamış Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamanın yüzeyinden EDS analizi



Spectrum	Cr	Ni	Toplam
Spectrum 2	21.86	78.14	100.00
Mak.	21.86	78.14	
Min.	21.86	78.14	

Şekil 4.31: Plazma püskürtme yöntemiyle kaplamış NiCr arabağlayıcının parlatılmış enine kesitinden EDS analizi

4.6 Numunelerin Mikrosertlikleri

Vickers sertlik ölçme yöntemiyle gri dökme demir altlık numunesinin sertlik değeri ortalama $HV_{0,2}$= 222±25, aynı yöntemle 8 ölçüm sonucunda Metco 19E'nin sertliği $HV_{0,2}$= 630±25, Metco 18C'nin $HV_{0,2}$= 510±25 ve Cr_3C_2-NiCr kaplamanın ortalama sertliği $HV_{0,2}$= 766±25 olarak ölçülmüştür. Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplama uygulanmış disk numunesinde 10 ölçüm sonucunda kaplamanın ortalama sertliği ise $HV_{0,2}$= 643±25 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.32: Mikrosertlik ölçme cihazı

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın deneysel bölümü, SAE J2522 dinamometre genel fren etkinlik test prosedürüne göre orijinal ve kaplanmış disklerin testlerini, DTV'yi, konikliği, BTV'yi, aşınmayı, hızlandırılmış ve uyarlanmış SAE J2334 korozyon testini içermektedir.

5.1 Dinamometre Testi

Orijinal ve kaplanmış diskler, SAE J2522 dinamometre genel fren etkinlik test prosedürüne göre test edildi. Bu testlerde disk-balata ikilisinin sürtünme davranışı; ön alışma etkinliği, hız hassasiyeti, sıcaklığa bağlı fren zayıflaması direnci, etkin sürtünme davranışının yeniden oluşturulması ve sürtünme kararlılığı gibi özellikler kapsamlı bir biçimde incelendi. Tablo 5.1'deki test prosedürüne ilave olarak bazı test prosedürlerinde fren tork değişimleri, 6 adet kapasitif prop ile disk kalınlık değişimi (DTV) ve koniklik ölçüldü.

Tablo 5.1: SAE J2522 dinamometre genel fren etkinlik testi [76]

Bölüm	Durma ya da yavaşlama sayısı	Frenleme ve bırakma hızı (km/h)	Fren uygulaması kontrolü	Başlangıç fren sıcaklığı (^{o}C)
Ön alışma (Green) etkinliği	30	80-30	30 bar	100
Alışma evresi (Burnish)	64	80-30	Çeşitli basınçlar	100
Karakteristik kontrol I	6	80-30	30 bar	100
Hız/Basınç hassasiyeti	8	40-<5	10,20,….80 bar	100
Hız/Basınç hassasiyeti	8	80-40	10,20,….80 bar	100
Hız/Basınç hassasiyeti	8	120-80	10,20,….80 bar	100
Hız/Basınç hassasiyeti	8	160-130	10,20,….80 bar	100
Hız/Basınç hassasiyeti	8	200-170	10,20,….80 bar	100
Karakteristik kontrol II	6	80-30	30 bar	100
Soğuk frenleme kontrolü	1	40-<5	30 bar	40
Otoyol frenleme kontrolü 1	1	100-5	0,6 g	50
Otoyol frenleme kontrolü 2	1	180-100	0,6 g	50
Karakteristik kontrol III	18	80-30	30 bar	100
Sıcaklıkla fren zayıflaması (Fade 1)	15	100-<5	0,4 g	100-500
Kararlılık (Recovery)	18	80-30	30 bar	100
Basınç hassasiyeti (100 °C)	8	80-30	10,20,….80 bar	100
Artan sıcaklık hassasiyeti (500 °C)	9	80-30	30 bar	100,150,…500
Basınç hassasiyeti (500 °C)	8	80-30	10,20,….80 bar	500
Karakteristik kontrol IV	18	80-30	30 bar	100
Sıcaklıkla fren zayıflaması (Fade 2)	15	100-<5	0,4 g	100-500
Karakteristik kontrol V	18	80-30	30 bar	100

Yapılan testlerde; frenleme sayısı, çevrim zamanı, frenleme başlangıç hızı, bırakma hızı, frenleme süresi, frenleme ivmesi, tork, basınç, sürtünme katsayısı, diskin ilk ve

son sıcaklığı, iç ve dış balataların ilk ve son sıcaklığı gibi parametreler ölçülerek kaydedilmiştir. Bu parametrelere ek olarak bazı test bölümlerinde ise koniklik, frenleme tork değişimleri (BTV) ve disk kalınlık değişimleri (DTV) de ölçüldü. Ayrıca testler başlamadan önce ve testler tamamlandıktan sonra disk ve balataların aşınma oranları hem boyutsal (mm) hem de kütlesel (g) olarak tespit edildi. Daha sonra tüm diskler SAE J2334 test standardına göre hızlandırılmış korozyon testine tabii tutuldu. Testlerde disklerin sıcaklıkları yüzeye değdirilen termokapıl (rubbing thermocouple) vasıtasıyla ölçüldü. Metco 19E kaplı diskin sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan termokapıl, hız-basınç hassasiyeti (200 km/h) bölümünde oluşan aşırı yüksek sıcaklıklardan ve sürtünmeden dolayı deforme olmuştur. Böylece Metco 19E kaplı diskte sıcaklık ölçümleri bu aşamadan sonra yapılamamıştır

5.1.1 Ön alışma (Green) etkinliği

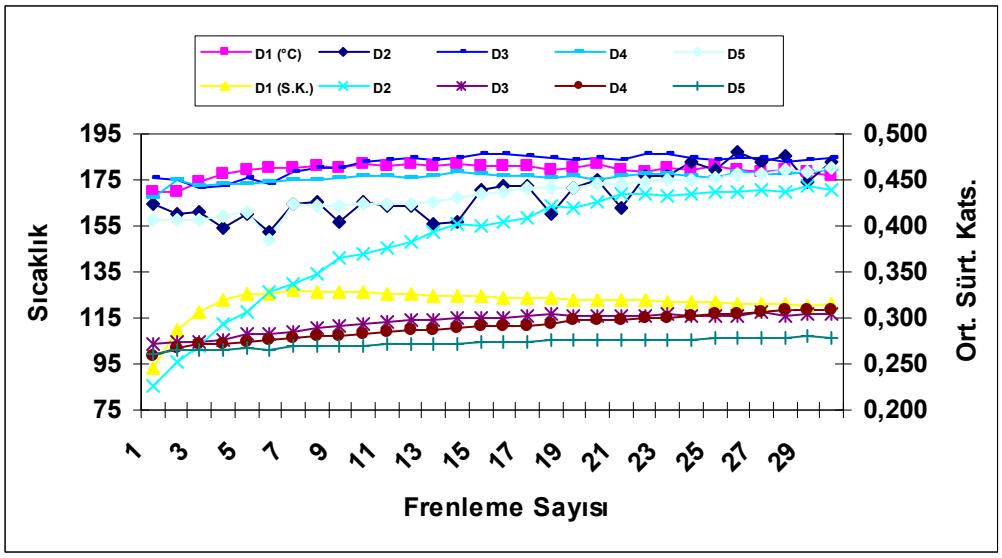
Testin bu ilk bölümünde, balata ve diskin ilk kullanılmaya başlanmasından dolayı frenleme performansı düşük (sürtünme katsayısı düşük düzeylerdedir) düzeylerde kaldı. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi frenleme sayısına bağlı olarak D2[9] diski ve balata ikilisinin sürtünme katsayısı (SK) diğer disk-balata çiftlerinden daha iyi bir sürtünme davranışı göstermiştir. Bu sonuçta; D2 diskinin yüzey pürüzlülüğünün diğer disklerden küçük olması (balatanın gerçek temas alanının diğer disklerden büyük olması) ve kaplama tozunda %60-65 düzeyinde nikel tozları (saf Ni'in SK'sinin yüksek olması) bulunması etkili olmuştur. D5 diskinin hem termal bariyer etkisi hem de düşük SK'ye sahip olmasından dolayı, bu diskle eş çalışan balatalar sürtünme davranışında en düşük değerleri sağlamıştır. Bu prosedürde genel olarak D3, D4 ve D5 disk balata çiftlerinin sürtünme katsayıları, D1 ve D2 disk balata çiftlerine göre daha düşük olmasına rağmen daha kararlı bir değişim göstermiştir. D5 diski hariç ön alışma fazında D1, D2, D3 ve D4 disklerinin sürtünme katsayısının 0,3'ün üzerinde olması literatürle [32] uygunluk göstermiştir.

5.1.2 Alışma evresi (Burnish)

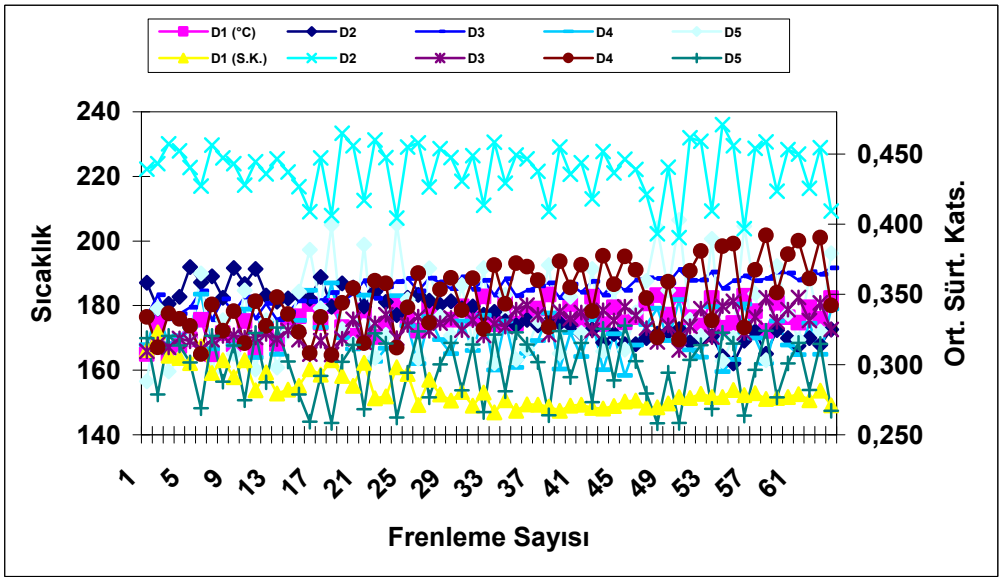
Şekil 5.2'de görüldüğü gibi frenleme sayısına bağlı olarak D1 disk-balata çifti en düşük SK değerleri sağladı. Buna karşın D2 disk-balata ikilisinin SK değeri oldukça

[9] D1 diski, orijinali; D2, Metco 19E'yi; D3, Metco 18C'yi; D4, Cr_3C_2 – NiCr'u ve D5 ise Al_2O_3-TiO_2 kaplanmış diski ifade etmektedir.

yüksek gerçekleşti. Ancak bu durumda D2 diskinin yüzey pürüzlülüğünün diğer disklerden küçük olması balatanın gerçek temas alanını büyütmesinin SK'yi büyütmesi olasıdır. D5 diski ile çalışan balatalar hem diskin yapısal özelliğinden hem de daha yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı D1 diskine yakın SK davranışı gösterdi. D3 ve D4 disk-balata çiftleri D1 disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı göstermiştir. Ancak D4 sürtünme çiftinin SK'si, D3 sürtünme çiftinden daha büyük olmuştur.



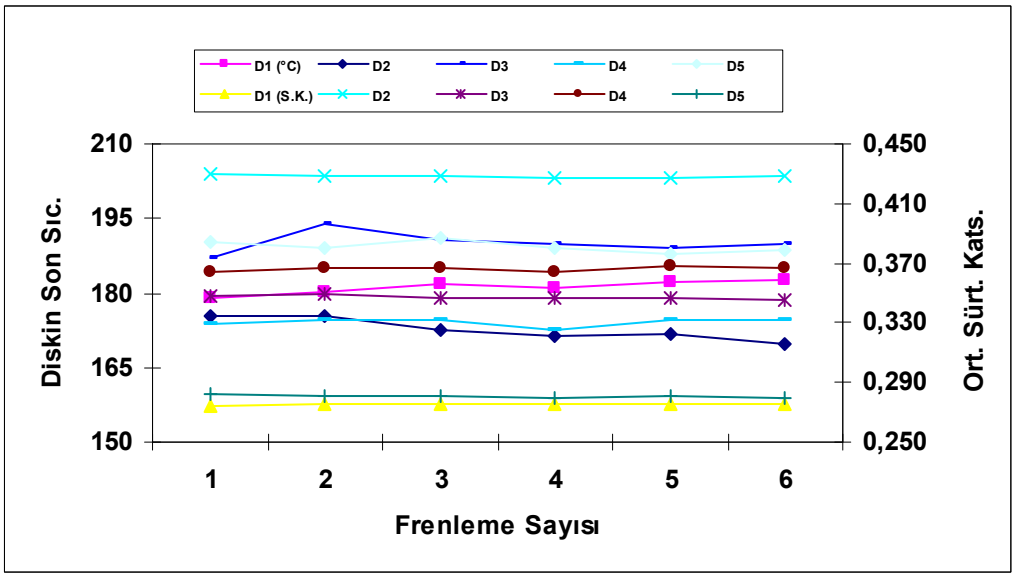
Şekil 5.1: Deney disklerinin ön alışma (green) etkinliği değişiminin incelenmesi



Şekil 5.2 Deney disklerinin alışma (burnish) davranışı

5.1.3 Karakteristik kontrol – I

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi D2 diskinin balatları yaklaşık 105 ile 120 °C arasında bir işletme sıcaklığına erişti. Buna karşılık ortalama SK değeri 0,428 düzeylerinde gerçekleşti. Bu test prosedüründe en küçük SK değerini D1 ve D5 disk balata çiftleri sağladı. D1 diskinin balataları yaklaşık 85 - 90 °C arasında bir sıcaklıkta çalışmasına rağmen sürtünme katsayısı 0,275 gibi küçük değerlerde kaldı. Bu değerden, D1 disk-balata çiftinin çok düşük sıcaklıklarda iyi SK geliştiremediği söylenebilir. D5 disk-balata çiftinin ise ortalama frenleme torku yüksek olmasına rağmen diskin hem termal bariyer özelliğinden hem de yapısal özelliklerinden[10] dolayı SK'si düşük değerlerde kalmıştır. İç balata sıcaklıkları ise içeride 101 ve dışta ise 116 °C sıcaklığa ulaştı. D2, D3 ve D4 disk balata çiftleri genel olarak D1 disk-balata çiftinden sıcak çalışmasına rağmen daha büyük SK değerleri sağlamıştır.



Şekil 5.3: Deney disklerinin karakteristik kontrolü I

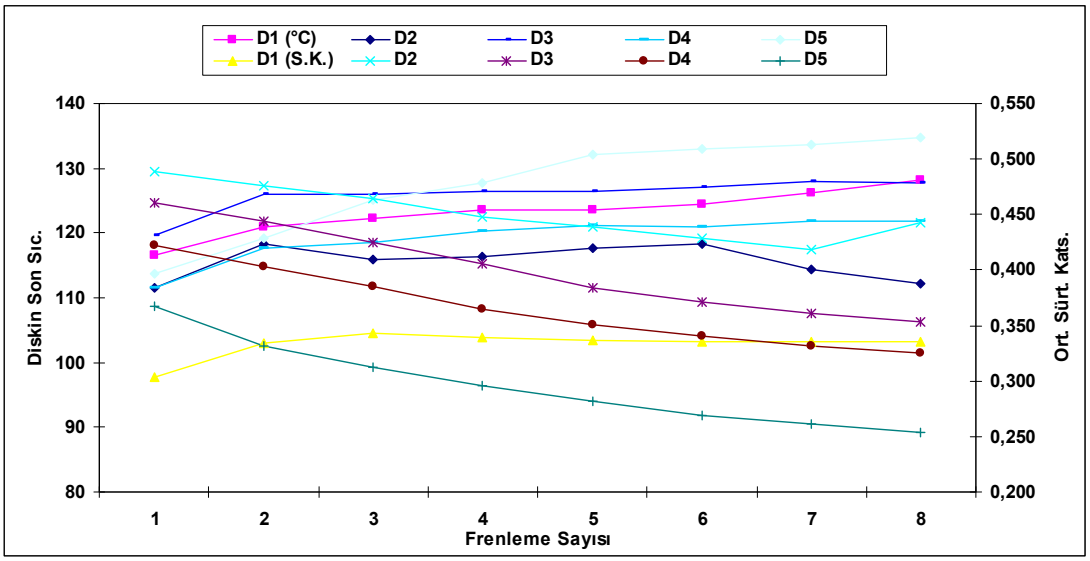
5.1.4 Hız/Basınç hassasiyeti

Hız/Basınç hassasiyeti test prosedürleri Tablo 5.1'de görüldüğü gibi beş prosedürden oluşmaktadır. Bu test prosedürlerinde 10 ile 80 bar arasında farklı basınç uygulamaları ile 40, 80, 120, 160 ve 200 km/h'ten başlatılan frenleme hız değerlerine göre ayrı ayrı tetkik edilmiştir.

[10] Al_2O_3-TiO_2 kaplamalar: Sert, kayma aşınmasına dirençli, sürtünme katsayısı ve termik iletkenliği düşük yapısal özelliğe sahiptir [83].

5.1.4.1 Hız/Basınç hassasiyeti (40 km/h)

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi genel olarak tüm balatalarda sürtünme katsayısı değişimleri gerçekleşmiştir. Bu durumda her bir frenlemede 10 bar'dan başlayarak 80 bar'a kadar arttırılan uygulama basınçlarında SK, D3, D4 ve D5 disk-balata çiftlerinde hafif düşme göstermiştir. Düşük hızın etkisiyle de D5 diski ile çalışan balatalarda da makul ancak artan fren sayısına bağlı olarak düşme gösteren bir sürtünme katsayısı gözlenmiştir. En düşük SK değeri D5 diskinde gerçekleşmiş ve bu durum diskin yavaşlatılmasında gerek duyulan negatif ivme oranının ve frenleme torkunun da düşük değerlerde kalmasına sebep olmuştur. En büyük frenleme ivmesi ve frenleme torku ile frenlenen D2 disk-balata çiftinin sürtünme davranışı, ortalama 0,45 değerlerinde bir değişim göstermiştir. D3 ve D4 sürtünme çiftlerinden artan fren sayısına bağlı olarak düşme gösteren bir sürtünme katsayısı gözlenmiştir. Ancak şekilden görüldüğü gibi SK değeri 0,32'nin üzerinde gelişmiştir. D1 diski, kaplamalı disklerin aksine artan frenleme sayısına göre üçüncü frenlemeden sonra sürtünme katsayısında çok az bir düşme göstermiştir.

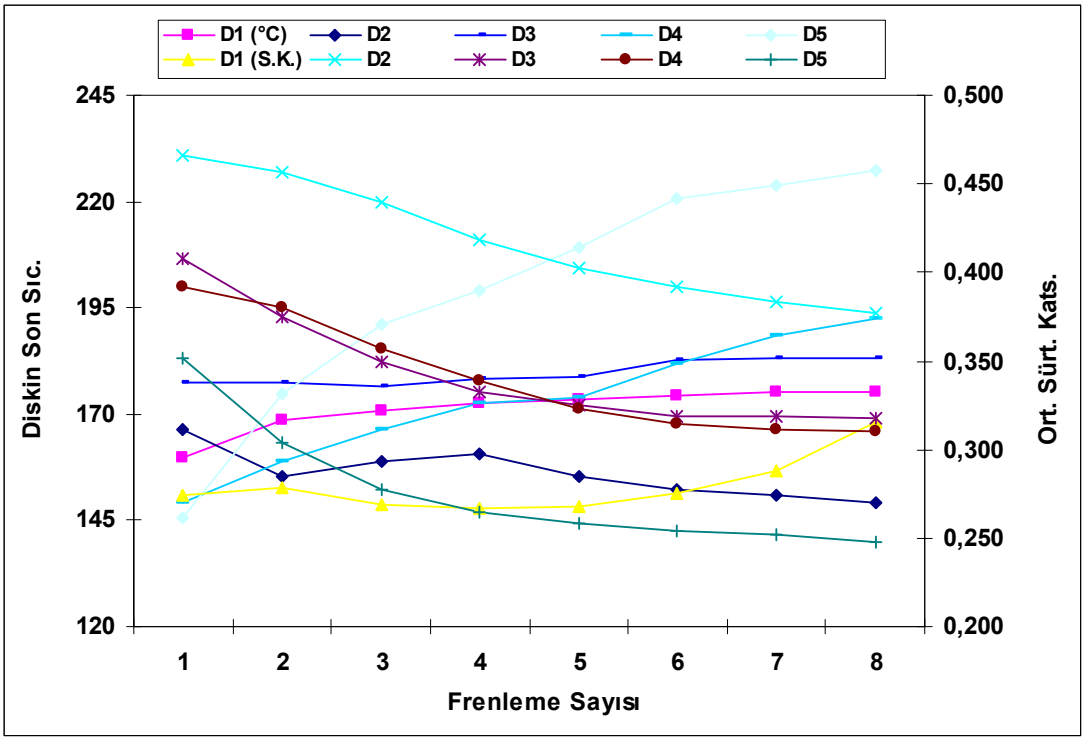


Şekil 5.4: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (40 km/h) kontrolü

5.1.4.2 Hız/Basınç hassasiyeti (80 km/h)

Bu test prosedüründe Şekil 5.5'de görüldüğü gibi frenleme aşamasının son safhalarına doğru sıcaklık artışı ile birlikte orijinal disk balatalarının SK değeri yükselme gösterirken, diğer disklerde düşme gözlendi. D2 sürtünme çiftinin SK

değeri diğer disklerden daha yüksek gerçekleşti. Bu test prosedüründe D2 diskinin son sıcaklığı orijinal disk kadar yükselmemesine rağmen, yüksek değerlerdeki SK'nin etkisinden dolayı D2 diski ile birlikte çalışan balatalar daha yüksek sıcaklıklara erişti. D3 diskinin hem son sıcaklığı hem de balata sıcaklıkları orijinal diskten daha yüksek değerlere ulaştı. Ancak bu sıcaklıklar balatanın etkin sürtünme değeri sağlayabileceği bir aralıkta kaldı. Bu prosedürde D4 diski en yüksek işletme sıcaklığına erişmesine rağmen, birlikte çalışan balataları aşırı ısınmadı. D5 diski ise, D4 diski kadar ısınmamasına rağmen özellikle D5 diskinin dış balatalarının son sıcaklığı 140 °C'ye kadar yükseldi. Bu test prosedüründe 10 ile 80 bar arasında değişken hat basıncı kullanıldı. Bu basınç değişimleri disk-balata çiftlerinin oldukça farklı SK geliştirmesine neden oldu. D1 ve D2 diski hariç diğer diskler artan uygulama basıncına bağlı olarak daha düşük SK geliştirmiştir.

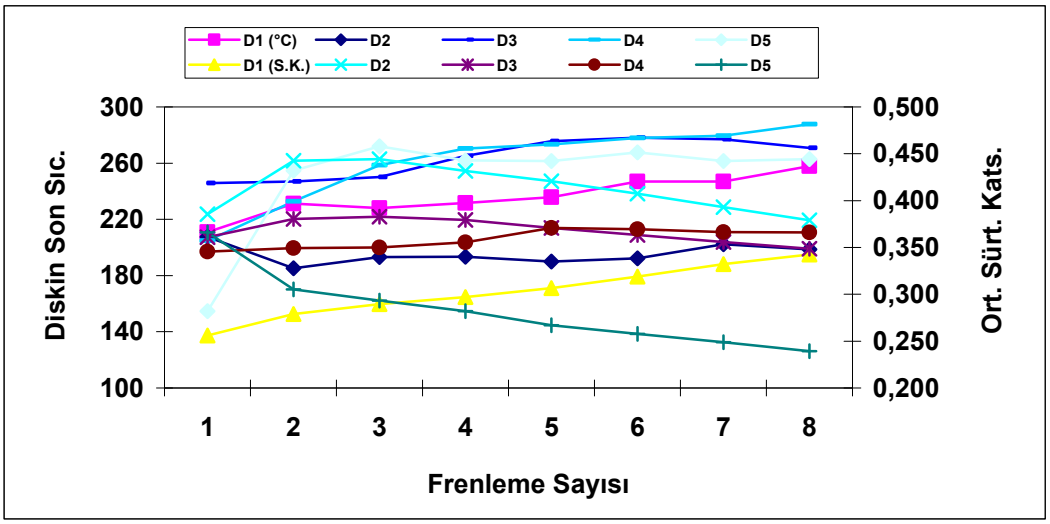


Şekil 5.5: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (80 km/h) kontrolü

5.1.4.3 Hız/Basınç hassasiyeti (120 km/h)

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi D2 diskinin sıcaklığı düşük seyretmesine rağmen balataları oldukça yüksek SK değerleri gösterdi. D4 diskinin sıcaklığı artan frenleme sayısına bağlı olarak artış gösterdi ve son frenlemede 288 °C'ye kadar ulaştı. Buna rağmen disk-balata çiftinin SK'sinde az bir değişim meydana geldi. Artan frenleme

sayısına bağlı olarak D1 disk-balata ikilisinin SK'si de artış gösterdi. Bu durum disk-balata çiftinin frenleme performansı açısından alışma[11] dönemini geçirdiğinin işaret etmektedir. Sadece artan frenleme sayısına, uygulama basıncına ve sıcaklığa bağlı olarak D5 diski düşen bir SK eğrisi göstermiştir. Frenleme sayısına bağlı olarak sıcaklığı artan D3 diskinin sürtünme katsayısında çok az değişim görüldü. Artan fren sayısına bağlı olarak D3 disk-balata çiftinin sürtünme katsayısında üçüncü frenlemeden (SK = 0,383) sonra frenleme sayısına bağlı olarak düşen bir değişim görüldü ve sekizinci frenlemede 0,349'luk SK'ye geriledi.

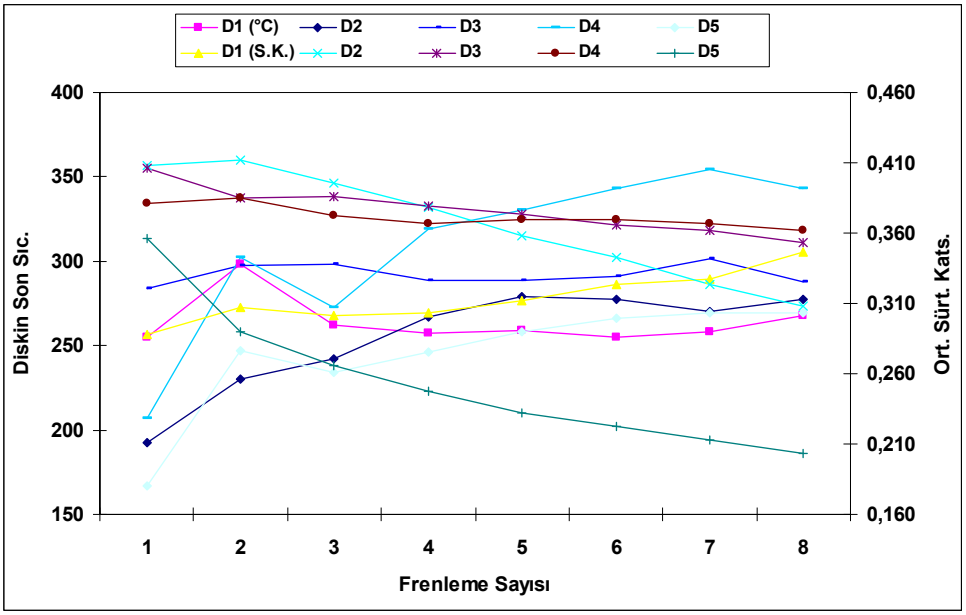


Şekil 5.6: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (120 km/h) kontrolü

5.1.4.4 Hız/Basınç hassasiyeti (160 km/h)

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi bu test prosedüründe D3 ve D4 disklerinin balataları benzer sürtünme davranışı gösterdi. Ancak D3 disk-balata çifti daha yüksek değerler sağladı. Yine bir önceki prosedürdeki gibi D4 diskinin son sıcaklığı diğer disklerden daha yüksek olarak ölçüldü. D5 diski ile çalışan dış balatanın sıcaklığı son frenlemelerde 185 °C'ye kadar yükseldi. Bu durum balatanın sürtünme katsayısında düşmeyi de beraberinde getirdi. D2 diskinin sıcaklığı 230 °C'ye ulaşana kadar balatanın SK'si 0,412 düzeylerinde gerçekleşti. Ancak diskin sıcaklığı 277 °C'ye yükselirken sürtünme katsayısı da lineer bir düşme göstererek son frenleme de 0,308'e kadar geriledi. D1 disk-balata çifti için frenleme performansı açısından alışma dönemini geride bıraktığı söylenebilir. Çünkü artan frenleme sayısına bağlı olarak SK'si de artış gösterdi.

[11] Daha kararlı ve performanslı frenleme için disk-balata çiftinin iyi bir ikili oluşturması.



Şekil 5.7: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (160 km/h) kontrolü

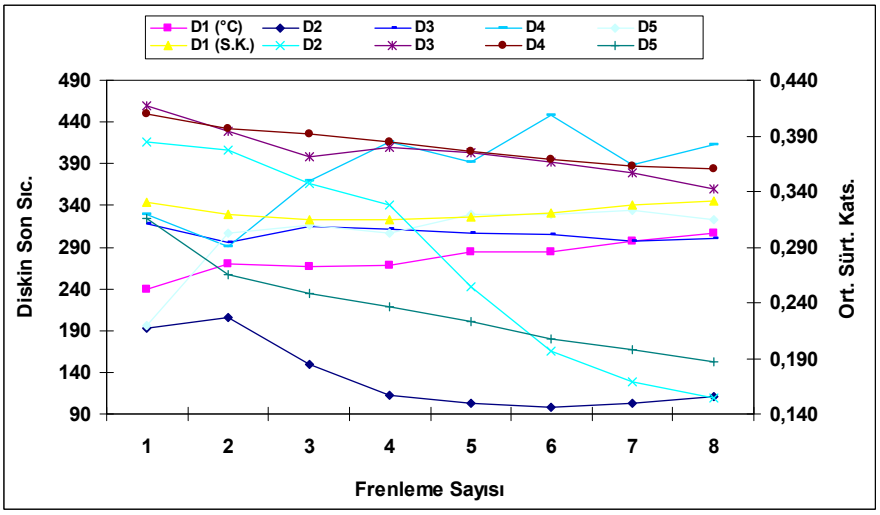
5.1.4.5 Hız/Basınç hassasiyeti (200 km/h)

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi bu test prosedüründe D5 diskinin iç ve dış balataları oldukça farklı çalışma sıcaklıklarına erişti. Buna rağmen balataların sağladığı sürtünme katsayısı değeri kabul edilebilir düzeylerde (yani sıcaklıkla fren zayıflaması sınırının üzerinde) gerçekleşti. D5 diskinin artan uygulama basıncı ve frenleme sayısına bağlı olarak SK'sinde düşme gözlendi. D2 disk-balata çiftinin hem yüksek sürtünme katsayısı hem de kaplama malzemesinin yapısal özelliğinden dolayı termokapıl arızalandı. Ayrıca D2 diskinin, frenleme sayısına bağlı olarak sıcaklığında görülen düşme termokapılın ölçüm hassasiyetindeki bozulmaya işaret etmektedir. Bu test prosedüründe D4 diski en sıcak çalışan disk oldu. Yine de SK'si 0,34'ün üzerinde gerçekleşti. D3 diski-balata çifti de benzer bir SK sağladı. D1 diski; D3, D4 ve D5 diskleri kadar yüksek frenleme sıcaklıklarına maruz kalmamasına rağmen D3 ve D4 diskinden daha düşük bir SK gösterdi. Bu test prosedüründen sonra D2 diski testlerden çıkarıldı.

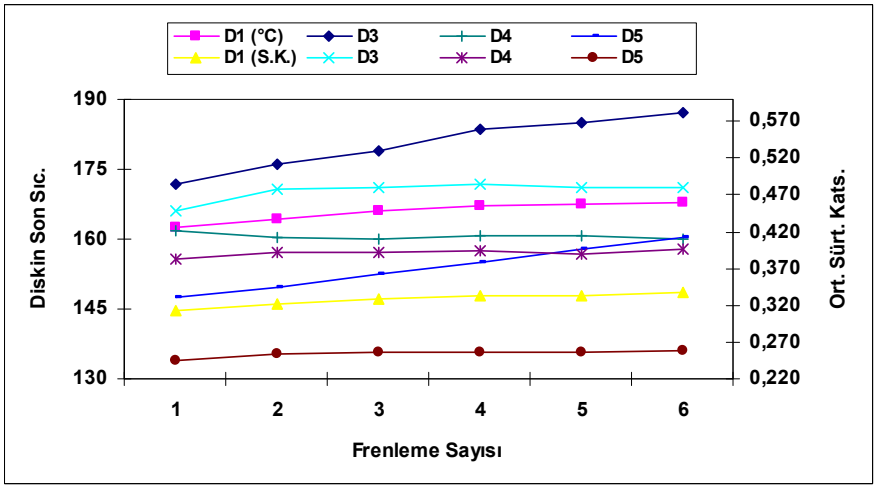
5.1.5 Karakteristik kontrol – II

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi bu test prosedüründe de en düşük sürtünme katsayısını D5 disk-balata çifti gösterdi. En yüksek disk sıcaklığı D3 diskinde gerçekleşirken balata sıcaklığı ise D5 diski ile çalışan balatalarda gözlendi. Buna rağmen D3 diski

ile eş çalışan balataların SK'si çok yüksek olduğundan bu durum diskin sıcaklığını yükseltti. Bu prosedürde D1 disk-balata çifti diğer tüm disklerden daha düşük ortalama frenleme torkuna maruz kalmıştır. D4 disk-balata çiftinin ise altı frenleme sonunda ortalama SK'si 0,391 olarak hesaplanmıştır.



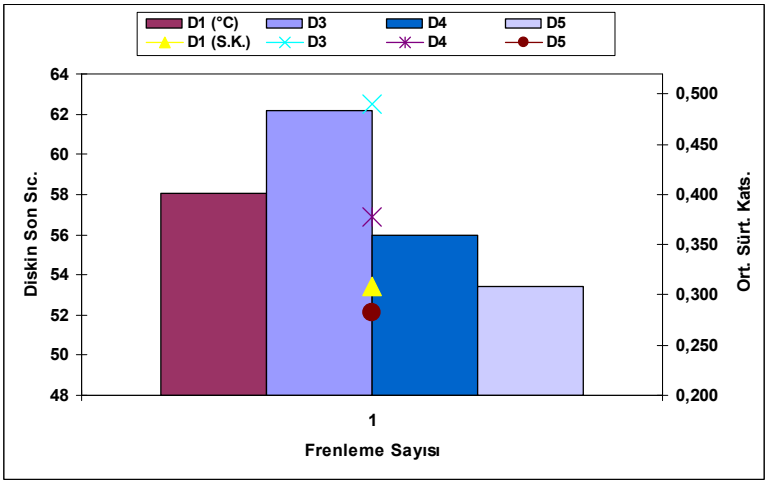
Şekil 5.8: Deney disklerinin hız/basınç hassasiyeti (200 km/h) kontrolü



Şekil 5.9: Deney disklerinin karakteristik kontrolü II

5.1.6 Soğuk frenleme kontrolü

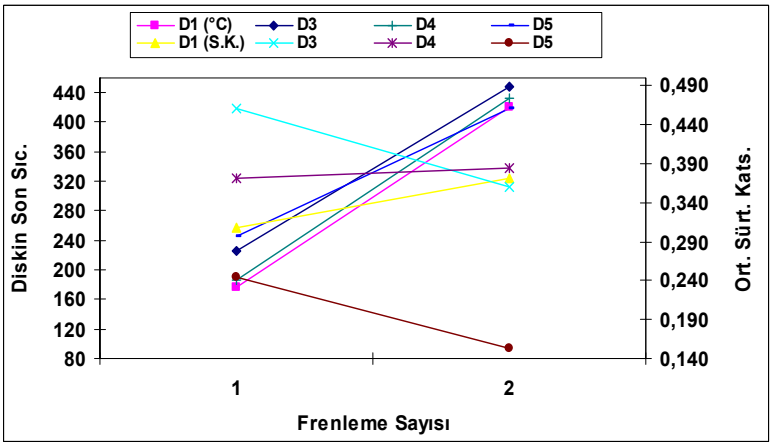
Şekil 5.10'da görüldüğü gibi bu test prosedüründe disklerin ilk sıcaklıkları 39 ile 42 °C arasında değişiklik gösterdi. 40 km/h'lik hızda iken yapılan frenlemede, en iyi SK değerini D3 sürtünme çifti ve en düşük SK'yi ise D5 sürtünme çifti sağladı. Buradan D3 diskinin soğuk frenleme performansının diğer disklerden daha iyi olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 5.10: Deney disklerinin soğuk frenleme kontrolü

5.1.7 Otobanda frenleme kontrolü I-II

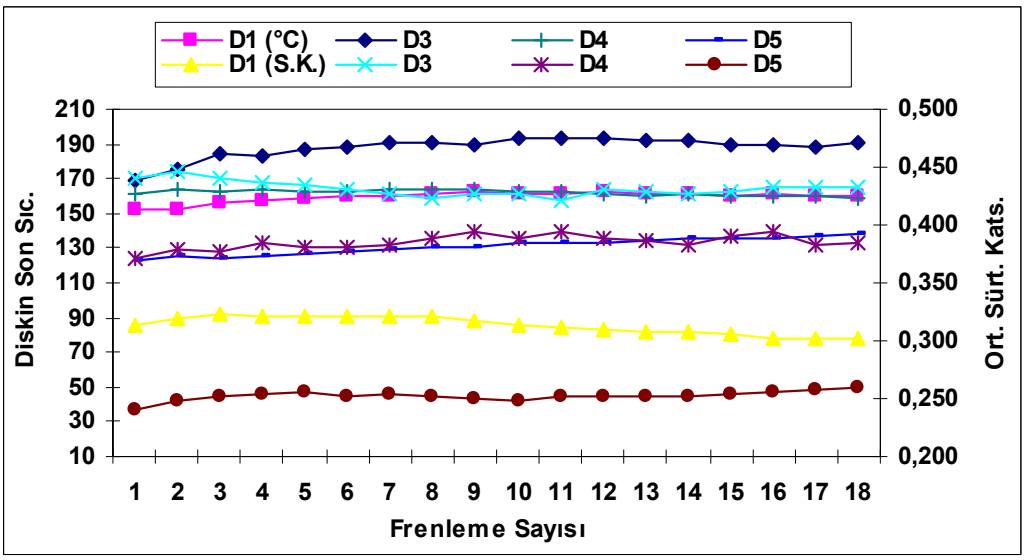
Şekil 5.11'de görüldüğü gibi bu test prosedüründe ilk frenleme 100 km/h'ten 5 km/h hıza yaklaşık 6 m/s^2'lik yavaşlama ivmesi ile gerçekleştirilirken, ikinci frenleme 180 km/h'ten 100 km/h'e yavaşlama şeklinde gerçekleştirildi. Bundan dolayı ikinci frenleme esnasında disk sıcaklıkları 420 °C seviyelerine kadar çıktı. Bu ani frenlemede D1 ve D4 diskleri ile çalışan balatalar çok kararlı bir SK değişimi gösterdi. D3 sürtünme çifti ilk frenlemedeki yüksek SK değerini ikinci frenlemede koruyamadı ancak yine de 0,359 gibi yüksek bir SK sağladı. SK'deki bu düşmede diskin sıcaklığının 227 °C'den 447 °C'ye yükselmesi etkili olmuştur. D5 diski ikinci frenlemede oldukça yüksek sıcaklığa erişti. Bununda etkisiyle disk-balata çiftinin SK'si 0,152 düzeyine kadar düştü. Ayrıca D5 diskinin iç ve dış balatalarında oldukça yüksek bir sıcaklık farkı olduğu tespit edildi.



Şekil 5.11: Deney disklerinin otoyol frenleme kontrolü I-II

5.1.8 Karakteristik kontrol – III

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi bu test prosedüründe en yüksek frenleme sıcaklığı D3 diskinde gözlendi. Buna rağmen D3 disk balata çifti yüksek SK geliştirdi. Bu prosedürde tüm disk-balata çiftleri ilk frenleme safhalarındaki SK değerine yakın değerlerle kararlı bir davranış gösterdi.



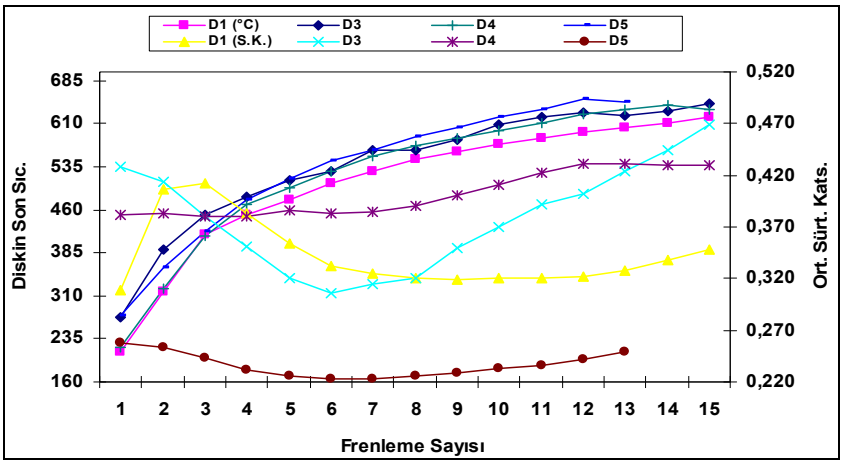
Şekil 5.12: Deney disklerinin karakteristik kontrolü III

5.1.9 Sıcaklıkla fren zayıflaması I (Fade I)

Bu test prosedüründe D5 diskinin göstermiş olduğu termal bariyer[12] etkisinden dolayı, frenleme periyodunun sonlarına doğru balatalarındaki sıcaklıklar yaklaşık 750 °C'ye kadar ulaştı. Buna rağmen balataların başlangıçtaki SK'sine yakın değerler göstermiş olması çok önemli bir sonuçtu. Ancak 15 frenlemeden oluşan bu prosedürde disk-balata sıcaklık aşırı yüksek olduğundan D5 diskinin frenleme sayısı 13'de bırakıldı. Şekil 5.13'de görüldüğü gibi D3 ve D4 disk-balata çiftleri yüksek frenleme performansı[13] göstermiştir. Ayrıca sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründe disklerde oluşan sıcaklıklar genel olarak birbirine yakın değerler göstermiştir. Bu prosedürde D5 diski ile birlikte çalışan balataların adezyon aşınmasına uğramış olması olasıdır. Bu kanaate nihai aşınma ölçümünde D5 diski

[12] Al_2O_3-TiO_2 kaplamanın ısı iletim katsayısı 2 W/mK'den daha düşüktür [Tablo 3.2 ve A1].
[13] Dinamometre testlerinde genel olarak D3 ve D4 disk balata çifti, D1 disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirmiştir. Sürtünme katsayısındaki artış, durma mesafesini kısaltacağından D3 ve D4 disk-balata çiftleri D1 diskinden daha iyi frenleme performansı sağlamıştır.

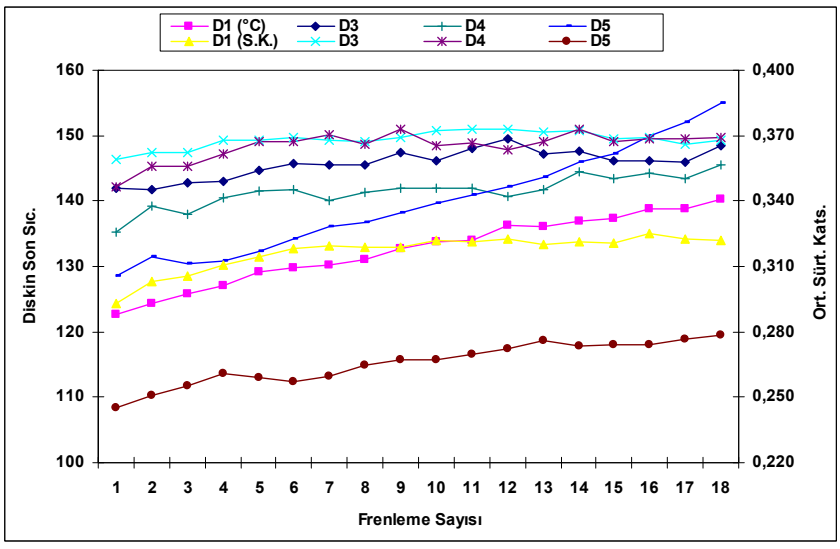
ile birlikte çalışan balatalardaki aşıntı miktarlarının yüksek olmasından ve aynı test prosedüründe yapılan DTV incelemesinde balataların 650 °C'nin üzerinde olduğu konumlarda diskte oluşan sapmalardan varılmıştır.



Şekil 5.13: Deney disklerinin sıcaklıkla fren zayıflaması I (Fade I) kontrolü

5.1.10 Kararlılık (Recovery) testi

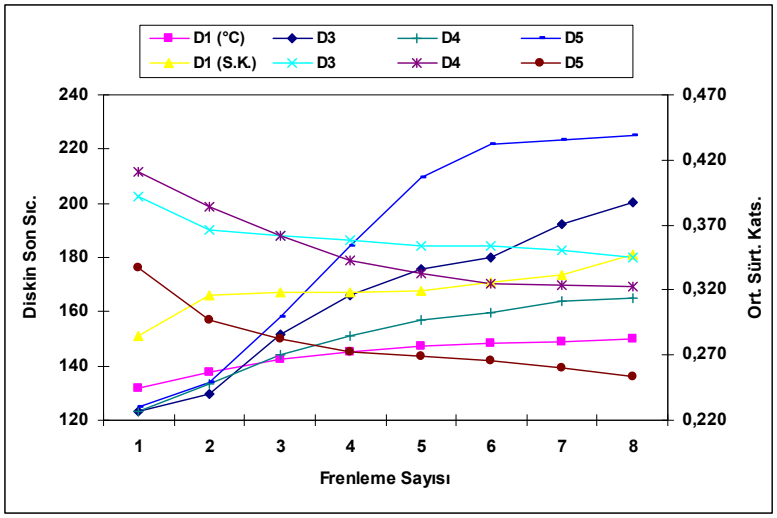
Kararlılık test prosedüründe de en yüksek SK değerleri Şekil 5.14'de görüldüğü gibi D3 ve D4 disk-balata çiftleri tarafından sağlandı. D3, D4 ve D5 disklerinin sıcaklıkları birbirine yakın değerler gösterirken, D1 diskinin çalışma sıcaklığı daha düşük değerlerde kaldı. Frenleme sayısına bağlı olarak sürtünme çiftlerinin SK'leri; D1 ve D5'te belirgin bir şekilde artarken, D3 ve D4 ise artışlar daha az değişim göstermiştir.



Şekil 5.14: Deney disklerinin kararlılık (Recovery) testi

5.1.11 Basınç hassasiyeti (~ 100 °C'de)

Basınç hassasiyeti test prosedüründe D5 diskinin sıcaklığı frenleme sayısı ile yükselme gösterdi. Ancak SK'sinin başlangıçtaki 0,337'lik değeri frenleme sayısı ile sürekli düşerek 0,253 değerine kadar geriledi. D3 ve D4 diskleri ile birlikte çalışan balatalar bu prosedürde yine etkin bir performans gösterdi. Ancak Şekil 5.15'de görüldüğü gibi bu disklerin çalışma sıcaklığı sürekli artış gösterirken SK'leri de sıcaklıkla ve basınç artışı ile lineer olmayan bir düşme gösterdi. D1 diskinin son sıcaklığının diğer disklerden daha düşük olmasının da etkisi ile SK'sinde frenleme sayısına bağlı olarak lineer olmayan artış görüldü. Bu test prosedüründe frenleme sayısına bağlı olarak arttırılan uygulama basıncıyla D1 disk-balata çiftinde sürtünme duyarlılığında düşme olmadığı görüldü. Düşük sıcaklıklarda değişken uygulama basınçlarında (yaklaşık 10…80 bar arasında); D1 disk-balata çiftinin sürtünme davranışının, kaplamalı disklerden daha iyi olduğu sonucuna varılabilir.

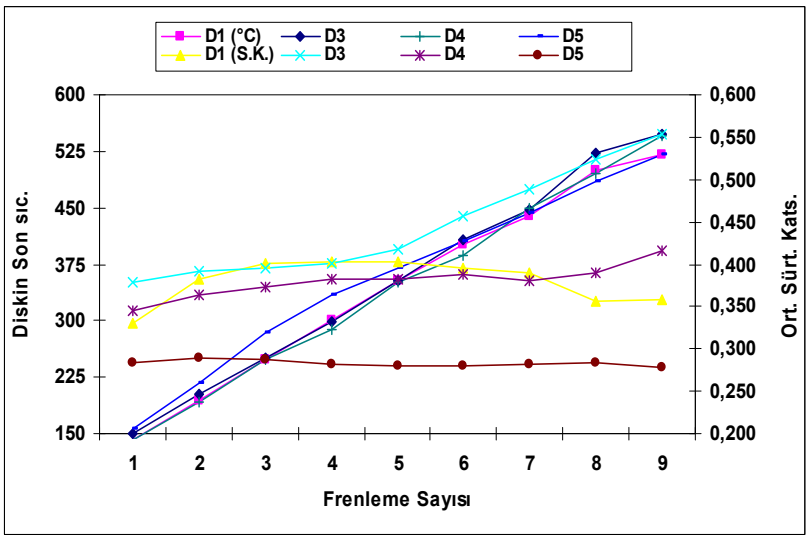


Şekil 5.15: Deney disklerinin basınç hassasiyeti kontrolü

5.1.12 Artan sıcaklık hassasiyeti

Artan sıcaklık hassasiyeti test prosedüründe, disklerin son sıcaklıkları birbirine yakın değerler gösterdi. Ancak Şekil 5.16'da görüldüğü gibi D3 ve D4 diskleri ile eş çalışan balatalar oldukça iyi bir sürtünme davranışı gösterdi. D1 diski ile birlikte çalışan balataların SK değerinde biraz sapma gerçekleşti. Ancak 3. ve 4. frenlemelerde D1 diskinin son sıcaklığı 250 ile 350 °C arasında iken (bu aralıkta balataların son sıcaklıkları 130 ile 190 °C arasında bir değişim gösterdi) disk-balata çifti yaklaşık

0,402'lik bir SK geliştirdi. D5 diski ile birlikte çalışan balataların SK'si ise, başlangıçtaki 0,283'lük değerini çok az değişmelerle 0,278'e gerileyerek tamamladı. Bu test prosedüründe disklerin frenleme öncesi sıcaklığının arttırılmasıyla sabit basınçta gerçekleştirilen frenlemelerde, frenleme sayısına bağlı olarak D1 disk-balata çiftinin SK'sinde artış görüldü.



Şekil 5.16: Deney disklerinin artan sıcaklık hassasiyeti kontrolü

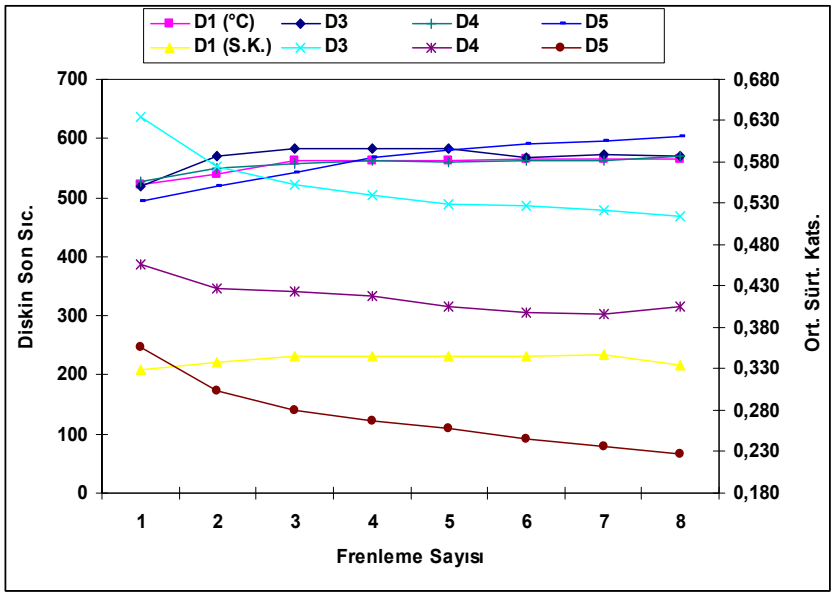
5.1.13 Basınç hassasiyeti (~ 500 °C'de)

5.1.11'de belirtilen basınç hassasiyeti test prosedüründe frenlemelerin hemen öncesinde disk sıcaklığı yaklaşık 100 °C iken bu test prosedüründe ise disk sıcaklığı yaklaşık 500 °C'dir. Artan basınç hassasiyeti test prosedüründe, balataya uygulanan basınç miktarı 10 bar'dan başlayarak yaklaşık 80 bar'a kadar değiştirildi. Bu prosedürde Şekil 5.17'de görüldüğü gibi D3 diskinin balataları (balataların son sıcaklıkları 400 - 420 °C arasında iken) oldukça iyi ve D4 diskinin balataları ise iyi düzeyde SK değeri geliştirdi. En belirgin SK düşüşü de D5 diskinin balatalarında görüldü. Bu prosedürde sırasıyla balataların son sıcaklıkları; yaklaşık 380, 450, 440 ve 610 °C gibi değerlere ulaştı.

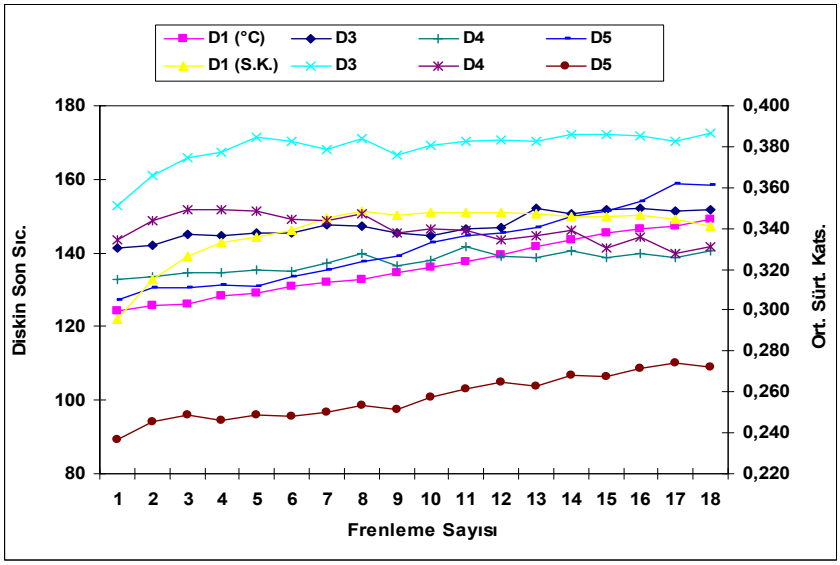
5.1.14 Karakteristik kontrol - IV

Bu test prosedüründe de Şekil 5.18'de görüldüğü gibi D3 diski ile birlikte çalışan balatalar 0,360 ile 0,390 arasında SK geliştirdi. D5 disk-balata çifti, frenleme

sayısına bağlı olarak SK'sini yükseltirken; D1 disk-balata çifti de, artan frenleme periyoduna bağlı olarak yaklaşık lineer artış gösterdi. Şekil incelendiğinde D4 disk-balata çiftinin SK'si 0,330 ile 0,360 arasında bir değişim gösterdi.



Şekil 5.17: Deney disklerinin basınç hassasiyeti (500 °C) kontrolü

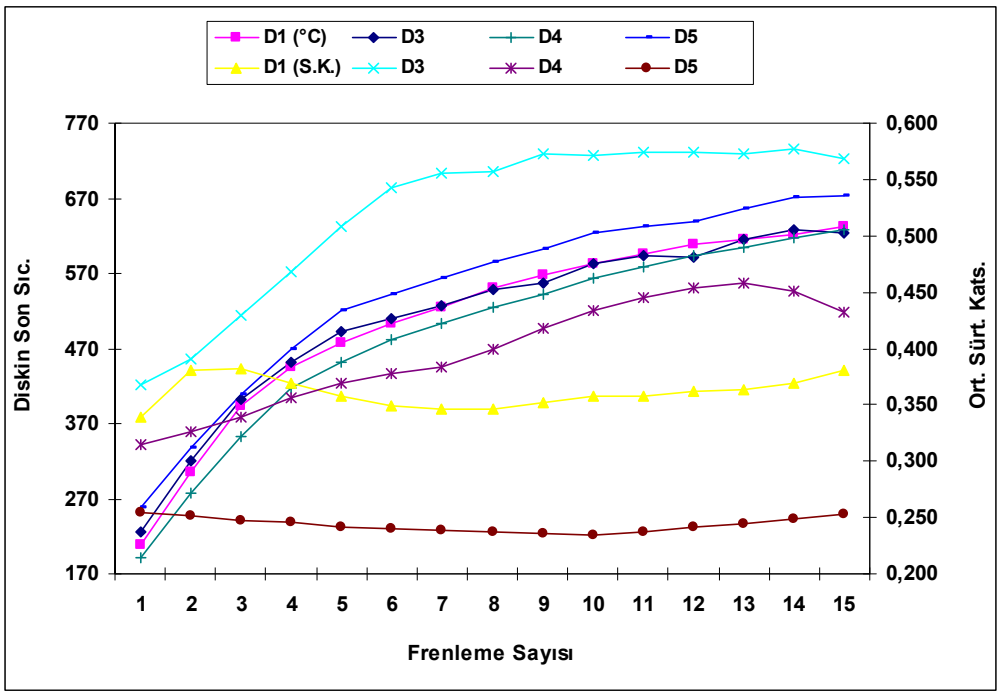


Şekil 5.18: Deney disklerinin karasteristik kontrolü

5.1.15 Sıcaklıkla fren zayıflaması II (Fade 2)

İkinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründe Şekil 5.19'da görüldüğü gibi D3 diski ile birlikte çalışan balatalar oldukça yüksek SK (yaklaşık 0,375 ile 0,580

arasında)[14] geliştirdi. Bu eğriye en yakın grafiği D4 disk-balata çifti gösterdi. D5 diskinin yüksek sıcaklığına rağmen balataları başlangıçtaki değerlerini kararlılıkla sürdürdü. Bu bölümün tüm frenlemelerinde D1 disk-balata çiftinin geliştirdiği SK değerleri de yaklaşık 0,330 ile 0,380 arasında bir değişim gösterdi. Bu prosedürde sırasıyla balataların nihai sıcaklıkları; yaklaşık 450, 663, 630 ve 664 °C'ye kadar ulaştı. Genel olarak yüksek disk-balata sıcaklıklarına rağmen bu testte belirgin bir sıcaklıkla fren zayıflaması olmamıştır.

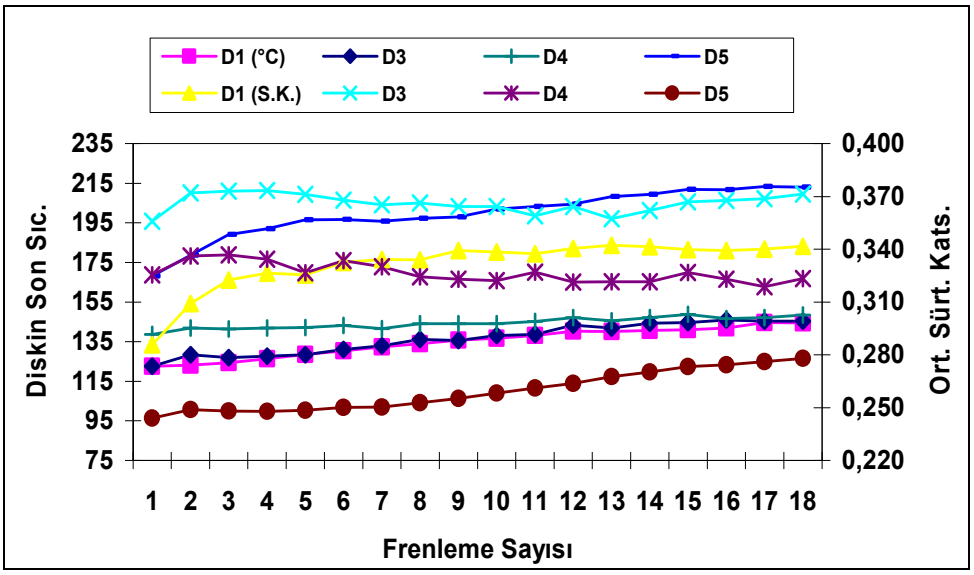


Şekil 5.19: Deney disklerinin sıcaklıkla fren zayıflaması II (Fade II) kontrolü

5.1.16 Karakteristik kontrol - V

Testin bu son bölümünde de Şekil 5.20'de görüldüğü gibi D3 diski ile birlikte çalışan balatalar oldukça yüksek, D1 diski ile çalışan balatalar da oldukça kararlı ve iyi bir SK geliştirdi. Bir önceki karakteristik kontrole göre D5 diskinin balataları da bu prosedürde etkinliğini arttırdı. Bu bölümün tamamında D4 disk-balata çifti ortalama 0,326'lık bir SK geliştirirken, en yüksek sürtünme katsayısını 0,337'lik değeri ile 3. frenlemede sağladı.

[14] Kaplama tozunun %40'ı Co, %27'si Ni ve %6'sı Mo'den oluşmuştur. D3 diskindeki DTV ve salgı miktarları ile disk (225 ile 663 °C arasında) ve balata sıcaklıkları (94 ile 663 °C) arasındaki değişimlerden sürtünme katsayısındaki sapmalar artmıştır. Bunlara D1 diskinin balatalarının D3 diskinin balatalarından daha düşük işletme sıcaklıklarına maruz kaldığı da eklenmelidir.



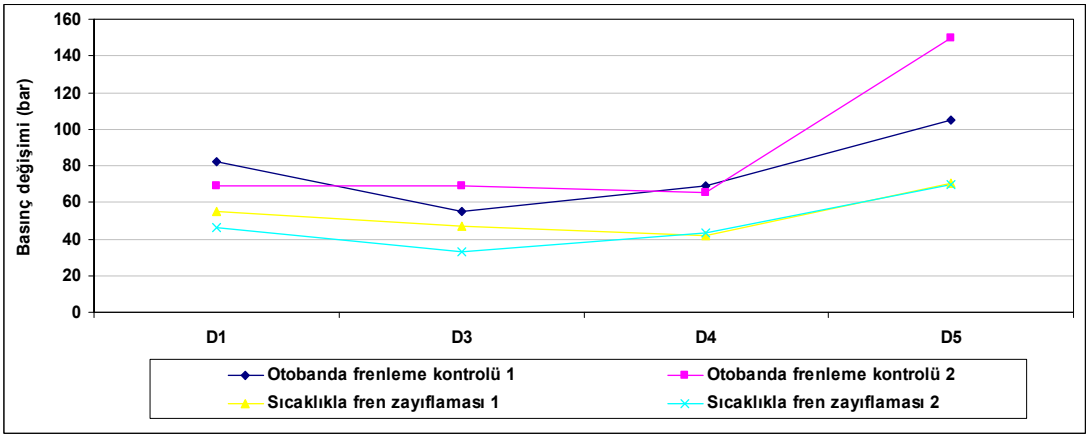
Şekil 5.20: Deney disklerinin karakteristik kontrolü – V

Toplam 11 farklı parametre ve 21 farklı test koşulunda yapılan SK incelemelerinde D1 diski tüm frenleme koşullarında ortalama 0,316'lık SK sağlamıştır. D1 diskinin SK'si, en düşük 0,227 ve en yüksek 0,480 olarak tespit edilmiştir. Hız/Basınç hassasiyetinin (80-40 km/h) son safhasına doğru D1 disk-balata çiftinin SK'si artmıştır. Bu durum D1 disk-balata çiftinin frenleme performansı açısından alışma dönemini geçirdiğine işaret etmektedir. Düşük sıcaklıklarda değişken uygulama basınçlarında (yaklaşık 10…80 bar arasında); D1 disk-balata çiftinin sürtünme davranışının, kaplamalı disklerden daha iyi olduğu sonucuna varılabilir. Metco 19E metalik tozla kaplanmış disk (D2) balata çifti; ön alışma (green), alışma (burnish), karakteristik kontrol ve hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) dâhil ortalama 0,419'luk sürtünme katsayısıyla çok iyi bir performans göstermiştir. D2 diskinin sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan termokapıl, hız-basınç hassasiyeti (200-170 km/h) bölümünde oluşan aşırı yüksek sıcaklıklardan ve sürtünme katsayılarından dolayı hasar gördü ve testlerden çıkarıldı. D2 diskinin yüzey pürüzlülüğünün diğer disklerden küçük olması, balatanın gerçek temas alanının diğer disklerden büyük olmasını sağlamıştır. Bununla birlikte kaplamada %60-65 düzeyinde bulunan nikel'in SK'sinin yüksek olması da frenleme mesafesini kısaltmıştır. Metco 18C ile kaplanmış diskin (D3) kaplama kompozisyonu, %40'ı Co, %27'si Ni ve %6'sı Mo'den oluşmuştur. Kaplamanın bu kimyasal kompozisyonu, genel olarak sürtünme katsayısını arttırmıştır. Ancak yaklaşık %93'ü perlitik yapılı dökme demir olan D1 diskinden daha büyük ve farklı faz değişimleri oluşmasına sebebiyet vermiştir. D3 disk-balata ikilisi; ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci karakteristik kontrolde ($\mu \approx$

0,419), soğuk frenlemede, disk ve balata ikilisinin kararlılık haline gelmesi bölümünde (recovery), artan sıcaklık hassasiyetinde ve ikinci sıcaklıkla fren zayıflaması testlerinde ortalama 0,407'lik bir SK göstermiştir. 850 °C'ye kadar düşük sürtünme katsayısına ve abrazyon aşınmasına karşı yüksek dirence sahip [48] olan Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disk (D4) balata çifti; 200 km/h'ten 170 km/h'e yavaşlamada hız/basınç hassasiyeti, otobanda frenleme kontrolü ve sıcaklıkla fren zayıflamasının birinci test prosedürlerinde ortalama 0,382'lik sürtünme katsayısı göstermiştir. Al_2O_3-TiO_2 kaplamalar; sert, kayma aşınmasına dirençli, sürtünme katsayısı ve termik iletkenliği (<2 W/mK) düşük yapısal özelliğe sahiptir. Al_2O_3-TiO_2 ile kaplanmış D5 diski, kaplamanın özelliğinden dolayı termal bariyer etkisi göstermektedir. Buna rağmen D5 diski ile eş çalışan balatalarda, belirgin bir sıcaklığa bağlı fren zayıflaması (fading fenomeni) gelişmemiştir. Bu disk-balata çifti, sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürlerinde oluşan yüksek arayüz sıcaklıklarına rağmen en düşük 0,152'lik SK değeri ile göreceli olarak iyi bir performans göstermiştir.

5.1.17 Sabit frenleme ivmeli test prosedüründeki basınç değişimi

21 test prosedüründen oluşan dinamometre testinin "otoyol frenleme kontrolü I – II ile sıcaklıkla fren zayıflaması I – II (fade I – II)" prosedürlerinde sabit yavaşlama ivmesi kullanılmıştır. Şekil 5.21'de de görüldüğü gibi sabit ivmeli test prosedürlerinde en büyük basınç değişimi 180 km/h'ten 100 km/h'e yavaşlamada otobanda frenleme kontrolü testinde D5 diski göstermiştir. D5 diskinin balataları yaklaşık 150 bar'lık bir uygulama basıncına maruz kalmıştır. Şekilde görüldüğü gibi genel olarak D3 ve D4 diskleri en düşük basınç değerlerine sahip olmuştur.



Şekil 5.21: Sabit frenleme ivmesine sahip test prosedürlerindeki basınç değişimi

5.2 Disk Kalınlık Değişimi ve Koniklik İncelemesi

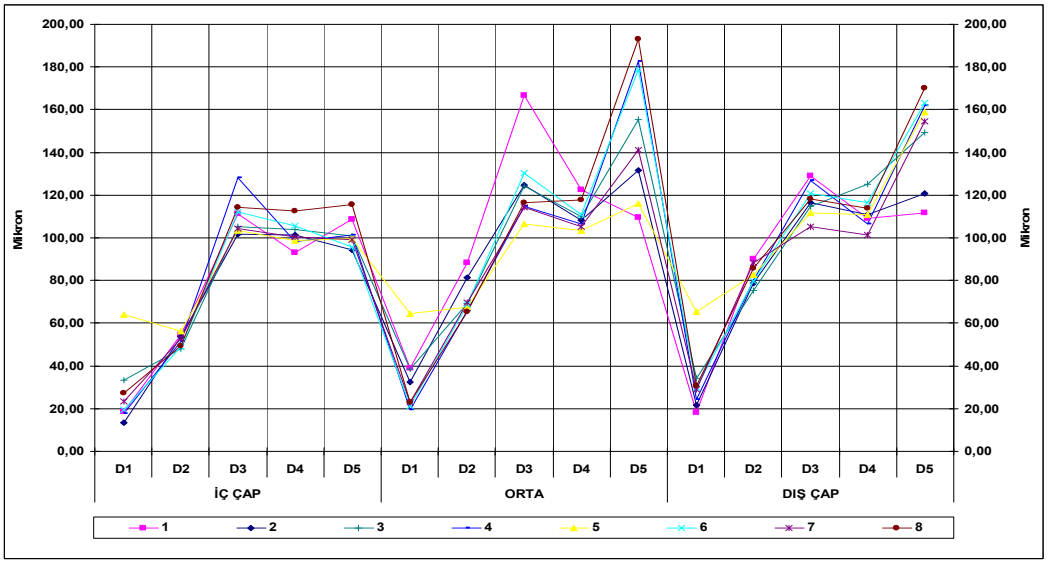
6 propla diskin iç ve dış yüzeyinin koniklik değişimleri; diskin iç, orta ve dış çaplarından disk kalınlık değişimi incelenerek tespit edildi. Çalışmanın bu bölümündeki grafikler testlerdeki ortalama verilerden değil proplardan alınan anlık verilerden oluşturuldu. Koniklik ve disk kalınlık değişimleri (DTV), sadece 160 km/h'ten 130 km/h'e hıza yavaşlamanın yapıldığı hız/basınç hassasiyeti ile birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürlerinde incelendi.

5.2.1 Disk kalınlık değişimi

DTV değişimleri, hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) ile birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürlerinde diskin iç, orta ve dış yüzeyindeki değişimler incelenerek gerçekleştirildi.

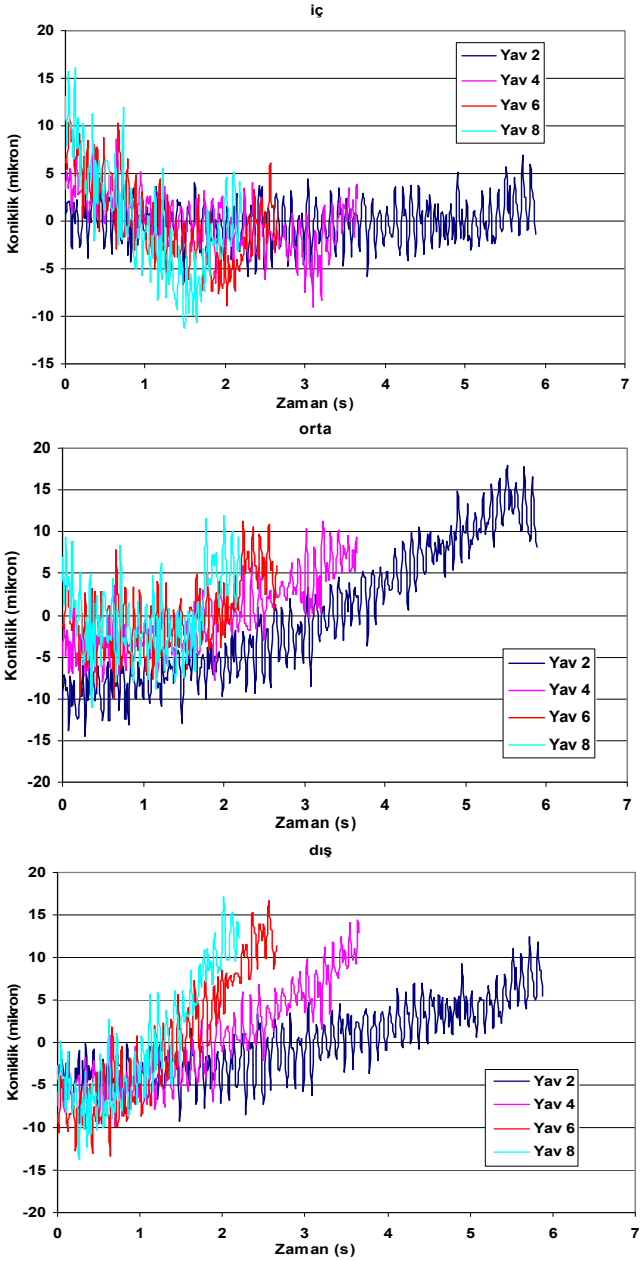
5.2.1.1 DTV - hız hassasiyeti (160-130 km/h)

Disklerin hız hassasiyeti test prosedüründeki DTV değişimleri, ortalama değerlerden hareketle oluşturulan Şekil 5.22'deki grafikten daha rahat görülebilir. Bununla birlikte her bir diskin anlık DTV değerleri Şekil 5.23 ile Şekil 27 arasında ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde genellikle DTV değerinin diskin orta ve dış kısmında artış gösterdiği görülebilir. Bu artışta diskin hem çevresel hızının [84] hem de yapılan işin diskin dış kısmına doğru artış göstermesi etkili olmuştur.



Şekil 5.22: Tüm disklerin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) ortalama DTV değerleri

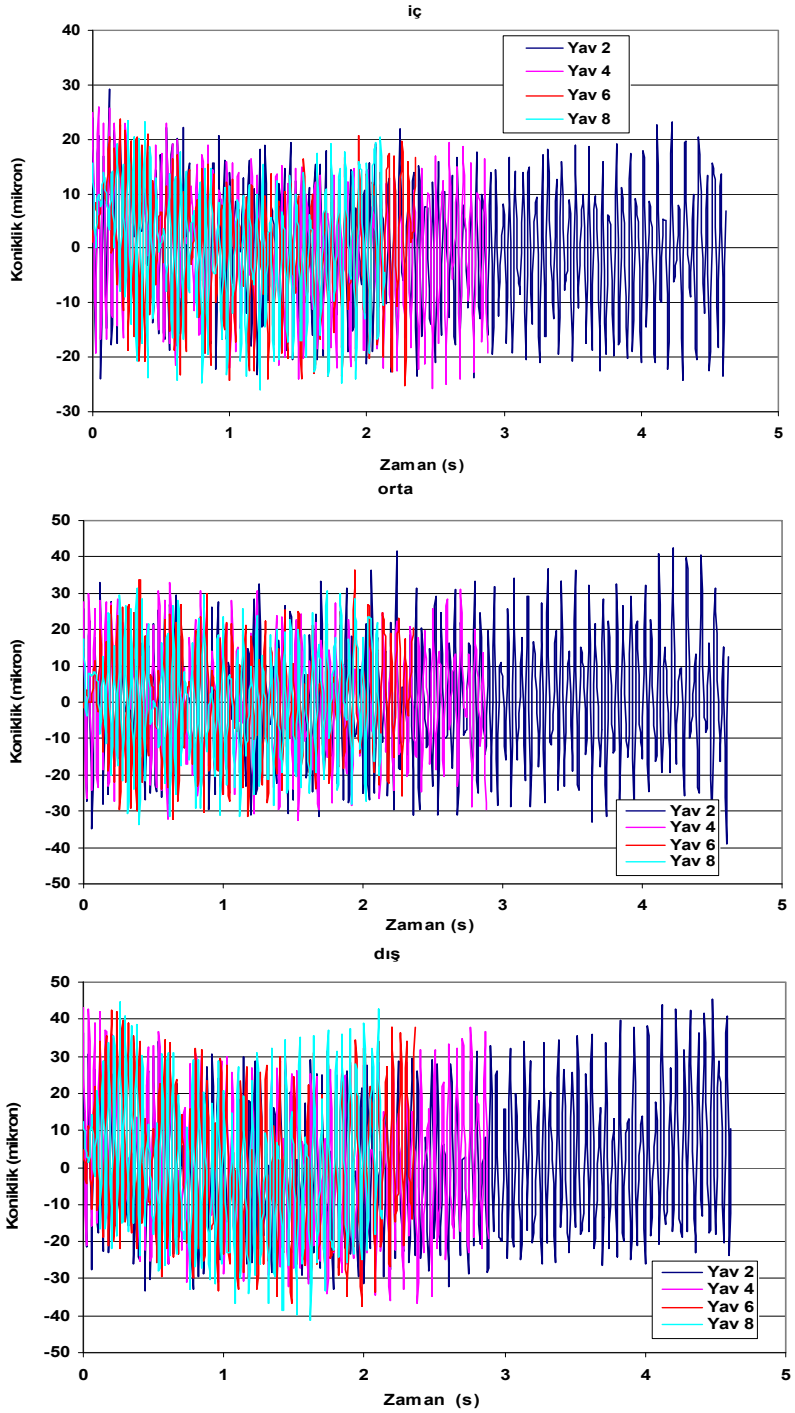
Şekil 5.23'de D1 disk-balata çiftinin hız hassasiyeti (160-130 km/h) test prosedüründeki DTV değişimleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi D1 diskinin iç kısmında 0,016 ile -0,012 mm, orta kısmında 0,018 ile -0,014 mm düzeyinde ve dış kısmında ise 0,017 ile -0.013 mm arasında koniklik gelişti. Genel olarak frenleme sayısına bağlı olarak DTV değişimleri artış gösterdi. İkinci frenlemede diskin orta kısmında gelişen koniklik değerinin, iç ve dış kısımda gelişenden daha yüksek olduğu gözlendi. Bu durumda diskin son sıcaklığının 292 °C olması etkili olmuştur. Ayrıca bu kısım etkili fren yarıçapına[15] tekabül eden kısımdır.



Şekil 5.23: D1 diskinin DTV'si – Hız hassasiyeti 160 km/h

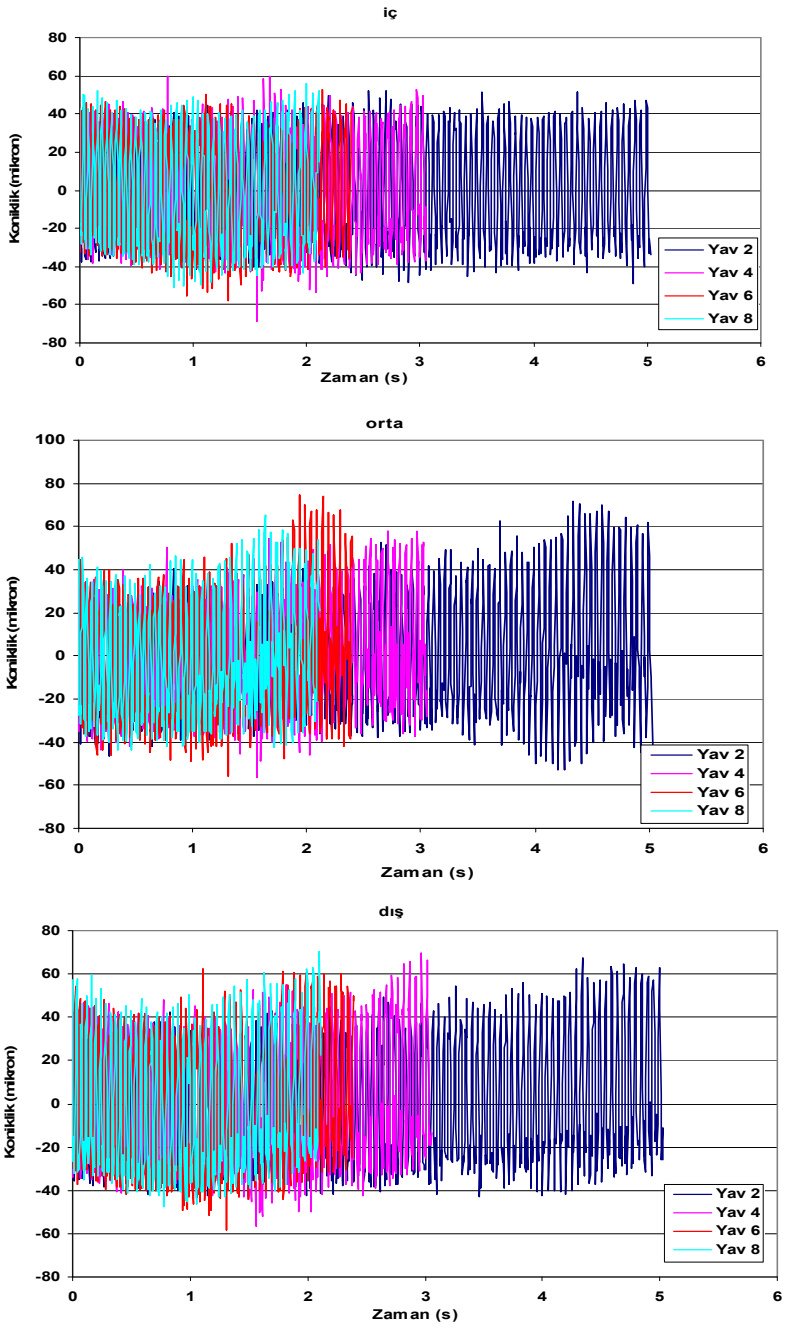
[15] Etkili fren yarıçapı: Aks merkezinden yaklaşık balatanın orta noktasına olan mesafeye etkili fren çapı denir [1].

Şekil 5.24'de görüldüğü gibi D2 diskinin iç kısmında 0,028 ile -0,025 mm, orta kısmında 0,042 ile -0,038 mm ve dış kısmında ise 0,044 ile -0,041 mm arasında koniklik ölçüldü. D2 diskinin DTV değerlerinin D1 diskinden daha büyük olmasında; D2 diskinin sapma miktarının, salgı miktarının ve bu test prosedürlerine kadarki agresif aşınma miktarından kaynaklanan aşınma tozlarının, yüzey pürüzlülüğünün ve testlerdeki yüksek SK değerlerinin birleşik ya da ayrık etkilerinden dolayı büyük olması etkili olmuştur.



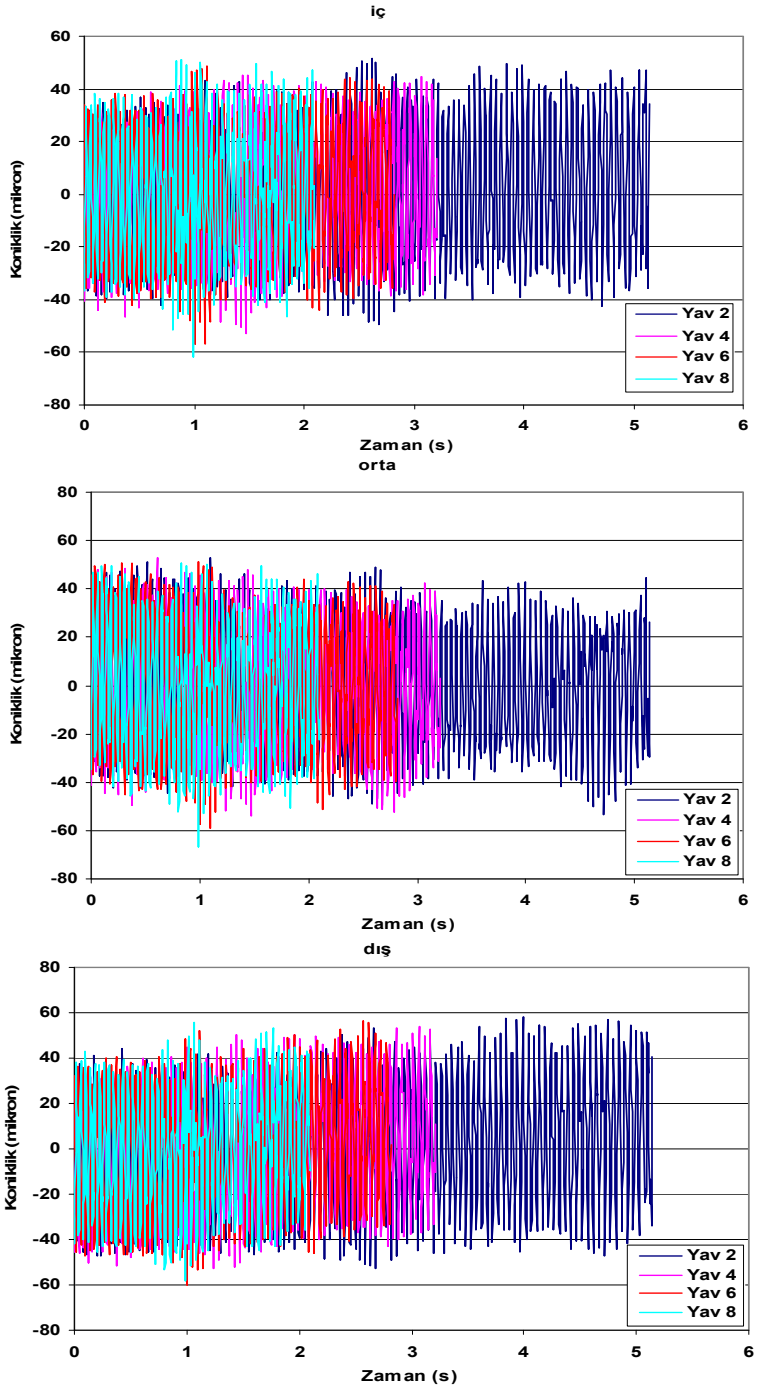
Şekil 5.24: D2 diskinin DTV'si – Hız hassasiyeti 160 km/h

Şekil 5.25'de görüldüğü gibi D3 diskinin iç kısmında 0,060 ile -0,070 mm, orta kısmında 0,073 ile -0,056 mm ve dış kısmında ise 0,070 ile -0,058 mm arasında koniklik gelişti. D3 diskinin DTV değerlerinin hem D1 hem de D2 diskinden daha büyük olmasında; D3 diskinin iç/dış sapma miktarı farkının, salgı miktarının, BTV'sinin, başlangıçtaki yüzey pürüzlülüğünün, testlerdeki yüksek SK'sinin ve disk sıcaklık değerlerinin büyük olması etkili olmuştur.



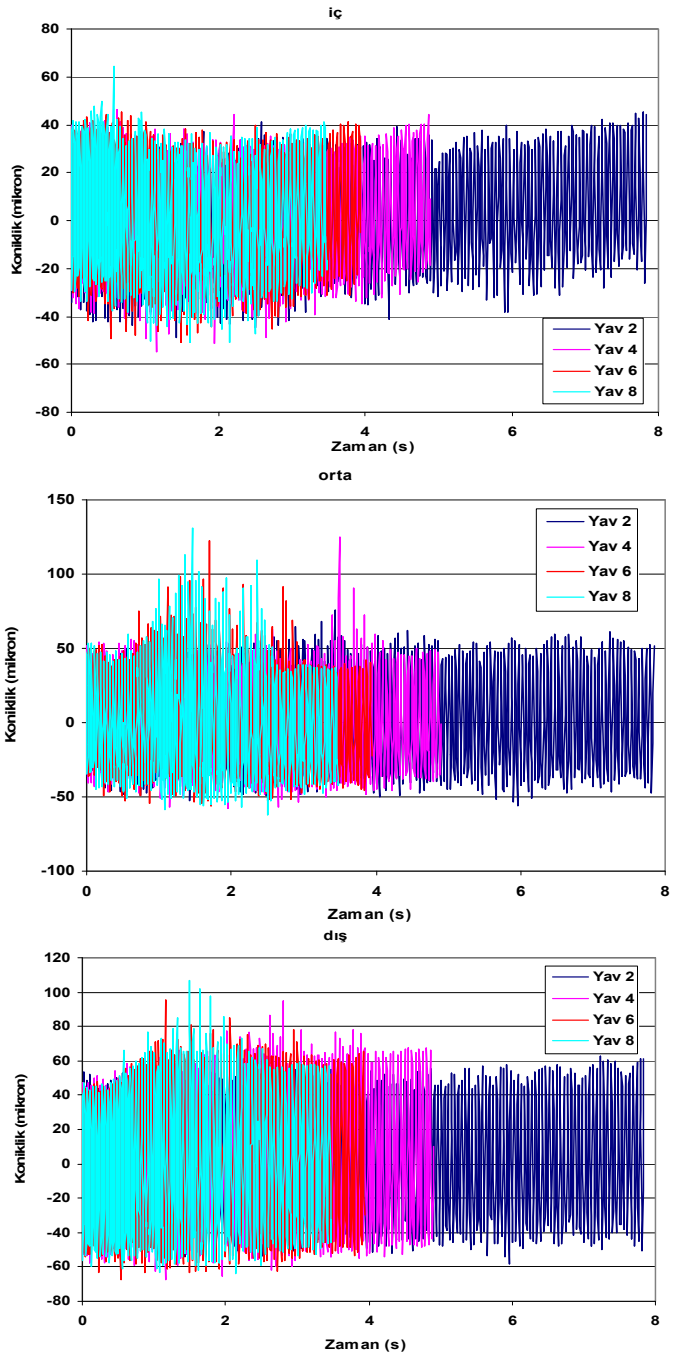
Şekil 5.25: D3 diskinin DTV'si – Hız hassasiyeti 160 km/h

Şekil 5.26'da görüldüğü gibi D4 diskinin iç kısmında 0,050 ile -0,062 mm, orta kısmında 0,053 ile -0,068 mm düzeyinde dış kısmında ise 0,059 ile -0,060 mm arasında koniklik gelişti. D4 diskinin hem salgı miktarının hem de iç/dış sapma miktarının büyük olmasına rağmen DTV değerleri D3 diskinden daha küçük olarak gelişmiştir. Bu duruma D4 diskinin kalınlık farkının, BTV'sinin ve başlangıçtaki yüzey pürüzlülüğünün küçük olması etkili olmuştur. Ayrıca D4 diskinin testlerdeki işletme sıcaklığı tüm disklerden yüksektir.



Şekil 5.26: D4 diskinin DTV'si – Hız hassasiyeti 160 km/h

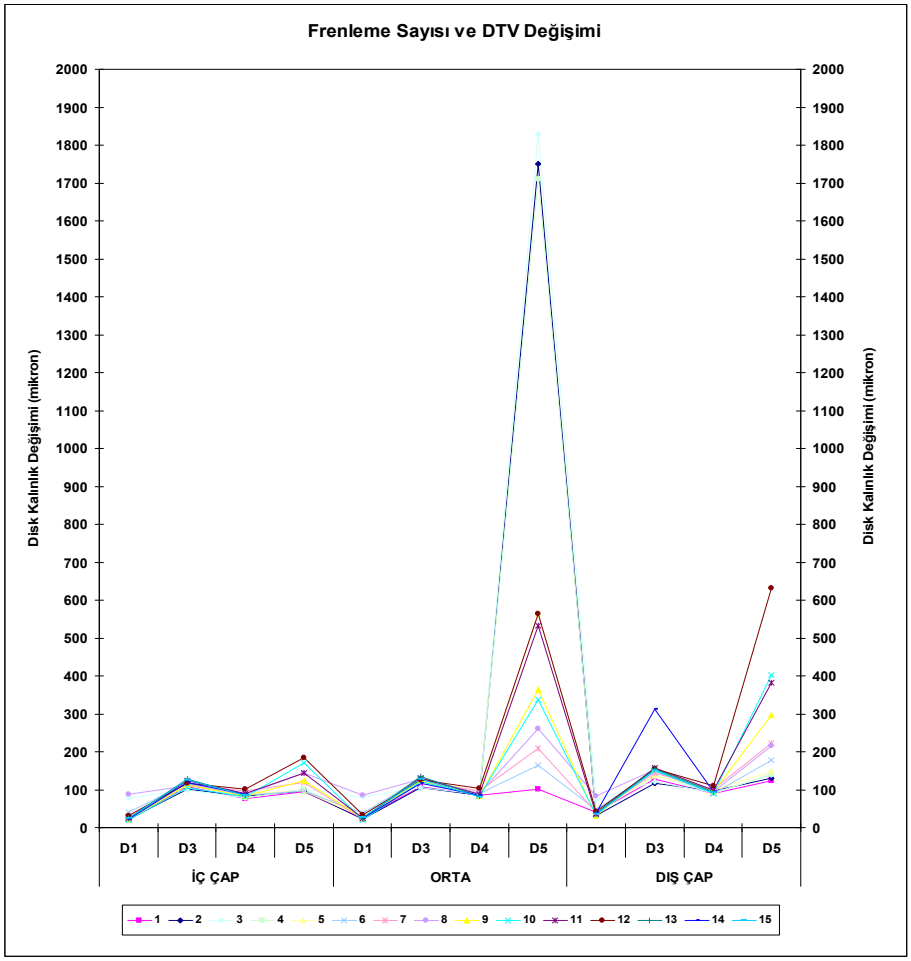
Şekil 5.27'de görüldüğü gibi D5 diskinin iç kısmında 0,065 ile -0,055 mm, orta kısmında 0,130 ile -0,065 mm ve dış kısmında ise 0,110 ile -0,070 mm arasında koniklik ölçüldü. Kaplamalı diskler içerisinde en büyük salgı miktarına sahip olan D5 diskinin; iç/dış sapması, fren tork değişimleri, SK ve (diskin) işletme sıcaklığı tüm disklerden daha küçüktür. Buna rağmen D5 diskinde; 4., 6. ve 8. frenlemelerin bazı fazlarında yüksek disk kalınlık değişimleri gözlenmiştir. Bu sapma değerlerinde muhtemelen balata aşınmasının ve salgının etkisi olmuştur.



Şekil 5.27: D5 diskinin DTV'si – Hız hassasiyeti 160 km/h

5.2.1.2 DTV - sıcaklıkla fren zayıflaması I

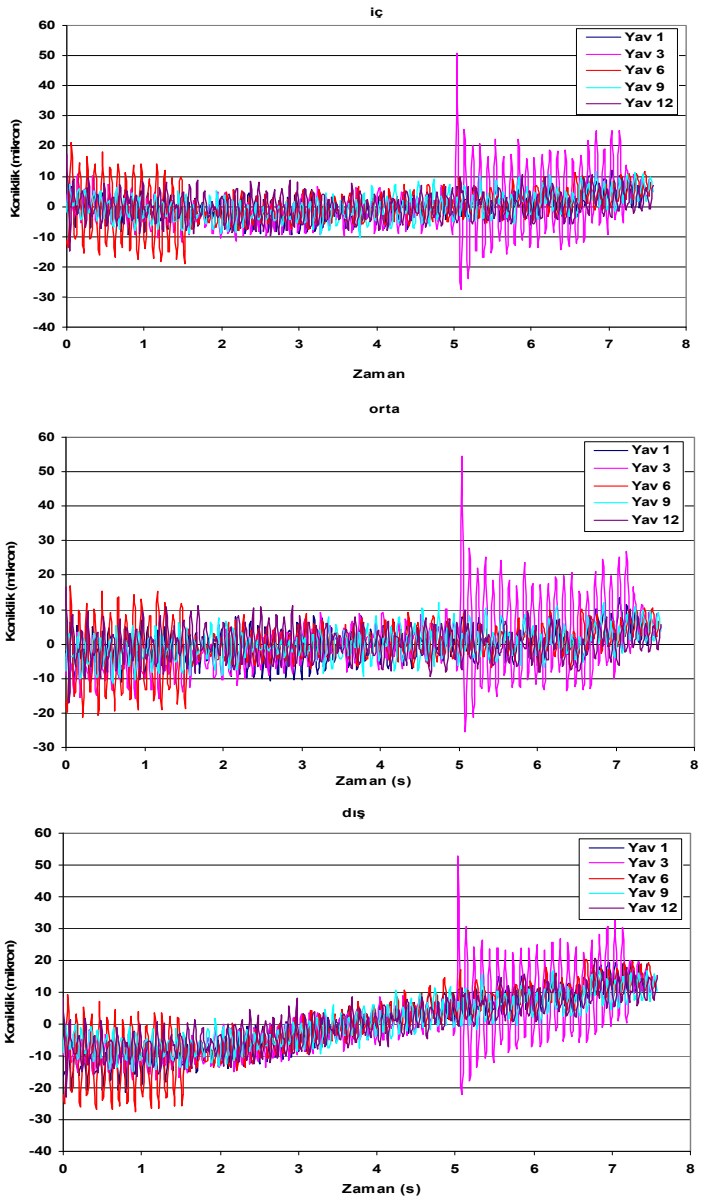
Şekil 5.28'de D2 diski hariç tüm disklerin sıcaklıkla fren zayıflamasındaki DTV değişimleri gösterilmiştir. Bununla birlikte her bir diskin anlık DTV değerlerinden çizilen grafikler Şekil 5.29-32'de daha ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 5.28 incelendiğinde D5 diskinin 2, 3 ve 4. frenlemelerde aşırı DTV değişimi gösterdiği görülecektir. Bu sapmalarda, D5 diski ile birlikte çalışan balataların adezyon[16] aşınmasına maruz kalması ve balatadan diske olan kütle transferinin etkisi büyük olmuştur. Nihai aşınma ölçümünde D5 diski ile birlikte çalışan balatalardaki aşıntı miktarlarının yüksek olması da bu yaklaşımı doğrulamaktadır. Ayrıca müteakip frenlemelerde, sapmaların küçülmesi ve daha kararlı bir büyüklüğe gelmesi, diske transfer olan balata parçacıklarının yüzeyden sıyrılması neticesinde gelişmiştir.



Şekil 5.28: Sıcaklıkla fren zayıflaması I prosedüründeki ortalama DTV'ler

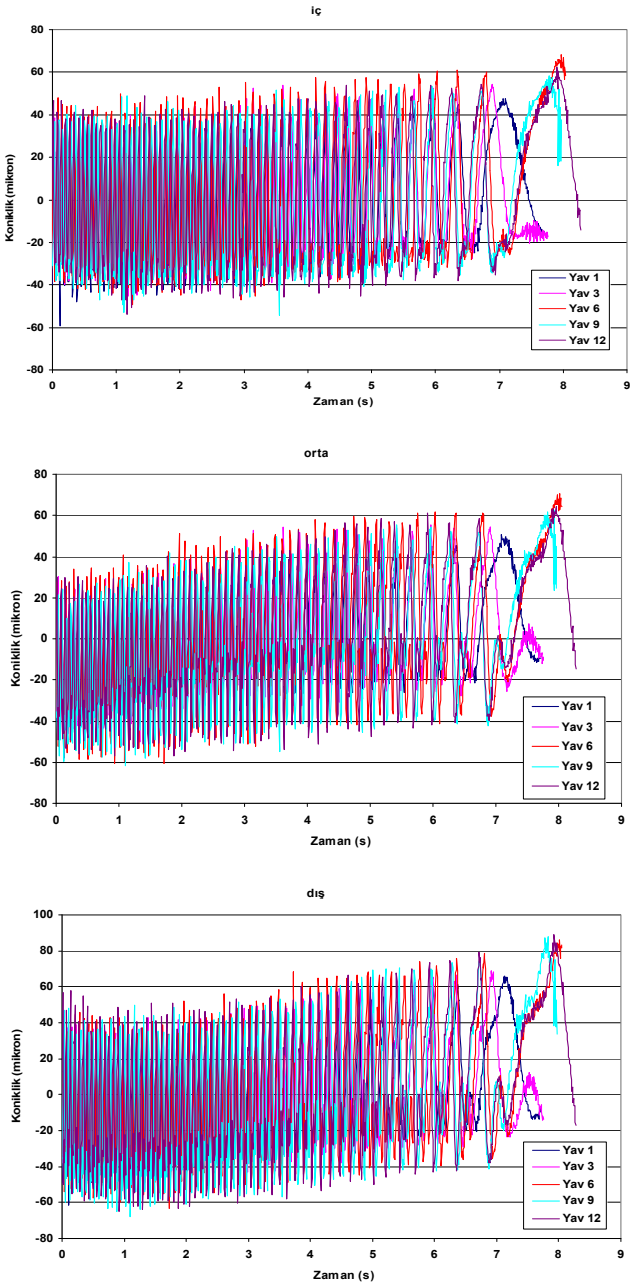
[16] D5 diski ile çalışan balatalarda, tüm testlerden sonra yapılan kütlesel aşınma ölçümlerinde iç balatada 44,6 gram ve dış balatada ise 68,9 gram aşınma görülmüştür. D1 dikindeki aşınma durumu ise, hem iç hem de dış balatalarda 6 gram olarak ölçülmüştür.

Hızın yaklaşık 30 km/h ve D1 diskinin sıcaklığının 417 °C'lerde olduğu üçüncü frenlemenin son safhalarında belirgin sapmalar gerçekleştiği Şekil 5.29'da görülmektedir. Bu sapmalarda, frenlemenin bu safhalarında balatanın yüksek olan SK'sinin (ortalama 0,412) ve bu safhasından sonra müteakip frenlemelerde SK'sinin 0,319'lara kadar düşmesinin etkisi olmuştur. D1 diskindeki fren tork değişimleri birbirine yakın değerler göstermiştir. Genel olarak D1 diskinin son sıcaklığı ortalama 507 °C iken SK'si ise 0,342 düzeyinde gelişmiştir. Diskteki DTV'lerde hem yüksek sıcaklık hem de yüksek SK'lerin birleşik ya da ayrık etkileri olmuştur. Çünkü sıcaklık diskin bir miktar termik genleşmesine sebep olmuştur.



Şekil 5.29: D1 diskinin DTV'si - Sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürü

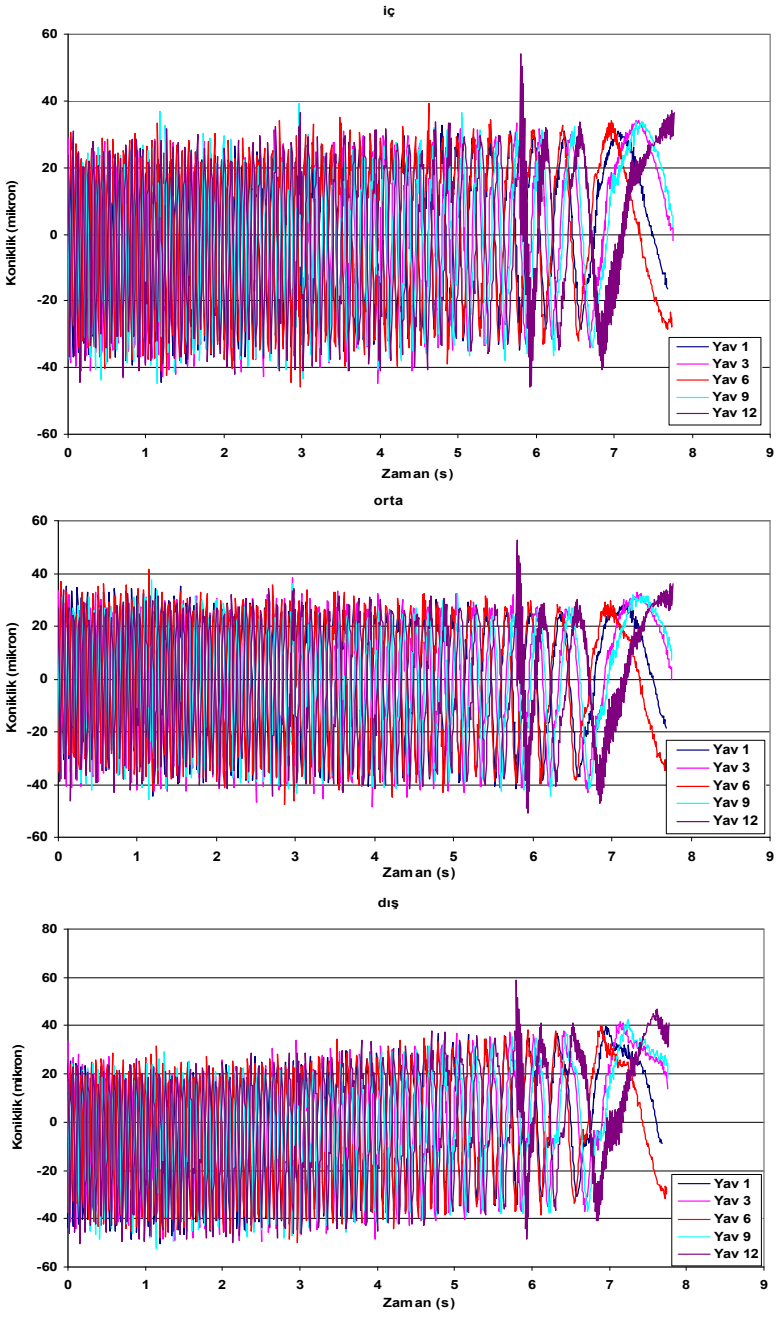
Şekil 5.30'da görüldüğü gibi bu test prosedüründe D3 diskinin DTV değerlerinin D1 diskinden daha büyük olmasında diskin üniform olmayan dönme geometrisinin[17] yanı sıra, genel olarak D3 disk ve balatalarının son sıcaklıkları ile SK'sinin (ortalama 0,379) yüksek olması da etkili olmuştur. Ancak hem artan SK'ye hem de disk-balata son sıcaklığına rağmen D3 diskinin DTV değerleri hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) testindekine yakın olmuştur. Bu durum D3 diskinin sıcaklığa karşı D1 diski kadar duyarlı olmadığına da işaret etmektedir.



Şekil 5.30: D3 diskinin DTV'si - Sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürü I

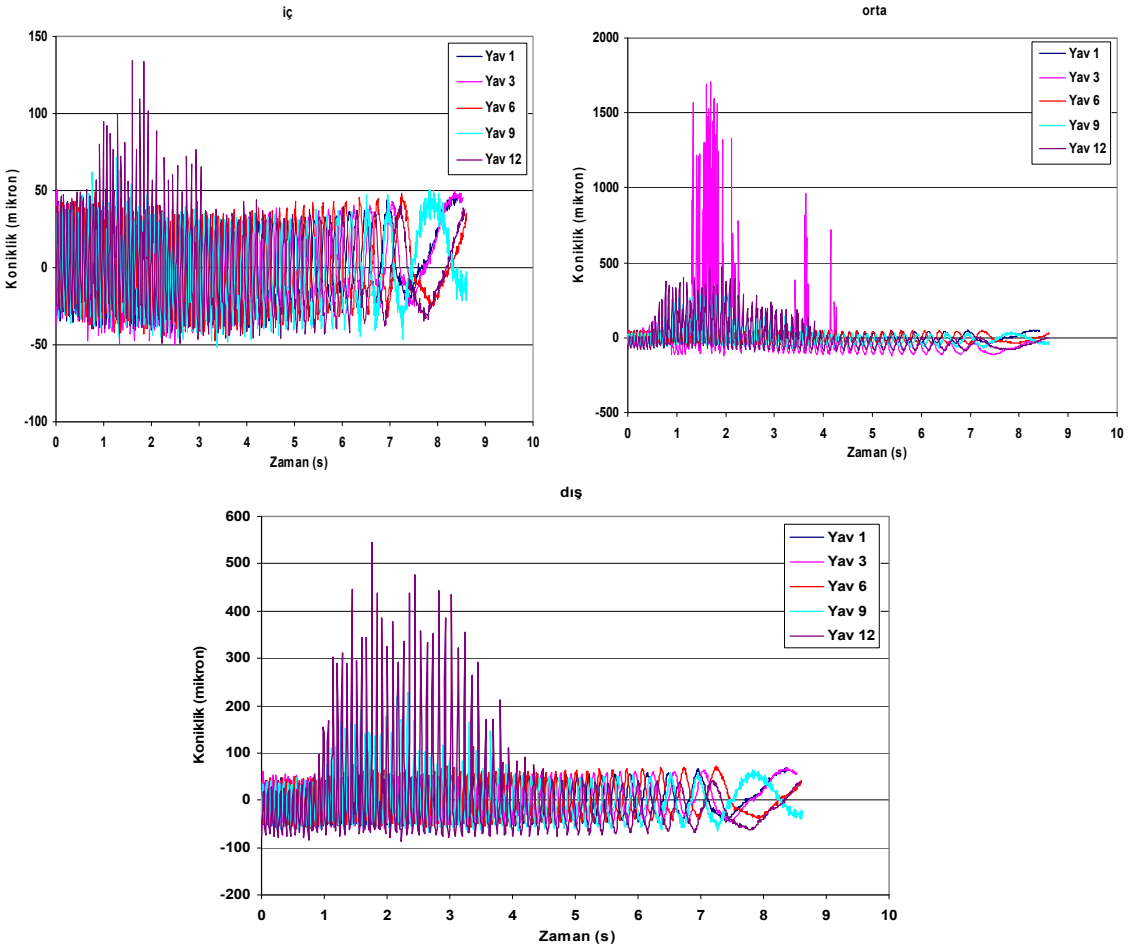
[17] D1 diskine göre kaplanmış olan tüm disklerde (D2, D3, D4 ve D5), daha büyük salgı ve kalınlık değişimi "üniform olmayan dönme geometrisi"ne sebep olmuştur.

Şekil 5.31'de görüldüğü gibi genel olarak D4 diskinin iç, orta ve dış koniklik değerleri 0,040 ile -0,040 arasında geniş bir aralık göstermiştir. Bu test prosedüründe D4 diskinin DTV değerleri D1 diskinden daha büyük ve D3 diskinden daha küçük gelişmiştir. Genel olarak D4 diskinin ve balatalarının son sıcaklıkları ile SK'si (ortalama 0,402) hem D1 hem de D3 diskinden daha yüksek olmuştur. Buna rağmen D4 diskinin DTV değerleri hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) testindekinden daha küçük olmuştur. Bu durum D4 diskinin sıcaklığa karşı hem D1 hem de D3 diski kadar duyarlı olmadığına da işaret etmektedir.



Şekil 5.31: D4 diskinin DTV'si – Sıcaklıkla fren zayıflaması I

D5 diskinin iç bölümünde onikinci frenlemenin 1 - 3. saniyesi, orta bölümünde üçüncü frenlemenin 1,5 ile 4,3 saniye ve dış bölümünde ise onikinci frenlemenin 1 ile 4. saniye aralığında ciddi sapmalar olduğu Şekil 5.32'de görülmektedir. Bu sapmalarda iç/dış balata sıcaklıklarında olan farklılıklar ve balata sıcaklıklarının yüksek olması ile balatanın adezyon aşınmasına maruz kalmasının etkisi olmuştur. Balatadan kopan parçaların ilk etapta disk-balata arayüzünde azami basıncın oluştuğu nokta ya da noktalarda diskin yüzeyine yapıştığı düşünülmektedir. Müteakip frenlemelerde adezyonla disk yüzeyine yapışan parçacıklar hem merkezkaç kuvvetin etkisi hem de disk yüzeyinde sıkı bir bağlantı (sürtünme ile kaynak olma) oluşturamamasıyla yüzeyden süpürülmüşlerdir. Bu yaklaşımı diskin orta kısmında gelişen büyük kalınlık değişimi (aniden kalınlık değişimi 250 μm'den 1750 μm'ye ve yaklaşık bir saniye sonra 50 μm seviyelerine düşmektedir) doğrulamaktadır. Bu koniklik değerlerinde, az da olsa yüksek sıcaklıklardan dolayı termik genleşmelerin de etkisi olmuştur. 15 frenleme ile yapılan bu test prosedürü aşırı yükselen balata sıcaklıklardan dolayı 13. frenlemede bırakılmıştır.



Şekil 5.32: D5 diskinin DTV'si – Sıcaklıkla fren zayıflaması 1

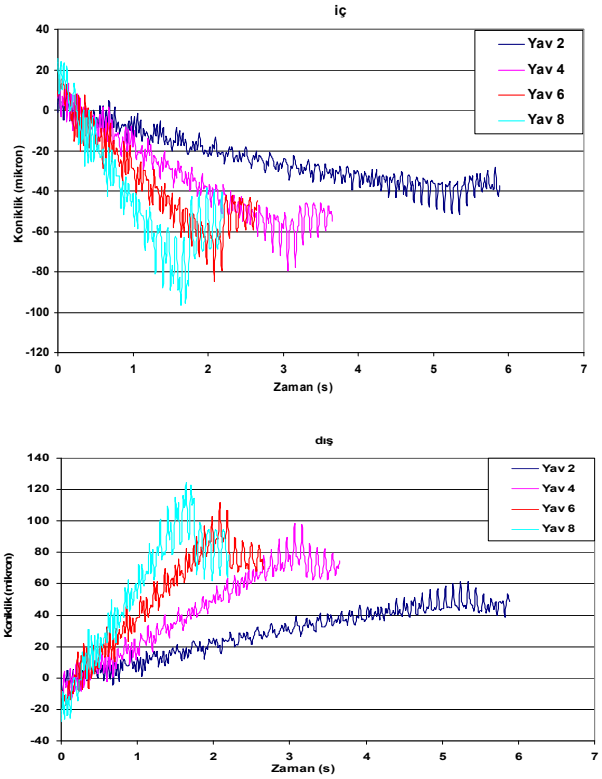
5.2.2 Disklerde koniklik incelemesi

Koniklik değişimleri, sadece 160 km/h hızdan başlayan frenlemenin yapıldığı hız/basınç hassasiyeti ile birinci sıcaklıkla fren zayıflaması bölümünde 6 propla tespit edilmiştir.

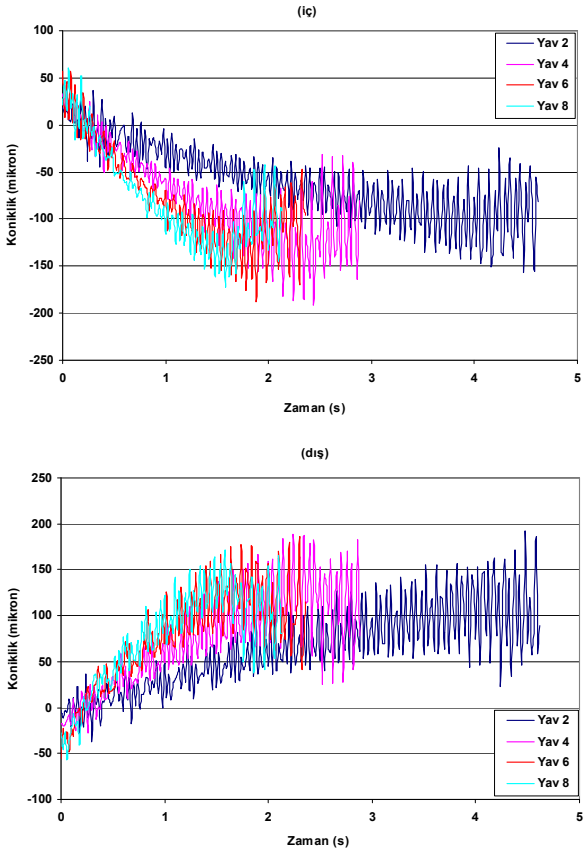
5.2.2.1 Koniklik incelemesi - hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h)

D1 diskinin koniklik miktarının frenleme sayısı ile arttığı, ayrıca diskin dış kısmındaki koniklik eğrilerinin iç kısımdan daha büyük sapma gösterdiği Şekil 5.33'de görülebilmektedir. Bu test prosedüründe uygulama basıncı artıkça genel olarak sürtünme katsayısı da artış göstermiştir. Bu iki değerdeki artış ta koniklik değerini etkilemiştir. Grafikler incelendiğinde iç kısımdaki koniklik 8. frenlemede -0,090 mm ve dış kısımda ise yine 8. frenlemede 0,125 mm düzeyinde gerçekleşti. Diskin iç kısmından dış kısmına doğru hem çevresel hızın hem de yapılan işin artış göstermesi koniklik değerlerinin büyük olmasında etkili olmuştur. Frenleme sayısına bağlı olarak artan koniklik değerlerine ise, sıcaklık artışına bağlı olarak gelişen termik genleşme neden olmuştur.

D2 diskinin koniklik değerlerinin D1 diskinden biraz yüksek olmasında, hem SK'sinin hem de fren tork değişiminin yüksek olması etkili olmuştur. Ancak Şekil 5.34'de görüldüğü gibi koniklik davranışı kararlı bir değişim göstermiştir. Grafikler incelendiğinde; iç kısımda koniklik 4. frenlemede -0,180 mm düzeylerinde iken, dış kısımda da ise yaklaşık 0,180 mm düzeylerinde gerçekleşmiştir. Bu koniklik değerlerinde; testler öncesi D2 diskinin salgı ve kalınlık değişimlerinden kaynaklanan üniform olmayan dönme geometrisi, testler esnasında diskin sürtünme yüzeyinde gelişen düzensiz ısınma ve dolayısıyla düzensiz termik genleşme sebebiyet vermiştir. Bu durum geçici DTV'ye ve şekil değişimlerine (koniklik ve belvermeye) neden olmuştur. Ayrıca bu yapısal faktörün etkisi yanında, D2 disk-balata çiftinin yüksek olan sürtünme katsayısının da koniklik değerleri üzerinde etkisi olmuştur.

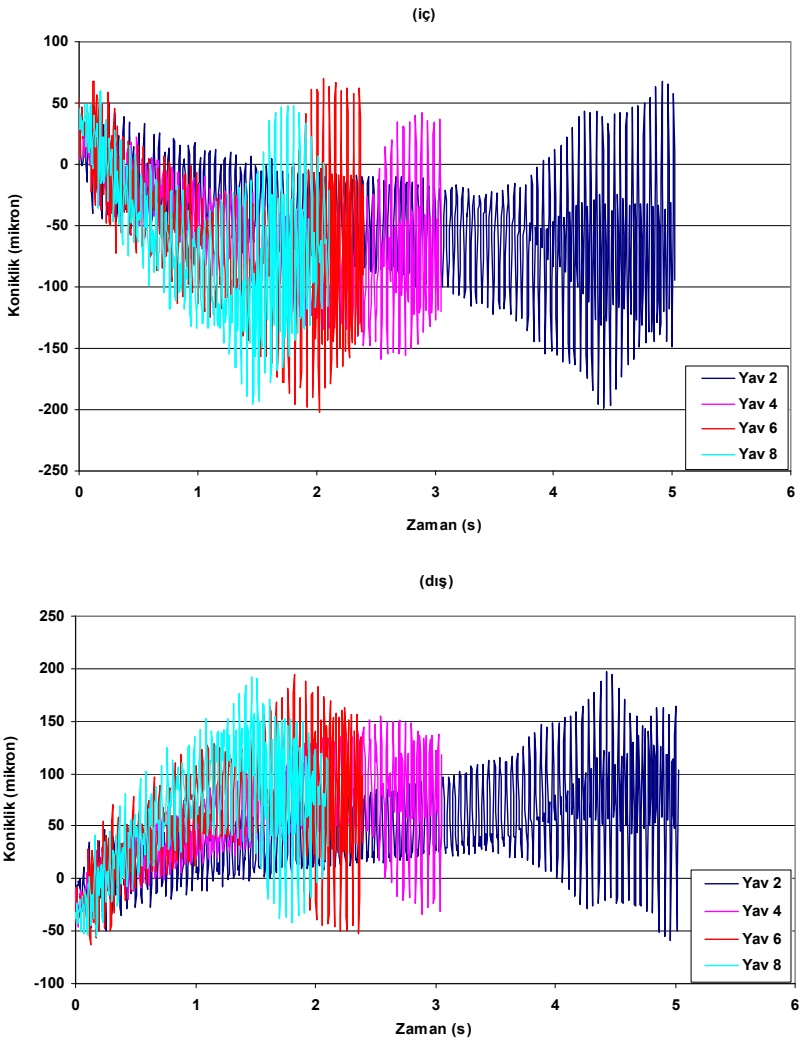


Şekil 5.33: D1 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi



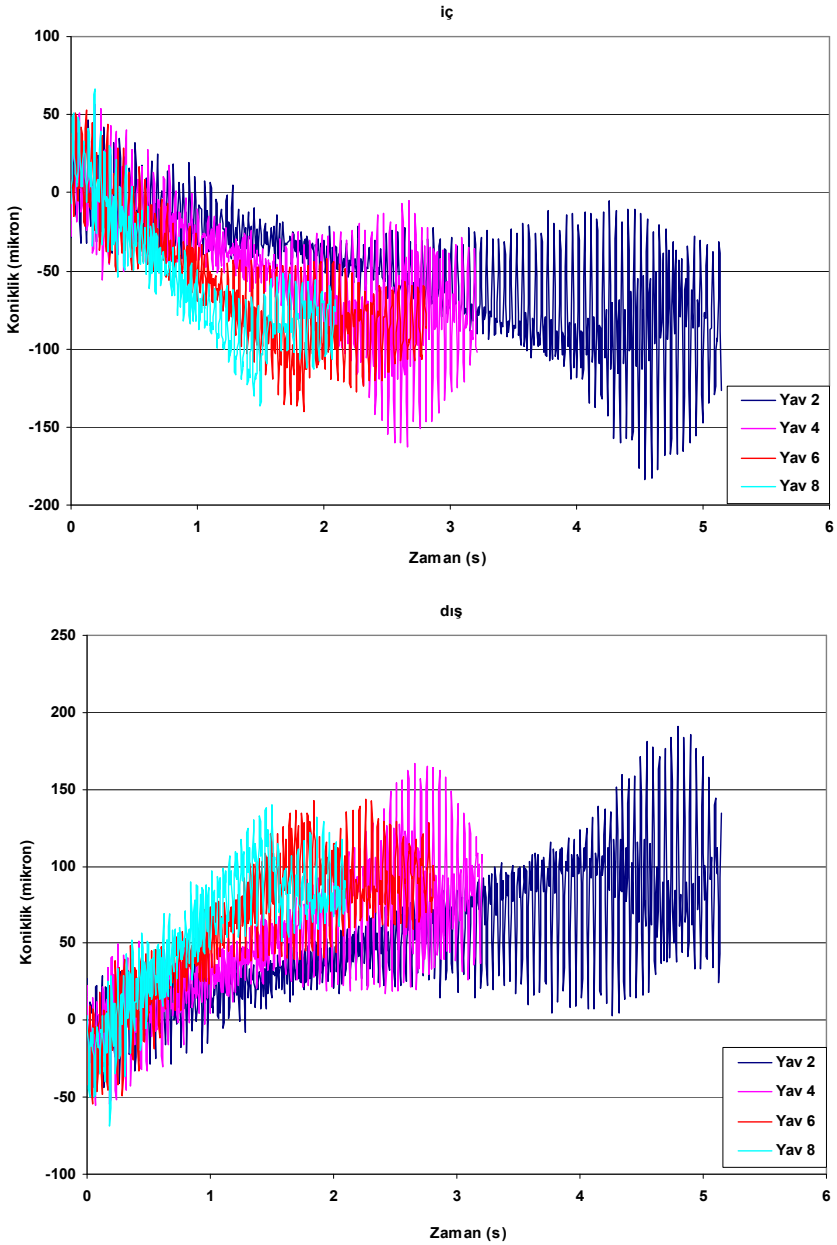
Şekil 5.34: D2 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi

Şekil 5.35'de görüldüğü gibi D3 diskinin iç kısmındaki koniklik değeri 0,060 ile -0,210 mm arasında değişirken, dış kısımda ise -0,06 ile 0,190 mm arasında bir değişim göstermiştir. Grafikler incelendiğinde koniklik değerlerindeki sapmalar diskin iç ve dış kısmında birbirine yakın değerlerdedir. D3 diskinin koniklik değerlerinin D1 diskinden bir miktar büyük olmasında; testler öncesi D3 diskinin salgı ve kalınlık değişimleri testler esnasında diskin sürtünme yüzeyinde düzensiz ısınmaya ve dolayısıyla düzensiz termik genleşme neden olmuştur. Bu yapısal faktörlere ek olarak D3 disk-balata çiftinin, D1 diskinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirmesi de bu koniklik değerlerini etkilemiştir. Ayrıca her bir frenlemenin son safhasına doğru artan koniklik değerlerinde, frenleme süresine bağlı olarak artan sıcaklığın da etkisi olmuştur. İkinci frenlemedeki yüksek koniklik değerlerinde disk-balata çiftinin ortalama 0,385'lik bir SK geliştirmesi de etkili olmuştur.



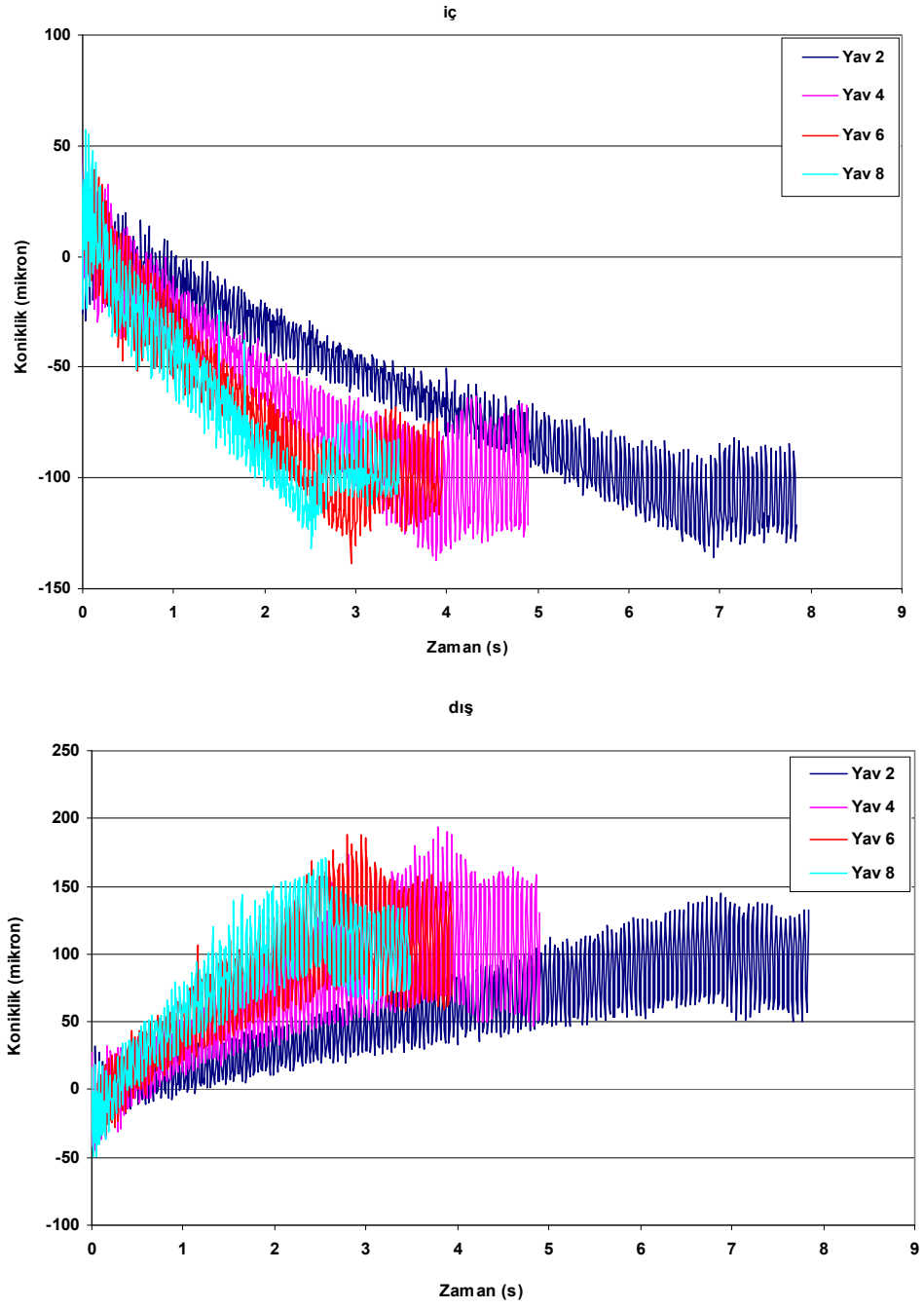
Şekil 5.35: D3 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi

Şekil 5.36'da görüldüğü gibi D4 diskinin iç kısmındaki koniklik değeri 0,065 ile -0,180 mm arasında değişirken, dış kısımda -0,065 ile 0,190 mm arasında bir değişim göstermiştir. Koniklik miktarı diskin iç ve dış kısmında birbirine yakın değerlerde olmuştur ve genel olarak tüm fren periyotlarının son safhalarında artan sıcaklıkla birlikte maksimum sapma göstermiştir. Bu test prosedüründe D4 diski diğer üç diskten (D1, D2 ve D3) daha yüksek işletme sıcaklıklarına maruz kalmıştır. Ayrıca testler öncesinde D4 diskinin hem salgı hem de kalınlık değişiminin; D1, D2 ve D3 disklerinden daha büyük olması da değerleri etkilemiştir.



Şekil 5.36: D4 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi

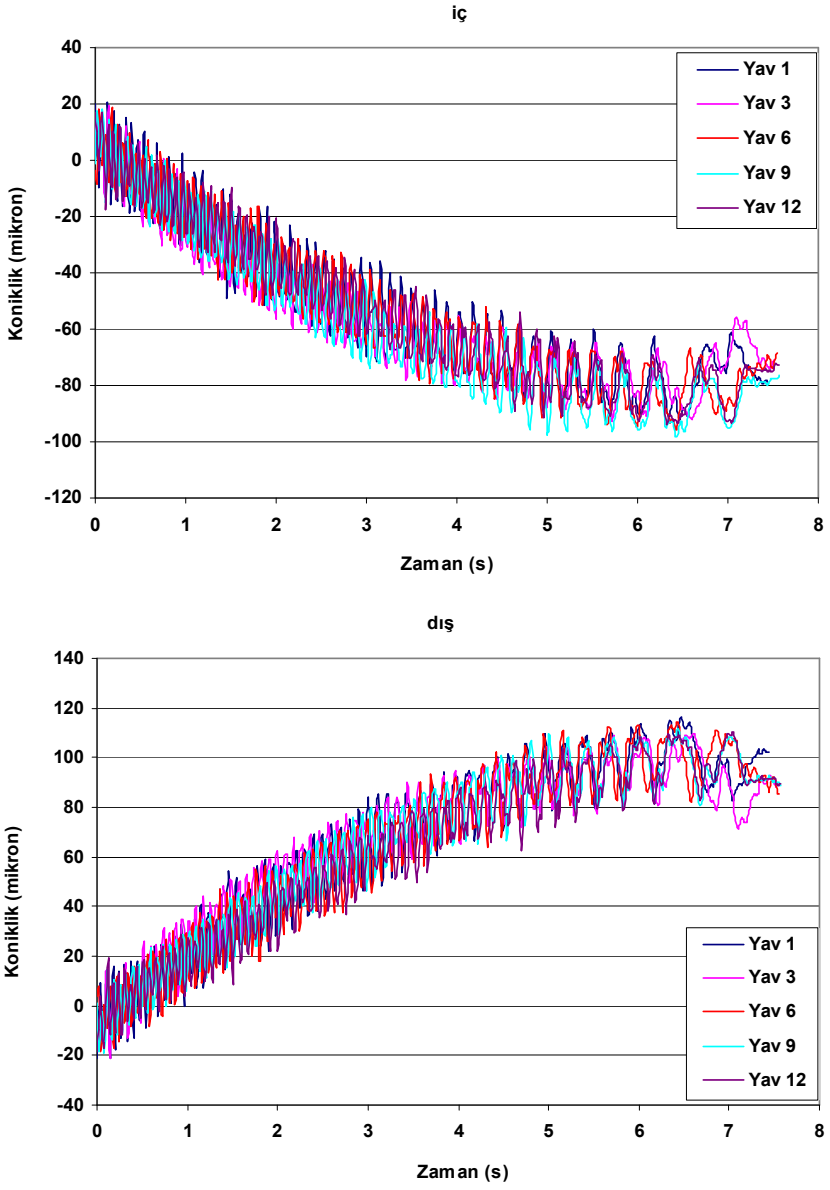
Şekil 5.37'de görüldüğü gibi D5 diskinin iç kısmındaki koniklik değeri 0,070 ile -0,135 mm arasında değişiklik gösterirken, bu durum dış kısımda -0,052 ile 0,190 mm arasında değişim göstermiştir. Diskin dış tarafındaki koniklik miktarının daha büyük olmasında hem dış salgının iç salgıdan bir miktar büyük olmasının hem de frenleme enerjisinin etkisi olmuştur.



Şekil 5.37: D5 diskinin hız hassasiyetinde (160-130 km/h) koniklik değişimi

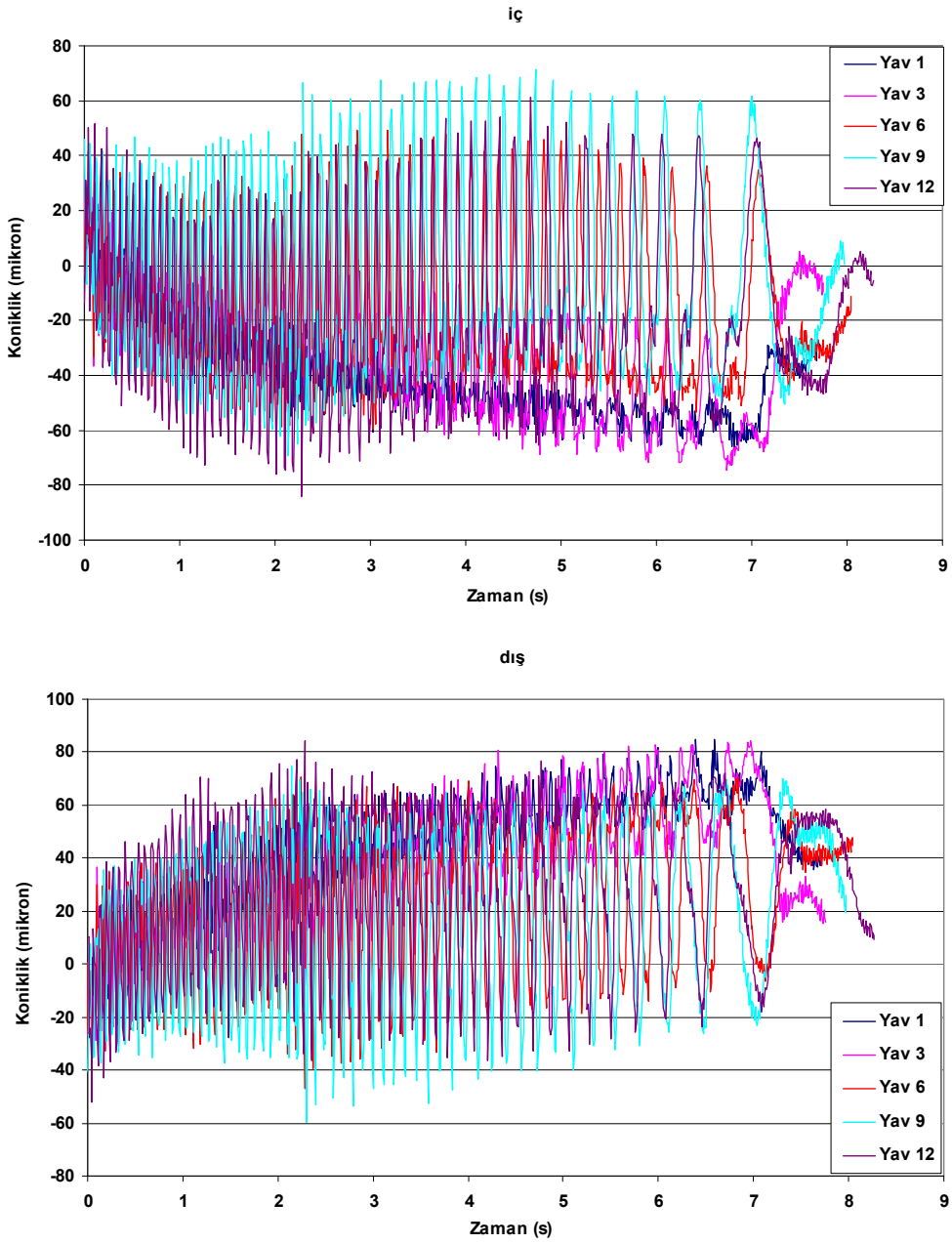
5.2.2.2 Koniklik incelemesi - sıcaklıkla fren zayıflaması I (Fade I)

Şekil 5.38'de görüldüğü gibi D1 diskinin frenleme başlangıcında, iç kısmında 0,020 mm'lik pozitif bir koniklikten -0,098 mm'lik negatif konikliğe kadar yumuşak bir dalgalanma gerçekleşti. Diskin dış kısmındaki koniklik iç tarafın tam simetriği olarak gelişmedi. İç tarafta -0,020 mm'lik negatif koniklikten 0,118 mm'ye kadar bir koniklik gelişimi oldu. D1 diskindeki sıcaklık artışı ile sapma oranlarındaki artışlara, diskin sıcaklıkla genleşmeye maruz kalması neden olmuştur. Diskin dış bölümündeki koniklik miktarının yüksek olmasında, hem frenleme enerjisinin hem de diskin dış kısmındaki salgı değişiminin diskin iç kısmından bir miktar büyük olmasının etkisi olmuştur.



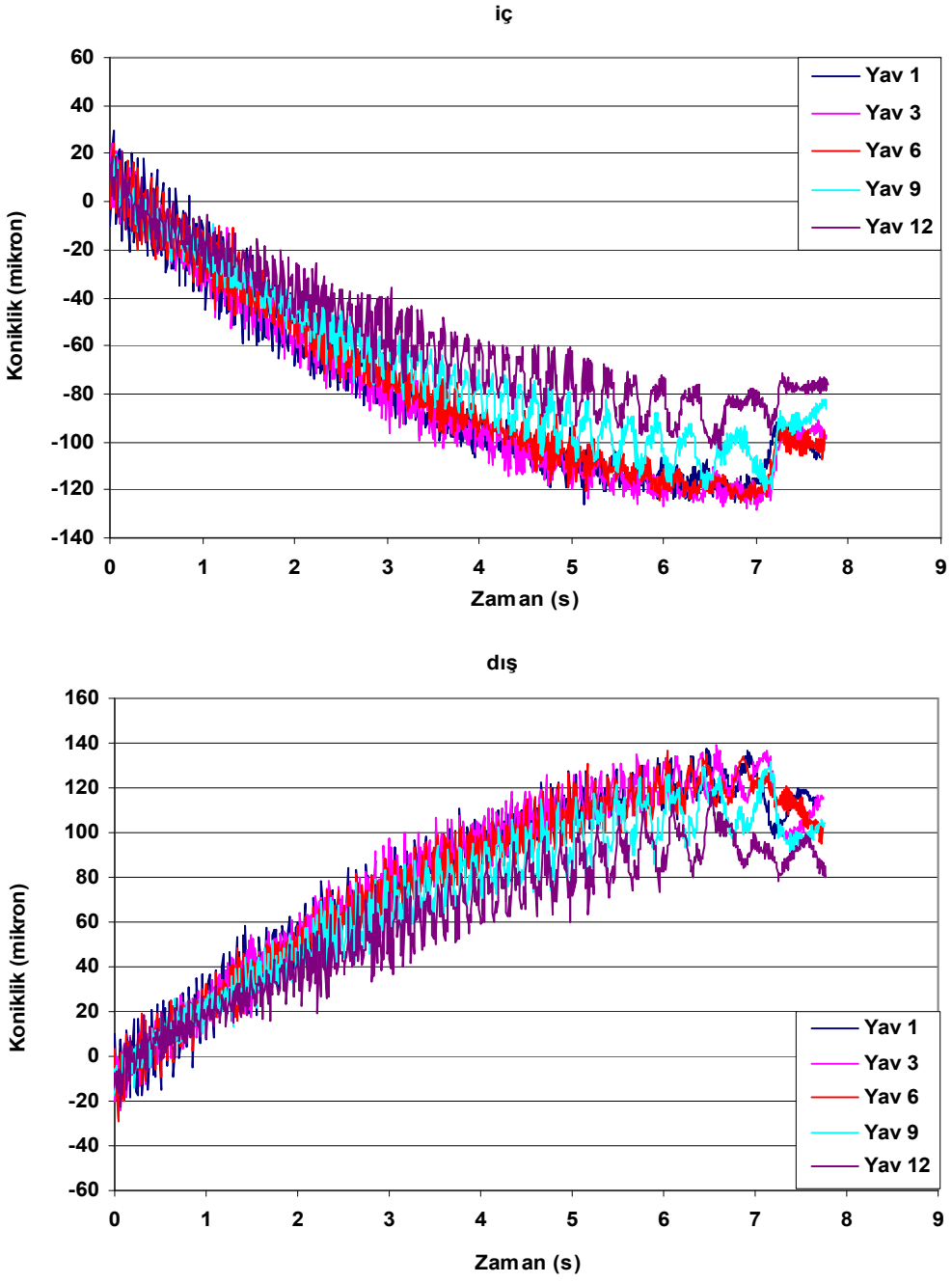
Şekil 5.38: D1 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi

Şekil 5.39'da görüldüğü gibi D3 diskinin frenlemelerdeki koniklik değişimi özellikle 9 ve 12. duruşlarda oldukça büyük değerlere ulaştı. Diskin iç kısmındaki koniklik miktarı -0,085 ile 0,070 mm dış yüzeyindeki ise -0,060 ile 0,085 mm düzeyinde gerçekleşti. Koniklik miktarının büyük olmasında disk-balata ikilisinin SK'sinin yüksek olması da etkili olmuştur. Bu diskteki sıcaklık artışı D1 diski kadar sapmaları beraberinde getirmedi. Ayrıca iç ve dış koniklik miktarı orantılı bir değişim gösterdi. Aynı durum D4 diskinde de meydana geldi. Bu sonuçlar, D3 diskine uygulanan kaplama malzemesinin, sıcaklığa orijinal diskten daha az duyarlı (termik genleşmesinin daha düşük) olduğunu göstermektedir.



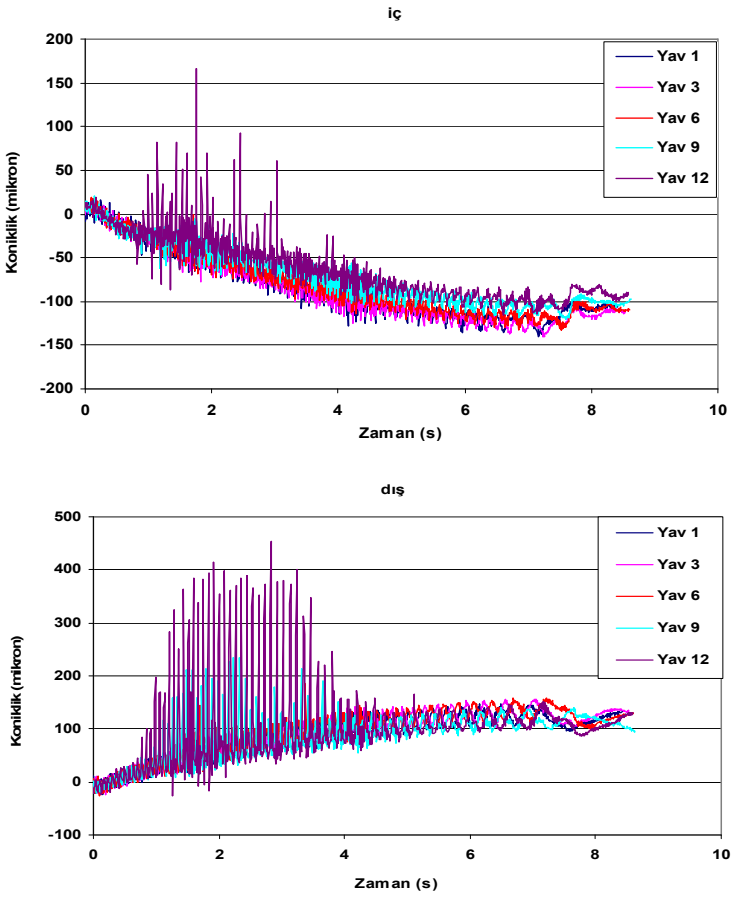
Şekil 5.39: D3 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi

Şekil 5.40'da görüldüğü gibi D4 diskinin birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründeki grafiği D1 diskinin koniklik davranışının biraz büyütülmüş hali gibi elde edildi. Diskin iç kısmındaki koniklik miktarı 0,038 ile -0,125 mm iken dış kısmındaki ise -0,030 ile 0,138 mm düzeyinde gerçekleşti. Koniklik miktarının büyük olmasında disk-balata ikilisinin SK'sinin yüksek olması da etkili olmuştur. Bu diskteki sıcaklık artışı D1 diski kadar ani sapmalar göstermedi. Ayrıca iç ve dış koniklik miktarı orantılı bir değişim gösterdi. Bu sonuçlar D4 diskine uygulanan kaplama malzemesinin, sıcaklığa D1 diskinden daha az duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.40: D4 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi

Şekil 5.41'de görüldüğü gibi D5 diski, 12. frenlemenin 2 ile 4. saniye aralığında ciddi sapmalar gösterdi. Bu sapmalara muhtemelen iç/dış balata sıcaklıklarında olan farklılıklar ve balata sıcaklıklarının 762 °C'lere kadar çıkması ile balatanın adezyon aşınmasına maruz kalmasının etkisi olabilir. İlk etapta balatadan kopan parçaların, disk balata arayüzünde azami basıncın olduğu noktada diskin yüzeyine yapıştığı düşünülmektedir. Müteakip frenlemelerde adezyonla disk yüzeyine yapışan parçacıklar disk yüzeyinde sıkı bir bağlantı oluşturamadığından disk yüzeyinden ayrılarak/süpürülerek ortama atılmıştır. İkinci etapta bu koniklik değerlerinde az da olsa yüksek sıcaklıklardan dolayı termik genleşmelerden kaynaklanan sapmalarda etkili olmuştur. Diskin iç ve dış koniklik değerlerindeki aşırı farklılıklarda bazı frenlemelerde; iç ve dış balata sıcaklıkları arasında 200 °C gibi farkların oluşması da etkin faktördür. 15 frenleme ile yapılan birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürü aşırı yükselen sıcaklıklardan dolayı 13. frenlemede bırakılmıştır. Diskin iç yüzeyindeki koniklik miktarı 0,170 (12. frenlemede) ile -0,130 mm iken dış yüzeyindeki ise 0,450 (12. frenlemede) ile -0,050 mm düzeyinde gerçekleşmiştir.



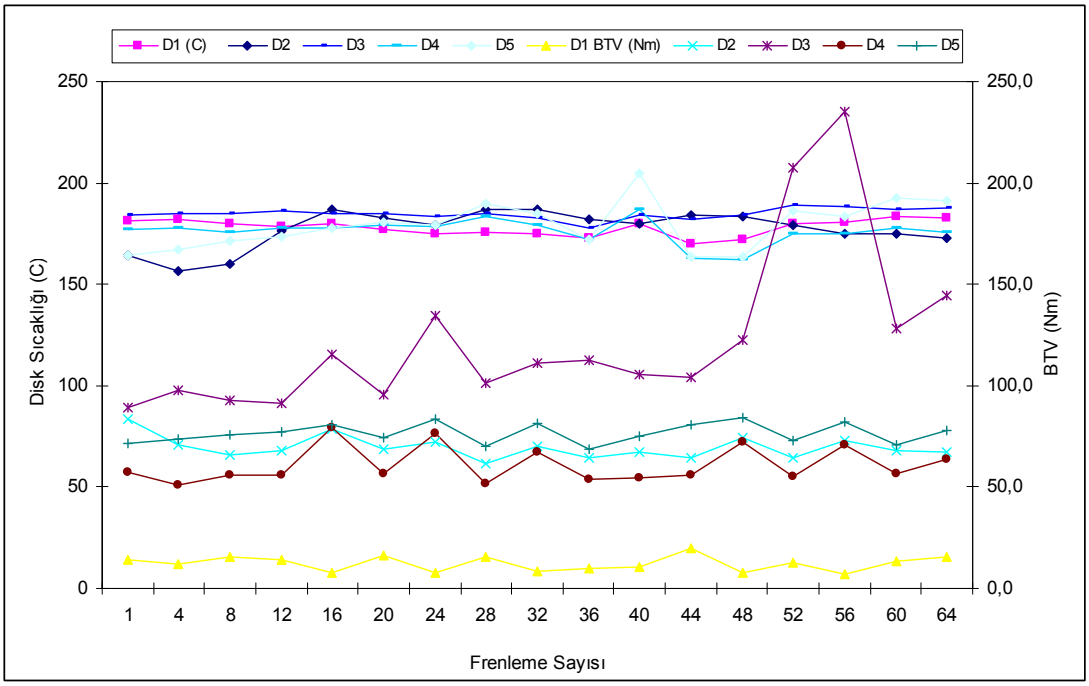
Şekil 5.41: D5 diskinin sıcaklıkla fren zayıflaması prosedürlerindeki koniklik değişimi

5.3 Fren Tork Değişimleri (BTV)

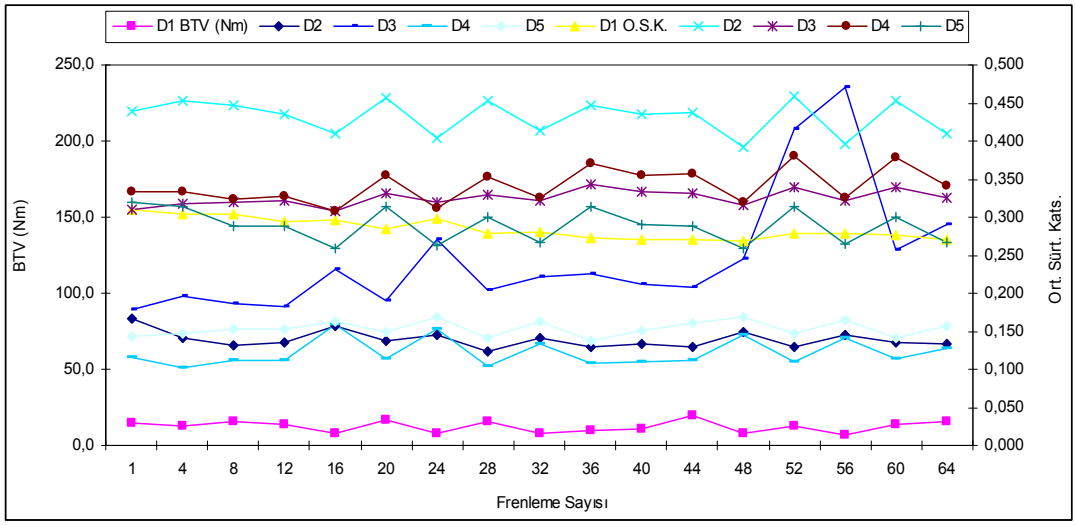
BTV değişimi; alışma (burnish), hız/basınç hassasiyeti ve kararlılık (recovery) test bölümlerinde incelendi.

5.3.1 Alışma (Burnish) test prosedüründe BTV incelemesi

Alışma test prosedüründe en düşük BTV değişimi orijinal diskte görüldü. Sonrasında sırasıyla D4, D5, D2 ve D3 disklerinde gelişti. Hem yüzey pürüzlülüğü hem de iç/dış kalınlık farkı en yüksek olan D3 diskinde 48. frenlemeden 60. frenlemeye kadar BTV' de ciddi bir sapma oldu. Bu durum hem SK'sinde pozitif bir sapma getirdi hem de sıcaklık değişmesinde de bir artışa sebep oldu. Şekil 5.42 incelendiğinde D4 diskinin genel olarak BTV'si, D1 diskinden büyük olmasına rağmen diskin son sıcaklığı açısından D1 diskinden daha iyi bir performans sağladı. Ayrıca Şekil 5.43'de görüldüğü gibi D1 diskinin balataları; D2, D3 ve D4 diskleri ile birlikte çalışan balatalara göre daha düşük SK değerleri sağladı ancak sürtünme kararlılığı açısından oldukça iyi bir performans gösterdi.



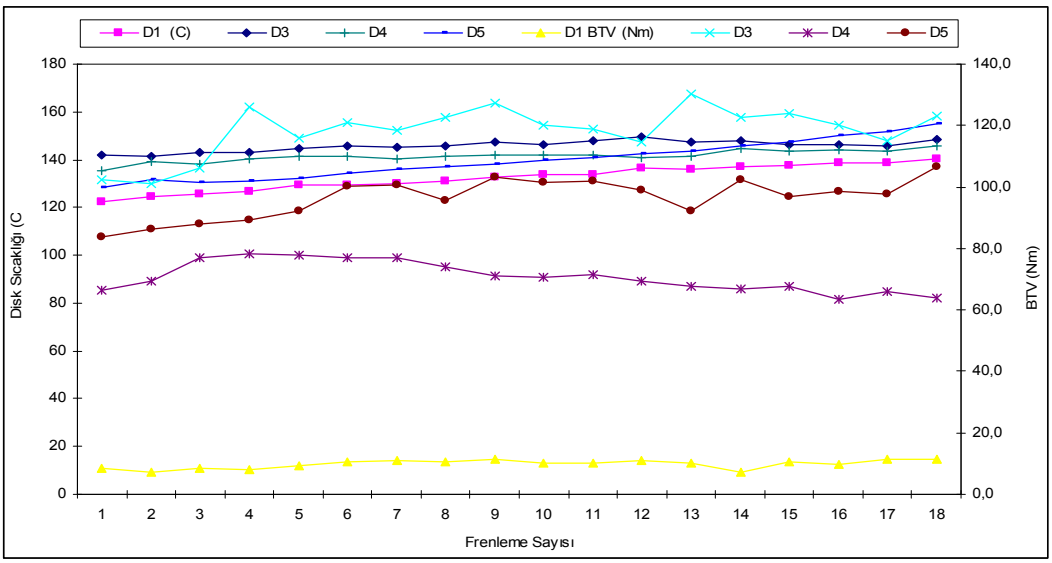
Şekil 5.42: Alışma (Burnish) test prosedüründe diskin son sıcaklığı ve BTV değişimi



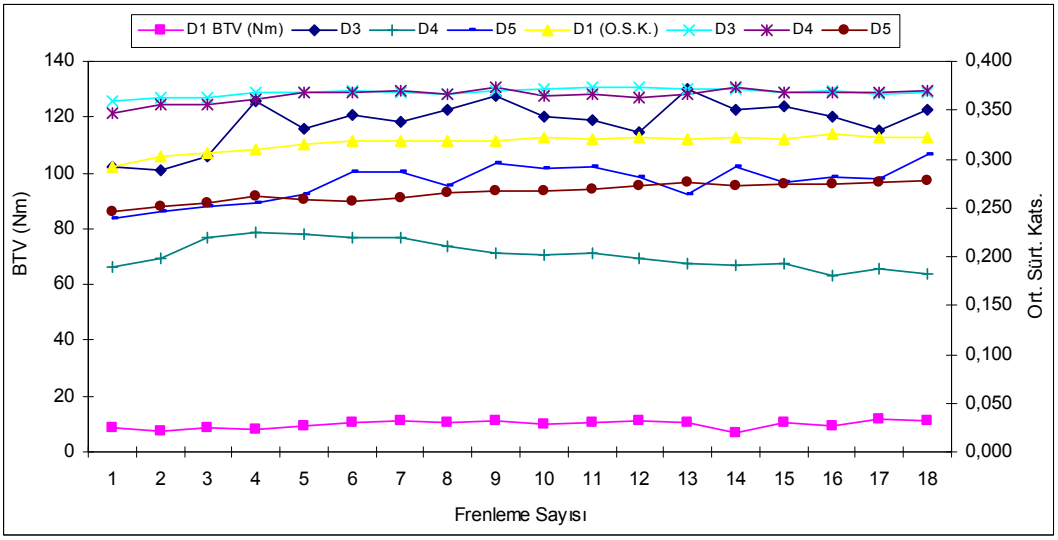
Şekil 5.43: Alışma test prosedüründe BTV'nin ort. sürtünme katsayısı (OSK) ile değişimi

5.3.2 Kararlılık (Recovery) test prosedüründe BTV incelemesi

D2 diskinin incelenmediği 14. test prosedürü olan kararlılık test prosedüründe BTV değişiminde yine en düşük değerleri D1 diski sağladı. Bu test prosedüründe Şekil 5.44'de görüldüğü gibi en yüksek çalışma sıcaklığını kararlı bir yükselişle D5 diski ve en büyük sapmayı da D3 diski gösterdi. Bu sapmalarda D3 diskinin yüzey pürüzlülüğü ve iç/dış kalınlık farkı etkili olmuştur. Ayrıca D3 disk-balata çiftinin SK değerlerinin büyük olması etkili olabilir. Aynı zamanda D3 diskinin çalışma sıcaklığı da yüksek düzeylerde kaldı. Bu prosedürde en büyük SK değerlerinin D3 ve D4 diskleri tarafından sağlandığı Şekil 5.45'de görülebilir.



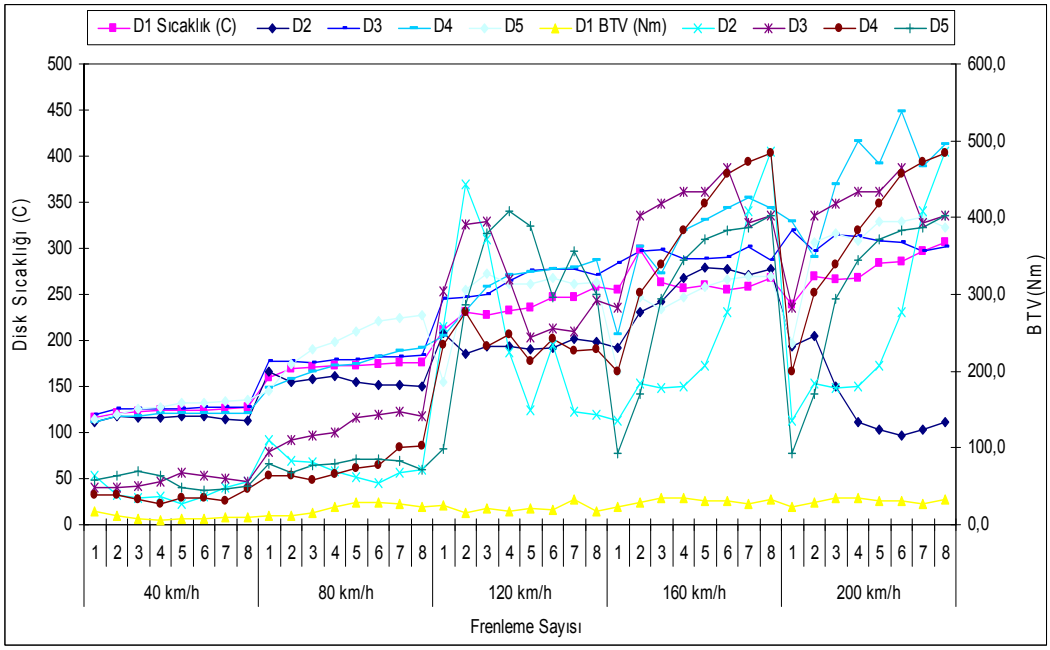
Şekil 5.44: Kararlılık testinde diskin sıcaklığı ve BTV değişimi



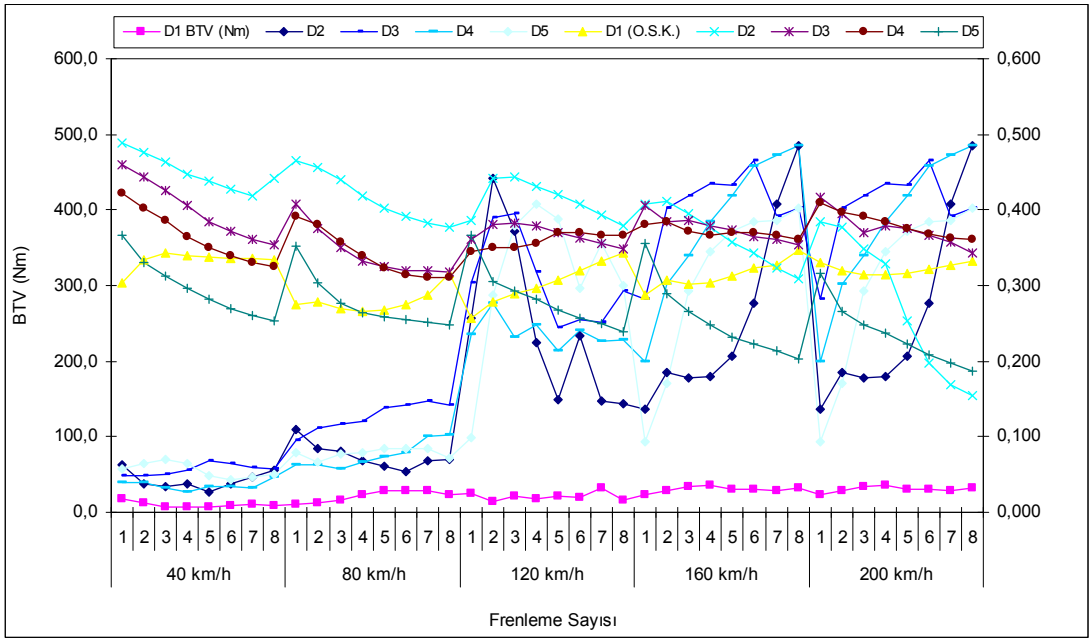
Şekil 5.45: Kararlılık testinde BTV'nin OSK ile değişimi

5.3.3 Hız/basınç hassasiyeti test prosedüründe BTV incelemesi

Şekil 5.46 ve 47'de görüldüğü gibi en düşük BTV değişimlerini D1 diski gösterdi. D2, D3, D4 ve D5 disklerindeki BTV oranları 80 km/h'in üstündeki hızlarda daha belirgin değişme gösterdi. Bu değişimlere genel olarak yükselen işletme sıcaklıkları, SK gelişimi, yüzey pürüzlülükleri ve üniform yapılı olmayan dönme geometrisi (salgı ve kalınlık değişimi) sebep olmuştur.



Şekil 5.46: Hız hassasiyeti prosedüründe BTV'nin diskin son sıcaklığına bağlı değişimi

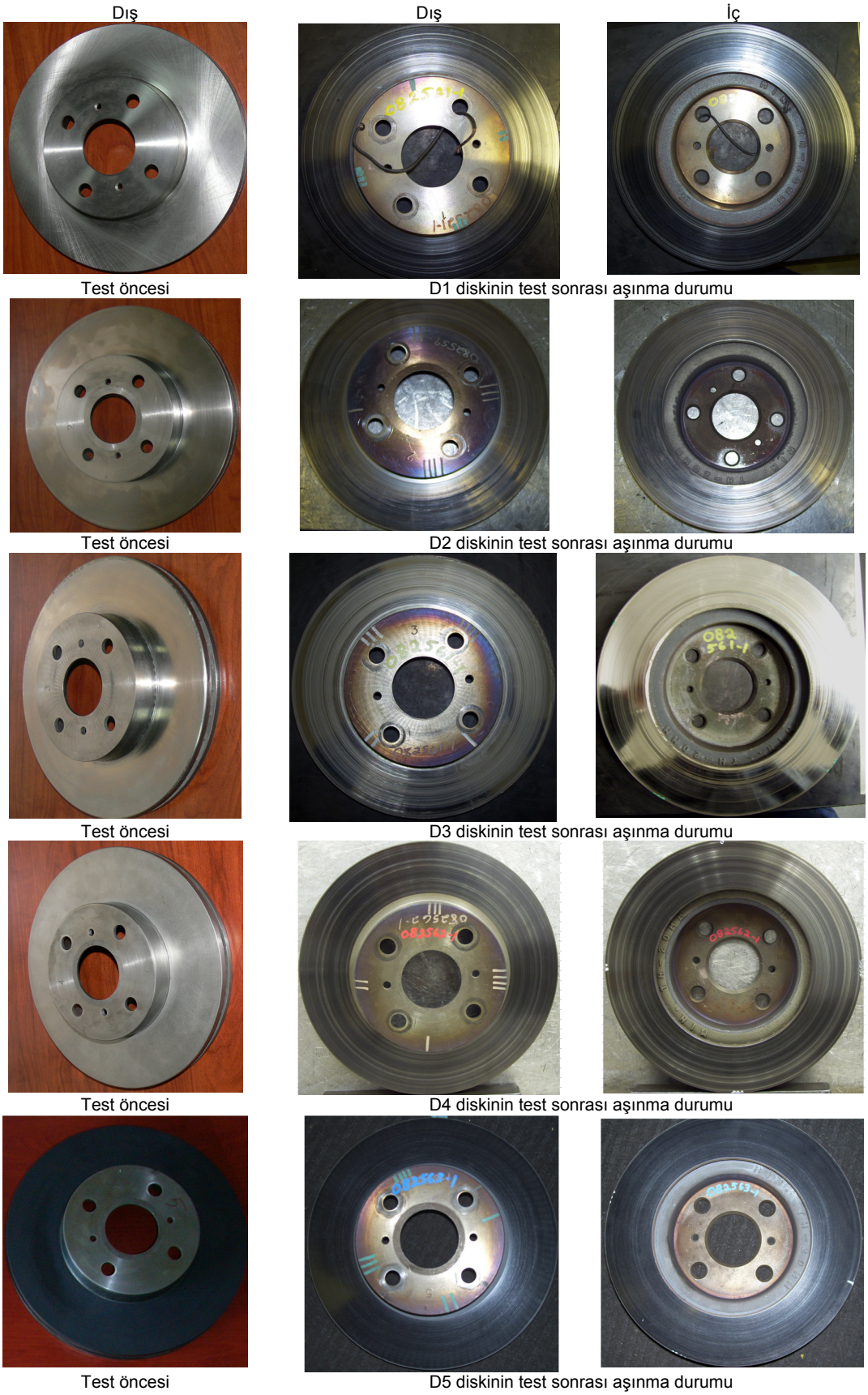


Şekil 5.47: Hız hassasiyeti bölümünde BTV'nin OSK'ye bağlı değişimi

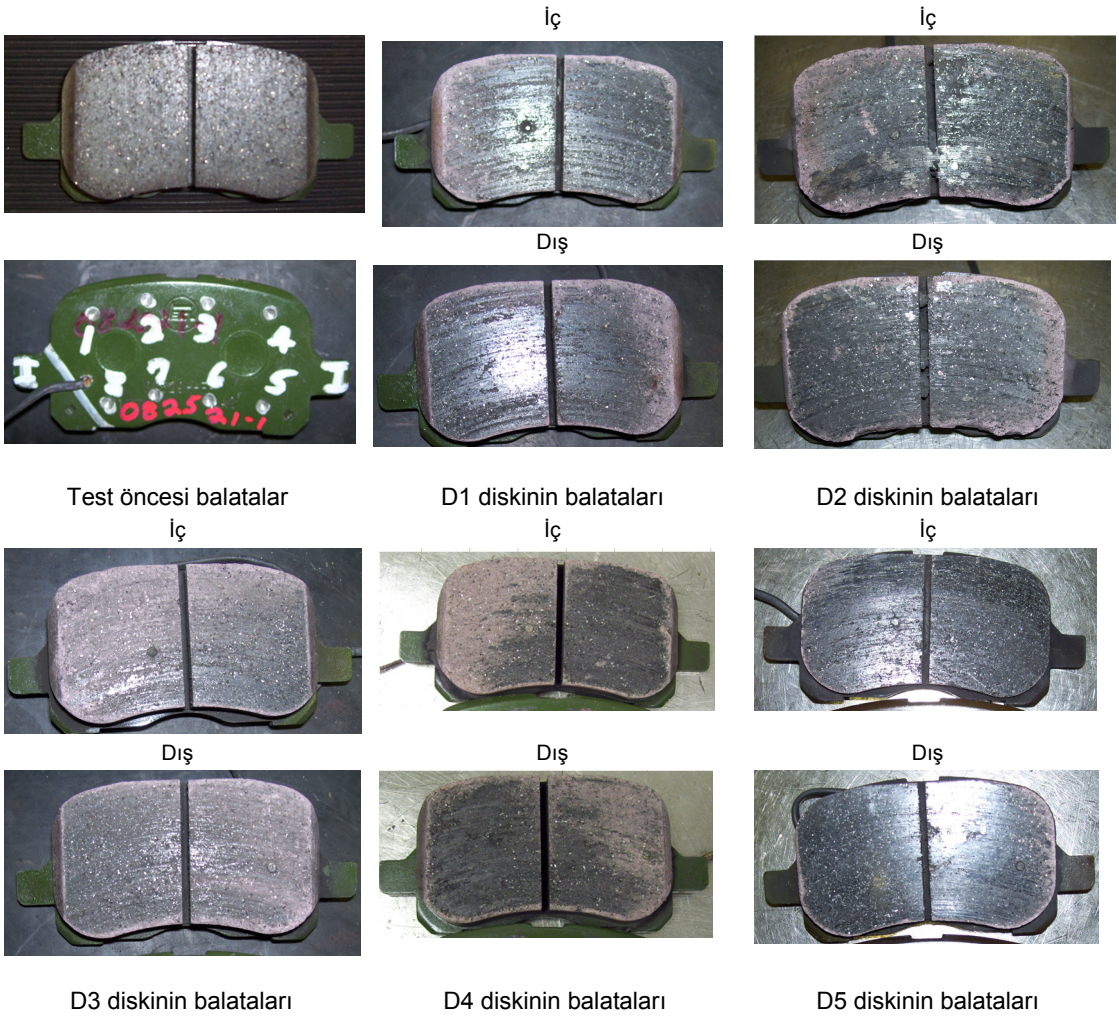
5.4 Aşınma Miktarlarının Tespiti

Aşınma miktarı, test öncesi ve sonrasında kalınlık ve kütle ölçümü ile tespit edilmiştir. Şekil 5.48'de disklerin ve Şekil 5.49'da ise testlerde kullanılan tüm balataların testler sonrası aşınma durumları gösterilmiştir.

D2 ve D3 disklerinin kaplanmasında kullanılan alevle püskürtme yöntemi, atmosferik ortamda uygulandığından dolayı oksitli bileşiklerin oluşması söz konusudur. Matriksin, oksitli bileşikler ve porozitelerin varlığından dolayı, aşınma mukavemeti bir miktar düşmüştür. D2 ve D3 disklerinin mikroyapı incelemelerinde iri karbürlü bileşiklerin oluştuğu görülmesine rağmen matriksle iyi ıslanma sağlanamadığından, nikelin karbür oluşturamadığı görülmüştür. Ayrıca yapılan frenleme testlerinde D2, D3 ve D4 disk-balata çiftleri genel durum itibariyle D1 disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirdiklerinden dolayı hem ilgili balatalarda hem de ilgili disklerde bir miktar daha fazla kütlesel kayıplar oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 5.48: Tüm disklerin test sonrası aşınma durumu



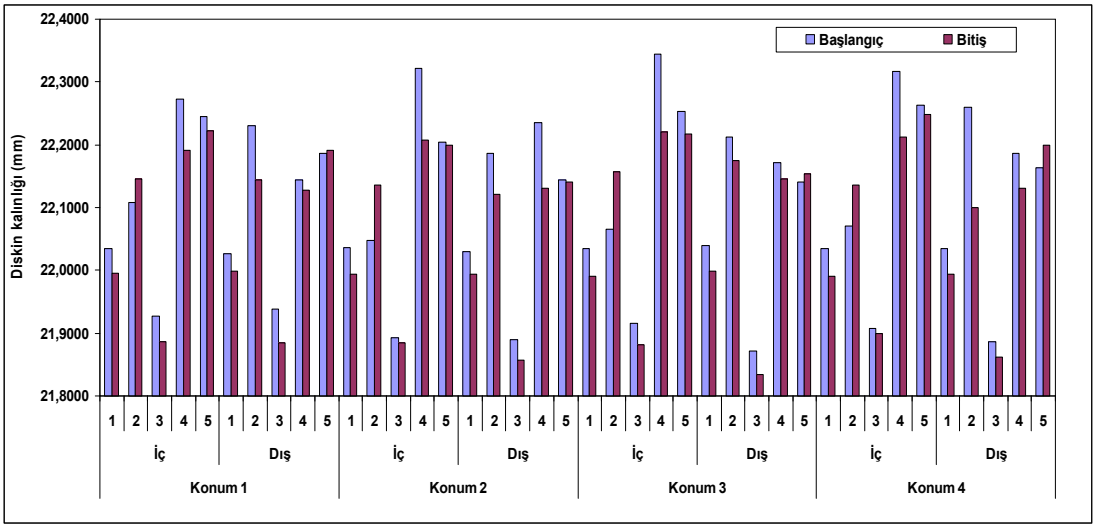
Şekil 5.49: Testler sonrası tüm balataların aşınma durumları

5.4.1 Disklerin boyutsal aşınma miktarı

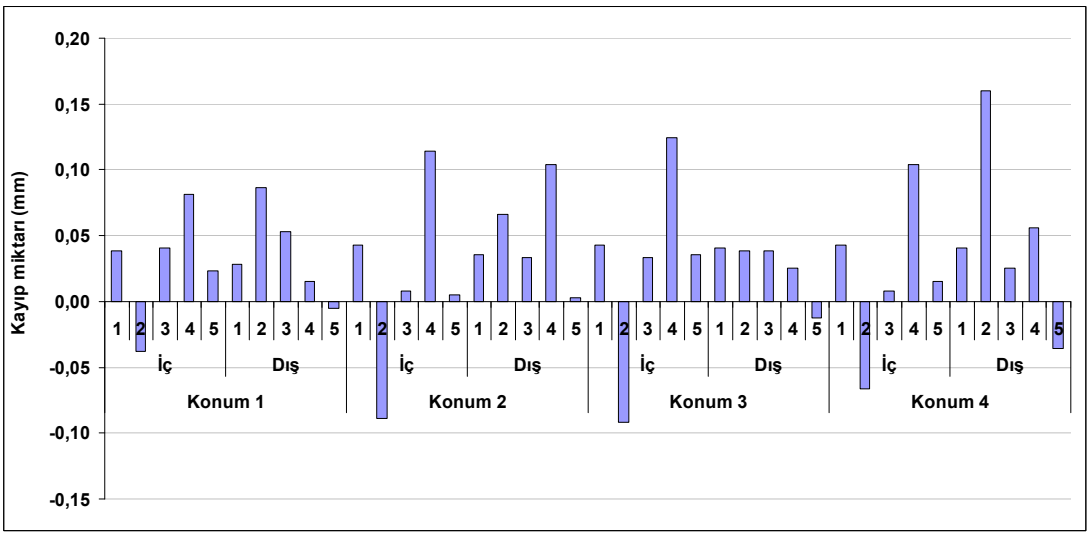
Test öncesi ve sonrasında disklerin kalınlık değişim miktarları (mm cinsinden), Şekil 5.50 ve 51'de gösterilmiştir. D2 (200 -170 km/h hız basınç hassasiyetine kadar), D3 ve D4 diskleri D1 diskinden daha fazla aşınma miktarı gösterdi. Yüksek işletme sıcaklığı, yüksek SK, poroziteler, oksitli bileşikler ve D1 diski kadar üniform olmayan dönme geometrisi bu sonuçlar üzerinde etkili oldu. Ancak tüm testler göz önüne alındığında D3 ve D4 disklerinin tercih edilebilir[18] sonuçlar ortaya çıkardığı söylenebilir. Şekilde görüldüğü gibi en az aşınma miktarını kütlesel olarak aşınma

[18] D3 ve D4 diskleri, D1 diski kadar üniform dönme geometrisine sahip değildir. Bununla birlikte dinamometre testlerinde genel olarak D3 ve D4 disk balata çifti, D1 disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirmiştir. Bu nedenlerden dolayı D3 ve D4 disklerinin aşınma limitleri, D1 diskinin aşınma miktarına yakın değerler sağladığından dolayı "tercih edilebilir" diye yorumlanmıştır.

göstermeyen D5 diski göstermiştir. Seramik kaplanmış D5 diskinde aşınma olmaması; düşük ısıl iletkenlik, büyük sertlik ve termal bariyer etkisinden dolayı düşük sürtünme katsayısından kaynaklanmıştır.



Şekil 5.50: Disklerin mm cinsinden aşınma miktarları



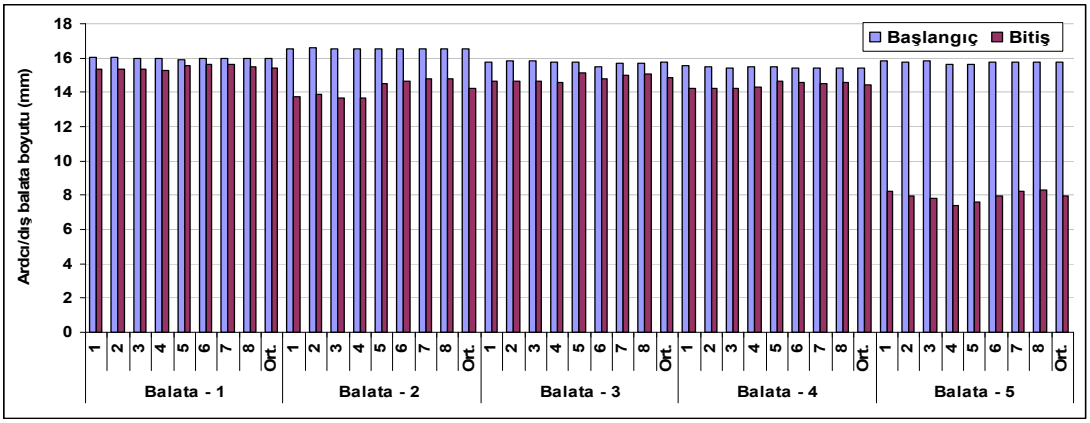
Şekil 5.51: Disklerin mm cinsinden kayıp miktarları

5.4.2 Balataların boyutsal aşınma miktarı

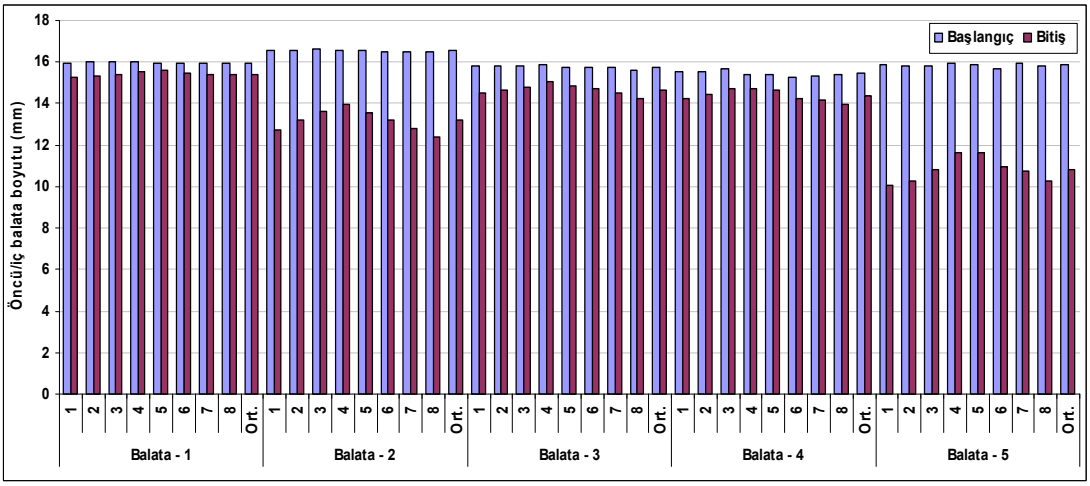
Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'de balataların öncü ve artçı[19] bölgelerindeki aşınma miktarları mm cinsinden gösterilmiştir. Boyutsal aşınma davranışında en iyi değerler

[19] Balatanın öncü kısmı, diskin balataya giriş yaptığı kısımdır. Artçı kısım ise diskin balatadan çıkış yaptığı kısmıdır.

sırasıyla D1, D4 ve D3 diskleri ile birlikte çalışan balatalar tarafından sağlandı. Genel olarak balatalardaki aşınma oranı diskin balataya giriş yaptığı kısımda gelişen devirme momenti[20] etkisinden dolayı daha büyük olarak gerçekleşti.



Şekil 5.52: Balataların mm cinsinden aşınma miktarları (artçı/dış)



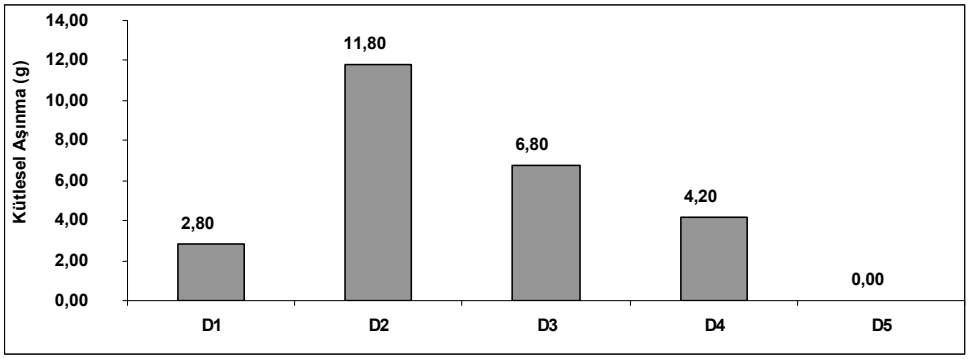
Şekil 5.53: Balataların mm cinsinden aşınma miktarları (öncü/iç)

5.4.3 Disklerin kütlesel aşınma miktarı

D5 diski, testleri aşınmayarak tamamladı. Şekil 5.54'de görüldüğü gibi bu diske en yakın değeri D1 diski gösterdi. D2 (200 – 170 km/h hız basınç hassasiyetine kadar), D3 ve D4 diskleri D1 diskinden daha fazla aşınma miktarı gösterdi. Yüksek işletme sıcaklığı, yüksek SK, poroziteler, oksitli bileşikler ve D1 diski kadar üniform olmayan

[20] Devirme momenti: Disk balata yüzeyleri arasında etkileşime önce giren bölgede (öncü bölge) balatayı diske doğru bastıran ilave bir kuvvet oluştururken, etkileşimin sona erdiği artçı bölgede balatayı diskten uzaklaştırma yönünde etki yapmaktadır. Bu nedenle öncü bölgede değme basıncı artarken artçı bölgede azalmaktadır [84].

dönme geometrisi bu sonuçlar üzerinde etkili oldu. Ancak tüm testlerde kütlesel aşınma miktarı bakımından D3 (Metco 18C) ile D4 (Cr_3C_2-NiCr) disk-balata çiftleri, D1 diskten biraz daha fazla aşınmıştır. Ancak D1 diskine nazaran frenleme performansları[21] daha iyi olduğundan tercih edilebilir. D2 (Metco 19E) ve D3 (Metco 18C) disklerinin kaplanmasında kullanılan alevle püskürtme yöntemi, atmosferik ortamda uygulandığından dolayı oksitli bileşiklerin oluşması söz konusudur. Matriksin, oksitli bileşikler ve porozitelerin varlığından dolayı, aşınma mukavemeti bir miktar düşmüştür.



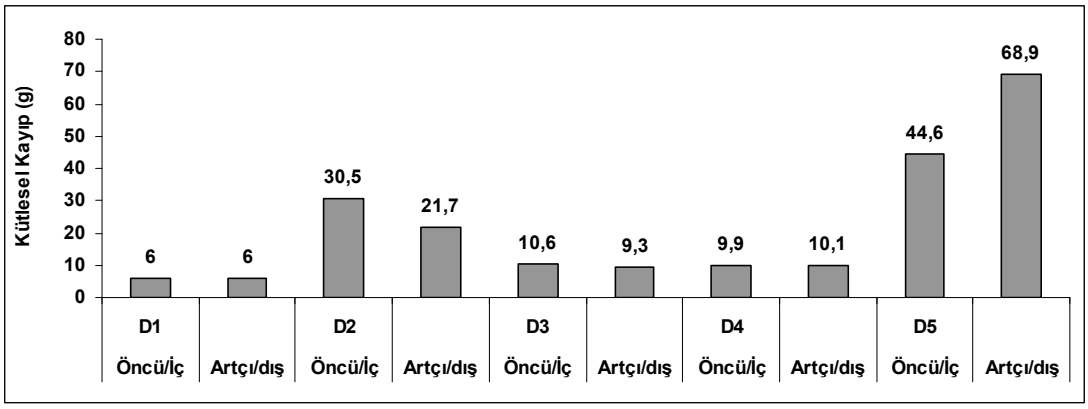
Şekil 5.54: Disklerin kütlesel aşınma miktarları

5.4.4 Balataların kütlesel aşınma miktarı

Şekil 5.55'de görüldüğü gibi balataların kütlesel aşınma davranışı açısından D1 diski ile birlikte çalışan balata çifti en az aşınma değeri gösterdi. Bunun nedenleri olarak; D2, D3 ve D4 disk-balata çiftlerine göre daha düşük SK değerleri, D1 diskinin daha düşük sertliğe ve grafitin sürtünmede yağlayıcılık özelliğine sahip olması gösterilebilir. En fazla aşınma miktarı ise, sertliğinden ve termal bariyer etkisinden dolayı daha yüksek çalışma sıcaklıklarında servis sağlayan D5 diski ile birlikte çalışan balatalarda görüldü. D2 diskinin balata çifti ise Ni esaslı kaplamanın sertlik derecesinin çok yüksek olmasının da etkisiyle oldukça fazla aşınmaya maruz kaldı. D2 ve D5 disklerine göre, D3 ve D4 diskleri ile çalışan balatalar kabul edilebilir bir aşınma[22] gösterdi. Genel olarak iç balatalardaki aşınma oranı diskin balataya giriş yaptığı kısımda daha büyük olarak gerçekleşti.

[21] Dinamometre testlerinde genel olarak D3 ve D4 disk balata çifti, D1 disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirmiştir. Sürtünme katsayısındaki artış, durma mesafesini kısaltacağından D3 ve D4 disk-balata çiftleri D1 diskinden daha iyi frenleme performansı sağlamıştır.

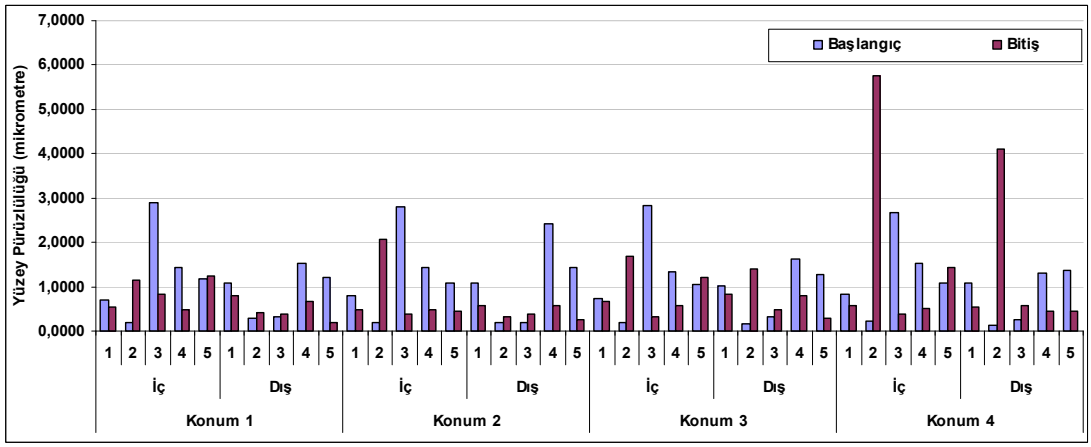
[22] D1 disk-balata sürtünme çifti, hem disk hem de balata özellikleri dikkate alınarak imal edilmiştir. Kaplanmış olan tüm disklerde (D2, D3, D4 ve D5), balatalar test edilip denenerek bir seçim yapılmamıştır. Ayrıca dinamometre testlerinde genel olarak D3 ve D4 disk balata çifti, D1 disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirmiştir. D3 ve D4 diski ile eş çalışan balatalardaki aşınma limitleri, orijinal diskin balatalarındaki aşınma miktarına yakın değerler sağladığından dolayı "kabul edilebilir" diye yorumlanmıştır.



Şekil 5.55: Balataların kütlesel aşınma miktarları

5.4.5 Yüzey pürüzlülük ölçümü

Genellikle yeni disklerin ortalama pürüzlülük değerleri[23] 1,125 ile 1,5 μm arasında olabilmektedir [73]. Şekil 5.56 incelendiğinde dinamometre testi öncesi D3 diskinin iç yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık 2,8 μm ve dış pürüzlülük değerleri ortalaması ise 0,27 μm olarak ölçüldü. D3 diskinin dış pürüzlülük değerleri, D1 diskinden daha küçüktür. D1 diskinin pürüzlülük değerleri iç yüzeyi ortalama 0,75 ve dış yüzeyi ise 1,06 μm olarak ölçüldü. Testler sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinde D2 diskinde ekstrem miktarda sapmalar olduğu şekilde görülmektedir. Bu duruma D2 (Metco 19E) diskinin kaplamasında yaklaşık % 64 oranında bulunan ve sürtünme katsayısı yüksek olan Ni tozu neden olmuştur.

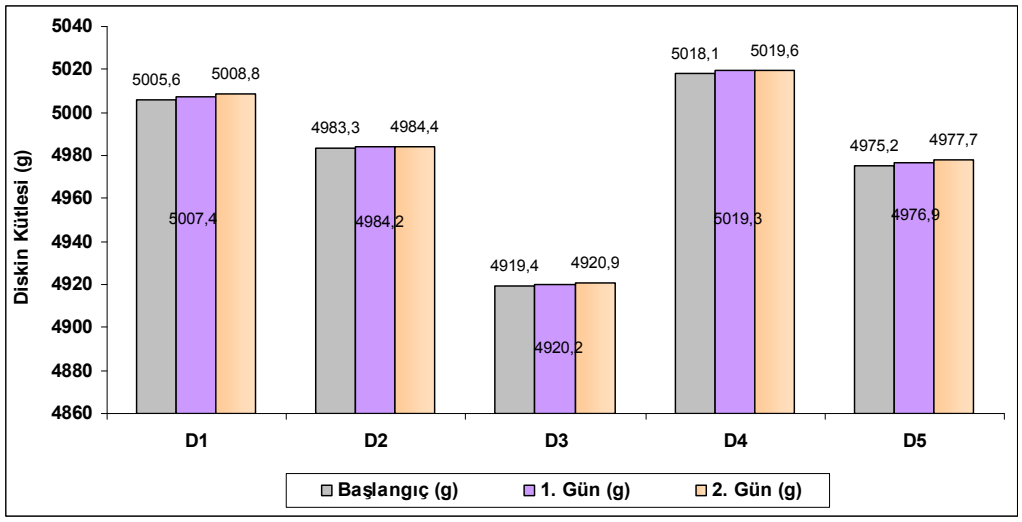


Şekil 5.56: Surfometre ile disklerin 4 konumundan ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri

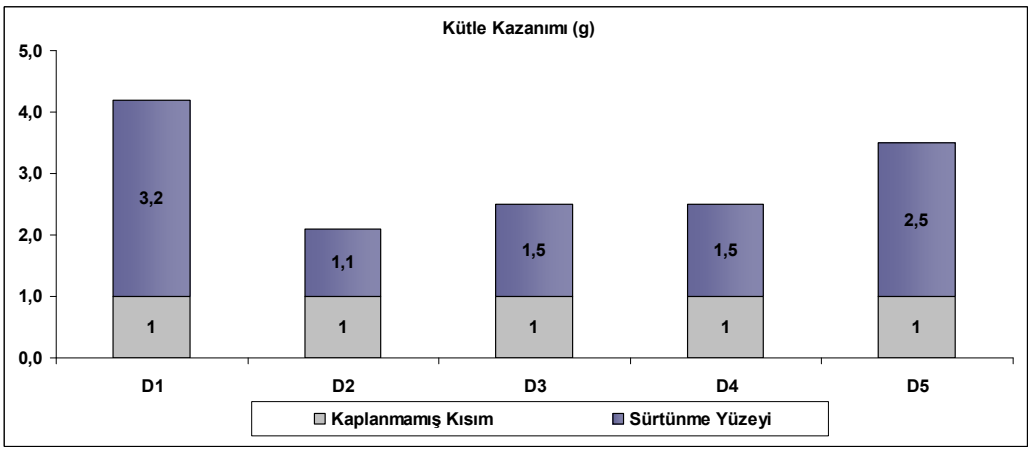
[23] Çoğu yeni diskin yüzey pürüzlülük değeri 1,125 ile 1,5 μm arasında olabilmektedir [73]. Bijwe ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Suzuki Maruti Esteem otomobilin fren diskinin ortalama pürüzlülük değeri 3,38 μm olarak ölçülmüştür [85].

5.5 Korozyon Testinin Değerlendirilmesi

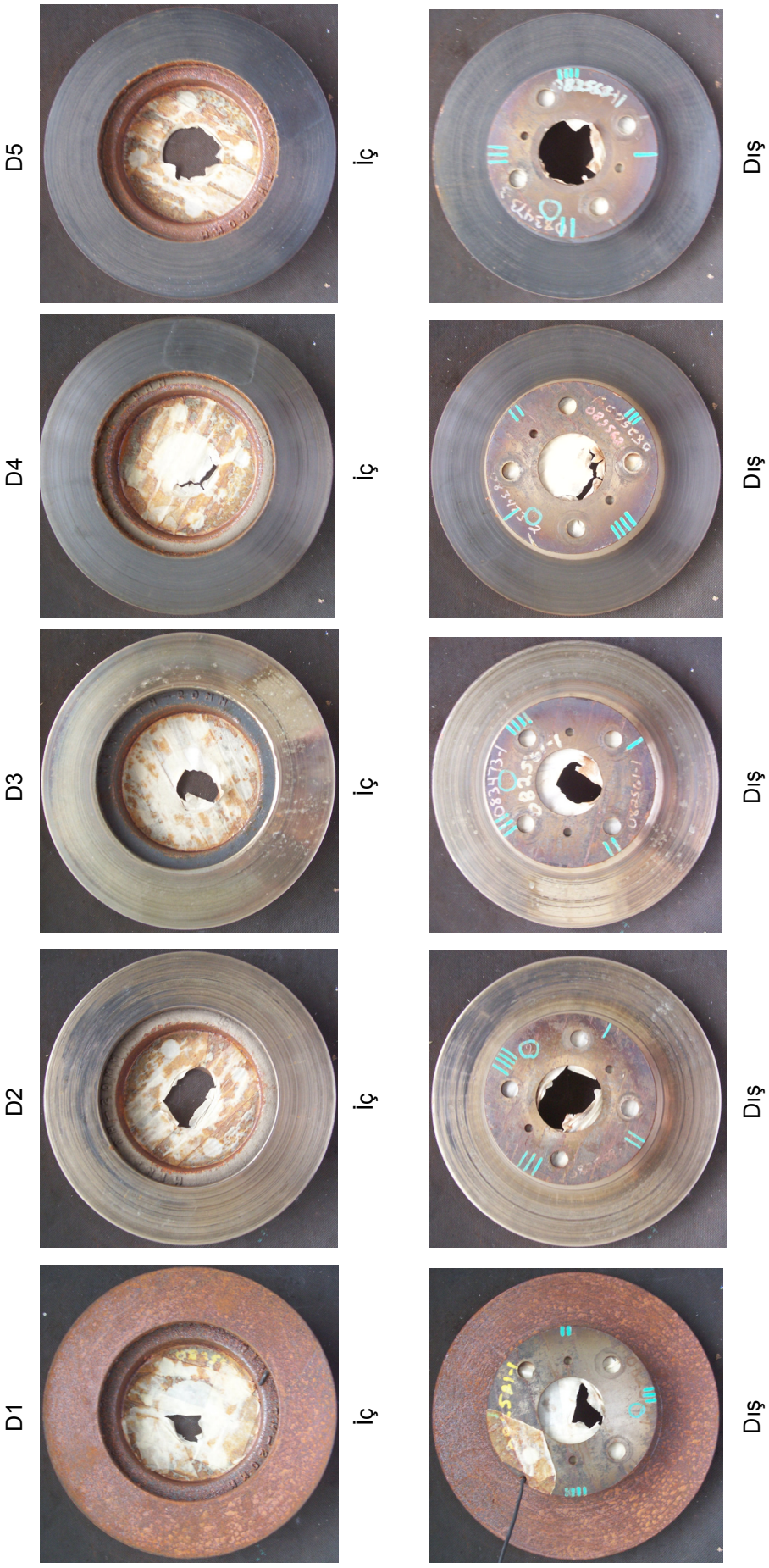
Hızlandırılmış SAE J2334 korozyon testi, her bir diske iki tam gün uygulanmıştır. Test sonucunda disklerin kütle değişimleri Şekil 5.57 ve Şekil 5.58'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi D1 diski diğer disklerden oldukça fazla korozyona maruz kalmıştır. Kaplamalı disklerdeki korozyonla kütle artışına ağırlıklı olarak kaplanmamış bölgelerdeki korozyonun neden olduğu Şekil 5.59'da görülebilir. Korozyon testi ile kaplanmış bölgelerdeki kütle artışına bir yaklaşım sunması açısından Şekil 5.58'de gösterilen grafikte, diskin kaplanmamış kısmının kütle kazanımı tüm disklerde 1 gram kabul edildiğinde kaplamaların korozyonla kütle artışı hakkında daha belirgin bir değerlendirme yapılabilir. Disklerin sürtünme yüzeylerinde korozyon miktarı, diskin yanal çarpıklık nedenlerinden biridir [86].



Şekil 5.57: SAE J2334 korozyon testi sonucunda disklerdeki kütle değişimi



Şekil 5.58: SAE J2334 korozyon testi sonucunda disklerdeki kütle artış miktarı



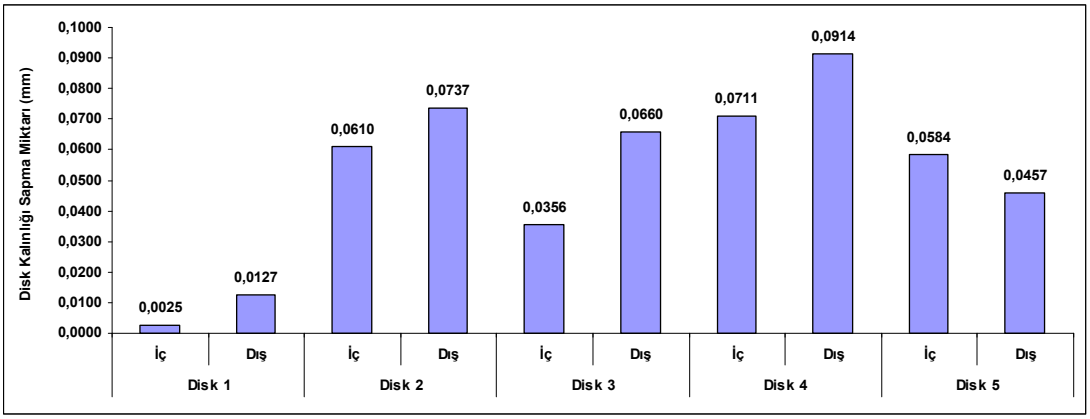
Şekil 5.59: SAE J2334 korozyon testi sonucunda disklerdeki korozyon durumu

5.6 Hata Analizi

Hata analizinde; disk kalınlıklarındaki ve salgılardaki farklılıklar dikkate alınarak bir analiz yapılmış ve disk kalınlık değişiminin tork değişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca test öncesi ve sonrasında disklerin tartılmasında kullanılan tartı cihazının hassasiyeti göz önüne alınarak bulunan değerlerdeki ölçüm hataları da tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak atalet dinamometresinde yapılan testlerde kullanılan bazı prop ve sensörlerin lineerlik, hassasiyet, belirsizlik ve tekrarlanabilirlik miktarları da verilmiştir.

5.6.1 Disk kalınlıklarındaki sapmalar

D1 ve kaplanmış disklerin kalınlık değişimleri, dinamometre testinden önce hem diskin iç hem de dış kısmından 90'ar derecelik dört ölçümle ölçülerek tespit edilmiştir. Bu ölçümlerdeki değerler Şekil 5.60'da görüldüğü gibi en küçük sapma D1 diskinde iken, en büyük sapma ise D4 diskinin dış kısmında tespit edilmiştir.



Şekil 5.60: Diskin iç ve dış kısmındaki sapma miktarları

5.6.1.1 Disk kalınlıklarındaki sapmaların BTV' ye etkisi

Disk kalınlıklarındaki sapmaların fren torklarında oluşturduğu değişimler hem hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) hem de birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründe incelenmiştir. Tork değişimleri değişken uygulama basınçlarında gerçekleştirilen hız/basınç hassasiyeti testinin beşinci frenlemesindeki 500 tork verisinden incelenmiştir. Sabit 0,4g frenleme ivmesinde gerçekleştirilen sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedüründeki tork değişimleri ise, testin onuncu

frenlemesindeki 1000 tork verisinden hareketle yapılmıştır. Bu incelemelerde frenleme esnasında fren torku değişimine yönelik olarak belli bir zaman aralığında diskin bir tam devrindeki ölçüm sayısı hesaplanmıştır. Tablo 5.2'de bu hesaplamalar ile ölçümlerin yapıldığı test prosedürleri ve Tablo 5.3 ile 5.4'de ise bu test prosedürlerine göre gerçekleştirilen teslerden alınan ölçümler ve yapılan hesaplamalar verilmiştir. 160 km/h'ten 130 km/h'e yavaşlamada hız/basınç hassasiyeti test prosedüründe ölçülen BTV değişimlerinde anlık hız değişimleri bilinmediğinden bu kısımda ancak toplam ölçüm ve ortalama ivme üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. 0,4g sabit frenleme ivmesinde gerçekleştirilen birinci sıcaklıkla fren zayıflaması testindeki hesaplamalar belli bir zaman aralığındaki sabit ölçüm sayısından hareketle hesaplanmıştır.

Tablo 5.2: Disk kalınlık değişiminin BTV'ye etkisinin incelendiği testi prosedürleri

Bölüm	**Durma ya da yavaşlama sayısı**	**Frenleme ve bırakma hızı (km/h)**	**Fren uygulaması kontrolü**	**Başlangıç fren sıcaklığı (^{o}C)**
Hız/Basınç hassasiyeti	8	160-130	10,20,….80 bar	100
Sıcaklıkla fren zayıflaması-I	15	100-<5	0,4g	100-500

Tablo 5.3: Hız/basınç hassasiyeti (160-130 km/h) test prosedürünün beşinci frenlemesinde diskin bir devrindeki ölçüm sayısı

	Sembol	Birim	Değer				
			D1	D2	D3	D4	D5
Yavaşlama	-	-	5	5	5	5	5
Başlangıç zamanı	t_i	s	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Bitiş zamanı	t_s	s	2,48	2,79	2,040	2,030	2,48
Toplam ölçüm sayısı	Z_t	-	500	500	500	500	500
Frenleme başlangıç hızı	ν_i	m/s	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4
Frenleme bitiş hızı	ν_s	m/s	36,11	36,11	36,11	36,11	36,11
Ortalama ivme*	a_{ort}	m/s^2	3,98	3,46	5,05	5,11	2,69
Alınan toplam yol**	s_{top}	m	83,76	96,24	66,02	65,60	106,68
Bir devirdeki ölçüm sayısı***	z_1	-	11,16	9,71	14,16	14,26	8,76
Lastiğin çapı	d	m	0,596	0,596	0,596	0,596	0,596
Lastiğin yuvarlanma çevresi	u	m	1,872	1,872	1,872	1,872	1,872
Örnek hesaplamalar D4 diski için yapılmıştır.	*$a_{ort} = (\nu_i-\nu_s)/(t_i-t_s) = (44,4-36,11)/(2,03-0,4) = 5,11\ m/s^2$						
	**$s_{top} = \nu_i.t - (1/2.a.t^2) = 44,4x1,63-(1/2x5,11x1,63^2) = 65,60$ m						
***Bir devirdeki ölçüm sayısı= (Toplam ölçüm sayısı x Lastik Çapı)/Alınan Yol= (500x1,8724)/65,60= 14,26 ölçüm							

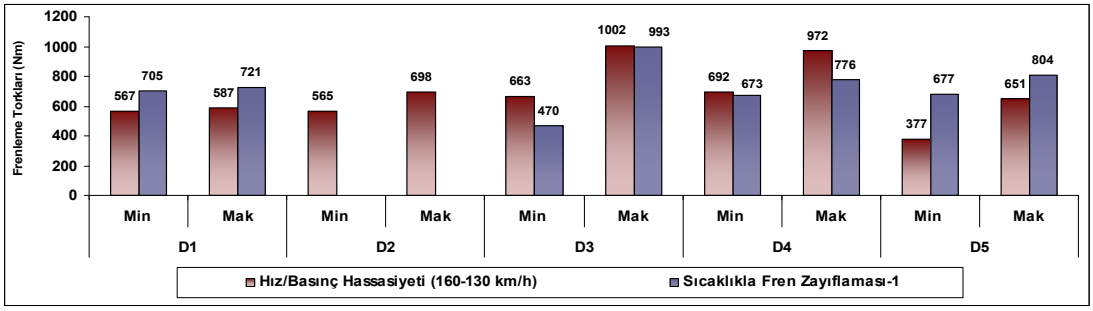
Tablo 5.4: Birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürünün onuncu frenlemesinde diskin bir devrindeki hesaplamalar

	Sembol	Birim	Değer				
			D1	D2	D3	D4	D5
Yavaşlama	-	-	10	-	10	10	10
Başlangıç zamanı	t_i	s	0,151	-	0,161	0,154	0,156
Bitiş zamanı	t_s	s	0,502	-	0,576	0,559	0,603
Fark Zaman	Δt	s	0,37	-	0,41	0,405	0,440
Toplam ölçüm sayısı	Z_{top}	s	50	-	50	50	50
Frenleme başlangıç hızı	ν_i	m/s	27,5	-	27,5	27,5	27,5
Frenleme bitiş hızı	ν_s	m/s	26,66	-	26,11	26,38	26,38
Ortalama ivme	a_{ort}	m/s^2	0,4g = 3,92				
Alınan toplam yol*	s_{top}	m	9,91	-	10,96	10,81	11,73
Bir devirdeki ölçüm sayısı**	z_1	-	9,43	-	8,53	8,64	7,97
1 devir seçimindeki zaman aralığı		s	0,151-0,212	-	0,161-0,229	0,154-0,220	0,156-0,220
*$s_{top} = \nu_i.t - (1/2.a.t^2) = 27,5x0,405-(1/2x3,92x0,405^2) = 10,81$ m (Bu hesaplama D4 diski için yapılmıştır)							
**Bir devirdeki ölçüm sayısı= (Toplam ölçüm sayısı x Lastik çapı)/Alınan yol= (50x1,8724)/10,81= 8,64 ölçüm							

Tablo 5.5 ve Şekil 5.61 incelendiğinde disk kalınlıklarındaki sapmaların ve salgıların genel olarak frenleme torkunu değiştirdiği görülmüştür. Örneğin D3 diskinin iç ve dış sapma oranı yaklaşık %85 iken; aynı diskin hız/basınç hassasiyetinin beşinci frenlemesindeki tork değişimi %51 ve birinci sıcaklıkla fren zayıflaması testinin onuncu frenlemesinde ise %111'lik bir oranda değişim göstermiştir. Aynı durum iç ve dış sapma oranı yaklaşık %28 olan D4 diski için incelendiğinde; aynı diskin hız/basınç hassasiyetinin beşinci frenlemesindeki tork değişimi %40 ve birinci sıcaklıkla fren zayıflaması testinin onuncu frenlemesinde ise %15'lik bir oranda değişim göstermiştir.

Tablo 5.5: Disk kalınlık değişiminin fren tork değişimine etkisi

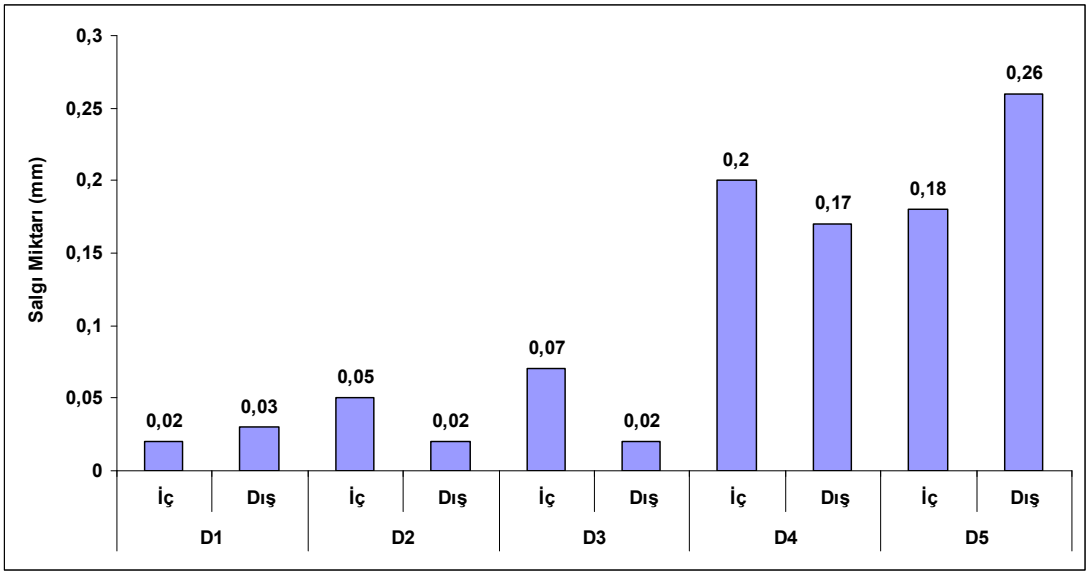
	D1		**D2**		**D3**		**D4**		**D5**	
	İç	**Dış**	**İç**	**Dış**	**İç**	**Dış**	**İç**	**Dış**	**İç**	**Dış**
Sapma Miktarları (mm)	0,0025	0,0127	0,0610	0,0737	0,0356	0,0660	0,0711	0,0914	0,0584	0,0457
Salgı Miktarı (mm)	0,02	0,03	0,05	0,02	0,07	0,02	0,2	0,17	0,18	0,26
Frenleme Torkları (Nm)										
	Min	**Mak**	**Min**	**Mak**	**Min**	**Mak**	**Min**	**Mak**	**Min**	**Mak**
Hız/Basınç Hassasiyeti (160-130 km/h)	567	587	565	698	663	1002	692	972	377	651
Sıcaklıkla Fren Zayıflaması-I	705	721	-	-	470	993	673	776	677	804



Şekil 5.61: Fren tork değişiminin incelenmesi

5.6.2 Disklerin salgılarındaki sapmalar

Tüm disklerin iç ve dış yanal salgılarındaki değişim miktarları Şekil 5.62'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en büyük salgının D5 diskinde olduğu görülmektedir. Ancak iç-dış salgı değişiminde en büyük sapmayı ise D3 diski ile D2 diski göstermiştir.



Şekil 5.62: Disklerdeki yanal salgılardaki sapmalar

5.6.3 Aşınma ölçümünde hata analizi

Tablo 5.6'da görüldüğü gibi disklerdeki aşınma miktarları minimum 2,8 gram ve maksimum 11,8 gramdır. Bu değerleri 0,1 gram tartı cihazı hassasiyeti göz önüne alındığında minimum değerde 0,035'lik (%3,5) ve maksimum değerde 0,0084'lük (%0,84) bir ölçüm hatası olduğu ifade edilebilir.

Tablo 5.6: Tartı cihazı hassasiyetinden kaynaklanan ölçüm hatası

	D1	D2	D3	D4	D5
Başlangıç	5002,1	4990,2	4922,7	5016,7	4969,9
Bitiş	4999,3	4978,4	4915,9	5012,5	4969,9
Kütlesel Kayıp	2,80	11,80	6,80	4,20	0,00
Ölçüm hatası*	0,0357	0,0084	0,0147	0,0238	
*Tartı cihazının ölçüm hassasiyeti 0,1 gram olduğundan D1 diskindeki ölçüm hatasını hesaplarken tartı hassasiyeti kütlesel kayba bölünür (0,1/2,8 = 0,0357).					

5.6.4 Testlerdeki lineerlik, tekrarlanabilirlik, hassasiyet ve belirsizlik oranları

Dinamometrede yapılan ölçümlerde; basınç, açısal hız, sıcaklık, tork, akışkan hacmi gibi sensörlerden ve kapasitif proplardan toplanan verilerdeki lineerlik, tekrarlanabilirlik, hassasiyet ve belirsizlik oranları Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Tablo 5.7: Ölçümlerde lineerlik, tekrarlanabilirlik, hassasiyet ve belirsizlik oranları

Tanımlamalar	**Üretici**	**Lineerlik (±% TÖ)**	**Tekrarlanabilirlik (±% TÖ)**	**Hassasiyet faktörü**	**Genişletilmiş belirsizlik oranı (±% TÖ)**
Basınç	Sensotec	-	-	1	%0,31
Açısal hız	SICK STEGMANN	-	-	0,0016667	%0,29
Sıcaklık	Link Engineering Co.	-	-	1	%0,54
Tork	Siebe Lebow	%0,100	0,0005	1	%0,34
Aşınma	Mitutoyo	%0,100		1	%0,34
Akışkan hacmi	Balluff	%0,020	%0,002	1	%0,30
Kapasitif prob	Capacitec	%0,200	%0,010	1	%0,24
Not: "TÖ" ifadesi tam ölçeği ifade eder.					

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Özellikle yüklü taşıtların sürekli frenlemelerinde ve yüksek hızlı seyir esnasında yapılan ani frenlemelerde disk ve balata yüzeylerinde oluşan termik gerilmeleri azaltmak ve yüksek sıcaklıklardan dolayı oluşan fren zayıflamasının önüne geçmek gerekmektedir. Bu çalışmada diskler üzerine çeşitli kaplama yöntemleriyle uygulanan kaplamaların; aşınma, korozyon direnci, sıcaklık ile sürtünme katsayısına bağlı frenleme performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla dört adet 2001 model Toyota Corolla'nın orijinal ön fren diskleri 3 farklı yöntemle; metalik, sermet ve seramiklerle kaplandı. Birinci disk 1 mm kalınlığında alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak Metco 19E metalik tozla (D2), ikinci disk 1 mm kalınlığında alevle püskürtme ve ergitme yöntemi kullanılarak Metco 18C metalik tozla (D3), üçüncü disk HVOF yöntemi kullanılarak 50 mikron kalınlığında NiCr arabağlayıcı üzerine yaklaşık 300 mikron kalınlığında %75 Cr_3C_2 - %25 NiCr (D4) ve dördüncü disk plazma sprey yöntemi ile 30 mikron kalınlığında NiCr arabağlayıcı üzerine yaklaşık 550 mikron kalınlığında %87 Al_2O_3 - %13 TiO_2 (D5) ile kaplandı. Daha sonra disklerden alınan numunelerin enine kesitinden ve yüzeyinden standart metalografik tekniklerle numuneler oluşturuldu. Taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) mikroyapıları incelenerek mikrografları alındı. SEM üzerindeki enerji dispersif spektrometre (EDS) ünitesiyle de noktasal analizler yapıldı.

Kaplanan dört adet disk ile orijinal (OEM) disk ön ölçüm işlemlerinden geçirildi ve Link Engineering Company Laboratuarında (Detroit, USA) SAE J2522 test standardına göre fren test dinamometresinde genel fren etkinlik testine tabii tutuldu. Yapılan testlerde; toplam 11 farklı parametrede, 21 farklı test koşulunda, 10 ile 158 bar arasında değişen uygulama basınçlarında, (0,4-0,6)g arasındaki frenleme ivmelerinde, 200 km/h'ten 5 km/h'e kadar değişen hızlarda gerçekleştirilen 276 frenlemeden ölçümler alındı. Bu ölçümlerde; frenleme sayısı, çevrim zamanı, frenleme başlangıç hızı, frenleme bitiş hızı, frenleme süresi, frenleme ivmesi (dekselerasyon), tork (min, ort, mak), basınç (min, ort, mak), sürtünme katsayısı (min, ort, mak), diskin ilk ve son sıcaklığı, iç ve dış balataların ilk ve son sıcaklığı gibi parametre değerleri kaydedildi. Bu parametrelere ek olarak bazı test bölümlerinde

ise koniklik, frenleme tork değişimleri (BTV) ve disk kalınlık değişimleri (DTV) de ölçülmüştür. Her bir diskin toplam test süresi yaklaşık 41.400 saniye (11,5 saat) tutmuştur. Bu sürenin ortalama 39.600 saniyesi (11 saat) diskin rejim haline getirilmesi için harcanmıştır. Geri kalan ortalama 1770 saniyesi (29,5 dakika) de etkin frenleme testine harcanmıştır. Ayrıca testler başlamadan önce ve testler tamamlandıktan sonra disk ve balataların aşınma oranları hem boyutsal (mm) hem de kütlesel (g) olarak ölçülmüştür. Tüm dinamometre testleri tamamlandıktan sonra hızlandırılmış SAE J2334 korozyon testine göre tüm diskler korozyon testine alınmıştır.

Tüm bu incelemelerde Metco 19E metalik tozla kaplanmış disk ve balata çifti; ön alışma (green), alışma (burnish), karakteristik kontrol ve hız/basınç hassasiyetinin (160 km/h'ten başlayan frenleme) dördüncü safhası da dâhil ortalama 0,419'luk sürtünme katsayısıyla çok iyi bir performans gösterdi. Bu diskin sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan termokapıl, hız-basınç hassasiyeti (200-170 km/h) bölümünde oluşan aşırı yüksek sıcaklıklardan ve sürtünme katsayılarından dolayı hasar gördü ve ikinci disk testlerden çıkarıldı. Ancak bu bölüme kadar iyi sürtünme performansı gösteren Metco 19E kaplanmış disk ve balata çiftlerinde, yüksek sürtünme katsayıları ve kaplamanın metalürjik özelliğinden dolayı diskte toplam 11,8 gramlık, balatalarda ise toplam 50 g'lık kütlesel kayıp olmuştur. Bu durum test sonrası diskin yüzey pürüzlülük değerlerinde aşırı sapmaların oluşmasına yol açmıştır. Metco 18C ile kaplanmış disk ve balata çifti ise; ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci karakteristik kontrolde ($\mu \approx 0{,}419$), soğuk frenlemede, disk ve balata ikilisinin kararlılık haline gelmesi bölümünde (recovery), artan sıcaklık hassasiyetinde ve ikinci sıcaklıkla fren zayıflaması testlerinde ortalama 0,407'lik bir sürtünme katsayısı değeri göstermiştir.

Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disk ve balata çifti; 200 km/h'ten 170 km/h'e yavaşlamada hız/basınç hassasiyeti, otobanda frenleme kontrolü ve sıcaklıkla fren zayıflamasının birinci test prosedüründe ortalama 0,382'lik sürtünme katsayısı göstermiştir. Genel olarak Metco 18C ve Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disklerin BTV, DTV ve koniklik değerleri orijinal diskten daha büyük sapmalar göstermesine rağmen bu iki diskin tüm testlerde sağladığı iyi sürtünme performansı ve makul aşınma miktarları bu disklerin uygun bir seçim olduklarını göstermiştir. Ayrıca Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı diskin kütlesel aşınma göstermemesi de testlerden elde edilen önemli bir bulgudur. Ancak frenleme esnasında disk-balata arayüzünde diskin termal bariyer etkisinden kaynaklanan

yüksek sıcaklılar, balataların fazla aşınmasına sebep olmuştur. Bir diğer önemli bulguda Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı diskin balatalarında, sıcaklığa bağlı fren zayıflamasının (fading fenomeni) belirgin olarak gelişmiş olmamasıdır. Bu disk-balata çifti, sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürlerinde oluşan yüksek arayüz sıcaklıklarına rağmen en düşük 0,152'lik sürtünme katsayısı değeri ile beklentilerin üzerinde bir performans göstermiştir.

Hızlandırılmış SAE J2334 korozyon testi sonucunda OEM disk diğer disklerden oldukça fazla korozyona maruz kalmıştır. Kaplamalı disklerdeki korozyonla kütle artışına, ağırlıklı olarak diskin kaplanmamış bölgelerindeki korozyon neden olmuştur.

Tüm numunelerdeki mikrografların incelenmesinden, kaplamaların disk yüzeylerine oldukça iyi bağ mukavemeti ile bağlandığı görülmüştür. Bu durum altlıkların kaplanmaya elverişli ve uygun tekniklerle hazırlanması ve kaplamanın yüzeye iyi bağlanabilmesi için püskürtme şartlarının optimum düzeyde yerine getirilmesi ile sağlanmıştır. İlgili noktasal analizlerden, kaplama-arabağlayıcı ve arabağlayıcı-altlık bölgelerinde ısının etkisiyle malzeme difüzyonları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen testlerde herhangi bir kaplamanın altlık malzemesinden ayrılmaması ve kaplamalarda herhangi bir kırılma ve dökülmenin olmaması kaplama işleminde seçilen malzemelerin, kaplama kalınlıklarının ve yöntemlerinin uygunluğunu göstermiştir. Metco 19E ve 18C ile kaplanan disklerin, kaplanmasında kullanılan alevle püskürtme ve ergitme yöntemi, atmosferik ortamda uygulandığından dolayı kaplama esnasında oksitli bileşikler oluşmuştur. Matriksin, oksitli bileşikler ve porozitelerin varlığından dolayı, aşınma mukavemeti bir miktar düşmüştür. Metco 19E ve 18C kaplanmış disklerin mikroyapı incelemelerinde iri karbürlü bileşiklerin oluştuğu görülmesine rağmen matriksle iyi ıslanma sağlanamadığından, nikelin karbür oluşturamadığı görülmüştür. Ayrıca yapılan frenleme testlerinde Metco 19E, Metco 18C ve Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disk ve balata çiftleri genel durum itibariyle OEM disk-balata çiftinden daha büyük sürtünme katsayısı geliştirdiklerinden dolayı hem ilgili balatalarda hem de ilgili disklerde bir miktar daha fazla kütlesel kayıplar oluştuğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada;

- Birinci sıcaklıkla fren zayıflaması test prosedürünün 13. frenlemesinde, Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı diskin sıcaklığı 642 °C'ye, dış balata sıcaklığı ise yaklaşık 762 °C'ye ulaştı. Bu sıcaklıklarda disk-balata çifti minimum 0,212'lik sürtünme katsayısı sağlayarak sıcaklıkla belirgin bir fren zayıflaması (fade) göstermemiştir.

- Metco 18C ile Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disklerin sürtünme katsayısında orijinal diske göre sırasıyla %17 ve %12'lik artışlar elde edilmiştir.

- Testlerde daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmasına rağmen Metco 18C ile Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disklerin sürtünme katsayısı, OEM disk-balata çiftinin sürtünme katsayısından daha büyük olarak ölçülmüştür. Bu durum Metco 18C ile Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disklerin binek otomobillerinde kullanılması ile aktif güvenlikte artış sağlanabileceğini göstermiştir.

- Tüm testlerde kütlesel aşınma miktarı bakımından Metco 18C ile Cr_3C_2-NiCr disk-balata çiftleri, OEM diskten biraz daha fazla aşınmıştır. Ancak OEM diske nazaran frenleme performansları daha iyi olduğundan tercih edilebilir.

- Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı disk de aşınma görülmemiştir. Bunun yanı sıra balatalar, diskin termal bariyer etkisinden dolayı yüksek çalışma sıcaklıklarına maruz kalarak belirgin kütlesel aşınmaya uğramıştır. Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı diskler, uygun balata seçimiyle otomobillerde kullanılabilecek bir diğer alternatiftir.

- Genel olarak Metco 18C, Cr_3C_2-NiCr ve Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı disklerde daha yüksek düzeylerde BTV ve DTV değişimleri olduğu görülmüştür. Bu durumun meydana gelmesinde Metco 18C ile Cr_3C_2-NiCr kaplanmış disk-balata çiftlerinin sürtünme katsayılarının büyük olması, aşınma oranları, genel olarak tüm kaplanmış disklerin daha büyük işletme sıcaklıklarına maruz kalması ve üniform olmayan dönme geometrileri (soğuk DTV ve salgı miktarı) etkili olmuştur.

- Otobanda frenleme kontrolü ile sıcaklıkla fren zayıflaması I-II gibi sabit ivmeli test prosedürlerinde ortalama basınç değişimleri açısından en küçük değerleri Metco 18C ile Cr_3C_2-NiCr kaplamalı diskler göstermiştir.

- Otobanda frenleme kontrolü testinde Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı diskin basınç değeri 158 bar'a kadar ulaşmasına rağmen kaplamada dökülme olmadığı görülmüştür. Bu durum seçilen kaplama tozlarının, kalınlıklarının ve yöntemlerinin uygun olduğunu göstermiştir.

- Yapılan tüm testlerde; ağırlıklı olarak disk sıcaklığı balata sıcaklığından daha yüksek olarak ölçülmüştür. Ancak 200 km/h'ten 170 km/h'e yavaşlamada hız/basınç hassasiyeti, karakteristik kontrol III-IV, sıcaklıkla fren zayıflamasının birinci test prosedürü, disk-balata ikilisinin rejim haline gelmesi, basınç ve sıcaklık hassasiyeti test prosedürlerinde Al_2O_3-TiO_2 kaplamalı diskin termal bariyer etkisinden dolayı balatalarında daha yüksek sıcaklıklar kaydedilmiştir.

- Genel olarak tüm DTV incelemelerinde diskin iç çapından dış çapına doğru disk kalınlık değişimlerinde artışlar görülmüştür.

- Korozyon testi sonucunda OEM disk diğer disklerden oldukça fazla korozyona maruz kalmıştır. Bu nedenle korozif etkilerin yüksek olduğu ortamlarda kaplamalı disklerin daha etkin performans gösterebileceği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışmanın devamında;

- Disklerin orijinal yüzey pürüzlülük, salgı, balans ve kalınlık özelliklerinin muhafaza edilerek kaplanmaları sonrasında fren testlerine tabii tutularak incelenmesi,

- Kaplama uygulanacak disk ve balata çalışmalarında, bu çalışmadaki testlere ve parametrelere ek olarak, gürültü ve diskin termik haritasının da incelemeye katılması,

- Kaplama uygulanmış disklerin aşınma davranışının frenleme esnasında anlık ölçülmesiyle; fren tork değişimleri, sıcaklık, sürtünme katsayısı ve koniklik arasındaki ilişkilerin incelenmesi,

- Tolerans limitlerinin ötesinde aşınmış disklerin, yaygınlaştırılmış kaplama yöntemleri ve uygulanabilecek ekonomiklikteki kaplama tozları ile kaplanarak kullanılabilirliğinin[24] araştırılması,

- Kaplanmış disklerin mekanik ve metalürjik yapısına uygun balatanın seçimi için daha kapsamlı testlerin gerçekleştirilmesi,

- Al_2O_3-TiO_2 kaplanmış disklerin[25], seramik bazlı malzemelerden (örneğin, metal matriks kompozitlerden) yapılmış balatalarla test edilmesi ile, sürtünme katsayısı, sıcaklık ve aşınma davranışının birlikte incelenmesi,

faydalı ve farklı sonuçlar verebilir.

[24] 2001 model Toyota Corolla'nın atölye el kitabında ön fren disklerinin bir yüzeyinde maksimum 1 mm'lik aşınma toleransına müsaade edildiği belirtilmektedir. Ayrıca maksimum çarpıklık limiti de 0,05 mm'dir. Bu sınırları aşacak şekilde aşınmış ve çarpılmaya maruz kalmış disklerin, yaygınlaştırılmış kaplama yöntemi ve uygulanabilecek ekonomiklikteki kaplama tozları ile kaplanması durumunda, fren testlerindeki davranışının incelenmesiyle bu disklerin geri kazanım koşullarının araştırılması.

[25] Seramik kaplamalı disklerin, korozyon direnci oldukça yüksek ve ömrü uzundur. Bu disklerin uygun balatalarla kullanılması ile bakım onarım masrafları minimize edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Göktan, A., Güney, A., Ereke, M., "Taşıt Frenleri", ***Alliedsignal Automotive***, Türkiye, Panel Matbaacılık, ISBN 975-95017-0-8, (1995).

[2] Kinkaid, N.M., O'Reilly, O.M. ve Papadopoulos, P., "Automotive disc brake squeal", ***Journal of Sound and Vibration****, 267*, 1, 105–166, (2003).

[3] Lee, K., "Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking", ***SAE Technical Paper Series***, 1999-01-0483, (1999).

[4] Yamabea, J., Takagia, M., Matsuia, T., "Development of disc brake rotors for heavy- and medium-duty trucks with high thermal fatigue strength", ***Technical Review***, 15, 42-51, (2003).

[5] Bettge, D., Starcevic, J., "Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes", ***Wear****, 254*, 195–202, (2003).

[6] Huang, S.X., Paxton, K.A., "Macrocomposite Al brake rotor for reduced weight and improved performance", ***Journal of the Minerals***, 50, 8, 26-28, (1998).

[7] Kevorkijan, V., "Engineering wear-resistant surfaces in automotive aluminum", ***Journal of the Minerals***, 55, 2, 32-34, (2003).

[8] Warren, H., Hunt, Jr., "Cost-effective composites", ***Journal of the Minerals***, 6, (2003).

[9] Shorowordi, K.M., "Processing and tribological charaterization of aluminium based metal matrix composites for brake disc/drum applications", http://www.mtm.kuleuven.ac.be/Research/SURF/ webkms.htm, **(Ziyaret tarihi: 15 Ekim 2007)**.

[10] Straffelini, G., Pellizzari, M. ve Molinari, A., "Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al-based metal-matrix-composites against friction material", ***Wear****, 256*, 754–763, (2004).

[11] Shorowordi, K.M., Haseeb, A.S.M.A. ve Celis, J.P., "Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad", ***Wear,*** *256*, 1176–1181, (2004).

[12] Nakanishi, H., Kakihara, K., Nakayama, A., Murayama, T., "Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad", ***JSAE Review,*** 23, 3, 365-370, (2002).

[13] Zhang, H., Ramesh, K.T., Chin, E.S.C., "High strain rate response of aluminium 6092/B4C composites", ***Materials Science and Engineering***, A 384, 26–34, (2004).

[14] Oda, N., Sugimoto, Y., Higuchi, T., Minesita, K., "Development of disk brake rotor utilizing aluminum metal matrix composite", ***International Congress & Exposition, Session: Advanced Materials***, Detroit, Document Number: 970787, (1997).

[15] Blau, P.J., "Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives", ***Technical Report*****,** US Department of Energy (US), (2001)

[16] Anonim, "Brake pads structure and geometry", http://home.wanadoo.nl/this-is-me-at/brembo/brembo.html, (2002), **(Ziyaret tarihi: 18 Mayıs 2006)**.

[17] Anonim, "Ceramic brake discs for high performance vehicles", ***Daimler Chrysler High Tech Report***, p.96, (2000).

[18] Stanford, M.K. ve Jain, V.K., "Friction and wear characteristics of hard coatings", ***Wear,*** 250/51, 990–996, (2001).

[19] Eggleston, D., "Cold judder", ***EURAC Technical Bulletin***, 00029711, (1999).

[20] Leslie, A., "Mathematical model of brake caliper to determine brake torque variation associated with disc thickness variation (DTV) input", ***SAE-Paper***, 2004-01-2777, (2004).

[21] Jacobsson, H., "Analysis of brake judder by use of amplitude functions", ***SAE-Paper***, 1999-01-1779, (1999).

[22] Jacobsson, H., "Disc brake judder considering instantaneous disc thickness and spatial friction variation", ***Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering***, 217, 5, 325-342, (2003).

[23] Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K., "Development of high thermal conductivity cast iron for brake disc rotors", ***ABS Traction Control and Brake Components***, ***SAE Paper 900002***, (1990).

[24] Kao, T.K., Richmond, J.W., Douarre, A., "Brake disc hot spotting and thermal judder: an experimental and finite element study", ***International Journal of Vehicle Design,*** 23, 3-4, 276-296, (2000).

[25] Ellis, K., "The effect of cast iron disc brake metallurgy on friction and wear characteristic", ***The 2nd International Seminar on Automotive Braking Recent Developments and Future Trends***, Britol, UK, (1998).

[26] Yamabea, J., Takagia, M., Matsuia, T., Kimurab, T., Sasakib, M., "Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength", ***JSAE Review,*** 23, 1, 105-112, (2002).

[27] Cueva, G., Sinatora, A., Guesser, W.L., Tschiptschin, A.P., "Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors", ***Wear***, 255, 1256–1260, (2003).

[28] Seong, K.R., Michael, G.J. ve Peter, H.S.T., "The role of friction film in friction, wear, and noise of automotive brakes", ***ABS Traction Control and Brake Components***, SAE: 900004, (1990)

[29] Jang, H., Koa, K., Kima, S.J., Basch, R.H. ve Fash, J.W., “The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials”, ***Wear,*** 256, 406-414, (2004).

[30] Lee, K., Barber, J.R., "An experimental investigation of frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes under a drag brake application", ***Journal of Tribology***, 116, 3, 409–414, (1994).

[31] Thuresson, D., “Influence of material properties on sliding contact braking applications”, ***Wear***, 257, 451-460, (2004).

[32] Bijwe, J., Nidhi., Majumdarb, N., Satapathy, B.K., “Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials”, ***Wear***, 259, 1068–1078, (2005).

[33] Dmitriev, A.I., Yu Smolin, A.,Psakhie, S.G., Österle, W., Kloss, H. ve Popov, V.L., “Computer modelling of local tribological contact by the example of the automotive brake friction pair”, ***Physical Mesomechanics***, 11, 1-2, 73-84, (2008)

[34] Roubicek, V., Raclavska, H., Juchelkova, D. ve Filip, P., “Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry”, ***Wear***, 265, 167–175, (2008).

[35] Jang, Y.H., Ahn, S., “Frictionally-excited thermoelastic instability in functionally graded material”, ***Wear***, 262, 1102–1112, (2007).

[36] Blau P.J., Jolly, B.C., Qu, J., Peter, W.H., Blue, C.A., “Tribological investigation of titanium-based materials for brakes”, ***Wear***, 263, 1202–1211, (2007).

[37] Mingxi, L., Yizhu, H, Xiaomin, Y., “Effect of nano-Y2O3 on microstructure of laser cladding cobalt-based alloy coatings”, ***Applied Surface Science***, 252, 8, 2882-2887, (2005).

[38] Yaz, M., Çelik, H., “Cr-Ni’li paslanmaz çeliğin Co esaslı süper alaşımlar ile sertyüzey kaplanabilirliğinin araştırılması”, ***Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi***, 19 (2), 225-233, (2007).

[39] Planche, M., Liao, H., Coddet, C., “Study on the behaviour of the in-flight particle of arc sprying”, ***Basel, Switzerland***, (2005).

[40] Çelik H., Yaz M., “Klinker Öğütme Silpeps'lerinin Alaşım Katkı Oranlarına Bağlı Abrasiv Aşınma Davranışlarının Araştırılması”, ***10. th International Metallurgy and Materials Congress***, İstanbul, Türkiye, 893-900, (2000).

[41] Miguel, J.M., Guilemany, J.M., Vizcaino, S., “Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes”, ***Tribology International***, 36, 3, 181-187, (2003).

[42] Çelik, H., “Investigation of machinability in Co and Cr containing hard materials heated by plasma arc”, P. Ü., Mühendislik Fakültesi, ***Mühendislik Bilimleri Dergisi***, 2, 2, 123-127, (1996).

[43] Çelik H., İzciler, M., "WC-Co Esaslı Kesici Takımlarda Tane Büyüklüğü ve Kobalt İçeriğinin Aşınma Direncine Etkisi", P.Ü., Müh. Fak., ***6. Denizli Malzeme Sempozyumu***, Denizli, 416-424, (1995).

[44] İzciler, M., Çelik, H., "Two- and three-body abrasive wear behaviour of different heat-treated boron alloyed high chromium cast iron grinding balls", ***Journal of Materials Processing Technology***, 105, 3,237-245, (2000).

[45] Placko, H. E., Brown Stanley, A., Payer, H. J., "Effects of microstructure on the corrosion behavior of CoCr porous coatings on orthopedic implants", ***Journal of Biomedical Materials Research***, 39, 2, 292 – 299, (1998).

[46] Wang, B.Q., "in: T.S. Sudarshan, K.A. Khor, M. Jeandin (Eds.), Surface Modification Technology X", ***The Institute of Materials***, London, (1996).

[47] Guilemany, J.M., Espallargas, N., Suegama, P.H. ve Benedetti, A.V. "Comparative study of Cr_3C_2–NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings", ***Corrosion Science***, 48,10, 2998–3013, (2006).

[48] Pawlowski, L., "The science and engineering of thermal spray coatings", ***John Wiley & Sons***, ISBN 0-47-159253-2, 414, (1995).

[49] Chagnon, P., Fauchaus, P., "Thermal spraying of ceramics", ***Ceramics International***, 10, 4, 110-131, (1984).

[50] Gang-Chang, J., Chang-Jiu, L., Yu-Yue, W., Wen-Ya, L., "Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr_3C_2–NiCr coating", ***Surface & Coatings Technology***, 200, 24, 6749–6757, (2006).

[51] Vuoristo, P., Niemi, K., Makela, A., Mantyla, T., "in: C.C. Berndt, S. Sampath (Eds.), Thermal spray industrial applications", ***ASM International***, Materials Park, Ohio, USA, (1994).

[52] Erol, M., "Seramik Malzemeler", Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği ***Ders Notları***, (2007-2008)

[53] Anonim, "Automotive Handbook", ***Robert Bosch GmbH***, (2002).

[54] Hidalgo, V.H., Varela, F.J.B., Menendez, A.C. ve Martinez, S.P., "A comparative study of high-temperature erosion wear of plasma sprayed NiCrBSiFe and WC-NiCrBSiFe coatings under simulated coal-fired boiler conditions", ***Tribology International***, 34, 161-169, (2001).

[55] Smith, R.W., Fast, R.D., "The future of thermal spray", ***Welding Journal***, 7, 3 (8), 43-50, (1994).

[56] Villat, M., "Functionally effective coatings using plasma spraying", ***Sulzer Technical Review***, 3, 41-45, (1986).

[57] Houck, D.L., "Thermal Spray: Advances in Catings Technology", ***1st National Thermal Spray Conference***, 14-17 September, Orlando (FL), ASM International, 367, (1987).

[58] Smith, R.W. ve Knight, R., "Thermal spraying I: Powder Consolidation - From coating to forming", ***Journal of the Minerals***, 47, 8, 32-39, (1995).

[59] Hoff, I.H., "Thermal spraying and its application", ***Welding and Metal Fabrication***, 63, 7, 266-269, (1995).

[60] Clare, J.H., Crawmer, D.E., "Thermal spray coatings", ***Metals Handbook***, 5, 361-375, (1982).

[61] Halamoğlu, T., "Metal püskürtme yöntemiyle aşınmaya dayanıklı kaplamalar", ***Yüzey İslemler Dergisi***, 154-159, (2003).

[62] Sarıtas, S., "Toz Metalurjisi", ***Makine Mühendisliği El kitabı***, 2. Basım, Cilt.1, 2/64-82, (1994).

[63] Erdoğan M., Güneş İ., Develi F., "Plazma sprey ve kullanım alanları" ***Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Teknik Not***, ISSN:1304-4141, 61-66, (2006).

[64] Anonim, "Senkron Yüzey Teknolojileri", ***Broşür***, (2007).

[65] Salman, S., "Plazma ve alev püskürtme tekniğiyle Al_2O_3-%13TiO_2 ve Cr_2O_3-%5SiO_2-%3 TiO_2 seramik kaplanan malzemelerin özellikleri", Doktora Tezi, ***Yıldız Teknik Ünv. Fen Bil. Enst.,*** 1995.

[66] Öner, C., Can, İ., "Toz püskürtme yöntemi ile krank mili ana yatağının yeni bir alaşım ile kaplanması", ***Teknolojik Araştırmalar, Teknik Not***, ISSN: 1304-4141; Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi; 77-81, (2007).

[67] Akbulut, H., "Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ders Notları", ***Sakarya Üniversitesi***, (2007).

[68] Sobolev, V., Guilemany, J.M., Nutting, J., "High velocity oxy-fuel spraying", ***Maney, England,*** ISBN 1-902653-72-6, 397, (2004).

[69] Suegama, P.H., Fugivara, C.S., Benedetti, A.V., Fernández, J., Delgado, J., Guilemany, J.M., "Electrochemical behaviour of thermally sprayed Cr_3C_2-NiCr coatings in 0.5 M H_2SO_4 media" ***Journal of Applied Electrochemistry***, 32, 11, 1287–1295, (2002).

[70] Guilemany, J.M., Lorenzana C., Nin, J., Delgado, J., "On-line Monitoring Control of Stainless Steel Coatings Obtained by HVOF and APS Processes", ***Proceedings of the United Thermal Spray Congress and Exhibition*** **(UTSC'2002),** Essen, Germany, 86–90, (2002).

[71] Mossor, C. W., "Electrical breakdown of thermal spray alumina ceramic applied to AlSiC baseplates used in power module packaging", Yüksek Lisan Tezi, ***Virginia***, (1999).

[72] Anonim, "Metalografi", http://www.metkon.com/tr/content.asp?id=5, (**Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2008**).

[73] Halderman, J.D., "Automotive Brake Systems", Second Edition, ***Prentice-Hall***, (2000).

[74] Hammer, L., “Brake roughness and pedal pulsation”, Mighty Tech. Tip., http://www.mightyautoparts.com/pdf/articles/tt117.pdf, **(Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2008).**

[75] Anonim, “Coolant proof micrometer series 293-with dust/water protection conforming to IP65 level”, http://www.mitutoyo.com, (**Ziyaret tarihi: 15 Temmuz 2008**).

[76] Carlos, E.A., Ferro, E., “Technical overview of brake performance testing for original equipment and aftermarket industries in the US and European markets”, ***Link Technical Report FEV 2005-01***, 15-16, (2005).

[77] Anonim, “How to read and understand the aftermarket standard SAE J2430/brake effectiveness evaluation procedure test report”, ***Link Testing Laboratories B.E.E.P. task force***, (2002).

[78] Liu, W., Pfeifer, J.L., “Introduction to brake noise & vibration”, www.sae.org/events/bce/honeywell-liu.pdf, **(Ziyaret tarihi: 14 Kasım 2007)**

[79] Anonim, “SAE international surface vehicle Standard”, ***Cosmetic Corrosion Lab Test,*** 1998-06, Rev 2002-10.

[80] Anonim, “ESX-3CA 14 cubic foot ultra-cold temperature and humidity chamber”, http://www.espec.com/na/products/model/esx_3ca/, **(Ziyaret tarihi: 25 Temmuz 2008)**

[81] Factor, M. ve Roman, I., “Microhardness as a simple means of estimating relative wear resistance of carbide thermal spray coatings: Part 1. characterization of cemented carbide coatings”, ***Journal of Thermal Spray Technology***, 11, 4, 468-481, (2002).

[82] Tian, W., Wang, Y., ve Yang, Y., “Fretting wear behavior of conventional and nanostructured Al_2O_3–13 wt%TiO_2 coatings fabricated by plasma spray”, ***Wear***, 265, 11-12, 1700-1707, (2008).

[83] Anonim, “Superfine aluminum oxide and titanium oxide based powder”, Product sheet for Infralloy 2600 series, http://www.inframat.com/sf-al.htm, **(Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2008)**

[84] Sarıyerli, G., Disk frenlerin tasarım ve tribolojik açıdan incelenmesi”, Doktora Tezi, ***Yıldız Teknik Ünv. Fen Bil. Enst.,*** 2006.

[85] Bijwe, J., Kumar, M., Gurunath, P.V., Desplanques, Y., Degallaix, G., “Optimization of brass contents for best combination of tribo-performance and thermal conductivity of non-asbestos organic (NAO) friction composites”, ***Wear,*** 265, 5-6, 699–712, (2008)

[86] Anonim, “Diagnosing and measuring rotor run-out”, Bulletin CQB 03-02, www.carquest.com/common/downloads/partsTechBrakeCQB%2003-02.pdf, **(Ziyaret tarihi: 22 Aralık 2008)**

[87] Limpert, R., “Brake Design and Safety”, Third Edition, ***Society of Automotive Engineers***, Warrendale, (2001).

[88] Happian-Smith, J., “An Introduction to Modern Vehicle Design”, ***Butterworth Heinemann***, (2002).

EKLER

EK-A. DENEYSEL VERİLERE DAYALI MATEMATİKSEL UYGULAMALAR

Frenleme mesafesi; taşıtın hızına, yüküne, yol ve lastik durumuna, frenlerin durumuna ve fren zayıflamasına bağlıdır. Sıcaklıkla fren zayıflaması-I test prosedürüne, literatürdeki bazı kabullere ve uygulamalara göre hesaplamalar uygulandı.

A.1 Frenleme Enerjisi ve Frenleme Gücü

Hareket eden bir taşıtın frenlenmesi süresince taşıtın kinetik ve potansiyel enerjileri frenlerdeki sürtünmelerden dolayı termal enerjiye çevrilir. ν_1 hızından ν_2 hızına yavaşlayan bir taşıt için frenleme enerjisi $\mathbf{E_f}$;

$$E_f = (1/2).m.(\nu_1^2-\nu_2^2) + (1/2).I.(\omega_1^2 - \omega_2^2) \qquad [Nm] \qquad (A.1)$$

şeklindedir. Burada;

I : Dönen parçaların kütle atalet momenti, [kgm^2]

m : Taşıtın kütlesi, [kg]

ν_1 : Taşıtın ilk hızı, [m/s]

ν_2 : Taşıtın son hızı, [m/s]

ω_1 : Frenleme başlangıcında dönen parçaların açısal hızı, [1/s]

ω_2 : Frenleme sonunda dönen parçaların açısal hızı, [1/s]

Eğer taşıt frenleme sonucunda duruyorsa $\nu_2 = \omega_2 = 0$ olacak ve denklem (A.1) aşağıdaki şekle dönüşecektir.

$$E_f = (1/2).m.\nu_1^2 + (1/2).I.\omega_1^2 \qquad [Nm] \qquad (A.2)$$

$\omega_1 = \nu_1/r_1$ olduğu hatırlanırsa;

$$E_f = (1/2).m.[1 + I/(m.r^2)].\nu_1^2 \approx (1/2).m.k.\nu_1^2 \quad (A.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

k : Dönen kütleler için düzeltme faktörü (**k ≈ 1+ I/m.r^2)**

r : Dinamik lastik yarıçapı, m

Binek otomobilleri için **k** yüksek viteslerde 1,05 ile 1,15, düşük viteslerde 1,3 ile 1,5 arasında bir değer olarak alınır. Kamyonlar için yüksek viteslerde 1,03 ile 1,06, düşük viteslerde 1,25 ile 1,6 arasında bir değerdir [87].

Frenleme gücü, frenleme kuvvetinin birim zamanda yaptığı işe eşittir. O halde;

$$P_f = \partial(E_f)/\partial t \quad [W] \quad (A.4)$$

Eğer taşıt herhangi bir sabit "**a"** ivmesiyle yavaşlıyorsa, taşıtın zamana bağlı hızı **ν(t)**;

$$\nu(t) = \nu_1 - a.t \quad [m/s] \quad (A.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (A.3) ve (A.5)'in yardımıyla;

$$P_f = k.m.a.(\nu_1 - a.t) \quad [W] \quad (A.6)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (A.6) incelenirse frenleme gücünün frenleme boyunca sabit olmadığı görülebilir. Çünkü **t = 0** anında; yani frenleme başlangıç zamanında frenleme gücü maksimum iken taşıt durduğunda sıfırdır.

Taşıtın herhangi bir **"a"** ivmesiyle durma zamanı (t_f) için;

$$t_f = \nu_1/a \quad [s] \quad (A.7)$$

yazılabilir.

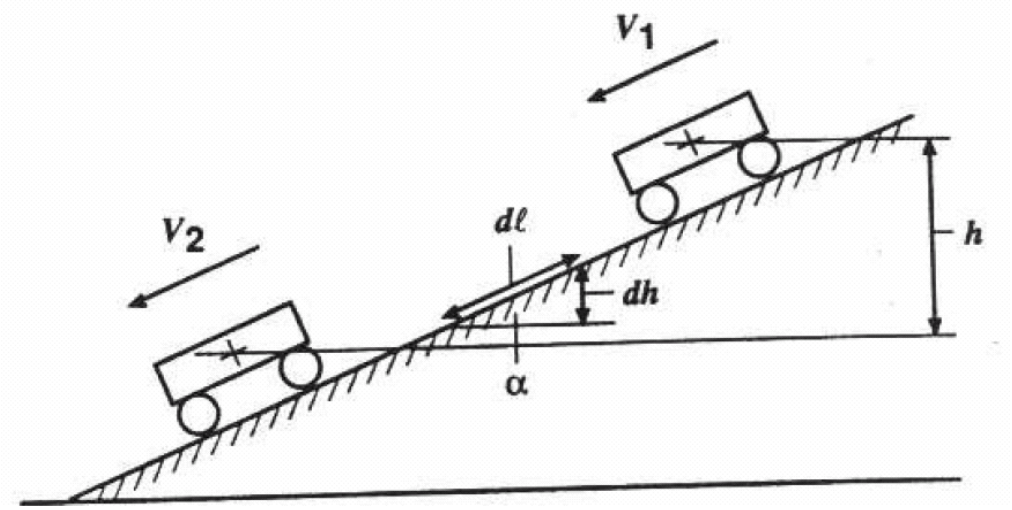
Bir taşıtın t_f frenleme zamanında durması için ortalama frenleme gücü P_{ort};

$$P_{ort} = k.m.a.\nu_1 / 2 \quad [W] \qquad (A.8)$$

olarak elde edilir. Bu formülde, lastiklerdeki kaymalar göz ardı edilmiştir.

Eğer taşıt yavaşlayarak yokuş aşağı iniyorsa, disk ve balata ikilisi hem potansiyel hem de kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürecektir [Şekil A1]. Bu durum için enerjinin korunumu kanunu yazılacak olursa;

$$E_f = m.g.h + 1/2.k.m.(\nu_1^2 - \nu_2^2) \quad [Nm] \qquad (A.9)$$



Şekil A1: Eğimli yolda kinetik ve potansiyel enerji [87]

Sabit hızda sürekli frenleme için (yani yokuş aşağı sabit hızla iniş) denklem (A.9) da $\nu_1 = \nu_2$ olarak alınırsa;

$$E_f = m.g.h \quad [Nm] \qquad (A.10)$$

şekline dönüşür. Burada;

g : Yerçekimi ivmesini, [m/s^2]

h : Yüksekliği, [m]

ifade eder.

A.2 Frenlemenin Termik Olarak İncelenmesi

Frenleme olayı genel olarak bir enerji dönüşümüdür. Taşıtın kinetik ve potansiyel enerjisinin disk-balata çiftinin sürtünme arayüzünde ısıya dönüştürülmesi olayıdır. Bu açıdan frenlemenin termik olarak incelenmesi dinamik olarak incelemesi kadar önemli bir konudur.

A.2.1 Balata ve disk tarafından harcanan frenleme gücü

Fren sıcaklıklarının analizi için hem frenlerin absorbe ettiği enerji miktarı tam olarak bilinmeli hem de bu enerjinin balata ve disk arasında nasıl paylaştırıldığı saptanmalıdır. Fakat bunu tahmin etmek zordur. Frenleme veya termal enerji dağılımı, direkt olarak ısının üretildiği bütün yüzeylerdeki termal dirençle ilişkilendirilebilir. Disk ve balata arasındaki ısı transferi, eşdeğer dirençle tanımlanabilir. Bu durum kararlı koşullar için şu şekilde ifade edilmiştir [87].

$$q''_R / q''_P = \sum R_P / \sum R_R \qquad (A.11)$$

Burada;

q_R : Diskteki ısı akısı, [W/m^2]

q_p : Balatadaki ısı akısı, [W/m^2]

R_P : Balatadaki iletimle ısı akışına gösterilen termik direnç, [K/W]

R_R : Diskteki iletimle ısı akışına gösterilen termik direnç, [K/W]

denklem (A.11)'den

$$\frac{q''_R}{q''_P} = \left(\frac{\rho_R c_R k_R}{\rho_P c_P k_P} \right)^{1/2} \qquad (A.12)$$

şekilde yazılır. Burada;

ρ_R : Disk yoğunluğu, [kg/m^3]

ρ_p : Balata yoğunluğu, [kg/m^3]

c_R : Diskin özgül ısısı, [J/kgK]

c_p : Balatanın özgül ısısı, [J/kgK]

k_R : Diskin ısı iletim katsayısı, [W/mK]

k_p : Balatanın ısı iletim katsayısı, [W/mK]

(A.12) formülünden istifade edilerek oransal ısı faktörü (rölatif frenleme enerjisi-relative braking energy)

$$\gamma = \frac{q_R^{"}}{q_R^{"} + q_P^{"}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_P c_P k_P}{\rho_R c_R k_R} \right)^{1/2}}, \qquad \text{(A.13)}$$

olarak formüle edilir. Burada γ = oransal ısı faktörüdür.

Sürekli veya tekrarlı frenlemelerde, denklem (A.13) yüksek fren sıcaklıkları sonucunda meydana gelen taşınımla ısı transferinden dolayı daha karmaşık hale gelir. Bu durum Şekil A.2'de gösterilmiştir. Kararlı durumlar için diskte enerji depolanması olmayacaktır. Sonuç olarak disk için ısıl direnç yazılacak olursa [87];

$$\sum R_R = 1/(h_R A_R) \qquad [K/W] \qquad \text{(A.14)}$$

Balatalarla ilgili ısıl direnç;

$$\sum R_P = 1/(h_P A_P) + \delta_P/(k_P A_P) + \delta_S/(k_S A_P) \qquad [K/W] \qquad \text{(A.15)}$$

A_p : Balata yüzey alanı, [m^2]

k_s : Balata desteğinin ısı iletim katsayısı, [W/mK]

δ_p : Balatanın kalınlığı, [m]

δ_s : Balata destek plakası kalınlığı, [m]

(A.13) denklemi ile oransal ısı faktörü, (A.14) ve (A.15) ile de elde edilebilir [87];

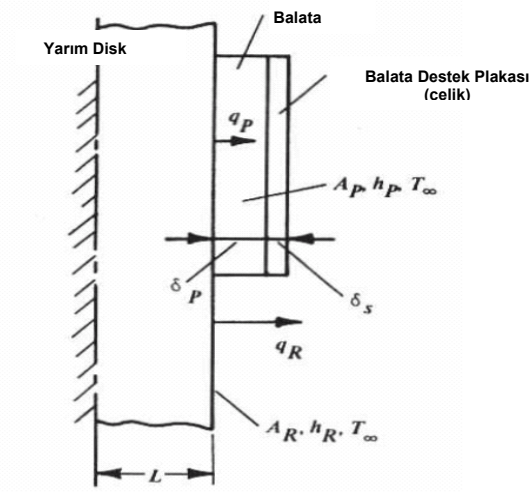
$$\gamma = \frac{q_R^{"}}{q_R^{"} + q_P^{"}} = \frac{1}{1 + \frac{\sum R_R}{\sum R_P}}$$

Diske olan ısı dağılımı;

$$\gamma = \left(1 + \frac{h_P k_P k_s A_P}{h_R A_R \left(k_P k_S + \delta_P h_P k_S + \delta_S h_P k_P \right)} \right)^{-1}, \qquad \text{(A.16)}$$

şeklinde ifade edilir [87].

Frenlerin yüksek sıcaklıklara ulaştığı durumlarda ışınım da diskin soğutulmasına katkıda bulunur. Işınımla ısı transferi, bazı durumlarda etkin ısı taşınım katsayısına eklenebilir.



Şekil A2: Sürekli frenlemede ısı transferi [87]

A.2.2 Sürtünmeyle üretilen ısı enerjisi ve düzeltilmiş oransal ısı faktörü

Frenlerin termik analizi, sürtünmeyle ortaya çıkan ısı enerjisinin ve bu enerjinin disk ve balata arasında nasıl paylaştırıldığının tam olarak tanımlanmasını gerekli kılar. Kısa süreli frenlemelerde, arayüzde oluşan toplam ısı miktarı, disk ve balata tarafından emilen ısıya eşittir [87]. Temas yüzeylerindeki ısı üretimi şu şekilde tanımlanabilir.

$$q(x,y,t) = \mu.\nu.p(x,y,t), \tag{A.17}$$

Burada; μ= sürtünme katsayısı, ν = kayma hızı, p(x,y,t) = uygulama basıncıdır.

(A.17) formülü bir boyutlu silindirik koordinatlarda oransal ısı faktörünün (rölatif frenleme enerjisi) kullanılmasıyla şu şekilde düzenlenir.

$$q(r,t) = \gamma.\mu.p(r,t).\nu(r,t) = \gamma.\mu.p(t).\omega(t).r, \tag{A.18}$$

(A.18)'deki formül diskteki ısıyı ifade eder. Balatada oluşan ısı miktarı ise;

$$q_b(r,t) = (\gamma - 1).\mu.p.(r,t).\nu(r,t) = (\gamma - 1).\mu.p(t).\omega(t).r, \tag{A.19}$$

şekilde ifade edilir [34].

Lee tarafından yapılan bir çalışmada oransal ısı faktörünün elde edilmesinde kullanılan (A.13) ve (A.16) formüllerinde, diskin süpürülen alanının balatanın temas alanından çok büyük olmasından dolayı,

$$\frac{q_1}{q_1+q_2}=\frac{1}{1+\frac{(A_P k_P \alpha_R^{1/2})}{(A_R k_R \alpha_P^{1/2})}}, \qquad \text{(A.20)}$$

(A.20) formülündeki gibi bir düzeltme önerilmektedir [3]. Burada; α = Termik difüziviteyi, A = Süpürülen yüzey alanını ve $q_1 + q_2$ = Arayüzde üretilen ısıyı ifade etmektedir [3].

A.2.3 Frenlerin konveksiyon ile soğutulması

Fren sıcaklığının hesaplanmasında, taşıt hızıyla değişen ısı taşınım katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Birçok uygulama için ısı transfer katsayısını ortalama hıza göre kabul etmek yeterli olmaktadır. Literatürde değişik durum ve geometriler için ısı taşınım katsayının tahminine yönelik birçok ampirik ifade bulunmaktadır. Bu denklemler bazı yaklaşımlarla frenleme elemanlara uygulanabilir. Bu yaklaşımlarda ölçülen ve tahmin edilen sıcaklıklar arasındaki farkın %10 ile %30 olması gerekmektedir. Disk için en genel konveksiyonla taşınım aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$q_c = h_c.A_R.(T_R-T_\infty), \qquad [W] \qquad \text{(A.21)}$$

Burada,

T_R : Diskin yüzey sıcaklığı, [K]

$T\infty$: Çevre sıcaklığı, [K]

A_R : Serbest disk yüzeyi, [m^2]

h_c : Taşınım katsayısı, [W/m^2K]

A.2.4 Işınımla ısı transferi

Yüksek fren sıcaklıklarında frenleme elemanlarının ışınım ile de bir miktar soğuyabileceği ifade edilmektedir [87]. Işınımla ısı transfer katsayısı h_R;

$$h_R = \frac{\sigma.\varepsilon_R \left(T_R^4 - T_\infty^4\right)}{T_R - T_\infty}, \qquad [W/m^2K] \qquad (A.22)$$

Burada;

T_R : Diskin yüzey sıcaklığı, [K]

$T\infty$: Çevre sıcaklığı, [K]

ε_R : Diskin yüzey emisivitesi,

σ : Stefan-Boltzman sabiti ($5{,}7.10^{-8}$ W/m^2K^4)

(3.22) denkleminde ε_R=0,55 alınarak hesaplama yapılabilir [87]. Yüksek fren sıcaklıklarına ulaşılmadıkça ışınımla soğutmanın meydana gelmeyeceği kabul edilir. Taşıtın düşük hızlarındaki sıcak frenler için ışınımla soğutma, soğutma mekanizması üzerinde biraz daha baskın olabilir.

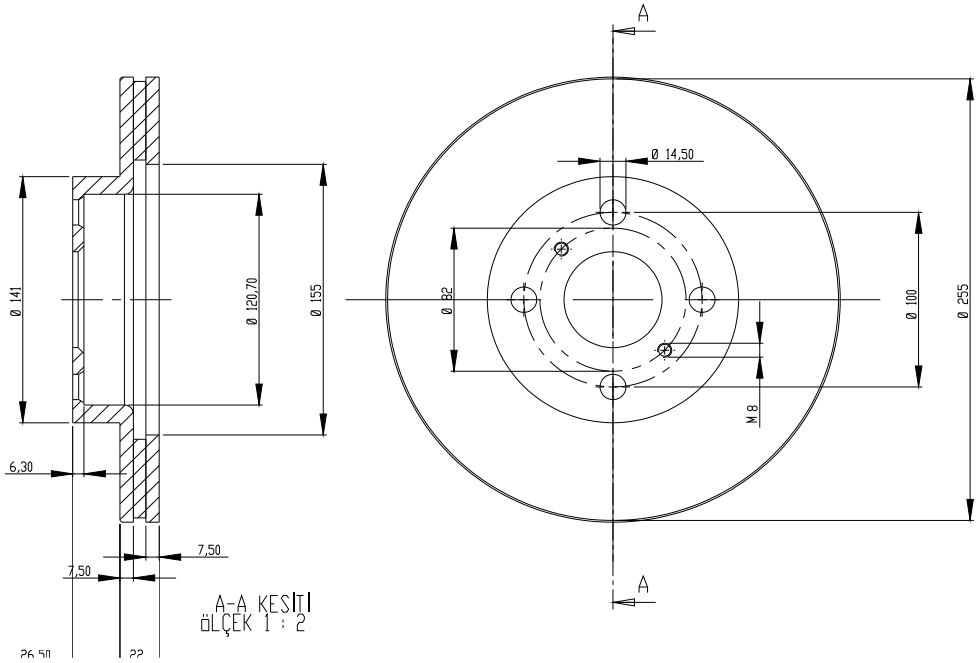
A.3 Deneysel Verilere Dayalı Matematiksel Uygulamalar

Frenleme mesafesi; taşıtın hızına, yüküne, yol ve lastik durumuna, frenlerin durumuna ve fren zayıflamasına bağlıdır. Sıcaklıkla fren zayıflaması-I test prosedürüne, literatürdeki bazı kabullere ve uygulamalara göre hesaplamalar uygulandı. Bu uygulamalarda kullanılan gerçek taşıt verileri ve ilgili diğer veriler Tablo A.1 ve A.2'de verilmiştir. Bu uygulamalarda; taşıtın kinetik enerjisi, tek tekerleğin kinetik enerjisi, ısı akısı, orantısal ısı faktörü, taşınımla ve ışınımla ısı geçişi, net ısı akısı ve diskin orta noktasının sıcaklık değeri gibi büyüklükler hesaplandı. Şekil A.3'de deney diskinin geometrik boyutları ve Şekil A.4'de ise tabakalı yapılardaki ısı iletimi gösterilmiştir. Tüm hesaplamalar ise Tablo A.3-8'de verilmiştir.

Hesaplamalarda yapılan bazı kabuller:

- Fren sisteminin mekanik ve hidrolik verimi % 100 kabul edildi.
- Atalet katsayısı "**k**" değeri; otomobillerde 1. viteste 1,45; 2. viteste 1,15; 3. viteste 1,08; 4. viteste 1,05; 5. viteste 1,03 civarında alınabilir [1]. Bu değer hesaplamalarda 1,15 olarak alındı.
- Yuvarlanma direncinin frenlemeye etkisi 0,01g ve aerodinamik direncin etkisi ise 0,03g olarak alındı [88].
- Lastiğin aderans katsayısı 0,85 olarak alındı.

- Balata kavis açısı yaklaşık olarak 50 derece olarak ölçüldü.
- Frenlemede yük dağılımının %65 önde, %35 arkada gerçekleştiği kabul edildi.
- Isı taşınım katsayısı hesaplamaların yapıldığı sıcaklıkla fren zayıflaması-I prosedürü için 113,5 W/m^2K olarak alındı.
- Sıcaklığa bağlı olarak ışınımla ısı transferi değişimi yapılan bir çalışmada 371 ^oC'de 7,93, 593 ^oC'de 15,86 ve 760 ^oC'de ise 23,89 olarak ölçüldü. Yüksek sıcaklıklarda ışınım katsayısının sıcaklıkla lineer değiştiği kabul edildi [87]. Diskin yüzey emisivitesi (ε_R) 0,55 [87] ve Stefan-Boltzman sabiti $5{,}7.10^{-8}$ W/m^2K^4 olarak alındı.



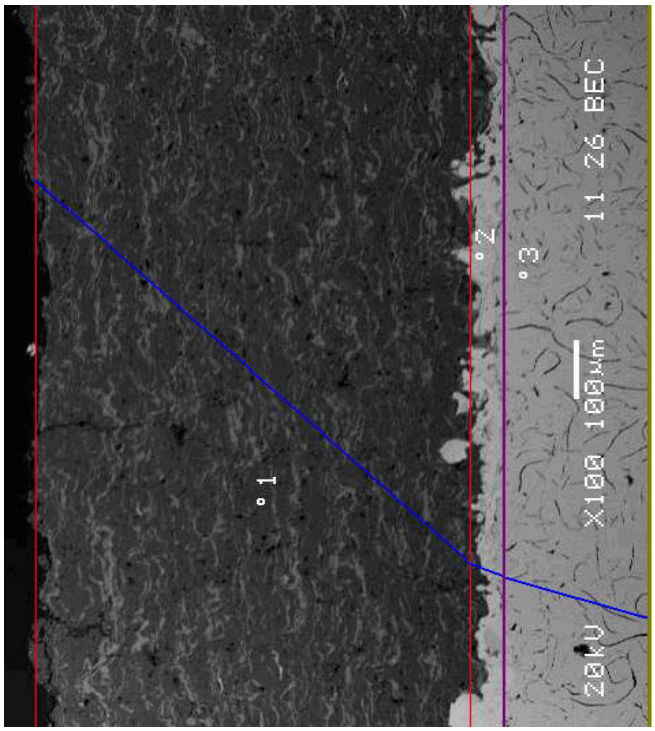
Şekil A3: 2001 model Toyota Corolla'nın ön fren diski teknik resmi

Tablo A1: Hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler ve yapılan kabuller

Parametre		**Birimi**	**Değer**
Atalet katsayısı (k)		-	1,15
Aderans katsayısı (f)		-	0,85
Yuvarlanma direncinin frenlemeye etkisi		m/s^2	0,01g
Aerodinamik direncinin frenlemeye etkisi (yüksek hızlarda)		m/s^2	0,03g
Frenlemede yük dağılımı (ön/arka)		%	65/35
Diskin yüzey emisivitesi (ε_R)		-	0,55
Stefan-Boltzman sabiti (σ)		W/m^2K^4	$5{,}7.10^{-8}$
Işınımla ısı transferi		W/m^2K	14,29
Isı iletim katsayısı	Orijinal Disk (Gri dökme demir)	W/mK	48
	Metco 19E (Ni esaslı metalik toz)	W/mK	30
	Metco 18C (Co esaslı metalik toz)	W/mK	40
	NiCr arabağlayıcı	W/mK	11,30
	Cr_3C_2-NiCr (Sermet)	W/mK	14
	Al_2O_3-TiO_2 (Seramik)	W/mK	1,70

Tablo A2: 2001 model Toyota Corolla'nın bazı teknik değerleri ve yapılan kabuller

Parametre	Birimi	Değer
Motor gücü	PS/kW	110/81, (6000 dev/dak)
Boyutlar (u/g/y)[26]	mm	4315/1690/1385
Dingil mesafesi	mm	2465
Aracın boş ağırlığı (manüel/ otomatik)	kg	1055/1080
Azami yüklü ağırlık	kg	1615
Ön dingil kapasitesi	kg	920
Arka dingil kapasitesi	kg	920
Ön dingil gelen yük	kg	830
Arka dingil gelen yük	kg	785
Balata kavis açısı	derece	Dış: 51.5 - İç: 47
Balatanın kalınlığı	mm	12
Balatanın kütlesi	g	292,2
Balatanın yüzey alanı	mm^2	4213
Balata sınıfı	-	PN529H-FF NAC
Diskin kalınlığı	mm	22
Diskin kütlesi	g	5004
Diskin çapı	mm	255
Diskin etkili yarıçapı	mm	102,5 mm
Diskin süpürülen alanı	mm^2	30949
Taşınım ve ışınımın oluştuğu disk alanı[27]	mm^2	26733
Kaliper konumu	-	Saat 9 konumunda
Kaliper tipi	-	Yüzer tip - tek silindirli
Lastik etiketi	-	185/65 R14
Lastik çapı	mm	596



(1) Al_2O_3 - TiO_2 seramik kaplama kısmı, (2) NiCr arabağlayıcı, (3) Altlık gri dökme demir

Şekil A4: Al_2O_3 - TiO_2 seramik kaplamalı diskte ısı iletiminin analizi

[26] u/g/y: Uzunluk, Genişlik, Yükseklik

[27] Taşınım ve ışınımın oluştuğu disk alanı= Diskin süpürülen alanı - Balatanın yüzey alanı

Tablo A3: Sıcaklıkla fren zayıflaması I için örnek hesaplamalar

Diskler	Frenleme Say.	Frenleme Hızı	Bırakma Hızı	Frenleme Hızı	Bırakma Hızı	Frenleme Süresi	Yuvarlanma ve Aerodinamik Etkili Hız	Kinetik Enerji	Tek Teker Kinetik Enerjisi	Isı Akısı	Frenleme İvmesi	Min. Tork	Ort. Tork	Mak. Tork
		km/h	km/h	m/s	m/s	s	m/s	J	J	W	m/s^2	Nm	Nm	Nm
D1	1	99,7	4,9	27,70	1,37	6,94	27,31	392344,89	146638,90	21132,57	3,79	703	738	776
	2	99,8	5,0	27,73	1,40	6,98	27,34	393178,67	146950,53	21053,08	3,77	677	729	787
	3	100,0	5,0	27,79	1,40	7,02	27,40	394938,30	147608,19	21041,79	3,76	692	721	764
	4	99,7	4,9	27,70	1,37	7,00	27,31	392344,89	146638,90	20957,40	3,76	680	720	754
	5	99,6	4,9	27,67	1,37	7,01	27,28	391467,53	146310,99	20871,75	3,75	679	720	750
	6	99,6	4,9	27,67	1,37	7,05	27,28	391467,53	146310,99	20765,11	3,73	683	719	744
	7	99,7	4,9	27,70	1,37	7,08	27,31	392344,89	146638,90	20711,71	3,72	676	718	742
	8	99,9	4,9	27,76	1,37	7,08	27,37	394102,57	147295,83	20798,62	3,73	680	718	744
	9	99,9	4,9	27,76	1,37	7,07	27,37	394102,57	147295,83	20839,82	3,73	680	718	737
	10	99,8	5,0	27,73	1,40	7,05	27,34	393178,67	146950,53	20849,96	3,74	689	718	740
	11	99,7	4,9	27,70	1,37	7,05	27,31	392344,89	146638,90	20808,70	3,74	690	718	732
	12	99,5	4,9	27,64	1,37	7,08	27,25	390591,14	145983,44	20633,70	3,71	695	718	734
	13	99,6	4,9	27,67	1,37	7,06	27,28	391467,53	146310,99	20712,20	3,72	697	719	738
D3	1	100	4,9	27,78	1,36	7,21	27,39	394631,85	147493,65	20456,82	3,66	623	737	807
	2	100	4,9	27,83	1,36	7,62	27,44	396238,57	148094,17	19434,93	3,47	580	731	850
	3	99,9	4,9	27,75	1,36	7,26	27,36	393829,71	147193,85	20274,64	3,64	510	723	893
	4	99,9	4,9	27,75	1,36	7,34	27,36	393829,71	147193,85	20053,66	3,59	491	715	957
	5	99,8	4,9	27,72	1,36	7,44	27,33	393028,38	146894,36	19743,87	3,54	443	707	972
	6	99,9	4,9	27,75	1,36	7,55	27,36	393829,71	147193,85	19495,87	3,5	422	700	981
	7	99,9	4,9	27,75	1,36	7,5	27,36	393829,71	147193,85	19625,85	3,52	412	701	991
	8	99,8	4,9	27,72	1,36	7,55	27,33	393028,38	146894,36	19456,21	3,49	402	699	1009
	9	99,8	4,8	27,72	1,33	7,47	27,33	393067,86	146909,11	19666,55	3,53	397	702	1080
	10	99,8	4,9	27,72	1,36	7,47	27,33	393028,38	146894,36	19664,57	3,53	407	705	1020
	11	99,9	4,9	27,75	1,36	7,38	27,36	393829,71	147193,85	19944,97	3,57	415	711	1006
	12	99,9	4,9	27,75	1,36	7,77	27,36	393829,71	147193,85	18943,87	3,4	436	712	1015
	13	99,8	4,8	27,72	1,33	7,39	27,33	393067,86	146909,11	19879,45	3,57	449	712	1027
D4	1	99,9	4,9	27,75	1,36	7,18	27,36	393829,71	147193,85	20500,54	3,68	669	738	780
	2	100	4,9	27,83	1,36	7,6	27,44	396238,57	148094,17	19486,07	3,48	663	735	783
	3	99,9	4,9	27,75	1,36	7,26	27,36	393829,71	147193,85	20274,64	3,64	669	734	788
	4	99,8	4,8	27,72	1,33	7,23	27,33	393067,86	146909,11	20319,38	3,65	670	735	791
	5	99,9	4,9	27,75	1,36	7,59	27,36	393829,71	147193,85	19393,13	3,48	666	736	797
	6	99,9	4,9	27,75	1,36	7,24	27,36	393829,71	147193,85	20330,64	3,65	609	732	793
	7	99,7	4,9	27,69	1,36	7,62	27,30	392227,86	146595,16	19238,21	3,45	642	732	801
	8	100	4,9	27,83	1,36	7,26	27,44	396238,57	148094,17	20398,65	3,64	638	731	804
	9	99,7	4,9	27,69	1,36	7,26	27,30	392227,86	146595,16	20192,17	3,63	625	729	803
	10	100	4,9	27,78	1,36	7,27	27,39	394631,85	147493,65	20287,99	3,64	610	728	804
	11	99,8	4,9	27,72	1,36	7,28	27,33	393028,38	146894,36	20177,80	3,62	622	728	810
	12	99,7	4,9	27,69	1,36	7,27	27,30	392227,86	146595,16	20164,40	3,62	630	730	819
	13	99,8	4,9	27,72	1,36	7,61	27,33	393028,38	146894,36	19302,81	3,46	634	731	822
D5	1	100	4,9	27,78	1,36	7,92	27,39	394631,85	147493,65	18622,94	3,34	622	746	879
	2	99,8	4,9	27,72	1,36	8,01	27,33	393028,38	146894,36	18338,87	3,29	574	733	859
	3	99,6	4,9	27,67	1,36	8,03	27,27	391428,16	146296,28	18218,71	3,28	553	730	845
	4	99,7	4,9	27,69	1,36	8,07	27,30	392227,86	146595,16	18165,45	3,26	542	726	847
	5	99,7	5	27,69	1,39	8,08	27,30	392187,57	146580,10	18141,10	3,25	525	723	852
	6	99,8	4,9	27,72	1,36	8,11	27,33	393028,38	146894,36	18112,74	3,25	534	723	851
	7	99,6	4,9	27,67	1,36	8,13	27,27	391428,16	146296,28	17994,62	3,24	535	720	854
	8	99,8	4,9	27,72	1,36	8,12	27,33	393028,38	146894,36	18090,44	3,25	531	721	853
	9	99,8	4,9	27,72	1,36	8,12	27,33	393028,38	146894,36	18090,44	3,25	528	719	865
	10	99,7	4,9	27,69	1,36	8,11	27,30	392227,86	146595,16	18075,85	3,25	533	721	861
	11	99,6	4,9	27,67	1,36	8,12	27,27	391428,16	146296,28	18016,78	3,24	517	719	849
	12	99,6	4,9	27,67	1,36	8,08	27,27	391428,16	146296,28	18105,97	3,25	531	724	853
	13	99,7	58,6	27,69	16,28	4	27,30	253435,53	94721,53	23680,38	2,85	528	715	862

Tablo A3: Sıcaklıkla fren zayıflaması I için örnek hesaplamalar (Devam)

Diskler	Frenleme Say.	Min. Basınç	Ort. Basınç	Mak. Basınç	Min Sür. Kat.	Ort. Sür. Kat.	Mak. Sür. Kat.	Diskin İlk Sıc.	Diskin Son Sıc.	Diskin İlk Sıc.	Diskin Son Sıc.	Kaplama İletim Katsayısı	Arayüzey Bağlayıcı İletim Katsayısı	Orijinal Disk İletim Katsayısı	Balata İletim Katsayısı
		bar	bar	bar	-	-	-	°C	°C	K	K	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK
D1	1	52,6	54,8	57,7	0,289	0,309	0,32	100	212	372,81	485,48	48,00	....	48,00	1,21
	2	39,5	41,3	45,9	0,341	0,406	0,43	198	316	471,28	589,41	48,00	....	48,00	1,21
	3	34,6	40,6	50,5	0,318	0,412	0,48	284	417	557,10	690,24	48,00	....	48,00	1,21
	4	36,8	43,7	52,7	0,298	0,383	0,45	329	452	601,94	725,40	48,00	....	48,00	1,21
	5	39,2	47,1	55,0	0,285	0,354	0,42	367	478	640,15	751,40	48,00	....	48,00	1,21
	6	41,0	50,2	58,9	0,267	0,332	0,40	397	507	670,51	779,80	48,00	....	48,00	1,21
	7	41,7	51,3	60,0	0,259	0,325	0,40	421	526	694,51	798,85	48,00	....	48,00	1,21
	8	41,8	51,9	60,9	0,258	0,320	0,39	444	548	717,59	821,06	48,00	....	48,00	1,21
	9	41,7	52,1	60,2	0,260	0,319	0,39	465	562	738,13	834,69	48,00	....	48,00	1,21
	10	41,4	51,9	60,3	0,263	0,321	0,39	482	574	754,66	847,02	48,00	....	48,00	1,21
	11	41,5	51,9	60,6	0,264	0,321	0,39	496	584	769,47	857,56	48,00	....	48,00	1,21
	12	41,8	51,9	61,1	0,262	0,321	0,39	511	595	783,83	868,59	48,00	....	48,00	1,21
	13	41,7	51,0	59,9	0,275	0,327	0,39	525	604	798,28	877,10	48,00	....	48,00	1,21
D3	1	35,3	39,6	45,1	0,36	0,43	0,48	99	272	372,15	545,15	30,00	....	48,00	1,21
	2	35,7	40,6	43,1	0,36	0,41	0,48	205	391	478,15	664,15	30,00	....	48,00	1,21
	3	31,4	44,2	52,8	0,31	0,38	0,53	287	452	560,15	725,15	30,00	....	48,00	1,21
	4	31,1	49,1	66,9	0,24	0,35	0,57	330	482	603,15	755,15	30,00	....	48,00	1,21
	5	29,6	56,6	86,5	0,18	0,32	0,62	366	512	639,15	785,15	30,00	....	48,00	1,21
	6	29,1	60,6	95,7	0,16	0,31	0,61	397	528	670,15	801,15	30,00	....	48,00	1,21
	7	29,5	58,7	94,4	0,16	0,32	0,61	422	565	695,15	838,15	30,00	....	48,00	1,21
	8	29,1	56,4	94,6	0,16	0,32	0,58	445	565	718,15	838,15	30,00	....	48,00	1,21
	9	28,4	50,7	87	0,17	0,35	0,59	464	581	737,15	854,15	30,00	....	48,00	1,21
	10	29,9	47	81,6	0,18	0,37	0,6	482	609	755,15	882,15	30,00	....	48,00	1,21
	11	29,6	43,9	72,6	0,18	0,39	0,62	497	620	770,15	893,15	30,00	....	48,00	1,21
	12	29,3	42,7	72,4	0,18	0,4	0,63	512	630	785,15	903,15	30,00	....	48,00	1,21
	13	28,3	40,4	70,9	0,2	0,42	0,64	525	624	798,15	897,15	30,00	....	48,00	1,21
D4	1	38,5	44,6	48,4	0,34	0,38	0,45	99	220	372,15	493,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	2	41,1	44,1	46,9	0,35	0,38	0,41	197	322	470,15	595,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	3	40,5	44,4	47,9	0,35	0,38	0,41	276	413	549,15	686,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	4	39,7	44,5	48,1	0,35	0,38	0,42	329	468	602,15	741,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	5	39,9	43,9	47,6	0,35	0,39	0,42	367	499	640,15	772,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	6	38,9	43,9	46,8	0,35	0,38	0,41	397	528	670,15	801,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	7	40,3	43,7	46,3	0,36	0,39	0,42	421	553	694,15	826,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	8	39,1	43,1	46,6	0,35	0,39	0,44	445	571	718,15	844,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	9	37,4	41,9	46,8	0,35	0,4	0,46	464	586	737,15	859,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	10	35,3	40,8	46	0,36	0,41	0,47	482	597	755,15	870,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	11	35,3	39,7	44,6	0,36	0,42	0,49	497	612	770,15	885,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	12	34,9	39	43,5	0,38	0,43	0,49	511	626	784,15	899,15	14,00	11,30	48,00	1,21
	13	35,2	39,1	43	0,38	0,43	0,48	525	634	798,15	907,15	14,00	11,30	48,00	1,21
D5	1	52,1	67,1	77,9	0,2	0,26	0,34	94	276	367,15	549,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	2	56,5	66,7	74,3	0,21	0,25	0,32	191	358	464,15	631,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	3	57,4	68,9	74,2	0,21	0,24	0,28	269	422	542,15	695,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	4	57,8	72,2	79,2	0,2	0,23	0,28	330	478	603,15	751,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	5	57,3	73,6	82,9	0,19	0,23	0,27	366	514	639,15	787,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	6	59,1	74,5	86,1	0,19	0,22	0,27	397	546	670,15	819,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	7	59,7	74,6	85,5	0,19	0,22	0,27	421	564	694,15	837,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	8	59,7	73,7	86	0,19	0,23	0,27	444	587	717,15	860,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	9	57,3	72,3	85,1	0,19	0,23	0,28	464	603	737,15	876,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	10	56,3	71,2	81,8	0,19	0,23	0,28	482	621	755,15	894,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	11	54,1	70,3	81,7	0,19	0,24	0,29	496	634	769,15	907,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	12	55,4	68,7	74,2	0,2	0,24	0,29	511	653	784,15	926,15	1,70	11,30	48,00	1,21
	13	52,3	66,1	71	0,21	0,25	0,3	525	647	798,15	920,15	1,70	11,30	48,00	1,21

Tablo A3: Sıcaklıkla fren zayıflaması I için örnek hesaplamalar (Devam)

Diskler	Frenleme Say.	Taşınım Katsayısı	Diskin Yüzey Emisivitesi	Stefan-Boltzman sabiti	Diskin Termik Difüzivitesi	Balata Termik Difüzivitesi	Kaplama Kalınlığı	Arabağlayıcı Kalınlığı	Diskin Orta Nokta Kalınlığı	Süpürülen Disk Alanı	Taşınım ve Işınımın Oluştuğu Disk Alanı	Balata Alanı	Orantısal Isı Faktörü	İletim Direnci
		W/m^2K	-	W/m^2K^4	m^2/s	m^2/s	m	m	m	m^2	m^2	m^2	-	K/W
D1	1	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	2	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	3	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	4	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	5	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	6	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	7	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	8	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	9	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	10	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	11	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	12	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
	13	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	....	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9995	0,0025
D3	1	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	2	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	3	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	4	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	5	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	6	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	7	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	8	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	9	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	10	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	11	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	12	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
	13	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,001	....	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9992	0,0036
D4	1	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	2	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	3	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	4	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	5	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	6	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	7	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	8	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	9	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	10	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	11	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	12	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
	13	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	0,0003	0,00005	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9984	0,0034
D5	1	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	2	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	3	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	4	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	5	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	6	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	7	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	8	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	9	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	10	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	11	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	12	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131
	13	113,50	0,55	$5,7.10^{-8}$	3.10^{-7}	16.10^{-6}	$5,5.10^{-4}$	3.10^{-5}	0,0038	0,030949	0,061006	0,00421	0,9869	0,0131

Tablo A3: Sıcaklıkla fren zayıflaması I için örnek hesaplamalar (Devam)

Diskler	Frenleme Say.	İç Balatanın İlk Sıc.	İç Balatanın Son Sıc.	Dış Balatanın İlk Sıc.	Dış Balatanın Son Sıc.	Taşınımla Isı Geçişi	Işınımla Isı Geçişi	Net Isı Akısı	Diskin Fark Sıc.	Diskin Orta Nokta Sıc.	Diskin Orta Nokta Sıc.
		°C	°C	°C	°C	W	W	W	K	K	°C
D1	1	77	87	72	81	1284,31	90,75	19747,58	49,85	435,63	162,48
	2	110	129	106	123	2003,91	215,33	18823,96	47,52	541,89	268,74
	3	156	175	152	172	2702,10	418,63	17911,18	45,21	645,03	371,88
	4	210	224	212	226	2945,53	514,07	17487,95	44,15	681,25	408,10
	5	248	261	251	264	3125,57	594,18	17142,20	43,27	708,13	434,98
	6	279	292	282	294	3322,24	691,72	16741,40	42,26	737,54	464,39
	7	306	317	308	322	3454,10	763,37	16484,51	41,61	757,23	484,08
	8	327	339	330	344	3607,94	853,70	16327,21	41,22	779,85	506,70
	9	346	358	350	362	3702,32	912,88	16214,83	40,93	793,76	520,61
	10	362	373	366	378	3787,70	968,96	16083,51	40,60	806,42	533,27
	11	376	388	380	391	3860,67	1018,88	15919,38	40,19	817,38	544,23
	12	389	401	393	405	3937,03	1073,12	15613,87	39,41	829,18	556,03
	13	401	413	405	416	3995,91	1116,38	15590,18	39,35	837,74	564,59
D3	1	93	118	91	116	1697,46	153,43	18590,56	66,95	478,20	205,05
	2	140	170	137	165	2521,44	356,62	16542,27	59,57	604,58	331,43
	3	193	225	193	219	2943,82	513,35	16802,24	60,51	664,64	391,49
	4	245	272	244	270	3151,54	606,44	16280,61	58,63	696,52	423,37
	5	285	310	285	310	3359,27	711,32	15658,45	56,39	728,76	455,61
	6	316	338	315	339	3470,05	772,40	15238,78	54,88	746,27	473,12
	7	341	360	337	360	3726,25	928,35	14956,51	53,86	784,29	511,14
	8	360	379	358	380	3726,25	928,35	14787,00	53,25	784,90	511,75
	9	376	395	374	396	3837,03	1002,51	14812,23	53,34	800,81	527,66
	10	392	412	389	412	4030,91	1142,70	14476,19	52,13	830,02	556,87
	11	406	427	403	427	4107,08	1201,56	14621,35	52,66	840,49	567,34
	12	420	443	418	443	4176,32	1256,98	13496,33	48,61	854,54	581,39
	13	433	458	431	456	4134,77	1223,51	14506,23	52,24	844,91	571,76
D4	1	94	118	93	122	1337,41	97,63	19032,53	63,94	429,21	156,06
	2	135	166	137	171	2043,67	224,46	17186,60	57,74	537,41	264,26
	3	182	213	188	222	2673,77	408,43	17159,82	57,65	628,50	355,35
	4	229	258	240	269	3054,60	561,59	16670,51	56,01	685,14	411,99
	5	267	294	280	307	3269,25	664,36	15428,32	51,83	720,32	447,17
	6	297	322	311	338	3470,05	772,40	16055,49	53,94	747,21	474,06
	7	324	349	338	365	3643,16	875,44	14688,67	49,35	776,80	503,65
	8	348	372	361	389	3767,79	955,66	15642,38	52,55	791,60	518,45
	9	370	393	381	407	3871,66	1026,55	15261,49	51,27	807,88	534,73
	10	390	410	398	423	3947,82	1080,95	15226,58	51,16	818,99	545,84
	11	406	425	413	438	4051,68	1158,53	14935,12	50,18	834,97	561,82
	12	421	438	427	453	4148,62	1234,59	14748,75	49,55	849,60	576,45
	13	433	449	440	470	4204,02	1279,68	13788,06	46,32	860,83	587,68
D5	1	84	145	94	198	1725,16	158,44	16495,50	215,49	333,66	60,51
	2	142	204	163	290	2292,94	288,00	15517,81	202,72	428,43	155,28
	3	197	263	226	389	2736,09	431,11	14812,96	193,51	501,64	228,49
	4	247	311	282	504	3123,84	593,37	14210,39	185,64	565,51	292,36
	5	284	346	325	571	3373,11	718,75	13811,70	180,43	606,72	333,57
	6	317	384	359	636	3594,69	845,63	13435,27	175,51	643,64	370,49
	7	345	427	383	668	3719,32	923,85	13115,83	171,34	665,81	392,66
	8	371	565	410	635	3878,58	1031,41	12943,58	169,09	691,06	417,91
	9	397	549	425	630	3989,37	1111,51	12752,69	166,60	709,55	436,40
	10	411	599	444	637	4114,00	1207,02	12518,16	163,53	730,62	457,47
	11	428	568	455	691	4204,02	1279,68	12297,18	160,65	746,50	473,35
	12	439	547	487	715	4335,58	1391,64	12141,68	158,62	767,53	494,38
	13	448	537	496	762	4294,03	1355,53	17720,76	231,50	688,65	415,50

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve ortaokulu bitirdikten sonra 1988 yılında Trabzon Endüstri Meslek Lisesi İş Makineleri bölümünü kazandı. 1992 yılında Motor Teknik Lisesinden mezun oldu. 1992 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünü kazandı. 1996 yılında Otomotiv Öğretmeni olarak mezun oldu. 1996-1999 yılları arasında "Toplu Taşıma Araçlarında Otomatik Vites Kutusu Uygulaması ve İşletme Maliyetlerine Etkisi" konulu tez çalışmasıyla yüksek lisansını tamamladı. 1997-2000 yılları arasında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. Araştırmacı şu anda İstanbul Büyükşehir Belediyesi Otopark İşletmeleri Ticaret A.Ş.'de (İSPARK) Etüt Plan ve Proje Müdürü olarak çalışmakta, Otohaber Dergisinde "Teknik Danışman ve Okuyucu Soruları Editörlüğü"nü yürütmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.