

ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

UYARLANABİLİR CEPHE SİSTEMLERİNDE ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR VE UYGULAMALARI

Özge ERGİN¹,¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, Yapı Programı, İstanbul, Türkiye
ozgergin88@gmail.com ORCID: 0000-0003-4446-6825Z. Canan GİRGIN²²Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye
zcgirgin@yildiz.edu.tr ORCID: 0000-0003-1985-448X

GELİŞ TARİHİ / RECEIVED DATE: 04.05.2019 KABUL TARİHİ / ACCEPTED DATE: 24.12.2019

Özet

Günümüzde; küresel ısınmanın ve fosil yakıt kullanımının azaltılması, enerjinin etkin kullanımı gibi zorlu hedeflerle yüzleşilmektedir. Bu bakımdan çevre koşullarına uyum sağlayan, duyarlı cephe sistemlerinin geliştirilmesi de önem kazanmıştır. Dinamik bina tasarımı ile enerji performansı optimize edilebildiğinden, "Uyarlanabilir Bina Cepheleri" gibi yenilikçi kavramlar yakın gelecekte çok önemli rol oynayacaktır. Uyarlanabilir cephe sistemleri performansına katkı sağlayan en önemli faktörlerden biri de akıllı ve çok fonksiyonlu malzeme etkisidir. Sözkonusu malzemeler, çevre koşullarına karşı özgün davranış biçimleri ile adaptasyona katkı sağlarlar. Akıllı malzemeler günümüzde yirmiden fazla grup altında sınıflandırılmaktadır, mimarlık alanında kullanımı ise birkaç malzeme grubu dışında hala araştırma aşamasındadır. Bu araştırma, şekil ve form değiştiren akıllı malzeme grubunda yer alan Şekil Hafızalı Alaşımın (SHA), uyarlanabilir cephe sistemlerine yönelik muhtemel uygulamaları üzerine odaklanmıştır. Çalışma kapsamında SHA'nın özgün davranışı; yapıya entegrasyon, cephe uyarlama güncel araştırmalar ve öncü uygulama örnekleri ile desteklenerek irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı, Yenilikçi, Şekil Hafıza Alaşım, Uyarlanabilir cephe

NEW APPROACHES TO SHAPE MEMORY ALLOYS IN ADAPTIVE FACADE SYSTEMS**Abstract**

Today; its is confronted with global warming and the reduction of fossil fuel use, and the efficient use of energy. In this respect, the development of sensitive façade systems, which adapt to environmental conditions, has gained importance. Dynamic behavior of a building can optimize the energy performance so innovative concepts such as Adaptive Building Facades will play a very important role in the near future. One of the most important factors contributing to the performance of adaptive façade systems is the smart and multifunctional materials. Some smart materials may adapt to environmental conditions with their distinctive behaviors. They are classified under more than twenty groups, and their utilization in architecture is still under research except for a few material groups. This research consists of addressing the possible applications of "Shape Memory Alloys (SMA)" in adaptive façade systems in the group of smart materials changing shape and form. In this study, the original behavior of SMA, integration to façade system, prototype examples in facade adaptation are focused.

Keywords: Smart, Innovative, Shape Memory Alloys, Adaptive Façade

1. GİRİŞ

Uyarlanabilir (adaptif) mimari sistemler; mekanlar arasındaki fiziksel ayırıcının geçici performans gerekliliklerine yanıt olarak; işlev, özellik veya davranışın değiştirilebildiği sürdürülebilir dinamik sistemlerdir. Amaç, mekanik sistemlere olan ihtiyacı azaltarak enerji tasarrufu sağlamaktır. Uyarlanabilir cephe, performans gereksinimleri ve sınır şartlarındaki değişimlere, zaman içinde tekrar tekrar ve tersine yanıt verebilmelidir. Şekil değiştiren malzemeler, bu değişime katkı sağlayabilecek akıllı malzemeler içerisinde yer alır, tetikleyici uyarılarına göre sınıflandırılabilir. Bu çalışmanın konusu olan Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA), sıcaklık değişimi uyarını ile faz değişimi gösteren *termostraktif* akıllı malzemeler (Addington ve Schodek, 2005) grubunda yer alır.

ŞHA'ların düşük aktivasyon enerjisi gereksinimi ve değişen koşullara doğrudan cevap verebilme yeteneği, onları uyarlanabilir mimari alanında da gelecek vaad eden yapı bileşenleri haline getirmektedir. Atomik örgü yapının faz dönüşümü, farklı elektrik ve mekanik karakteristikler ortaya çıkarır. Algılama, aktivasyon ve kontrol işlevleri olan ŞHA'lar, hareket etme kabiliyeti ile günümüz uyarlanabilir cephe sistemi bileşenlerine alternatif olabilecektir. Bu çalışmada, uyarlanabilir mimari sistemlerde; ŞHA'ların kullanım amaçları ve güncel örnekleri üzerine odaklanılmaktadır.

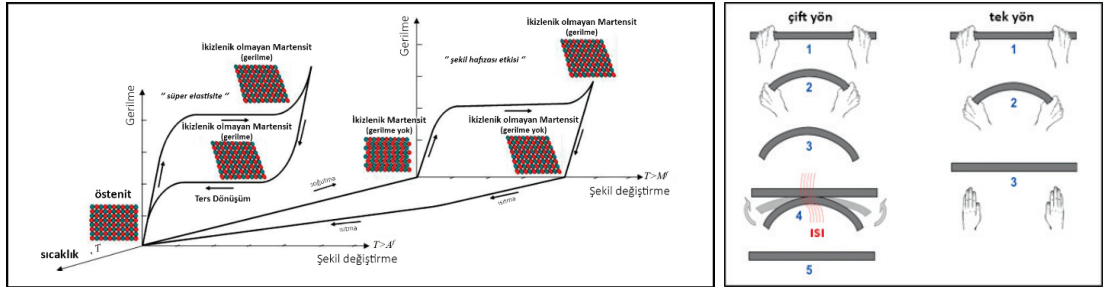
2. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

2.1. Tarihsel Gelişim

Adens Martens tarafından 1890'larda çelikte martensitin keşfi, gelecekteki şekil hafızalı alaşımların geliştirilmesi yönünde atılmış önemli bir adımdır (Gamal ve Mowafy, 2018). İlk şekil hafıza etkisi 1930'larda Au-Cd alaşımında gözlenmiş olsa da asıl önemli gelişme 1962'de, Buehler ve Wang'ın, Ni-Ti (*Nitinol*) alaşımı ile faz dönüşümü ve buna bağlı şekil hafızası etkisini bulması olmuştur. İleriki yıllarda şekil hafızalı yeni alaşım sistemleri de geliştirilmiştir ve araştırmalar devam etmektedir. ŞHA; günümüzde, bükülebilir gözlük çerçeveleri, vücut ısısı ile doğru boyut ve şekilde genişleyen sıkıştırılmış formda tıbbi stentler, bilgisayarlardan diskleri çıkaran uyarıcılar gibi günlük uygulamalarda kullanılmaktadır.

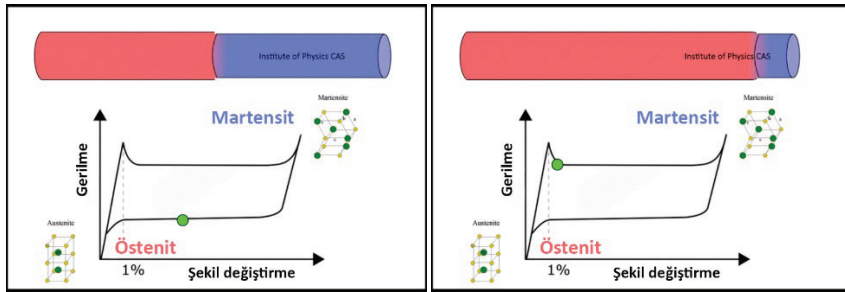
2.2. Teknik Özellikler

ŞHA, farklı sıcaklık düzeylerinde farklı kristal fazlarda bulunabilir. Yüksek sıcaklıkta *östenit* fazda, düşük sıcaklıkta *martensit* fazda bulunur. Malzeme; *östenit* fazda iken kuvvetli, sert ve kübik yapıda; *martensit* fazda iken yumuşak, sünek ve rombik yapıdadır (Şekil 1). ŞHA, şekil hafızası ve süper elastisite özelliğine sahiptir. Şekil hafızası etkisi, alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarına kadar ısıtıldığında ilk formlarına (*östenit* faz) dönebilme özelliğidir. Süper elastisite ise üzerine uygulanan yük kalktıktan sonra orjinal formuna geri dönme özelliğidir (Fiorito ve diğerleri, 2006). ŞHA, iki farklı hareket türüne sahip olabilir. Malzemenin sadece ısıtılarak *östenit* faza geçmesi tek yönlü, ısıtma ile *östenit* faza geçiş, tekrar soğutma ile *martensit* faza geçiş yapması ve bu iki şekil arasında ileri geri kayarak hareket etmesi çift yönlüdür.



(a)

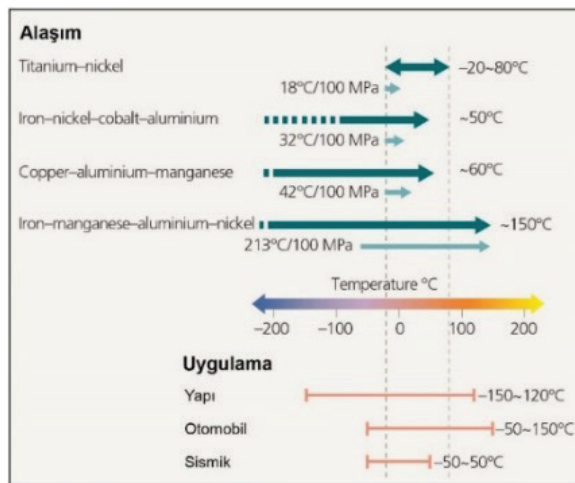
(b)



(c)

Şekil 1. (a) Faz Dönüşümü/ süper elastikyet- şekil hafızası etkisi (Seo ve diğerleri, 2015), (b) Şekil Hafıza alışılmı hareket türleri (Fedelich, 2016), (c) Gerilme-şekil değişimi grafiği [1]

Farklı ŞHA tiplerinin, farklı dönüşüm sıcaklık aralıkları nedeniyle uygulama alanları farklıdır (Şekil 2). Örneğin, Al-Mn ve Fe-Ni-Co-Al tipi ŞHA'nın çalışma sıcaklığı -50°C'den +50°C'ye geniş bir aralığı kapsar, yapılar da sismik güçlendirme uygulamaları için uygundur (Chang ve Araki, 2016).



Şekil 2. Polikristalli süperelastik alaşımların çalışma sıcaklığı-uygulama alanı ilişkisi (Omori ve diğerleri, 2011)

En yaygın ŞHA'lar; yüksek geri kazanılabilir şekil değiştirme düzeyi (~%8), 500 MPa üzeri çekme dayanımı, yüksek biyo-uyumluluğu ve yüksek korozyon dayanımı ile Ni-Ti (*Nitinol*) alaşımlarıdır. Yüksek maliyeti¹ nedeniyle de tel veya Nitinol'un martensit ve ostenit fazdaki teknik büyüklükleri Tablo 1'de verilmiştir.

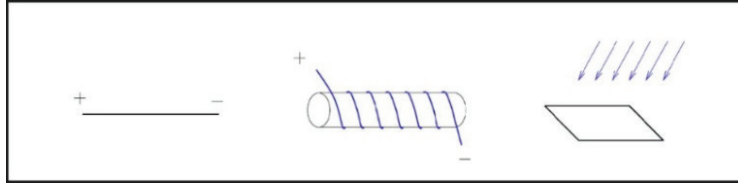
Tablo 1. Nitinol Telin Teknik Özellikleri (Jun, 2004; Toptaş ve diğerleri,2008)

Özellik	Değer	
Erime sıcaklığı (°C)	1300	
Yoğunluk (g/cm ³)	6.45	
Elektrik direnci (micro-ohm*cm)	Östenit	100
	Martenzit	72
Isıl genleşme (°C)	Östenit	11*10 ⁻⁶
	Martenzit	6,6*10 ⁻⁶
Isıl iletkenlik (W/cm*°C)	Östenit	0.18
	Martenzit	0.85
Elastik modül (GPa)	Östenit	75 - 83
	Martenzit	28 - 41
Akma dayanımı (MPa)	Östenit	195 - 690
	Martenzit	70 - 140
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	754 - 960	
Dönüşüm sıcaklığı (°C)	(-100) – (+110)	
Şekil hafıza şekildeğiştirmesi (%)	Maks. 8.5%	

Temel olarak, ŞHA üç farklı yöntemle ısıtılabilir (Şekil 3).

- Elektrik akımı geçirmek: yalnızca küçük çaplı bir ŞHA teli veya yay kullanıldığında uygulanabilir, avantajı basit olmasıdır.
- ŞHA elemanı etrafına sarılmış yüksek dirençli bir tel veya bant içinden elektrik akımı geçirmek: ŞHA çubukları veya tüpleri için kullanılabilir.
- ŞHA elemanı termal radyasyona maruz bırakmak: Ek ısıtma sistemi gerektirmeyen yöntemin en büyük dezavantajı esnek olmasıdır, yapıyı geri çekmek çok zor olabilir.

¹ Türkiye'de tel formulu Nitinol'un 1 m'si IPN 300 profilinin 1 m si ile benzer maliyettedir (~120 TL/m)



Şekil 3. Isıtma metotları; Bir akımın içinden geçmek, Harici ısıtma teli ile, Termal radyasyon (Huang, 1998)

3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN UYARLANABİLİR CEPHEDE KULLANIMI

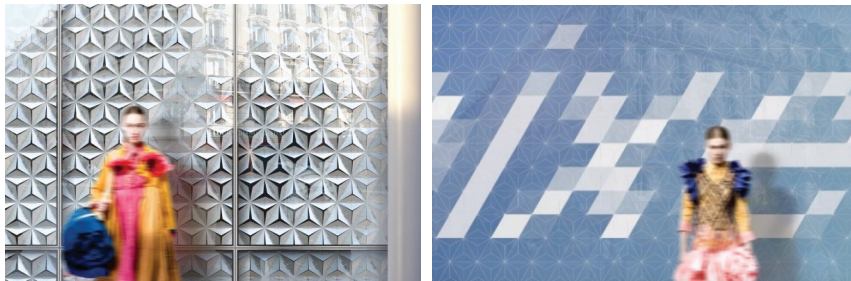
Uyarlanabilir cepheler; birçok malzeme, bileşen ve sistemlerden oluşmaktadır. ŞHA'nın uyarlanabilir cephe tasarımındaki öncü uygulamaları, yepyeni bir bina tasarımı ve kullanımı paradigmasına yol açmıştır. Düşük aktivasyon enerjisi ve değişen koşullara doğrudan cevap verebilme yetenekleri, onları uyarlanabilir yapı bileşeni konusunda tercih edilebilir hale getirmektedir.

3.1 Şekil Hafızalı Alaşım Kullanılan Öncü Uygulamalar

Bu bölümde, ŞHA kullanılmış öncü cephe uygulamalarının prototipleri incelenecektir.

ÖRNEK 1: *PixelSkin02*²

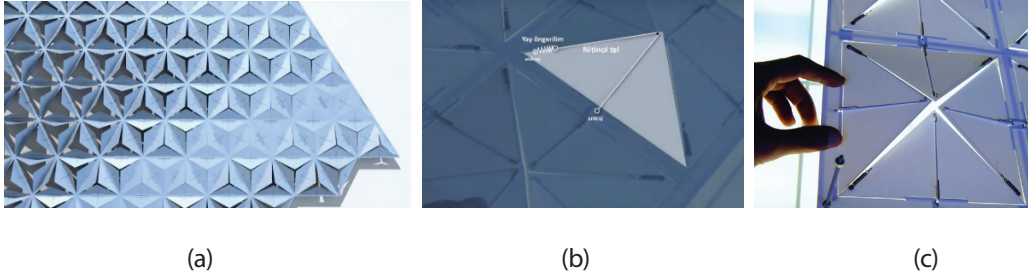
PixelSkin02, güncel mimari yüzeylerde günışığı kontrolü ve tabela kullanımı arasındaki çatışmaya bir cevap olarak, aydınlatma entegrasyonu ve gün ışığı kontrolünü gerçek zamanlı iletişim araçları ile sağlayan uyarlanabilir, interaktif ve elektrografik bir yüzeydir. Yüzey, elektromekanik olarak, düşük çözünürlüklü görüntüler ve videolar üreten saydam bir görsel alan oluşturur (Şekil 4).



Şekil 4. PixelSkin02 elektrografik cephe görüntüsü [2][3]

Her piksel karosu, 200mA ŞHA tellerinin aktive ettiği dört adet üçgen panelden oluşur. Çoklu Kontrol Tekniği, hareketli desenler ve görüntüler oluşturmak için piksel-karo koleksiyonunun kontrolünü sağlar (Şekil 5). Yüzeye gömülü mikrodenetleyici konsollar; her panelin açılma düzeyini, saniyede yirmi kez, tamamen açık veya kapalı durum arasında, 255 ayrı konumda düzenler.

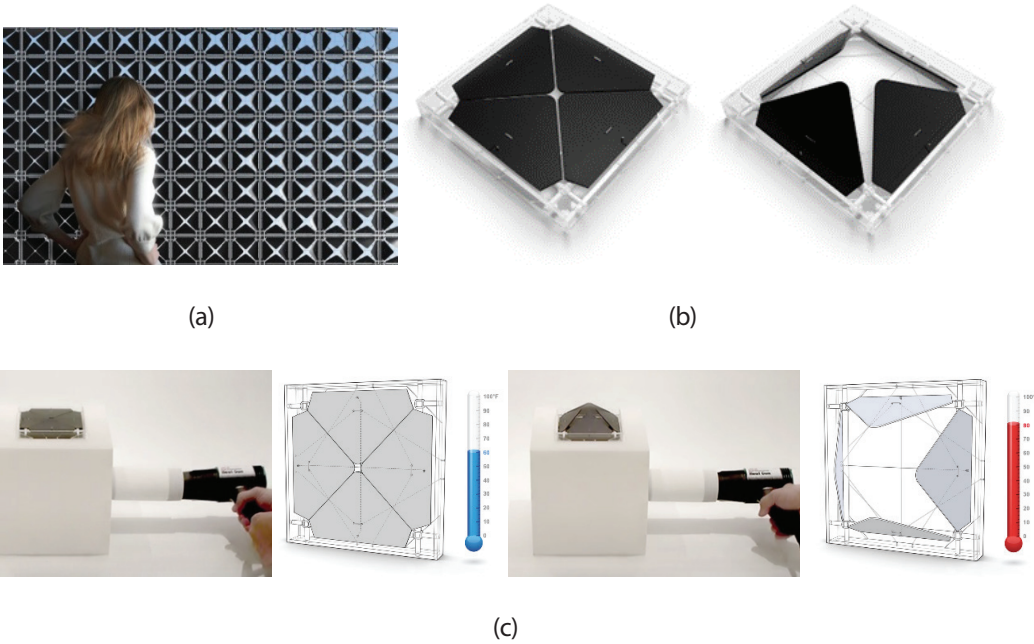
² GCU Glasgow'daki Akıllı Bina Laboratuvarı Baş Organizatörü O. Void'in yaratıcısı olduğu PixelSkin01, 2006 yılında S.Anshuman tarafından *PixelSkin02* adı altında geliştirilmiştir.



Şekil 5. (a) Çoklu kontrol, (b) sıcaklık farkına göre çalışma prensibi, (c) prototip [4]

ÖRNEK 2: *The Air Flower*

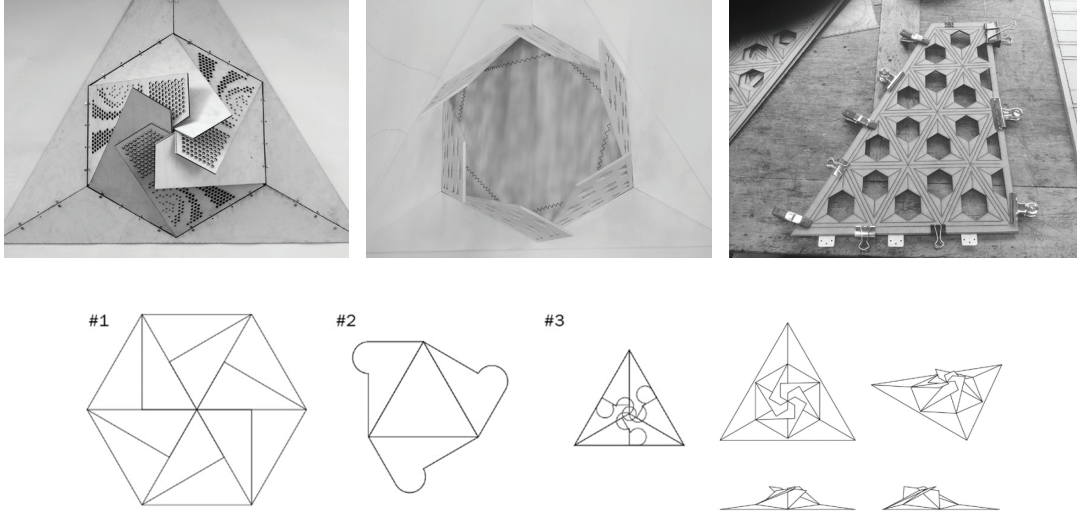
LIFT mimarlık tarafından sunulmuş *The Air Flower* projesinin amacı, güç kaynağına gerek duymadan, iç ve dış hava akışını sağlayarak, iç ortam kalitesini dengede tutmaktır. Sarı çiğdem çiçeğinin doğadaki davranışından esinlenilmiş olan, ŞHA telleri vasıtası ile ısı açıdan aktif bir havalandırma sistemidir. Prototipin sıcaklığı bir ısı tabancası ile 65°C'ye getirilir, bu etki tellerin kısalması ve panellerin çiçek gibi açılmasına neden olur (Şekil 6). Sıcaklığın azalması ile teller genleşmeye başlar ve her paneli yavaşça kapalı konumuna geri çeker.



Şekil 6. (a) Çift veya tek cidarlı cephe sistemleri için *The Air Flower*, (b) Prototip, (c) Artan sıcaklık ile ŞHA tellerin kısalarak panelin açılması deneyi [5]

ÖRNEK 3: TUB Projesi

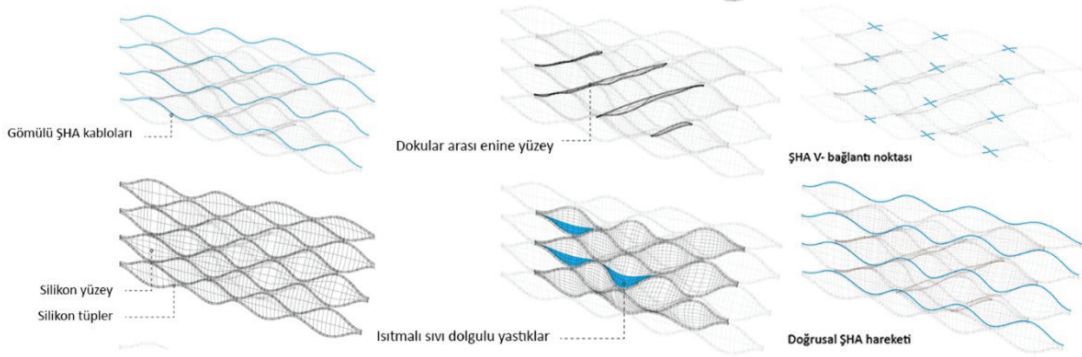
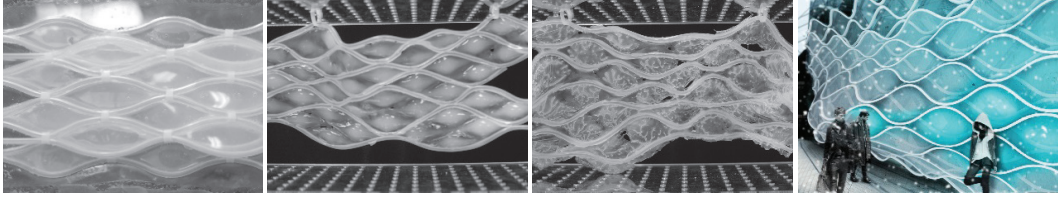
Victor Li ve arkadaşları tarafından, 2016'da *TUB* projesi ile ŞHA'lar kullanılarak, uyarlanabilir cephe sistemleri için bir gölgeleme sistemi prototipi sunulmuştur. Prototip, ŞHA'ların cephe sistemlerinde kullanımına yönelik, ilham kaynağı olması amacıyla geliştirilmiştir. Tasarım formunda, paket katlama yöntemlerinden esinlenilmiştir. Açıklıklar altı kanattan oluşur, art arda her bir kanat birbirlerine ŞHA telleri ile bağlıdır (Şekil 7). Ticari uygulama için, hafif metal veya biyoplastik malzeme kullanımı önerilmiştir.



Şekil 7. TUB modül, yüzey prototipleri ve tasarım aşaması [6]

ÖRNEK 4: Iconic SKIN

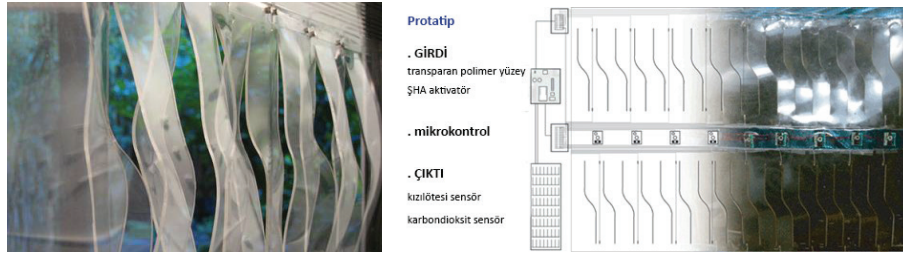
Iconic SKIN, mekânsal modülasyon ve çevresel uyarılara cevap verebilen uyarlanabilir bir kinetik yüzeyin küçük ölçekli prototipidir. Hafif ve kinetik ağ yüzeyi, elektrik akımı altında şeklini değiştiren gömülü ŞHA kafesi etrafında düzenlenir. Tel ağı, kas benzeri hareketler ile yüzey dönüşümlerini kolaylaştırır. Tel ağı etrafında geliştirilen malzeme sisteminin sürekli bileşik yapısı içinde; kalınlığı, rijitliği ve geçirgenliği değişkendir. Uyarıcıların kafes boyunca stratejik yerleşimi ile, yüzey eğilip bükülerek biçim değiştirir (Şekil 8).



Şekil 8. Hareketin hızı, derecesi ve yüzeyin rijitliği ile şeffaflığındaki değişimler [7]

ÖRNEK 5: Living Glass

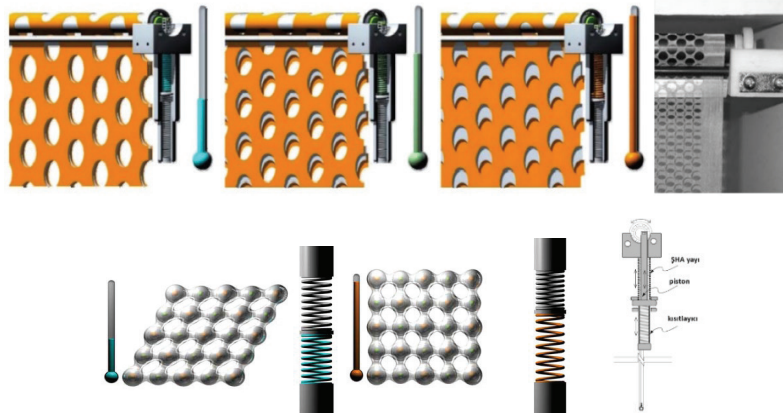
Living Glass projesi, elastik ŞHA'ların hareketi ile iç ortamdaki CO₂ seviyesinin kontrolü amacıyla S. Yang ve D.Benjamin tarafından 2005 yılında geliştirilmiştir. Proje formu solungaçtan ilham alınarak tasarlanmıştır, ŞHA tellerinin arası polimer yüzey ile kaplanmıştır. CO₂ seviyesi arttığında elektriksel uyarı ile ŞHA telleri kısalır ve temiz havanın içeri akmasını sağlayacak yarıklar açılır (Şekil 9); sistem, CO₂ seviyesi dış ortama eşitlendiğinde normal haline getirilir.



Şekil 9. Hafif duyarlı cephe prototipinin çalışma biçimi [8]

ÖRNEK 6: SmartScreen

M.Decker ve P.Yeadon tarafından 2009'da tasarlanan *SmartScreen*, iç hava sıcaklığındaki değişiklikler sonucu otomatik olarak devreye giren bir gölgeleme tasarımıdır. Yenilikçi bir tasarım olan R-Faz ŞHA yayı, yalnızca iç ortam ısındaki değişiklikler ile etkinleşir, bunun için herhangi bir güç kaynağı gerekli değildir.³ Sistemde hem algılayıcı hem de motor işlevi olan R-Faz ŞHA yayının devrede olduğu sıcaklık aralığı 21-26°C'dir (Khoo ve diğerleri, 2011). Ortam sıcaklığının 21°C'nin altına veya 26°C'nin üstüne çıkması durumunda, R-Faz ŞHA'nın hareketi sınırlayıcılar ile engellenir (Şekil 10).

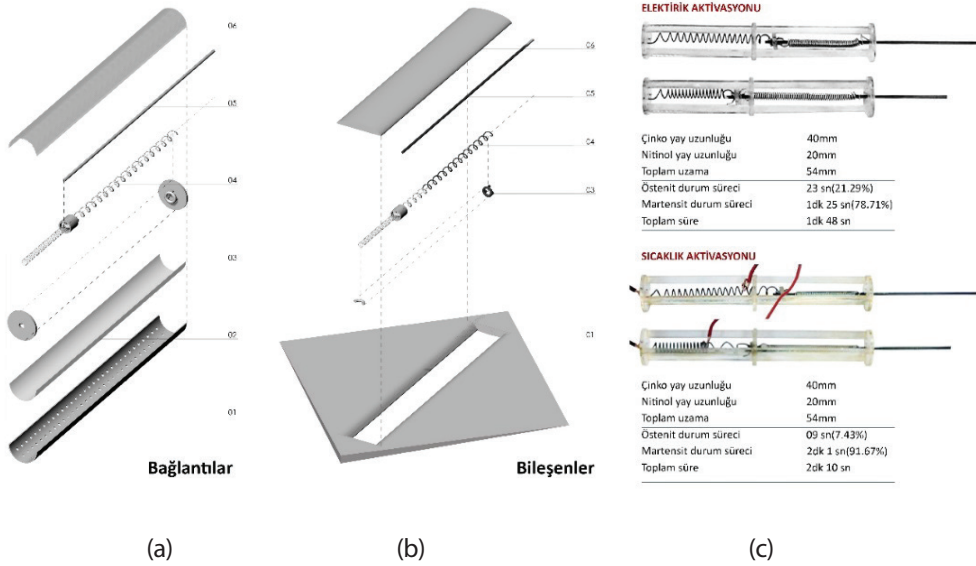


Şekil 10. SmartScreen sisteminde R-Faz ŞHA, sıcaklık değişiminin etkisi ve sınırlayıcılar (Decker ve diğerleri, 2008)

ÖRNEK 7: SELF Adaptive Membrane

Kendinden uyarlamalı *SELF Adaptive Membrane*, 2015 yılında N. Gonzalez ve S.More tarafından, aktif performans ile pasif mimarlık stratejileri arasındaki boşluğu birleştiren, aynı zamanda sürdürülebilir bir geleceği şekillendirmek için geliştirilmiş yeni bir uyarlanabilir sistemdir (Şekil 11). Projenin amacı, mevcut mekanik iklimlendirme sistemlerine ihtiyaç göstermeyen, güneş ışınımına karşı cephe geometrisini değiştirebilen pasif bir sistem geliştirmektir. Sistemde, elektrik ile aktive edilen ŞHA Nitinol, çinko ile birlikte kullanarak pasif bir kinetik motor sistemi geliştirilmiştir. Çinko yayının dış kuvveti Nitinol'u kısaltır ve genişletir, prototip "*SmartScreen*" projesinden ilham alınarak tasarlanmıştır.

3 % 7 şekil değiştirme düzeyinin mümkün olduğu elektrik ile aktive olan klasik ŞHA'dan farklı olarak, burada şekil değiştirme % 1 ile sınırlıdır.






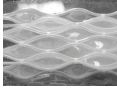


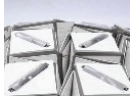

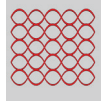





Şekil 11. (a) SELF Adaptive Membrane prototip ve hareket sınırlayıcı bağlantı noktası, (b) 1-havalandırma için delikli boru, 2-yansıtıcı yüzey, 3-yaylar için bağlantı noktaları, 4-Nitinol ve çinko yayları, 5-mobil kol, 6-Doğrusal fresnel lens, (c) Sıcaklık ve elektrik etkisine göre Nitinol ve çinko yayları uzunluk ve uzama süreleri [9][10]

2 cm'lik Nitinol yaylar içeren kinetik 16 Nitinol eklemlili dört eklem kümesi eş zamanlı olarak modeli yeniden şekillendirir. Katlanır mozaik geometri içinde eklemler, sadece hacmi genişletmekle kalmaz, aynı zamanda yüzey alanını da genişletir. Sistem; hafif, yükleri eşit şekilde aktaracak ve diğer elemanlara birleşim ihtiyacını en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır.

3.2. Prototipler Üzerinden ŞHA İşlev Sınıflandırması

Uyarlanabilir cephelerin ayrıntılı bir sınıflandırma şekli, Loonen ve diğerleri (2015) tarafından yapılmıştır. Bu bölümde Bölüm 3.1'de incelenen öncü uygulamalar çerçevesinde Tablo 2'de bir sınıflandırma yapılmıştır; ŞHA'nın kullanım amacı/amaçları, uygulama şekli ve aktivasyon için kullanılan yöntem bir matris düzeninde incelenmiştir. ŞHA kullanımındaki temel amaç, uyarlanabilir cepheler için güç kaynaklarına olan ihtiyacı azaltmaktır. *Smartscreen* öncü uygulamasında, ŞHA'nın özgün hareketlerini elektriksiz çalışma koşullarında sağlamak da hedeflenmiştir.

Tablo 2. ŞHA kullanımının amacı, kullanım alanı ve aktivasyon biçimi [(Juaristi ve diğerleri, 2018), (Huang, 1998), (Loonen ve diğerleri, 2015)]den yararlanılarak

	Pixelskin02	The Air Flower	TUB	Iconic SKiN	Living Glass	SmartScreen	SELF Adaptive Membrn
							
ŞHA Kullanım Amacı							
Termal kontrol	Gölgeleme cihazı		Gölgeleme cihazı				Gölgeleme cihazı
İç ortam kalitesi		Hava akış kapakçıkları			CO ₂ Reaktif hava damperi	Termoreaktif cihaz	
Görsel perform.	Dijital yüzey						
Akustik konfor				Hafif sistem hareketi	Hafif sistem hareketi		Esnek sistem hareketi
Enerji üretimi							
Kullanıcı kontrolü				Kullanıcı aktivasyonu			Elektrik aktivasyonu
ŞHA ile Oluşan Form							
Cephe yüzeyi elemanı							
Birleşim elemanı	(t)*			(t)	(t)		
Aktivatör elemanı							
		(t)	(y)			(y)	(y)
ŞHA Isıtma Yöntemi							
Akım geçerek	-	-	-	+	+	-	+
Harici ısıtma	+	+	+	-	+	-	-
Termal radyasyon	+	+	+	-	-	+	+

*Tel form: (t), Yay form: (y)

4.SONUÇ

Bu çalışmada incelenen konulardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Uyarlanabilir cephe sistemleri, diğer bir deyişle dinamik cephe uygulamaları, özellikle sıcak iklim bölgelerinde gittikçe önem kazanmaktadır. Küresel ısınmanın da gittikçe artış eğilimi gösterdiği ve fosil yakıta dayalı enerji kaynaklarında tasarruf gerekliliği düşünüldüğünde, söz konusu sistemlerde yenilikçi fikirlere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, güç kaynaklarına min. düzeyde ihtiyaç gösteren veya ihtiyaç göstermeyen ŞHA'lar gelecek için önemli bir potansiyel taşımaktadır.
- ŞHA'lar, cepheden kontrollü temiz hava alımından, ışık kontrolü veya değişken formlarda cephe tasarımına kadar farklı alanlarda uygulama potansiyeli taşımaktadır. Bu amaca yönelik olarak ilk mimari prototipler gösteri ölçeğinde olsa da dikkat çekmektedir.
- ŞHA'ların algılama, aktivatör ve kontrol etme işlevleri vardır. Uyarlanabilir cephe sistemi bileşenlerine alternatif olabilecektir.
- Teknolojik gelişmelere bağlı olarak, önümüzdeki yıllarda ŞHA'lar ile birlikte farklı akıllı malzemeler de kullanılarak, binaların enerji verimliliğine önemli katkılarının ekonomik biçimde sağlanabileceği öngörülebilir.

KAYNAKÇA

Addington, M., Schodek, D. 2005. "Smart Materials and Technologies for Architecture and Design Professions", *Elsevier Ltd.*, Amsterdam, 241p.

Buehler, W., Wang, F. 1967. "A Summary of Recent Research on the Nitinol Alloys and Their Potential Application in Ocean Engineering", *Ocean Engng. Vol. 1. Pergamon Press 1968*, Great Britain, 105-120

Chang, W.S., Araki, Y. 2016. "Use of Shape-Memory Alloys in Construction: A Critical Review", *ICE Proc. Civil Engineering*, 87-92.

Decker, M., Yeadon, P. 2008. "SmartScreen: Controlling Solar Heat Gain with Shape Memory Systems", *Boston Society of Architects Design Research Grants*.

Fedelich, N. 2016. "Characterization of shape memory alloys by DSC and DMA, Part 1: DSC analysis", *the METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom 40*.

Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., Ranzi, G. 2006. "Shape Morphing Solar Shadings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews 55*, 870-872.

Gamal, Y., Mowafy, O. 2018. "Shape Memory Alloy Shading Systems: An Optimization Model", *4th Building Simulation and Optimization Conference*, Cambridge, UK, 488-499.

Huang, W. 1998. "Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures", *University of Cambridge Department of Engineering*, 2-20.

Juaristi, M., Barrio, A.M., Knaack, U., Acebo, T.G. 2018. "Smart and Multifunctional Materials and their possible application in façade systems", *Journal of Facade Design and Engineering*, Vol 6. No 3. (FAÇADE 2018-Adaptive) 19-24.

Jun, H.Y. 2004. "Development Of a Fuel-Powered Compact SMA" *Actuator System*.

Khoo, C.K., Burry, J.R., Burry, M. 2011. "Soft Responsive Kinetic System: An Elastic Transformable Architectural Skin for Climatic and Visual Control", *Acadia 2011_Proceedings*, 335-337.

Loonen, R.C.G.M., Rico-Martinez, J.M., Favoino, F, Brzezicki, M., Menezo, C., La Ferla, G., Aelenei, L. 2015. "Design for Façade Adaptability- Towards a Unified and Systematic Characterization", *In Proc. 10th Energy Forum- Advanced Building Skins*, Bern, Switzerland, 1274-1284.

Omori, T., Ando, K., Okano, M., Xu, X., Tanaka, Y., Ohnuma, I., Kainuma, R., Ishida, K. 2011. "Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys", *Science* 333(6038), 68-71.

Seo, J., Kim, C.Y., Hu, J.W. 2015. "Pilot Study for Investigating the Cyclic Behavior of Slit Damper Systems with Recentering Shape Memory Alloy (SMA) Bending Bars Used for Seismic Restrainers", *Applied Sciences*, 187-208.

Toptaş, E., Akkuş, N., Genç, G. 2008, "Şekil Hafızalı Alaşımli Telin Elektrik Akımı Altındaki davranışının deneysel incelemesi", *Proc. 12th International Materials Symposium (IMSP'2008), October 15--17, 2008, Denizli, Turkey*.

İNTERNET SİTELERİ

[1] <https://www.fzu.cz/en/novinky/scientists-from-the-czech-academy-of-sciences-explore-the-nature-of-the-localized>

[2] <http://transmaterial.net/pixelskin02/>

[3] http://beyond.iaac.net/?page_id=1790

[4] <https://www.youtube.com/watch?v=rWlKe5GWhq8>

[5] <http://www.liftarchitects.com/air-flower/>

[6] <http://tactile-architecture.com/make-material-city-shading-device/>

[7] <https://integratedesign.org/2012/07/01/skin-soft-kinetic-network/>

[8] <https://inhabitat.com/carbon-dioxide-sensing-living-glass/>

[9] http://www.iaacblog.com/programs/self-adaptive-membrane-_a-passive-kinetic-system/

[10] <http://materiability.com/portfolio/self-adaptive-membrane/>

