



## Online optimization of engine control unit to satisfy performance and drivability metrics

Özer Ulucay<sup>1\*</sup>, Selim Sivrioğlu<sup>2</sup>, Muammer Özkan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gebze Technical University, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Piri Reis University, 34940, Tuzla, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>Division of Automotive, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Machinery, Yıldız Technical University, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

### Highlights:

- Determination of combined cost function for performance and drivability attributes
- Performance and drivability optimization over against changes due to mechanical wear and aging
- Tracking system operation and diagnose throughout the life span of the vehicle

### Keywords:

- Engine control unit
- Drivability and performance
- Driveline anti-jerk control
- Parameter optimization
- Response surface methodology

### Article Info:

Research Article

Received: 31.12.2022

Accepted: 27.11.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1226530

### Acknowledgement:

This work was supported by Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.

### Correspondence:

Author: Özer Ulucay

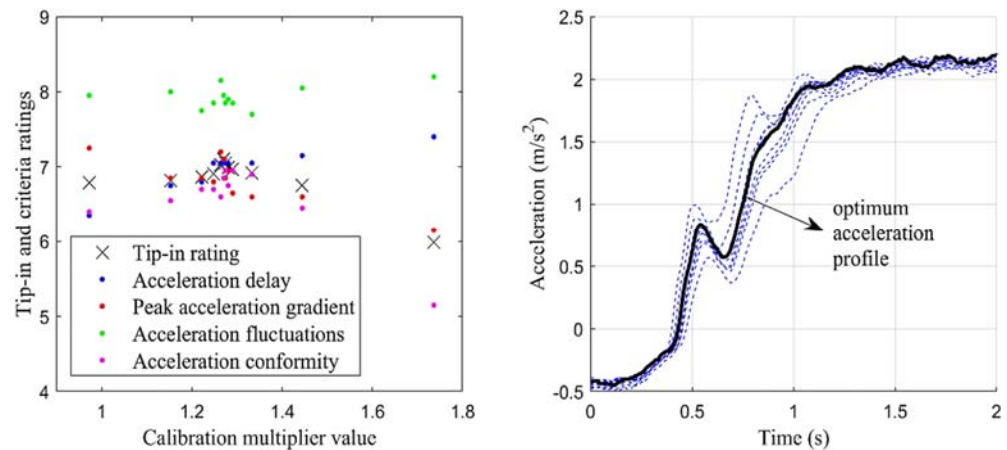
e-mail:

ozarulucay@gtu.edu.tr

phone: +90 532 658 7918

### Graphical/Tabular Abstract

A self-tuning algorithm that yields optimized performance and drivability is proposed and validated. As an example, 2<sup>nd</sup> gear 1500rpm 50% accelerator pedal optimization maneuvers' results are given in Figure A.



**Figure A.** Tip-in and criteria ratings & acceleration profiles from 2<sup>nd</sup> gear 1500rpm 50% accelerator pedal optimization maneuvers

**Purpose:** The purpose of this study is to develop combined objective evaluation metrics for drivability and performance attributes and a self-tuning algorithm that yields optimized performance and drivability based on developed metrics throughout the life span of the vehicle over against changes due to wear and aging.

**Theory and Methods:** Firstly, to demonstrate method performance, tip-in during deceleration maneuver is selected, and event detection conditions are defined. For assessments, drivability and performance criteria are determined. Design of experiments is prepared and performed with small passenger and light commercial vehicles. For subjective assessments, each criterion is rated separately and is done by means of drive rating from 1 to 10 based on developed rating scale. Response surface methodology is adopted to correlate objective data and subjective assessments, and rating functions for each criterion are formulated. For combined objective evaluation, overall tip-in rating is also formulated from criteria ratings using correction factors for each rating and weight factors of each criterion. To demonstrate effectiveness of the proposed method optimization is studied online on a test vehicle. Golden section algorithm, and a multiplier value that updates the look-up table which defines torque rate based on instantaneous torque is used for optimization. The proposed methodology is applied and validated in the vehicle.

**Results:** For models developed for criteria functions, root mean square error of residuals are all below 0.2531 (between 0.1139 and 0.2531) and coefficient of determination values are all above 0.9252 (between 0.9901 and 0.925) which shows strong relationship between objective measurements and subjective assessments. Furthermore, ratings from developed tip-in rating function and experts' subjective results are within +/-0.1 rating range which represents the validity of the optimization process.

**Conclusion:** The methodology has been proven to be successful both in vehicle evaluations and in providing online performance and drivability optimization. The recommended software structure is suitable for diagnostics purposes to track changes in system operation and avoid system failures. In addition, the proposed methodology can reduce vehicle testing time and development costs, and it is easy to apply without any expertise. Moreover, it has high potential to be used in an engine control unit due to its simplicity.



## Performans ve sürülebilirlik ölçütlerini sağlamak için motor kontrol ünitesinin çevrimiçi optimizasyonu

Özer Ulucay<sup>1\*</sup>, Selim Sivrioğlu<sup>2</sup>, Muammer Özkan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Piri Reis Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34940, Tuzla, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Performans ve sürülebilirlik nitelikleri için birleşik maliyet fonksiyonunun belirlenmesi
- Mekanik aşınma ve yaşlanma nedeniyle meydana gelen değişikliklere karşı performans ve sürülebilirlik optimizasyonu
- Aktarma organlarının takip edilmesi, değerlendirilmesi ve tanılama yapılmasına olanak verilmesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.12.2022

Kabul: 27.11.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1226530

### Anahtar Kelimeler:

Motor kontrol ünitesi,  
sürülebilirlik ve performans,  
tepkî yüzey metodolojisi,  
aktarma organı salınımları  
ölçme kontrolü,  
parametre optimizasyonu

### ÖZ

Otomotiv kontrol modüllerinde, sistem kontrolü için kalibrasyon parametreleri kullanılmaktadır ve optimum performans için optimize edilmeleri gerekmektedir. Araçların başlangıç performansları ve sürülebilirlikleri, kullanım mesafesi ve şartlarına bağlı olarak ortaya çıkan yıpranmalardan olumsuz etkilenir. Fakat mevcut motor kontrol ünitelerinin yazılım yapısı, güç aktarım sisteminin işleyişindeki değişikliklerin izlenmesine izin vermemektedir. Bu makalenin özgün yönü, mekanik aşınma ve yaşlanma nedeniyle aracın pedal kumandasına verdiği cevapta meydana gelen olumsuz değişikliklere karşı aracın ömrü boyunca optimize edilmiş performans ve sürülebilirlik sağlayan ve sistemi kendi kendine kalibre etmesi prensibine dayanan bir algoritma önermesidir. Sürücü memnuniyeti için gerek sürülebilirlik gerekse performans özellikleri dikkate alınmalıdır. Araç değerlendirmeleri için nesnel metriklerin mevcut olmaması ve uygulamada öznel değerlendirme kullanılması nedeniyle, sürülebilirlik ve performans özelliklerinin onayı hem zaman almakta hem de uzmanlık gerektirmektedir. Çalışmanın benzerlerinden farklı bir diğer yönü, performans ve sürülebilirlik özellikleri için birleşik bir maliyet fonksiyonunun belirlenmesidir. Algoritmanın çalıştığını göstermek için yavaşlama esnasında gaz pedalına hızlı basış manevrası seçilmiş ve deney tasarımı hazırlanarak küçük binek ve hafif ticari araçlarla kontrollü ortamda testler gerçekleştirilmiştir. Nesnel verilerle öznel değerlendirmeleri ilişkilendirmek için yanıt yüzeyi metodolojisi ve optimizasyon için altın kesit algoritması kullanılmıştır. Önerilen metodoloji uygulanarak araç değerlendirmeleri ve çevrimiçi optimizasyonda başarılı olduğu doğrulanmış ve alınan sonuçlar sunulmuştur. Fizibilite ve gelecekte yapılabilecek potansiyel çalışmalar tartışılmıştır.

## Online optimization of engine control unit to satisfy performance and drivability metrics

### H I G H L I G H T S

- Determination of combined cost function for performance and drivability attributes
- Performance and drivability optimization over against changes due to mechanical wear and aging
- Enable tracking system operation and diagnose throughout the life span of the vehicle

### Article Info

Research Article

Received: 31.12.2022

Accepted: 27.11.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1226530

### Keywords:

Engine control unit,  
drivability and performance,  
response surface methodology,  
driveline anti-jerk control,  
parameter optimization

### ABSTRACT

In automotive control modules, lookup tables are used for system control and parameter optimization is necessary for optimum performance. The initial performance and drivability of vehicles are adversely affected depending on the distance and conditions of use; however, current engine control unit software structure does not allow tracking changes in powertrain system control. The original aspect of this article is that it proposes a self-tuning algorithm that yields optimized performance and drivability throughout the life span of the vehicle over against changes due to mechanical wear and aging. Besides, for driver satisfaction both drivability and performance attributes must be considered. Optimization takes time and requires expertise for drivability and performance attributes since objective metrics are not available and generally subjective assessment is used for signoff. Therefore, another challenging aspect of this work is determination of a combined cost function for performance and drivability attributes. For vehicle assessments tip-in maneuver is selected, and design of experiments is prepared and performed with small passenger and light commercial vehicles in controlled environment. Response surface methodology is adopted to correlate objective data and subjective assessments, and golden section algorithm is used for optimization. The proposed methodology is applied, validated and results are presented. Feasibility and potential areas of future work are also discussed.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*ozerulucay@gtu.edu.tr, ssivrioğlu@pirireis.edu.tr, muaozkan@yildiz.edu.tr /  
Tel: +90 532 658 7918

## 1. Giriş (Introduction)

Sürülebilirlik sürücünün sürüş kalitesi algısı ve aracın sürücüyü ne kadar iyi yanıt verdiği olarak tanımlanır. Araçta aktarma organları bileşenlerinin esnekliği nedeniyle tork geçişleri sırasında burulma titreşimleri meydana gelir. Bu salınımlar malzeme gerilimi haricinde hem performans hem de sürülebilirliği olumsuz etkilemektedir [1]. Özellikle araçta oluşabilecek salınımların sönümlenmesi sürüş konforu ve sürücü memnuniyeti için gereklidir [2]. Bu çalışma ile ilk olarak performans ve sürülebilirlik değerlendirmesi için gerekli kriterler tanımlanmış ve öznel değerlendirmeler ve nesnel ölçümler arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Sonrasında performans ve sürülebilirliğin birleşik değerlendirmesi için maliyet fonksiyonu geliştirilmiş ve mevcut motor kontrol ünitesi kalibrasyon parametrelerinin çevrimiçi güncellenmesi üzerine optimizasyon çalışılmıştır.

## 2. Motivasyon ve Arka Plan (Motivation and Background)

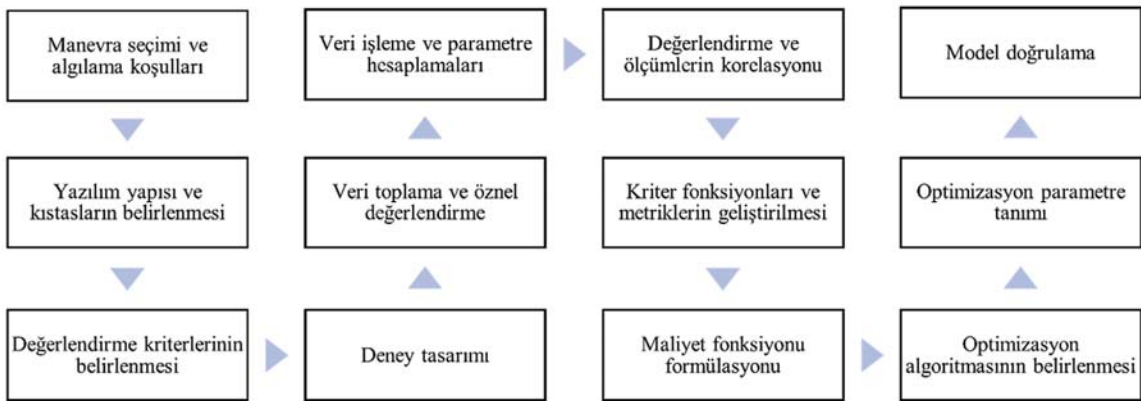
Araç sürülebilirliği ve performans değerlendirmeleri, sürülebilirlik kontrolü ve motor kontrol ünitesi parametre optimizasyonu konularında literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. İlk olarak, sürülebilirlik özelliği için nesnel değerlendirme metriği geliştirme sektörteki ana zorluklardan biridir. Metriğin ölçülen bir sinyalden ve onun istenen değerinden hesaplanan hata olarak belirlendiği birçok özneliğin aksine, nesnel metrikler sürülebilirlik özelliği için belirlenmiş ve hazır değildir. Genel olarak, değerlendirmeler teknik uzmanlar ve sürüş bilirciği tarafından öznel olarak gerçekleştirilir. Bu amaçla bazı araştırmacılar araç dinamik performansını araştırmıştır [3] ve sürüş konforuna odaklanan bazı çalışmalar da bulunmaktadır [4]. Bununla birlikte, sürülebilirlik ve performans arasındaki etkileşimin dikkate alınması ve birleşik değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, öznel değerlendirmeler ve nesnel ölçümler arasındaki korelasyon araştırılmış ve performans ve sürülebilirlik niteliklerinin değerlendirilmesi için gerekli bütün kriterleri dikkate alan birleşik değerlendirme yapılması sağlanmıştır. Literatürde nesnel ölçümler ve öznel değerlendirmeler arasındaki korelasyonun kullanıldığı benzer yaklaşımların ergonomi ve dinamik konforu değerlendirmek için kullanıldığını görebiliriz [5]. Ek olarak, güç aktarım sistemleri için donanımsal olarak sürüş konforu ve sönüm sistemi tasarımı konusunda çalışmalar yapılmaktadır [6]. Bu çalışma sürüş konforu ve performans geliştirme için yazılımsal geliştirmeye odaklanmaktadır. Ayrıca, sürülebilirliği değerlendirmek ve geliştirmek için farklı aktarma organları modellerinin geliştirildiği model tabanlı çalışmalar vardır. Ancak model tabanlı yöntemler,

sürülebilirlik için hassas dinamik motor ve aktarma organları modeli gerektirir. Yeni aktüatörlerle birlikte otomotiv kontrolünün karmaşıklığı giderek artmakta ve bu, sistemin fizik modelini temel fiziksel ilkelere göre kurmayı çok zorlaştırmaktadır [7]. Modele dayalı çalışmaların bazılarında sonuçlar umut vericidir ancak sonuçlara ilave olarak kalibrasyon mühendisleri tarafından test sürüşleri sırasında düzeltmeler yapılması gerekmektedir [8]. Bu nedenle, gerçek motor ve araç özelliklerini tam olarak temsil etmek için bu çalışma, bir şase dinamometresi testi veya modele dayalı simülasyondan ziyade bir test pistinde gerçek araç testleri içermektedir. Bu çalışmada, kontrol modülü sinyalleri ve boylamsal ivme kullanılmış olup, değerlendirme, ölçülen ve hesaplanan parametrelere dayanılarak 1'den 10'a kadar değerlendirme ölçütü ile yapılmıştır.

Nesnel değerlendirme çalışmasından sonra, sürülebilirlik ve performans özellikleri için optimizasyon çalışılmıştır. Parametre belirleme optimizasyon için oldukça önemlidir. Kontrol yazılımında kullanılan parametrelerin hassasiyet analizi, motor kalibrasyon optimizasyonu için başka bir ilgi alanıdır. Diğer parametreler sabitlenirken her bir girdinin görelî etkisini araştırarak çalışmalar mevcuttur [9]. Bu çalışmada, torkun değişim oranı kontrolü üzerinden optimizasyon çalışılmıştır. Ayrıca, son yıllarda motor kontrol ünitesi kalibrasyon haritaları için yinelemeli öğrenme kontrol yaklaşımı üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu tür öğrenme algoritmalarının, parçalarının degradasyonuna rağmen motor performansını iyileştirmek için kalibrasyon haritalarını çevrimiçi güncellenmesi için nasıl kullanılabilirliği araştırılmıştır [10, 11]. Bu çalışmaların devamı ve bu alandaki çalışmalara katkı olarak bu makale, daha önce yapılmayan sürüş ve performans özelliklerinin çevrim içi optimizasyonu için motor kontrol ünitesinde kullanılan kalibrasyon parametrelerine uygulanan kendi kendini ayarlayan bir algoritma önermektedir. Çalışmada uygulanan yöntemler ve sırası akış şeması ile Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Sürülebilirlik ve performans özelliklerinin birleşik nesnel değerlendirmesinin formüle edilmesi ve uzmanlık gerektiren öznel sürülebilirlik değerlendirmelerinin nesnel yapılabilmesinin sağlanması.
- Mekanik aşınma ve yaşlanma nedeniyle araç sürüşünde meydana gelen olumsuz değişikliklere karşı aracın ömrü boyunca optimize edilmiş performans ve sürülebilirlik sağlayan bir algoritma geliştirilmesi.



Şekil 1. Uygulanan yöntemlerin akış şeması (Flow chart of applied methods)

- c. Hızlı ve yaklaşık sonuçlar için baskın parametrelerden metriklerin belirlenmesi.
- d. Önerilen algoritmanın uygulanma kolaylığı ve işlemci ve hafıza gereksinimlerine uygunluğu nedeniyle bir motor kontrol ünitesinde kullanım potansiyeli.
- e. Geliştirilen metodolojinin sistem çalışmasındaki değişiklikleri izlemek için tanılama amaçlarına uygun olması.

### 3. Nesnel Değerlendirme Kriterleri (Objective Assessment Criteria)

#### 3.1. Manevra Seçimi (Maneuver Selection)

Araçta hızlanma, yavaşlama, gaz pedalına basma ve bırakma, vites geçişi, sabit hız ve kalkış gibi yapılabilecek farklı manevralar bulunmaktadır. Gaz pedalına basma ve bırakma manevraları sürülebilirlik ve performans değerlendirmeleri için ana manevralardır. Yöntem performansını göstermek için manevra olarak yavaşlama sırasında gaz pedalına basış manevrası seçilmiştir. Gaz pedalına basış manevrası, yavaşlama sırasında gaz pedalına yüksek pedal hızıyla basılması olarak tanımlanır ve Tablo 1'de verilen koşullara göre manevra algılama algoritması geliştirilmiştir.

**Tablo 1.** Manevra algılama koşulları (Maneuver detection conditions)

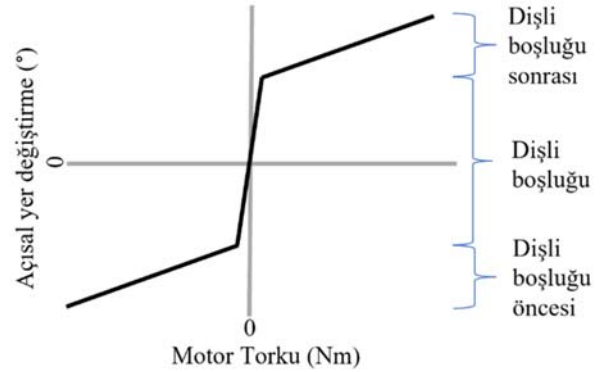
İlk ivmelenme seviyesi $< 0 \text{ m/s}^2$
Vites $> 0$ & fren pedalı $= 0$
Gaz pedal değişimi $\geq \%10$ & gaz pedalı değişimi oranı $> 150 \% / \text{s}$
Manevra süresi $\geq 2 \text{ s}$
Salınımlar sonrası stabil ivme değeri $\geq 0,2 \text{ m/s}^2$ ve ivme değişim miktarı $\geq 0,5 \text{ m/s}^2$

#### 3.2. Motor Tork Aktarma Kontrolü (Engine Torque Transfer Control)

Motor kontrol yazılımında, gaz pedalına basma manevraları sırasında oluşabilecek salınımları önlemek için sarsıntı önleme kontrolcüsü bulunur. Bu işlev, sürücünün talep ettiği tork mevcut torktan daha büyük veya daha düşük olduğunda torku kontrol eder. Gaz pedalına basma manevrası sırasında aktarma organları tork geçişlerine maruz kalır ve aktarma organları parçalarının esnekliği nedeniyle burulma titreşimlerine eğilimlidir [12]. Sarsıntı önleyici kontrol, sönümlü salınımlar olarak da adlandırılan uzunlamasına araç salınımlarını azaltır. Bu salınımlar araç konforunu, sürülebilirliğini ve aktarma organları bileşeninin dayanıklılığını da etkilemektedir [13, 14].

Otomotiv aktarma organlarında bulunan dişli boşluğunun sistemin tepkisinde önemli etkisi bulunmaktadır. Dişli boşluğu torkun işaret değiştirdiği sırada salınımlara neden olur ve sürüş konforunu olumsuz etkiler [15] ve bu oluşan salınımların önlenmesi tork kontrolü ile sağlanmaktadır [16]. Torkun işaret değiştirmesi gaz pedalına basılmadığı motorun kendi sürtünmesi ile negatif torka sahip olduğu bir durumdan en az negatif torku yenecek kadar gaz pedalına basarak pozitif bir tork üretmesi durumunda veya gaz pedalı basılı ve pozitif bir tork üretmesi durumundan gaz pedalının bırakılması ile gerçekleşir. Motor tork kontrolü, dişli boşluğu öncesi, dişli boşluğu sırasında ve dişli boşluğu sonrası olmak üzere aktarma organları durumlarına göre yapılır. Negatif torktan pozitif torka geçişte dişli boşluğu öncesinde tork kontrolünün amacı, yürüyen aksamın negatif torktan sıfır torka geçişini yönetmektir. Motor tarafından aktarma organlarına uygulanan tork sıfır olduğunda, aktarma organları boşluktadır. Dişli boşluğu fazı sırasında, mekanik arayüz nedeniyle tork iletilmez. Motor tork aktarımında negatif torktan pozitif torka veya tersi yönde torkun işaret değiştirdiği sırada tork artış/azalma oranını optimize etmek hem tepki süresini azaltmak hem de salınım ve çökme gibi hata durumlarını önlemek için kritik öneme sahiptir. Dişli boşluğu sonrasında aşamada, salınım önleyici kontrolcü sürücü talebine ulaşana kadar torku sürücü talebine doğru yükseltir.

Her bir durumda tork-açısız yer değiştirme ilişkisi Şekil 2'de gösterilmektedir [17].



**Şekil 2.** Motor tork aktarma aşamaları (Engine torque transfer states)

#### 3.3. Yazılım Yapısı ve Kısıtlar (Software Structure and Constraints)

Kontrol yazılımında, optimum performans için kalibre edilmesi gereken haritalar, eğriler ve tek boyutlu değişkenler vardır. Motor tork kontrol yazılımında optimize edilmesi gereken ana parametreler, anlık tork, gaz pedalı, motor devri ve viteseye dayalı haritalardır.

Bu çalışma için kullanılan yazılımda her vites için gaz pedalı ve motor devri bazlı haritalar ve ayrıca anlık tork ve vites bazında ayrı bir harita daha bulunmaktadır ve bu haritaların çıktıları çarpılarak anlık tork oranı hesaplanmaktadır.

Aktarma organlarındaki salınımları en aza indirmek için dişli boşluğu aşamasında tork artış oranı azaltılır ve tepki süresi ve beklenen performans elde etmek için dişli boşluğu öncesi ve sonrası aşamalarında tork oranı artırılır. Bununla birlikte, tork oranı düşük bir değere ayarlanırsa tepki gecikmesi ve performans hissi eksikliği riskleri vardır. Öte yandan, özellikle torkun işaret değiştirdiği esnada tork oranı yüksekse, salınım ve hatta darbe hatası durumu oluşabilir. Darbe hatası durumu, mekanik bileşenler birbirine çarptığında meydana gelir ve sürücüler tarafından gürültü ve sert tepki olarak hissedilir.

Örnek olarak bir test aracında 2. vites %50 gaz pedalı ile 1500 dev/dk motor devrinde farklı tork artış oranları ile gaz pedalına basış manevraları gerçekleştirilmiştir. Motor tork artış oranı sırasıyla 600 Nm/s, 1800 Nm/s ve 3000 Nm/s olarak ayarlanmış ve sonuç motor devri ve anlık talep tork sinyalleri Şekil 3'te sırasıyla yeşil, mavi ve kırmızı çizgiler olarak gösterilmiştir. Çok düşük tork oranıyla salınım genliklerinin çok düşük ancak performansın zayıf olduğu, öte yandan, tork oranı çok yüksek bir değere ayarlandığında performansın iyi ancak salınım genliğinin yüksek olduğu görülmüştür. Bu örnek, optimum konfor ve performans elde etmek için yazılımdaki kontrol haritalarının kalibre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

#### 3.4. Kriter Belirleme (Criteria Determination)

Sürücüler için temel sürüş konforu ve performans belirleyicileri ivmelenme ve ivmelenmedeki değişimdir. Bu nedenle hızlanma profili, genel performans hissi, aracın sürücü girdilerine tepki süresi, hızlanmadaki ani değişiklikler, ivmelenmedeki ani düşüşler ve salınım genliklerinin objektif değerlendirme için dikkate alınması gereken ana nitelikler olduğuna karar verilmiştir. Sonuç olarak araçta sürülebilirlik ve performans değerlendirmesi için "ivme gecikmesi", "ivme uyumu", "ivme artış hızı" ve "ivme salınımları" olmak üzere 4 kriter belirlenmiştir. Kriterlerden ivme gecikmesi ve ivme uyumu



performans, ivme artış hızı ve ivme salınımları sürüş konforu değerlendirilmesi düşünülerek belirlenmiştir.

İvme gecikmesi kriteri, aracın sürücünün gaz pedalı girdisine tepki süresini değerlendirir. İvme uyumu kriteri, hızlanma ve gaz pedalı pozisyonunun uyumu olarak tanımlanır. İvme artış hızı, boyuna ivme değişim oranını değerlendiren kriterdir. İvme salınımları kriteri, hızlanmadaki dalgalanmaları değerlendiren kriterdir. Her bir kriterin detayları bölüm 4.3'te verilmiştir.

#### 4. Nesnel Ölçümler ve Öznel Değerlendirmeler Arasındaki Korelasyon (Correlation Between Objective Measurements and Subjective Assessments)

Nesnel ölçüm ve öznel değerlendirmeler 2 adet küçük binek araç ve bir hafif ticari araç ile yapılmıştır. Ayrıntılı araç özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir. Testler, test pistinde ve karşılaştırılabilir sonuçlar için aynı test koşullarında; düz yol, rüzgarsız hava ve 20-25°C ortam sıcaklığı; gerçekleştirilmiştir.

Öznel değerlendirmeler ve nesnel ölçümler için deney tasarımı hazırlanmıştır. Her vites için 4 farklı gaz pedalı konumu ve vitesine bağlı olarak 1000 dev/dk'dan 3000 dev/dk'ya kadar 4 ila 6 başlangıç motor devri seviyesi ve düşük viteslerde 500 dev/dk, yüksek

viteslerde 250 dev/dk hızlanma aralıkları kullanılmıştır. Model doğruluğunu geliştirmek için, değişen gaz pedalı oranları ve tork oranları ile her nokta için çoklu testler yapılmıştır.

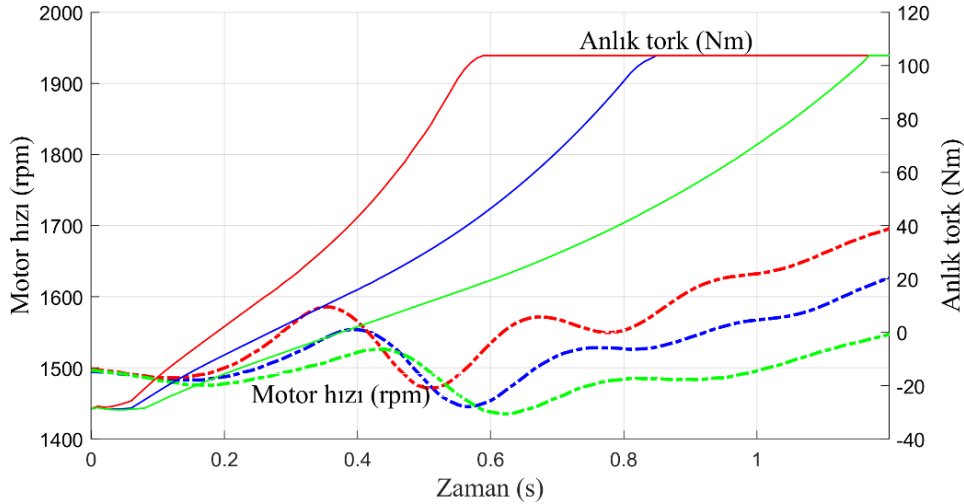
#### 4.1. Öznel Değerlendirmeler (Subjective Assessments)

Öznel notlandırma için her bir kriter ayrı ayrı değerlendirilmiştir ve notlar sürüş uzmanları tarafından 0,25 çözünürlükte verilmiştir. Öznel değerlendirme skalası Tablo 3'te gösterilmektedir.

Değerlendirme sonuçları uzmanlar arasında tartışılarak notlandırma için ortak karar belirlenmeye çalışılmış, ortak karar üzerinde anlaşamadığı durumda değerlendirme notlarının ortalaması kullanılmıştır. 7,0 puana eşit veya daha fazla not alındığı durumda araçtan sürücülerin çoğunun memnun olduğu sonucu çıkmaktadır. 6,5'in altında bir nota sahip araçtan ise sürücüler hoşnutsuz olmaya başlamakta ve notlar düştükçe memnuniyet düzeyi de düşmektedir.

#### 4.2. Nesnel Ölçümler ve Veri İşleme (Objective Measurements and Data Processing)

Nesnel değerlendirmeler için araç testleri sırasında motor kontrol ünitesinden motor devri, araç hızı, gaz pedalı pozisyonu, motor torku, fren pedalı ve vites sinyalleri alınmıştır. Ek olarak, yüksek çözünürlüklü boylamasına ivme bilgisi için araçlara ivmeölçer monte



Şekil 3. Farklı tork artış oranlarının karşılaştırması (Comparison of different torque increase rates)

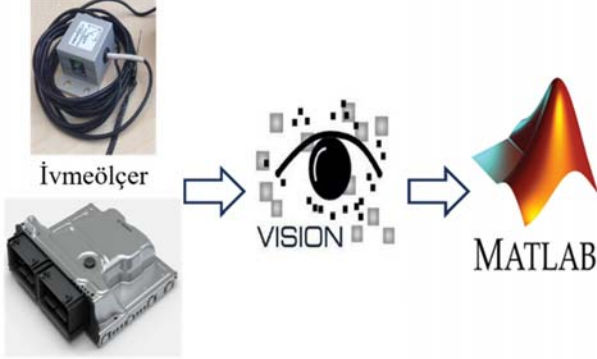
Tablo 2. Test araçlarının özellikleri (Specifications of the test vehicles)

Özellik	Araç #1	Araç #2	Araç #3
Araç Sınıfı	Hafif Ticari	Binek	Binek
Model	Courier	Figo	Fiesta
Motor & güç	DV5FD / 85PS	DV5D / 100PS	DV5FC / 120PS
Emisyon Seviyesi	Euro 6	Euro 6	Euro 6
Şanzıman	6MX65	5MX65	iB6
Aks Oranı	3,55	3,37	3,35
Boş Ağırlık	1450kg	1280kg	1290kg
Teker	195/60R15	185/55R15	195/55R16

Tablo 3. Öznel değerlendirme skalası (Subjective rating scale)

Değerlendirme Endeksi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Performans	Kabul edilemez	Çok zayıf	Zayıf	Sınırdadır	Biraz memnuniyetsiz	Kabul edilebilir	İyi	Çok iyi	Mükemmel	
Sürücü Memnuniyeti	Hiç memnun değil									

edilmiştir. Motor kontrol modülünden ve enstrümantasyondan ölçüm almak için ticari bir araç olan ATI Vision, veri işleme ve hesaplamalar için MATLAB uygulamaları kullanılmıştır. Veri toplama ve işleme akış şeması Şekil 4'te gösterilmiştir.



Motor kontrol ünitesi

Şekil 4. Veri toplama ve işleme akış şeması (Flowchart of data acquisition and processing)

Her bir kriter için notlandırma fonksiyonlarını formüle etmek amacıyla motor kontrol ünitesinden alınan temel sinyaller haricinde bazı parametreler hesaplamalar yapılarak türetilmiştir. Parametre listesi Tablo 4'te verilmiştir ve bazı parametre hesaplamaları Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu parametrelerden gaz pedalı değişim oranı gaz pedal pozisyonunun türevi alınarak, maksimum ivme gradyanı ivme türevinin en yüksek değeri, stabilize ivme gaz pedalına basıldıktan sonra oluşan salınımlar sönümlendikten sonra aracın sahip olduğu stabil ivme değeri, tepki süresi gaz pedalına basma zamanı ile aracın

0,5 m/s<sup>2</sup> uzunlamasına ivme farkına ulaştığı zaman arasındaki süre ve pedal ivme korelasyonu normalize edilmiş gaz pedalı altındaki alan ile normalize edilmiş uzunlamasına ivme altındaki alanın oranı olarak hesaplanmıştır. Hangi parametrenin hangi kriter hesabında kullanıldığı kriterlerin detaylı anlatıldığı bölüm 4.3 alt başlıklarında açıklanmıştır.

Tablo 4. Parametre tablosu (Parameter table)

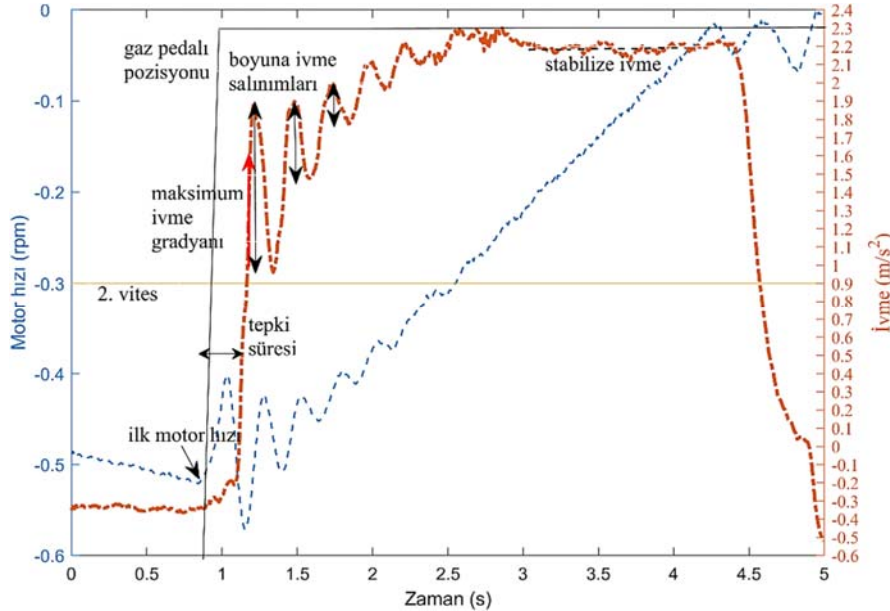
gaz pedalı pozisyonu	stabilize ivme
gaz pedal değişim oranı	boyuna ivme 1. salınım genişliği
ilk motor hızı	boyuna ivme 2. salınım genişliği
başlangıç motor torku	boyuna ivme 3. salınım genişliği
maksimum tork	tepki süresi
vites	maksimum ivme gradyanı
	pedal ivme korelasyonu

Kriter notlandırma fonksiyonlarında kullanılan sinyallerin işlenmesinde alçak geçiren filtre ve hareketli ortalama algoritmaları kullanılmıştır. Araçlarda aktarma organlarının vitese bağlı olarak tipik rezonans frekansları 1 ve 10 Hertz aralığındadır [2, 12, 16, 18]. Bu nedenle aktarma organları kaynaklı salınımlar için 1 Hz. ve 10 Hz. frekans aralığı dikkate alınmıştır. İşlenen sinyaller Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. İşlenmiş sinyaller (Processed signals)

Motor torkunun hareketli ortalaması
İvmenin türevinin hareketli ortalaması
Düşük geçiş filtrelili ivme
İvmenin hareketli ortalaması
Motor hızının hareketli ortalaması

Ayrıca parametre hesaplamaları için Tablo 6'da verilen araç, motor ve şanzıman bilgileri kullanılmıştır.



Şekil 5. Gaz pedalına basış manevrası sırasında hesaplanan bazı parametreler (Some of the calculated parameters during a tip-in event)

Tablo 6. Araç, motor ve şanzıman bilgileri (Vehicle, engine, and transmission information)

Motor tam yük tork eğrisi (Nm)	Araç ağırlığı (kg)
Motor sürtünme eğrisi (Nm)	Tekerlek yuvarlanma yarıçapı (m)
Toplam krank mili ataleti (kg.m <sup>2</sup> )	Araç ön alan (m <sup>2</sup> )
Şanzıman dişli oranları	Hava direnç katsayısı (-)
Şanzıman vites tork limitleri (Nm)	Yol direnç katsayısı (-)

#### 4.3. Kriter Fonksiyonları (Criteria Functions)

İlk olarak Box ve Wilson [19] tarafından geliştirilen yanıt yüzeyi metodolojisi, kriter notlandırma fonksiyonlarını geliştirmek için kullanılmıştır. Yanıt yüzeyi metodolojisi birden çok bağımsız değişkenden etkilenen yanıtları modellemek için kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir koleksiyonudur [20]. Sürüş uzmanlarının öznel değerlendirme sonuçları yanıt değişkeni olarak ve ölçülen sinyaller ve hesaplanan parametreler yanıt yüzeyi metodolojisine bağımsız değişkenler olarak verilmiştir. Modellerde güven düzeyi 0,05 olarak seçilmiştir. Yanıt yüzeyi metodolojisi, çeşitli faktörlerin etkilerini değerlendirmek için bir model sağlamaktadır ve Matlab'ın "rstool" fonksiyonu, derecelendirme işlemlerini elde etmek için kullanılmıştır.

Her bir kriter için ilgili parametreler, sabit, doğrusal ve etkileşim terimlerini içeren etkileşim modeline girdi olarak seçilmiştir. Formülde n'nin parametre sayısı, a<sub>0</sub>'ın sabit terim, a<sub>i</sub> ve a<sub>ij</sub>'nin sırasıyla doğrusal ve etkileşim terimleri katsayıları olduğu ve i ve j'nin parametre sayısı için kullanıldığı parametre değerlerini gösteren x<sub>(i,j)</sub>'yi içeren kriter notlandırma fonksiyonu Eş. 1'de verilmiştir.

$$\text{Kriter notlandırma fonksiyonu} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=2, j \neq i}^n a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Örnek olarak, üç parametrelilik kriter fonksiyonu Eş. 2'deki biçimde olacaktır.

$$3 \text{ parametrelilik kriter fonksiyonu} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 \quad (2)$$

Her kriterin detaylı analizi alt bölümlerde verilmiştir. Her kriter için, her biri yanıt yüzeyinin diğer tüm bağımsız değişkenler sabit tutulduğu durumda tek bir değişkene karşı yanıt yüzeyinin bir konturunu gösteren bir dizi grafik görüntülenmektedir. Fonksiyon ayrıca modellenmiş yanıt yüzeyinin % 95'lik eşzamanlı güven bandını iki kırmızı eğri olarak grafiklerde göstermektedir. Ek olarak, her kriter için öznel değerlendirme notlarına karşılık nesnel notlandırma hesapları gösterilmiştir.

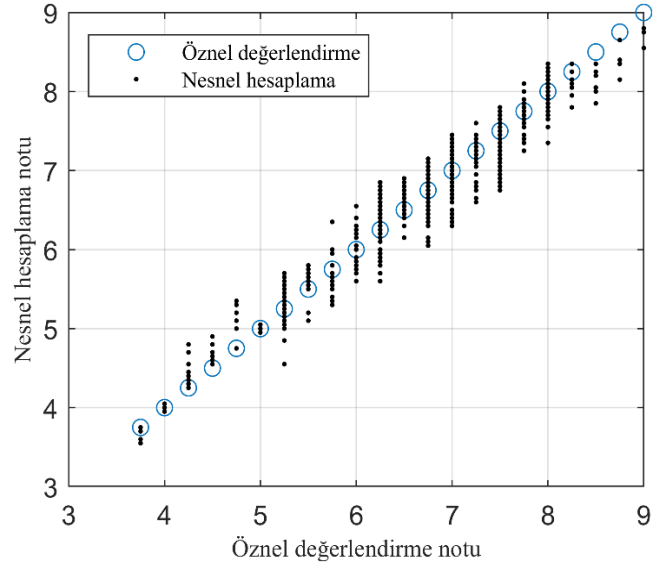
Yanıt yüzeyi modellerinin geçerliliğini ölçmek için belirleme katsayısı (R<sup>2</sup>) ve hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RMS) değerleri kullanılmıştır. Tüm kriterler için, RMS değerleri 0,255'in altında ve R<sup>2</sup> değerleri 0,925'in üzerindedir ve bu sonuçlar nesnel ölçümler ile öznel değerlendirmeler arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve modelin doğruluğunu göstermektedir.

#### 4.3.1. İvme gecikmesi (Acceleration delay)

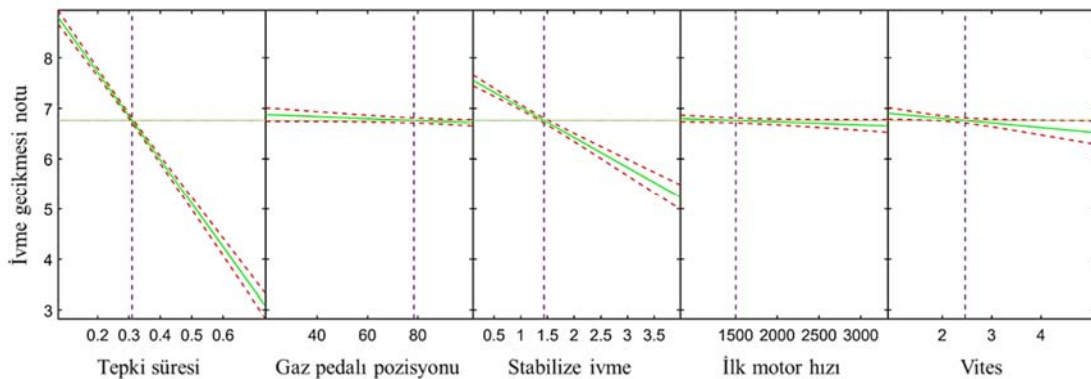
İvme gecikmesi kriteri, aracın sürücünün gaz pedalı girdisine tepki süresini değerlendirmektedir. İvme gecikmesi notlandırma fonksiyonu için kullanılan parametreler motor devri, gaz pedalı pozisyonu, vites, stabilize ivme ve tepki süresidir. Tepki süresi, ivme gecikmesi kriteri için baskın parametredir ve pedal basma süresi ile aracın 0,5 m/s<sup>2</sup> uzunlamasına ivme farkına ulaştığı zaman arasındaki süre olarak formüle edilmiştir.

İvme gecikmesi kriteri için yanıt yüzeyi modeli grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Aynı tepki süreleri için, düşük başlangıç motor devirleri, düşük vitesler ve düşük stabilize ivmeler için kriterin daha yüksek notlar aldığı görülmektedir.

Ek olarak, ivme gecikmesi kriteri için öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması Şekil 7'de verilmiştir. R<sup>2</sup> değeri 0,9267 ve RMS değeri 0,231'dir ve bu sonuçlar öznel değerlendirmeler ile model sonuçları arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. İvme Gecikmesi – Öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması (Acceleration Delay – Subjective assessment rating vs objective calculation rating)



Şekil 6. Çok boyutlu ivme gecikmesi yanıt yüzeyi modelinin tek boyutlu konturları (One-dimensional contours of multidimensional response surface model of acceleration delay)

#### 4.3.2. İvme uyumu (Acceleration conformity)

İvme uyumu kriteri, ivmelenme ve gaz pedalı pozisyonunun uyumu olarak tanımlanmıştır. İvme uyumu notlandırma fonksiyonu için kullanılan parametreler motor devri, gaz pedalı pozisyonu, vites, stabilize ivme ve baskın parametre olan pedal ivme korelasyonudur. Pedal ivme korelasyonu normalize edilmiş gaz pedalı altındaki alan ile normalize edilmiş uzunlamasına ivme altındaki alanın oranı olarak formüle edilmiştir.

İvme uyumu kriteri için yanıt yüzeyi modeli grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Aynı pedal ivme korelasyon değerleri için düşük başlangıç motor devirleri ve düşük stabilize ivme değerleri için kriterin daha yüksek değerlendirildiği görülmektedir.

Ayrıca, ivme uyumu kriteri için öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması Şekil 9'da verilmiştir.  $R^2$  değeri 0,9901 ve RMS değeri 0,1139'dur ve bu değerler öznel değerlendirmeler ile model sonuçları arasında çok güçlü bir korelasyon olduğunu ve modelin verileri temsil etmede çok başarılı olduğunu göstermektedir.

#### 4.3.3. İvme artış hızı (Peak acceleration gradient)

İvme artış hızı, uzunlamasına ivmenin değişimini değerlendiren kriterdir. İvme artış hızı notlandırma fonksiyonu için kullanılan parametreler motor devri, gaz pedalı pozisyonu, gaz pedalı değişim hızı, vites, stabilize ivme ve baskın parametre olan maksimum ivme gradyanıdır.

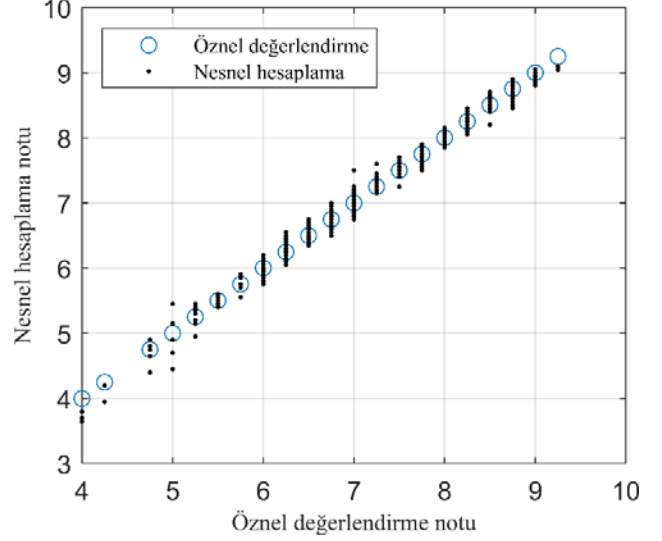
İvme artış hızı kriteri için yanıt yüzeyi modeli grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. Aynı maksimum ivme gradyanı değerleri için yüksek gaz pedalı pozisyonları, yüksek gaz pedalı değişim hızları ve düşük vitesler için kriterin daha yüksek not aldığı görülmektedir.

İvme artış hızı kriteri için öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması Şekil 11'de verilmiştir.  $R^2$  değeri 0,9708 ve RMS değeri 0,1851'dir ve bu sonuçlar modelin başarı düzeyinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

#### 4.3.4. İvme salınımları (Acceleration fluctuations)

İvme salınımları, ivmelenmedeki dalgalanmaları değerlendiren kriterdir. İvme salınımları notlandırma fonksiyonu için kullanılan parametreler motor devri, gaz pedalı pozisyonu, gaz pedalı hızı, vites,

stabilize ivme ve ilk üç boyuna ivme salınım genliğidir. Bu kriter için ana parametre, sarkma olarak da adlandırılabilen ilk negatif salınım genliğidir, ancak diğer salınım genliklerinin de notlandırma hesaplaması üzerinde önemli etkisi vardır.

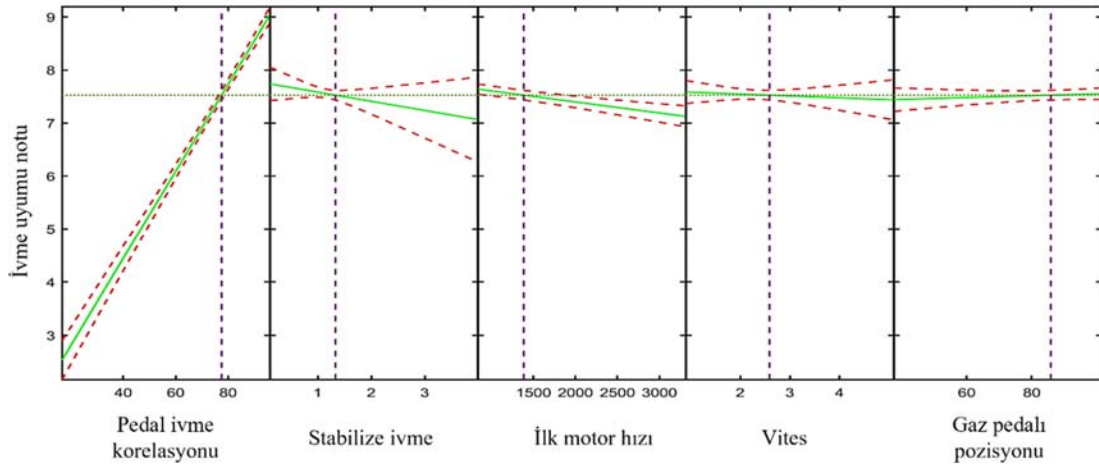


Şekil 9. İvme uyumu – Öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması (Acceleration Conformity – Subjective assessment rating vs objective calculation rating)

İvme salınımları kriteri için yanıt yüzeyi modeli grafikleri Şekil 12'de verilmiştir. Aynı ilk salınım genlikleri için yüksek gaz pedalı hızları ve düşük vitesler için kriterin daha yüksek not aldığı görülmektedir. Ek olarak, ivme salınımları kriteri için öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması Şekil 13'te verilmiştir.  $R^2$  değeri 0,9252 ve RMS değeri 0,2531'dir ve bu da öznel değerlendirmeler ile model sonuçları arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak, bu korelasyon diğer kriterlerdeki kadar güçlü değildir.

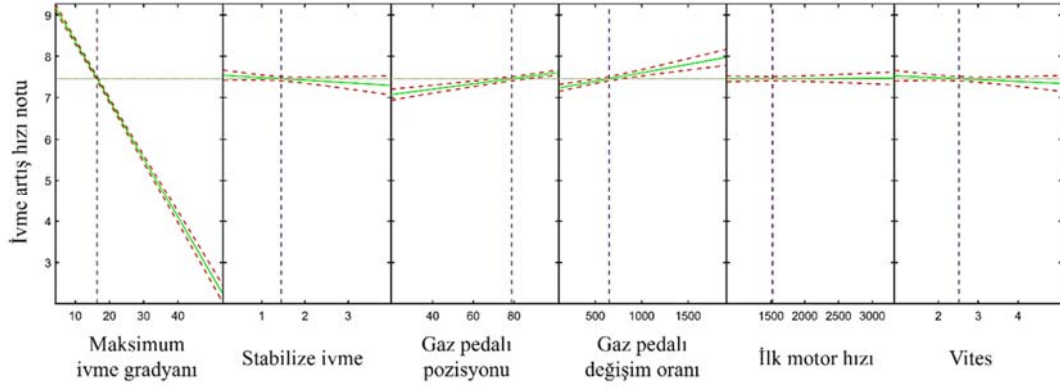
#### 4.4. Kriter Metrikleri (Criteria Metrics)

Kriter notlandırma fonksiyonlarının yanı sıra, baskın parametreler kullanılarak her kriter için metrikler tanımlanmıştır. Metrikler ve sınır kabul edilebilir parametre değerleri, uzmanlar tarafından diğer

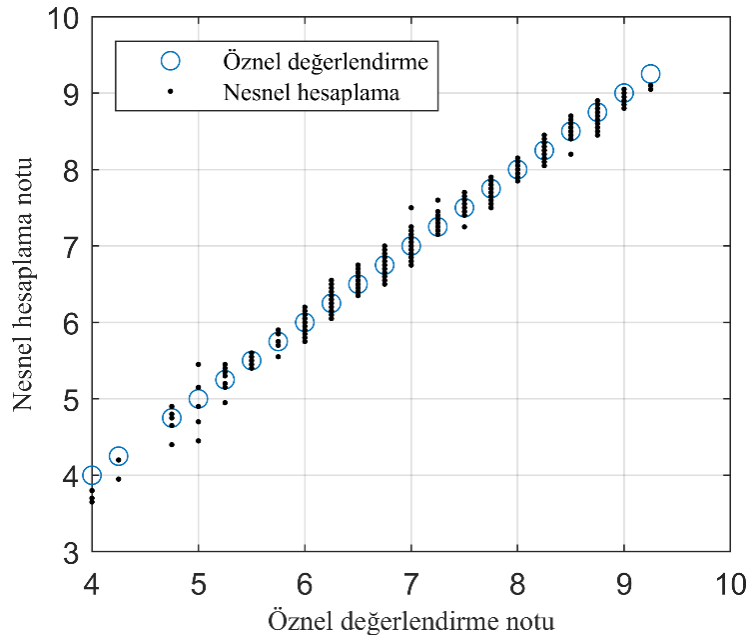


Şekil 8. Çok boyutlu ivme uyumu yanıt yüzeyi modelinin tek boyutlu konturları (One-dimensional contours of multidimensional response surface model of acceleration conformity)

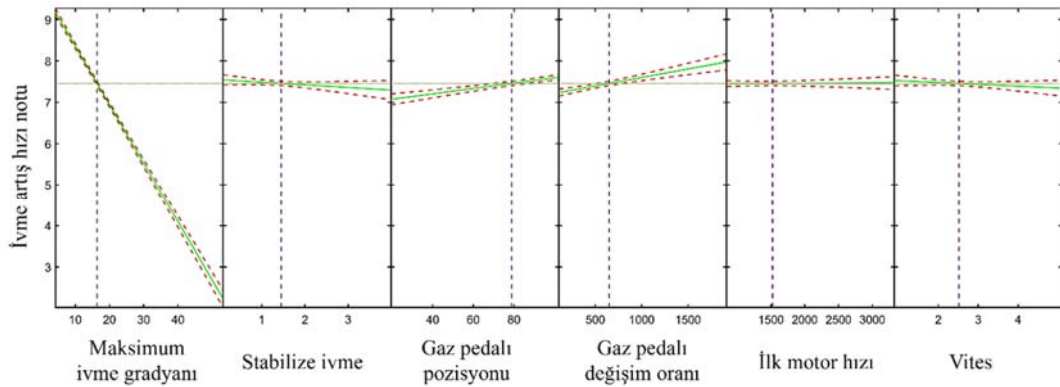




**Şekil 10.** Çok boyutlu ivme artış hızı yanıt yüzeyi modelinin tek boyutlu konturları  
(One-dimensional contours of multidimensional response surface model of peak acceleration gradient)



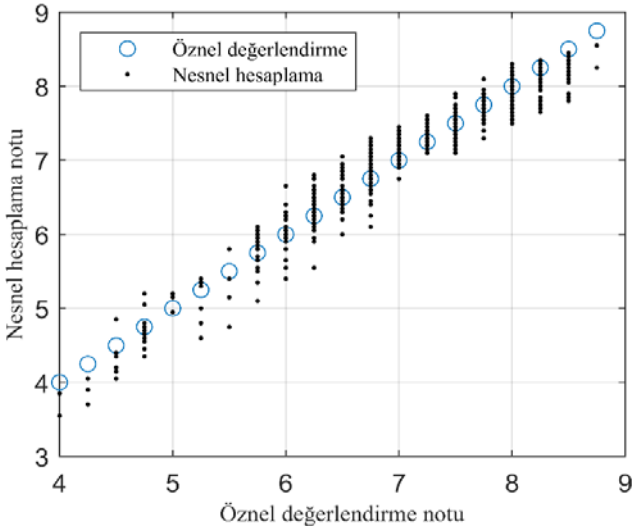
**Şekil 11.** İvme artış hızı – Öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırması  
(Peak Acceleration Gradient – Subjective assessment rating vs objective calculation rating)



**Şekil 12.** Çok boyutlu ivme salınımları yanıt yüzeyi modelinin tek boyutlu konturları  
(One-dimensional contours of multidimensional response surface model of acceleration fluctuations)

parametrelerin etkilerine ve baskın parametrelerin hedef notlar etrafında saçılmasına göre tanımlanmıştır. Metrikler, araştırmacılar ve

kalibrasyon mühendisleri için yoğun hesaplamalara gerek kalmadan hızlı ve kolay ancak yaklaşık değerlendirmeler için yararlı olacaktır.

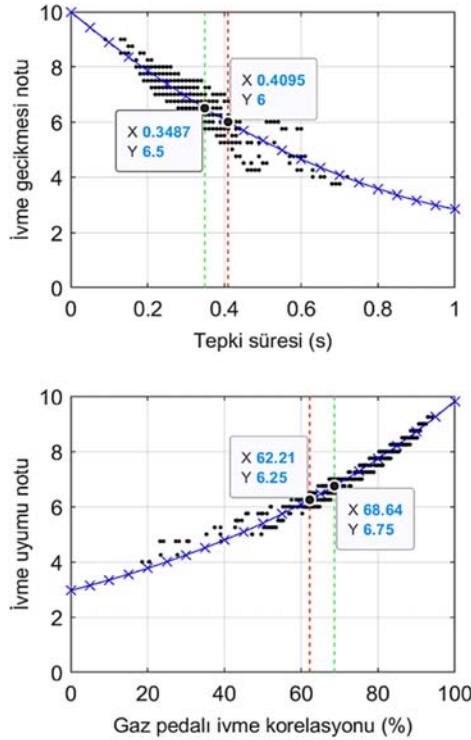


**Şekil 13.** İvme salınımları – Öznel değerlendirme notlarının nesnel hesaplama notları ile karşılaştırılması  
(Acceleration Fluctuations – Subjective assessment rating vs objective calculation rating)

İlk olarak uzmanların notlandırma sonuçlarını tepki süresi parametresine göre 2. dereceden bir polinoma yakınsayarak Eş. 3'te verilen ivme gecikmesi metrik fonksiyonu elde edilmiştir. İvme gecikmesi metriği olarak tepki süresinin 0,3487 sn'den küçük olması gerektiği belirlenmiştir ve sınır kabul edilebilir seviye olarak, tepki süresi 0,4095 sn'nin üzerinde olmamalıdır.

$$4,4335 x^2 - 11,583x + 10, 0 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

2. kriter olan ivme uyumu kriteri için yapılan öznel değerlendirmeleri pedal ivme korelasyonu parametre değerlerine göre üstel bir



**Şekil 14.** Metrik fonksiyonları (Metric functions)

fonksiyona yakınsayarak Eş. 4'te verilen ivme uyumu metrik fonksiyonu elde edilmiştir. İvme uyum metriği pedal ivme korelasyonunun %68,64'ten büyük olması olarak tanımlanmıştır ve sınır kabul edilebilir seviye olarak %62,21'in üstünde olması gerektiği hesaplanmıştır.

$$3,1025exp^{0,0114x}, 10 \leq x \leq 100 \quad (4)$$

İvme artış hızı metrik fonksiyonu ise uzmanların notlandırma sonuçlarını maksimum ivme gradyanı parametresine göre 2. dereceden bir polinoma yakınsayarak elde edilmiştir. Fonksiyon Eş. 5'te verilmiştir. İvme artış hızı metriği maksimum ivme gradyanının 21,36 m/s<sup>3</sup>'ten küçük olması olarak tanımlanmıştır ve sınır kabul edilebilir seviye olarak 25,47 m/s<sup>3</sup>'ün altında olmalıdır.

$$0,0012 x^2 - 0,1778x + 10, 0 \leq x \leq 70 \quad (5)$$

Son olarak, öznel değerlendirme sonuçlarını ilk ivme salınım genliği parametre değerlerine göre bir güç fonksiyonuna yakınsayarak Eş. 6'da verilen ivme salınımları metrik fonksiyonu elde edilmiştir. İvme salınımları metriği, ilk ivme salınım genliğinin 0,3459 m/s<sup>2</sup>'den küçük olması ve sınır kabul edilebilir seviye olarak 0,4914 m/s<sup>2</sup>'nin üzerinde olmaması gerektiği olarak belirlenmiştir.

$$5,1027 x^{-0,228}, 0,05 \leq x \leq 2,0 \quad (6)$$

Metrik fonksiyon eğrileri ve öznel kriter değerlendirmeleri Şekil 14'te gösterilmiştir.

## 5. Çevrimiçi Optimizasyon (Online Optimization)

### 5.1. Kriter Ağırlık Faktörleri (Criteria Weight Factors)

Çevrimiçi optimizasyon için, gaz pedalına basış notlandırma fonksiyonu kriter fonksiyonları kullanılarak formüle edilmiştir. Nihai

manevra notlandırmasında her kriter için farklı ağırlıklar kullanılmıştır. Manuel şanzımanlı küçük yolcu ve hafif ticari araçlar için seçilen kriter ağırlıkları Tablo 7'de verilmiştir.

**Tablo 7.** Kriter ağırlıkları (Criteria weights)

Kriter	Ağırlık
İvme artış hızı	2
İvme sınımları	1
İvme gecikmesi	1
İvme uyumu	3

İvme uyumu kriteri en önemli kriter olarak değerlendirilmiştir ve ağırlığı diğer kriterlere göre daha yüksek bir değere ayarlanmıştır. İvme gecikmesi ve ivme sınımları ise ivme artış hızı kriterinden daha düşük ağırlıklara sahiptir. Farklı araç tipleri ve şanzımanlar için, kriter ağırlıklarının incelenmesi ve güncellenmesi gerekir. Örneğin, performans konfora tercih edildiği durumda performans kriter ağırlıkları daha yüksek ve sürülebilirlik kriter ağırlıkları daha düşük seçilebilir.

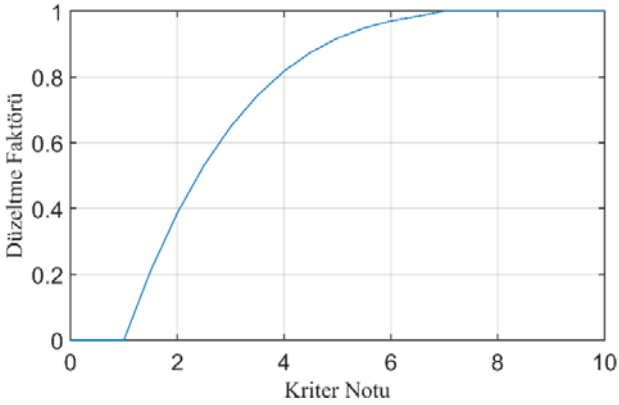
### 5.2. Gaz Pedal Manevrası Maliyet Fonksiyonu (Tip-in Cost Function)

Gaz pedalına basma manevrası maliyet fonksiyonu her kriterin notlandırma değerleri kullanılarak Eş. 7'deki şekilde formüle edilmiştir.

$$\text{Gaz pedalına basış notu} = \sum_{i=1}^n cf(i) cr(i) w(i) / w_T \quad (7)$$

Formülde  $cr(i)$  kriter notu,  $w(i)$  kriter ağırlığı,  $w_T$  toplam ağırlık,  $cf(i)$  düzeltme faktörü ve  $i$  (1, 2, 3, ..., n) kriter numarası için kullanılmıştır.

Kriterler için ağırlıklar, seçilen araç tipine uygun ortalama sürücü beklentilerine göre belirlense de sürücünün gerçek algısını yansıtmaması için düşük notların genel notlandırma üzerinde daha fazla etkiye sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle hesaplama doğrusal değildir ve bu yaklaşım, Şekil 15'te gösterildiği gibi kriter notlarının bir fonksiyonu olan düzeltme faktörü ile maliyet fonksiyonu içerisinde değerlendirmeye alınmıştır.



**Şekil 15.** Düzeltme faktörü (Correction factor)

7,0'ın üzerindeki notlandırmalar için düzeltme yapılmasına gerek olmadığına karar verilmiştir, bu nedenle 7,0'nin üzerindeki kriter notları için düzeltme faktörü değeri 1,0 olarak belirlenmiştir. 1,0 kriter notunda düzeltme faktörü 0 olacak şekilde 7,0 notundan başlayarak 1,0 notuna doğru düzeltme faktörü katlanarak azaltılmıştır.

Sonuç olarak, gaz pedalına basma manevrası notlandırma fonksiyonu, nesnel değerlendirme ve optimizasyonda kullanmak için hem sürülebilirlik hem de performans kriterlerini birleştirerek formüle edilmiştir.

### 5.3. Test Düzenegi ve Uygulama Arayüzü (Test Setup and Application Interface)

Çevrimiçi optimizasyon için Ford Motor Şirketi'nin Transit Courier model hafif ticari aracı kullanılmıştır. Araç özellikleri Tablo 8'de listelenmiştir. Araca yüksek çözünürlüklü uzunlamasına ivme için bir ivmeölçer monte edilmiştir. Diğer girdi sinyalleri motor kontrol ünitesinden alınmıştır.

**Tablo 8.** Test aracının özellikleri (Test vehicle properties)

Özellik	Değerleri
Model	Courier
Motor & güç	DV5FD / 85PS
Şanzıman	6MX65
Aks oranı	3,55
Boş ağırlık	1450kg
Teker	195/60R15

Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için MATLAB uygulamasında bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir ve bu arayüzden optimizasyon çevrimiçi olarak belirtilen test aracında çalışılmıştır. ATI Vision uygulaması ise motor kontrol modülünden ve enstrümantasyondan ölçüm almak için kullanılmıştır. Kullanıcı arayüzü, motor kontrol modülüne ve ATI Vision veri kaydı ve dış aktarma özelliklerine bağlanmak için ATI Vision uygulama programlama arayüzünü kullanmaktadır. Kayıt başlatma ve durdurma tetikleme algoritması, bölüm 3.1'de tanımlanan manevra algılama koşullarına göre tanımlanmıştır. Belirli bir test koşulu; vites, gaz pedalı pozisyonu ve motor devri; için optimizasyon etkinleştirildiğinde optimizasyon parametresi, sürüş konforu ve performansı optimize etmek üzere yinelemeli olarak güncellenir. Optimizasyon parametresi seçimi ve detayları bölüm 5.5'te verilmiştir. Yeni bir kayıt çalışma dizinine dışa aktarıldığında, uygulama kaydı otomatik olarak analiz etmekte ve kriter ve genel manevra notlarını hesaplamaktadır. Her kayıt analizinden sonra, optimizasyon parametresi otomatik olarak güncellenmekte ve güncellenmiş parametre değeri ile yeni bir kayıt almak için kayıt başlatma koşulu tetiklenmektedir.

### 5.4. Optimizasyon Algoritması (Optimization Algorithm)

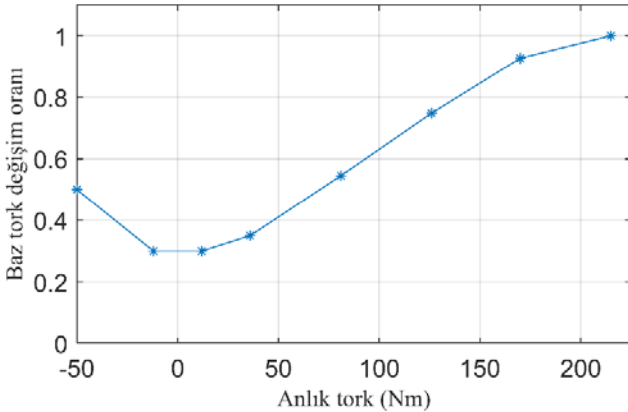
Çevrimiçi optimizasyon için altın kesit algoritması seçilmiştir. Altın kesit algoritması, optimum değer var olduğu bilinen aralıkta bir fonksiyonun en düşük veya en yüksek değerini bulmak için kullanılan bir sayısal optimizasyon yöntemidir. Değerlendirme noktalarının aralıklarında altın oran (0,61803) kullanılır, bu nedenle bu arama algoritmasına altın kesit denilmiştir [21]. Maksimum değeri bulmak için kullanıcının tanımladığı alt ve üst limitler arasında altın oran kullanılarak belirlenen iki değerlendirme noktasından başlanmaktadır. Belirlenen aralığın alt limiti, iki değerlendirme noktası ve belirlenen aralığın üst limit değeri kullanılarak 3 bölge tanımlanır. İlk olarak belirlenen değerlendirme noktalarında maliyet fonksiyonu değerleri hesaplanır. Sonrasında hangi değerlendirme noktasındaki maliyet fonksiyonu değeri daha küçükse o taraftaki bölge arama aralığından kaldırılır. Bir bölüm kaldırıldıktan sonra, üst ve alt sınırlar yeniden tanımlanır ve bir değerlendirme noktasının zaten mevcut olduğu ve değerlendirildiği yeni aralıkta altın oran kullanılarak yeni bir değerlendirme noktası hesaplanır. Bu şekilde, her hesaplama ve değerlendirmede, arama aralığı değerlendirme noktalarındaki maliyet fonksiyonu değerlerine bağlı olarak kademeli olarak daraltılır. Amaç, performans ve sürülebilirlik kriterlerinden geliştirilen maliyet fonksiyonu kullanarak motor kontrol yazılımında kullanılan parametrelerin optimum değerlerini bulmaktır. Kullanıcının tanımladığı değerlendirme noktası sayısı veya değerlendirme noktalarının yakınlığı koşulları karşılandığında, döngüden çıkılır ve optimizasyon tamamlanır. Altın kesit algoritma adımları Şekil 16'da gösterilmektedir.

$L_a$  : alt limit,  $L_u$  : üst limit,  $ao$  : altın oran  $(\sqrt{5} - 1)/2$ ,  $t$  : tolerans,  $d_1$  &  $d_2$  : değerlendirme noktaları  
 $ys$  : yineleme sayısı,  $mys$  : maksimum yineleme sayısı,  $f(d_i)$  : fonksiyonun  $d_i$  noktasındaki değeri  
 Adım 1:  $L_a, L_u, t$  ve  $mys$  değerlerinin belirlenmesi  
 Adım 2:  $d_1 = (1 - ao) * L_a + ao * L_u$ ,  $d_2 = ao * L_a + (1 - ao) * L_u$ ,  $ys = 0$   
 Adım 3:  $ys = ys + 1$   
 Eğer  $f(d_1) > f(d_2)$   
 $L_a = d_1, d_1 = d_2$   
 $d_2 = ao * L_a + (1 - ao) * L_u$   
 değilse  
 $L_a = d_2, d_2 = d_1$   
 $d_1 = (1 - ao) * L_a + ao * L_u$   
 Adım 4: Adım 3'ü  $ys > mys$  veya  $|f(d_1) - f(d_2)| < t$  olana kadar tekrarla

Şekil 16. Altın kesit algoritma adımları (Golden section algorithm steps)

5.5. Optimizasyon Parametresi (Optimization Parameter)

Anlık tork değişim oranının belirlenmesinde her vites için gaz pedalı ve motor devri bazlı haritalar ve anlık tork ve vites bazlı ek bir harita kullanılmaktadır. Bu haritaların çıktıları çarpılarak anlık tork oranı hesaplanmaktadır. Optimizasyon için vites bazlı normalize edilmiş anlık torka dayalı tork değişim oranını tanımlayan bir baz optimizasyon eğrisi tanımlanmıştır. Gaz pedalı ve motor devri bazlı haritalar sabit tutulmuştur ve optimizasyon parametresi olarak kalibrasyon eğrisini güncelleyen bir çarpan değeri kullanılmıştır. Baz optimizasyon eğrisinde ise hata modlarını önlemek için negatif torktan sıfır torka yaklaşırken tork değişim oranı düşürülmüş, sıfır tork ve yakın değerlerinde tork değişim oranı düşük tutulmuş ve sonrasında ise tork yükseldikçe değişim oranı da yükseltilmiştir. Eğri -50Nm kesme noktasında 0,5 olarak ve dişli boşluğu bölgesinde (+/-10Nm) 0,3 olarak ayarlanmıştır ve maksimum tork değerine doğru 1'e yükseltilmiştir. Değerlerinin 0 ile 1 arasında olduğu baz optimizasyon eğrisi Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Anlık torka bağlı motor torku değişim oranı için kullanılan baz eğri (Base curve used for engine torque rate based on instantaneous torque)

Her çalışılmak istenen vites, motor devri ve gaz pedalı noktası optimizasyon parametresi ile anlık torka dayalı tork değişim oranı eğrisi kullanılarak optimize edildikten sonra, gaz pedalı ve motor devri tabanlı haritalar her vites için belirlenen optimum değerler kullanılarak tekrar şekillendirilmekte ve güncellenen kalibrasyon araç kontrol ünitesine yüklenmektedir. Bu sayede optimum performans ve sürüş konforu sağlanmaktadır.

5.6. Model Doğrulama ve Optimizasyon Sonuçları (Model Verification and Optimization Results)

Doğrulama için 1500-2000 dev/dk motor devri aralığında çeşitli gaz pedalı pozisyonları ile testler yapılmıştır. Örnek olarak, 1500 dev/dk motor devrinde 2. vites %50 gaz pedalı ile yapılan testlerdeki

kalibrasyon çarpanı değerlerine karşılık alınan manevra ve kriter notlandırma sonuçları Şekil 18'de verilmiştir.

Belirlenen test noktası için tork değişim oranı en düşük 600Nm/s, en yüksek 3000 Nm/s olarak belirlenmiştir. 600Nm/s tork değişim oranı ile düşük performans ve salınım olmadığı konforlu sürüş, 3000Nm/s değeri ile de yüksek performans fakat çok yüksek salınımlar ve hatta darbe hatası olduğu bilinmektedir. Gaz pedalı ve motor devri tabanlı haritalar 1200Nm/s tork değişim oranı verecek şekilde ayarlanmış ve optimizasyon parametre aralığı 0,5-2,5 olarak belirlenmiştir. 2. vites 1500 dev/dk noktasında kalibrasyon çarpanı değerlerine karşılık gelen anlık torka bağlı tork değişim oranları Şekil 19'da verilmiştir.

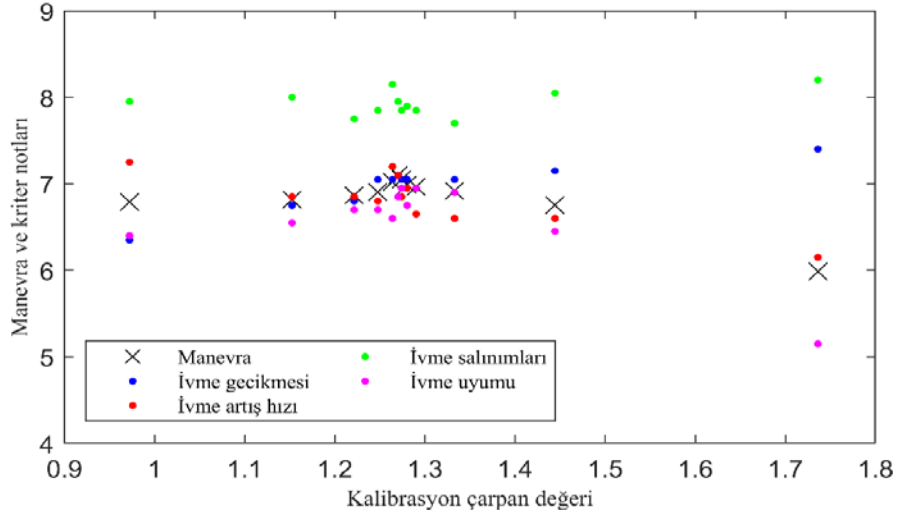
Sonuçlardan, kalibrasyon çarpanı değerlerinin artmasıyla performansın daha iyi olduğu, fakat salınım genliklerinin arttığı, bununla birlikte azaldığı durumda ise performansın kötüleştiği ve salınım genliklerinin azaldığı görülmektedir. Genel manevra notunun en yüksek 7,1 olduğu sonucun optimum kalibrasyon çarpanı değeri 1,27 ile sağlandığı ve bu durumda daha az salınım genliği ile sürüş konforu memnuniyeti ve kabul edilebilir performansın elde edildiği belirlenmiştir. Testlerdeki ivme profilleri Şekil 20'de verilmiştir.

Manevralar ayrıca uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir ve uzman notlarının ve hesaplama sonuçlarının farkının -0,2 olduğu birkaç nokta haricinde +/-0,1 notlandırma aralığında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar optimizasyon sürecinin başarılı olduğunu ve geçerliliğini temsil etmektedir. Test sonuçları Tablo 9'da verilmiştir.

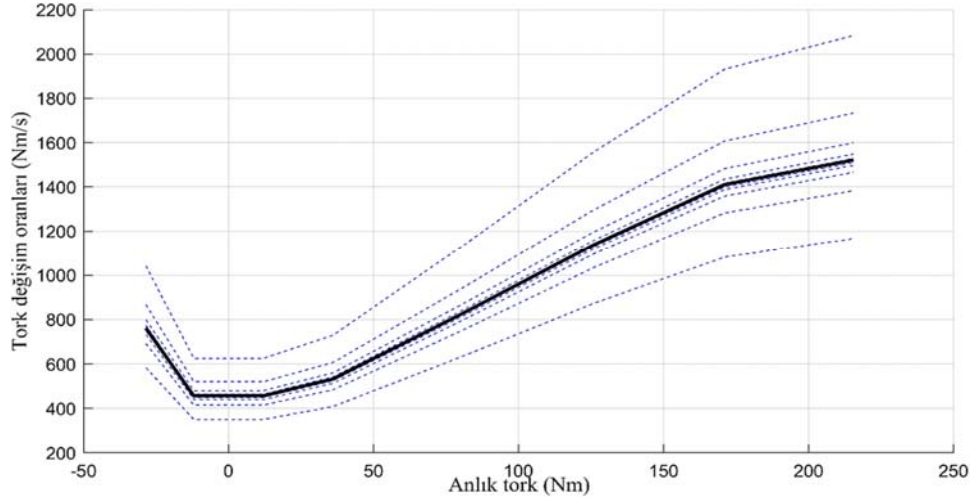
Tablo 9. Test sonuçları (Test results)

Manevra sayısı	Hesaplama sonuçları				Uzman notları					
	Kalibrasyon çarpanı değeri	Genel manevra notu	İvme gecikmesi notu	İvme artış hızı notu	İvme salınımları notu	İvme uyumu notu	İvme gecikmesi notu	İvme artış hızı notu	İvme salınımları notu	İvme uyumu notu
1	1,264	7,02	7,05	7,20	8,15	6,60	7,00	7,25	8,25	6,50
2	1,736	5,99	7,40	6,15	8,20	5,15	7,50	6,00	8,25	5,25
3	0,972	6,79	6,35	7,25	7,95	6,40	6,50	7,25	8,00	6,50
4	1,444	6,75	7,15	6,60	8,05	6,45	7,25	6,50	8,00	6,50
5	1,152	6,82	6,75	6,85	8,00	6,55	6,75	7,00	8,00	6,50
6	1,333	6,92	7,05	6,60	7,70	6,90	7,00	6,50	7,75	7,00
7	1,221	6,87	6,80	6,85	7,75	6,70	6,75	6,75	7,75	6,75
8	1,290	6,97	6,95	6,65	7,85	6,95	7,00	6,50	7,75	7,00
9	1,248	6,91	7,05	6,80	7,85	6,70	7,00	6,75	7,75	6,50
10	1,274	7,05	7,05	6,85	7,85	6,95	7,00	6,75	7,75	7,00
11	1,280	6,99	7,05	6,95	7,90	6,75	7,00	6,75	8,00	6,75
12	1,270	7,10	7,10	7,10	7,95	6,85	7,00	7,00	7,75	6,75

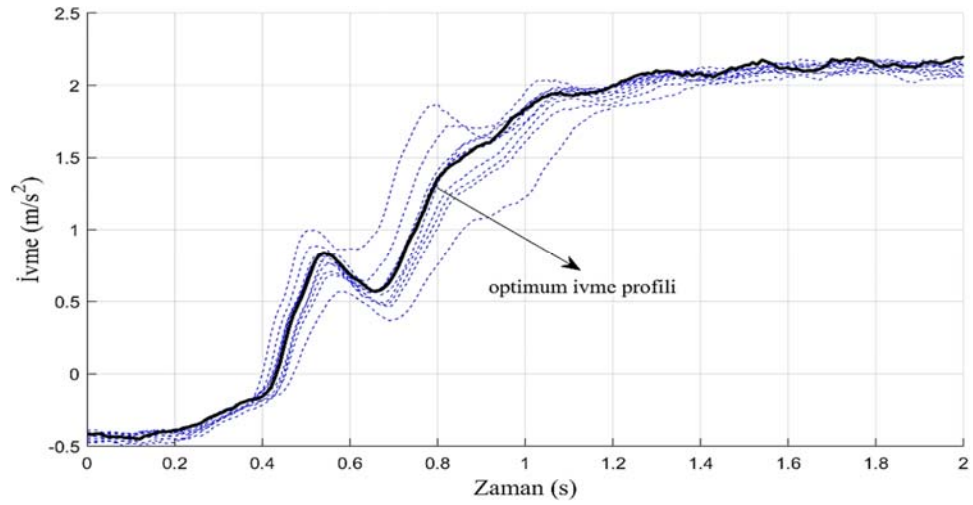




Şekil 18. 2. vites 1500rpm %50 pedal ile yapılan testlerdeki kalibrasyon çarpanı değerlerine karşılık alınan manevra ve kriter notları (2<sup>nd</sup> gear 1500rpm 50% pedal input, calibration multiplier values vs tip-in and criteria ratings)



Şekil 19. Her çarpan değeri için anlık torka karşılık tork değişim oranları (Instantaneous torque vs torque rate for each multiplier value)



Şekil 20. 2. vites %50 gaz pedalı ile 1500rpm motor devrinden başlayan optimizasyon manevraları ivme profilleri (Acceleration profiles from 2<sup>nd</sup> gear 1500rpm engine speed and 50% accelerator pedal position optimization maneuvers)

## 6. Sonuçlar (Conclusions)

Motor kontrol yazılımında sürülebilirlik ve performans öznitelikleri için kullanılan kalibrasyon parametreleri için kendi kendini optimize eden bir algoritma önerilmiştir. Manevra algılama, maliyet fonksiyonu geliştirme ve optimizasyon aşamaları açıklanmış ve test sonuçları sunulmuştur.

Sektördeki ana zorluklardan sürüş özellikleri değerlendirmelerinin hem uzmanlık hem de uzun zaman gerektirmesine çözüm getirilmiş ve değerlendirmelerin nesnel yapılabilmesi sağlanmıştır. Bu çalışma ile sürülebilirlik ve performans öznitelikleri için mevcut olmayan kriter ve genel manevra değerlendirme fonksiyonları farklı araçlar kullanılarak ve çok sayıda testler yapılarak geliştirilmiştir. Metrikler ve değerlendirme fonksiyonları binek ve hafif ticari araçlar için geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Ek olarak, süre ve kullanıma bağlı olarak araç sürüşünde meydana gelen olumsuz değişikliklere karşı çevrimiçi değerlendirme, parametre güncelleme ve bu sayede optimum sürüş için yöntem geliştirilmiştir. Önerilen metodolojinin hem araç değerlendirmelerinde hem de çevrimiçi optimizasyon algoritması ile olumsuz değişikliklere karşı optimize edilmiş performans ve sürülebilirlik sağlamada başarılı olduğu doğrulanmıştır.

Hesaplamalar için kullanılan sinyallerin çoğu yazılımda mevcuttur ve olmayan parametreler makalede açıklandığı şekilde kolaylıkla eklenebilir ve önemli bellek ve işleme gereksinimleri yoktur. Bu sayede bu algoritmanın motor kontrol modülünde uygulanmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Yazılım yapısı, altın kesit algoritması ve her vites için gaz pedali pozisyonu ve motor devrine bağlı puan tabloları eklenerek güncellenebilir. Önerilen yazılım yapısı, sistem operasyonlarını izlemeye de olanak sağladığı ve sistem arızalarını önleyebileceği için teşhis amacıyla kullanılabilir.

Ayrıca, geliştirilen metodoloji değerlendirme ve kalibrasyon geliştirme aracı olarak veya özel değerlendirmeleri destekleyici olarak araç geliştirme proseslerine dahil edilebilir. Bu sayede ürün geliştirme aşamasında araç testlerini azaltarak genel kalibrasyon sürecinin test süresini ve geliştirme maliyetlerini düşüreceği öngörülmektedir. Bunlara ek olarak, önerilen metod performans ve sürülebilirlik özellikleri konusunda uzmanlığa sahip olmayan test mühendisleri veya araştırmacılar tarafından da uygulanabilir.

Gelecekteki potansiyel çalışmalar, çok değişkenli optimizasyon algoritmalarının uygulanması ve yöntem performanslarının analiz edilmesi ve karşılaştırması olabilir. İsteğe bağlı olarak, algoritmanın etkinliğini göstermek için sürücü karakterizasyonu da çalışılabilir. Her sürücünün kendine özgü sürüş becerileri ve araç kullanım profili olduğundan kriter ağırlıkları sürüş profiline göre seçilebilir ve parametreler sürücü beklentilerini karşılamak için dinamik olarak güncellenebilir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, test araçları, test ekipmanları ve gerekli bütün imkanları sağlayan Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.'ye teşekkür eder. Ayrıca, araç entegrasyon ve sürülebilirlik uzmanları Bahadır Mertan ve Ahmed Arslantürk'e sürüş değerlendirmeleri ve kriter fonksiyon geliştirmelerindeki katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız. Bahadır Mertan, Ford Otosan Sancaktepe Teknik Merkezi'nde araç entegrasyon lideridir ve 20 yılı aşkın araç değerlendirme deneyimine sahiptir. Ahmed Arslantürk, AVL Türkiye Araştırma ve Mühendislik Merkezi'nde çalışmaktadır ve 14 yıl araç entegrasyon, kalibrasyon ve araç değerlendirme tecrübesine sahip olup, uzmanlıkları nesnel araç değerlendirmesini mümkün kılmıştır.

## Kaynaklar (References)

- Baumann, J., Torkzadeh, DD., Ramstein, A., Kiencke, U., Schlegl, T., Model-based predictive anti-jerk control, *Control Engineering Practice (Control Eng. Pract.)*, 14 (3), 259-266, 2006.
- Fredriksson, J., Weiefors, H., Egardt, B., Powertrain control for active damping of driveline oscillations, *Vehicle System Dynamics (Veh. Syst. Dyn.)*, 37 (5), 359-376, 2002.
- Zhao, J., Liu, J., He, P., Yang, L., Exploring the Relationships between Subjective Evaluations and Objective Metrics of Vehicle Dynamic Performance, *Journal of Advanced Transportation (J. Adv. Transp.)*, Hindawi-Wiley, 2018.
- Zhang S., Yang G., Wang Y., Ji Q., Zhang H., Objective Evaluation for the Driving Comfort of Vehicles Based on BP Neural Network, 2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI), Hangzhou, China, 737-742, December 18-20, 2020.
- Ao, D., Wong, P. K., Huang, W., Mei X. T., Cao Y. C., Zhao J., Analysis of Co-Relation Between Objective Measurement and Subjective Assessment for Dynamic Comfort of Vehicles, *International Journal of Automotive Technology (Int. J. Automot. Technol.)*, 21 (6), 1553-1567, 2020.
- Genç M.O., Kaya N., Design and verification of elastomer spring damping system for automobile powertrain systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 1957-1971, 2020.
- Fang, C., Cao, Z., Ektesabi, M. M., Kapoor, A., Sayem, A.H.M., Driveline modelling analysis for active driveability control, 2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC), Kuala Lumpur, Malaysia, 125-128, December 13-15, 2013.
- Mayr, C. H., Euler-Rolle, N., Jakubek, S., Automatic tuning of PID controllers in engine control units by means of local model networks and evolutionary optimization, 2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Beijing, China, 901-906, July 6-11, 2014.
- Nikzadfar, K., Shamekhi, A. H., Investigating the relative contribution of operational parameters on performance and emissions of a common-rail diesel engine using neural network, *Fuel*, 125, 116-128, 2014.
- Min, K., Sunwoo, M., Han M., Iterative Learning Control Algorithm for Feedforward Controller of EGR and VGT Systems in a CRDI Diesel Engine, *International Journal of Automotive Technology (Int. J. Automot. Technol.)*, 19 (3), 433-442, 2018.
- Caporale, D., Deori, L., Mura R., Falsone, A., Vignali, R., Giulioni, L., Pirota, M., Manganini, G., Optimal control to reduce emissions in gasoline engines: An iterative learning control approach for ECU calibration maps improvement, 2015 European Control Conference (ECC), Linz, Austria, 1420-1425, July 15-17, 2015.
- Figel, K. J., Schultalbers, M. and Svaricek, F., Review and experimental evaluation of models for drivability simulation with focus on tire modeling, *Forschung im Ingenieurwesen: Engineering Research (Forsch. Ingenieurwes.)*, 83 (2), 105-118, 2019.
- Götting, G., Kretschmer, M., Development and series application of a vehicle drivetrain observer used in hybrid and electric vehicles, *World Electric Vehicle Journal*, 6 (2), 364-372, 2013.
- Akkaş O., Işık E., Çulha O., Failure analysis of cardan shaft's flange yoke fracture occurred during torsional fatigue test, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 901-914, 2022.
- Reddy, P., Shahbakhti, M., Ravichandran, M., Doering, J., Real-Time Estimation of Backlash Size in Automotive Drivetrains, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (IEEE/ASME Trans. Mechatron.)*, 27 (5), 3362-3372, 2022.
- Scamacchio, A., Gruber, P., De Pinto, S., Sorniootti, A., Anti-jerk controllers for automotive applications: A review, *Annual Reviews in Control (Annu. Rev. Control)*, 50, 174-189, 2020.
- Furlich, J., Robinette, D., Blough, J., Remisoski, N., Taylor, C., Torque and Displacement Measurement with Enhanced Signal Processing for System Lash Estimation of a MDOF Rotating System, *Experimental Techniques (Exp. Tech.)*, 46, 931-944, 2022.
- Bruce, M., Egardt, B., Pattersson, S., On powertrain oscillation damping using feedforward and LQ feedback control, *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, Toronto-Canada*, 1415-1420, August 28-31, 2005.

19. Box, G. E. P., Wilson, K. B., On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* (J. R. Stat. Soc. B), 13 (1), 1-38, 1951.
20. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, 10th Edition, New York, 2019.
21. Kiefer, J., Sequential minimax search for a maximum, *Proceedings of the American Mathematical Society* (Proc. Am. Math. Soc.), 4 (3), 502-506, 1953.

