

## BİR BİNEK ARAÇ İÇİN DÖRT-TEKERLEKTEN YÖNLENDİRME SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Burak Ulaş

Hexagon Studio A.Ş., Şasi ve Güç Aktarma Sistemleri Departmanı, Kocaeli

### ÖZET

Taksi konsepti olarak üretilen bir aracın Londra şehri için önerilecek sağdan direksiyonlu, elektrik motoru tahrikli versiyonu mevcuttur. Araçta, İngiliz taksi regülasyonunda tanımlanan 7.62 m minimum dış dönüş çapı şartının karşılanabilmesi için arka tekerleklere de yönlendirme sistemi uygulanacaktır. Bu çalışmada, sistemin tasarımı ve simülasyonuna ait çalışmalar özetlenerek, eyleyici sistemini gerçekleştirmek için yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Arka tekerlek yönlendirme, dört-tekerlekten yönlendirme, dönüş çapı

### DEVELOPMENT OF FOUR-WHEEL STEERING SYSTEM FOR A PASSENGER VEHICLE

#### ABSTRACT

The vehicle which is created as a taxi concept, has a version with right-hand drive and which is driven by an electric motor. In order to satisfy the minimum outer turn diameter of 7.62 m which is determined by the British taxi regulations, it was decided to implement a rear-wheel steering system. This study summarizes system design and simulation studies and also the application of the actuator system.

**Keywords:** Rear wheel steering, four-wheel steering, turning diameter

### 1. GİRİŞ

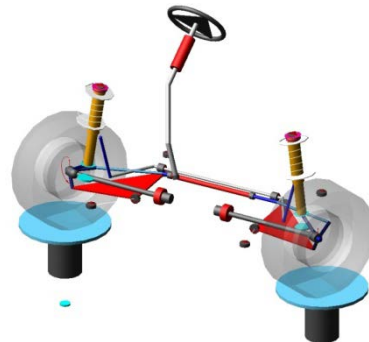
Taksi konsepti olarak tasarlanan ve üretilen bir binek araç, içten yanmalı motorlu versiyonunun yanı sıra yalnız elektrik motoru tahrikli versiyona sahiptir. Konvansiyonel ön tekerleklerden yönlendirme sistemine sahip olan bu versiyon standart olarak 6.15 m kaldırımdan kaldırıma dönüş yarıçapını sağlamaktadır.

Londra şehrinde taksi olarak kullanılmak üzere tasarlanan sağdan direksiyonlu aracın İngiliz taksi regülasyonları gereğince kaldırımdan kaldırıma 3.81 m dönüş yarıçapını karşılaması gerekmektedir. Paketleme imkansızlıkları ve kinematik zorluklar nedeniyle bu koşulun araçta sadece ön tekerlerin yönlendirilmesi ile sağlanması mümkün değildir.

Manevra kabiliyetini arttırmak amacıyla arka tekerleklerin de yönlendirilebilir olmasına karar verilmiştir. Arka süspansiyona ait sabit rot kollarının yerine yerleştirilecek doğrusal eyleyiciler ile ön yönlendirme geometrisi ile uyumlu bir dönüş kinematığı

sağlanması hedeflenmektedir.

### 2. ÖN YÖNLENDİRME GEOMETRİSİ

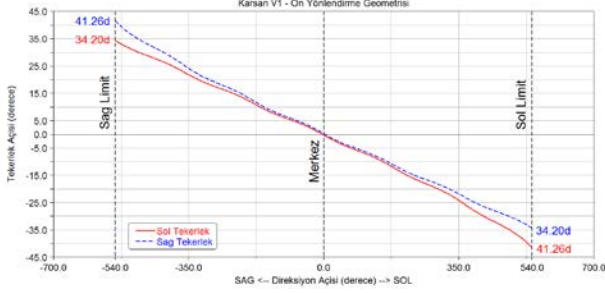


Şekil 1. Yönlendirmeli ön süspansiyon sistemi modeli

Önden yönlendirmeli aracın, tam-taşıt ve ön/arka süspansiyon modelleri, çoklu-gövde dinamiği yazılımı olan MSC.ADAMS ile hazırlanmıştır. Lastikler, süspansiyon yayları, bağlantı burçları, direksiyon kolunu

ve şaftları ile bunlara ait kardan mafsalları, dişli mekanizması ve viraj denge çubuğu detaylı olarak modellenmiştir. Ön yönlendirme direksiyon sistemi elasto-kinematik modeli (Şekil 1) kullanılarak ön direksiyon oranı eğrileri hesaplanmıştır.

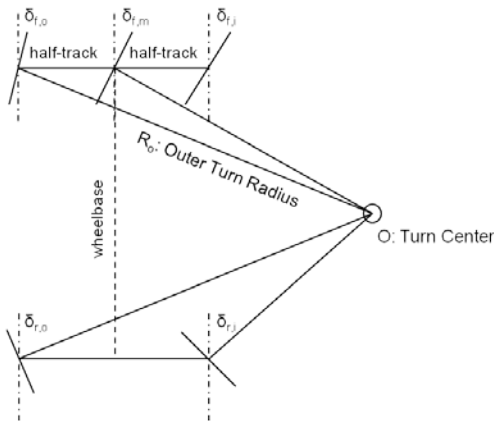
Direksiyon açısına karşılık gelen sol ve sağ teker yönlendirme açıları tam-soldan tam-sağa yapılan çevrimler sonucu elde edilmiştir. Sol ve sağ tekerlekler simetrik olarak yönlendirilmekte ve  $\pm 540^\circ$  maksimum direksiyon açısında  $41.3^\circ$  iç ve  $34.2^\circ$  dış teker açısına ulaşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Ön yönlendirme sistemine ait sol ve sağ teker direksiyon oranı eğrileri

### 3. DÖRT-TEKERLEKTEN YÖNLENDİRME KİNEMATİĞİ

Literatürde yer alan düşük hızda dört-tekerlekten yönlendirme teorisine [1] göre, yönlendirme sistemindeki yönlendirme açısı, yaklaşık olarak sol ve sağ teker açılarının ortalamasına eşittir. Bu kabul, yönlendirilen ön tekerleklerin Ackerman etkilerini basitleştirdiğinden arka tekerleklerin yönlendirme kinematığının hesaplanmasında kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 3. Dış dönüş çapı kısıtı altında yönlendirme kinematığı

Ön yönlendirme sistemi üzerinden hesaplanan maksimum iç ve dış teker açılarında ortalama ön teker açısı  $37.7^\circ$  olmaktadır. 3260 mm dingil mesafesine ve 1700 mm ön/arka iz genişliğine sahip araç için, ön aks merkezi orijin  $\{0, 0\}$  koordinatı olarak kabul edildiğinde hedef dış dönüş yarıçapı için dönme merkezi

koordinatları  $\{2453.4, -1898.3\}$  mm olarak hesaplanmaktadır (Tablo 1).

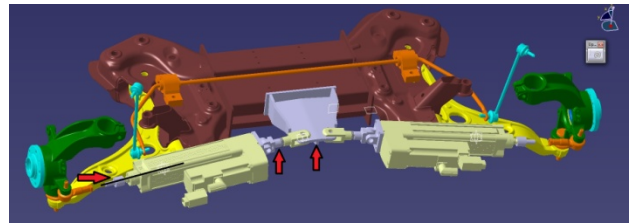
Tablo 1. Dört tekerlekten yönlendirme kinematığı hesap tablosu

Aks Mesafesi	3260	(mm)
İz Genişliği	1700	(mm)
Dış Dönüş Yarıçapı	3810	(mm)
Maks. Ön Teker İç Açısı	41.26	(°)
Maks. Ön Teker Dış Açısı	34.20	(°)
Ortalama Ön Teker Açısı	<b>37.73</b>	(°)
Ön Aks Merkezi X Koordinatı	0	(mm)
Ön Aks Merkezi Y Koordinatı	0	(mm)
Dönüş Merkezi X Koordinatı	<b>2453.429</b>	(mm)
Dönüş Merkezi Y Koordinatı	<b>-1898.278</b>	(mm)
Maks. Arka Teker İç Açısı	40.340	(°)
Maks. Arka Teker Dış Açısı	22.402	(°)

Bu dönme merkezi, ön aks merkezinden aks eksenine ile ortalama teker açısı kadar açı yaparak geçen doğrunun, ön dış teker merkezli ve yarıçapı 3810 mm olan çemberin kesiştiği noktada yer almaktadır. Bu kinematik kabulü ile arka aksın maksimum teker açıları kaldırımından kaldırılma dönüş çapı koşulunun sağlanacağı öngörülmektedir. Bu noktada dönüş merkezinden arka teker merkezlerine çekilen doğruların aks eksenine ile yaptıkları açı arka tekerleklerin maksimum iç ve dış teker açılarını yansıtmaktadır (Şekil 3).

Belirlenen dönüş merkezine göre arka yönlendirilebilir tekerler  $40.3^\circ$  iç ve  $22.4^\circ$  dış teker açılarını sağlamalıdır.

### 4. ARKA YÖNLENDİRME GEOMETRİSİ



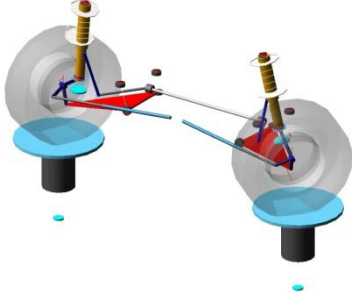
Şekil 4. Paketlenen arka yönlendirme eyleyici sistemi

Arka süspansiyon sistemine entegre edilen yönlendirme eyleyicilerine ait bağlantı noktası koordinatları, bilgisayar destekli tasarım verilerinden (Şekil 4) ölçülerek oluşturulan elasto-kinematik arka süspansiyon modeline girilmiştir.

Güncellenen model (Şekil 5) ön aksta olduğu gibi yönlendirme kinematığı simülasyonuna tabi tutularak eyleyici deplasmanına karşılık iç ve dış teker açılarını veren eğriler hesaplanmıştır.

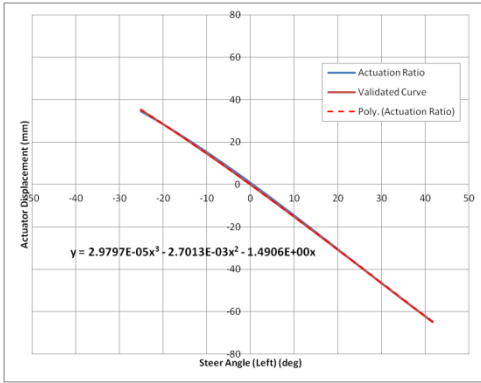
Teker açılarına karşılık eyleyici deplasmanını veren

eğri, terim katsayıları  $C_1=-1.4906$ ,  $C_2=-2.7013E-03$  ve  $C_3=2.9797E-05$  olan 3. dereceden bir polinoma benzetilmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Yönlendirmeli arka süspansiyon sistem modeli

Benzetilen polinom, dört tekerlekten yönlendirme kinematiğine ait hesaplarda, direksiyon açısına karşılık gelen iç ve dış teker açılarını sağlamak üzere eyleyicilerin yapması gereken deplasmanları belirlemekte kullanılacaktır.



Şekil 6. Teker açısına karşılık eyleyici deplasmanı eğrisi

Yönlendirme kinematiği çalışması, her bir direksiyon açısı değeri için ihtiyaç duyulan arka teker açılarını hesaplamak üzere genişletilmiştir. Bu yöntemde, teker açılarında geçiş yapılabilmesi için, her bir direksiyon açısında sağlanması gereken bir dış dönüş yarıçapı değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Hedef dönüş yarıçapları, sürücüye doğrusal bir manevra hissiyatı verecek şekilde belirlenmelidir. Bu amaçla, hedef minimum dış dönüş yarıçapı değerinin tersi alınarak eğrilik değerine dönüştürülür. Eğrilik değeri, direksiyon merkezde iken sıfır olacak şekilde, 540 derecelik maksimum direksiyon açısında maksimum değerine ulaşacak şekilde eşit artımlarla dağıtılır. Her bir açı değerinde eğrilikten tekrar dönüş yarıçapına geçilerek hedef değerler belirlenmiş olur.

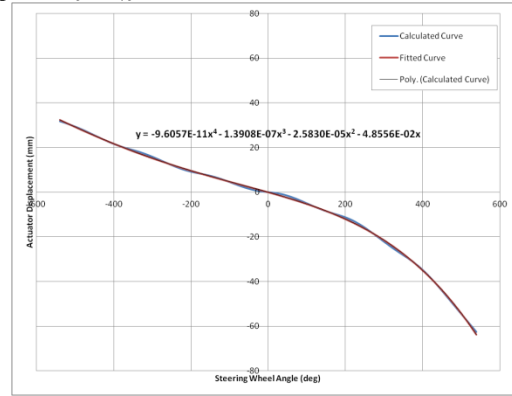
Tablo 2'de, tanımlanan yöntem ile birkaç farklı direksiyon açısı için hesaplanan ortalama ön teker açısı, dış dönüş yarıçapı, eğrilik değeri ve bunlara bağlı arka tekerde gerekli teker açılarının sağlanması için sol eyleyicinin deplasmanı gösterilmiştir.

Elde edilen konfigürasyonda eyleyicilerin dizayn konumuna göre 31.7 mm uzama ve 62.6 mm kapanma mesafesine sahip olması gerektiği belirlenmiştir. Buna göre en az 95 mm strok boyuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 2. Dört tekerlekten yönlendirme kinematiği hesap tablosu

Direksiyon Açısı	Ort. Ön Teker Açısı	1/Ro, Eğriligi	Ro, Dış Dönüş Yarıçapı	Sol Eyleyici Deplasmanı
deg	deg	mm <sup>-1</sup>	mm	mm
-540.0	37.7	0.000262	3810.0	31.70
-537.3	37.4	0.000261	3829.2	31.55
-534.6	37.2	0.00026	3848.5	31.40
-531.9	36.9	0.000259	3868.0	31.25
-529.2	36.6	0.000257	3887.8	31.10
-526.5	36.3	0.000256	3907.7	30.95
-523.8	36.1	0.000255	3927.8	30.79
-521.1	35.8	0.000253	3948.2	30.64
-518.4	35.5	0.000252	3968.8	30.48
-515.7	35.3	0.000251	3989.5	30.31

Tablo 2'den yola çıkarak farklı direksiyon açı değerleri için eyleyicilerin yapacağı deplasmanlar bir eğriye dönüştürülmüştür. Eğri, 4. dereceden bir polinoma uydurularak terim katsayıları  $C_1=-4.8556E-02$ ,  $C_2=-2.5830E-05$ ,  $C_3=-1.3908E-07$  ve  $C_4=-9.6057E-11$  olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).

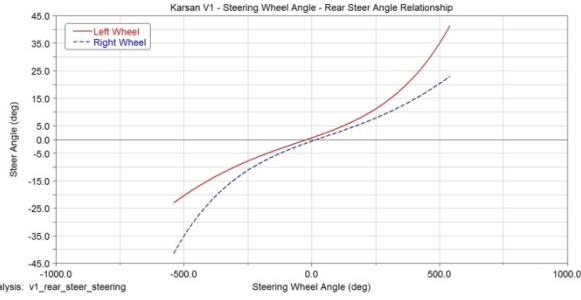


Şekil 7. Direksiyon açısına karşılık sol eyleyici deplasmanı eğrisi

## 5. TAM-TAŞIT MODELİ İLE DOĞRULAMA

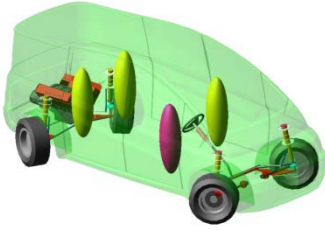
Oluşturulan tam taşıt modelinde aracın direksiyon sisteminden alınan direksiyon açısı sinyali, uydurulan polinom fonksiyonlarına girdi teşkil ederek, fonksiyon değeri arka süspansiyondaki yönlendirme eyleyicilerine zamana bağlı deplasman sinyali olarak tanımlanmıştır.

Arka yönlendirilebilir süspansiyon kapsamında gerçekleştirilen yönlendirme analizleri neticesinde modelin tüm direksiyon açısı aralığında polinomdan beklenen yönlendirme açılarını sağladığı görülmüştür (Şekil 8).



**Şekil 8.** Arka süspansiyon yönlendirme analizi sonucu elde edilen iç ve dış teker açılarındaki değişimi

Arka yönlendirmeyi kontrol eden fonksiyonun doğrulanması ile birlikte, tam-taşıtlı modeline (Şekil 9) geçilerek ulaşılan minimum kaldırımdan kaldırıma dönüş çapının değeri ve sistemin çalışma performansı değerlendirilecektir.



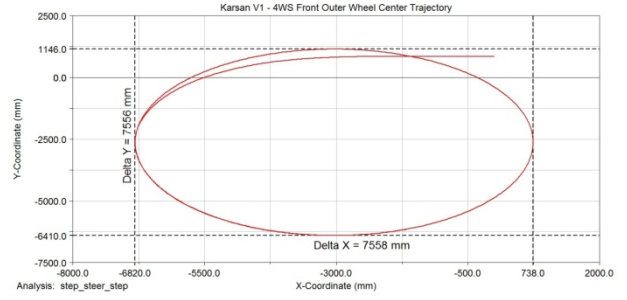
**Şekil 9.** Dört tekerlekten yönlendirilebilir aracın tam-taşıtlı modeli

5 saniye süreli basamak fonksiyonu direksiyon açısı ve 5 km/h araç hızı ile yapılan simülasyonda, direksiyon merkezden tam-sola çevrilerek aracın sağ ön teker merkezinin yatay düzlemde çizdiği yörünge incelenmiştir (Şekil 10).



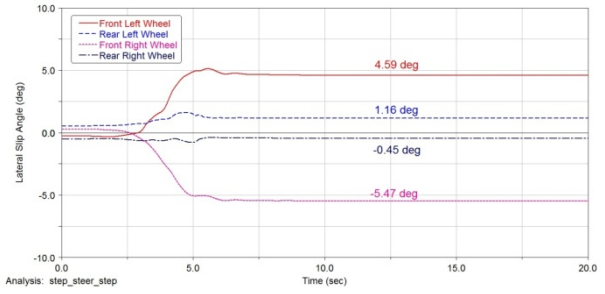
**Şekil 10.** Dört tekerlekten yönlendirilebilir aracın tam-taşıtlı modeli

Yörünge oluşturduğu çemberin yarıçapı ölçülerek, dış dönüş yarıçapı kabul edilmiştir. Bu durumda Şekil 11'de de gösterildiği gibi aracın eriştiği minimum dönüş yarıçapı 3780 mm olup, hedef değer olan 3810 mm'den düşüktür. Dolayısıyla sistem beklenen performansı yerine getirmektedir.



**Şekil 11.** Dış ön teker merkezinin yörüngesi ve dönüş çapının ölçümü

Bu sonuç, tasarlanan sistemin hedef minimum dönüş çapının sağlandığını göstermektedir. Düşük hızlarda yapılan manevralarda yönlendirmede Ackerman geometrisinin sağlanması oranında tekerleklerdeki yanallı kaymanın en az seviyede olması beklenir. Bu bağlamda Şekil 12'de gösterildiği gibi tüm lastiklerdeki yanallı kayma açıları zamanla değişimi incelendiğinde, aynı aks üzerindeki iç ve dış lastiklere ait kayma açıları birbirine yakın ancak ön lastiklerdeki yanallı kayma açısının arka lastiklere oranla çok yüksek seviyelerde seyrettiği görülmektedir.



**Şekil 12.** Lastik kayma açıları zamanla değişimi

Bu durum, orijinal araçta ön iki tekerlekten yönlendirmek üzere tasarlanan direksiyon geometrisinin, arka tekerleklerin de yönlendirmeye dahil edilmesine bağlı olarak değişen dönüş kinematiğine uyum sağlayamadığını göstermektedir. Ön yönlendirme kinematiği yeniden değerlendirilerek, Ackerman geometrisini sağlayacak şekilde direksiyon sistemi değiştirilmelidir. Böyle bir değişiklik çalışmanın kapsamı dahilinde olmadığından yüksek ön kayma açıları kabul edilerek devam edilecektir.

Ön lastiklerde görülen bu yüksek kayma açıları, manevra esnasında olası lastik gürültülerine, aşınmaya ve ön süspansiyon parçaları üzerindeki yanallı kuvvetlerin artmasına sebep olacağı öngörülmektedir.

## 6. SİSTEMİN ENTEGRASYONU

Tedarik edilen SKF marka doğrusal eyleyiciler, arka süspansiyon rot kollarının yerini alacak şekilde teker tarafından küresel mafsal, gövde tarafından ise ardışık iki adet mafsal ile bağlanmaktadır (Şekil 13).

Ardışık iki mafsal, eyleyicinin kendi eksenini

etrafındaki dönme serbestisini ortadan kaldırması açısından gereklidir. Bu yönden iki mafsal tek bir universal mafsalı temsil etmektedir ancak daha rijit bir yapıya sahiptir.



Şekil 13. Araca monte edilen doğrusal eyleyiciler

Aracın arka kısmına konumlandırılan Siemens PLC kontrol sistemi, yapılan çalışma sonucunda elde edilen ve polinomlar ile ifade edilen eyleyici deplasman eğrilerini (Şekil 7), direksiyon açısı sensöründen gelen sinyali referans alarak uygulamaktadır.



Şekil 14. Teker açısı ölçüm tablaları üzerinde sistem performansının ayarlanması

Sistemin genel performansı ilk olarak Şekil 14'de gösterildiği gibi açı ölçüm tablaları üzerinde denenmiş ve eyleyicilerin açı girdilerine tepki süreleri ve aşmaları, kontrol sistemi üzerinden hassas bir şekilde ayarlanmıştır.

Direksiyon açısına karşılık gelen teker açıları ölçülerek doğrulama yapılmış ve üretim toleranslarına dayalı hatalar, kontrol sistemine tanımlanan ofsetler ile giderilmiştir.

Sadece park hızlarında kullanılmak üzere tasarlanan sistem, araç hızının sınır değeri olarak belirlenen 25 km/saat'in üzerine çıkması durumunda yönlendirme kinematiğine bağlı kalarak arka teker açılarını düzgün bir

şekilde sıfıra çekmektedir. Arka tekerleklerde sağlanan büyük teker açıları, yüksek araç hızlarında aracın yönlendirme stabilitesini azaltmakta ve kontrolü zorlaştırmaktadır. Riskleri önlemek amacıyla sistem park hızları dışında devreye alınmamaktadır.

## 7. SONUÇ

Bu çalışmada, tanımlanan hedef minimum dış dönüş çapını sağlamak üzere ön tekerleklerden yönlendirmeli araca entegre edilen arka tekerlek yönlendirme sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Düşük hızlarda Ackerman geometrisine mümkün olduğunca yaklaşmak üzere, ön tekerlek yönlendirme açıları baz alınarak arka tekerleklerin yönlendirme kinematiği hesaplanmış ve sanal prototipler üzerinde doğrulanmıştır. Kaldırımdan kaldırıma dönüş çapı için koyulan hedefin hesaplanan kinematik ile sağlanabildiği ortaya konulmuştur.

Ön yönlendirme kinematiğinin, dört-tekerlekten yönlendirme kinematiğine uyumlu olmamasına rağmen, genel olarak sistemin beklentiyi karşıladığı ve fiziksel testlerde kabul edilebilir bir sonuç ortaya koyduğu gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Gillespie, T. D., 1992, “**Fundamentals of Vehicle Dynamics**”, Society of Automotive Engineers, Inc.
2. Thurston-Thorpe, J., Power, T., 2009, “**Rear Wheel Steering System**”, Patent Cooperation Treaty (PCT), Patent No: WO 2009/156738 A1.
3. Heiβing, B., Ersoy, M., 2011, “**Chassis Handbook**”, Vieweg+Teubner Verlag

