

PROSTOR

28 [2020] 1 [59]

ZNANSTVENI ČASOPIS ZA ARHITEKTURU I URBANIZAM  
A SCHOLARLY JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

SVEUČILIŠTE  
U ZAGREBU,  
ARHITEKTONSKI  
FAKULTET  
UNIVERSITY  
OF ZAGREB,  
FACULTY OF  
ARCHITECTURE

ISSN 1330-0652  
[https://doi.org/  
10.31522/p](https://doi.org/10.31522/p)  
UDK | UDC 71/72  
CODEN PORREV  
28 [2020] 1 [59]  
1-200  
1-6 [2020]

POSEBNI OTISAK / SEPARAT | OFFPRINT

ZNANSTVENI PRILOZI | SCIENTIFIC PAPERS

142-153 **DAVOR ANDRIĆ**

SUVREMENE PNEUMATSKE  
KONSTRUKCIJE U ARHITEKTURI  
KRITIČKI PREGLED I ANALIZA

PREGLEDNI ZNANSTVENI ČLANAK  
[https://doi.org/10.31522/p.28.1\(59\).9](https://doi.org/10.31522/p.28.1(59).9)  
UDK 72.00:696.5 "20"

CONTEMPORARY PNEUMATIC STRUCTURES  
IN ARCHITECTURE

CRITICAL REVIEW AND ANALYSIS

SCIENTIFIC SUBJECT REVIEW  
[https://doi.org/10.31522/p.28.1\(59\).9](https://doi.org/10.31522/p.28.1(59).9)  
UDK 72.00:696.5 "20"



Af



**DAVOR ANDRIĆ**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
 ARHITEKTONSKI FAKULTET  
 HR – 10000 ZAGREB, KAČIĆEVA 26  
 dandric@arhitekt.hr

UNIVERSITY OF ZAGREB  
 FACULTY OF ARCHITECTURE  
 HR – 10000 ZAGREB, KAČIĆEVA 26  
 dandric@arhitekt.hr



## PREGLEDNI ZNAJSTVENI ČLANAK

[https://doi.org/10.31522/p.28.1\(59\).9](https://doi.org/10.31522/p.28.1(59).9)

UDK 72.00:696.5 "20"

TEHNIČKE ZNAJSTVI / ARHITEKTURA I URBANIZAM

2.01.03. – ARHITEKTONSKE KONSTRUKCIJE, FIZIKA ZGRADE,  
 MATERIJALI I TEHNOLOGIJA GRAĐENJA

ČLANAK PRIMLJEN / PRIHVACEN: 7. 5. 2020. / 23. 6. 2020.

## SCIENTIFIC SUBJECT REVIEW

[https://doi.org/10.31522/p.28.1\(59\).9](https://doi.org/10.31522/p.28.1(59).9)

UDC 72.00:696.5 "20"

TECHNICAL SCIENCES / ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

2.01.03. – ARCHITECTURAL STRUCTURES, BUILDING PHYSICS,  
 MATERIALS AND BUILDING TECHNOLOGY

ARTICLE RECEIVED / ACCEPTED: 7. 5. 2020. / 23. 6. 2020.

# SUVREMENE PNEUMATSKE KONSTRUKCIJE U ARHITEKTURI

## KRITIČKI PREGLED I ANALIZA

# CONTEMPORARY PNEUMATIC STRUCTURES IN ARCHITECTURE

## CRITICAL REVIEW AND ANALYSIS

PNEUMATSKE KONSTRUKCIJE  
 SUVREMENE KONSTRUKCIJE  
 LAGANE KONSTRUKCIJE  
 PNEUBOTIKA  
 BIOMIMETIKA

PNEUMATIC STRUCTURES  
 CONTEMPORARY STRUCTURES  
 LIGHT STRUCTURES  
 PNEUBOTICS  
 BIOMIMETICS

Rad donosi pregled razvoja pneumatskih konstrukcija kao specifičnoga konstrukcijskog politipa. Pneumatske konstrukcije započele su razvoj s prvim balonima na topli zrak u 18. st., tijekom Drugoga svjetskog rata koriste se u vojne svrhe, nakon čega slijedi i njihova civilna upotreba. Krajem 20. i početkom 21. st., s ubrzanim razvojem suvremenih projektantskih tehnika i računalnog upravljanja, dolazi do udruživanja robotske komponente s pneumatskom konstrukcijom u nastajanju nove kategorije pneubotskih konstrukcija.

This paper presents the evolution of pneumatic structures as a specific structural polytype. The development of pneumatic structures began with the first hot air balloons in the 18<sup>th</sup> century. During World War II they were used for military purposes and afterwards for civilian purposes. Rapid development of contemporary design techniques and computer control in the late 20<sup>th</sup> and the early 21<sup>st</sup> century led to a combination of a robotic component and a pneumatic structure resulting in a new type of pneubotic structures.

UVOD<sup>1</sup>

## INTRODUCTION

Razvoj pneumatskih konstrukcija – danas posebno aktualnih i izazovnih – započinje krajem 18. stoljeca, kada su braca Montgolfier uspješno konstruirala prvi balon na topli zrak, a Jacques A. C. Charles prvi balon punjen vodikom.<sup>2</sup> Tijekom i neposredno nakon Drugoga svjetskog rata primitivne pneumatske konstrukcije koristile su se u vojne svrhe<sup>3</sup>, nakon čega kreće i njihova civilna primjena. Zračni brodovi bili su inspiracija i za vizionarske prijedloge kakav je bio *Putujući grad* koji je 1932. godine osmislio Josip Seissel – grad za 50.000 stanovnika kao pet zgrada obješenih o zračni brod stalno spojen na izvor plina na tlu.<sup>4</sup> Od drugih ranih istraživanja u arhitekturi ističu se vizionarski prijedlog kupole za New York Buckminstera Fullera iz 1962. i projekt Arktičkoga grada Otta Freia iz 1970. godine.<sup>5</sup> Šezdesetih godina 20. stoljeca pojavljuju se grupe arhitekata i umjetnika koje se od okoštalošći tadašnjeg urbanizma i formalizma kasnomodernističke arhitekture okreću potencijalima pneumatskih konstrukcija kao obliku izražavanja proaktivne društvenosti, privremenosti, mobilnosti i svega suprotnog od statičnosti i inertnosti tadašnjeg društva i arhitekture<sup>6</sup>, što će popularizirati ovu vrstu konstrukcija i dovesti do vrhunca interesa na Svjetskoj izložbi u Osaki 1970. godine.<sup>7</sup> Na izložbi su se, između ostalih, isticala tri paviljona s pneumatskom konstrukcijom: 1) Američki paviljon autora Davisa Brodyja, Davida Geigera i Waltera Birda kao krvna membranska konstrukcija nošena zra-

kom povišenog tlaka u interijeru; 2) paviljon tvrtke Fuji autora Yutake Murate konstruiran kao niz povezanih tlačnih pneumatskih lukova bez dodatnog tlaka u interijeru i 3) *Plutajuće kazalište*, također projekt Yutake Murate, s konstrukcijom od tlačnih pneumatskih lukova stabiliziranih membranom pokrova i negativnim tlakom zraka<sup>8</sup> (Sl. 2.).

Nakon procvata u šezdesetim i sedamdesetim godinama 20. stoljeca slijedi relativno sporiji razvoj pneumatskih konstrukcija<sup>9</sup>, dok na prijelazu iz 20. u 21. stoljeće pneumatske konstrukcije doživljavaju ponovni zamah. Taj recentni razvoj bitno je potaknula i unaprijeditelja pojava novih tehničkih i umjetnih materijala posebno projektiranih mehaničkih, fizikalnih i drugih svojstava<sup>10</sup>, kao i razvoj tehnička računalnog projektiranja i proizvodnje.<sup>11</sup>

**Cilj, metoda, materijali** – Cilj je ovoga rada kroz pregled recentnih tipova pneumatskih konstrukcija pokazati da one predstavljaju poseban konstrukcijski politip visoke prilagodljivosti i biomimetičkog potencijala. Termin *konstrukcijski politip* odnosi se na postojanje višestrukih tipova konstrukcija unutar jedne vrste konstrukcije, a *biomimetički potencijal* predstavlja kapacitet ove vrste konstrukcija da u nekom svom aspektu (konstrukcijskom logikom, mehanizmom ili funkcijom) oponaša logiku, mehanizam ili funkciju živih bića. Kroz izabrane primjere bit će prikazana i istaknuta njihova glavna svojstva i mogućnosti primjene koji svjedoče o visokoj prilagodljivosti i fleksibilnosti. Primjeri su tematski provučeni kroz poglavlja koja izlažu neka od glavnih polja razvoja suvremenih pneumatskih konstrukcija, što sve zajedno potkrepljuje tezu o konstrukcijskom politipu i biomimetičkom potencijalu.

<sup>1</sup> Rad se temelji na dijelu istraživanja provedenom prilikom izrade doktorske disertacije autora, završene 2017. godine na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom profesora Karin Serman i Josipa Galica te naknadnim istraživanjima autora.

<sup>2</sup> Potonji su se razvili u zračne brodove tipa Zeppelin.

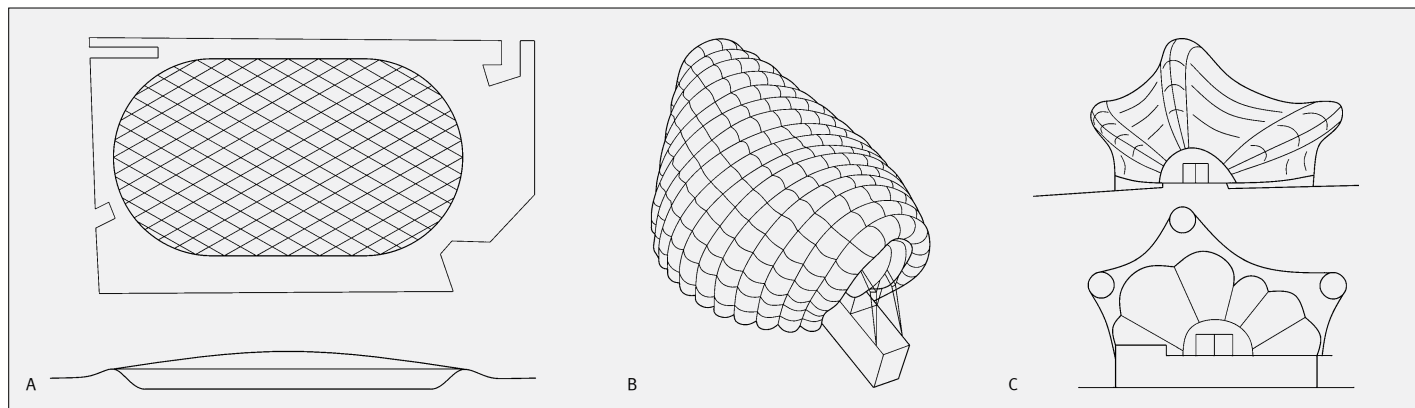
<sup>3</sup> Razni lažni kamioni i tenkovi na napuhavanje bili su postavljeni na polja diljem Britanije, dalje od strateskih objekata, kao 'mamci' za njemačka bombardiranja, a pneumatske kupole, takozvane *radome* (od engleskih riječi *radar+dome*), bile su korištene za zaštitu radarske opreme od atmosferskih prilika. [CHI, PAULETTI, 2005.]

<sup>4</sup> Prijedlog je bio upućen Međunarodnom odboru za rješavanje problema moderne arhitekture [CIRPAC] kao prilog pripremi Četvrtoga kongresa CIAM-a. [MIKIĆ, 2010.]

<sup>5</sup> Frei je 1967. u Stuttgartu organizirao prvi tematski znanstveni skup o pneumatskim konstrukcijama IASS Pneumatic Colloquium.

<sup>6</sup> Među istaknutima jesu grupe Utopie, Archigram i Ant Farm. Privlačne su kvalitete pneumatskih konstrukcija: lakoca, prenosivost, privremenost, financijska pristupačnost, hibridnost i dr. kao odlike suprotne formalizmima kasnomodernističkih arhitektonskih manifestacija, a slične senzibilitetu *Pop Art* pokreta – za mase, jeftino, potrošno, mladenacki, glamurno i sl.

<sup>7</sup> Razlozi za izbor ovoga tipa konstrukcija na spomenutoj izložbi bili su slaba nosivost tla i visoka seizmička aktivnost područja na kojem se izložba održavala.



## SUVRERENE PNEUMATSKJE KONSTRUKCIJE U ARHITEKTURI

### CONTEMPORARY PNEUMATIC STRUCTURES IN ARCHITECTURE

U razdoblju obilježenom neodlučnošću, željom za neinvazivnim i reverzibilnim načinima gradnje, gradnjom koja ne ostavlja tragove, organiziranjem privremenih javnih i društvenih okupljanja na mjestima minimalne tehničke opremljenosti, željom za boravkom na teško dostupnim mjestima i slično – ponovno se intenzivira primjena pneumatskih konstrukcija upravo za lagane, prijenosne i privremene konstrukcije. Želja za privremenim korištenjem prostora, kao i razne krizne situacije, potom istancaniji osjećaj za utjecaj na okoliš te pojava suvremenih projektantskih tehnika i brzog prototipiziranja doveli su do ubrzanja razvoja pneumatskih konstrukcija. Koncerti i festivali također su za korištenje pneumatskih konstrukcija koje dobivaju i složenije oblike, a organiziranja privremenih događaja zahvalne su prilike za konstrukcije od jeftinijih i potrošnih materijala koji se mogu lako podići, premjestiti i popraviti.

Polja primjene tako su se od prvotnih – transportnog, vojnog i civilnog, dodatno razgranala u transportno, infrastrukturno, krizno, ekspedicijsko, civilno, energetska i druga,

8 CHI, PAULETTI, 2005.

9 Ovo razdoblje obilježava ponajprije primjena pneumatskih konstrukcija za krovove velikih raspona, a razvijaju se i pneumatski jastuci kao lagana alternativa staklenim ovojnicama.

10 To su u prvom redu razne folije i tekstili s poboljšanim svojstvima (visoka mehanička otpornost, refleksivnost toplinskog i ultraljubičastog zračenja, otpornost na probijanje, mogućnosti samozacjeljenja materijala i dr.).

11 To su softveri za simulaciju velikih deformacija i neelastičnog ponašanja materijala, za pronalazjenje optimalnog oblika membrana i membrana pod tlakom te softveri za računalno numeričko upravljanje ponajprije strojevima za rezanje membrana i folija.

12 Raumlabor

13 Casa Bubble

što prati i pojačani razvoj novih vrsta i tipova samih konstrukcija te laganijih, manje stalnih građevina. Uobičajena je temeljna podjela pneumatskih konstrukcija na membrane nošene zrakom u prostoru, na napuhane konstrukcije (membrane pod tlakom) i na vlačno stabilizirane napuhane konstrukcije. Primjeri membrana nošenih zrakom u prostoru najčešći su, kao što je, primjerice, koncertna dvorana *Ark Nova Arate Isozakija* i *Anisha Kapoora* projektirana kao privremena konstrukcija složene geometrije nepravilnog torusa. U istu vrstu pripada i *Das Küchenmonument*, mobilna limena skulptura koja sadrži spremište membrane i stroj za punjenje prostora zrakom, koji ujedno služi i kao vjetrobran (*airlock*). Napuhavanjem membrane, pneumatskom se konstrukcijom formira prostor privremene javne namjene (domjenci, konferencije, kino, koncerti, ples, spavaonice, sauna i dr.). Instalacija *Space Buster* sličan je koncept, samo u ovome slučaju kao pretkomora za ulaz i napuhavanje služi kombi vozilo koje se lakše može premjestiti od limene skulpture pa tako i lakše služiti istraživanju kvaliteta i mogućnosti korištenja raznih javnih prostora u New Yorku.<sup>12</sup> Pojava trenda *glampinga* također je pridonijela popularizaciji pneumatskih konstrukcija, ponajprije rješavanjem hotelskih soba u divljini, kao što je *Casa Bubble* Frédérica Richarda i Pierre-Stéphana Dumasa. Ove hotelske sobe – kao kućice u neizgrađenom okolišu – dolaze u nekoliko varijanti kao prozirne ili djelomično prozirne, ovisno o zahtjevima privatnosti i zaštite od elemenata okoliša. Sastoje se od dvije prostorije: 1) glavne sobe – većeg prostora za boravak i 2) zračne pretkomore – *airlock* – kroz koji se ulazi u sobu, a koji sustavom dvostrukih vrata sprječava nagao gubitak zraka iz prostora<sup>13</sup> (Sl. 3.A). Ovo je glavna karakteristika ovoga tipa konstrukcija – posebno oblikovani ulaz što sprječava gubitak zraka koji nosi konstrukciju.

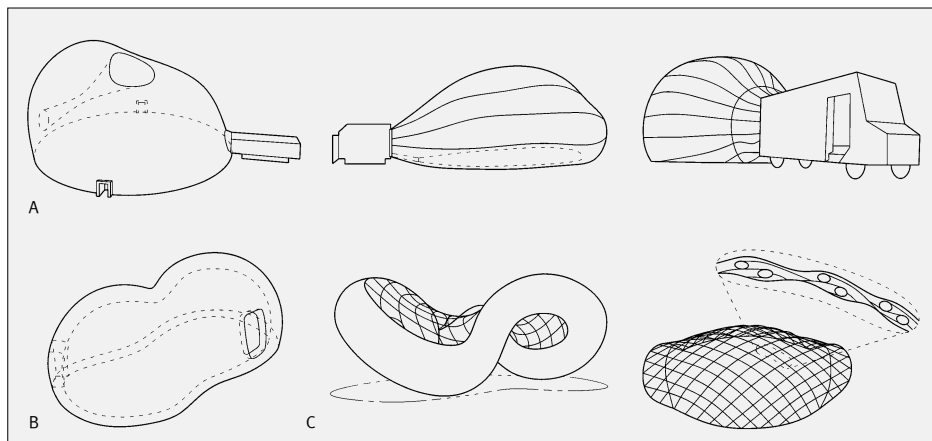
Primjer drugoga tipa pneumatskih konstrukcija, dakle napuhanih konstrukcija odnosno membrana pod tlakom, jest *Kućica za čaj*

SL. 2. TRI OSNOVNA TIPA PNEUMATSKIH KONSTRUKCIJA NA EXPO-U 1970. U OSAKI:

- A) MEMBRANA NOŠENA TLAKOM ZRAKA U INTERIJERU: AMERICKI PAVILJON  
 B) KONSTRUKCIJA NOŠENA TLAKOM ZRAKA UNUTAR MEMBRANE (SNOP CJEVASTIH LUKOVA): FUJI PAVILJON  
 C) VLAČNO STABILIZIRANA PNEUMATSKA KONSTRUKCIJA: PAVILJON PLUTAJUĆE KAZALISTE

FIG. 2 THREE BASIC TYPES OF PNEUMATIC STRUCTURES ON THE 1970 OSAKA EXPO:

- A) MEMBRANE CARRIED BY AIR PRESSURE IN THE INTERIOR: AMERICAN PAVILION  
 B) CONSTRUCTION CARRIED BY AIR PRESSURE INSIDE THE MEMBRANE (BUNDLE OF TUBULAR ARCHES): FUJI PAVILION  
 C) TENSION-STABILIZED PNEUMATIC STRUCTURE: PAVILION FLOATING THEATER



SL. 3. SUVREMENE INAČICE OSNOVNA TRI TIP A PNEUMATSKIH KONSTRUKCIJA:

- A) MEMBRANA NOŠENA ZRAKOM U INTERIJERU:  
ARK NOVA, DAS KÜCHENMONUMENT, SPACE BUSTER  
B) NAPUHANA KONSTRUKCIJA: KUCICA ZA ČAJ  
C) VLAČNO STABILIZIRANE NAPUHANE KONSTRUKCIJE:  
PEACE PAVILION I PLUSMINUS

FIG. 3 CONTEMPORARY VARIATIONS OF THREE BASIC TYPES OF PNEUMATIC STRUCTURES:

- A) MEMBRANE CARRIED BY AIR IN THE INTERIOR: ARK NOVA, DAS KÜCHENMONUMENT, SPACE BUSTER  
B) INFLATED STRUCTURE: LITTLE TEAHOUSE  
C) TENSION-STABILIZED INFLATED STRUCTURES: PEACE PAVILION AND PLUSMINUS

Kenga Kume (Sl. 3.B), projektirana za frankfurtski Muzej suvremene umjetnosti 2007. godine, koja je izvedena kao dvoslojna membrana pod tlakom. Zrak u interijeru normalnoga je atmosferskog tlaka, a kućica površine 20-ak m<sup>2</sup> može se grijati toplim zrakom koristeći dvostruku membranu kao radiator. Mobilnost i kinetičnost pneumatskih konstrukcija provlači se kroz primjere kratkotrajnih recentnih pneumatskih konstrukcija. Arhitekti MinSuk Cho i KiSu Park projektirali su 2008. godine pneumatsku konstrukciju *Air Forest* dužine 56,3 m, širine 25 m i visine 4 m. Trideset i pet stupova bilo je povezano prečkama u 9 šesterokutnih polja, a u bazama su imali zemljane utege, rasvjetu ili ventilatore za napuhavanje. Konstrukcija je bila vrlo podatna pa se na vjetru značajno njihala, a ugrađeni barometri mjerili su stanje tlaka u konstrukciji kako bi regulirali intenzitet napuhavanja, što predstavlja jednostavan oblik aktivno prilagodljive konstrukcije. Konstrukcija je korištena tjedan dana za razne društveno-umjetničke priredbe, kao i opću namjenu javnoga paviljona u gradskom parku u Denveru.<sup>14</sup>

Broj novih oblika i konstrukcijskih rješenja pneumatskih konstrukcija u posljednje se vrijeme intenzivno povećava, dijelom zahvaljujući i razvoju računalnog projektiranja i proizvodnje te simulacijskih programa i generativnih metoda.<sup>15</sup> Prvotni arhitektonski *blobovi* sada su zamijenjeni funkcionalno i logično projektiranim inovativnim oblicima mekih konstrukcija, pa tako i treći spomenuti uobičajeni tip – vlačno stabilizirane napuhane konstrukcije – dobiva svoje suvremene razrade i primjere. Ovdje je potrebno spomenuti da se vlačna stabilizacija obično pojavljuje u dvije varijante: 1) kao stabilizacija jednostrukom membranom i 2) stabilizacija (jednostrukom ili dvostrukom) membranom i vakuumiranjem. Potonja varijanta pritom graniči s jednom drugom vrstom konstrukcija – vakuumskim konstrukcijama. Primjer napuhane konstrukcije stabilizirane jednostrukom

vlačnom membranom jest *Peace Pavilion* u Cambridgeu iz 2013. pariškog ureda Atelier Zündel Cristea (Sl. 3.C). Konstrukciju površine 62 m<sup>2</sup> čini kontinuirana tlačna prostorno zakrivljena simetrična cijev koja je vlačnom membranom – pokrovom spregnuta u oblik proizasao iz mogućnosti suvremenih tehnika parametarskog projektiranja i strojne proizvodnje membranskih konstrukcija.<sup>16</sup> Isti ured projektirao je 2012. još jednu sličnu konstrukciju: pneumatski *Trampolin-most* preko Seine u Parizu (natjecajni projekt), koji je bio zamišljen kao niz od tri segmenta, svaki načinjen od savijene pneumatske cijevi koja je središnjom membranom napeta u oblik savijenog torusa. Primjer napuhane konstrukcije stabilizirane vakuumiranjem jest pneumatska mrežasta ljuska *PlusMinus*, konstrukcija nastala kao istraživački projekt studenata Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Stuttgartu i Instituta za lagane konstrukcije i konceptualno projektiranje<sup>17</sup> u suradnji s „Festo bioničkom mrežom za učenje”. Mrežasta ljuska od 34 napuhane cijevi promjera 5,5 cm, tlaka zraka 0,5-0,7 Ba, vakuumiranjem je stabilizirana između dviju membrana. Horizontalni potisak preuzima podna tekstilna membrana, a krajevi cijevi imaju prilagodljive spojeve tako da mogu zauzeti položaj pod bilo kojim potrebnim kutom u odnosu na podlogu. Konstrukcija koja natkriva površinu od 16,5×10,4 m u imenu daje do znanja da je riječ o konstrukciji „građenoj i pozitivnim i negativnim tlakom”.<sup>18</sup> Takva je konstrukcija izrazito vitka i lagana u odnosu na raspon i površinu koju natkriva.

## INOVATIVNE MOGUĆNOSTI PROJEKTIRANJA PNEUMATSKIH KONSTRUKCIJA

### INNOVATIVE POSSIBILITIES OF PNEUMATIC STRUCTURE DESIGN

Prethodno opisani (pod)tip napuhanih konstrukcija vlačno stabiliziranih vakuumiranjem između dviju membrana jest konstrukcija koja je ujedno i pneumatska i vakuumska pa je slična posebnom tipu konstrukcija, uvriježeno nazivanom vakuumski stabilizirane konstrukcije.<sup>19</sup> Takve konstrukcije – koje su puno rjeđa pojava od pneumatskih – jesu konstrukcije što sadrže rastresito ili nevezano punjenje koje se vakuumiranjem (unutar

<sup>14</sup> HYUN, 2008.

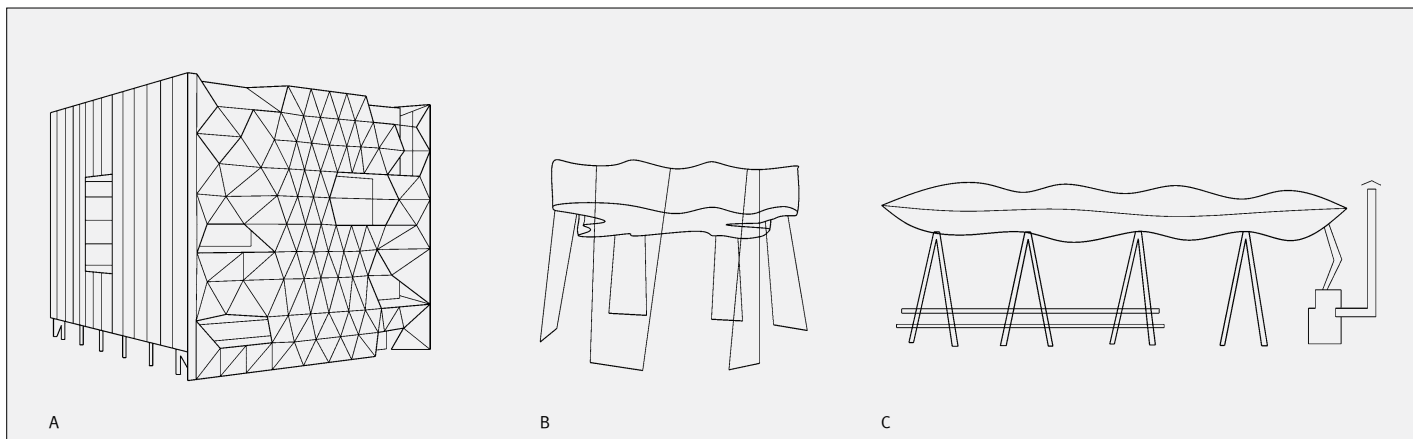
<sup>15</sup> Računala i softver donedavno nisu bili toliko dostupni i 'propusni' da bi omogućili aktivnu kontrolu mekih konstrukcijskih tijela uzivo, puno kompleksniju od kontrole tvrdih mehanizama.

<sup>16</sup> Peace Pavilion – AZC

<sup>17</sup> Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen [ITKE]

<sup>18</sup> PlusMinus – Pneumatic gridshell

<sup>19</sup> Moguće je susresti se i s drugim nazivima za ovaj tip konstrukcija, kao što su vakuumske konstrukcije, va-



membrane) stvrde u stabilan oblik. Ovakve su konstrukcije pogodne za oblikovanje laganih tvrdih konstrukcija s mogućnošću prilagodbe oblika. Pustanjem zraka u konstrukciju, punjenje ponovno postaje rastresito te ga se ponovnim vakuumiranjem može stvrdnuti u novi oblik.

Pneumatski jastuci – uobičajeno korišteni pri oblikovanju arhitektonskih ovojnica i pokriva – često se koriste za postizanje boljih energetskih svojstava građevina. Tako su dvostruki jastuci s mogućnošću različite napuhanosti pojedine komore postali često korišteno rješenje za projektiranje prilagodljivih ovojnica zgrada kojima je moguća regulacija toplinskih dobitaka, odnosno količine propuštanja prirodnoga svjetla prema trenutnim potrebama. To se postiže postavljanjem dvaju preklapajućih mutnih, neprozirnih ili reflektirajućih uzoraka na srednjoj i jednoj vanjskoj stijenci dvostrukog jastuka. Napuhavanjem jednoga i ispuhavanjem drugoga jastuka dva se uzorka preklape ili razmaknu, čime se svjetlo blokira ili propušta. Primjer takve inovativne primjene jest zgrada *Media-TIC* ureda Cloud 9 u Barceloni (Sl. 4.A), koja ima dva tipa pneumatske ovojnice na dvama pročeljima. Na jugoistočnom pročelju ovojnica se sastoji od trokutastih dvostrukih jastuka s preklapajućim uzorkom, dok se na jugozapadnom pročelju nalaze duguljasti vertikalni pneumatski jastuci u koje se, po potrebi, upuhuje smjesa umjetne magle na bazi dušika, čime se regulira popodnevna insolacija

interijera.<sup>20</sup> Osim zrakom, pneumatske konstrukcije tako mogu biti punjene drugim fluidima, kao što su neki elementarni plinovi, razne vrste umjetne magle i dima te dr. Američki arhitektonski ured Quastic projektirao je privremenu nadstrešnicu za okupljanja na otvorenomu *Floatastic* (Sl. 4.B). To je pneumatski jastuk nepravilne konture punjen helijem koji je obodnim zastorima sidren u tlo. Konstrukcija nije horizontalno stabilizirana pa se na vjetru pomiče i naginje koliko joj to dopuštaju dužine zastora.<sup>21</sup> A privremeni paviljon galerije Serpentine u Londonu iz 2006. Rema Koolhaasa<sup>22</sup> imao je pneumatsku kupolu – balon koji se mogao podići u zrak ili povući nazad na paviljon, zatvarajući ga tako, ovisno o vremenskim prilikama i vrsti aktivnosti koja se u tom trenutku odvija. Još jedan primjer pneumatske konstrukcije koja nije punjena običnim zrakom jest prenosivi paviljon za izletnike *Krov koji ide u dim*<sup>23</sup> (Sl. 4.C). On se sastoji od zračnog jastuka punjenog toplim zrakom (otpadnom topline iz peći na drva) koji natkriva stolove s drvenim klupama te tako odozgo zrači toplinu na prostor za okupljanja na otvorenomu. Paviljon je nominiran za nizozemsku nagradu za dizajn 2012. godine.<sup>24</sup>

Dodavanje pneumatskih konstrukcija postojećim ovojnicama zgrada može biti priuštiv način poboljšanja energetskih svojstava zgrade, kao i povećanja volumena zgrade bez značajnog dodavanja težine na postojeću konstrukciju. Projekt *Shanghai Bubble Building* ureda 3GATTI Arch. Studio primjer je takvog pristupa renoviranju i poboljšanja energetskih svojstava postojeće uredske zgrade. Ovojnica se napuhuje dok u zgradi borave i rade ljudi, a ispuhuje se tijekom noći. Uz poboljšanje fizike zgrade postignut je i dodatan vizualni efekt ovojnice kao dinamičke skulpture (s dnevnim i noćnim režimom ponašanja) te nove vizualne prepoznatljivosti, dok zračni prostor između postojeće zgrade i dodane ovojnice pridonosi povećanju energetske učinkovitosti građevine.<sup>25</sup>

SL. 4. PNEUMATSKE KONSTRUKCIJE PUNJENE DRUGIM MEDIJEM:

- A) PNEUMATSKI JASTUCI PRILAGODLJIVO PUNJENI UMJETNOM MAGLOM: *MEDIA-TIC* BUILDING  
 B) KONSTRUKCIJA PUNJENA HELIJEM: *Floatastic*  
 C) KONSTRUKCIJA PUNJENA TOPLIM ZRAKOM: *KROV KOJI IDE U DIM*

FIG. 4 PNEUMATIC STRUCTURES FILLED WITH OTHER MEDIUM:

- A) PNEUMATIC PILLOWS ADAPTIVELY FILLED WITH ARTIFICIAL MIST: *MEDIA-TIC* BUILDING  
 B) STRUCTURE FILLED WITH HELIUM: *Floatastic*  
 C) STRUCTURE FILLED WITH HOT AIR: ROOF THAT GOES UP IN SMOKE

kuumski prednapete konstrukcije ili u engleskom jeziku *vacuumatics* analogno riječi *pneumatics*.

<sup>20</sup> Postignuto je smanjenje solarnog faktora 'g' s 0,35 na 0,19, a cijena ovoga sustava iznosila je 5% ukupne cijene građnje zgrade. [Cloud 9]

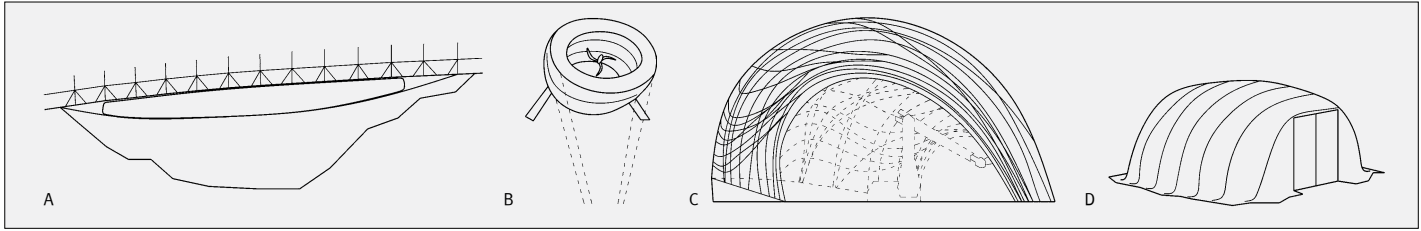
<sup>21</sup> Quastic

<sup>22</sup> Balmond Studio

<sup>23</sup> Izvorni naziv na nizozemskom glasi: *Het dak dat opgaat in rook*.

<sup>24</sup> Overtreders W

<sup>25</sup> 3Gatti



SL. 5. INOVATIVNE PRIMJENE PNEUMATSKIH KONSTRUKCIJA: A) SKIJAŠKI MOST U LANSLEVLARDU KAO TENSIRAITY GREDA, B) LEBDECA VJETROELEKTRANA, C) ICD-ITKE 2014-15 PAVILJON, D) COMBAT CONCRETE

FIG. 5 INNOVATIVE APPLICATIONS OF PNEUMATIC STRUCTURES: A) SKI BRIDGE IN LANSLEVLARD AS A TENSIRAITY BEAM, B) FLOATING WIND PLANT, C) ICD-ITKE 2014-15 PAVILION, D) COMBAT CONCRETE

Poseban tip konstrukcija koji se odnedavno intenzivnije istražuje i koristi, a koje je patentirao i popularizirao Mauro Pedretti, jesu takozvane *tensairity* konstrukcije.<sup>26</sup> To su kompozitne konstrukcije koje se sastoje od vitkih tlačnih elemenata stabiliziranih pneumatskim jastukom kao zračnom tlačnom ispunom i uzadima u vlačnoj zoni.<sup>27</sup> Često se koriste kao lagani gredni nosači velikih raspona, kao što je krov garaže u Montrauxu u Švicarskoj ureda Luscher Architects raspona 28 m iz 2004. ili skijaški most u Lanslevillardu u Francuskoj ureda Barbeyer Architect raspona 52 m iz 2005. (Sl. 5.A), no mogu se oblikovati i u stupove, kupole i dr.<sup>28</sup>

Suvremena istraživanja pneumatskih i pneumatski prilagodljivih konstrukcija uključuju i razna alternativna tehnička rješenja u drugim tehničkim poljima, kao što su primjerice: (prilagodljiva) krila letjelica, lebdeće vjetroelektrane (Sl. 5.B), samopodizne konstrukcije, pneumatski okviri, lukovi i modularne kupole, prilagodljivi bukobrani, nasipi i dr. Vazno je istaknuti istraživanja mogućnosti primjene pneumatskih konstrukcija u sustavima protu-potresne izolacije poput onoga japanske tvrtke Air Danshin, koji se aktivnom kontrolom napuhanosti pneumatskih elemenata ugrađenih između temelja i konstrukcije kuće optimalno prilagođava djelovanju potresa prema vrsti i intenzitetu (80-ak kuća u Japanu bilo je opremljeno ovim sustavom u svrhu testiranja).<sup>29</sup>

Još jedna inovativna primjena pneumatskih konstrukcija jest mogućnost korištenja pneumatske konstrukcije kao oplata za gradnju. Primjerice, robotski proizvedena biomimetička kupola *Istraživačkog paviljona 2014-15* u Stuttgartu Instituta ICD-ITKE<sup>30</sup> (Sl. 5.C) nastala je nanošenjem ugljičnih vlakana na unutarnju stranu napuhane kupole od ETFE folije. Privremena skloništa Combat Concrete tvrtke ACSG<sup>31</sup> (Sl. 5.D) – sustav su brze gradnje privremenih građevina koja se dopremaju kao paketi unutar kojih je pneumatski jastuk koji, napuhan, služi kao oplata za podizanje tekstil-betonske ljuške. Nakon stvrdnjavanja ljuške pneumatik se na mjestu vrata izrezuje, dok ostatak membrane ostaje kao unutarnji završni sloj, čime se osigurava higijenska razina korištenja, primjerice za poljske bolnice, laboratorije i dr.

## KRIZNE SITUACIJE, EKSPEDICIJE I SVEMIRSKA ISTRAŽIVANJA

### CRITICAL SITUATIONS, EXPEDITIONS, AND SPACE EXPLORATION

Pneumatske konstrukcije često se koriste u razne ekspedicijske svrhe na Zemlji i u svemiru. Primjer zemaljske upotrebe tako su konstrukcije *Perec* i *Splav* autora Gillesa Eberolta Sarla za pokretne istraživačke laboratorije (Sl. 6.A). Sastoje se od pneumatskih cijevi od PVC-a povezanih mrežom, na kojima je moguće podići šatore za boravak ili objesiti istraživačke kapsule i opremu. To su svojevrsne platforme velike površine<sup>32</sup> koje se zračnim brodom dopremaju i polaze na vrh krošnji prašumskih stabala. Istraživači su tako podignuti visoko iznad zone predatora, zmija i drugih životinja te smješteni u osunčanu zonu iznad mračnoga i vlažnoga pojasa krošnja s puno letećih insekata.<sup>33</sup>

U ovu grupu može se uvrstiti i koncept *Passing Cloud* studija Tiago Barros (Sl. 6.B). Zamisljen kao projekt velikoga transportnog 'oblaka', ideja je to koja preispituje konstrukciju zračnog broda ili balona na topli zrak, i to, u ovom slučaju, tako da putnike smješta na gornju stranu balona – plohu inače izloženu atmosferskim prilikama.<sup>34</sup>

Arturo Vittori i Andreas Vogler 2004. godine za Europsku su svemirsku agenciju projektirali *Desert Seal*, pustinjsko sklonište – šator od aluminiziranog platna prevučenog preko skeleta od pneumatskih cijevi. Šator na vrhu ima ventilator koji hvata hladniji zrak iznad

<sup>26</sup> Pojam *tensairity* sličan je pojmu *tensegrity*. Prvi je nastao spajanjem riječi *tension*, *air* i *integrity* te predstavlja vrstu pneumatskih konstrukcija, dok je drugi nastao spajanjem riječi *tension* i *integrity* a predstavlja vlačno stabilizirane konstrukcije obično konstruirane od stapova i uzadi, bez pneumatskih jastuka.

<sup>27</sup> Pneumatski jastuk ovdje služi kao tlačna ispunna ekvivalentnoga rešetkastog nosača.

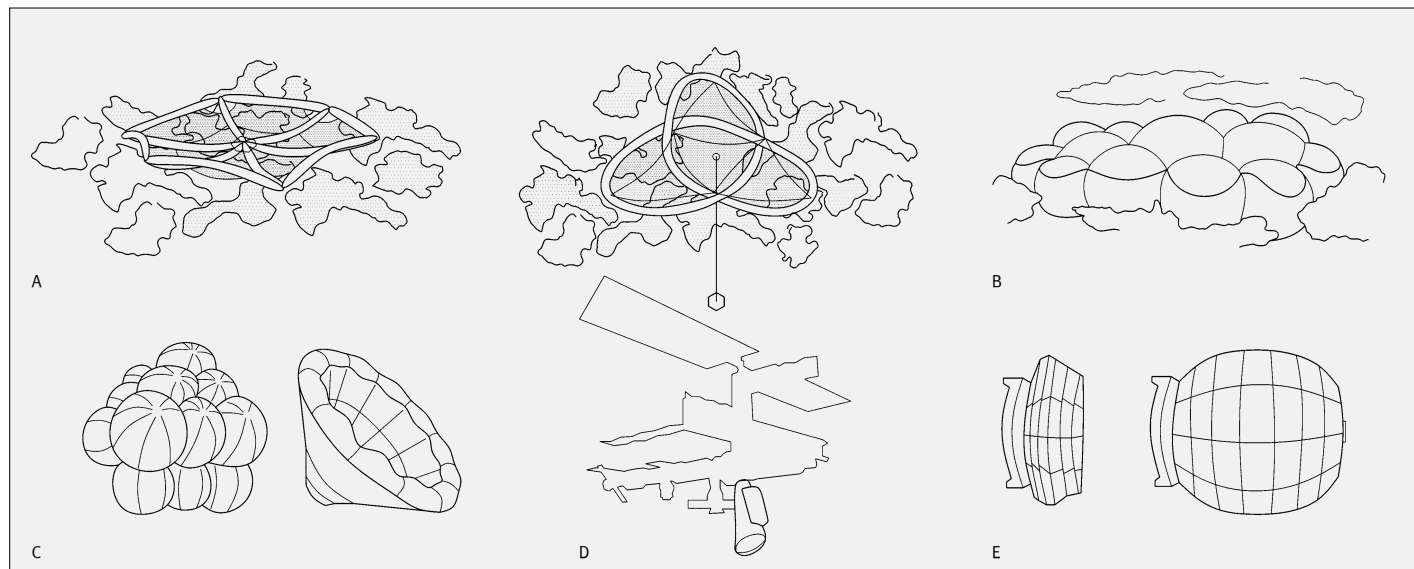
<sup>28</sup> Tensairity Soultions

<sup>29</sup> Air Danshin

<sup>30</sup> Institut for Computational Design and Construction [Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung] / Institute of Building Structures and Structural Design [Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen]

<sup>31</sup> ACSG [Amplified Concrete Solutions Global] američka je tvrtka koju su osnovali ratni veterani, a koja proizvodi





tla i upuhuje ga u nizi prostor satora, cineci ga tako ugodnim za boravak.<sup>35</sup> Konstrukcije s pneumatskim cijevima postale su uobicajne kod raznih suvremenih tipova satora, od malih osobnih za kampiranje pa do vecih, npr. poljske bolnice i druge privremene gradevine.

Pojava novih visokotehnoloskih materijala, kao sto su *kevlar*, *dyneema* i drugi materijali koji pružaju dovoljnu sigurnost koristenja u uvjetima vakuuma, intenzivnoga suncanog zracenja, mikrometeora, temperaturnih promjena i dr., reaktualizirala je primjenu pneumatskih konstrukcija u svemirskim istrazivanjima. Ispituje se primjenjivost pneumatskih konstrukcija pri projektiranju raznih lualica za druge planete, orbitalnih postaja, istrazivackih kolonija, pokretnih laboratorija i dr. Dok jedan dio ideja moze djelovati odvec vizionarski, jedan je dio njih realno izvediv ili se vec primjenjuje. Zracni jastuci i naprave za pomoc pri slijetanju<sup>36</sup> (Sl. 6.C), razne antene i zrcala s pneumatskom konstrukcijom i dr., stalno su prisutni u svemirsko-istrazivackim

projektima i studijama. Istrazuju se mogucnosti primjene mekih tekstilnih pneumatskih kotaca umjesto cesto koristenih metalnih za svemirska vozila, konstruiranja raznih balona za primjenu na drugim planetima i satelitima s razlicitim tipovima atmosfere i dr.<sup>37</sup> Mala tezina i kompaktnost pogodni za transport u svemir prednosti su pneumatskih konstrukcija pri ovoj vrsti istrazivanja. Projekt razvijajucega pneumatskog modula *Space Loggia* Petre Gruber za Medunarodnu svemirsku postaju (Sl. 6.D) predvida konstruiranje ovojnice s velikim prozirnim površinama kao alternativu limenim modulima s malim oknima za promatranje Zemlje i svemira.<sup>38</sup>

Prosirive ovojnice za istrazivacke laboratorije u svemiru montirane na kruti endoskelet, koji cini jezgru s opremom, zbog male tezine i mogucnosti 'pakiranja' u format lansirne rakete za dopremu u svemir atraktivan su istrazivacki koncept. Prototip svemirske postaje hibridne konstrukcije – istrazivacki projekt NASA-ina svemirskog centra Johnson – predstavlja takvu viseetažnu svemirsku postaju kompaktnog volumena i oblika prilagodene gabaritima teretnog prostora vecine lansirnih raketa. Kada raketa dospje na cilj, opna isporucenog modula napuše se povecavajući volumen radno-istrazivackog prostora.<sup>39</sup> Prototip modula vec se devedesetih godina prosloga stoljeca konkretno ispitivao u velikim vakuumskim komorama simulirajuci svemirske uvjete, no NASA je 2000. odustala od daljnje razvoja ovoga prototipa nazvanog *TransHab*<sup>40</sup> te je njegov razvoj nastavila tvrtka Bigelow Aerospace, koja je uspješno lansirala dva takva modula *Genesis I* 2006. i *Genesis II* 2007. Ista je tvrtka na Medunarodnoj svemirskoj postaji instalirala i testirala pneumatski rastezljivi modul *BEAM* (Sl. 6.E).<sup>41</sup>

SL. 6. PNEUMATSKJE KONSTRUKCIJE ZA EKSPEDICIJE I SVEMIRSKA ISTRAZIVANJA: A) PEREC I SPLAV, B) PASSING CLOUD, C) UREDAJ ZA POMOC PRI SLIJETANJU NA MARS I UREDAJ ZA POVRAK U ATMOSFERU, D) SPACE LOGGIA, E) BEAM

FIG. 6 PNEUMATIC STRUCTURES FOR EXPEDITIONS AND SPACE EXPLORATION: A) SOLVIN BRETZEL AND CANOPY RAFT, B) PASSING CLOUD, C) DEVICE ASSISTING IN LANDING ON MARS AND DEVICE FOR RETURNING INTO ATMOSPHERE, D) SPACE LOGGIA, E) BEAM

visoko prenosive betonske infrastrukturne konstrukcije za izvanrednu i udaljenu primjenu.

32 Perc, primjerice, ima površinu od 400 m<sup>2</sup>.

33 Agence d'Architecture Gilles Ebersolt Sarl

34 Passing Cloud

35 Architecture and Vision

36 Sustav ublazavanja slijetanja robotskih lualica na Mars cini grozd zracnih jastuka koji se aktivira trenutak prije kontakta s površinom.

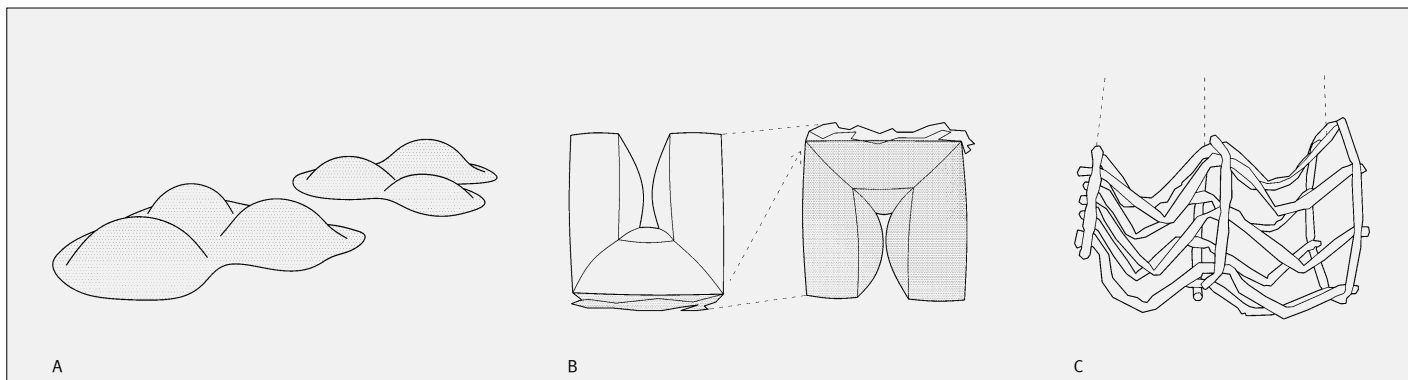
37 JONES, 2001.

38 GRUBER, IMHOF, 2007.

39 ADAMS, 2007.

40 The Space Review: Interview: TransHab developer William Schneider

41 Bigelow Expandable Activity Module, iako se pokazao uspješnim za boravak ljudi, trenutno se koristi za odlaganje opreme. [Bigelow Aerospace]



SL. 7. PNEUMATSKE UMJETNIČKE INSTALACIJE: A) WASTE LANDSCAPE, B) SNOWBALLING DOORWAY, C) INNER SPACE  
 FIG. 7 PNEUMATIC ART INSTALLATIONS: A) WASTE LANDSCAPE, B) SNOWBALLING DOORWAY, C) INNER SPACE

## PNEUMATSKE KONSTRUKCIJE U UMJETNOSTI PNEUMATIC STRUCTURES IN ART

Pneumatske konstrukcije zahvalno su polje za razvoj prilagodljivih i interaktivnih umjetničkih instalacija. Zbog male težine, mogućnosti kompaktnog spremanja i jednostavnog transporta, visokih oblikovnih i transformacijskih mogućnosti – pneumatske interaktivne instalacije često su medij umjetničkog izražavanja i istraživanja. Dio njih povezan je s arhitekturom i služi preispitivanju ljudsko-strojne interakcije. To su instalacije raznih mjerila – od pneumatskih terena / krajobraza preko arhitektonskih elemenata do mekih robota.

*Waste Landscape* Elise Morin i Clemence Eliard (Sl. 7.A) umjetnička je instalacija od recikliranih kompaktnih diskova na pneumatskim mjehurima velikih dimenzija koji podsjećaju na brežuljke – kao serija krajobraza koja može biti postavljena u razne prostore i za razne prigode. A Alex Schweder gradi prostore i barijere/prolaze pneumatskim skulpturama kojima mijenja mogućnosti korištenja i kretanja kroz prostor. Instalacija *Snowballing Doorway* (Sl. 7.B) jest dvostruki pneumatski jastuk koji se pretakanjem zraka iz jednoga jastuka u drugi transformira iz barijere u prolaz i obratno, a *Wall to Wall Floor to Ceiling* sastoji se od 12 velikih pneumatskih tijela (6 montiranih na pod i 6 na strop), koja se međusobno guraju i istiskuju oblikujući promjenjive prostore za kretanje i istraživanje.<sup>42</sup>

Jedan primjer zrakom pokretanih kinetičkih skulptura većega mjerila jesu skulpture nazvane *Strandbeest* autora Thea Jansena. Rijec je o više različitih pasivnih analognih robota pokretanih vjetrom koji su zamišljeni kao lutajuća stvorenja što se beskrajno mogu kretati pješčanim plazama. Opremljeni su primitivnim mehaničkim logičkim sklopovima koji im osiguravaju minimum refleksa za opstanak u nepredvidivim uvjetima okoline. Vjetar može direktno gurati skulpture ili pomicati krilca kojima se putem poluga i klipova komprimira zrak u plastične spremnike, koji dalje, putem mreže pneumatskih cjevčica, dolazi do logičkih i pokretackih elemenata skulpture.<sup>43</sup>

Chico MacMurtrie je umjetnik koji intenzivno koristi pneumatske konstrukcije u svojim interaktivnim instalacijama. Neke od njegovih poznatijih interaktivnih pneumatskih skulptura jesu: *Ptice* – jato pneumatskih ptica što počinju život s početnim uzorkom ponašanja koje se dalje u interakciji s posjetiteljima razvija do nepredvidivoga završetka, *Inner Space* (Sl. 7.C) i *Inflatable Architectural Body* kojima istražuje odnose između unutarnjeg i vanjskog, kao simbioze s izgrađenim okolišem i načine ekspresije pojedinih umjetnih bica i njihove interakcije s okolinom.<sup>44</sup>

Primjer propitkivanja mogućnosti hipotetske primjene aktivne robotske pneumatske konstrukcije velikog mjerila u prostoru posebnog statusa, u ovome slučaju arheološkog nalazišta, jest koncept rekonstrukcije sklopa rano-kršćanskoga groblja Manastirine u Solinu pokraj Splita, koji su u svome radu teorijski postavili autori Davor Andrić i Nataša Jaksic.<sup>45</sup> Primjena ovakvih mekih konstrukcija za dinamičko fizičko neinvazivno rekonstruiranje etapa razvoja arheološkog sklopa *in situ* nudi se kao materijalno opipljiva alternativa uobičajenim slikovnim, maketarskim ili VR rekonstrukcijama i zavrjeđuje daljnje istraživanje.

## PNEUBOTSKE KONSTRUKCIJE PNEUBOTIC STRUCTURES

Pneumatski aktivno prilagodljive konstrukcije (pneumatika+robotika) ubrzano se razvijaju zahvaljujući razvoju složenijih računalnih

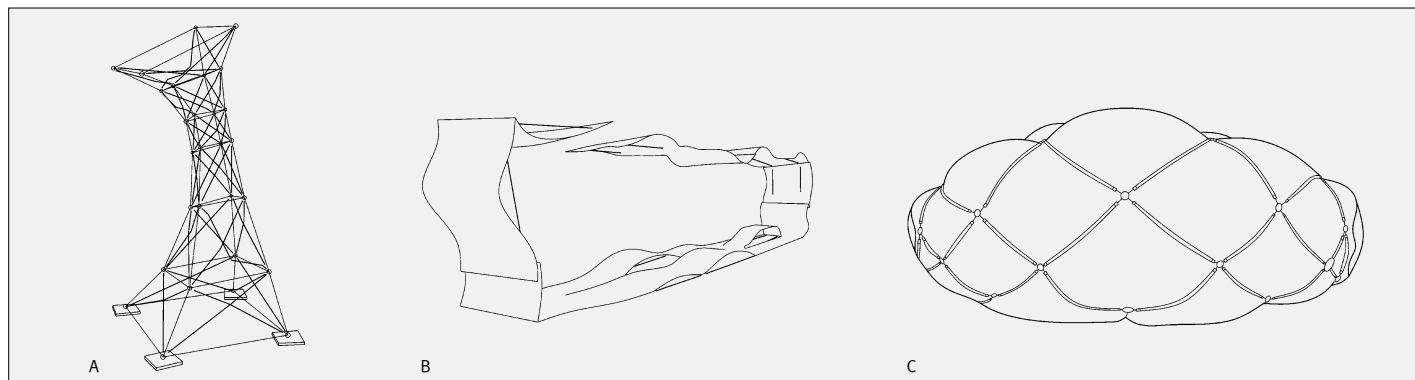
<sup>42</sup> Snowballing Doorway, Wall to Wall Floor to Ceiling

<sup>43</sup> Strandbeest

<sup>44</sup> Amorphicrobotworks

<sup>45</sup> ANDRIĆ, JAKSIC, 2018.

<sup>46</sup> Meki pneumatski pokretacki robotski elementi postojali su još od vremena prvih robota, kakav je bio *Gakutensoku*, japanski robot iz 1928. godine pokretan gumenim zračnicama. Uredaj *umjetni mišić* kao protetičko pomagalo za žrtve dječje paralize izumio je 1957. Joseph Laws McKibben koji se bavio proizvodnjom vakuumskih ventila. Uredaj je činila ljudski kontrolirana najlonska cijev pogonjena ugljičnim dioksidom iz zasebnog spremnika. *Gumeni mišić* iz 1967., izum Benjamin F. Goodricha i



kontrola, jeftinih elektroničkih upravljača, senzora i mekih pokretača. Neki pokretački elementi, poput ‘mekih mišića’, izumljeni su sredinom 20. stoljeća<sup>46</sup>, a aktivnu uporabu doživljavaju upravo u doba intenzivnoga razvoja meke robotike. Ovakve konstrukcije koje udružuju pneumatsku i robotsku komponentu nazivaju se pneubotske konstrukcije. One mogu biti pneumatski pokretane konstrukcije od tvrdih komponenata, ali se u većini slučajeva radi o laganim mekim pneumatskim konstrukcijama s mekim pneumatskim pokretačima. Pokretaci mogu biti linearni, kakvi su primjerice spomenuti ‘meki mišići’, ili volumenski, koji istovremeno mogu biti i oblikotvorni i pokretački element pneubotske konstrukcije.

Paviljon *Airecture* primjer je pneumatski aktivno prilagodljive prijenosne konstrukcije. Nosivu konstrukciju čine pneumatski stupovi i grede koji su stabilizirani mekim mišićima. Ovisno o promjeni vanjskih djelovanja, konstrukcija se prilagođava aktivnim upravljanjem prijenosom opterećenja, optimizirajući krutost pojedinih dijelova konstrukcije.<sup>47</sup>

Interaktivne pneubotske *proto-arhitekture* transdisciplinarnoga znanstvenoistraživačkog projekta *Hyperbody* Arhitektonskog fakulteta Tehničkog sveučilišta u Delftu – istraživački projekt pod vodstvom profesora Kasa Oosterhuisa – služe za istraživanje više tipova prilagodljivih konstrukcija, većinom pokretanih umjetnim mišićima. Projekt ima za cilj istraživanje mogućnosti projektiranja slo-

ženih sustava, njihove fleksibilnosti, sposobnosti zadržavanja oblika i prilagodbe krutosti, kombinirane s kinetičkim mogućnostima i kompleksnim ponašanjem interaktivnih sustava. Primjer konstrukcije s krutim stapovima i mekim mišićima jest *Muscle Tower II* (Sl. 8.A) koji linearnim skraćivanjem mišića značajno mijenja položaj stapova u konstrukciji, postizajući pokret i promjenu oblika. *Muscle Reconfigured* (Sl. 8.B) konstrukcija je konstrukcija koja se sastoji od fleksibilnih ploha što se mogu nabirati putem mekih mišića, mijenjajući tako topografiju poda, vertikalnih stijena i stropa. A *NSA Muscle* (Sl. 8.C) jest izložbena instalacija koja se sastoji od napuhane membrane premrežene mekim mišićima. Konstrukcija je u stalnoj interakciji s posjetiteljima zahvaljujući 24 senzora raspoređenih na 8 mjesta po mekomu pneumatskom tijelu, kojima detektira pokret, blizinu i dodir. Signal se u zvučnom formatu prenosi do računala koje ga tumaci te određuje ‘raspoloženje’ koje može biti ocijenjeno kao uzbuđenje, strah ili ljutnja. Konstrukcija je reagirala na okolinu trešnjom, promjenom oblika, zvučno i svjetlosno te je, između ostaloga, služila za istraživanje *nastajućih (emergent) uzoraka ponašanja*<sup>48</sup> robotskih rojeva (zamisljena je kao robotski roj s mekim mišićima koji koordinirano proizvode učinak). Chris Kievid i Kas Oosterhuis tvrde da se konstrukcija – koja je bila izložena u Centru Pompidou u Parizu, a pušteno je da sama reagira u interakciji s posjetiteljima – ponašala nepredviđeno te je tako predstavljala „prototip za okruženje koje je lagano izvan kontrole [...] prototip konstrukcije koja je proaktivna umjesto reagirajuća ili korisnicima poslušna”.<sup>49</sup> Suvremene tehnike programiranja videoigara i razvoja umjetnih inteligencija često se posuđuju za programiranje virtualnih okruženja za dinamičko projektiranje zgrada i razvoj pogonskog softvera ovakvih konstrukcija, a jedan od načina interakcije s aktivno reagirajućim konstrukcijama jest i kroz upravljače za videoigre (*gaming pad-ove*), te kroz geste, govor, piktogramske prekidače i dr.<sup>50</sup>

SL. 8. PNEUBOTSKE KONSTRUKCIJE: A) MUSCLE TOWER II, B) MUSCLE RECONFIGURED, C) NSA MUSCLE  
FIG. 8 PNEUBOTIC STRUCTURES: A) MUSCLE TOWER II, B) MUSCLE RECONFIGURED, C) NSA MUSCLE

Johna S. Englanda, ima pak upletenu vrpču u gumeno crijevo koje se napuhavanjem savija. Ovisno o tlaku mijenja se i zakrivljenost cijevi. Suvremeni su meki mišići uglavnom vlačni linearni pokretači načinjeni od elastične cijevi unutar vlaknaste mreže koja se širenjem skraćuje i tako proizvodi učinak.

<sup>47</sup> KRONENBURG, 2008.

<sup>48</sup> U kontekstu ove analize pojam *nastajuće ponašanje* odnosi se na pojavu kompleksnog ponašanja sklopa sastavljenog od elemenata temeljenih na setu jednostavnih pravila.

<sup>49</sup> KIEVID, OOSTERHUIS, 2012.

<sup>50</sup> BONGERS, 2012.

Ovakve interaktivne konstrukcije za istraživanje mogućnosti projektiranja konstrukcija meke topologije ili istraživanja ljudsko-robotске interakcije donose sa sobom specifične probleme. To su najčešće tehnički problemi vezani za aspekte proizvodnje, projektiranja, programiranja, korištenja i interakcije sa suvremenim pneubotskim konstrukcijama i dr., ali mogu biti i etički problemi vezani za pravna pitanja odgovornosti u slučaju neželjenih posljedica proizašlih djelovanjem uređaja opremljenih algoritamskim softverima.<sup>51</sup>

## ZAKLJUČAK

### CONCLUSION

Pneumatske konstrukcije su poseban tip konstrukcija u arhitekturi, štoviše riječ je o politipu koji može biti nosiva konstrukcija, ovojnica, temeljna konstrukcija, uređaj, robot, vozilo i dr. Također, isti tip konstrukcije moguće je svrstati i u druge vrste konstrukcija, čime pneumatske konstrukcije proširuju polje mogućnosti razvoja raznih disciplina. Udruživanjem meke robotike i pneumatskih konstrukcija nastao je robotski politip pneubotske konstrukcije koji dodatno proširuje polje mogućnosti za projektiranje prilagodljivih i reagirajućih konstrukcija kroz dinamičku interakciju s promjenjivim okolišem, što uključuje promjenjiva djelovanja na konstrukciju, promjenjive zahtjeve i potrebe korisnika i dr. Opremljene biologikom i senzoričkom one postaju aktivne, morfo-dinamične, biomimetičke konstrukcije. Ovakve jeftine i meke alternative tvrdim i mehaničkim kinetičkim konstrukcijama proširuju polje mogućnosti oblikovanja i opremanja prilagodljivih prostora. Posebnost pneumatskih i pneubotskih konstrukcija jest njihova velika sličnost s prirodnim oblicima i živim organizmima, što proizlazi iz njihove mekoće, zaobljenosti, male težine te višefunkcionalnosti i konstrukcijske optimiziranosti, čime pripadaju u konstrukcije visokoga biomimetičkog potencijala. Time što se lako i podatno uklapaju i u mehaničku i u organsku analogiju u arhitekturi, kao i u arhitekturu kao umjetnost, polje primjene pneumatskih i pneubotskih konstrukcija uistinu je vrlo široko. U skorajšnjoj se budućnosti samo može očekivati daljnje proširenje toga polja – kako za potrebe priremenih, žurnih, ekspedicijskih, transportnih, infrastrukturnih i drugih rješenja, tako i za oblikovanje trajnijih funkcionalnih konstrukcija zgrada. Razvoj ovih konstrukcija još je u ranoj etapi, ali mnogobrojni primjeri njihove uspješne i atraktivne primjene čine izglednijim da pneubotske konstrukcije uskoro postanu učeštalija pojava.

## LITERATURA

### BIBLIOGRAPHY

- ADAMS, C. (2007.), *Hybrid Inflatable Structures for High-Performance Applications*, Army Research Office Base Camp Sustainability Workshop, Sept. 12-14, Raleigh, NC: Synthesis Intl.
- ANDRIĆ, D.; JAKŠIĆ, N. (2018.), *Adaptive Pneobotics in the Service of Heritage Presentation: the Cemetery of Manastirine, Salona*, The 5<sup>th</sup> International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDS: S. ARCH 2018, Get It Published Verlag e.k.: 800-814, Erlangen, Njemačka
- BONGERS, B. (2012.), *Multimodal Interaction in Protospace 1.0*, Hyperbody-First Decade of Interactive Architecture [ur. OOSTERHUIS, K.; BIER, H.; BILORIA, N.; KIEVID, C.; SLOOTWEG, O.; XIA X.], Jap Sam Books: 533-548, Heijningen
- CHI, J.Y.; PAULETTI, R.M. (2005.), *An outline of the evolution of pneumatic structures*, II Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras, Caracas, Venezuela, Pon\_10, Universidad Central de Venezuela, Caracas
- GRUBER, P.; IMHOF B. (2007.), *Transformation: Structure/Space studies in bionics and space design*, „Acta Astronautica”, 60 (4-7): 561-570; <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.09.032>
- HYUN, Y. (2008.), *Pavilions in the Vanguard of Architecture*, „C3: Architecture + Landscape + Urbanism”, 0812 (292): 40-47
- JONES, J.A. (2001.), *Inflatable Robotics for Planetary Applications*, 6<sup>th</sup> International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics & Automation in Space: A New Space Odyssey, Montreal, Canada, June, 18-22: 1-6; <http://hdl.handle.net/2014/39004>
- KIEVID, C.; OOSTERHUIS, K. (2012.), *Muscle NSA, a Basis for a True Paradigm Shift in Architecture*, Hyperbody: First Decade of Interactive Architecture [ur. OOSTERHUIS, K.; BIER, H.; BILORIA, N.; KIEVID, C.; SLOOTWEG, O.; XIA, X.], Jap Sam Books: 445-452, Heijningen
- KRONENBURG, R. (2008.), *Portable architecture (3.)*, Elsevier/Architectural Press: 61-64, Oxford / Burlington, MA
- LIPSON, H. (2006.), *Evolutionary Robotics and Open-Ended Design Automation*, Biomimetics: Biologically Inspired Technologies [ur. BAR-COHEN Y.], CRC Press: 129-155, Boca Raton
- MIKIĆ, V. (2010.), *Zajednički projekti arhitekata Seissela i Picmana; Uz Seisselovu skicu „Putujući grad” iz 1932. godine*, „Prostor”, 18 (2/40): 348-359, Zagreb
- STEADMAN, P. (2008.), *The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts*, Routledge, Oxon; <https://doi.org/10.4324/9780203934272>

## IZVORI

### SOURCES

#### INTERNETSKI IZVORI

##### INTERNET SOURCES

- 3Gatti, <http://3gatti.com/#o> [1.2.2016.]
- Agence d'Architecture Gilles Ebersolt Sarl, <http://www.gilleasebersolt.com/> [12.2.2016.]
- Air Danshin, <http://www.airdanshin.jp/> [1.2.2016.]
- Amorphicrobotworks, <http://amorphicrobotworks.org> [7.12.2019.]
- Architecture and Vision, <http://www.architectureandvision.com/> [18.2.2016.]
- Balmond Studio, <http://www.balmondstudio.com/work/serpentine-pavilion-2006.php> [20.10.2019.]
- Bigelow Aerospace, <http://bigelowaerospace.com/> [12.2.2020.]
- Casa Bubble, <http://www.casabubble.com/> [18.2.2016.]
- Strandbeest, <http://www.strandbeest.com/> [30.12.2017.]
- Media-TIC Building, [http://www.abitare.it/wp-content/uploads/2010/01/PresentationMEDIA-TIC\\_web\\_EN-1.pdf](http://www.abitare.it/wp-content/uploads/2010/01/PresentationMEDIA-TIC_web_EN-1.pdf) [5.7.2017.]
- Overtreders W, <http://www.overtreders-w.nl/index.php?sb1=project&sb2=project&sb3=dak> [18.2.2016.]
- Passing Cloud, <http://tiagobarros.pt/Passing-Cloud-1> [21.3.2016.]
- Peace Pavilion – AZC, <http://www.zundelcristea.com/en/design/peace-pavilion/> [18.2.2016.]
- PlusMinus – Pneumatic gridshell, [https://www.festo.com/cms/en\\_corp/12645.htm](https://www.festo.com/cms/en_corp/12645.htm) [8.1.2016.]
- Quastic, <http://www.quastic.com/>, [17.4.2014.]
- Raumlabor, <http://raumlabor.net/> [10.11.2015.]
- Snowballing Doorway, <http://www.alexschweder.com/work/snowballing.html> [14.12.2015]
- Tensairity Solution, <http://www.tensairitysolutions.com/applications/> [14.4.2020.]
- Wall to Wall Floor to Ceiling, [http://www.alexschweder.com/work/wall\\_to\\_wall.html](http://www.alexschweder.com/work/wall_to_wall.html) [14.12.2015]
- Strandbeest, <http://www.strandbeest.com/> [1.12.2016.]
- The Space Review: Interview: TransHab developer William Schneider, <http://www.thespacereview.com/article/686/1> [21.1.2018.]

#### IZVOR ILUSTRACIJA

##### ILLUSTRATION SOURCE

Author

<sup>51</sup> Slični problemi prate razvoj trenutno aktualnih robotskih sustava autonomne voznje osobnih vozila.

## SAŽETAK

## SUMMARY

## CONTEMPORARY PNEUMATIC STRUCTURES IN ARCHITECTURE

### CRITICAL REVIEW AND ANALYSIS

The development of pneumatic structures began with the first hot air and hydrogen balloons in the 18<sup>th</sup> century. They were used in World War II for military purposes followed by their civilian application. Their culmination was reached at the Expo '70 in Osaka. Recent development of pneumatic structures has been substantially improved by the emerging new technical and man-made materials with specially designed properties as well as the development of computer-aided design and manufacture. By presenting the selected examples of contemporary pneumatic structures and main areas of their development, this paper aims to confirm a hypothesis that such structures represent a structural polytype (the existence of multiple types of structures within one particular kind) having a high biomimetic potential (capacity to mimic logic, mechanism or function of the living beings in some aspects). Pneumatic structures have been reused again in cases where lightweight, portable and temporary structures are needed. This trend echoes a particular historical period marked by indecision, non-invasive and reversible ways of construction, construction leaving no traces, the organization of temporary public and social gatherings at the places with minimal technical requirements, staying in some places that are difficult to access etc. Multi-purpose lightweight structures are designed for exhibition halls, concerts, festivals, dormitories, saunas, etc. These can be individual facilities or structures connected with the service devices and vehicles. The emergence of glamping is also an opportunity for the application of pneumatic structures as structures that do not leave traces in nature. Besides spatial enclosure, pneumatic structures can perform other technical functions such as the control of heating and cooling, light and heat transmission, etc. Pneumatic structures as additions to the existing building skin can significantly improve the energy performance of a structure. Some characteristics can be accomplished by means of a special construction of a pneumatic element or introduction of another medium besides ordinary air into the structure such as artificial mist, warm air, various gases etc. The

number of new forms and structural solutions is on the increase. It is partly due to the development of computer-aided design and manufacture as well as simulation programs and generative methods. There appear logically designed innovative forms of soft parametrically designed and robotically produced structures. Contemporary structural innovations include the so-called tensairity composite structures with slender compression elements stabilized by a pneumatic cushion as air compression web and tension cables as well as vacuum structures filled with loose material that may harden into a desirable shape by vacuuming process should. Contemporary research also includes the application of pneumatic structures in other technical fields such as for example: (adaptive) aircraft wings, flying wind power plants, self-erecting structures, pneumatic frames, arches and modular domes etc.

Research projects have been carried out in order to examine the possibilities of constructing pneumatic seismic insulation as well as formwork for temporary and permanent structures including the possibilities of robotic construction using such structures in combination with other materials. Crises and expeditions on the Earth and in space have also given impetus towards innovations in the field of pneumatic structures. This is mainly due to low weight and compactness of pneumatic structures which facilitates their transport to distant places with relatively large useful volume they can form. This development is supported by the use of new high-tech materials resistant to space vacuum conditions, intense radiation, micrometeor impacts, high temperature oscillations, etc. Thus, space research entails an analysis of various pneumatic structures and their applicability in the design of space devices, orbital stations, research colonies and mobile laboratories. These are, for example, landing cushioning systems, expandable envelopes of research laboratories with a rigid core containing equipment, which can be easily packed into space launch vehicles. Specific structures have already been constructed and tested as modules for the International Space Station in the Earth's orbit.

Pneumatic actively adaptable structures have emerged as a result of the development of more complex computer controls, inexpensive electronic control panels, sensors, and soft actuators. The built pavilions and experimental structures use volumetric and linear operating pneumatic elements to adapt their own shape and actively respond to users and the environment. Research is being carried out into the possibilities of designing complex systems, their flexibility, ability to retain the shape or adapt rigidity combined with kinetic possibilities and complex behavior of interactive systems. Such structures are pneumatically operated robotic structures – pneubotics. These are actively adaptable structures with pneumatic elements that can at the same time act as form-giving and actuating elements. Modern pneumatic structures are suitable for the construction of adaptable and interactive art installations of various scales: from small robots or architectural elements to dynamic terrains (landscapes). Thus, for example, some installations are static but portable, some are kinetic, some have a rudimentary analog logic circuit, while others are equipped with more sophisticated controllers and algorithms. Atypical applications are also considered such as the possibility of non-invasive reconstruction of archaeological findings using adaptive pneumatic structures in situ. It has been shown that pneumatic structures in architecture are a polytype that can be a load-bearing structure, envelope, basic structure, device, robot, vehicle, etc. By combining soft robotics and pneumatic structures, the resulting robotic polytype – pneubotic structures – further expands the field of design possibilities for adaptable and responsive structures in architecture. This type enables dynamic interaction between the structure and the changing environment which includes changing actions, changing requirements and users' needs etc. Equipped with bio-logic and sensors, they become active, morphodynamic, biomimetic structures. Numerous examples demonstrating the application of such structures indicate that pneumatic structures are likely to be increasingly used.

## BIOGRAFIJA

## BIOGRAPHY

Dr.sc. **DAVOR ANDRIĆ** je poslijedoktorand na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Doktorirao je 2017. s temom biomimetičkih pneubot-skih konstrukcija u arhitekturi. Istrazuje suvremene tehnike projektiranja i oblikovanja konstrukcija u arhitekturi.

**DAVOR ANDRIĆ**, Ph.D., postdoctoral researcher at the Faculty of Architecture in Zagreb. He received his Ph.D. with his dissertation on biomimetic pneubotic structures in architecture. His research interests are focused on the contemporary design techniques and structural design in architecture.

