

Design and Production of Two-Axis Shaking Table

Bilal TAYFUR*¹ , Emin USLU² , Ömer CAN¹ , Ahmet CİHAN³ ,
Ertekin ÖZTEKİN⁴ 

¹Bayburt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye

²Bayburt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye

³Düzce Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

⁴Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

Keywords:

Shaking Table
Dynamic Behavior

Abstract

Recently, many analytical methods have been developed to predict the behavior of structures under dynamic effects. Accordingly, sophisticated software platforms based on these methods have been emerged and presented to the service of engineers. However, it is not possible for these software platforms to predict some possible damages in the structures with absolute accuracy. Therefore, the shaking tables can be used to reveal some dynamic behaviors of the scaled models of the structures. However, these devices often have a high cost. Within the scope of this study, a two-axis (X and Y) shaking table has been designed and produced. The device with a table size of 700x700 mm and a ± 250 mm stroke length was designed to be able to apply both cyclic and predefined earthquake movements. Unlike common biaxial systems, the equal distribution of the loads on both axes was ensured thanks to the developed joint system. The system components that require real-time management were written in C programming language, and the computer interface software was written in C# programming language. The drive system was actuated by servo motors for stable operation of the system under high weights. The experiments revealed that the error margin of the shaking table system remains below 1 percent.

İki Eksenli Sarsma Tablası Tasarımı ve İmalatı

Anahtar Kelimeler:

Sarsma Tablası
Dinamik Davranış

Özet

Günümüzde yapıların dinamik etkiler altındaki davranışının öngörülmesi için geliştirilmiş çok sayıda analitik yöntem ve bu yöntemleri esas alan yazılımlar geliştirilmiş ve mühendislerin hizmetine sunulmuştur. Bununla birlikte bu yazılımların yapılardaki kimi olası hasarları mutlak doğrulukla öngörmesi mümkün olamamaktadır. Bu noktada kimi zaman yapıların ölçekli modellerinin dinamik davranışlarını ortaya koymak için sarsma tablaları kullanılabilir. Ancak bu cihazlar çoğunlukla yüksek maliyetleriyle dikkat çekmektedir. Bu çalışma kapsamında iki eksenli (X ve Y) sarsma tablası geliştirilmiştir. 700x700 mm tabla ölçüsüne sahip olan cihaz ± 250 mm kurs boyuna sahip ve hem çevrimsel hem de ön tanımlı deprem hareketlerini uygulayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Yaygın iki eksenli sistemlerin aksine; geliştirilen mafsal sistemi sayesinde her iki eksene gelen yüklerin eşit dağıtılması sağlanmıştır. Sistemin gerçek zamanlı yönetim gerektiren kısımları C dilinde, bilgisayar arayüz yazılımı ise C# dilinde yazılmıştır. Sistemin yüksek ağırlıklar altında kararlı çalışması için tahrik sistemi servo motorlarla sağlanmıştır. Üretim sonrasında yapılan deneyler neticesinde sistemin hata payının yüzde 1'in altında kaldığı görülmüştür.

1 GİRİŞ

Depremler, dinamik doğası itibariyle genellikle yapıların servis ömürleri boyunca karşılaştıkları en büyük tehdit olma özelliğini taşımaktadırlar. Bu dinamik kuvvet, tehdit unsuru oluşturduğu yapıyı çok farklı biçimlerde sınavabilmektedir. Yapının yüksekliği, geometrisi ve taşıyıcı sistemi gibi karakteristik özellikleri ve deprem etkilerinin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Yapının tasarımının bu tehditler göz önüne alınarak gerçekleştirilmesi yapının beklenen hizmet standardını sağlamakta anahtar role sahiptir [1]. Bu bağlamda deprem mühendisliği açısından yapı davranışının dinamik etkiler altında öngörülebilmesi gerekmektedir.

Yapının karakteristik özelliklerini göz önüne alarak dinamik davranışın belirlenmesi için kullanılan birçok analitik yöntem bulunmaktadır [2]. Yapıların dinamik davranışlarının öngörülebilmesi için genellikle bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Ancak bu yazılımlar çokça kabul ve doğru modelleme sonucunda gerçeğe yakın bir öngörü sunabilmektedir [3]. Fakat karmaşık sistemli yapılarda bu öngörülerin doğrulanması gerekebilmektedir. Büyük sarsma tablaları yapıların 1/1 ölçekle test edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak hem bu cihazlar hem de ilgili yapısal modellerin oluşturulması çok büyük maliyetleri beraberinde getirmektedir. Bu nedenle doğrulama işlemi için yapıların ölçekli modellerinin sarsma testine tabi tutulması yaygın bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [4].

Sarsma tablası testlerinin yapılması için yapıların ölçekli modelleri oluşturulurken; yapının geometrik, dinamik, kinematik ve malzeme özelliklerinden faydalanılır. Ölçeklenmiş yapının yine ölçekli dinamik verilerle teste tabi tutulması sonucunda elde edilen karakteristik dinamik veriler, bilgisayar yazılımları kullanarak oluşturulacak modeller için kalibrasyon kriterleri olarak veya gerçek yapının dinamik karakteristiğini öngörmek için kullanılabilir [5]. Sarsma tablaları çok farklı yapı türlerinin dinamik etkiler altındaki davranışlarını öngörmek için kullanılabilir [6]–[9]. Bunlara ek olarak, sarsma tablasının kullanımı deprem mühendisliği eğitimi ve dinamik davranışın öğretilmesinde çok önemli olanaklar sağlamaktadır.

Sarsma tablaları büyüklüğüne, eksen sayısına ve kullanım ihtiyaçlarına göre farklı özelliklerde üretilmektedir. Tahrik, genellikle tabla büyüklüğüne bağlı olarak servo motorlar veya hidrolik sistemler ile sağlanmaktadır. Her iki sistemin de kendine göre artı ve eksileri bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan servo motor tahrikli sistemler yer değiştirmelerde yüksek hassasiyetle doğruluk yakalanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte servo motorla birlikte gelen en büyük dezavantaj deplasman kapasitelerinin ve yük kapasitelerinin sınırlı olmasıdır. Ancak üretilecek sistemin ölçüleri göz önüne alındığında bu dezavantaj kayda değer bir önem taşımamaktadır. Hidrolik sistemler ise yüksek yük kapasitesi ve deplasman kapasitesine rağmen önemli bir maliyeti yanında getirmektedir. Bu nedenle genellikle büyük ölçekli sarsma tablalarında kullanımları yaygındır.

Salınım biçimi olarak sarsma tablaları kullandıkları motorlara göre farklılık gösterebilmektedir. Klasik elektrik motorla çalışan sarsma tablaları tekrarlı salınım hareketlerini gerçekleştirebilmekte [10] ancak deprem verisi gibi önceden tanımlanmış bir yer değiştirme hareketini simüle edememektedirler. Düzensiz hareketlerin simüle edilebilmesi için motor hızının ve yönünün çok daha hassas bir biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu işlevi karşılamak için step motor veya servo motor kullanılması mümkündür. Ancak step motorların yüksek devirlerde tork düşüşü yaşaması sebebiyle sarsma tablası için kullanılması pratik bir çözüm olamamaktadır. Fakat servo motorlar yüksek devirlerde de yüksek tork sağlayabilmeleri sayesinde küçük ölçekli sarsma tablalarında sıkça kullanılmaktadırlar [11].

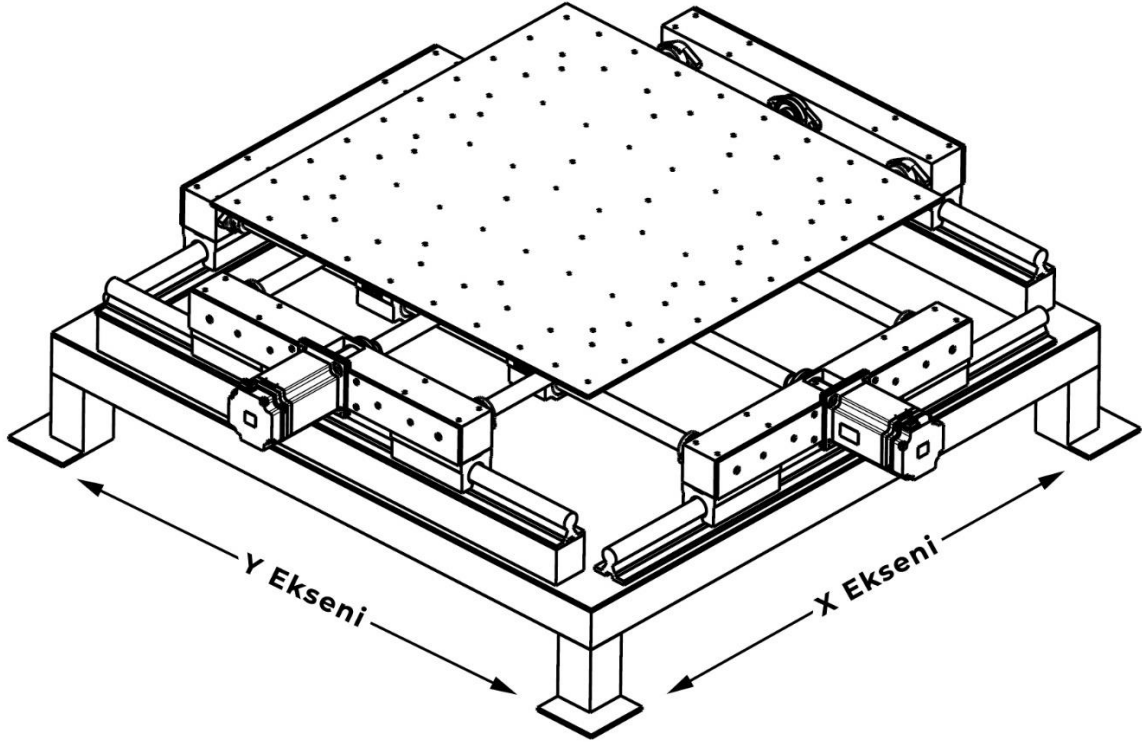
2 GELİŞTİRİLEN SİSTEMİN ÖZELLİKLERİ

Deprem yatağı etkilerini simüle etmek amacıyla (X ve Y) olmak üzere iki eksenle çalışacak şekilde üretilen 700x700 mm yüzey alanına sahip sarsma tablasında tahrik sağlamak amacıyla her bir eksen için 1.25 kW güce sahip servo motorlar kullanılmıştır. Sistem, her bir eksen için, tablada kullanılacak yapısal modellerin ölçekleri de göz önüne alınarak, ± 250 mm kurs boyu kapasitesi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tablanın zeminle rijit bağlantısını sağlayarak titreşim kaybını önlemek için güçlendirilmiş ayak yapısı kullanılmıştır. Bunlara ek olarak sarsma tablasının yüzey alanında teste tabi tutulacak modellerin rijit bağlantısını sağlamak amacıyla her iki eksenle simetrik çok sayıda montaj deliği bırakılmıştır.

2.1 Mekanik sistemin geliştirilmesi

İki eksenli (X ve Y) sarsma tablasının imalatından önce CAD programı kullanılarak 3 boyutlu tasarımı yapılmıştır. Cihazın tasarımı, minimum seviyede mekanik zorlanmalara maruz kalacak şekilde yapılmıştır. Tasarım sırasında kullanılacak olan parçaların analizler sonucundaki boyutlarının ve mekanik özelliklerinin bir üstü seçilmiştir. Bu sayede cihazın dayanımı ve hassasiyetinin üst seviyeye çıkartılması amaçlanmıştır. Ayrıca cihazı oluşturan

parçalarda ilgili firmaların kataloglarından fiyat-performans ilişkisi göz önünde bulundurularak standart elemanlar seçilmiştir. Standart olmayan parçalar yarı mamul halinde tedarik edilen malzemelerden (çelik sac, alüminyum ve diğer plastik ürünler) tasarıma uygun bir şekilde CNC tezgâhlarında işlenmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen cihazın 3 boyutlu tasarımına ait perspektif görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Cihazın perspektif görünümü

Cihaz mekanik olarak; ana gövde, hareketli taşıyıcı gövde ve üst tabla olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Ana gövde, cihazın hareketli aksamının monte edildiği taşıyıcı kısımdır. Profillerin kaynaklı birleştirilmesi ile oluşturulan taşıyıcı iskeletin üzerine, çelik sac ve ara parçaların montajlanmasıyla ana gövde oluşturulmuştur. Buradaki polioksimetilen (POM) malzemeden elde edilen ara parçalar, eksenler arasındaki kod farkını sıfırlamak amacıyla kullanılmıştır. Cihazın en hassas bölümünü oluşturan hareketli taşıyıcı gövde; günümüz teknolojisinin getirmiş olduğu yeniliklerden olan yataklama sistemi ve hareket iletim sistemi elemanlarından oluşmaktadır. Yataklama sisteminde krom kaplı indüksiyonlu miller ve lineer rulmanlar kullanılmıştır. Bu sayede sistemin X ve Y eksenleri yönünde doğrusal olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Yataklama sistemi elemanları alüminyum kolonlar ve çelik sac ile birbirlerine bağlanarak hareketli taşıyıcı gövde oluşturulmuştur. Hareket iletim sistemi için genellikle yüksek hassasiyet isteyen uygulamalarda tercih edilen vidalı mil mekanizması (vidalı mil ve biyelili somun) kullanılmıştır. Motorlardan alınan dönme hareketini doğrusal harekete dönüştüren bu mekanizma ile tablanın aksenal yönlerde hareketi gerçekleştirilmiştir. Bu mekanizmanın kaplin ile motor bağlantısı, rulmanlı yatak ve somun gövdesi ile hareketli taşıyıcı gövdeye bağlantısı yapılmıştır. Yüksek frekanslı dur-kalk uygulamalarında motordan aldığı dönme hareketini boşluksuz bir şekilde aktaran hassas kaplinler kullanılmıştır. Cihazın son mekanik aksamını yapıların ölçekli modellerinin yerleştirildiği üst tabla oluşturmaktadır. Bu kısım 700x700 mm ebatlarında çelik sac ve yükselti amacıyla kullanılan polietilen parçalardan oluşmaktadır. Taşıyıcı iskelet üzerine yerleştirilen cihazın tüm parçaları sökülebilen bağlantı elemanları olan civata-somun ile montajlanmıştır.

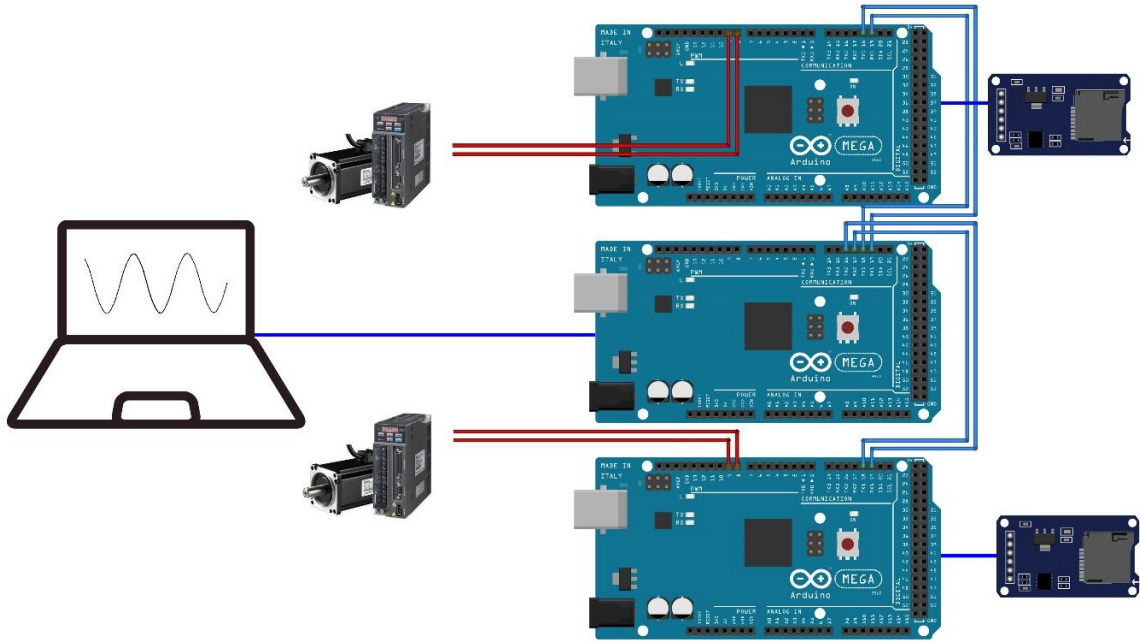


Şekil 2. Yataklama ve hareket iletim sistemi elemanlarından bazıları; krom kaplı indüksiyonlu mil-lineer rulman, vidalı mil-biyeli somun, yataklı rulman, kaplin

2.2 Yazılım ve elektronik aksamın geliştirilmesi

Servo motorlarda istenen hareketin sağlanması motorlara ait sürücülerin bir kontrol elemanı ile yönetilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen sarsma tablasında ihtiyaç duyulan bellek ve gerçek zamanlı hızı karşılamak amacıyla 3 adet Atmega2560 mikrokontrolöre sahip Arduino Mega [12] kullanılmıştır. Kontrolörlerden ikisi iki motora sinyal göndermek için üçüncü kontrolör ise arayüz yazılımıyla bağlantı kurmak ve motorlara bağlı kontrolörleri koordine etmek için kullanılmıştır. Sistemin genel bağlantı durumu Şekil 3'te verilmiştir.

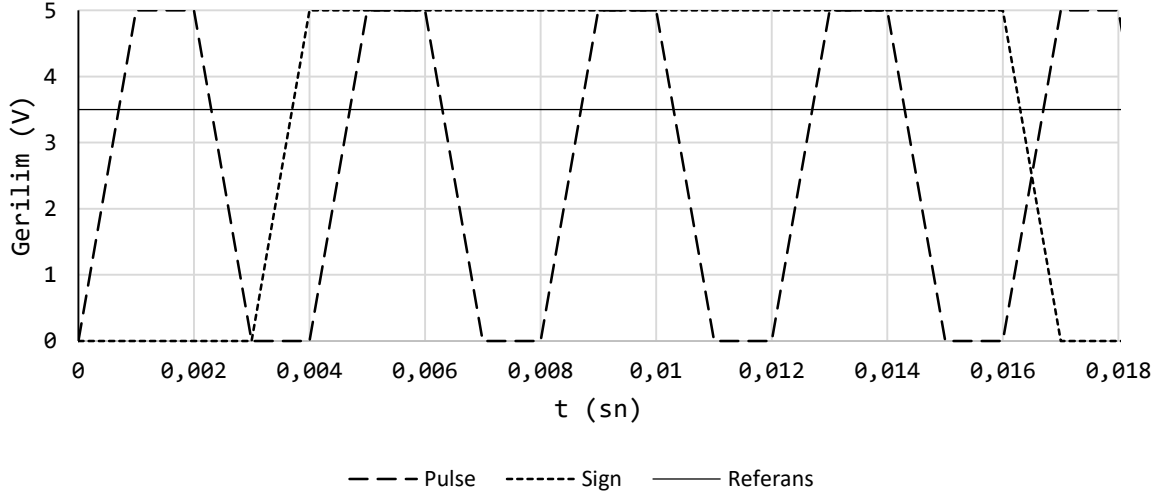
Kullanılan servo motorun yönlendirilmesi için sürücüye tanımlanmış iki yaygın yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birisi analog voltaj ile motorun hareket ettirilmesidir. Bu yöntemde verilen $\pm 10V$ değere bağlı olarak motorun dönme yönü ve hızı belirlenmektedir. Ancak bu yöntemle motora hassas veri gönderimi çok zordur. İkinci ve bu çalışmada kullanılan yöntem ise PWM (Pulse Width Modulation “Sinyal Genişlik Modülasyonu”) [13] tekniğidir. Mikrokontrolör, motor sürücüsüne “Pulse” ve “Sign” olmak üzere 5V gerilimde iki ayrı sinyal yollamaktadır. Zamana bağlı örnek sinyal akışı Şekil 4'te verilmiştir. Kontrolörün gönderdiği ve referans değeri aşan her bir “Pulse” sinyali motorun bir adımlık hareket yapmasını sağlamaktadır. Sistemde sürücü üzerinde tanımlanan ayarlarda motorun bir tam tur atabilmesi için 5000 “Pulse” gönderilmesi gerekmektedir. Motorun dönüş yönü ise “Sign” sinyalinin referans değeri aşmasına bağlı olarak saat yönünde veya saat yönünün tersinde gerçekleşmektedir. Örnek olarak, mekanik sistemdeki vidalı mil için seçilen 5 mm hatve aralığı da göz önüne alındığında 1 saniye içinde 5000 “Pulse” gönderimi tablanın saniyede 5 mm hareket etmesini sağlamaktadır. Bu noktada hatve aralığının büyümesi sistemin maksimum hızına olumlu yansıtacaktır. Ancak bununla birlikte motora binen yükün de artacağı göz önüne alındığında bir orta noktada kara kılınması gerekmektedir. Tüm bu kriterler göz önüne alındığında sistemdeki vidalı millerde 5 mm hatve aralığı kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3. Sistem genel bağlantı şeması

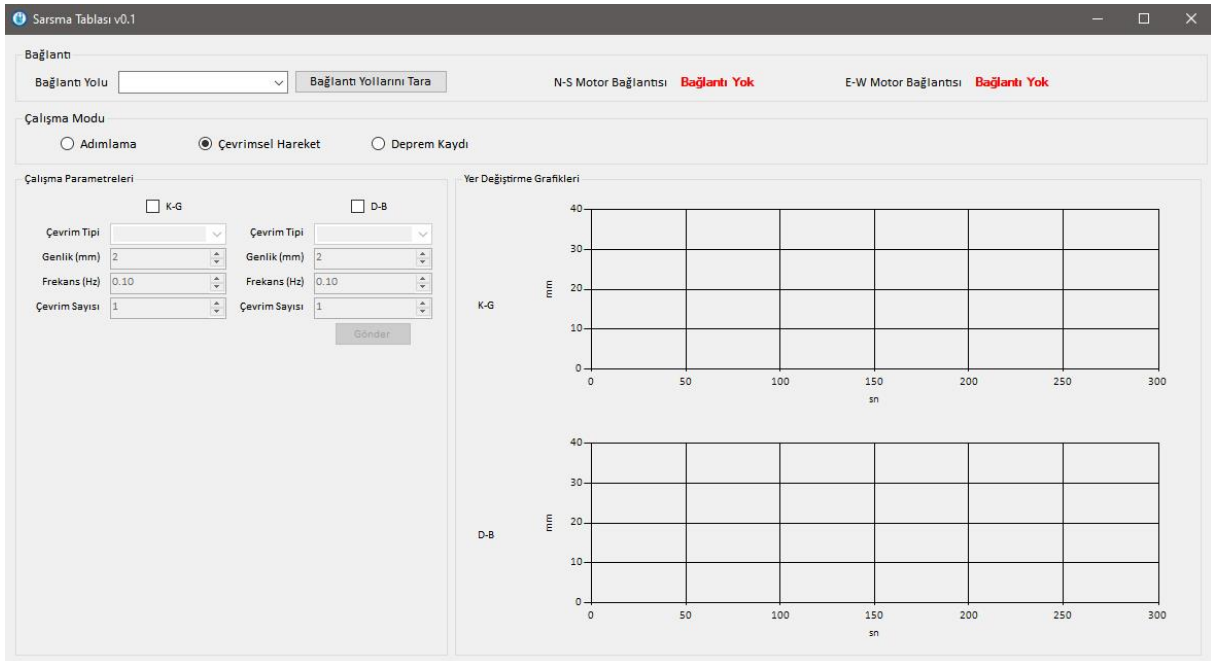
Sistemin yazılım kısmı; mikrokontrolörün programlanması, arayüz geliştirme süreci ve iletişim protokolleri olarak özetlenebilir. Sistemin Mikrokontrolör tarafındaki geliştirme süreci C yazılım dili ile arayüz geliştirme süreci ise C# dili ile gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablasının yönetilmesini sağlamak için geliştirilen arayüz yazılımı Şekil 5'te görülmektedir. Arayüz yazılımı cihazın 3 farklı moda çalışmasına olanak sağlamaktadır. Adımlama modu tabla konumunu ayarlamak için her iki eksen için adım boyu girilerek gerçekleştirilmektedir. İkinci moda ise cihazın çevrimsel hareket yapması sağlanmaktadır. Yapılacak teste göre aktif olacak doğrultular ve bu doğrultulara ait genlik, frekans ve çevrim sayısı bilgileri girilir. Üçüncü moda ise kontrolörlere bağlı kart okuyuculara daha önce yüklenmiş deprem verileri simüle edilebilir. Bu modun kullanımı için test edilecek yapıya göre hareket verilerinin önceden ölçeklenmesi gerekmektedir.

Gerçek deprem verilerinin kabul edilebilir bir biçimde [5] ölçeklenmesinin ardından bu verilerin servo motora PWM aracılığıyla gönderilmesi gerekmektedir. Bu işlem için ayrıca küçük bir C# yazılımı geliştirilmiştir. Tablo olarak düzenlenen yer değiştirme verileri yazılım aracılığıyla hız ve konum değişimine bağlı olarak dönüş yönü ve hızı temsil etmek üzere ikili sistemle ifade edilecek sayısal veriye çevrilmektedir. Bu sayısal değerler ise mikroişlemci tarafından PWM aracılığıyla servo motor sürücüsüne gönderilmektedir.



Şekil 4. PWM çalışma prensibi

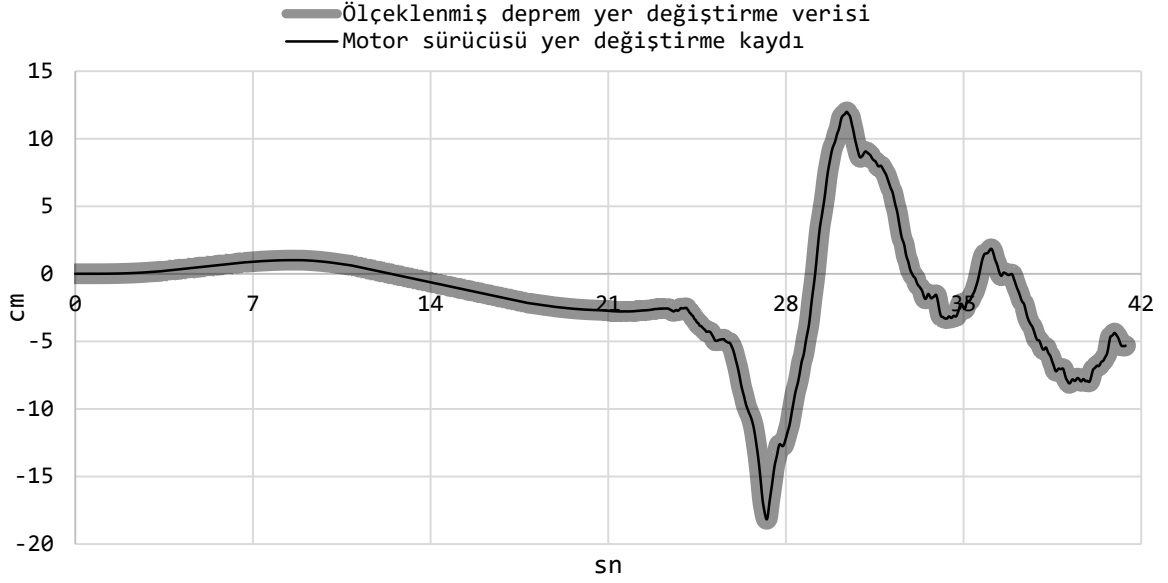
Arayüz yazılımı üzerinden çalıştırma komutu gönderildiğinde motor kontrolörlerinin bağlı olduğu merkez kontrolöre RS232 protokolü ile girilen hareket bilgileri gönderilir. Bu aşamada merkezi kontrolör gelen bilgileri eksenlere göre ayrıştırarak yine RS232 protokolü ile motorların bağlı olduğu kontrolörlere gönderir. Sonrasında her bir eksenle ait PWM sinyalleri gerçek zamanlı oluşturularak motor sürücülerine gönderilir ve hareket sağlanır.



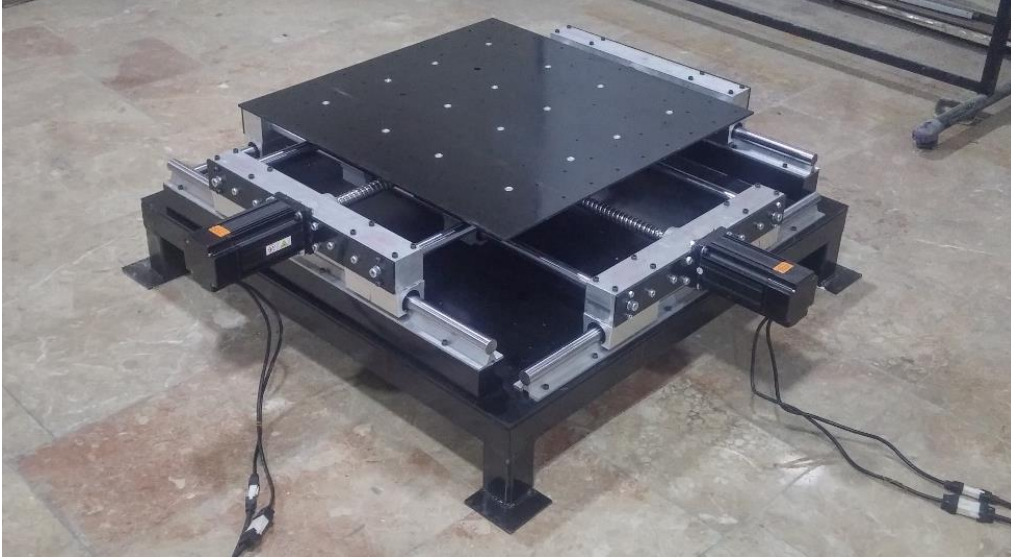
Şekil 5. Arayüz yazılımı

3 BULGULAR

Tasarımı gerçekleştirilen ve üretilen sistemin test edilmesi için ölçeklenmiş bir yer değiştirme kaydı kullanılmıştır. Üretilen yer değiştirme değerleri gerekli matematiksel ifadeler kullanılarak yazılımın kart okuyucu modül üzerinden tanımlanmıştır. Yer değiştirme verileri sistemin mekanik özellikleri itibarıyla 0.05 mm hassasiyetle üretilmiştir. Ölçeklenen deprem yer değiştirme verileri ile servo motor sürücüsünden alınan geri bildirim ile elde edilen yer değiştirme verilerinin zamana bağlı değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Test esnasında sisteme 80 kg'lık bir yükleme yapılmıştır. Bununla birlikte sistemin 12 Hz ve 3 mm genlik ile yapılan çevrimsel yükleme denemelerinde 200 kg'lık bir yüklemeyi sorunsuz olarak sarsabildiği görülmüştür. Üretilen sarsma tablasının son hali Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 6. Sisteme gönderilen ve motordan ölçülen yer değiştirme verilerinin kıyaslanması



Şekil 7. 2 Eksenli Sarsma Tablası

4 SONUÇLAR

Çalışmada hedeflenen özelliklere sahip çift eksenli sarsma tablası üretilmiştir. Üretilen cihazın lisans eğitiminde ve yüksek lisans çalışmalarında kullanılacak yeterliliğe sahip olduğu yapılan testler sonucunda görülmüştür. Üretilen cihaz;

- 0.05 mm'lik hassasiyetle istenen deprem verilerini simüle edebilmektedir.
- ± 250 mm yer değiştirme kapasitesine sahiptir.
- Arayüz yazılımı sayesinde motordan alınan gerçek yer değiştirme verileri bilgisayar ortamında eşzamanlı olarak takip edilebilme imkânı sunmaktadır. Ayrıca yazılım altyapısı daha sonra tanımlanabilecek ivmeölçer kayıtlarını da görüntüleyebilecek iletişim protokolüne sahiptir.
- Motorun 3000 RPM hıza sabit torkla (4 Nm) çıkabilme kabiliyetine sahip olması sayesinde yüksek ağırlıklarda bile 500 mm/sn hıza ulaşabilmektedir.
- Yapılan denemelerde 80 kg yüklemeye altında verilen yer değiştirme kayıtlarını hata payı yüzde 1'in altında kalacak şekilde simüle edebilmiştir. Ayrıca 12 Hz ve 3 mm genlikteki çevrimsel yüklemeye denemesinde 200 kg yüklemeye ağırlığının tabla tarafından sorunsuzca sarsılabildiği görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, Bayburt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından mali olarak desteklenmiştir (Proje No: 2017/01-69001-13). Yazarlar maddi desteklerinden dolayı Bayburt Üniversitesi'ne teşekkür etmektedir.

Kaynakça

- [1] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures*, 4th editio. London: Pearson Education Limited, 2015.
- [2] P. Sollogoub, *Seismic testing*, vol. 494. CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2007.
- [3] G. H. Powell, *Modeling for Structural Analysis : Behavior and Basics*. California: Computers and Structures INC., 2010.
- [4] E. AĞCAKOCA, “Yüksek Katlı Yapının Sarsma Tablası Üzerinde Deprem Performansının İncelenmesi,” *ALKÜ Fen Bilim. Derg.*, vol. 1, no. 3, pp. 132–143, Dec. 2019, doi: 10.46740/alku.577323.
- [5] Ö. Şahin, N. Çağlar, and E. Çelebi, “Küçük Ölçekli Sarsma Tablası Test Modelleri için Uygun Ölçeklendirme Katsayısının Araştırılması,” in *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 2017, vol. 2017, no. September, pp. 7–16.
- [6] L. Tao *et al.*, “Comparative study of the seismic performance of prefabricated and cast-in-place subway station structures by shaking table test,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 105, p. 103583, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.tust.2020.103583.
- [7] C. Zhong and C. Christopoulos, “Finite element analysis of the seismic shake-table response of a rocking podium structure,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, p. eqe.3397, Nov. 2020, doi: 10.1002/eqe.3397.
- [8] Q. Xu, H. Zhang, Q. Liu, and L. Wang, “Seismic analysis on reinforced concrete group silos through shaking table tests,” *Struct. Concr.*, p. suco.202000207, Oct. 2020, doi: 10.1002/suco.202000207.
- [9] M. Su, H. Wang, Z. Wang, and F. Wang, “Shaking table tests on steel portal frames consisting of non-compact tapered members,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 473–482, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.09.009.
- [10] A. Torun and M. Çunkaş, “İki Eksende Salınım Yapan Sarsma Tablası Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilim. Dergisi; Cilt 9 Sayı 2*; 85-96, vol. 9, no. 2, pp. 85-96–96, 2009.
- [11] M. T. Nazioğlu, M. Yalçınkaya, H. Keşen, H. Erdoğan, and Ö. F. Karaçal, “Comparison of Seismic Shake Table and Dynamic Analysis Results Using Balsa Model,” *Sciennovation*, vol. 2. Ali GÜRBÜZ, Taşlıdere mh. Menderes Bulvarı Gündoğdu Kuleleri K:5 No:14, pp. 47–57, 2020.
- [12] Arduino, “ARDUINO MEGA 2560 REV3,” 2020. <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3> (accessed Nov. 10, 2020).
- [13] S. K. Peddapelli, *Pulse Width Modulation*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2017.