

YARIM TORUS ŞEKİLLİ BİR SÜREKLİ DEĞİŞKEN AKTARMA SİSTEMİNİN TASARIMI, ANALİZİ VE İMALATI

Ahmet Yıldız*

Arş. Gör.,

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

ahmetyildiz@uludag.edu.tr

Osman Kopmaz

Prof. Dr.,

Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri

Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi,

Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

osman.kopmaz@btu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışma, mekanik preslerde kullanılmaya yönelik bir yarım torus şekilli sürekli değişken aktarma (SDA) sisteminin tasarımı, analizi ve imalatı ile ilgilidir. Burada, servo mekanik preslere benzer şekilde, klasik mekanik preslerde de hız değişimi ve koç kontrolü gerçekleştirmek için bir SDA sisteminin kullanımı önerilmiştir. Bunun için, hızlı çevrim oranı değişimine imkân sağlayan bir kontrol mekanizması tasarlanmıştır. Ayrıca disklerin temas noktalarında oluşan Hertz gerilmeleri, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Nihayetinde, SDA sisteminin ve mekanik presin dinamik karakteristiğini yansıtacak bir deney düzeneğinin imalatı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, ülkemizde yerli imkânlarla ilk defa bir toroidal SDA test sistemi üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toroidal, sürekli değişken aktarma, SDA, mekanik press

DESIGN, ANALYSIS AND PRODUCTION OF A HALF TOROIDAL CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION SYSTEM

ABSTRACT

This work is on the design, analysis and manufacturing of a half toroidal continuously variable transmission (CVT) system considered for the use in mechanical presses. Similar to the presses equipped with servo system the use of a CVT to perform speed variations and ram control is proposed in this work. To this end a control mechanism enabling fast speed ratio changes is designed. Moreover, the Hertz stresses on the disc contact points are analyzed. Finally, an experimental setup by which the characteristics of the CVT system and mechanical press can be analyzed is constructed. In this way, this is the first toroidal CVT setup manufactured in our country.

Keywords: Toroidal, continuously variable transmission, CVT, mechanical press

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 20.09.2015

Kabul tarihi : 03.12.2015

Yıldız, A., Kopmaz, O. 2015. "Yarım Torus Şekilli Bir Sürekli Değişken Aktarma Sisteminin Tasarımı, Analizi ve İmalatı," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 671, s. 53-58.

1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme sektöründe kullanılan mekanik preslerde çevrim içi hız kontrolü, son yıllarda üzerinde önemle durulan konulardan biridir [1-6]. Bu ihtiyaç, temelde, farklı karakterde metalleri şekillendirmede duyulan farklı deplasman-zaman eğrilerini tek bir mekanizma ile elde edebilme arayışına dayanmaktadır (Şekil 1). Aynı malzeme için dahi, çekme ve kesme operasyonları için en uygun pres hareket karakteristiği farklılık göstermektedir. Yaklaşık onbeş yirmi yıl kadar önce, söz konusu ihtiyaç, preslerde kullanılan konvansiyonel motorların yerine servo-motorların kullanılmaya başlanması ile bir çözüm yoluna doğru girmiştir. Önceleri düşük tonajlı preslerde uygulama imkânı bulabilen teknoloji, şimdilerde yüksek tonajlı preslere de çözüm sunabilir bir seviyeye ulaşmış görünmektedir.

Motor tipinin yanı sıra, servo-mekanik preslerin yapısal ikinci temel farklılığı, konvansiyonel sistemde kullanılan volan yerine, kapatisör bulunmasıdır. Bu sistemde volan devre dışı bırakılmıştır ve aktarma organlarının ataleti mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılmıştır. Güçlü motor ve düşük atalet ile tonaj ve pozisyon kontrolü elde edilmiş olur. Sonuç olarak, aynı işi yapmak üzere tasarlanmış bir servomekanik pres, konvansiyonel preslere göre 8 ila 10 kat daha büyük kurulu güç ile donatılmıştır ve dolayısı ile oldukça yüksek maliyetlidir.

Mekanik preslere alternatif olarak kullanılan servo mekanik preslerin yerine klasik mekanik prese bir sürekli değişken aktarma sistemi ekleyerek koç tabla hareketini istenildiği zaman yavaşlatıp hızlandırmak mümkün olacaktır. Ayrıca presin şekillendirme yapılmayan ölü zamanları azaltılıp çalışma süresi hızlandırılabilir.

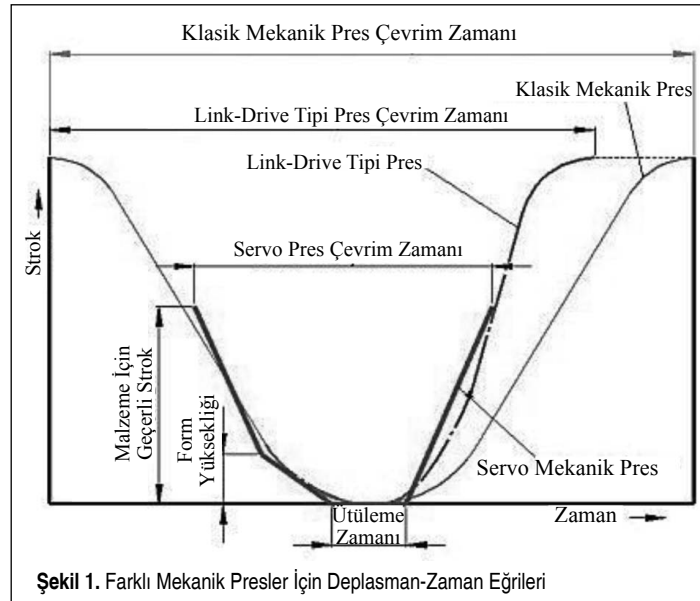
Bu çalışma, klasik bir mekanik prese bir sürekli değişken aktarma sistemi (Şekil 2) ekleyerek farklı krank açısız hızları elde etmeyi ve ayrıca bir servo mekanik preste elde edilebilen deplasman-zaman eğrilerini elde edebilmeyi amaçlamaktadır. Böylece farklı operasyonları aynı mekanik preste yapmak mümkün olacaktır. Bununla ilgili olarak Yıldız ve Kopmaz [6], bir mekanik preste yarım torus şekilli SDA sisteminin kullanımının teorik olarak mümkün olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmanın deneysel kısmını oluşturmak için hazırlanan test düzeneğinde, öncelikle yarım torus şekilli SDA sistemi tasarlanmış ve diskler arasında oluşacak Hertz basınçları analiz edilmiştir. Daha sonra, hızlı çevrim oranı değişimine imkân sağlayacak bir çevrim oranı değişim mekanizması geliştirilmiştir. Son olarak, sistemin imalatı gerçekleştirilmiştir.

SDA sistemlerinin farklı geometride ve konstrüksiyonda bir çok çeşidi mevcuttur. Bunların başlıcaları torus şekilli SDA [7-12], kayışlı ve/veya zincirli SDA [13-17], bilyalı SDA [18], küresel SDA [19] ve hidrostatik SDA [20, 21] sistemle-

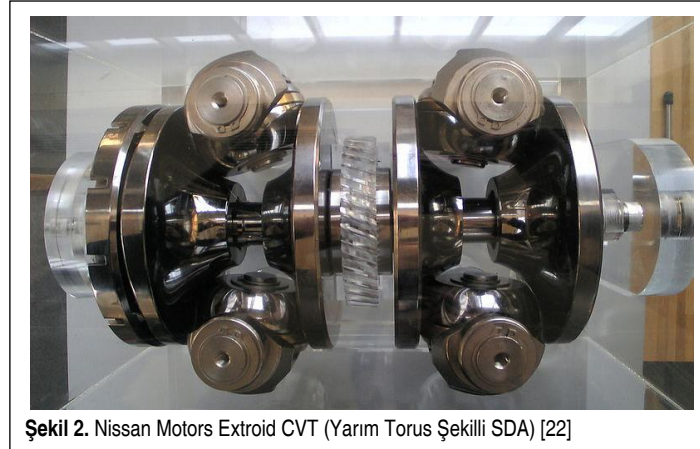
ridir. Torus şekilli SDA sistemleri tam torus şekilli ve yarım torus şekilli SDA olmak üzere ikiye ayrılır.

Tam ve yarım torus şekilli SDA sistemlerinde diskler, birbirine doğru sıkıştırılarak arada oluşan sürtünme kuvveti sayesinde güç iletimini sağlarlar. Disklere özel bir sıvı püskürtülerek yüzeyler arasında elastohidrokinamik teoriye dayalı bir film tabakası oluşması sağlanır ve böylece yüzeyler doğrudan metal-metal temas etmezler. Yarım torus şekilli sürekli değişken aktarma sistemlerinde giriş diski ile çıkış diski tam bir simit ya da torus oluşturmaz.

Carbone ve arkadaşları [7], yarım ve tam torus şekilli geometriye sahip SDA sistemlerinin ayrıntılı bir mukayesesini yapmışlardır. Bu iki sistemin geometrik parametreleri bir matematiksel model oluşturularak ele alınmış ve kinematik analizleri yapılmıştır. Kinematik analizler sonucunda, tam torus şekilli SDA sisteminde, ara disklerin giriş ve çıkış disklerine göre bağıl açısız hızın temas yüzeyine dik bileşeni olan spin hareketinin yarım torus şekilli SDA organına göre daha fazla



Şekil 1. Farklı Mekanik Presler İçin Deplasman-Zaman Eğrileri



Şekil 2. Nissan Motors Extroid CVT (Yarım Torus Şekli SDA) [22]

olduğu ve bunun da varyatörün verimini olumsuz yönde etkilediği gösterilmektedir.

2. YARIM TORUS ŞEKLİ SDA SİSTEMİNİN TASARIMI

Yarım torus şekilli SDA sisteminin temel tasarım parametreleri Şekil 3'te görülmektedir. Tasarımda kullanılan bu parametrelerin değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada torusun yarı çapı r_0 , ara disklerin yarı huni açısı θ ve ara disklerin profil yarıçapı r_{22} 'dir. Ayrıca ara diskin giriş diski ile temas yarıçapı r_1 ve çıkış diski ile olan temas yarıçapı r_3 'tür. Torusun aksel yarıçapı ise r_t 'dir. Ara diskin dönme merkezi O, dönme açısı ise ϕ 'dir.

Temas yarıçapları ile diğer parametreler arasındaki ilişki aşağıdaki şekildedir [7]:

$$r_1 = r_0(1 + k - \cos(\theta + \phi)) \quad (1)$$

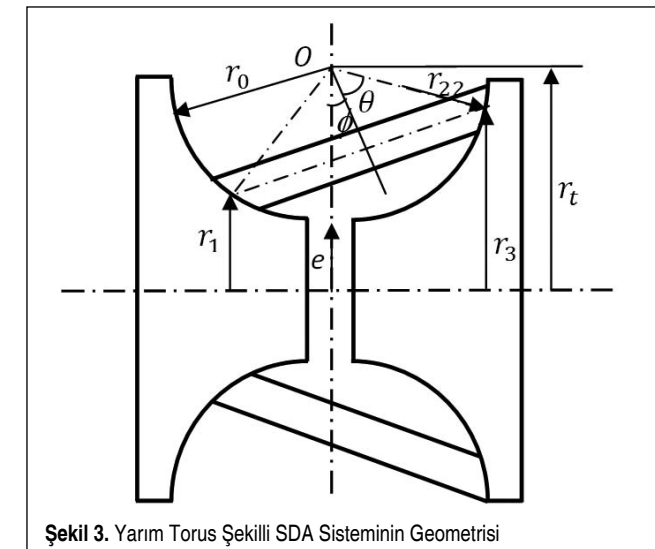
$$r_3 = r_0(1 + k - \cos(\theta - \phi)) \quad (2)$$

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{r_3}{r_1} \quad (3)$$

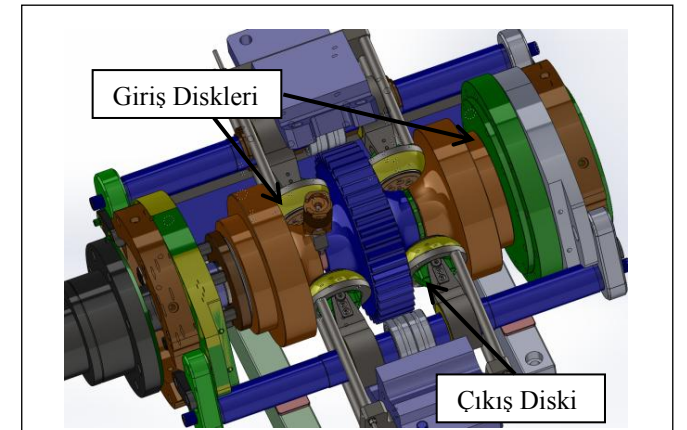
Burada k , kavite oranı ve değeri e/r_t 'dir. Ayrıca i , çevrim oranı; ω_1 ve ω_3 ise giriş ve çıkış açısız hızlarını göstermektedir.

Tasarlanan SDA sistemi; iki kademeli, hidrolik sıkıştırma sistemine sahip ve hızlı çevrim oranı değişimine imkân sağlayan bir mekanizmadan oluşmaktadır (Şekil 4). Yüksek torkların iletiminde avantaj sağlayan iki kademeli bu sistemin çevrim oranını kontrol için orjinal bir mekanizma geliştirilmiştir. Şekil 5'te görülen bu mekanizma, ara disklerin torus boyunca hem düz hem de aksel yer değişimine imkân sağlamaktadır.

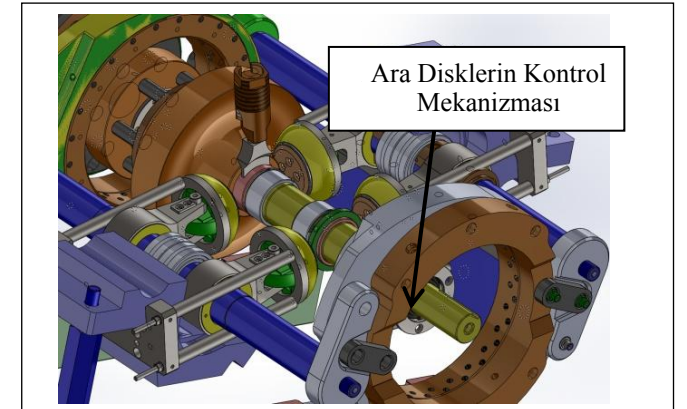
Ara diskler torus içinde itilince, kendiliğinden dönmekte ve



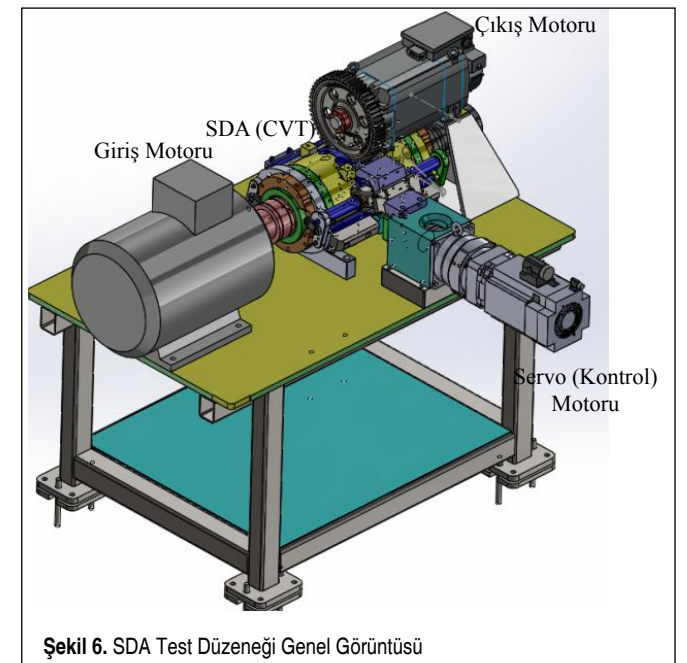
Şekil 3. Yarım Torus Şekli SDA Sisteminin Geometrisi



Şekil 4. Tasarlanan Çift Kademeli Yarım Torus Şekli SDA



Şekil 5. Çevrim Oranı Değişim Mekanizması Tasarımı



Şekil 6. SDA Test Düzeneği Genel Görüntüsü

istenilen çevrim oranı elde edilmektedir. SDA sisteminin test edilmesi için geliştirilen test düzeneğinde ara disklerin tahriği

Şekil 6'da görülen servo motor ile gerçekleştirilmektedir. Öte yandan, hem diskler arasındaki traction sıvısını hem de sıkıştırma kuvvetini sağlamak üzere tasarlanan hidrolik ünite Şekil 6'da görülen test masasının altına yerleştirilmiştir.

3. TEMAS BÖLGESİ GERİLME ANALİZİ

Disklerin temas bölgesinde meydana gelen elipsin merkezinde oluşan maksimum Hertz gerilmesi (σ_z), Hertz kontak teorisine göre;

$$\sigma_z = \frac{3 F_N}{2 \pi a b} \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır. Burada F_N , temas noktasında ara diske etkiyen normal kuvvet, a ve b temas noktasında oluşan elipsin sırası ile uzun ve kısa asal eksen uzunluklarıdır. Giriş kısmı, temas noktasında oluşan elipsin boyutları Carbone [7] yaklaşımlarıyla aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır:

$$\frac{1}{\bar{R}_{e,x}} = \frac{r_0}{R_{e,x}} = \frac{1+k}{1+k-\cos(\theta+\phi)} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\bar{R}_{e,y}} = \frac{r_0}{R_{e,y}} = \frac{1}{\bar{r}_{22}} - 1 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\bar{R}_e} = \frac{\cos(\theta+\phi)}{1+k-\cos(\theta+\phi)} + \frac{1}{\bar{r}_{22}} \quad (7)$$

Burada $\bar{R}_{e,x}$, $\bar{R}_{e,y}$ ve \bar{R}_e sırası ile a ve b asal eksenlerini ile çakışık x ve y eksenlerindeki eşdeğer eğrilik yarıçaplarıdır ve $\bar{r}_{22} = r_{22} / r_0$ 'dir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılacak eliptik parametre ε ve eliptik integral I yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanır [7]:

$$\varepsilon = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{\bar{R}_{e,y}}{\bar{R}_{e,x}} \right)^2 \quad (8)$$

$$I = 1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{1}{\varepsilon} \quad (9)$$

Temas bölgesinde oluşan elipsin yarı eksen boyutları a ve b aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$b = \left(\frac{6 F_N r_0}{\pi (1-\nu^2)} \varepsilon^2 I \bar{R}_e \right)^{1/3} \quad (10)$$

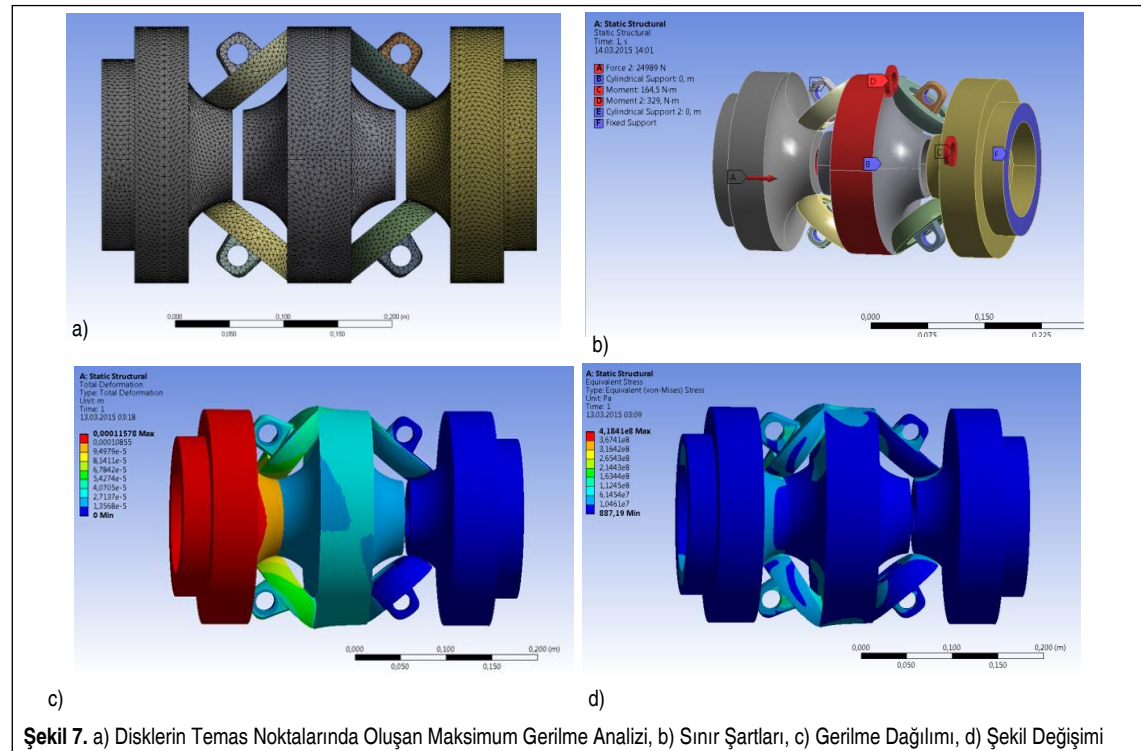
$$a = \left(\frac{6 F_N r_0}{\pi (1-\nu^2)} \frac{I \bar{R}_e}{\varepsilon} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Burada, disklerin elastisite modüllerinin ve Poisson oranlarının eşit ve sırasıyla E ve ν olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 1'de verilen moment değeri (M) iletilmek istenen mak-

Tablo 1. Temel Tasarım Parametreleri

r_0 (m)	0.048	F_N (N)	24989
r_t (m)	0.076	E (N/m ²)	2.1×10^{11}
r_{22} (m)	0.038	ν	0.29
θ	62°	M (N.m)	329



simum torku göstermektedir. Bu torka karşılık disklerde oluşacak normal kuvvet aynı tabloda verilmiştir.

Tasarlanan sistemin üretimine geçilmeden önce bir çok analizi yapılmıştır. Şekil 7'de, diskler arasında oluşan maksimum gerilmelerin analizleri sunulmuştur. Belirlenen sınır şartlarına göre, maksimum Hertz gerilmeleri çevrim oranının maksimum olduğu halde oluşur [8]. Burada yapılan analizlerde çevrim oranı iki olarak alınmıştır. Ayrıca yüksek sıkıştırma kuvvetine

karşılık disklerin şekil değiştirme analizi önem arz etmektedir. Nitekim, sıkıştırma kuvvetinin değişmesine karşılık disklerin temasının kesilmesi ve de güç iletiminin sağlanamaması ihtimali sürekli göz önünde tutulmuş ve analizler bu doğrultuda yapılmıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi, diskler arasında oluşan maksimum Hertz gerilmeleri 0.42 GPa ve maksimum şekil değiştirme miktarı 0.12 mm'dir. Diskler arasında oluşan bu gerilmeler, seçilen disk malzemelerine göre DIN standartlarında maksimum 3 GPa'a kadar çıkabilmektedir. Yukarıdaki verilen klasik Hertz hesaplamalarında da %90 uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla, yapılan tasarımın uygun bir tasarım olduğu görülmektedir. Diskler arasında oluşan yağ filmi çok ince bir tabaka şeklinde olduğundan, bu analizlerde elastohidrokinamik etkiler göz önüne alınmamıştır.

4. TEST DÜZENEĞİ İMALATI

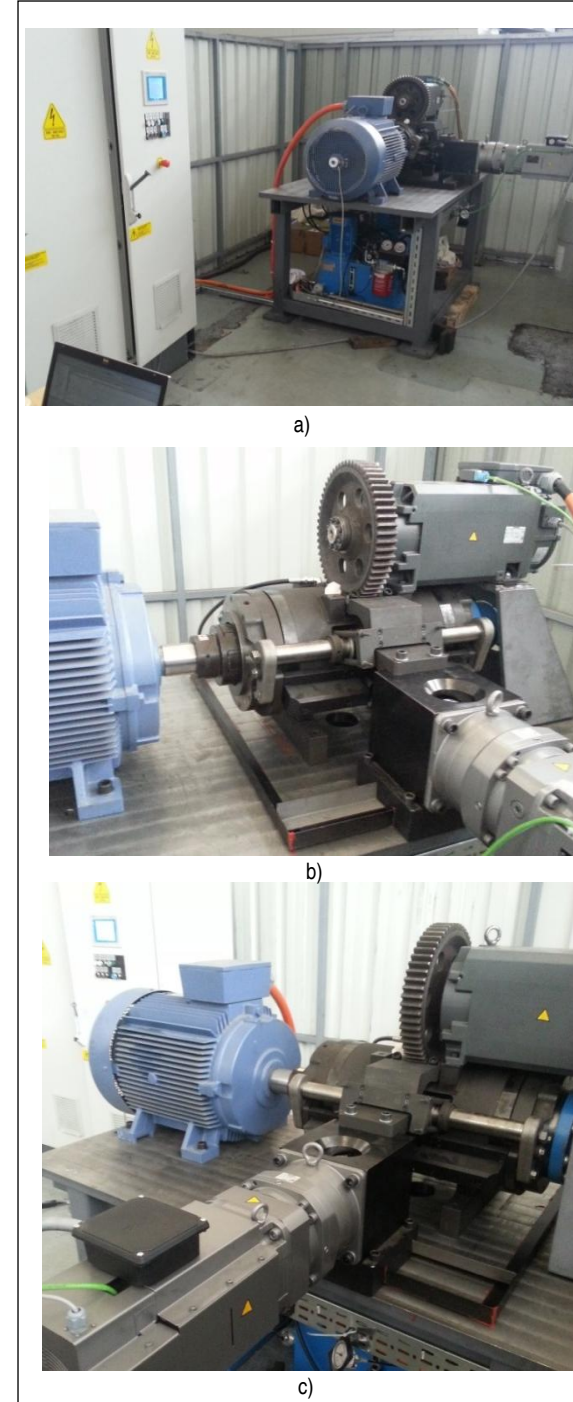
Tasarımı yapılan yarım torus şekilli SDA sisteminin tüm parçalarının teknik resimleri çizilmiş ve imal edilmiştir (Şekil 8).

Kurulan deney düzeneğinde kontrol senaryoları geliştirilerek SDA'nın verimi ve çevrim oranı hız değişim cevabı testleri yapılmaktadır. Bu testlerden sonra, mekanik presin giriş açılal hızı SDA ile kontrol edilerek koç kontrolü deneyleri gerçekleştirilecektir. Torus şekilli SDA sistemlerinde karşılaşılan en büyük güçlük, ara disklerin hassas kontrolü konusudur. Literatürde yapılan çalışmaların bu konuda yetersiz kaldığı ve bu konunun üzerinde çalışmaların devam ettiği görülmektedir. Kontrol ile ilgili karşılaşılan güçlükler daha hassas bir gövde imalatıyla yenilenmeye çalışılarak deneyler sürdürülmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, mekanik preslerde motor kontrolü olmaksızın farklı giriş hızları elde etmek ve ayrıca presin koç hareketini kontrol etmek amacıyla sisteme bir sürekli değişken aktarma organı eklenmesi ile ilgilidir. Bu doğrultuda, öncelikle iki kademeli, hızlı çevrim oranı değişim kabiliyetine sahip ve hidrolik sıkıştırma esaslı yarım torus şekilli bir SDA sistemi tasarlanmıştır. Diskler arasında oluşan maksimum temas gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemi ve Hertz bağıntılarına göre belirlenmiştir. Tasarım doğrulama çalışmalarından sonra, sistemin bütün parçalarının imalatı ve montajı gerçekleştirilerek deney düzeneği hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra, SDA sisteminin deneysel olarak doğrulanmasının ardından da mekanik presin deneyleri yapılacaktır.

Ayrıca, yaptığımız araştırmaya göre, Türkiye'de şimdiki kadar torus şekilli SDA sistemine rastlanmamıştır. Dolayısıyla, bu sistemin ülkemizde üretilen ilk yerli torus şekilli SDA sistemi olduğu söylenebilir.



Şekil 8. Yarım Torus Şekli SDA Sistemi Deney Düzeneği

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen 01086.STZ.2011-2 numaralı SAN-TEZ projesi kapsamında Ahmet YILDIZ tarafından yapılan yüksek lisans tezinin bir parçasıdır. Desteklerinden dolayı Bakanlığa, proje ortağı olan Coşkunöz Metal Form AŞ.ve ve tasarım çalışmalarında teknik destek sağlayan Bes Arge ve Mühendislik Ltd. Şti.ve teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Du, R., Guo, W. Z.** 2003. "The Design of a New Metal Forming Pres with Controllable Mechanism," *Journal of Mechanical Design, Transactions of ASME*, vol. 12, p. 582-592.
2. **Meng, C. F., Zhang, C., Lu, Y. H., Shen, Z. G.** 2004. "Optimal Design and Control of a Novel Press with an Extra Motor," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, p. 811-818.
3. **Soong, R. C.** 2010. "A New Design Method for Single DOF Mechanical Presses with Variable Speeds and Length-Adjustable Driving Links," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, p. 495-510.
4. **Li, H., Zhang, Y.** 2010. "Seven-Bar Mechanical Pres with Hybrid-Driven Mechanism for Deep Drawing, Part 1: Kinematic Analysis and Optimum Design," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24 (11), p. 2153-2160.
5. **Li, H., Zhang, Y.** 2010. "Seven-Bar Mechanical Pres with Hybrid-Driven Mechanism for Deep Drawing, Part 2: Dynamic Modeling and Simulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24 (11), p. 2153-2160.
6. **Yıldız, A., Kopmaz, O.** 2015. "Dynamic Analysis of a Mechanical Press Equipped with a Half-Toroidal Continuously Variable Transmission," *Int. J. Materials and Product Technology*, vol. 50 (1), p. 22-36.
7. **Carbone, G., Mangialarda, L., Mantriota, G.** 2004. "A Comparison of the Performances of Full and Half Toroidal Traction Drives," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, p. 921-942.
8. **Yıldız, A., Kopmaz, O.** 2014. "Yarım Toroidal SDA Sisteminde Temas Bölgesi Gerilmelerinin İncelenmesi," 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs 2014, Bursa.
9. **Imanishi, T., Machida, H.** 2001. Development of Powertoros Unit Half Toroidal CVT Comparison between Half Toroidal and Full Toroidal CVTs (2)," *Motion and Control NSK*, vol. 10, p. 1-8.
10. **Yıldız, A., Kopmaz, O., Telli, C. S.** 2015. "Dynamic Modeling and Analysis of a Four-Bar Mechanism Coupled with a CVT for Obtaining Variable Input Speeds," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29 (3), p. 1001-1006.
11. **Zhang, Y., Zhang, X., Tobler, W.** 2000. "A Systematic Model for the Analysis of Contact, Side Slip and Traction of Toroidal Drives," *Journal of Mechanical Design, Transactions of ASME*, vol. 122, p. 523-528.
12. **Novellis, D. L., Carbone, G., Mangialardi, L.** 2012. "Traction and Efficiency Performance of the Double Roller Full-Toroidal Variator: A Comparison with Half- and Full-Toroidal Drives," *Journal of Mechanical Design*, vol. 134 (071005), p. 1-14.
13. **Carbone, G., Mangialardi, L., Bonsen, B., Tursi, C., Venhuizen, P. A.** 2007. "CVT Dynamics: Theory and Experiments Mechanism and Machine Theory," vol. 42, p. 409-428.
14. **Srivastava, N., Haque, I.** 2009. A Review on Belt and Chain Continuously Variable Transmissions (CVT): Dynamics and Control," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, p. 19-41.
15. **Srivastava, N., Haque, I.** 2009. "Nonlinear Dynamics of a Friction-Limited Drive: Application to a Chain Continuously Variable Transmission (CVT) System," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 321, p. 319-341.
16. **Carbone, G., Novellis, L. D., Commissaris, G., Steinbuch, M.** "An Enhanced CMM Model for the Accurate Prediction of Steady-State Performance of CVT Chain Drives," *Journal of Mechanical Design*, vol. 132 (021005), p. 1-8.
17. **Zheng, C. H., Lim, W. S., Cha, S. W.** 2011. Performance Optimization of CVT for Two-Wheeled Vehicles," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 12 (3), p. 461-468.
18. **Belfiore, N. P., Stefani, G. D.** 2003. "Ball Toroidal CVT: A Feasibility Study Based on Topology, Kinematics, Statics and Lubrication," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 23 (3), p. 304-331.
19. **Kim, J., Park, F. C., Park, Y., Shizuo, M.** 2002. "Design and Analysis of a Spherical Continuously Variable Transmission," *Journal of Mechanical Design*, vol. 124 (1), p. 21-29.
20. **Iino, T., Okuda, A., Takano, M., Tanaka, M., Sakai, K., Asano, T., Fushimi, K.** 2003. "Research of Hydrostatic CVT for Passenger Vehicles," *JSAE Review*, vol. 24 (3), p. 227-230.
21. **Savaresi, S. M., Taroni, F. L., Previdi, F., Bittanti, S.** 2004. "Control System Design on a Power-Split CVT for High-Power Agricultural Tractors," *Transactions on Mechatronics*, vol. 9 (3), p. 569-579.
22. Wikimedia Foundation Inc. Continuously Variable Transmission. http://en.wikipedia.org/wiki/Continuously_variable_transmission, son erişim tarihi: 20.03.2015.