

KONSTRUKCJE MAGNETYCZNE JAKO KONTYNUACJA WIZJI ARCHITEKTURY EFEMERYCZNEJ RICHARDA BUCKMINSTERA FULLERA

Kajetan Sadowski

Politechnika Wrocławska, Wydział Architektury, ul. Bolesława Prusa 53/55, 50-317 Wrocław, Poland
E-mail: kajetan.sadowski@pwr.edu.pl, ORCID: 0000-0002-1713-430X

DOI: 10.24427/aea-2020-vol12-no3-02

MAGNETIC STRUCTURES AS A CONTINUATION OF VISION OF EFEMERIC ARCHITECTURE BY RICHARD BUCKMINSTER FULLER

Abstract

The Paper is an attempt to present the vision of architecture by R.B. Fuller, described by the author as ephemeral architecture. This article presents the development of selected philosophical views of Fuller and the professional achievements resulting from them, presented on selected examples of completed objects and conceptual projects. Selected works that exemplify Fuller's views on sustainable design understood as striving to minimize the interactions between building elements and between them and the external environment, the ideal of which is architecture constructed with the use of invisible forces. In the further part of the paper, examples of installations or utility design objects functioning thanks to invisible electromagnetic forces are presented, followed by an analysis of the possibility of constructing a "magnetic tower" for various variants of location or size of magnets. The results are presented in the form of charts showing the feasibility of such a structure.

Streszczenie

Artykuł jest próbą przybliżenia wizji architektury R.B. Fullera określonej przez Autora jako architektura efemeryczna. W pracy zaprezentowano rozwój wybranych poglądów filozoficznych Fullera i wpływających z nich dokonań zawodowych, przedstawionych na wybranych przykładach zrealizowanych obiektów oraz projektów koncepcyjnych. Wybrano prace egzemplifikujące poglądy Fullera w zakresie projektowania zrównoważonego rozumianego jako dążenie do minimalizacji oddziaływań między elementami budynków oraz pomiędzy nimi a środowiskiem zewnętrznym, którego ideałem jest architektura konstruowana za pomocą niewidzialnych elementów. W dalszej części pracy przedstawiono przykłady instalacji lub przedmiotów wzornictwa użytkowego funkcjonujących dzięki niewidzialnym siłom elektromagnetycznym a następnie przedstawiono analizę możliwości skonstruowania „wieży magnetycznej” dla różnych wariantów usytuowania lub wielkości magnesów. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów obrazujących możliwości wykonania takiej budowli.

Keywords: Fuller; magnetic constructions; sustainable design; magnets in architecture

Słowa kluczowe: konstrukcje magnetyczne; projektowanie zrównoważone; magnesy w architekturze

WPROWADZENIE

Zasadniczą cechą każdej, trwającej w czasie działalności człowieka jest jej rozwój. W przypadku inżynierii i techniki budowlanej polega on na ciągłym udoskonalaniu efektów swojej pracy czyli budynków oraz obiektów budowlanych. W różnych przypadkach intensywnemu rozwojowi podlegały różne aspekty działal-

ności budowlanej: od materiałów, z których budynki są wznoszone, poprzez układy funkcjonalno-konstrukcyjne, aż po sam proces technologii wznoszenia. Cele też są różne: od zaspokojenia coraz bardziej złożonych potrzeb funkcjonalnych użytkowników, poprzez oszczędność czasu i materiałów, zintensyfikowanie produk-

cji, niezawodność, trwałość bądź tymczasowość, aż po zmniejszenie oddziaływania na środowisko przez obiekt lub wywołanie określonego wrażenia u odbiorcy. Efekty te z pewnością są najsilniejsze wtedy, kiedy zmiana uwidacznia się na wielu poziomach odbioru. Takim przypadkiem może być upowszechniona przez R.B. Fullera kopuła geodezyjna będąca obiektem wyróżniającym pod kątem np. układu konstrukcyjnego, formy, sposobu montażu czy małej ilości użytych materiałów. Jej wszechstronna innowacyjność nie była wynikiem celowego działania w celu udoskonalenia wybranego parametru, ale efektem synergetycznego, jak by powiedział Fuller, myślenia o budynku jako o całości. Była też najbardziej spektakularnym spośród wielu przykładów w szeregu wynalazków Fullera, ponieważ została zaproponowana w odpowiednim momencie historii. Począwszy od prób z materiałami budowlanymi (w firmie *Stockade Building System*), poprzez projekt łazienki czy stacjonarnych domów np.: *4D House* lub *Dymaxion House*, a dalej tymczasowe, kontenerowe miejsca zamieszkania jak: *Standard of Living Package* czy wspomniane już kopuły geodezyjne z najbardziej spektakularną, choć niezrealizowaną kopułą o średnicy dwóch mil nad Manhattanem, aż po wizjonerskie, wyprzedzające swój czas projekty mega miast: *Tetra City*, *Triton Floating City*, *Cloud Nine* – tym szeregu zdarzeń projektowych widać wspólne mianowniki do których należą: dążenie do oszczędności w produkcji i użytkowaniu, samowystarczalność, elastyczność, lekkość, reorganizowalność, adaptatywność. Te i inne cechy wynikały z rozwijanego przez Fullera systemu filozoficznego, który nazywał *Synergetyką*. Pośród wielu dziedzin twórczości, jakimi Fuller się zajmował i w których odkrywał możliwości *synergetycznego rozwoju*, budownictwo stanowiło zdecydowanie najbardziej związany z rzeczywistością obszar jego działalności, w którym łatwo było uchwycić postępujące zmiany. Projekty Fullera ewoluowały wraz z nim, hołdując kosmicznej zasadzie przez niego wyznawanej: „*robić jak najwięcej z jak najmniejszych środków*” [J. Krausse, C. Lichtenstein 1999, s. 19], jednak tempo tej ewolucji zdecydowanie przewyższało tempo rozwoju techniki i inżynierii, przez co większość projektów nie została i nie będzie prawdopodobnie nigdy zrealizowana z uwagi na zmieniające się w czasie uwarunkowania. Gdyby jednak ograniczenia nie istniały, czy wieńczącym życiem Fullera projektem byłyby *Cloud Nine* – lewitujące miasta? A gdyby mógł pójść o krok dalej? Fuller miał nadzieję i wyobrażał sobie, że budynki będą całkowicie *efemeryczne* tzn. pozbawione materiałów budowlanych oraz wznoszone i sterowane jedynie „*polem elektrycznym i innymi zupełnie niewidzialnymi środkami sterowania środowiskiem*” [E. Kolbert 2008, s.3].

1. KOPUŁY GEODEZYJNE

Kopuły geodezyjne oparte na pomysłach rzutowania podzielonej na trójkątne sekcje ściany bryły platońskiej dwunastościanu lub dwudziestościanu foremnego na powierzchnię trójkąta sferycznego opisanego na tymże wielościanie, nie były nowym pomysłem. Pierwszą realizacją tego typu – tymczasową, ponieważ stanowiła rusztowanie pod konstrukcję powłoki betonowej – było planetarium Carla Zeiss'a w Jenie, zrealizowane w latach dwudziestych XX wieku. Nie wiemy do końca, jakie intencje przyświecały jej projektantowi, Walterowi Bauersfeldowi, zaś w przypadku Fullera kopuła geodezyjna była częścią, jak już wspomniano, dłuższego procesu myślowego. Zawarte w niej zostały cechy istotne z punktu widzenia filozofii postrzegania świata. Po pierwsze, zakwestionowana została fundamentalna idea budowania w kartezjańskim układzie współrzędnych, opartym na kącie prostym, który został zastąpiony – zdaniem Fullera – bardziej ekonomicznym, wydajniejszym i bliższym naturze układem opartym o kąt 60°, który na płaszczyźnie tworzy macierz szyku „*trójkątów równobocznych, która odpowiada kompleksowej koordynacji najbardziej oszczędnych i najbardziej wygodnych wzajemnych powiązań strukturalnych natury*” [R.B. Fuller 1979, s. 420.01]. Jej przestrzenna wersja złożona z powtarzających się czworoscianów i ośmiościanów, nazwana „izotropową macierzą wektorów”, stanowi bardziej wydajną konstrukcyjnie strukturę przestrzenną. Dowodem powyższego założenia jest fakt, że kopuła geodezyjna jest niezwykle wytrzymałym przykryciem o najmniejszej własnej wadze w stosunku do objętości zamykanej przestrzeni. Jej efektem jest niezwykła lekkość wynikająca z dużej smukłości prętów tworzących strukturę przestrzenną. W wielkoskalowych założeniach ciężar jej konstrukcji może być nawet mniejszy niż ciężar zawartego w niej powietrza, co ostatecznie może skutkować całkowitym „oderwaniem” się konstrukcji od podłoża jak w przypadku opracowanego wspólnie z Shoji Sadao projektu *Cloud Nine*: „*gdy słońce będzie ogrzewać powietrze wewnątrz, kula ze wszystkimi budynkami znajdującymi się w środku unosić się będzie w powietrzu, jak balon*” [E. Kolbert 2008, s. 5]. Konsekwencje realizacji takich struktur były, zdaniem Fullera, dalekosiężne – ludzie w tych konstrukcjach mogliby zwiedzać świat a nawet migrować [J. Baldwin 1996, s. 190], w większym stopniu istniałaby możliwość korzystania z „dywidend” energetycznych w postaci siły wiatru czy promieniowania słonecznego, powierzchnia Ziemi zostałaby uwolniona od kosztownej środowiskowo obecności człowieka. W ten sposób mogłyby „znikać” całe miasta co uczyniłoby korzystanie z zasobów naszej planety bardziej zrównoważonym.



a)

b)

c)

Ryc. 1. a) Warnow Tower; źródło: https://tensegrity.miraheze.org/wiki/Warnow_Tower, **b)** White Rhino II; źródło: <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/en/about/facilities/chiba/kawaguchi/>, **c)** MOOM tensegrity membrane structure; źródło: <https://parameterizing.wordpress.com/2017/01/18/pavilions/>

Fig. 1. a) Warnow Tower; source: https://tensegrity.miraheze.org/wiki/Warnow_Tower, **b)** White Rhino II; source: <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/en/about/facilities/chiba/kawaguchi/>, **c)** MOOM tensegrity membrane structure; source: <https://parameterizing.wordpress.com/2017/01/18/pavilions/>

W powyższym przypadku siłą sprawczą symbolicznej *efemeralizacji* budynku i jego konstrukcji była z jednej strony optymalna geometria struktury, dzięki której była ona lekka, z drugiej zaś proces fizyczny, który odpowiada za unoszenie się cieplejszego, a więc lżejszego niż ośrodek, powietrza do góry. Wykorzystanie działających sił natury było dla Fullera oczywiste ponieważ uważał, że świat jest pełen energii (choć często jest ona uwięziona w materii) i powinniśmy się nauczyć ją wykorzystywać w sposób racjonalny. Fuller podkreślał, że cały Wszechświat był przepelniony dowodami na projektowanie; niewyobrażalnie skomplikowane i niezawodne wzory energii ujawniają „wieczne zasady projektowania wzajemnych zależności” [A. Edmondson 2007, s. 62]. Przykładem może być krytykowana przez Fullera „blokowość” architektury wykorzystującej jedynie siły ściskające jako przeciwstawienie się grawitacji: „Człowiek kierował się mylnym, powierzchownym myśleniem, że mogą istnieć bryły oraz ciągle ściskanie. (...) To tylko ludzka mentalność błędnie starała się zorganizować ideę konstrukcji” [R.B. Fuller 1979, s. 645.04]. Fuller twierdzi więc, że musimy myśleć w kategoriach całych systemów pozostających w równowadze, w kategoriach wszechkierunkowych sił wzajemnie oddziałujących w samo stabilizujących wzorach [A. Edmondson 2007, s. 277]. W tym przypadku siłą równoważącą ściskanie jest rozciąganie, które wykorzystywał w swoich projektach, np. *Dymaxion House* czy fabryce włókienniczej *Automatic Cotton Mill*.

2. TENSEGRITY

Para przeciwstawnych, uzupełniających się sił ściskania i rozciągania stanowi podstawę systemu

o nazwie *Tensegrity* wymyślonego przez Fullera (ale kojarzonego także z K. Snelsonem i D.G. Emmerichem [J.F. Abel, I. Mungan 2011, s. 251]). W systemie tym ściskane pręty połączone są ze sobą rozciąganyymi cięgnami, tworząc samonośną, wstępnie sprężoną strukturę zdolną przenosić nie tylko własny ciężar, ale także obciążenia zewnętrzne. Obok wyglądających na lewitujące w powietrzu ściskanych prętów (spektakularnie wydobytych np. w dynamicznych rzeźbach przez Kennetha Snelsona), uzyskano wizualizację sił „krążących” w konstrukcji, co do tej pory w budynkach o ściskanych elementach często nie było możliwe. W pewnych przypadkach można było nawet odnieść wrażenie przeciwne, jakoby siły „znikały” (rozciągane cienkie cięgna), pozostawiając lewitujące w powietrzu grubsze ściskane pręty.

Konstrukcje *Tensegrity*, w swej klasycznej formie, nie uzyskały nigdy statusu w pełni aplikowalnych systemów konstrukcyjnych [J.F. Abel, I. Mungan 2011, s. 251], aczkolwiek wielokrotnie podejmowano próby realizacji budynków z ich użyciem (głównie masztów lub dachów). Były to jednak realizacje jednostkowe, jak np. *Warnow Tower* (proj. Mike Schleich) [ryc. 1a], *White Rhino II* (proj. Ken'ichi Kawaguchi) [ryc. 1b] czy *MOOM tensegrity membrane structure* (proj. Yasuyuki Ito, Kazuko Akamatsu, Shinya Omura) [ryc. 1c]. Mimo to nie zmienia to faktu, że pomysł Fullera, poetycko opisywany jako „wyspy ściskania w morzu rozciągania”, unaoczniał, że rozciągnięcie jest pełnoprawnym rodzajem siły, który da się z powodzeniem wykorzystać (co zresztą wcześniej prezentował w projektach architektonicznych) w konstruowaniu budynków.

Fascynacja Fullera prawami natury, które pragnął wykorzystywać, czerpiąc z nich darmową ener-

gię, nie ograniczała się jedynie do obszaru „stałych” materiałów. „*Metal i włókna pracujące na rozciąganie, powietrze i woda pracujące na ściskanie*” [J. Krausse, C. Liechtenstein 1999, s. 44] – pisał. Budulcem mogła być tak naprawdę cała materia, a więc i energia, niezależnie od jej postaci. Wręcz wyobrażał sobie wykorzystanie samej energii do utrzymywania i kontroli budynków. Uznawał, jak napisano we wstępie, że będzie można wykorzystać do tego samo pole elektromagnetyczne.

3. ARCHITEKTURA NIEWIDZIALNA

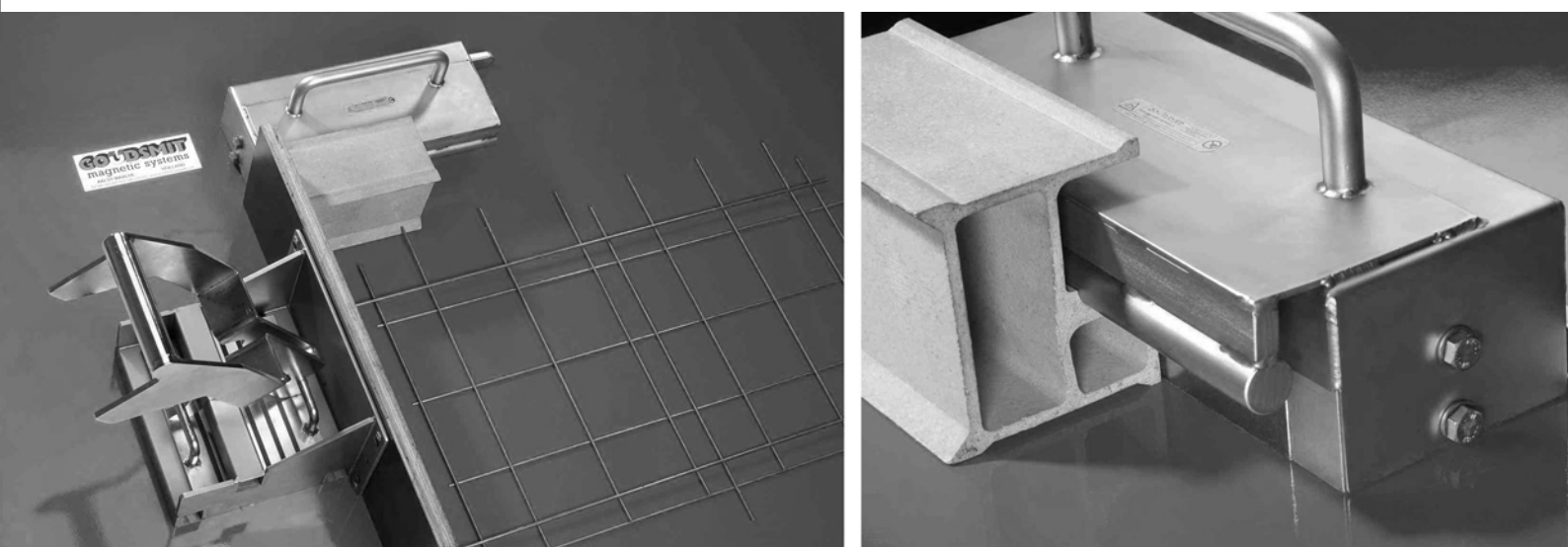
Opisanie architektury terminem *efemeryczna* może być rozumiane na różne sposoby, co może być wynikiem zmieniających się zmiennych np. środowiskowych. Dzisiejsze zagrożenie zmianami klimatu powoduje do stosowania jak najmniejszej ilości niskoemisyjnych materiałów, upraszczania technik wznoszenia czy zrównoważonego korzystania z zasobów energii. „*Występujące globalne ocieplenie i niepokój związany z klimatem stają się narzędziami architektury*” – wyjaśniał Phillipe Rahm, francuski architekt podejmujący problem „zanikania” architektury. W jego ujęciu, wyrażonym np. w pracach *Hormonium 2002* lub *Digestible Gulf Stream*, *efemeryczną* architekturę mogą tworzyć choćby doznania zmysłowe, takie jak odczuwanie temperatury, przepływów powietrza, zawartości wilgoci, stężenie O₂ itp. To odczuwanie zresztą zależy w głównym stopniu od architektury, która tworzy ramy środowiska, w którym przebywa człowiek. „*Przestrzeń architektoniczna (...) jest swego rodzaju kontinuum klimatycznym. Jest takie samo światło, średnia temperatura, poziom wilgoci*” [https://www.thefreelibrary.com/Michael+Wang+o-

n+ephemeralization-a0188962453] – tak tego oczekiwał Fuller po swoim projekcie kopuły nad Manhattanem, która miała zapewnić jednakowe, kontrolowalne i oszczędne warunki klimatyczne wewnątrz.

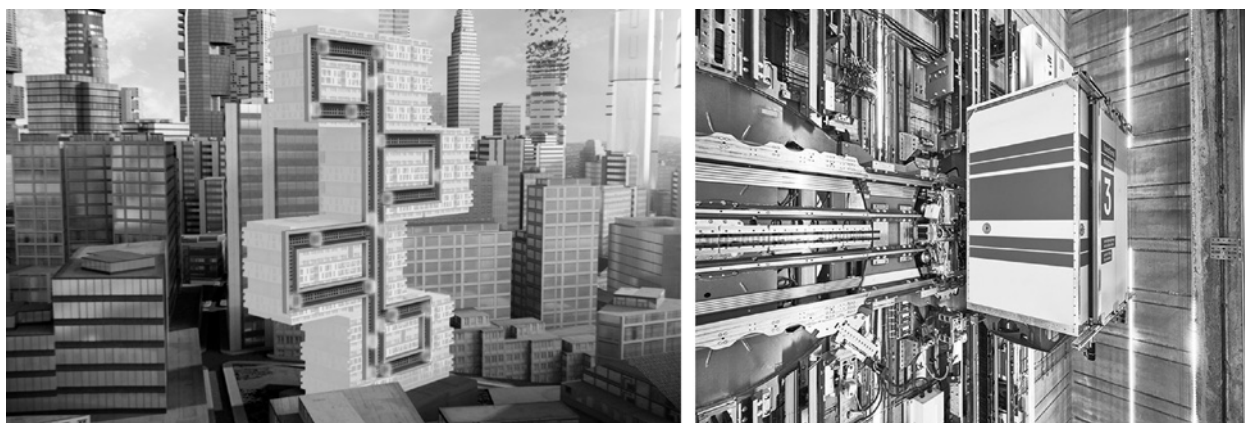
4. ODDZIAŁYWANIE MAGNETYCZNE

W niniejszej pracy uwaga jednak będzie skoncentrowana na potencjale, jaki niesie ze sobą oddziaływanie pola magnetycznego. Siły przez nie wywoływane mogą być wykorzystane jako materiał zastępczy dla stałych materiałów budowlanych. Przyciąganie zastępuje ściskanie a odpychanie zastępuje rozciąganie. Powietrze jest ośrodkiem, w którym te oddziaływania zachodzą, a za każdym razem dana siła musi być równoważona przez przeciwnie skierowaną siłę reakcji, która może występować np. w rozciągającym ciągnie lub ściskanym pręcie tak, aby układ pozostawał w równowadze. W interesujących nas przypadkach ważną parą równoważących się sił będzie układ złożony z rozciągającej siły magnetycznej i stanowiącej dla niego parę, ściskającej siły grawitacji.

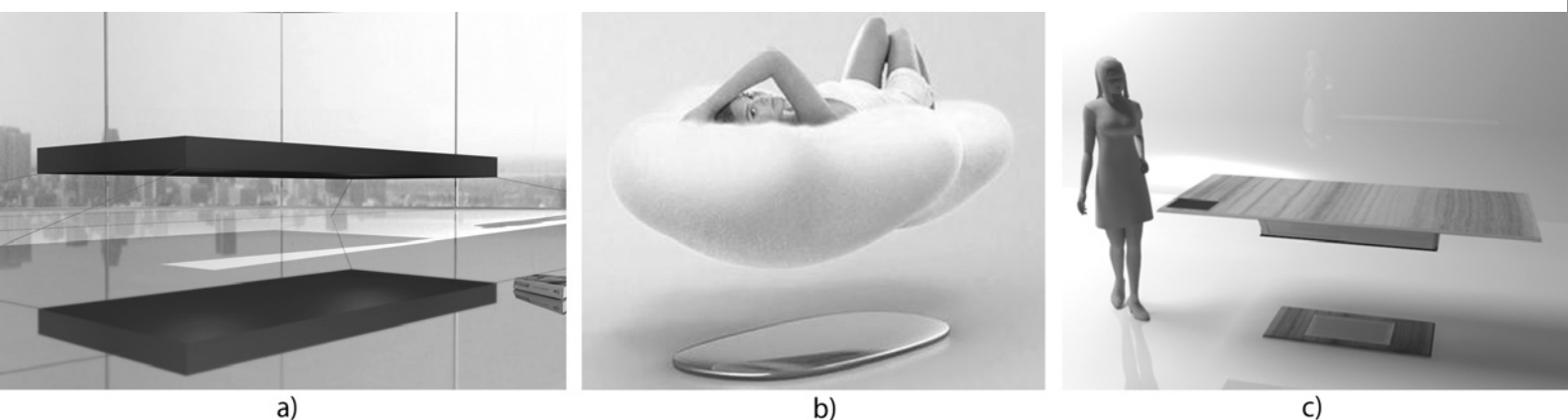
Aplikacji pola magnetycznego do zastosowań budowlanych jest bardzo niewiele i dotyczą raczej zastosowań na polu rozwiązań szczegółowych problemów technicznych. Za przykład mogą posłużyć produkty *Goudsmit Magnetics* oferującej szeroką gamę uchwytów i haków magnetycznych lub elektromagnesów podtrzymujących, które służą do stabilizacji elementów montażowych, takich jak szalunki lub elementy przeznaczone do montażu np. zbrojenie (ryc. 2).



Ryc. 2. Magnetyczne uchwyty montażowe; źródło:www.goudsmitmagnets.com
Fig. 2. Magnetic mounting brackets; source:www.goudsmitmagnets.com



Ryc. 3. Windy systemu MULTI; źródło: <https://blog.bulldozair.com/maglev-elevators-disrupting-architecture-and-construction>
Fig. 3. MULTI elevators; source: <https://blog.bulldozair.com/maglev-elevators-disrupting-architecture-and-construction>



Ryc. 4. Magnetyczne meble; źródło: **a)** <https://blog.miragestudio7.com>, **b)** <https://oddtymall.com/floating-cloud-magnet-sofa>, **c)** <https://www.yankodesign.com/2013/01/23/levitating-table/>

Fig. 4. Magnetic furniture; source: **a)** <https://blog.miragestudio7.com>, **b)** <https://oddtymall.com/floating-cloud-magnet-sofa>, **c)** <https://www.yankodesign.com/2013/01/23/levitating-table/>

Innym, ciekawym zastosowaniem magnetycznej siły nośnej jest system windy zaproponowany w 2017 r. przez firmę *Thyssen Group*. Oparty jest on o rozwiązania stosowane powszechnie w szybkich kolejach typu *Maglev*, gdzie dzięki siłom generowanym przez stałe lub zmienne pole magnetyczne (*EMS* – zawieszenie elektromagnetyczne, *EDS* – zawieszenie elektrodynamiczne) likwidowane są w sposób ciągły lub przy większych od minimalnych prędkościach opory tarcia, ponieważ kolej – lub w tym przypadku winda – „unoszą” się nad torem jezdny. Dzięki opracowanej przez *Thyssen Group* metodzie windy *MULTI* (ryc. 3) są innowacyjne w trzech obszarach: zlikwidowane są ograniczenia co do wysokości podciągania (w systemach linowych jest to ok. 600 m z uwagi na ciężar samych kabli nośnych), możliwe jest zmniejszenie wielkości brutto kabiny, w tym możliwe jest stosowanie

kilku kabin na sztyb, oraz, co najważniejsze, możliwy jest transport w dowolnym kierunku, także poziomym. System ten więc pokonuje ograniczenia związane ze stosowaniem tradycyjnych materiałów (lin nośnych) i może zrewolucjonizować transport wewnątrz budynku [https://blog.bulldozair.com/maglev-elevators-disrupting-architecture-and-construction].

Także w obszarze wyposażenia budynków lub mieszkań dostępne się stały w ostatnich latach magnetyczne meble np. łóżka (*Floating Bed*, proj. Janjaap Ruijssenaars) (ryc. 4a), sofy (*Floating Cloud Magnet Sofa*, proj. D.K.&Wei) (ryc. 4b) czy stoły (*Levitating Table* proj. Yana Christiaens) (ryc. 4c). Wszystkie projekty tego typu korzystają z zestawów odpychających się par magnesów umieszczonych w podłodze oraz w meblu i w niektórych przypadkach, jak *Floating Bed*, stabilizowanych cięgnami.

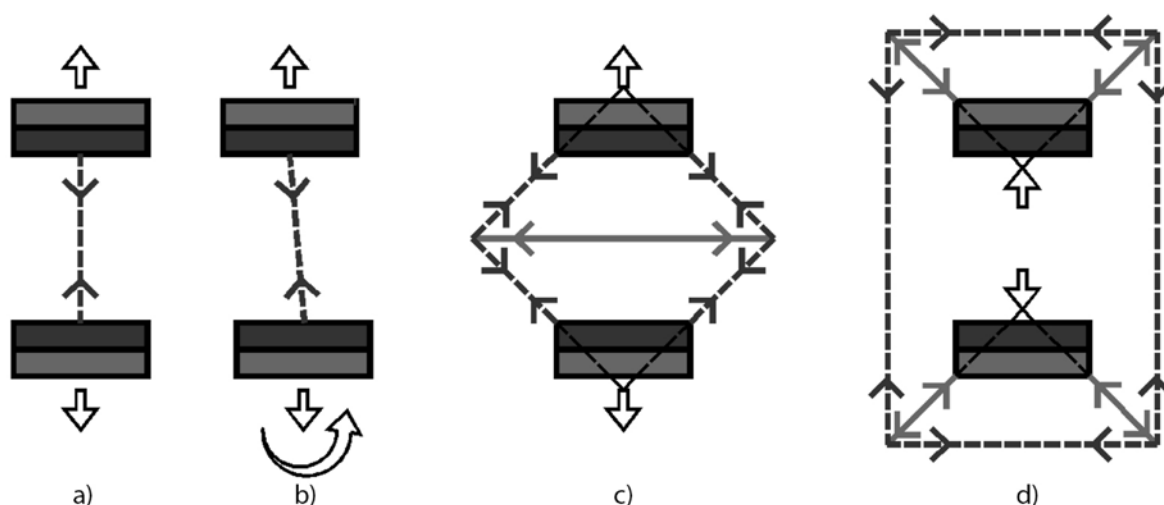
Najciekawsze z punktu widzenia *efemeryzmu* Fullera będą jednak aplikacje z zakresu architektury. Oczywiście, żadna z tych realizacji nie istnieje, ale można już zaobserwować trendy pojawiające się np. w projektach konkursowych czy projektach ideowych. Zdecydowanie największa grupa rozwiązań lewitujących budynków oparta jest, podobnie jak *Cloud Nine*, na idei wznoszenia w wyniku różnicy gęstości gazów. Projektowane wieżowce lub nawet habitaty podczepione są pod unoszące się balony jak w przypadku *Light Park Floating Skyscraper* (proj. Ting Xu, Yiming Chen w konkursie *eVolo Skyscraper Competition*, 2013) czy habitatu *Alveolus* (proj. Joseph Mwaisaka w konkursie *Laka Reacts Competition*, 2015).

Bardzo ciekawą i rojującą technologię pod nazwą *Magnetic Field Architecture* (MFA) zaproponowali Greg and Jill Henderson. Pomysł zakłada wykorzystanie *Prawa Lenza*, które mówi, że prąd indukcyjny (nazywany też prądem wtórnym) wzbudzony w przewodniku pod wpływem zmiennego pola magnetycznego, ma zawsze taki kierunek, że wytworzone wtórne pole magnetyczne przeciwdziała przyczynie (czyli zmianie pierwotnego pola magnetycznego), która go wywołała [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Lenza]. Utworzone w ten sposób wtórne prądy wirowe w pasywnym podłożu (przewodniku) będą odpychać źródło pierwotnego, poruszającego się pola magnetycznego. Zasada ta sformułowana w 1834 r. została wpięrow zaplikowana do projektu lewitującej deskorolki (*Hendo Hover*), która z powodzeniem może unieść ciężar dorosłego człowieka. Hendersonowie snują też wizję lewitujących budynków słusznie zauważając, że mogą one rozwiązywać problem np. trzęsień ziemi [<https://www.archdaily.com/769169/could-hovering-buildings-be-the-future-of-sustainability>]. Technologia jest dopiero we wstępnej fazie rozwoju a skalowanie zastosowane-

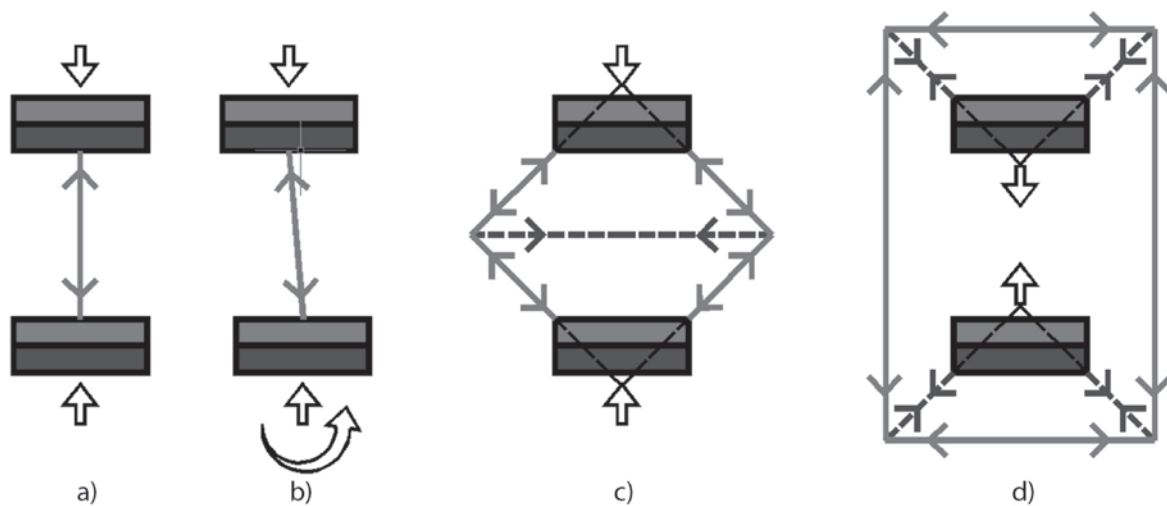
go w deskorolce rozwiązania zajmie zapewne wiele lat o ile nie dekad, co przyznają sami autorzy.

5. WIEŻA MAGNETYCZNA

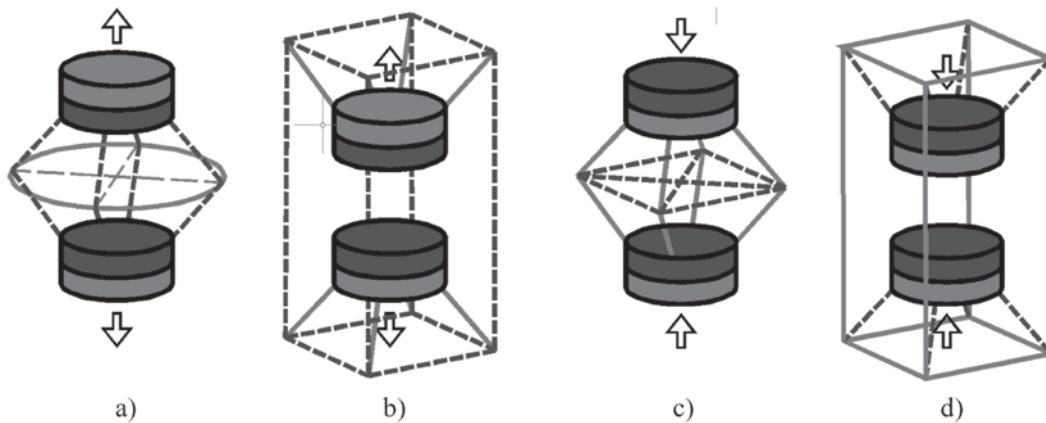
Rozważmy zatem możliwość wykorzystania sił magnetycznych w celu zaprojektowania pozostającego w równowadze układu konstrukcyjnego typu „wieża”, odpornego na trzęsienia ziemi, począwszy od zaprojektowania zrównoważonego modułu konstrukcyjnego. W tym celu można wykorzystać zarówno siłę przyciągającą jak i odpychającą pomiędzy dwoma polami magnetycznymi generowanymi przez magnesy. Zaprezentowano (ryc. 5) podstawowe płaskie moduły z dwoma źródłami pola magnetycznego (w postaci magnesów o przekroju prostokątnym), wzajemnie odpychającymi się wraz z elementami konstrukcyjnymi równoważącymi siłę odpychającą. Należy dodać, że występująca siła odpychająca tylko w idealnym, teoretycznym przypadku będzie miała kierunek prostopadły do płaszczyzny magnesu (ryc. 5a), w rzeczywistości zaś asymetria położenia względem siebie dwóch magnesów spowoduje występowanie poziomej składowej siły prowadzącej do obrotu magnesu i wzajemnego przyciągania się dwóch przeciwstawnych biegunów (ryc. 5b). W pierwszym przypadku (ryc. 5a) pokazano więc ogólny schemat modułu z równoważącym elementem rozciągającym (ciągną), następnie (ryc. 5c) schemat został rozbudowany o dodatkowy element, w tym przypadku ściskany, dzięki czemu uniemożliwiono obrót magnesu a układ pozostaje w rzeczywistej równowadze. W kolejnym przypadku (ryc. 5d) układ jest także w równowadze, ale zmieniono konfigurację elementów. Następnie przedstawiono analogiczne moduły dla przyciągającej się pary magnesów (ryc. 6a, 6b, 6c, 6d).



Ryc. 5. Płaski moduł konstrukcyjny dla odpychającej się pary magnesów; źródło: opr. własne
 Fig. 5. A flat construction module for a repulsive pair of magnets; source: by the author



Ryc. 6. Płaski moduł konstrukcyjny dla przyciągającej się pary magnesów; źródło: opr. własne
Fig. 6. A flat construction module for an attracting pair of magnets; source: by the author



Ryc. 7. Przestrzenny moduł konstrukcyjny dla odpychających się (**a, b**) oraz przyciągających się par magnesów (**c, d**);
 źródło: opr. własne

Fig. 7. Spatial construction module for repulsive (**a, b**) and attractive pairs of magnets (**c, d**); source: by the author

W przypadku modułów przestrzennych z zastosowanymi cylindrycznymi magnesami (o osiowo symetrycznym układzie linii pola magnetycznego) jego budowa jest analogiczna do modułu płaskiego z uwzględnieniem większej liczby elementów w układzie zapewniającym niezmienność w każdym kierunku.

Wartości sił pomiędzy dwoma odpychającymi lub przyciągającymi się cylindrycznymi magnesami można obliczyć ze wzoru (Wikipedia, dostęp: 05.12.2020)

$$F \simeq \left[\frac{B_0^2 A^2 (L^2 + R^2)}{\pi \mu_0 L^2} \right] \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2L)^2} - \frac{2}{(x+L)^2} \right] \quad [1]$$

gdzie:

B_0 – indukcja magnetyczna na powierzchni magnesu [T]

A – pole powierzchni ściany magnesu [m²]

L – wysokość magnesu [m]

R – promień magnesu [m]

x – odległość pomiędzy ścianami magnesów ($x > R$) [m]

μ_0 – przenikalność magnetyczna powietrza równa $4\pi \cdot 10^{-7}$ [(T*m)/A].

Indukcję magnetyczną (B_0) na dowolnej powierzchni (w tym przypadku na powierzchni magnesu) wyznacza się ze wzoru (supermagnete.de; dostęp 05.12.2020):

$$B_x = \frac{B_r}{2} \left(\frac{x+L}{\sqrt{R^2 + (x+L)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right) \quad [2]$$

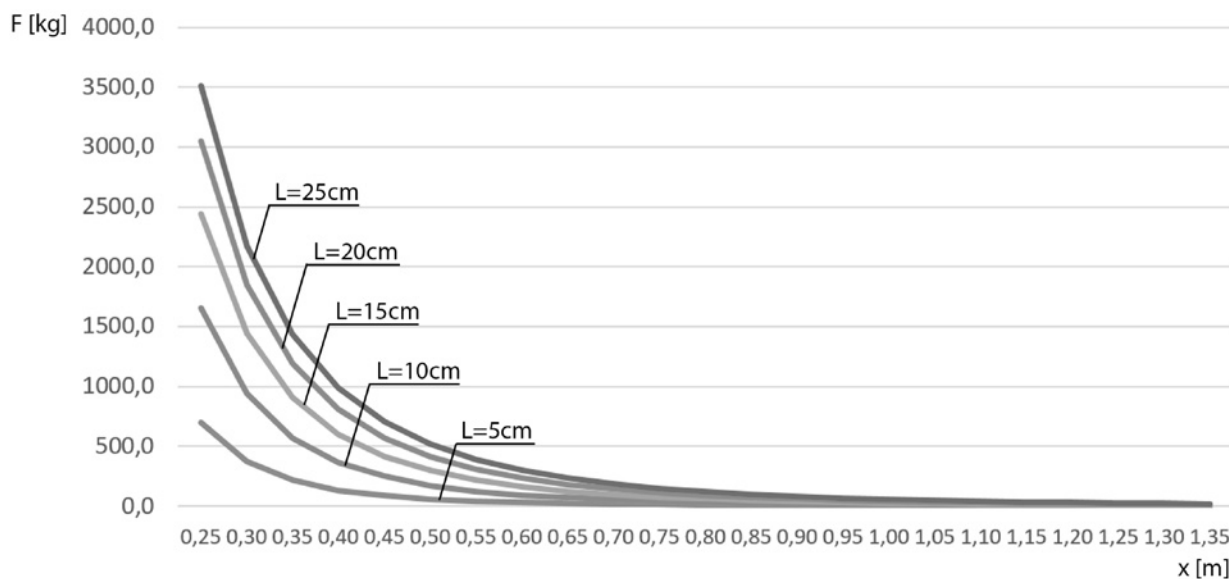
gdzie:

B_r – indukcja remanencji równa 1,3 [T] przyjęta dla magnesów neodymowych (Nd₂Fe₁₄B)

L – wysokość magnesu [m]

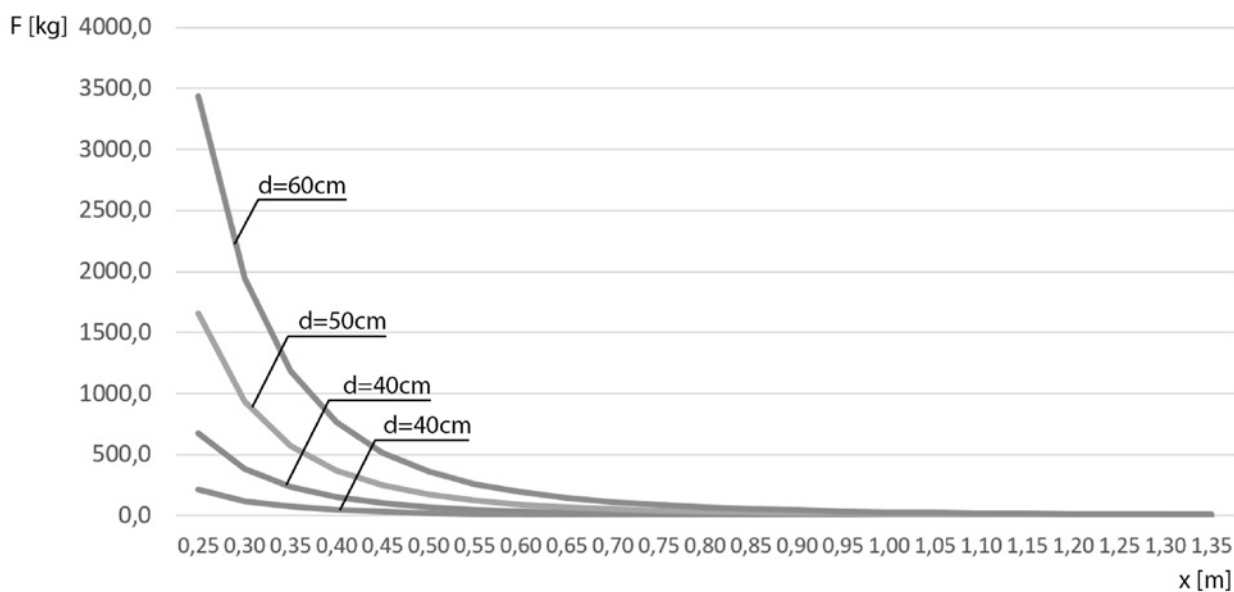
R – promień magnesu [m]

x – odległość powierzchni od powierzchni magnesu ($x=0$) [m].



Ryc. 8. Wartości sił (F) pomiędzy cylindrycznymi magnesami w zależności od odległości pomiędzy nimi (x) oraz wysokości (L) przy średnicy (d) równej 50 cm; źródło: opr. własne

Fig. 8. Values of forces (F) between cylindrical magnets depending on the distance between them (x) and the height (L) with a diameter (d) equal to 50 cm; source: by the author



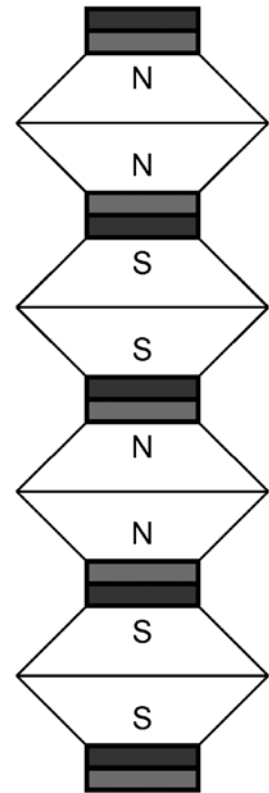
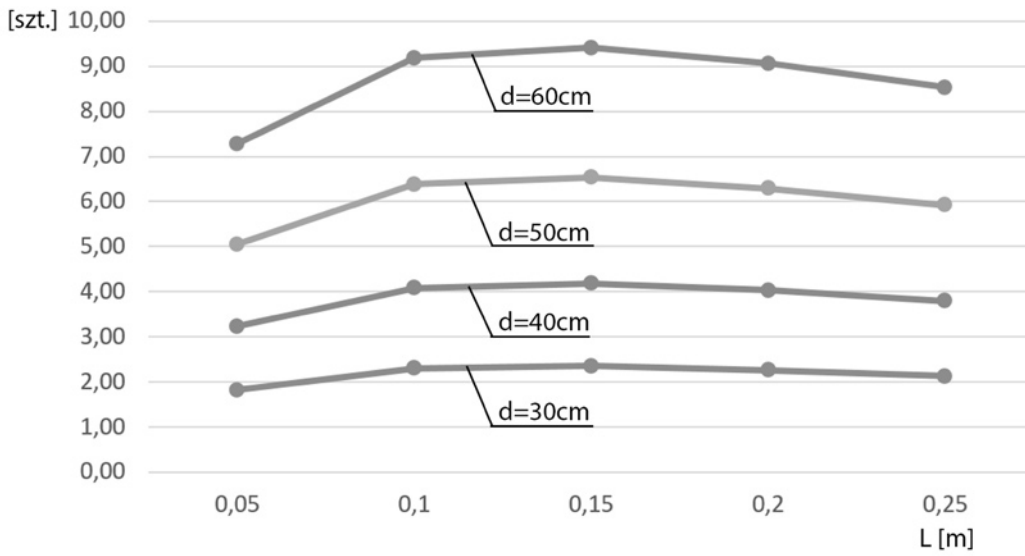
Ryc. 9. Wartości sił (F) pomiędzy cylindrycznymi magnesami w zależności od odległości pomiędzy nimi (x) oraz dla wysokości (L) równej 50 cm i różnych średnic (d) magnesów; źródło: opr. własne

Fig. 9. Values of forces (F) between cylindrical magnets depending on the distance between them (x), and for a height (L) equal to 50 cm and different diameters (d) of the magnets; source: by the author

Na ryc. 8 zestawiono wartości sił F pomiędzy dwoma cylindrycznymi magnesami w zależności od odległości (x) przy założonej średnicy $d = 50$ cm i różnej wysokości magnesów ($L = 5$ cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm oraz 25 cm). Na ryc. 9 zestawiono wartości sił F pomiędzy dwoma cylindrycznymi magnesami w zależności od odległości (x) przy założonej wysokości $L =$

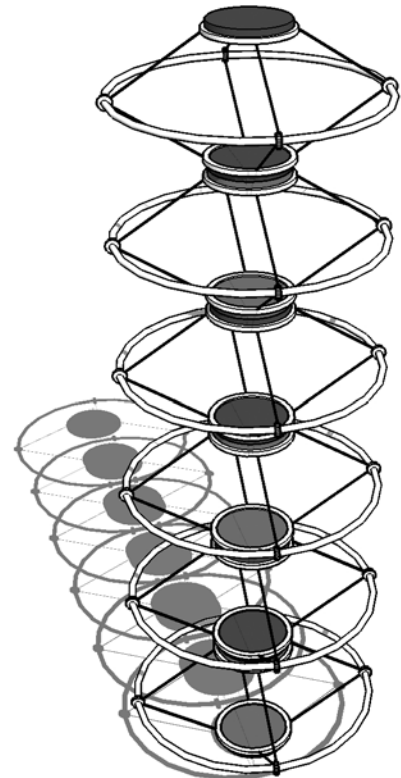
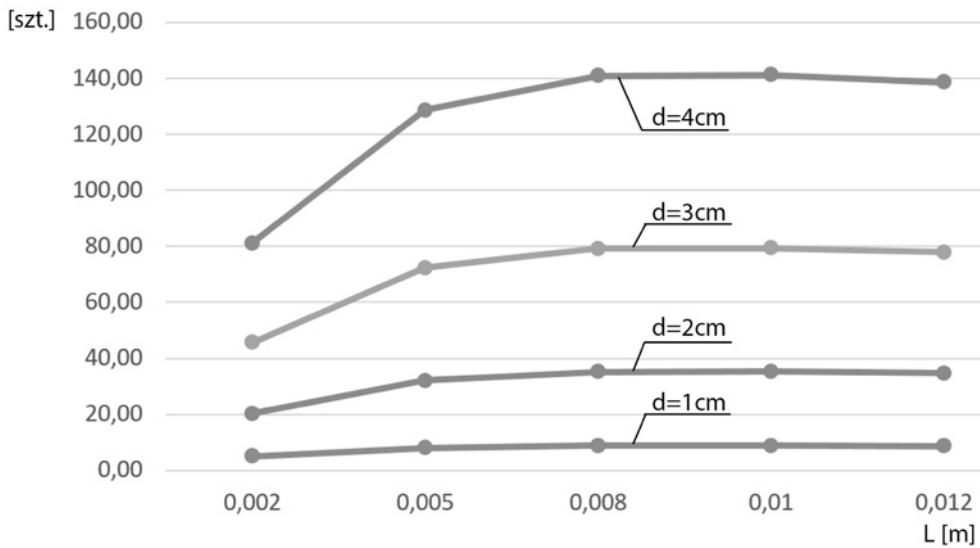
10 cm i różnej średnicy magnesów ($d = 30$ cm, 40 cm, 50 cm oraz 60 cm).

Na ryc. 10 przedstawiono nośność układu konstrukcyjnego (wieży) składającego się z usytuowanych nad sobą magnesów. Wykres pokazuje, ile magnesów mogłoby się znaleźć jeden nad drugim w sytuacji zrównoważenia się ich całkowitego ciężaru z siłą odpycha-



Ryc. 10. a) Wykres liczby cylindrycznych modułów (szt.) możliwych do usytuowania nad sobą w wieży w zależności od ich szerokości (d) oraz wysokości (L) i przy założeniu stałej odległości (x) pomiędzy nimi równej 30 cm, **b)** schemat wieży; źródło: opr. własne

Fig. 10. a) Diagram showing the number of cylindrical modules (pcs) that can be placed in the tower above each other depending on their width (d) and height (L), assuming a constant distance (x) between them equal to 30 cm, **b)** schema of the tower; source: by the author



Ryc. 11. a) Wykres liczby cylindrycznych modułów (szt.) możliwych do usytuowania nad sobą w wieży w zależności od ich szerokości (d) oraz wysokości (L) i przy założeniu stałej odległości (x) pomiędzy nimi równej 2 cm, **b)** perspektywa wieży; źródło: opr. własne

Fig. 11. a) Diagram showing the number of cylindrical modules (pcs) that can be placed in the tower above each other depending on their width (d) and height (L), assuming a constant distance (x) between them equal to 2 cm, **b)** perspective of the tower; source: by the author

Tab. 1. Wysokość konstrukcji przy odległości (x) pomiędzy modułami równej 30 cm
Tab. 1. Construction height with a distance (x) between modules equal to 30 cm

H	L=5cm	L=10cm	L=15cm	L=20cm	L=25cm
d=30cm	0,30	0,60	0,60	0,60	0,60
d=40cm	0,90	1,20	1,20	1,20	0,90
d=50cm	1,50	1,80	1,80	1,80	1,50
d=60cm	2,10	2,70	2,70	2,70	2,40

Źródło: opr. własne
 Source: by the author

Tab. 2. Wysokość konstrukcji przy odległości (x) pomiędzy modułami równej 2 cm
Tab. 2. Construction height with a distance (x) between modules equal to 2 cm

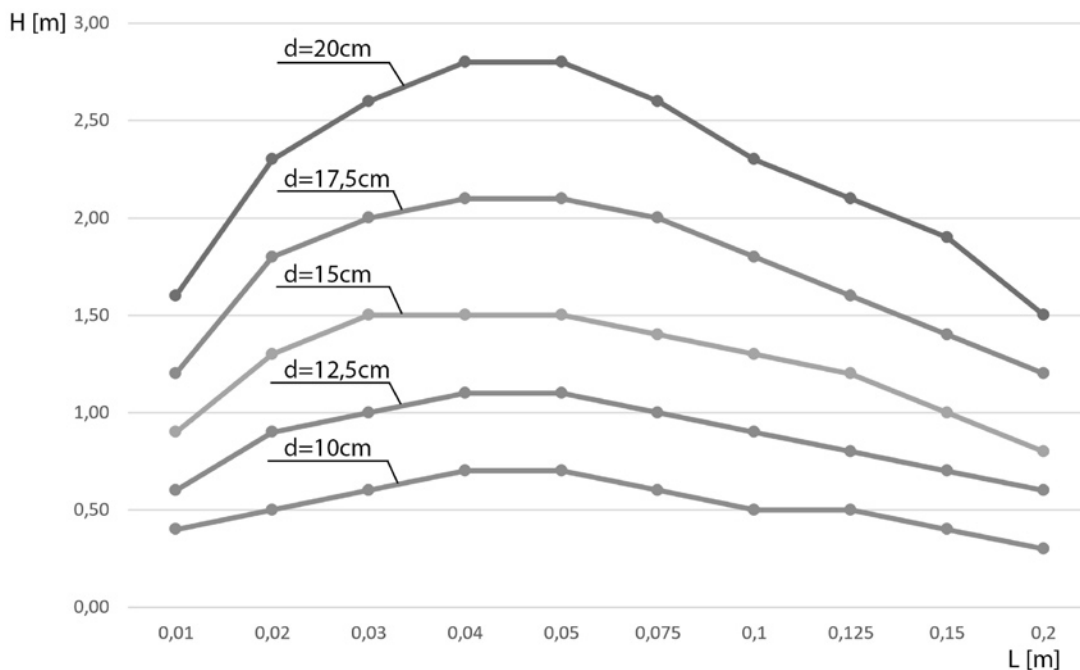
H	L=2mm	L=5mm	L=8mm	L=10mm	L=12mm
d=10mm	0,10	0,16	0,16	0,16	0,16
d=20mm	0,40	0,64	0,70	0,70	0,68
d=30mm	0,90	1,44	1,58	1,58	1,54
d=40mm	1,62	2,56	2,80	2,82	2,76

Źródło: opr. własne
 Source: by the author

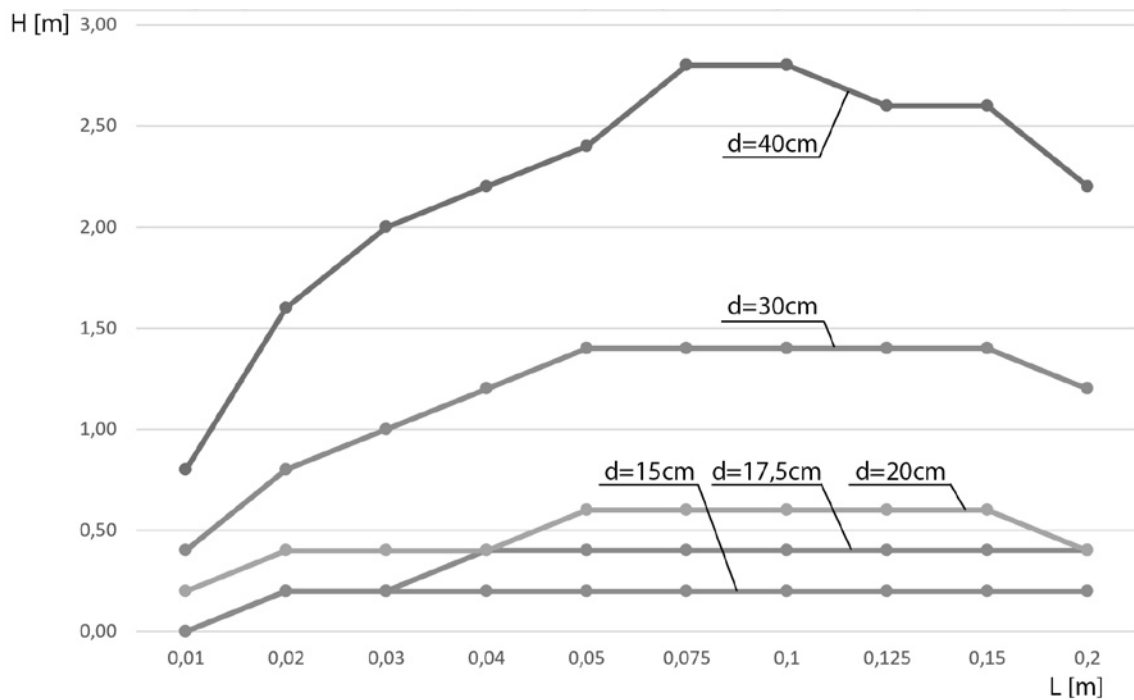
jąca dla najniższej położonej pary magnesów. Przyjęto ciężar objętościowy magnesu równy 7848 kg/m³, równą odległość pomiędzy nimi oraz pominięto ciężar dodatkowej konstrukcji stabilizującej. Z wykresu wynika, że największą nośność można uzyskać dla wysokości L = 15 cm. W przypadku magnesów o małych rozmiarach (d = 1, 2, 3 lub 4 cm; L = 2, 5, 8, 10, lub 12 mm) i odległości x = 2 cm można uzyskać znacznie większą nośność, co pokazano na ryc. 11.

Poniżej pokazano wysokości potencjalnych konstrukcji w zależności od średnicy (d), wysokości (L), przy założonej odległości (x) pomiędzy modułami równej 30 cm (tab. 1) lub 2 cm (tab. 2).

Z wykonanych analiz przeprowadzonych dla macierzy rozwiązań przy d = {1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 30, 40, 50, 60 cm} oraz L = {1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20 cm} uzyskano zależność x / L = 2, co oznacza, że największą nośność posiadają układy, dla których odległości pomiędzy magnesami są tylko dwa razy większe niż wysokości magnesów. Takie układy wydają się niestety niepraktyczne. Poniżej pokazano możliwe do uzyskania wysokości (H) konstrukcji dla różnych średnic (d) i wysokości (L) magnesów przy odległościach (x) pomiędzy magnesami równej 10 cm (ryc. 12) oraz równej 20 cm (ryc. 13).



Ryc. 12. Wysokość konstrukcji (H) w zależności od ich szerokości (d) oraz wysokości (L) i przy założeniu stałej odległości (x) pomiędzy nimi równej 10 cm; źródło: opr. własne
Fig. 12. The height of the construction (H) depending on their width (d) and height (L) and assuming a constant distance (x) between them equal to 10 cm; source: by the author



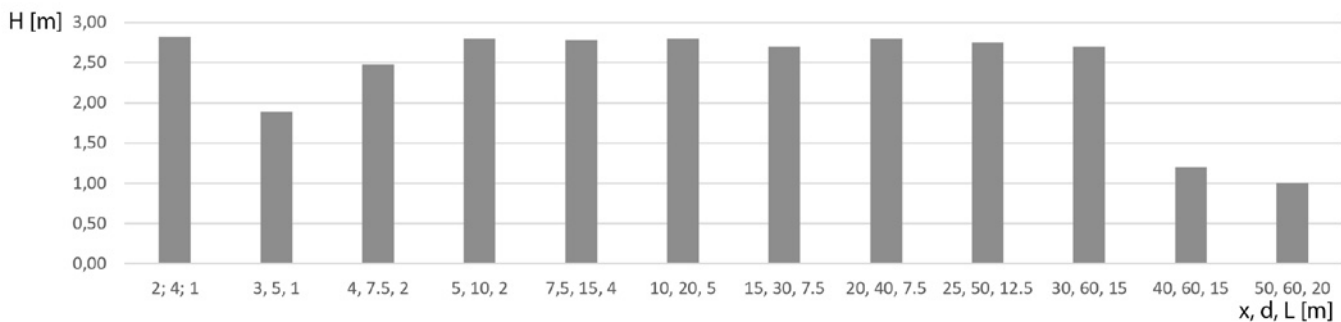
Ryc. 13. Wysokość konstrukcji (H) w zależności od ich szerokości (d) oraz wysokości (L) i przy założeniu stałej odległości (x) pomiędzy nimi równej 20 cm; źródło: opr. własne

Fig. 13. The height of the structure (H) depending on their width (d) and height (L) and assuming a constant distance (x) between them equal to 20 cm; source: by the author

WNIOSKI

W rezultacie powyższych analiz wykazano, że konstruowanie modułowych wież składających się z połączonych w pionie modułów par odpychających się magnesów jest możliwe. Na ryc. 14 pokazano wysokości (H) konstrukcji w zależności od odległości (x) przy wskazanej najkorzystniejszej konfiguracji parametrów (d) oraz (L). We wszystkich przypadkach konstrukcje są niższe niż 3 m.

Ponieważ głównym czynnikiem ograniczającym odległość pomiędzy magnesami (x) oraz wynikającą z niej wysokość konstrukcji (H) jest wartość indukcji magnetycznej na powierzchni magnesów, należy dążyć do jej zwiększenia, co w przypadku naturalnych materiałów jest trudne do uzyskania. Przyszłe prace badawcze oraz eksperymentalne prowadzone będą zatem z użyciem elektromagnesów w sposób umożliwiający uzyskanie odpowiednich wartości sił pomiędzy magnesami a także z możliwością uzyskiwania zmiennego kształtu struktury.



Ryc. 14. Wysokość konstrukcji dla różnych wartości parametrów: odległości pomiędzy modułami (x), średnicy magnesów (d) oraz wysokości (L); źródło: opr. własne

Fig. 14. Construction height for various values of parameters: distance between modules (x), magnet diameter (d) and height (L); source: by the author

LITERATURA

1. **Krausse J., Lichtenstein C. (1999)**, *Your Private Sky. R. Buckminster Fuller Art Design Science*, Lars Müller Publishers, Frankfurt/Main.
2. **Kolbert E. (2008)**, *Dymaxion Man, the visions of Buckminster Fuller*, The New Yorker, New York.
3. **Fuller R.B. (1979)**, *Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking*, Macmillan Pub Co, New York.
4. **Baldwin J. (1996)**, *Buckyworks: Buckminster Fuller's Ideas for Today*, Wiley, New York.
5. **Edmondson A. (2007)**, *Fuller Explanation. The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller*, EmergentWorld LLC, Pueblo.
6. **Abel J.F., Mungan I. (2011)**, *Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures*, Multi Science Publishing Co Ltd, Madrit
7. **Wikipedia**, Force between magnets, https://en.wikipedia.org/wiki/Force_between_magnets, dostęp 05.12.2020.
8. **Supermagnete.de**, How do you calculate the magnetic flux density? <https://www.supermagnete.de/eng/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density>, dostęp 05.12.2020.