

# Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel olarak tanımlanması

Arif Şenol Şener<sup>1</sup>

## Özet

Bir ürünün ve onun alt parçalarının gerçek çalışma koşullarındaki karşılaşılabileceği yük bilgilerini kestirmek kritiktir. Bir araç parçalarının bütün hayatını tahmin etme müşteri kullanım bilgisini ve o pazarın gerektirdiği güvenilirlik bilgilerini de göz önüne alan fiziksel testler ve nümerik analizlerle saptanmalıdır. Bu çalışmada bir hafif ticari aracın Türkiye'deki ortalama müşteri araç kullanımının tespiti bir anket yapılarak belirlenmiştir. Türkiye yolların yorulma karakteristikleri 50 adet yol verilerinin incelenmesiyle saptanmıştır. Bu makale bir yaprak yaya ait Türkiye genel yol spektrumunun tespit edilmesinde odaklanmıştır. Parçanın yorulma analizleri ve öngörülen ömür hesapları, sonlu elemanlar analizleri kullanılarak hesaplanmış ve Palmgren-Miner metoduyla doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Türk Müşterisi Otomobil Kullanımı, Yaprak Yay, Sonlu Elemanlar, Yorulma Analizi, Palmgren-Miner Kuralı

## Vehicle component fatigue life definition based on the finite element method according to a customer usage profile

### Abstract

Knowledge of operational loading conditions is critical when estimating the service life of a product and its components. Predictions regarding the life span of a vehicle component must be determined by physical tests and numerical analyses that take into account customer usage and market based reliability requirements. In this study, A questionnaire was used to determine the average usage of the light commercial vehicles in Turkey. Fatigue characteristics of Turkish roads were determined by analyzing fifty different roads. This article focuses on defining the general load spectrum of Turkey roads belong to the leaf spring. Fatigue analysis and estimated lifespan of the part were calculated using Finite Element Analyses and verified by the Palmgren-Miner rule.

**Keywords:** Turkish Automotive Customer Usage, Leaf Spring, Finite Element, Fatigue Analysis, Palmgren-Miner Rule<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Dr. Arif Şenol ŞENER, İstanbul Aydın Üniversitesi MYO Otomotiv Programı, Tel.0532 628 46 60 "Hafif Bir Ticari Otonun Arka Süspansiyon Yaprak Yayının Türkiye Koşullarına Göre Yorulma Analizi" Doktora Tezi

## Giriş

Otomobil imalatçıları uluslararası rekabet edebiliyor olmak için,yeni modellerinde otomobil maliyetlerini minimum da tutarken aynı zamanda müşteri kalite beklentilerini de tatmin edici bir şekilde karşılayabilecek bunun yanı sıra bu modellerini en kısa zamanda piyasaya sunmaları gereğinden dolayı büyük bir pazar baskısı altındadırlar (**Paul vd., 2001**). Yeni modellerin üretime alınma zamanının azaltılması konusunda otomobil endüstrisinde artan bir baskı vardır. Son 10 yılda genel olarak ürünün geliştirme zamanı 5 yıldan 2 yıla kadar düşmüştür. Tasarım geliştirme süreleri azaldığından , otomobil üreticileri yol yük verilerinin ölçümleri ve analiz metotları gibi gelişmiş teknikler kullanarak daha hızlı tasarım geliştirme yollarını aramaktadırlar (**Heyes vd., 1997;Paul vd., 2001**).

Genel otomobil tasarım gereksinimleri aşağıdakileri içermektedir; yüksek dijitalik, az yakıt sarfiyatı, yumuşak biniş ve sürüş, konfor, sürüş karakteristikleridir. Bu gereksinimlere ilave olarak aracın garanti zamanı içinde dayanım ve güvenilirlik konusunda da öngörülen hedefe beraberce ulaşılmalıdır. Dayanım malzemenin yorulmasıyla alakalıdır. Bu tür hatalar çok km veya mil yapmış eski araçlarda görülür (**Heyes vd., 1997**). Yorulma hatalarının gerçek müşterilerde ortaya çıkması uzun bir zamana bağlı olduğundan bu hataların kısa zamanda tespiti oldukça güçtür.

Bir aracın dayanımı 3 önemli parametreye bağlıdır; tasarımın geometrisine, malzeme özelliklerine ve yükleme koşullarına. Yük koşullarından biri olan yol pürüzlülükleri, yol tipleri ve coğrafik koşullar araç ömrünü etkiler. Normal koşullar altında, araçlar yüksek yüklerle nadiren maruz kalırlar. Zaman zaman yol pürüzlülüğünden kaynaklan bu yüksek yüklerin hassas bir istatistiksel tanımını elde etmek önemlidir (**Bogsjö, 2006**). Yol kalitesi ülkeden ülkeye önemli ölçüde değişir. Bu nedenle otomobil üreticileri hedef pazardaki müşteri beklentilerine göre kalite ve dayanım sınırlarını koymalıdır. Dayanım testleri zaman alıcıdır (**D'aprile vd., 2001**). Van Ossen Slingeland (1999) ifadesinde zaman açısından daha verimli bir metodun örnek olarak sanal yorulma analiz kestirimleri geliştirme zamanını azaltmak için kullanılmalıdır (**Huizinga vd.,2002**). Veri depolama kapasitesini ve veri ölçme hızındaki gelişmelerden sonra, bilgisayar yardımı mühendislik (CAE) yorulma hayatını değerlendirmek için anahtar bir araç olmalıdır. (**Huizinga vd., 2002; Medepalli ve Rao. 2000**). Değişik koşullarda özel test parkurlarından ve normal yollardan alınan geçerli bir yol profil verisi bilgisayar analiz simülasyonları, test rigi ve test parkurları ile normal kullanımı da oluşacak yorulma hayatı değerlendirme sonuçlarını kolaylaştırır. Bu, araç imalatçıları için önemli derecede geliştirme zamanının, araç geliştirme maliyetinin azalmasında tasarrufa yol açtığı gibi araç alan kişilerden de garanti şikayetlerinin riskini azaltır (**Ahlin vd., 2004**). Günümüzde, otomobil üreticilerinin kullandıkları önemli dayanım test metotları dört adettir; Sonlu Elemanlar Analizine (FEA) dayanan yorulma analizleri, test rigleri, test bankoları (laboratuar tek parça testleri) ve hızlandırılmış test yollarıdır. FEA dayalı yorulma analizleri çok kısa zamanda ve en uygun bir tasarım çözümü sağlar. Buna rağmen, ürün ve süreç hataları FEA ile tamamıyla temsil edilemez fakat kabul edilebilir bir sınırdan hesaplanabilir. Banko benzeşim testleri test zamanı ve maliyeti azaltıldığından gerçek şartları tamamıyla yansıtmayabilir. Yolda toplanan verilerin bazıları laboratuar koşulları altında yansıtılamaz. Örneğin, laboratuarda şasi dikey eksen boyunca test edilebilir. Normal sürüş şartlarında, frenleme, ivmelenme ve dönüş manevraları yatay yükler oluştururlar ki bu yanal yüklerin bir büyük kısmı da motorun ağırlığından dolayıdır. Bu tür yükler hidrolik pistonlarla laboratuarda çok iyi simülasyonu yapılamayabilir. Onlar çok düşük frekanslıdır ve böylece şasinin statik gerilmesini etkileyebilirler ve eşdeğer yorulma gerilme değeri değişebilir. Buna karşın, hızlandırılmış yol testleri laboratuar, banko ve FEA ya göre daha fazla zaman harcayan ve daha pahalı testlerdir. Hızlandırılmış test parkurlarında bazı sürücüler çok uzun bir süre araç süremeyebilir çünkü parkur çok ağır olup sürücü sağlığını etkileyebilir.

Yukarıda açıklanan her bir metodun kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bu ele alınan her bir metod için ana genel yol yük spektrumunu ve onunla ilişkili hızlandırılmış testler için genel yol yük spektrumu ile korelasyonu kurmada, genel yük spektrumunun hangi yollarla saptandığı önem kazanmaktadır. Bütün bu metodlar yorulma hasar kestiriminin zaman eksenli ya da frekans eksenli benzeşimlerine dayanmaktadır(**Gobbi ve Astinu, 1998**). Tarihi gelişim içinde ilk tasarım, geliştirme ve test prosedürlerinin neler olduğuna bakılırsa; bunlar tahmini kestirim çalışmalarından, en kötü yol koşullarından, pratikteki tecrübelerden, temel yol yük verilerinden ve yasalardan olduğu geçmişte görülür. Günümüzde müşteri profilini tespit etmede kullanılan en yaygın iki metod Black Box ve Anket metodudur.

Bu makalenin amacı; Bu çalışma ilgili firmanın ön seri aşamasında Türkiye 'de ilk defa devreye aldığı hafif ticari otosundaki arka süspansiyon yaprak yayının uzun km lere daha müşteri fiilen uzun km lere ulaşmadan kırılıp kırılmadığını CAE(bilgisayar destekli mühendislik) ile test ederek gerekirse önleyici faaliyetleri veya imalat sürecindeki düzeltici faaliyetleri alma ve ayrıca bu çalışma ile Türk müşteri araç kullanım profilini anket metoduyla belirleyip araç üzerindeki fiziksel ölçümlerle genel yük spektrumunu (Türk müşterisi kullanım profilini) oluşturmaktır.

### **Genel müşteri korelasyon metodları ve analizi**

Bir aracın ya da bir parçanın dayanım testleri normal koşullar altında tüm yükleri benzeştirmelidir. Bunun manası hedef yük test spektrumu aracın hayatı boyunca beklenen tüm yükleri ve koşulları kapsmalıdır(**Grubisic, 1994**). Otomobil üreticileri hedef pazarın müşteri kullanım bilgilerini önceden kestirim yapıp ürünleri üretilip o pazara sunulmadan önce müşterilerinin karşılaşabileceği güvenilirlik hedeflerini sağlayabilmeli ve müşterilerini tatmin etmelidir. Çalışma koşulları; trafik, genel araç kullanım amacı, araçta kullanım esnasında taşıdığı yük miktarı, coğrafik ve iklimsel koşullar, o ailede kişi başına düşen araç miktarları gibi konular aracın hangi ülke ve coğrafyada kullanılacağına bağlıdır (**Grubisic, 1994**). Araç parçalarının servis hayatı, büyük anlamda kullanım sırasındaki yüklerin şiddetine ve tekrür sayısına bağlıdır (**Grubisic, 1994**). Tasarım ve test amaçları için, bir temsili bir yük spektrumunun tanımlanarak tasarımın değerlendirilmesinde olduğu gibi dayanım testlerinde kullanılması için ihtiyaç vardır.

Yük spektrumunun önemli 3 parametresi çalışma koşulları, yapısal davranışlar ve oto kullanımıdır. Bu parametreler her biri birbirine bağlıdır ve bir temsili tasarım spektrumunu saptamak için bu parametrelerin hepsi hesaba katılmalıdır. Araç kullanımı ve sürücü davranışları yapısal davranışları, araç dinamik özelliklerini ve tasarımı değerlendirirken kritik faktörlerdir. Yol kalitesi ve tipleri çalışma koşullarını kestirim yaparken anahtar faktörlerdir. Eğer kullanım ve çalışma koşulları biliniyorsa, bir yeni aracın yol spektrumu saptanırken yalnızca o araca ait yüklerin adapte edilmesine ihtiyaç vardır (**Grubisic, 1994**). Bir kere bu saptama yapılmışsa, araç kullanımı ve çalışma koşullarına dayalı bir korelasyonun yapılarak tanımlanmalıdır (**Grubisic, 1994**). Bugün, müşteri kullanımını tespit etmek için kullanılan iki metod vardır; Anket (Questionnaire ) ve Siyah Kutu (Black Box ) metodudur.

### **Anket metodu**

Müşterilerle telefon vasıtasıyla veya yüz yüze yapılan anketlerle müşterilerin yol tipi kullanım oranı, o aracı hangi amaçla kullandıklarının oranı, eğitim seviyeleri, araç kullanım deneyimleri; kaçınıcı araca sahip oldukları vb sorularla müşterinin profili tespit edilir. Anket sonuçları elde edilip değerlendirilmesi yapıldıktan sonra, bir yol testi benzeşimi araç yada araçlar ve veya sürücü yada sürücülerle yol etkisinin verileri halk yolarında, değişik sürüş manevralarında (frenleme, viraj lama, hızlanma vs), güç üretimi sırasında ( motor ve iletim parçalarında ), farklı yerlerde, farklı yol

Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel olarak tanımlanması

tiplerinde ( şehir içi, şehir dışı, dağ yollarında, kırsal ve bozuk yollarda), özel test parkurlarında ve farklı araç yük koşullarında yol verilerinin araca etkisi ile alakalı ölçümler yapılır (**Grubisic, 1994**). Ölçülmüş veriler spike ve filtreleme vb. süreçlerinden geçirilir. Frekans analizleri ve aritmetik işlemler yorulma analizleri için işlemlerinden geçirilir (**D'aprile ve diğerleri., 2001**). Yol uyarı verileri sinyalleri periyodik random dan oluştuğundan, bu sinyallerin anlamlı bir şekilde yorulma açısından mukayesesi için range-pair ,rain flow, level corssing vb gibi istatistiksel bir süreçten geçirilmelidir (**ASTM E 1049,1985; D'aprile vd., 2001**). İstatistiksel olarak sayılmış olan yol uyarı sinyalleri 1 veya 1000 km vs gibi normalize edilmiş verilere dönüştürülür. Daha sonra bu sinyaller yol tiplerine ve yük koşullarına ayrılarak sınıflandırılır. Daha sonra bu veriler extrapolasyon vasıtasıyla ilgili firmanın yararlı araç kullanım zamanına kestirim yapılarak indirgenir. Bir çok firma tasarım gereksinimlerini öngörülen müşteri kullanımının ( km ya da mile dayanan ) % 90 yada % 95 karşılayan değere indirger. Genel kullanım profili ilgili firma hafif ticari aracının 200.000 km değeri ölçüm yapılan her fiziksel büyüklük için elde edilir. Elde edilen bu büyüklükler anket değerlendirmesi sonucunda elde edilen veriler ile oranlanarak o ülkeye ait genel yol uyarı sinyallerinden oluşan genel kullanım profili değerleri her bir sensor için elde edilir. Daha sonra elde edilen genel kullanım profili verilerinin bankolarda, hızlandırılmış parkurlarda, test riginde veya sanal analizlerde korelasyonun hızlandırılmış olarak kurulabilmesi için şu prensibe dayandırılır; *“Eğer aynı girdiler yeniden üretilirse, aynı hasar oluşacaktır”*.

Genel yol kullanım profili oluşturulduktan sonra, yol parkurlarının ya da test riginde kullanılacak verilerinin farklı karışımları ile hedef değerlerin sebep olacağı yorulma hasarına eşdeğer girdiler oluşturulabilir. Eğer aynı girdiler elde ediliyorsa, değişik formlardaki matris hesaplamalarının yol uyarı sinyallerinin değişik karışımlardaki düzenlenmesi test zamanı ve test uzunluğu açısından en uygun düzenleme yapılabilir.

$$A[X_1] + B[X_2] + C[X_3] + \dots + Z[X_n] = [Y]$$

Burada;

A1, B, C, D...Z = Anket metodundan elde edilen (% şehir içi yol kullanım oranı , % dağ yolu kullanım oranı,vs ) test verileri çarpanı

[X1],[X2],...[Xn] = Değişik her bir yol tiplerinde araç üstündeki duyargalardan ölçülen test verilerinin (yol uyarılarının) ölçümleri.

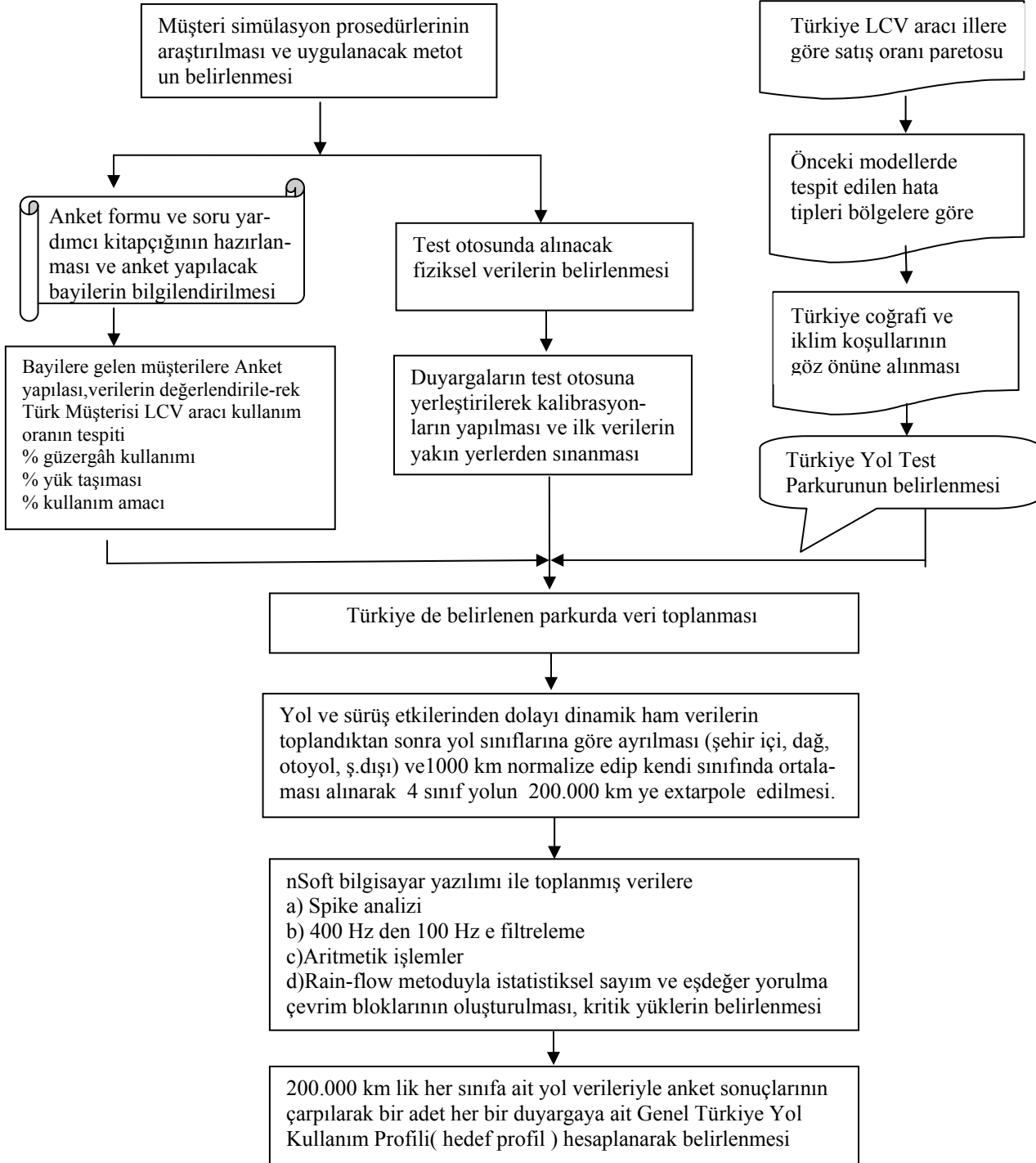
[Y] = Genel yol kullanım profili.

### **Black Box Metodu**

Black box metodunda ilgili araç üretici firma yaklaşık 40 adet cihaz ve duyargalarla( ısı duyargaları, kuvvet ölçerler, ivme ölçerler vb.) ile donatılmış aracını değişik meslek kategori-sinde gönüllü müşterilerine belirli periyotlarda kullanmalarını sağlamaktır. Toplam araç başı gidilen km yaklaşık 150.000 km dir. Müşteri her yola çıkışında hava durumunu, gittiği yol güzergâhı, o günkü arabayı kullanım amacı, arabaya koyduğu yük durumu vs konularında kayıt tutar ve yaklaşık her hafta cihada depo edilen duyargaların ölçmüş olduğu veriler ilgili üretici firmada bir kayıt altına alınarak depo edilir ve aracın veri depolama kapasitesi boşaltılır. Tekrar ölçümlere ve yol yapmaya devam edilir. Yaklaşık üç sene devam eden bu veri toplama işleminden sonra, veriler istatistiksel metotlarla değerlendirilerek araç kullanım profili ve değişik duyargaların genel yük spektrumu elde edilir. Elde edilen veriler hızlandırılmış test parkurları ve laboratuvar ortamında ve bilgisayar simülasyonları ile benzeşimleri kurulur (**Rivolo vd.,1983**).

## Örnek uygulama

Bu çalışmada Türk müşterisi LCV genel yol profilini tespit etmek için uyguladığım metodun kısa bir algoritması Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1 Çalışmanın algoritması

Belirlediğim ilgili firma servislerinde Türkiye deki testler esnasında ve sonrasında benim ve ilgili firma servis yetkililerinin önceden oluşturduğum anket formu ve soru yardımcı kitapçığı ile yüz yüze anket yapılarak Türk müşterisinin hafifi ticari araç kullanım profili tespit edildi. Aynı zamanda

Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel alarak tanımlanması

yol yorulma karakteristiklerinin toplanması için, ölçüm metodu olarak ilgili firmanın bir adet Hafif Ticari Otosu cihaz ve duyargalar ile donatılıp bir şoför; araç sürüşü için ve bir mühendis; cihazları kullanmak kaydıyla önceden belirlenmiş olan yol güzergahın da tam yük koşullarında Türkiye’de yol testleri yapıp yol karakteristiklerinin verileri toplandı. Bu çalışmada toplanan veriler Rain-flow ve Level crossing istatistik sayama metotları kullanılarak aritmetik ortalama metodu ile bu veriler işlendi. İşlenen yorulma verileri her yol karakteristiğine ait (şehir içi, şehir dışı, dağ ve şehirlerarası yol ) verilerinin aritmetik ortalamaları alınarak 1000 er km lik 4 veriye indirildi. Elde edilen bu dört veri (şehir içi, şehir dışı, dağ ve otoyol ) her biri anket metodunda tespit edilen kullanım oranlarıyla çarpılıp, bu tür araçlar için 200.000 km ye denk gelecek şekilde extrapole edilip Türk müşterisi genel kullanım profili her bir duyarga için tespit edildi. Bu çalışmanın kısa bir algoritması Şekil 1 de gösterilmiştir.

### **Türk müşterisi genel yol kullanım profilinin saptanması**

#### **Veri toplama aracının hazırlanması**

Veri toplama için Datarec A160 HEIM kayıt cihazını kullandım, Bu cihazdaki;

#### ***Sekiz adet İvme Kanalında ;***

Bir yaprak yay üzerinde tek eksenli iki adet yarım-köprü birim uzama ölçer duyargası ile; yol pürüzlülüğü, manevralar ve ivmelenmeden oluşan arka aksa gelen dikey yüklerin ölçümü için yaprak yay üzerindeki asal gerilme eksenine yerleştirilerek ölçümler yapıldı. Bir aks mili üzerinde üç eksenli birim uzama duyargası ile: aracın ivmelenmesi, durması ve vites değişimindeki aksa etkileyen burulma etkileri ölçüldü. Bir direksiyon rot kolu üzerinde tek eksenli bir adet birim uzama ölçer duyargası ile: sağ ön tekere gelen yatay kuvvetlerin ölçümü için hazırlandı. Dört adet dikey ivme ölçer ile: farklı manevralardan ve yol pürüzlülüğünden oluşan dikey ivmelerin araca etkisi amortisör alt bağlantı noktalarında 4 adet ivme ölçer duyargası ile ölçüldü.

#### ***Sekiz adet analog kanalda;***

İki adet ivme ölçer ile: yatay ve boylamasına araç gövdesine etki eden ivmelenmeler araç ağırlık merkezine yakın olan konsola yerleştirilerek ölçümler için kullanıldı.

Bir adet basınç duyargasının fren sistemine yerleştirilmesi ile: aracın yapmış olduğu frenleme adedi ve şiddeti ölçümleri için kullanıldı.

İki adet mesafe ölçer( displacement sensor) duyargası ile: Yolların dikey düzgünlüğü ve ivmelenmelerden dolayı araç kasasındaki dikey hareketlerin ölçümü için kullanıldı.

#### ***Dijital kanallarda***

Araç hızı, motor krank dönüş devri ölçümleri için kullanıldı.

#### ***RS-132 cihazı kanallarında***

12 adet sıcaklık duyargası (ön fren disk sıcaklığı, ön fren balata sıcaklığı, araka fren balata sıcaklığı, motor su sıcaklığı, motor yağ sıcaklığı, şanzıman yağ sıcaklığı, dış hava sıcaklığı, dört adet amortisör yüzey sıcaklığı) sıcaklık ölçümleri için kullandım.

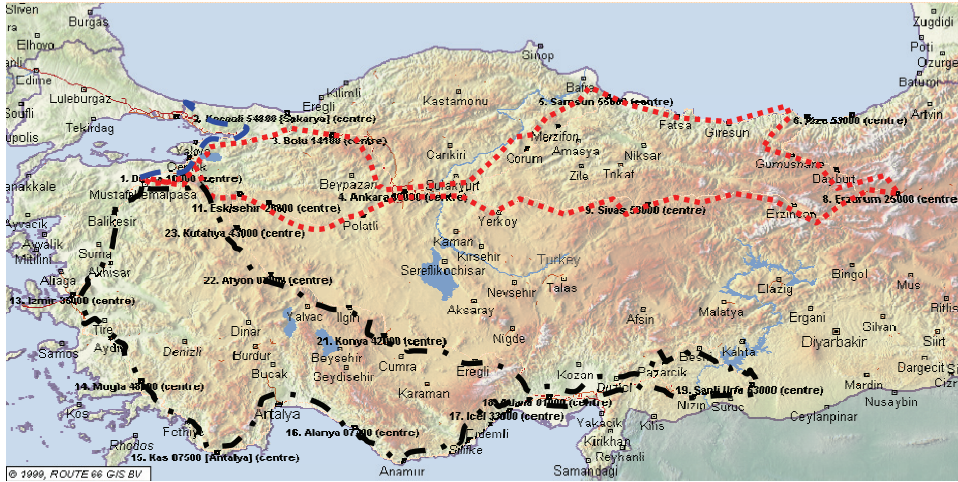
### **3.1.2. Anket uygulaması**

Bu çalışmada, daha hızlı veri toplanabilmesi, veriler üzerinde daha esnek bir değerlendirme yapabilme ve benzer bir metot olan Black Box metoduna göre kıyaslandığında çok daha ucuz bir metot olduğundan anket metodu seçilmiştir. Bu hafif ticari araca ait Türk müşterisi araç kullanım profili anketi benzer bir çalışma olan FIAT firmasının Ritmo ve Tipo araçlarında yapmış olduğu anket çalışması geliştirilerek, kullanım amacındaki tatil değeri 1 haftadan 3 güne indirgenerek soru

yardımcı kitapçığı ve anket formu oluşturuldu (Şener, 2003). Uyguladığım yöntem de hafif ticari araç firması bayilerinin yardımıyla müşteri ile telefon kullanmaksızın yüz yüze 300 den fazla anket yaptım. Bu anket verileri değerlendirip Türk müşterisi genel kullanım profili olan hedef değer oluşturulmasında matrisin çarpanları olarak kullandım.

### Test haritasının saptanması

Yol uyarı sinyallerinin toplanması için lazım olan yol test haritası Türkiye’de müşteri araç kullanımının % 90 ını temsil edecek şekilde aşağıda yazılan nedenler temel alınarak oluşturuldu. Şekil 2 deki haritada görülen yollar, Hafif Ticari Aracın Türkiye’de bölgelere göre satış oranları (1999), daha önceki modellerde müşteri şikayetlerinin olduğu bölgeler, Türkiye iklimsel şartları, ve coğrafya bilgileri temel alınarak oluşturuldu. Yollar 4 gruba bölünmüştür: Şehir içi kullanımı en çok yaygın olarak İstanbul semtlerinde, dağ yolları daha çok Karadeniz bölgesinde, sıcak iklim ve virajlı yollar Akdeniz bölgesinde, buna karşın ise yüksek seviyeler, sıcak iklim ve şehirler arası uzun mesafeler ise Orta Anadolu’daki şehirlerarası yollar ile karakterize edilmiştir. Otoyol karakteristik veri ölçümleri için İstanbul-Ankara ve Adana - Gaziantep yollarında yol uyarısı verilerinin ölçümleri yaptım. Toplanan karayolları verilerinin yanına genelde ilave edilen standart bilinen özel test parkuru verileri Türkiye’de standart test parkurları yabancı ülkelerdeki gibi olmadığı için, genel karayolundan alınan verilerin yanına özel test parkurları eşdeğer yorulma karakteristiği etkisini yaratabilecek köy ve çok bozuk halk yollarından veriler alınmıştır.



Şekil 2 Türkiye genel yol kullanım profilini tespit etmede kullanılan yol test haritası

### Türkiye genel müşteri yol kullanım profilinin saptanması için yollardan veri toplanması

Manevralardan ve yol pürüzlüğünden kaynaklanan yol etkilerinin ölçümünün birçok yolu vardır (Grubisic, 1994). Türkiye’deki yol uyarı sinyallerinin toplanması için, cihaz ve duyargalarla donatılmış hafif bir ticari oto, bir sürücü ve bir veri toplamayı yöneten bir mühendis olarak ben, araç tam yük koşullarında Şekil 2 de gösterilen Türkiye yollarında testler yapılarak yorulma karakteristik verileri topladım.

Önceki çalışmalarda; genel karayolunda (şehir içi, şehir dışı, dağ yolu ve otoyol) ölçülen verilere ilaveten özel test parkurlarından belirli oranda yorulma verileri eklenmiştir. Bu çalışmanın diğer önceki çalışmalardan farkı Türkiye genel karayolu kullanımına ilave olarak konulacak olan özel test parkurlarındaki veriler Türkiye de özel test parkurları olmadığı için, bu etki köy ve dağ yollarında ağır bozuk zeminde toplanan yorulma yol karakteristikleri kullanılmıştır.

Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel alarak tanımlanması

Bu çalışmanın diğer önceki çalışmalardan önemli bir farkı da daha önceki benzer çalışmalar incelendiğinde: yollardan veri toplama işlemi sırasında genelde iki şehir arası yol uzunluğunda örnekleme ile veri toplanmıştır. Diğer çalışmalarda ortalama olarak her yol tipinden yaklaşık 20 km lik bir temsili yol verisi alınmışken, bu çalışmada iki şehir arası olan veri toplama işlemi hiç kesintisiz direkt ölçüldü. Bunun sebebi ilgili üretici firmanın Türkiye de seri üretim öncesi güvenilirlik ve hızlandırılmış yorulma yol testleri parkurları yollarının standardizasyonu ve gerekirse bazı yolların iptali ve yenisinin eklenmesi amacıyla yapıldı. Bu sebepten bu çalışma daha önceki çalışmalara oranla örnekleme açısından daha hassas bir ölçüm yapılmış olmasına karşın yüksek oranda veri depolanması açısından ve bu verilerin işlenmesi açısından daha uzun bir zaman alan hantal bir çalışma olarak değerlendirilebilir.

Ölçümler esnasında trafik limit hızlarını aşmayacak ve trafik akışını aksatmayacak şekilde mümkün mertebe sabit hız koşullarında ölçümler yapılmıştır. Buradaki gaye, hız farkından dolayı olabilecek değişkenlikleri ortadan kaldırmaktır.

### **Veri İşleme**

Datarc A160 HEIM ile yapılan ham ölçülmüş veriler bilgisayara ham olarak transfer edildi. Bu ham veriler ilk işlem olarak spike analizi, filtreleme, aritmetik toplam çıkarma ve bölme işlemlerinden geçirilerek temizlemesi yapıldı. **(D'aprile vd., 2001;nSoft User Manuel, 1999).**

### **Spike analizi**

Veri toplanırken bazı spikelar (şiddeti çok büyük olup parçanın böyle bir davranışının fiziksel olarak imkansız olduğu durumdaki sinyaller olup yorulma makineleri için zararlı sinyaller ) çevresel etkilerden ve fiziksel faktörlerden (gerilim düşmesi, manyetik alan etkileri vs den) dolayı. Bu spikelar nSoft firmasının yazılımındaki görsel ve istatistiksel metotlar kullanılarak temizlendi. **(nSoft V5.2 User Manual, 1999).**

### **Filtreleme**

Yapılan frekans analizlerinde düşük genlikli 100 Hz üzerindeki sinyaller yorulma analizleri için önemli olmadığı düşünüldüğünden low-pass filtreleme yöntemiyle orijinal verilerden çıkartılıp atılmıştır **(nSoft V5.2 User Manual,1999)**. Genelde araç süspansiyon parçalarının yorulma analizleri için frekans aralığı 40 ile 60 Hertz arasındadır. Buna karşın yol simülasyonları için, genellikle 100 HZ üzerindeki veriler ihmal edilmiştir.

### **Aritmetik işlemler**

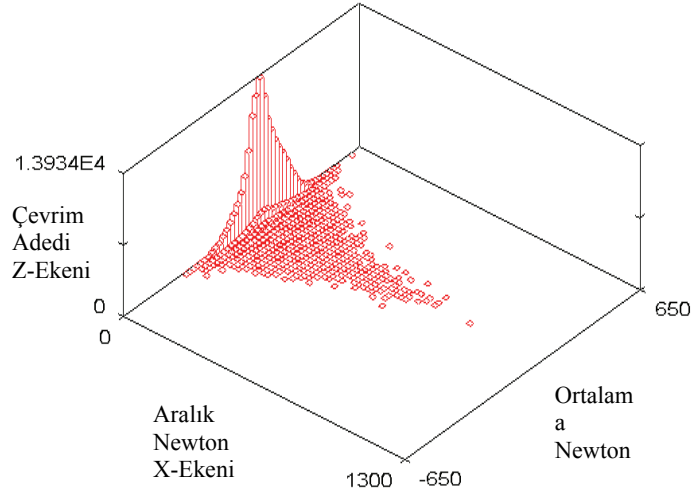
Aritmetik işlemler sinyallerin ve toplanması ve çarpılması vb işlemler için kullanılmıştır. Bu projede de her bir toplanan ve yorulma analizleri için yararlı olmayan veriler test aracı hareket etmeden önce ölçülen verileri toplam sinyalden atılmıştır.

### **İstatistiksel yol sinyallerin adetsel sayımı**

Yol uyarı sinyalleri zaman bağlı sürekli ve rastlantısal sinyallerden oluşmaktadır. Araç üzerinde çukurlar, demir yolları vb geçişi esnasında şok ve etkisi yaratan çok hasar verici yüzeylerdeki sinyaller ise periyodik olmayan (deterministic) sinyallerden oluşmaktadır. Zamana bağlı sinyallerin mukayese edilebilmesi için zamandan bağımsız eşdeğer bir değere dönüştürülmelidir. Bu çalışmada zamana bağlı değişen yorulma yük karakteristik verilerinin mukayeselerin yapılması için arka yaprak yayda ortalama gerilmeyi de hesaba katan rainflow istatistiksel sayım metotları kullanıldı. **(ASTM E 1049, 1985; Bishop vd., 1999)**. Yaprak yay birim uzama verileri öngörülen hedef değere (MP, 200.000 km ) rainflow istatistiksel sayma metodu kullanılarak indirgenmiştir. Rainflow



istatistiksel sayma metodu parça üzerine etkiyen zaman değişkenli yüklerin etkisinin ölçülmesinin yanı sıra ortalama gerilmenin büyüklüğünü de hesaba katar. Zamandan bağımsız yaprak yay uzama verisi Şekil 3 de gösterilmiştir. Birim uzama sinyallerinin istatistiksel sayımında diğer metotlara göre daha hassas olduğundan ve ortalama gerilmeyi de hesaba kattığından gerilmeye maruz parçalarda ( yaprak yay, aks ve rot kolu ) Rainflow metodu kullanıldı. (ASTM E 1049, 1985; Bishop vd., 1995).



Şekil 3 Rain-flow histogramı

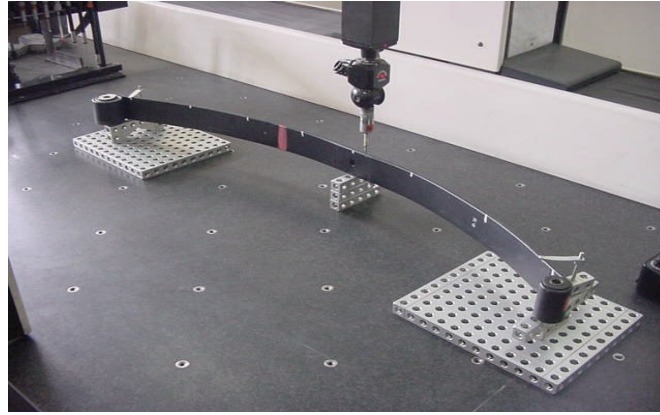
### Türkiye Genel yol profilinin oluşturulması

Her bir ölçümü yapılmış yol uyarı sinyali farklı uzunlukta olduklarından dolayı işlemlerde kolaylık olması açısından 1000 km lik değere indirildi. İndirgenen sinyaller sınıflarına göre (şehir içi, şehir dışı, dağ ve otoyol) göre ayrıldı. Her bir yol sınıfındaki sinyaller, kendi aralarında aritmetik ortalaması alınarak, sınıfların her birine ait yani toplam 4 adet ( şehir içi, şehir dışı, otoyol ve dağ yolu ) olmak üzere her bir sınıfın 1000 km lik ortalama değeri çıkarıldı. Her bir sınıftaki 1000 km lik değer 200000 km yükseldi. Daha sonra dört adet 200000 km lik yol farklı tip her bir yol sınıfına ait anket sonucunda bulunan çarpan yüzdeleriyle çarpılıp 200000 km farklı sınıftaki yol sinyalleri anket oranları ile çarpılarak tek bir 200000 km lik her duyargaya ait genel Türkiye yol kullanım profili olan tek bir sinyal elde edildi.

### Sonlu elemanlar analiziyle deneysel verilerin simülasyonu Modelleme

Yaprak yayın geometrik modeli yaprak yay üzerinde yaklaşık 1000 noktada 0.0003mm hassasiyeti olan 3D boyutlu ölçüm cihazıyla yaratılıp Şekil 4 de gösterilmiştir.

Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel alarak tanımlanması

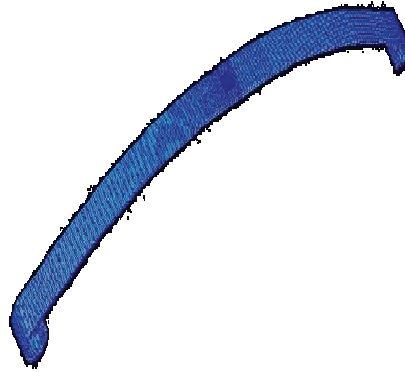


**Şekil 4** 3 Boyutlu ölçüm teknikleriyle koordinat ölçümü

Yaprak yayın CAD modeli Pro Engineer programı vasıtasıyla ölçülmüş noktaların koordinatları kullanılarak yaratıldı. Daha sonra FEA( sonlu elemanlar analizi,) yapılabilmesi için bir 3D CAD modeli MSC Patran software ine transfer edildi. (**Pro-engineer, 2001; MSC Patran,2001**).

## **5.2 Sonlu elemanlar modellemesi**

Yaprak yayın geometrik modeli karmaşık yapılardan oluşmadığından, isomesh metodu kullanıldı. Yaprak yay geometrik modeli 5728 hexa-tip elemanlar ve 9156 düğümden (node) oluşturuldu **Şekil 5**.Yaprak yayın FE sonlu elemanlar modellemesi sırasında kritik noktalar, kesitler ve bölgeler yaprak yay temel eksenini boyunca yüksek hassaslıkta ağ gözü (mesh) yapıldı.



**Şekil 5** Yaprak yay sonlu elemanlar modeli

## **Yük ve sınır koşulları**

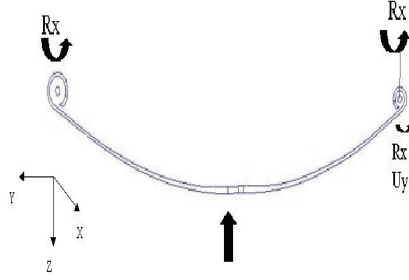
Bilgisayar analiz sonuçlarını doğrulamak için, parçalar laboratuvarında fiziksel olarak test edildi. Yaprak yayı test etmek için yaprak yay burçlarının her ikisi de kayar tekerleklere bağlanmıştır öyle ki test bankosunda burçlarının sürtünmesiz bir şekilde hareket edebilmeleri için. Aynı zamanda yaprak yayın merkezi parçanın kinematik hareketini simülasyonunu yansıtmak için dikey olarak sabitlenip hareketli bir piston tarafından hareket ettirildi. Yaprak yay sonlu elemanlar modeli (**Şekil 6**) daki iki sınır koşuluyla test edildi.(**MSC Nastran Getting starting User Guide, 2001**).

**-Sonlu elemanlar modelinin birinci sınır koşulu**

Yaprak yay büyük burç tarafı x-z düzleminde sabit ve y ekseninin de dönmeye izin verilip, yaprak yayın küçük burç tarafı serbest (yani; y eksenini boyunca serbest dönmeye ve x-z düzlemi boyunca yer değişimine müsaade edildi).

**-Sonlu elemanlar modelinin ikinci sınır koşulu:**

Yaprak yay merkezi sabit (Şekil 6),ve yaprak yayın her iki tarafı serbest olmasına müsaade edildi.



**Şekil 6** Sınır koşulları

Tablo1 yaprak yay üzerine uygulanmış kuvvetleri ve laboratuarda fiziksel kalibrasyon testlerinde birinci birim uzama duyargasında ölçülen birim uzamalar verilmiştir.

**Tablo 1** Birinci birim uzama duyargası için fiziksel kalibrasyon test sonuçları

| Fiziksel Yükleme Kuvvet Değeri ( daN ) | Ölçülmüş Birim Uzama Değeri ( $\mu\epsilon$ ) |
|--|---|
| 0                                      | 0   |
| 100                                    | 1293.2  |
| 250                                    | 3458.4  |
| 350                                    | 4952.8  |
| 500                                    | 7060  |

Fiziksel yük sonuçlarının Tablo 1 den sonlu elemanlar modeline uyarlanmış sonuçları Tablo 2 de gösterilmektedir.100 daN uygulandığında, fiziksel testlerle 1293  $\mu\epsilon$ , bilgisayar analizleri ile aynı değer 1190  $\mu\epsilon$  ölçülmüştür.

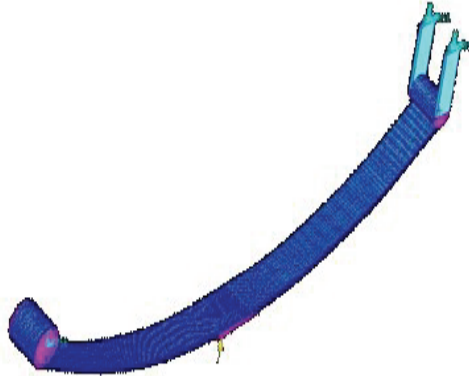
Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel alarak tanımlanması

**Tablo 2** Yaprak yay birinci birim uzama duyargasının sonlu elemanlar ile statik analiz sonuçları.

| YAPRAK YAY SONLU ELEMANLAR KALİBRASYON TEST SONUÇLARI |   |                                    |   |                                    |
|---|---|------------------------------------|---|------------------------------------|
| YÜKLEME KOŞULLARI                                     |   |                                    |   |                                    |
|   | Büyük burç sabit, küçük burç yalnızca yatayda serbest |                                    | Göbek sabit, burçlar yalnızca yatayda serbest |                                    |
| Kuvvet (daN)  | Lineer Statik $\mu\epsilon$                           | Non Lineer Statik( $\mu\epsilon$ ) | Lineer Statik $\mu\epsilon$                   | Non Lineer Statik( $\mu\epsilon$ ) |
| 100   | 1190  | 670                                | 1190  | 670                                |
| 250   | 2970  | 1880                               | 2970  | 1880                               |
| 350   | 4160  | 2580                               | 4160  | 2580                               |
| 500   | 5940  | 3640                               | 5940  | 3640                               |

#### 5.4 Araç yaprak yay sonlu elemanlar modeli

Şekil 7 yaprak yayın araçtaki modelini göstermektedir. Araç üzerindeki yaprak yay ve yaprak yayın bilgisayardaki sanal kalibrasyonu arasındaki ana fark, gerçek araç üzerinde yaprak yay küçük burç tarafı şasiye bir kolu ile bağlantı ekseninde serbest dönecek şekilde bağlanmasıdır. Bu sınır koşulları ile yaprak yayın merkezine kuvvet uygulandığında, küçük burç tarafı araç şasi üzerinde kaymaya yer değiştirmeye başlar ve yaprak yayın uzunluğu artmaya başlar. Sınır şartlarının sonucu olarak, yaprak yaydaki maksimum gerilme miktarı 2.7 oranında azaldığı tespit edildi.

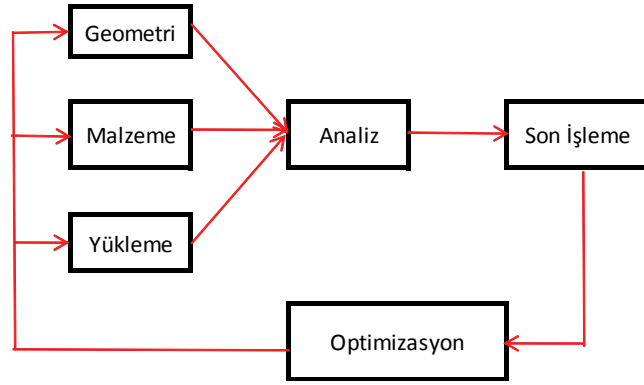


**Şekil 7** Araç yaprak yay sonlu elemanlar modeli

#### Statik ve yorulma analizleri

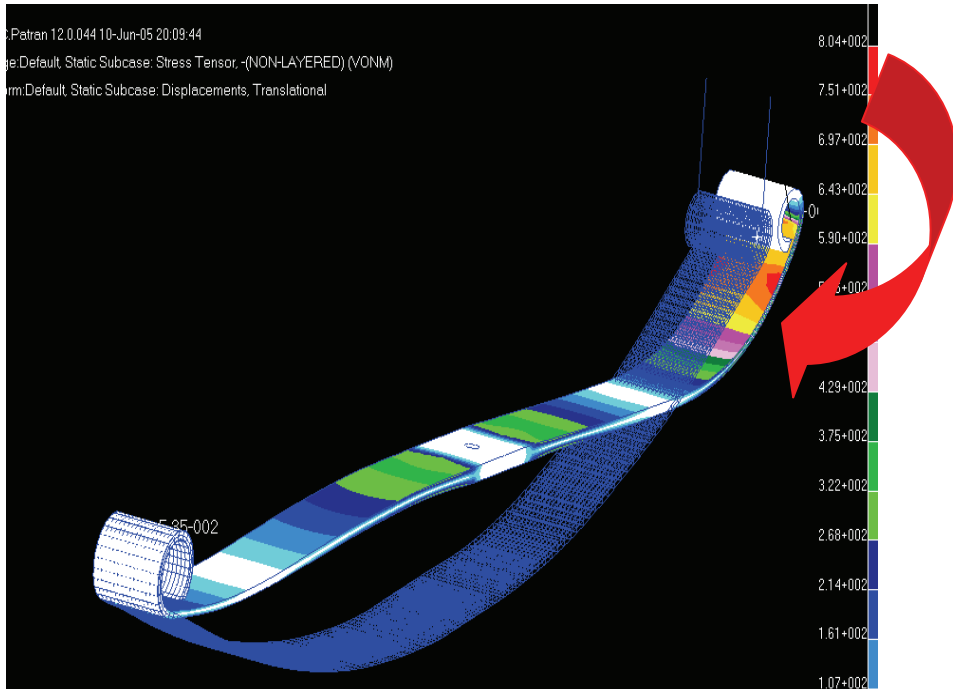
##### Statik ve yorulma hesapları

Şekil 8 yorulma analizlerini sonlu elemanlar teorisinde tamamlamak için gerekli parametreleri göstermektedir. Bu parametreler lineer analiz sonuçları, dinamik yük verisi ve malzeme özellikleridir (**Bishop ve Sherratt, 2000; MSC /FATIGUE V8 User Manuel, 1998**).



Şekil 8 Sonlu elemanlara göre yorulma hesaplama metodu.

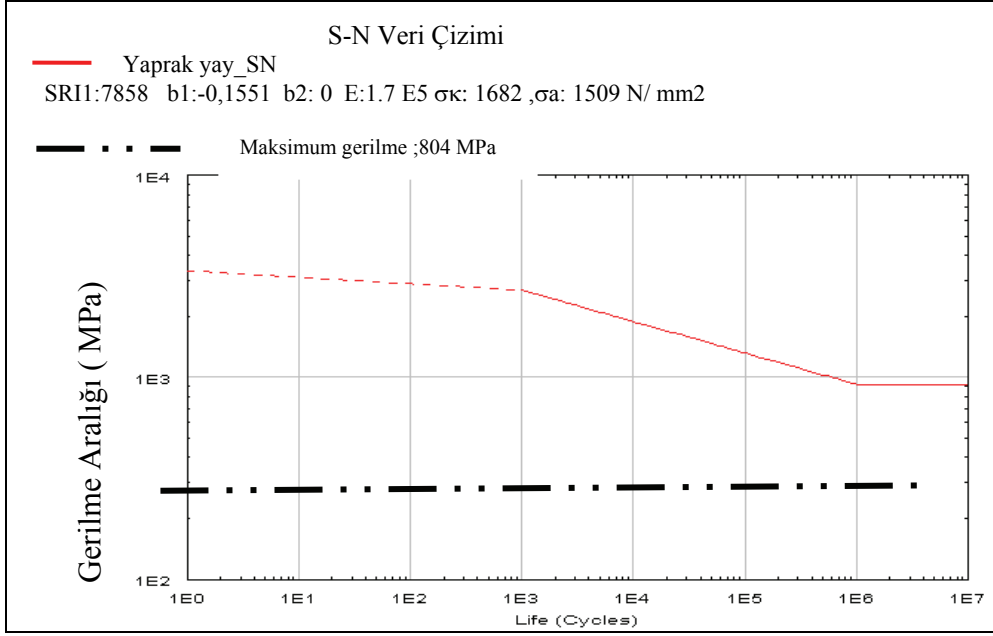
Bilgisayarda Lineer statik analizi genelde en ağır yük koşuluna göre yapıldığından, yaprak yay lineer statik analizi içinde Türkiye’de yapılan yol testleri sırasında ölçümü sonucu tespit edilen en kritik yük koşuluna (sol arka statik araç ağırlığı 413 kg dan =4051 N bulunmuştur. En ağır dinamik yük verisi 489 N eklendiğinde 4540 N luk maksimum yük değeri) göre yapılmıştır (Şener, 2003). Lineer statik analizleri için, araç ağırlığı ( yol testleri sırasında ölçülen maksimum gerilmeye ön gerilme olarak toplanmıştır. Şekil 9 küçük Von Misses metoduna göre lineer statik analiz sonuçlarında en kritik yük koşuluna göre küçük burca oldukça yakın 7967 nolu düğümde vuku bulan maksimum gerilme yaklaşık( 717 MPa statik arka aks ağırlığından + dinamik yol yük verisinden 87 MPa) toplamda 804 MPa olarak tespit edilmiştir (Bishop and Sherratt, 2000; MSC /FATIGUE V8 User Manuel, 1998).



Şekil 9 Lineer statik analiz sonuçları

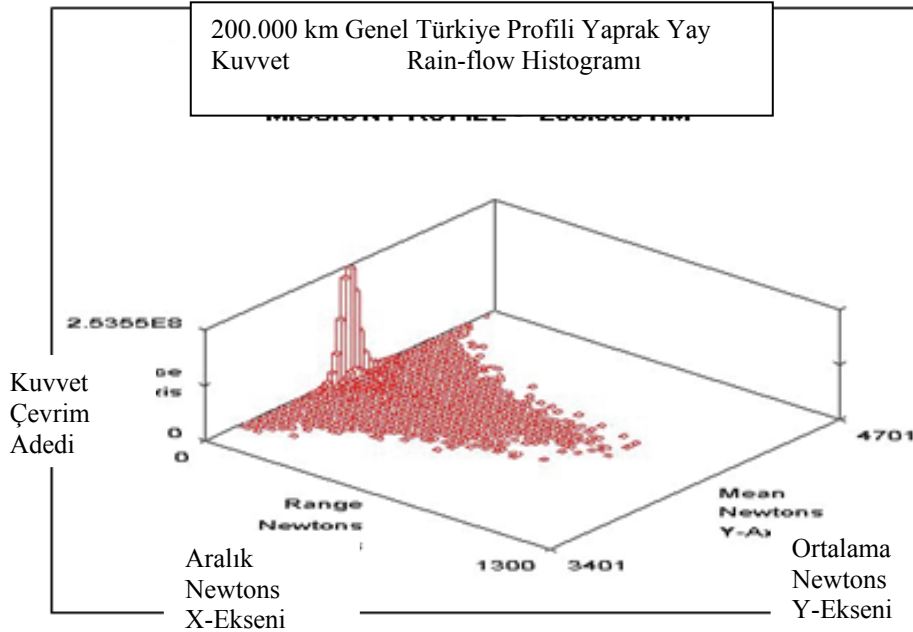
Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel olarak tanımlanması

Şekil 10 Yaprak yay malzeme E: 170.000 N/mm<sup>2</sup> karakteristiğinin Wohler eğrisini S(gerilme)-N(çevrim adedi) ve akma ve kopma gerilmeleri gösterilmiştir. Maksimum gerilme yaprak yay malzemesinin gerçek akma gerilmesinden çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Aslında malzeme akma gerilmesinin neredeyse yarısıdır.



Şekil 1 Ömür ( Adet ) verisi

Türkiye farklı yollardan elde edilen verilerin değeri malzemenin akma gerilmesinden çok düşük olduğundan S-N metodunun kullanımı tercih edilmiştir (Bishop ve Sherratt, 2000; The Ncode book of Fatigue Theory, 2000).



Şekil 11 200.000 km Türkiye genel yol kullanım profili yaprak yay rainflow kuvvet histogramı

### **Palmgren-Miner yorulma hasar analizi**

Servis hayatında, araç parçaları çoğu durumda değişken yüklere maruz kalmaktadırlar. Bunun anlamı parçalar çok nadiren yalnız bir tek gerilme seviyesinde tekrar ederler. Bundan ötürü, toplam yorulma hasarını değişik gerilme seviyesindeki tekrarlarından dolayı oluşacak toplam yorulma hasarının tahmin edilmesi gerekir. Lineer kümülatif hasar kuralı yada diğer adıyla Palmgren-Miner kuralı bu tür tahmin için çok kullanılan bir metottur. Bu kural bir parçanın yorulma hayatı her bir gerilme çevrimleri tarafından harcanan hayatın yüzde değerinin eklenmesiyle tahmin edilebilir. Eğer bir numune,  $\sigma_1$  gerilmesinde  $N_1$  çevrim adedinde bir hayata sahip ise  $\sigma_1$  gerilmesinde  $n_1$  adedinde toplam hasar miktarı  $n_1 / N_1$  olacaktır D hatasında. Benzer şekilde ikinci gerilme seviyesine tekabül eden hasar her bir çevrim için  $D/N_2$  olur. Böylece hatadaki toplam hasar:  $D = D \cdot n_1/N_1 + D \cdot n_2/N_2$  yada  $1 = n_1/N_1 + n_2/N_2$  burada  $n_1$  ve  $n_2$ ,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$  gerilmesinde çevrim sayılarının adedi sırasıyla . Çok seviyeli bir test için, Palmgren - Miner kuralı hasarın aşağıdaki koşul gerçekleştiğinde olacağını ifade eder:  $n_1 / N_1 + n_2 / N_2 + n_3 / N_3 > 1$  (**Miner,1945**)

### **Sonuçlar**

Hafif ticari oto müşteri kullanım profili dört ana kategoriye ayrılmıştır; şehir içi, şehir dışı, otoyol ve dağdır. Bu araçların yolcu taşıyan versiyonunun Türkiye araç kullanım yüzdesi 50% şehir içi, 24% şehir dışı, 20% otoyol ve 6% dağdır. Buna karşın bir Avrupa ülkesinin araç kullanım yüzdesi 36% şehir içi, 30% şehir dışı, 26% otoyol ve 8% dağdır. Buradan bu aracın kullanımıyla ilgili Türkiye profilinin şehir içi kullanım % desisi daha fazla, aynı zamanda bir Avrupa ülkesinin otoyol kullanım % desisi daha fazla olup buradan Türkiye profilinin daha ağır olduğu gözlenmektedir. Ayrıca bu araçlar Türkiye de daha çok şehir içi kullanımda olduğu tespit edilmiştir. Daha da ötesi, hafif ticari aracın Türkiye'deki kullanım amacı aşağıdaki kategorilere ayrılmıştır:

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| Ev –iş –ev            | 29.1% |
| İş – iş               | 55.3% |
| Alışveriş ve Dinlenme | 4.7%  |
| Hafta sonu            | 5.4%  |
| Tatil                 | 5.5%  |

Hafif Ticari Otonun birinci kullanım amacı iş den işe seyahatidir.

Şekil11de 200000 Km hedef Türkiye genel yol spektrumu, Palmgren-Miner hasar kuralına göre hasar analizi açısından doğrulaması yapıldı.  $D= 0,2697 < 1$  bulundu.

### **Tartışma**

Bu çalışmada Türkiye de hafif ticari araç kullanıcıların üzerinde anket metoduna temel alan bir Türk müşterisi araç kullanım profili geliştirildi. Hafif ticari aracın Türkiye deki temel kullanım amacının iş-iş ve ev-iş-ev seyahati önceliklidir. Hafif ticari aracın Türk sürücülerine özel bir genel yol kullanım profili geliştirilmiştir. Farklı yol sinyallerinin işlenmesi, sınıflanması ve normalize edilmesinden sonra bir matematiksel Türkiye genel yol kullanım profili (200000 km ) ilgili firmanın LCV aracına ait hesaplandı.

Test aracı üzerine monte edilen her bir ölçülen fiziksel büyüklüğün rainflow ve level crossing kullanılarak bilgisayar yardımı ile hızlandırılmış güvenilirlik ve yorulma test yollarının sentezi ve korelasyonları yapılmıştır. Bu analizleri esas alan, kritik kuvvetlerin ve gerilme aralıkları ve

Müşteri profiline göre araç komponentleri yorulma ömrünün sonlu elemanlar metodu temel alarak tanımlanması

büyüklikleri tanımlanmış ve gelecekte gerçekleştirilecek projelerin geliştirilmesinde referans olarak kullanılmak üzere kayıtlı edilmiştir.

Bu çalışmada, tetra- ve hexa-tip 3D elemanları sonlu elemanlar modellemesi analizinde ( FEA) denedi. Hexa- tip elemanlar hacim ve distorsiyon ( çarpıklık) açısından daha hassas sonuçlar verdiği saptandı. Bu tür bir yaprak yayın sanal analizlerinde kullanılan lineer analiz metodu lineer olmayan metoda göre (non-lineer) daha hassas sonuçlar verdiği kanıtlandı..

Test edilen iki sınır koşulunda arasında (yani büyük burç serbestçe ekseninde dönerken yada küçük burç x-ekseninde serbestçe dönerken) çok büyük anlamlı bir fark bulunamadı. Sanal analiz çalışmaları ile parça üzerinde ölçülen gerilmelerin ve yüklerin yaprak yay malzemesinin elastik gerilmesinin (Wohler eğrisi) oldukça aşağısında olduğundan ve çevrim sayıları küçük olduğundan, S-N yorulma metodu daha uygun olduğu saptandı.

Türk müşterisi genel yol kullanım profili statik ve dinamik verilerinin uygulanmasıyla yaprak yay üzerinde yorulma hasarının  $D_{0,2697} < 1$  olduğundan yaprak yayda müşteriler öngörülen km ye geldiğinde yorulma hasarı oluşmayacağı tespit edildi.

Bilgisayar yardımcı analiz çalışmaları laboratuvar testlerine bir alternatif olarak kullanılabilceği gözlemlendi. Bu sonuçlara göre, bilgisayar yardımı hesaplama metotları hem maliyet etkin hem de pazara özgün ürünlerin daha iyi geliştirilmesine yardımcı olur. Bu çalışmanın sonuçları yeni otomobil modelleri geliştirilirken, gerçek prototiplerin ve ön-seri araçların üretiminden önce kullanılabilir.İleriki projelerde için, üretici firmanın veya araştırmayı yapanların gece, yağışlı ve karlı yollarda böyle bir çalışmanın yapılarak sonuçlarının incelenmesi tavsiye edilir.Yine bu tip bir çalışmanın Black box metodunu da içeren bir çalışmayı en az 10 yılda bir tekrarlanması tavsiye edilir. Çünkü Türkiye gelişmekte olan bir ülke olduğundan yol kalitesi ve piyasaya sunulan araç miktarı günden güne değişkenlik göstermektedir.

### **Teşekkürler**

Bu araştırmadaki katkılarından dolayı TOFAŞ A.Ş. teşekkür ederim.

### **Kaynaklar**

Ahlin,K.,Ganlund,J.and Lindström,F.(2004)'Comparing roads profiles with vehicle perceived roughness',Int.J.Vehcile Design ,Vol.36,Nos.2/3,pp.270-286.

ASTM Standard E 1049-85 ‘‘ Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis’’,(Reapproved 1997) Philadelphia.

Bishop, N.W.M.,Lack,L.W.,Li,T.,Kerr,S.C. ( 1995 ) ‘‘Analytical Fatigue Life Assessment of Vibration Induced Fatigue Damage ‘‘MSC World Users Conferance, Universal City,CA.

Bishop.N.W.M.,Kerr,S.,Caserio,A.,(1999)'The Fatigue Damage Caused to Vibrating Automotive Components ‘‘,1 st MSC World- wide Automotive User Conference, September 20-22.

Bishop, N.W.M., Sherratt ,F,( 2000 ) ‘Finite Element Based Fatigue Calculations ‘NAFEMS LTD (International Association for the Engineering Analysis Community) [www.nafems.org](http://www.nafems.org).

Bogsjö,K(2006)'Development of analysis tools and stochastic models of road profiles regarding their influence on heavy vehicle fatigue', Vehicle System Dynamics ,44:1,780-790.



A. Ş. Şener

D'aprile Filippo, Macni Marco, Bruder Thomas ,Riefaoghe Christophe ( 2001 ),'' Structural Characterisation of Vehicle on a Rig Test Versus Different Road Profiles Analysis of Experimental Results, ATA vol.54 .n 7/8 Luglio –Agosto (LMS International ,Belgium,-Memoria presentata al convegno florance Ata , Fienze.).

Gobbi,M and Astinu,M(1998)'Expected Fatigue Damage of Road Vehicles due to Road Excitation', Vehcile System Dynamics ,29:1,778-788.

Grubisic,V. ( 1994 ) '' Determination of Load Spectra for Design and Testing '' Int.J.of Vehicle Design , Vol.15 nes.1/2 ,pp 8-26.

Heyes,P., Lin, X.,Buczynski,A., Brown,M. ( 1997 )'Application of Biaxial Plasticity and Damage Modelling to the Life Prediction and Testing of Automotive Components "5 th International Conference on Biaxial /Multiaxial Fatigue and Fracture Cracow,Poland , Ncode International Limited.

Huizinga,F.T.M.J.M.,Van Ostaijen,R.A.A.and Slingeland,A.Van Oosten(2002)'A practical approach to virtual testing in automotive engineering', Journal of Engineering Design , 13:1,33-47.  
Kouta,R.,Play,D.,(1999)'Correlation procedures for fatigue life determination', Journal of Mechanical Design,vol.121/289.

Medepalli,S.and Rao,R.(2000)'Prediction of road loads for fatigue design –a sensitivity study', Int,J.of Vehcile Design,Vol.23,Nos.1/2,pp,161-175.

Miner. M.A.(1945)'Cumulative Damage in Fatigue', Journal of Applied Mechanics, ASME, vol:12,pp.159-164.

MSC Online Help Documentation ( 1999 ) Institute of Technology.

MSC /FATIGUE V8 User Manuel,MSC Corporation ,Los Angeles,CA,(1998).

MSC Nastran Getting Starting User Guide (2001).

MSC nSoft v5.2 User Manuel (1999).

MSC Patran(2001).

Pro-Engineer (2001).

The Ncode book of Fatigue Theory ( 2000 ) Ncode Technical Referance Book V:4.3. Docum.rel1.0.

Paul,P.K.,Dunga,R.K. and Verma,A.,Mnnikar,A.V. and Raju,S.(2001),'Techniques for Accelerated Design Validation of Tractor Chassis', SAE Paper 2001-01-0050.

Rivolo., Paparella.,Gai (1983),'Statistical Measurments of Automobile Operating Conditions:An Important Improvement to Customer Oriented Reliability Predictions''IX Seminario Eoqc,Fienze.

Şener,Ş.A., (2003),' Hafif Bir Ticari Otonun Arka Süspansiyon Yaprak Yayının Türkiye Koşullarına Göre Yorulma Analizi 'PhD tesis. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.