

PICK-UP HAFİF KAMYON UYGULAMALARI İÇİN TEK PARÇALI ALÜMİNYUM KARDAN MİLİ KONSEPT TASARIMI

¹Muzaffer KASABA , ²Efe IŞIK , ³Sedat TARAKÇI 

^{1,2,3} Tirsan Kardan San. ve Tic. A.Ş. Araştırma Geliştirme Merkezi OSB IV. Kısım, Manisa, TÜRKİYE
¹m.kasaba@tirsankardan.com.tr, ²e.isik@tirsankardan.com.tr, ³s.tarakci@tirsankardan.com.tr

(Geliş/Received: 21.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.11.2020)

ÖZ: Kardan milleri, motordan aldığı torku ve dönme hareketini arka akslara ileten bir aktarma organı elemanıdır. Yüksek tork taşıma gerekliliklerini karşılamak amacıyla, hafif ticari araç uygulamalarında kullanılan kardan milleri çelik malzeme kullanılarak üretilmektedir. Çelik malzeme kullanılarak üretilmiş kardan mili ve parçalarında ağırlık azaltma, geometrilerin sınır koşulları nedeniyle çoğu zaman kısıtlı olabilir. Bu nedenle alüminyum gibi düşük yoğunluklu malzemeler kullanılarak geliştirilen uygulamalar önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında pick-up tarzı hafif ticari araç uygulamalarında kullanılmak üzere alüminyum kardan mili için mühendislik hesapları gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplar doğrulanmıştır. Doğrulmalar sonucunda iki yöntem arasında dayanım hesaplarında %1, doğal frekans hesaplarına %8 sapma hesaplanmıştır ve sapma değerlerinin kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir. Birim parçaların, için sonlu elemanlar ile elde edilen sonuçlar kullanılan alüminyum malzemenin akma limitleri ile güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen güvenlik katsayıları kardan milleri için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kardan mili, Alüminyum, Dayanım Hesapları, Kritik Hız, Doğal Frekans

Concept Design Of an Aluminum One-Piece Driveshaft for Pick-up Truck Applications

ABSTRACT: Driveshafts are the driveline elements that transfers torque and rotational motion which is received from the engine to the rear axles. In order to meet the high torque handling requirements, driveshaft components are usually made up of steel. Weight reduction in steel parts can often be limited due to the boundary conditions of geometries. For this reason, applications developed with low density parts such as aluminum gain importance. Within the scope of this study, engineering calculations for aluminum cardan shaft for pick-up style light commercial vehicle applications were performed and the calculations were verified with finite element analysis. As a result of the corrections, deviation of 1% for strength calculations and 8% for natural frequency calculations was calculated between the two methods, and it was determined that the deviation values were acceptable. The yield limits and safety coefficients of the aluminum material used were calculated for the unit parts with the results obtained with finite elements. It has been determined that the safety coefficients obtained are suitable for driveshafts.

Key Words: Driveshafts, Aluminum, Strength Calculations, Critical Speed, Natural Frequency

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan malzeme olarak karşımıza çıkan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafif olmaları, iyi ısıl ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için önemli bir alternatif malzeme konumundadır. Özellikle son yıllarda, enerji tasarrufuna dönük çalışmalar, daha az yakıt harcayan hafif, ekonomik taşıtların üretimini gündeme getirmiş ve alüminyum alaşımları, kara ve

deniz taşıtları yapımında öncelikli olarak tercih edilir olmuştur. Öyle ki 1400 kg ağırlığındaki bir kara taşıtında geniş kapsamda alüminyum kullanımı, taşıtın ağırlığında %20'ye varan bir azalmaya imkân tanımaktadır (Hirsch, 1999).

Literatürde kara taşıtlarının aktarma organlarına ait birçok hafifletme çalışması bulunmaktadır. Kardan mili özelinde ise Hak Sun Kim ve arkadaşları, alüminyum / kompozit hibrit kardan mili uygulamaları ve bu uygulamanın düşük hızlı darbe hasarı özelliklerini incelemiştir (Kim ve diğ., 2004). Dai Gil Lee ve arkadaşları ise çalışmalarında, klasik metalik yapılar ile kompozit yapıların değiştirilmesinin, daha yüksek spesifik sertlik ve kompozit malzemelerin spesifik yüksek mukavemeti nedeniyle birçok avantaja sahip olduğunu belirtmişlerdir (Lee ve diğ., 2004). Durk Hyun Cho ve arkadaşları çalışmalarında bir şanzıman şaftının karbon kompozit ve alüminyum malzemeler kullanılarak üretilmesi durumunda doğal eğilme frekansının değiştirilmeden tork taşıma kapasitesinin artırılabilirliğini belirtmişlerdir. (Cho ve diğ., 1997). Young Choi ve arkadaşları ise kardan milleri için alüminyum soğuk çekim sıcak ekstrüzyon boru imalat parametrelerinin gerekli mukavemet özelliklerini sağlaması amacıyla proses optimizasyonu üzerine çalışmıştır (Choi ve diğ., 2013). Yücel Birol ve arkadaşlarının çalışmasında, otomotiv süspansiyon bileşenlerinde yaygın olarak kullanılan EN AW 6082 alaşımlı dövme yapının karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Sıcak dövme işleminin, sonraki yapay yaşlandırma döngüsü sırasında yeterli yaş sertleşmesini sağlamak için dövme sırasında yeterli Mg ve Si'nin çözülmesi için ince ayar yapıldığı takdirde ayrı bir çözelti işleminin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Öncelikle ince bir lifli çekirdeğe sahip olan ve bu şekilde elde edilen düzgün yapıların daha iyi yorulma ve darbe özellikleri ile daha uzun bir hizmet ömrü sağlayacağı gösterilmiştir. Önerilen işlem ile, sadece otomotiv süspansiyon bileşenlerinin kalitesini arttırmakla kalmamış, aynı zamanda önemli maliyet tasarrufu sağlamıştır (Birol ve diğ., 2016). J. Bouquerel ve arkadaşları, 6082-T6 alüminyum malzemenin soğuk dövme prosesi sırasındaki mikro yapısındaki değişimleri incelemiştir. İnceleme sırasında Electron Backscatter Diffraction (EBSD), Line Segment Method (LSM), Kernel Average Misorientation (KAM), Grain Orientation Spread (GOS) ve Grain Average Misorientation (GAM) yöntemleri kullanılmıştır (Bouquerel ve diğ., 2015). Störzel ve arkadaşlarının çalışmasında, nominal gerilme, yapısal sıcak nokta gerilimi ve çentik gerilme gibi farklı yaklaşımlar, işlenmiş alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımını analiz etmek için kullanılmıştır (Störzel ve diğ., 2012). Vidit Gaura ve arkadaşları, iki farklı dolgu malzemesine sahip 50 mm kalınlığında MIG kaynaklı Al-Mg alaşımı (Al-5083) plakaların Walker modeline dayanan, S-N eğrilerinin eğimlerinin monoton olmayan trendini ve öngörülen yorulma ömürlerini bu modellerden daha iyi yakalayabilen yeni bir model önermiştir (Gaura ve diğ., 2018). Ruan ve arkadaşları ise 6 mm kalınlığında 6082-T6 alüminyum alaşımlı levha üzerinde, kaynak bağlantısının mikro sertliği ve dayanımı üzerinde çalışma yürütmüşlerdir (Ruan ve diğ., 2012). Harshal ve arkadaşları çalışmalarında kompozit malzeme üzerinde optimizasyon yaparak kardan mili ağırlığında azaltma çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Harshal ve diğ., 2013). Kammuluri ve arkadaşları dayanım artırma çalışmaları için alüminyum hibrit malzeme çalışmaları gerçekleştirilmişlerdir (Kammuluri ve diğ., 2016). Khalid ve arkadaşları alüminyum/kompozit hibrit kardan millerinin eğilme yorulma davranışları üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir (Khalid ve diğ., 2007). Mutasher ve arkadaşları alüminyum/kompozit hibrit kardan millerinin torsiyonel dayanımının kestirilmesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir (Mutasher ve diğ., 2019). Rompicharla ve arkadaşları kompozit malzemeli kardan millerinin tasarımı üzerine çalışmışlardır (Rompicharla ve diğ., 2012).

Pick-Up Tarzı Hafif Ticari Araçlar İçin Tek Parçalı Alüminyum Kardan Mili Tasarımı (Design Of A One Piece Aluminum Cardan Shaft For Light Weight Pick-Up Trucks)

Pick-up tarzı hafif ticari araçlarda, çelik malzeme kullanılarak üretilmiş kardan milleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe karbon emisyonlarının gelecek yıllar içinde daha da düşük seviyeler çekilmesi sadece ülkemiz için değil tüm dünyada yasal bir zorunluluk haline gelmektedir. Bu bağlamda araç üreticileri, yakıt sarfiyatını ve karbon salınımını azaltmak amacı ile araç üzerinde birçok yapısal parçayı, çelik malzeme kullanımına alternatif olabilecek alüminyum ve kompozit malzeme kullanarak üretme yoluna gitmiştir. Araç üzerinde motor, şanzıman ve diferansiyel arasında

konumlandırılan kardan millerinin de alüminyum malzeme kullanılarak üretilmesi durumunda, çelik malzeme kullanılarak üretilen benzerlerine kıyasla yüksek oranlarda ağırlık azaltma imkânı doğmaktadır. Bu sınıftaki araçların teknik özellikleri Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Pick-up tarzı hafif ticari araçların teknik özellikleri

Table 1. Technical properties of lightweight pick-up trucks

Özellik	Değer Aralığı
Dingil Mesafesi (mm)	2600 - 3200
Güvenli çalışma hız aralığı (dev/dk)	5700 - 6000
Güvenli çalışma frekans aralığı (Hz)	95 - 100
Fonksiyonel limit torku (Nm)	2800
Motor gücü (Bg)	160 - 220
Azami yük (kg)	2000 - 3000

Kardan milleri motorlu taşıtlarda motorda üretilen dönme hareketini ve gücü motor veya şanzımandan alarak, aracın diferansiyeline ileterek, araca hareket verilmesinde kullanılan aktarma organı elemanlarıdır. Pick-up tarzı araçların aktarma organlarına ait yerleşim çoğunlukla Şekil 1.'deki gibidir (Andrews, 2020).



Şekil 1. Pick-up sınıfı araçlar için aktarma organlarının yerleşimi

Figure 1. Driveline layout of pick-up class trucks

Çalışma kapsamında çelik malzeme kullanılarak üretilmekte olan iki parçalı kardan milinin, tek parçalı alüminyum kardan mili olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir.

MÜHENDİSLİK HESAPLARI (ENGINEERING CALCULATIONS)

Kardan milleri motor ve diferansiyel kaynaklı yüksek hız aralıklarında fonksiyonelliğini koruyarak güvenli şekilde çalışabilmelidir. Bahse konu güvenli çalışma aralığı gerekliliği, kardan milinin doğal frekansının aracın güvenli çalışma hızından daha büyük olması zorunluluğunu doğurur. Denklem 1 ile alüminyum kardan mili için tasarlanan farklı boru boyutlarına ait doğal frekanslar analitik olarak hesaplanmıştır. (SAE International, 1991)

$$NF = 2\pi \sqrt{\frac{ExI}{\rho x AxL^4}} \quad (1)$$

Denklemde, E (elastisite modülü) 70 GPa., ρ (yoğunluk) 2.7 gr /cm³ ve kardan milinin araç yerleşimine uygun olarak L (uzunluk) 1740 mm olarak alınmıştır. Farklı boru boyutlarına göre doğal

frekanslar Çizelge 2’de verilmiştir. Kardan milinin minimum doğal frekans limiti Çizelge 1.’de verilen aracın güvenli çalışma hız aralığına göre belirlenmiştir.

Çizelge 2. Kavramsal kardan mili tasarımı için farklı boru boyutlarına göre 1. doğal frekans hesaplamaları

Table 2. 1 st Natural frequencies of the concept design according to different tube dimensions

Boru çapı (mm)	Et kalınlığı (mm)	1. Doğal Frekans (Hz)
125	3	122.8
120	3	119.5
120	2.4	104
101	1.7	96
84	1.7	88

Kardan milleri, motordan gelen torku da fonksiyonelliğini koruyarak güvenli şekilde arka aksa iletebilmelidir. Kardan milinin araç üzerinde maruz kalacağı maksimum tork değeri aracın fonksiyonel limit torku ile belirlenmiştir. Denklem 2’ de kardan mili boruları için kayma gerilmesi formülü verilmiştir. Alüminyum kardan milinde kullanılan alüminyum borunun boyutlandırılmasında özellikle pick-up tarzı hafif ticari araçlarda görülen Çizelge 1’de verilen 2800 Nm’lik fonksiyonel limit torku dikkate alınmıştır. (SAE International, 1991)

$$\tau_b = \frac{M_b}{I_p} x r \quad (2)$$

τ_b : Burulma Gerilmesi

M_b : Burulma Momenti

I_p : Alan Atalet Momenti

Denklem 2. kullanılarak Çizelge 3.’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 3. Alüminyum ve çelik borular için farklı boru boyutlarına göre dayanım hesapları

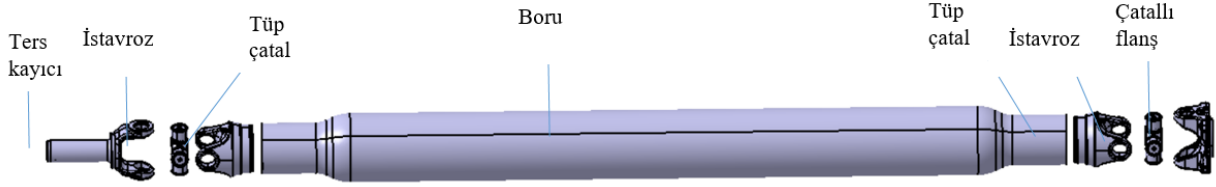
Table 3. Strength calculations for aluminum and steel tubes according to different tube dimensions

Boyut (mm)	Malzeme Tipi	Akma Dayanımı σ (MPa)	Malz. Kayma Dayanımı τ_m (MPa)	Tork (Nm)	Burulma Gerilmesi τ_b (MPa)	Eşdeğer Von Mises Gerilmesi σ (MPa)
Ø 84 x 1.7	EN AW 6082 - T6	320	384	2800	157	274
Ø 120 x 2.40	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	66	116
Ø 125 x 3	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	40	71
Ø 120 x 1.5	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	85	148
Ø 120 x 2	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	65	113

Çizelge 3 incelendiğinde dayanım kriterleri göz önünde bulundurularak Ø84x1.7 boyutlarının alüminyum boru için güvenli olacağı görülmüştür. Ancak doğal frekans kriterlerini sağlaması için yapılan mühendislik hesaplarının sonucunda Şekil 1’de gösterilen araç yerleşimi göz önünde bulundurularak 1740 mm boru uzunluğuna sahip kardan mili uygulaması için hem dayanım kriterlerini hem de doğal frekans kriterlerini sağlayan optimum boru boyutu Ø120x2.40 olarak tespit edilmiştir.

Boru boyutunun belirlenmesini takiben tek parçalı alüminyum kardan milinin tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarım Şekil 2.’de verilmiştir. Bu tasarımda, çatallı flanş ve tüp çatal boru ile beraber alüminyum malzeme seçilerek tasarlanmıştır. Bu sayede iki parçalı çelik malzeme kullanılarak tasarlanan

muadil kardan millerine göre kardan milinin ağırlığı yaklaşık %41 oranında hafifletilmiştir. Şekil 2’de verilen tasarımda ters kayıcı, istavroz gövdesi ve rulmanları ise dayanım, ömür ve güvenlik kısıtlarından dolayı çelik olarak tasarlanmıştır.



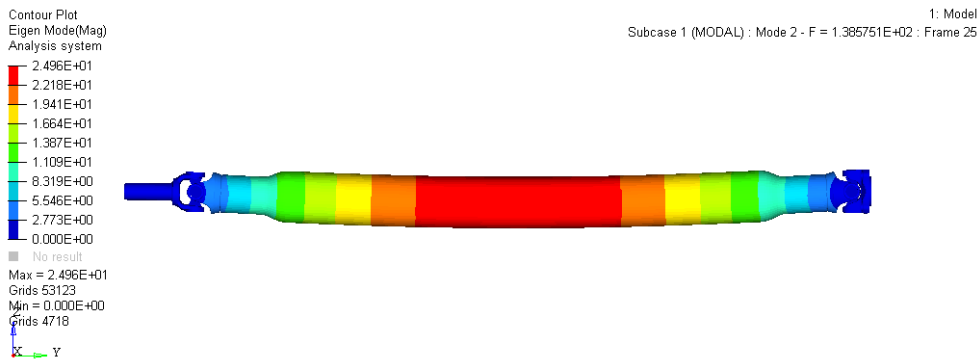
Şekil 2. Kavramsal tek parçalı alüminyum kardan mili tasarımı

Figure 2. Concept One piece aluminum driveshaft design

SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ (FINITE ELEMENT ANALYZES)

DeneySEL yöntemler genellikle yüksek doğrulukla sonuç verse de getirdiği fazladan ekipman, zaman ve maliyet gibi nedenlerle alternatif bir tasarım doğrulama yöntemi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler çoğu zaman tasarım doğrulama yöntemi olarak tercih edilmektedir. Kurulacak sonlu elemanlar modelinin gerçek durumu en doğru şekilde benzetmesi beklenirken aynı zamanda kolay modellenmeli, hızlı çözümlenmelidir. Bu çalışma kapsamında beklentileri karşılayacak şekilde bir sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Mühendislik hesapları göz önüne alınarak tasarımı gerçekleştirilen alüminyum kardan milinin tasarım doğrulaması için sonlu elemanlar ile analiz gerekliliği de doğmuştur. Bu bağlamda öncelikle modal analiz için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modellemeleri için HyperWorks (Versiyon 2019) yazılımı kullanılmıştır. Modelde, kardan milinin araca montaj koşulları göz önünde bulundurularak her iki tarafına sabit sınır koşulları uygulanmış ve modal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen modal analiz sonucunda ortaya çıkan 1. doğal frekansının titreşim biçimi Şekil 3’de verilmiştir. Sonlu elemanlar modal analiz sonucunda alüminyum kardan miline ait ilk doğal frekans 117 Hz olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç, mühendislik hesapları ile belirlenen (Çizelge 1’de) maksimum kritik hız limitleri ile kıyaslanmıştır ve Ø120 x 2.40 ebadındaki boru kullanılarak gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarının konsept tasarımın aracın hız limitlerine uygun olduğu görülmüştür. Bu sonuca ilaveten sonlu elemanlar ile gerçekleştirilen modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ile mühendislik hesaplarıyla elde edilen doğal frekans arasında % 8 fark tespit edilmiştir.

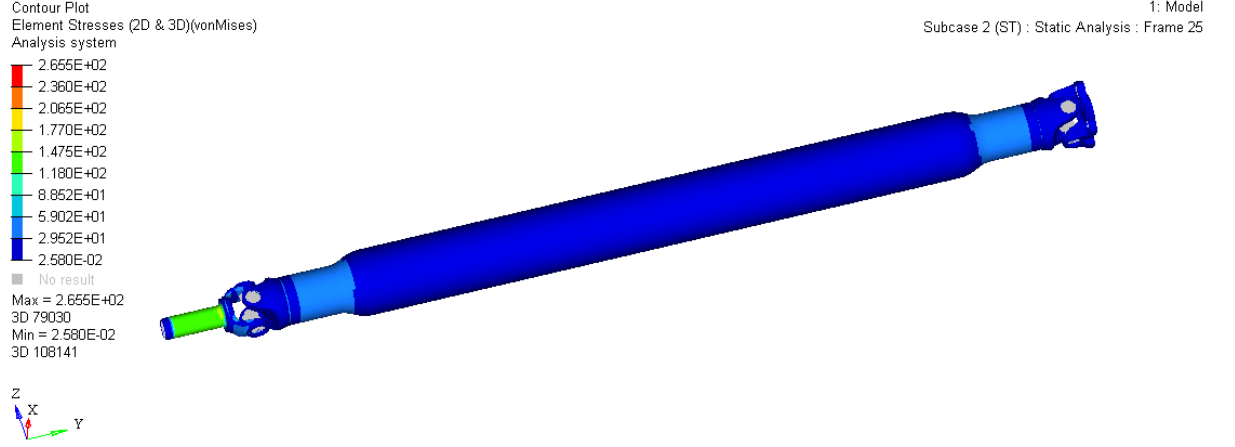


Şekil 3. Kavramsal alüminyum kardan mili modal analiz mod şekli

Figure 3. Modal analysis mode shape of concept aluminum driveshaft

Modal analiz çalışmaları tamamlanan alüminyum kardan milinin sonlu elemanlar ile statik analiz çalışmaları kardan mili üzerindeki gerilme dağılımlarının tespit edilmesi için gerçekleştirilmiştir. Şekil

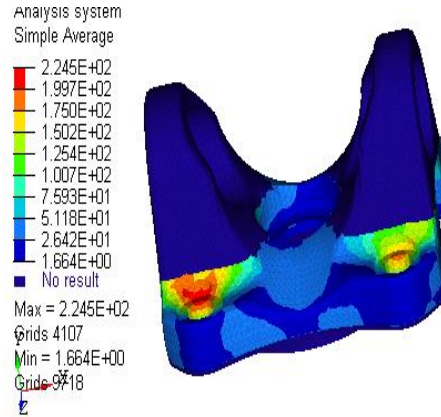
4.'de 2800 Nm torsiyonel yük altındaki alüminyum kardan mili üzerinde ortaya çıkan gerilme dağılımı verilmiştir.



Şekil 4. Alüminyum kardan mili gerilme dağılımı

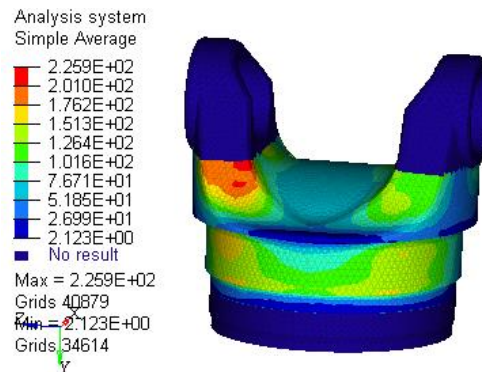
Figure 4. Stress distribution aluminum cardan shaft

Alüminyum kardan milinin gerilme dağılımının belirlenmesi sonrasında alüminyum olarak tasarlanan kardan mili birim parçaları tüp çatal, çatalı flanş ve boru için gerilme dağılımları incelenmiştir. Çatalı flanş, tüp çatal ve boruya ait gerilme dağılımları Şekil 5, 6 ve 7'de sırasıyla verilmiştir.



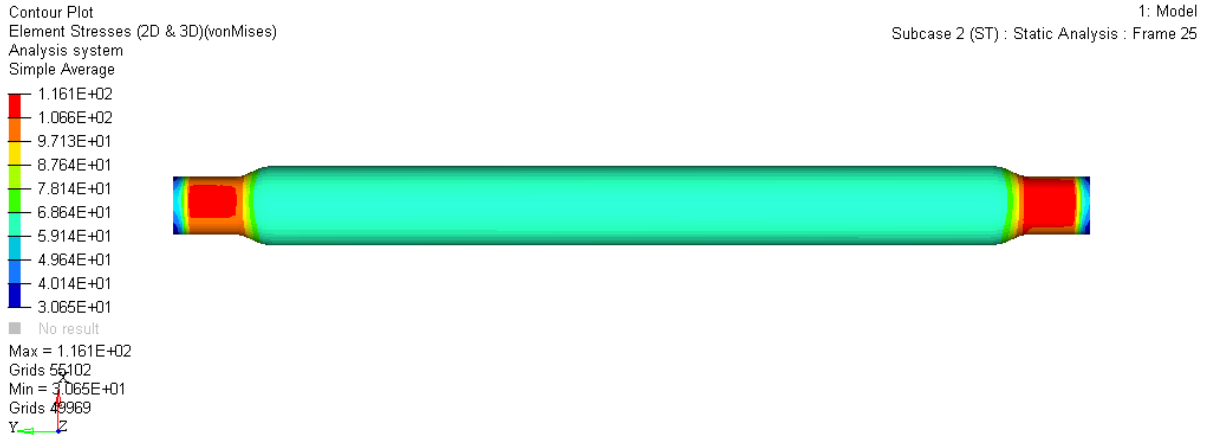
Şekil 5. Çatalı flanş gerilme dağılımı

Figure 5. Stress distribution of flange yoke



Şekil 6. Tüp çatal gerilme dağılımı

Figure 6. Stress distribution of tube yoke



Şekil 7. Boru gerilme dağılımı

Figure 7. Stress distribution of tube

Alüminyum boru, çatallı flanş ve tüp çatal üzerinde ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri Çizelge 3.'de 6082 T6 ve boru malzemesi akma değerleri ile kıyaslanmış ve dayanım olarak güvenli bölgede olduğu görülmüştür.

Çizelge 4. Alüminyum mili birim parçaları için sonlu elemanlar analizleri ile akma mukavemeti değerlerinin kıyaslanması

Table 4. Comparison of finite element analysis and yield strength values for aluminum and steel cardan shaft parts

Alüminyum Akma Mukavemeti	Alüminyum FY Sonlu Elemanlar Maksimum Von Misses Gerilmesi σ	Alüminyum TY Sonlu Elemanlar Maksimum Von Misses Gerilmesi σ	Alüminyum boru Sonlu Elemanlar Maksimum Von Misses Gerilmesi σ
320 Mpa	224 Mpa	225 Mpa	116 Mpa

SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Çalışmanın sonucu olarak tek parçalı alüminyum kardan milinin tasarımı tamamlanmıştır. Malzeme seçimi yapılırken literatür incelenmiş, Birol ve arkadaşlarının çalışmaları ve dayanım özellikleri de göz önünde bulundurularak malzeme EN AW 6082 T6 olarak belirlenmiştir.

- Boru boyutlarını belirlemek için önce dayanım limitlerine uygunluğu daha sonra da doğal frekans limitlerine uygunluğu mühendislik hesapları ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda alüminyum parçalardan imal edilecek tek parçalı kardan mili için boru boyutları $\varnothing 120 \times 2.4$ olarak belirlenmiştir.

- Tasarımı tamamlanan alüminyum kardan mili için öncelikle sonlu elemanlar ile modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucunda tek parçalı alüminyum kardan milinin ilk doğal frekansı 117 Hz olarak hesaplanmıştır. Aracın maksimum çalışma frekansının 100 Hz olduğu düşünüldüğünde tek parçalı alüminyum kardan milinin rezonans frekansının üzerinde güvenli şekilde çalışacağı öngörülmüştür.

- Tek parçalı kardan miline ait statik torsiyon analizi aracın fonksiyonel limit torku olan 2800 Nm'de gerçekleştirilmiştir. Alüminyum malzeme kullanılarak tasarlanan tüp çatal, çatallı flanş ve boru üzerinde maksimum Von-Misses gerilmesi sırasıyla 225 MPa, 224 MPa ve 116 MPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen maksimum gerilme sonuçları ile EN AW 6082 T6 akma limiti kıyaslandığında, çatallı flanş ve tüp çatal için güvenlik katsayısının 1.4, boru için ise güvenlik katsayısının 2.75 olarak ortaya çıktığı görülmüştür.

- Sonlu elemanlar analizleri sonuçları ile analitik sonuçlar arasında dayanım hesaplarında %1,

doğal frekans hesaplarında maksimum %8 lik bir sapma tespit edilmiştir.

- Elde edilen güvenlik katsayıları ve sapma değerlerinin kardan milleri için uygun olduğu tespit edilmiştir.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Tirsan Kardan A.Ş. Ar-Ge Merkezi'ne ve Test Merkezi'ne bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

Dai, G. L., Hak, S. K., Jong, W. K., Jin, K. K., 2004, "Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft" *Composite Structures* 63, 87–99.

Durk, H. C., Dai, G. L., Jin, H. C., 1997, "Manufacture of one-piece automotive drive shafts with aluminum and composite materials", Vol. 38, 309-319

Hak, S. K., Byung, C. K., Tae, S. L., Dai, G. L., 2004, "Foreign objects impact damage characteristics of aluminum/composite hybrid drive shaft", *Composite Structures* 66, 377–389.

Biol, Y., Gokcil, E., Guvenc, M., Akdi S., 2016, "Processing of high strength ENAW 6082 forgings without a solution heat treatment" *Materials Science & Engineering A*, 674, 25–32.

Harshal, B., Viraj, S., Baskar, P., 2013, "Material Optimization and Weight Reduction of Drive Shaft Using Composite Material" *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Volume 10, Issue 1, 39-46.

Hirsch, J., 1999, "Light Metal World, Light Metal Age", p.124.

Bouquerel, J., Diawara, B., Dubois, A., Dubar, M., Vogt, J.B., Najjar, D., "Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy", *Materials and Design* 68 (2015) 245–258.

Störzel, K., Bruder, T., Hanselka, H., "Durability of welded aluminium extrusion profiles and aluminium sheets in vehicle structures, *International Journal of Fatigue* 34 (2012) 76–85

Vidit, G., Manabu, E., Toshiya, O., Syohei, Y., "A study on fatigue behavior of MIG-welded Al-Mg alloy with different fillerwire materials under mean stress", *International Journal of Fatigue* 107 (2018) 119–129

Ruan, Y., Qiu, X.M., Gong, W.B., Sun, D.Q., Li, Y.P., " Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux, *Materials and Design* 35 (2012) 20–24

Kammuluri, B., Venkata, S., Ramakotiah, K., 2016, "Hybrid materials of aluminium" *Materials Today: Proceedings* 3, 4140–4145.

Khalid, Y. A., Mutasher, S.A., Sahari, B.B., Hamouda, A.M.S., 2007, "Bending fatigue behavior of hybrid aluminum/composite drive shafts", *Materials and Design*, 28, 329–334.

Mutasher, S.A., 2019, "Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft" *Materials and Design* 30, 215–227.

Rompicharla, R. P., Rambabu K., 2012, "Design and Optimization of Drive Shaft with Composite Materials" Vol.2, Issue.5, 3422-3428.

SAE International, 1991, "Universal Joint and Driveshaft Design Manuel" The Society of Automotive Engineers.

Young, C., Kim, D., U., Kang, B., Y., Park, D., K., Lee, D., J., Lee, S., W., Shin, H., T., 2013, "Forming of the precision aluminum tube for a light weight driveshaft" *Journal of Mechanical Science and Technology*, Volume 27, Issue 11, pp 3445–3449.

Andrews, J., 2020, "Off-road vehicle four-wheel drive systems explained" <https://www.fwi.co.uk/>,