

Κατασκευές από ρεγόλιθο: *Η αρχή μιας νέας περιπέτειας στο διάστημα*

Ομιλητής: Δρ Γεώργιος Καμπάς

Συνιδρυτής και Διευθύνων Σύμβουλος της Rcube PC

Visiting Fellow @University of Greenwich

Designing for the Future: Optimising the structural form of regolith-based monolithic vaults in low-gravity conditions

EY: Δρ Γεώργιος Καμπάς, *Rcube*

- Κύριος Μεταδιδακτορικός ερευνητής: Δρ Νικόλαος Καλαπόδης, *Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου*
- Υλικά/Πειραματική διερεύνηση: Δρ Πάνος Κλουκίνας, *University of Greenwich*
- Σεισμική επικινδυνότητα: Δρ Όλγα-Τζοάν Κτενίδου, *Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών* και Δρ. Γεώργιος Ζαλαχώρης, *Omikron Kappa consulting*
- Βελτιστοποίηση δομικής μορφής: Dr Christian Malaga-Chuquitaype, *Imperial College London* and Dr Milad Memarzadeh, *NASA Ames Research Center*
- Φυγοκεντρητής: Prof Jonathan Knappett, *University of Dundee*

Για περισσότερες πληροφορίες:

XO-Structures research group <https://www.xo-structures.com/>

- Εισαγωγή
- Ρεγόλιθος: *ιδιότητες*
- Σεισμική επικινδυνότητα
- Ρεγόλιθος σαν δομικό υλικό
- Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη
- Η δική μας πρόταση

Εισαγωγή

Πρώτες κατασκευές εκτός Γης

- Δεν υπάρχει ατμόσφαιρα
- Διαφορετικοί τύποι ακτινοβολίας: *ηλιακός άνεμος, ηλιακές εκλάμψεις, κοσμική ακτινοβολία*
- Επαναχρησιμοποιούμενα μέσα μεταφοράς: *περιορισμός χώρου + πολύ ακριβή μεταφορά*
- Συνθήκες μερικής βαρύτητας
- Φυσικοί κίνδυνοι: *σεισμοί, κρούσεις μετεωριτών, ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, κ.τ.λ.*







ΡΕΓΟΛΙΘΟΣ

ΡΕΓΟΛΙΘΟΣ

Ρεγόλιθος: ιδιότητες

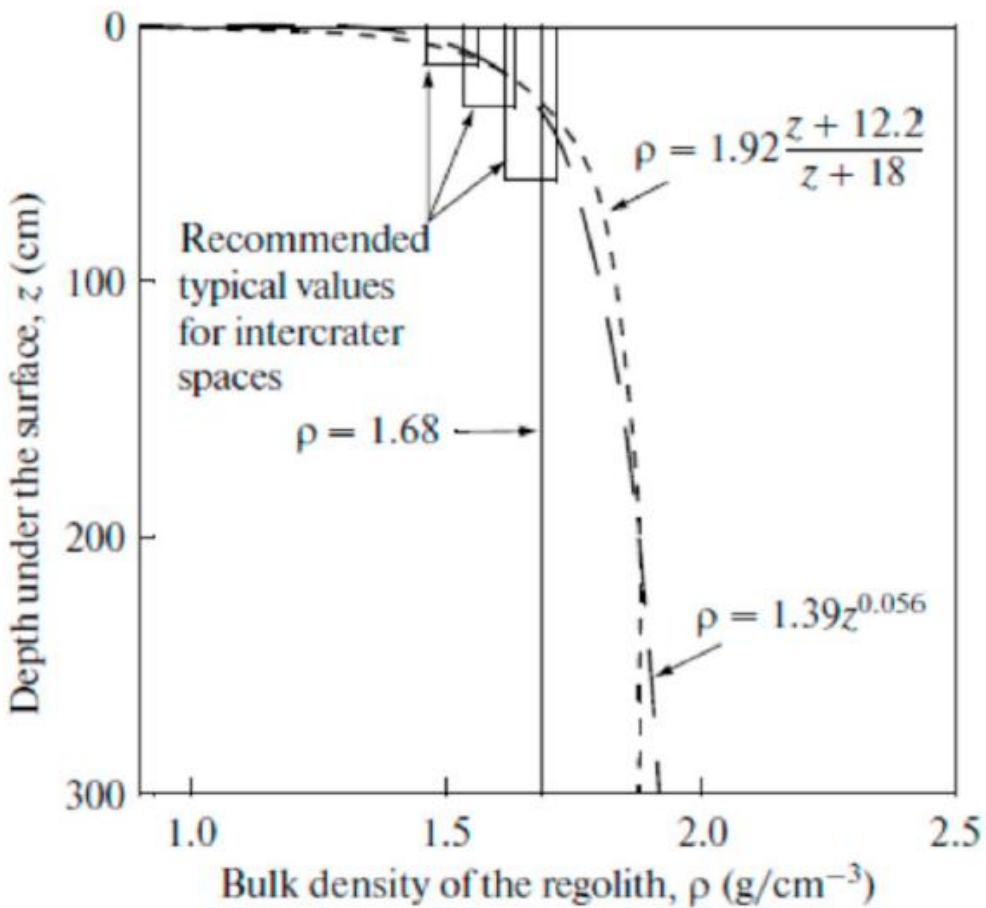


Fig. 1. The hyperbolic dependence of the bulk density of Lunar regolith versus depth (dashed curve) [28].

Table 1
Lunar soil density according to depth range [27].

Depth range (cm)	Bulk density, ρ (g/cm ³)	Relative density, D_R (%)
0–15	1.50 ± 0.05	65 ± 3
0–30	1.58 ± 0.05	74 ± 3
30–60	1.74 ± 0.05	92 ± 3
0–60	1.66 ± 0.05	83 ± 3

Table 3
Typical values of cohesion and internal friction angle for a Lunar surface ground layer of 60 cm [28]. The mean and range of values are given.

Depth Interval (cm)	Cohesion (kPa)		Internal friction angle (°)	
	mean	range	mean	range
0–15	0.52	0.44–0.62	42	41–43
0–30	0.90	0.74–1.10	46	44–47
30–60	3.00	2.40–3.80	54	52–55
0–60	1.60	1.30–1.90	49	48–51

Ρεγόλιθος: ιδιότητες



Table 2
Geotechnical properties of the original Lunar regolith samples.

Mission	Description	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Reference
Lunar Orbiter (1966)	Boulder track analysis	0.35	33	Nordmeyer (1967) [29]
Surveyor I (1966)	Strain gage and TV data	0.15–15	55	Jaffe (1967) [30]
Surveyor III and VI (1967)	Soil mechanics surface sampler	0.35–0.70	35–37	Scott and Roberson (1969) [31]
Lunar Orbiter (1966)	Boulder track analysis	0.1	10–30	Moore (1970) [32]
Apollo 11 (1969)	Penetrometer tests in LRL on bulk soil sample	0.3–1.4	35–45	Costes et al. (1970) [33]
Apollo 11 (1969)	Penetration of core tubes, flagpole, SWC shaft	0.8–2.1	37–45	Costes et al. (1971) [34]
Apollo 12 (1969)	Penetration of core tubes, flagpole, SWC shaft	0.6–0.8	38–44	Costes et al. (1971) [34]
Apollo 14 (1971)	Soil mechanics trench	<0.03–0.3	35–45	Mitchell et al. (1971) [35]
Apollo 15 (1971)	Measured at station 8	1.92–2.01 (typical 1.97)	47.5–51.5 (typical 49.5)	Mitchell et al. (1972b) [36]
Luna-16 (1970)	Lunar soil from Mare Fecunditatis	5.1	25	Leonovich et al. (1974) [25]

Ρεγόλιθος: ιδιότητες

Table 4
Mechanical properties of Lunar regolith simulants.

Simulant	Description	ρ (g/cm ³)	D_R (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Reference
JSC-1	The simulant was created at the Johnson Space Center (JSC), USA, targeting Lunar mare regolith. It contains a low percentage of titanium and a high abundance of glass.	1.90	–	0.2	49	Perkins et al. (1991) [41]
		–	–	2.4–3.8	52–55	Carrier et al. (1991) [28]
		1.50 1.60 1.65	–	≤1	45	McKay (1994) [42,43]
		1.62 1.72	40 60	3.9 13.4	44.4 52.7	Klosky et al. (1996) [44]
		1.33–1.80	–	0	48–64	Perkins and Madson (1996) [45]
		1.62 1.72 1.81	–	3.9 6.2 14.4	44.3 49.5 53.6	Klosky et al. (2000) [46]
FJS-1	This simulant originated in Japan (Fuji volcano) and was designed to simulate the low-titanium Lunar soil brought by the Apollo 14 mission	1.55	–	8	37.2	Kanamori et al. (1998) [47]
FJS-2	It contains more olivine and simulates the properties of the Apollo 14 soil better than FJS-1	1.55	–	3	39.4	
FJS-3	It was produced by adding ilmenite and olivine in FJS-1 and can simulate the properties of the Apollo 11 soil	1.55	–	4	32.5	
MLS-1	This simulant was developed in the University of Minnesota, USA, and can simulate the properties of the Apollo 11 sample	1.56–2.20	–	0	48–58	Perkins and Madson (1996) [45]
JSC-1A	JSC-1A is a modification of JSC-1, targeting the mare Lunar regolith. It is mined in the volcanic field of the San Francisco area.	–	53–95	3.9–14.4	44.4–53.6	Klosky et al. (2000) [46]
		1.63–1.88	20–75	2.0–5.0	37–48	Alshibli and Hasan (2009) [48]
		1.66–1.94	24.6–84.6	–	41.87–56.70	Zeng et al. (2010) [49]
TJ-1	The simulants are created with the use of volcanic ash deposits collected from northern China. These are simulants of low-titanium basaltic regolith produced by Tongji University in China.	1.36	–	0.86	47.6	Jiang et al. (2012) [50]
TJ-2		1.45	–	1.03	46.9	Jiang et al. (2012) [50]
GRC-3	This simulant was created using Bonnie silt (which is a natural loess) excavated from a site in Burlington, Colorado (US). Such a simulant is applied for the evaluation of traction forces to the wheels of a rover.	1.63–1.84	30.4–80.3	–	37.8–47.8	He et al. (2013) [51]
CAS-1	This simulant is composed of low-titanium basaltic scoria from the Changbai mountains in northeast China and was developed by the Chinese Academy of Science to support the Lunar orbiter mission. It is designed to match the Lunar sample brought by the Apollo 14 mission.	1.03–2.04 (Compacted-state density) 0.73–1.72 (Loose-state density)	–	0–12	33.3–41.8	Lu and Jianguo (2014) [52]
BP-1	It is developed by the Kennedy Center/Arizona, USA, and consists of crumbled basalt. It also matches the low-titanium Lunar soil of basaltic composition.	1.43–1.86	–	0–2.0	39–51	Suescun-Florez et al. (2015) [53]



Ρεγόλιθος: ιδιότητες



Table 6
Mechanical properties of the surface Martian regolith.

Mission	Description	ρ (g/cm ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	Reference
Viking Lander 1	Scoop trenching and landing pad sinking	1.15 ± 0.15	1.6 ± 1.2 0–3.7	18 ± 2.4	Moore et al. (1982) [69] Moore et al. (1987) [70] Moore & Jakosky (1989) [67]
Viking Lander 1	Scoop trenching and landing pad sinking	1.60 ± 0.40	5.1 ± 2.7 2.2–10.6	30.8 ± 2.4	Moore et al. (1982) [69] Moore et al. (1987) [70] Moore & Jakosky (1989) [67]
Viking Lander 1 & 2	Scoop trenching and landing pad sinking	2.60	1–10	40–60	Moore et al. (1982) [69] Moore et al. (1987) [70] Moore & Jakosky (1989) [67]
Viking Lander 2	Scoop trenching and landing pad sinking	1.40 ± 0.20	1.1 ± 0.8 0–3.2	34.5 ± 4.7	Moore et al. (1982) [69] Moore et al. (1987) [70] Moore & Jakosky (1989) [67]
MPF Sojourner	Wheel dig trenching	2.0–2.2	0.34–0.57	31.4–42.2	Moore et al. (1999) [63]
MPF Sojourner	Wheel dig trenching	1.07–1.27	0.18–0.53	15.1–33.1	Moore et al. (1999) [63]

Table 7
Mechanical properties of Martian regolith simulants.

Simulant	Description	ρ (g/cm ³)	D_R (%)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	Reference
JSC Mars-1	Accounts for the oxidized Martian soil and is a fraction of altered volcanic ash from a cindered one that originates in Hawaii	0.835 0.90–1.15	0–96	1.91 0.61–0.85	47 40.8–41.4	Allen et al. (1998) [77] Perko et al. (2006) [76]
JPL Lab 107	Collected at the Jet Propulsion Laboratory (JPL); consists of dust-free washed silica sand	1.47–1.67	26–100	0.67–1.41	33.3–33.7	Perko et al. (2006) [76]
JPL Lab 82	Collected at JPL; consists of dust-free washed ruby garnet mix	2.44–2.56	64–95	0.69–0.99	33.7–38.3	Perko et al. (2006) [76]
MER Yard 317	Obtained from the indoor MER test facility and created by crushing volcanic rock	1.48–1.69	14–74	1.49	47.9–53.3	Perko et al. (2006) [76]
MARS Yard	Taken from the outdoor Mars Yard and created by decomposed granite brick cinder and dust from washed sand	1.62–1.79	45–103	0.93–0.99	35.1–37.2	Perko et al. (2006) [76]
MMS sand I	Basaltic simulant in rock, sand and dust form. The source rock of the simulant is mined from the Tertiary Tropico group in the western Mojave	1.384		0.81	38	Peters et al. (2008) [78]
MMS sand II	desert. The sand and dust gradients are produced by mechanically crushing basaltic boulders.	1.341		1.96	39	Peters et al. (2008) [78]
MMS dust I		1.078		0.38	31	Peters et al. (2008) [78]
MMS dust II		0.911		0.53	30	Peters et al. (2008) [78]
ES-1	Sandy material, based upon Nepheline sternoy 7. Intended to resemble the characteristics of the top-soil on Mars.	1.30 1.50		0.50–1.50 0.50–2.00	16–21 18–24	Brunskill et al. (2011) [79]
ES-2	Sandy material, based upon Red Hill 110. Intended to resemble the characteristics of the terrestrial medium-fine to coarse quartz sands.	1.45 1.60		0.00–1.50 0.00–1.50	23–27 29–34	Brunskill et al. (2011) [79]
ES-3	Sandy material, based upon Leighton buzzard DA 30. Intended to resemble the characteristics of the terrestrial medium-fine to coarse quartz sands.	1.55 1.80		0.00–0.30 0.00–0.30	30–40 35–42	Brunskill et al. (2011)
JMSS-1	Developed by the Chinese Academy of Science. Produced by the mechanical crushing of Jining basalt including small amounts of magnetite and hematite.	1.45		0.33	40.6	Zeng et al. (2015)

Ρεγόλιθος: ιδιότητες

Table 9

Numeration of the Lunar and Martian original samples and simulants.

LUNAR REGOLITH				MARTIAN REGOLITH			
	n.a	Mission/Simulant	Reference		n.a	Mission/Simulant	Reference
ORIGINAL SAMPLES	1	Lunar Orbiter (1966)	Nordmeyer (1967) [29]	ORIGINAL SAMPLES	1	Viking Lander 1 (1975)	Moore et al. (1982) [69]
	2	Surveyor I (1966)	Jaffe (1967) [30]		2	Viking Lander 1 (1975)	Moore et al. (1987) [70]
	3	Lunar Orbiter (1966)	Moore (1970) [32]		3	Viking Lander 1 (1975)	Moore and Jakosky (1989) [67]
	4	Surveyor III and VI (1967)	Scott and Roberson (1969) [1]		4	Viking Lander 1 (1975)	Moore et al. (1982) [69]
	5	Apollo 11 (1969)	Costes et al. (1970) [33]		5	Viking Lander 1 (1975)	Moore et al. (1987) [70]
	6	Apollo 11 (1969)	Costes et al. (1971) [34]		6	Viking Lander 1 (1975)	Moore and Jakosky (1989) [67]
	7	Apollo 12 (1969)	Costes et al. (1971) [34]		7	Viking Lander 1&2 (1975)	Moore et al. (1982) [69]
SIMULANTS	8	Luna-16 (1970)	Leonovich et al. (1974) [25]	SIMULANTS	8	Viking Lander 1&2 (1975)	Moore et al. (1987) [70]
	9	Apollo 14 (1971)	Mitchell et al. (1971b) [35]		9	Viking Lander 1&2 (1975)	Moore and Jakosky (1989) [67]
	10	Apollo 15 (1971)	Mitchell et al. (1972b) [36]		10	Viking Lander 2 (1975)	Moore et al. (1982) [69]
	11	JSC-1	Perkins et al. (1991) [41]		11	Viking Lander 2 (1975)	Moore et al. (1987) [70]
	12	JSC-1	Carrier et al. (1991) [28]		12	Viking Lander 2 (1975)	Moore and Jakosky (1989) [67]
	13	JSC-1	McKay (1994) [42,43]		13	MPF Sojourner (1996)	Moore et al. (1999) [63]
	14	JSC-1	Klosky et al. (1996) [44]		14	MPF Sojourner (1996)	Moore et al. (1999) [63]
	15	JSC-1	Perkins and Madson (1996) [45]		15	JSC Mars-1	Allen et al. (1998) [77]
	16	MLS-1	Perkins and Madson (1996) [45]		16	JSC Mars-1	Perko et al. (2006) [76]
	17	FJS-1	Kanamori et al. (1998) [47]		17	JPL Lab 107	Perko et al. (2006) [76]
	18	FJS-2	Kanamori et al. (1998) [47]		18	JPL Lab 82	Perko et al. (2006) [76]
	19	FJS-3	Kanamori et al. (1998) [47]		19	MER Yard 317	Perko et al. (2006) [76]
	20	JSC-1	Klosky et al. (2000) [46]		20	MARS Yard	Perko et al. (2006) [76]
	21	JSC-1A	Klosky et al. (2000) [46]		21	MMS sand I	Peters et al. (2008) [78]
	22	JSC-1A	Alshibli and Hasan (2009) [46]		22	MMS sand II	Peters et al. (2008) [78]
	23	JSC-1A	Zeng et al. (2010) [49]		23	MMS dust I	Peters et al. (2008) [78]
	24	TJ-1	Jiang et al. (2012) [50]		24	MMS dust II	Peters et al. (2008) [78]
	25	TJ-2	Jiang et al. (2012) [50]		25	ES-1	Brunskill et al. (2011) [79]
	26	GRC-3	He et al. (2013) [51]		26	ES-1	Brunskill et al. (2011) [79]
	27	CAS-1	Lu and Jianguo (2014) [52]		27	ES-2	Brunskill et al. (2011) [79]
	28	BP-1	Suescun-Florez et al. (2015) [53]		28	ES-2	Brunskill et al. (2011) [79]
					29	ES-3	Brunskill et al. (2011) [79]
					30	ES-3	Brunskill et al. (2011) [79]
					31	JMSS-1	Zeng et al. (2015) [80]

Ρεγόλιθος: ιδιότητες

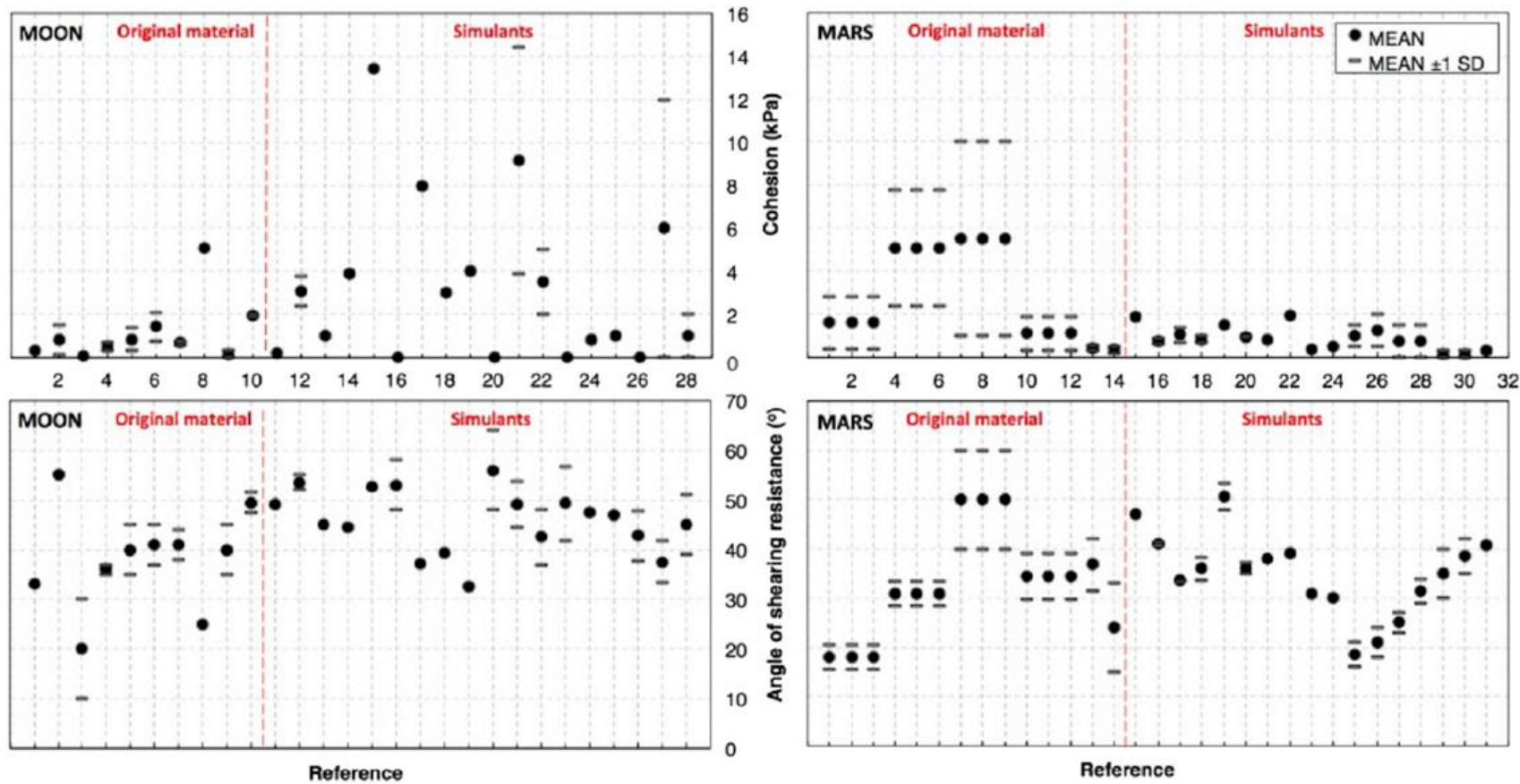


Fig. 2. Mechanical characteristics (cohesion up and angle of friction/shearing resistance down) for the original Lunar and Martian regolith along with the corresponding simulants. The box-and-whisker markers indicate mean values and ranges, where available from the original source. The x axis indicates bibliographical references as numbered in [Table 9](#).

Ρεγόλιθος: μηχανικές ιδιότητες



Table 5
Chemical composition of the Lunar original samples and their simulants.

Oxide (wt%)	Original Lunar Samples (Mean values)									Lunar Simulants (Mean values or ranges)								
	Apollo Missions						Luna Missions			Made in US			Made in Japan			Made in China		
	11	12	14	15	16	17	16	20	24	MLS-1	JSC-1	JSC-1A	BP-1	FJS-1	FJS-2	FJS-3	TJ-1	CAS-1
	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(b)	(c)-(d)	m.d*	(e)	(a)	(a)	(a)	(f)	(g)
SiO ₂	42.2	46.3	48.1	46.9	45	43.2	41.7	45.1	43.9	43.9	47.7	46–49	47.2	49.1	49.7	46	47.7	49.24
TiO ₂	7.8	3	1.7	1.4	0.54	4.2	3.4	0.55	1.3	6.3	1.6	1–2	2.3	1.9	1.7	6.7	2	1.91
Al ₂ O ₃	13.6	12.9	17.4	14.6	27.3	17.1	15.3	22.3	12.5	13.7	15	14.5–15.5	16.7	16.2	14.8	13.7	16.2	15.8
Cr ₂ O ₃	0.3	0.34	0.23	0.36	0.33	0.33	0.28	–	0.32	–	0.04	0.02–0.06	–	–	–	–	–	–
FeO	15.3	15.1	10.4	14.3	5.1	12.2	16.7	7	19.8	13.4	7.4	7–7.5	6.2	8.3	8.2	7.9	–	11.47
Fe ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2.6	3.4	3–4	5.9	4.8	4.7	5.9	10.75	–
MnO	0.2	0.22	0.14	0.19	0.3	0.17	0.23	0.13	0.25	0.2	0.18	0.15–0.20	0.21	0.19	0.19	0.28	0.15	0.14
MgO	7.8	9.3	9.4	11.5	5.7	10.4	8.8	9.8	9.4	6.7	9	8.5–9.5	6.5	3.8	8.1	7.3	5.04	8.72
CaO	11.9	10.7	10.7	10.8	15.7	11.8	12.5	15.1	12.3	10.1	10.4	10–11	9.2	9.1	8.4	7.8	8.21	7.25
Na ₂ O	0.47	0.54	0.7	0.39	0.46	0.4	0.34	0.5	0.31	2.1	2.7	2.5–3	3.5	2.8	2.6	2.6	4.92	3.08
K ₂ O	0.16	0.31	0.55	0.21	0.17	0.13	0.1	0.1	0.04	0.28	0.82	0.75–0.85	1.1	1	0.92	0.87	2.29	1.03
P ₂ O ₅	0.05	0.4	0.51	0.18	0.11	0.12	0.12	0.16	0.11	0.2	0.66	0.6–0.7	0.52	0.44	0.4	0.39	0.58	0.3
BaO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.06	–
NiO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.09	–
S	0.12	–	–	0.06	0.07	0.09	0.21	0.08	0.14	–	–	–	–	–	–	–	–	–
H ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.43	0.47	0.58	–	–
Total	99.9	99.6	99.8	100.8	100.8	100.5	99.7	100.8	100.4	99.5	98.9		99.33	98.14	100.2	100	98.9	99.46

*m.d.: Manufacturer Data (a) Kanamori et al. (1998) [47] (b) Weiblen et al. (1990) [54] (c) McKay et al. (1993) [55] (d) McKay et al. (1994) [42,43] (e) Jiang et al. (2012) [50] (f) Zheng et al. (2009) [56] (g) Stoesser and Rickman (2010) [57].

Ρεγόλιθος: ιδιότητες



Table 8

Chemical composition of the Martian original material and their simulants.

Oxide (wt%)	Original Martian material tested <i>in-situ</i> (Mean values)						Martian Simulants (Mean values or ranges)					
	Viking Landers		Pathfinder	Pathfinder	MER	MER	Made in US			Made in UK		Made in China
	1	2		Soil	MER-1/Oppy	MER-2/Spirit	JSC MARS-1	MMS-I	MMS-II	MGS-1	Y-Mars	JMSS-1
	(a)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(b)	(f)	(f)	(g)	(h)	(i)
SiO ₂	43	43	44	42	43.80	45.8	34.5–43.5	49.4	43.8	45.57	44.97	49.28
TiO ₂	0.66	0.56	1.1	0.80	1.08	0.81	3–3.8	1.09	0.83	0.30	0.77	1.78
Al ₂ O ₃	7.3	7.0	7.5	10.30	8.60	10	18.5–23.3	17.1	13.07	9.43	13.31	13.64
Cr ₂ O ₃	–	–	–	0.30	0.46	0.35	–	0.05	0.04	0.12	–	–
FeO	–	–	–	–	–	15.8	–	–	–	16.85	–	–
Fe ₂ O ₃	18.5	17.8	16.5	21.70	15.60	–	12.4–15.6	10.87	18.37	–	7.57	16.00
MnO	–	–	–	0.30	0.36	0.31	0.2–0.3	0.17	0.13	0.10	0.18	0.14
MgO	6	6	7.0	7.30	7.10	9.3	2.7–3.4	6.08	6.66	16.50	14.32	6.35
CaO	–	–	5.6	6.10	6.67	6.1	4.9–6.2	10.45	7.98	4.03	7.65	7.56
Na ₂ O	–	–	2.1	2.80	1.60	3.3	1.9–2.4	3.28	2.51	3.66	2.23	2.92
K ₂ O	0.15	0.15	0.3	0.60	0.44	0.41	0.5–0.6	0.48	0.37	0.43	0.08	1.02
P ₂ O ₅	–	–	–	0.70	0.83	0.84	0.7–0.9	0.17	0.13	0.37	0.09	0.3
BaO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NiO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SO ₃	6.6	8.1	4.9	6.00	5.57	5.82	–	0.10	6.11	2.63	–	–
Cl	0.7	0.5	0.5	0.90	0.44	0.53	–	–	–	–	–	–
H ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Total	88.8	75.8	89.5	99.80	99.18	99.37	–	99.24	100.0	99.99	–	99.47

(a) Banin et al. (1992) [81] (b) Allen et al. (1998) [77] (c) Foley et al. (2003) [82] (d) Rieder et al. (2004) [83] (e) Gellert et al. (2004) [84] (f) Peters et al. (2008) [78] (g) Cannon et al. (2019) [85] (h) Stevens et al. (2018) [86] (i) Zeng et al. (2015) [80].

Γεωτεχνικές εργασίες



Fig. 5. Use of KOHLS-1. a) Prototype tile; b) Compression strength tests [93].



Fig. 6. Proof of concept of the robotic construction of a 20-m VTVL landing pad. a) In-situ basalt Moon-scape; b) Paver deployment mechanism (PDM) [94].

Table 10 Summary of anchoring methods in extraterrestrial environments.		
Anchoring & drilling technique	Description	Reference
Helical anchoring (Fig. 3a)	Focusing on the practicality of the helical anchoring method and its resistance to uplift; developed through experimental work performed on JSC-1 Lunar simulant.	Klosky et al. (1998) [87]
Suction drilling (Fig. 3b)	A drilling technique that takes advantage of pumping the grained soil out of the borehole by using cold gas flow. For the case of the Moon, the lack of atmosphere means the amount of gas needed for the drill should be included in the weight budget. On the other hand, the thin Martian atmosphere will provide an unlimited gas resource.	Kömle et al. (2008) [89]
Circular wedge anchoring (Fig. 3c)	Experimental study focusing on the assessment of the effect of circular wedge anchoring applied on a compacted Lunar simulant. The main goal is the establishment of verified anchoring standards (which can be applied to the design of Lunar facilities) through the development of a function between pull-out force and theoretical models of the failure mechanism.	Chang et al. (2010) [90]
Claw anchoring (Fig. 3d)	The proposed method uses the Discrete Element Method (DEM) for evaluating the perpendicular (with respect to the surface) and holding forces exhibited by claw anchoring. Both engagement and disengagement forces are referred to as perpendicular forces, since they are pointed into or out of the surface.	Ebert & Larochelle (2016) [91]

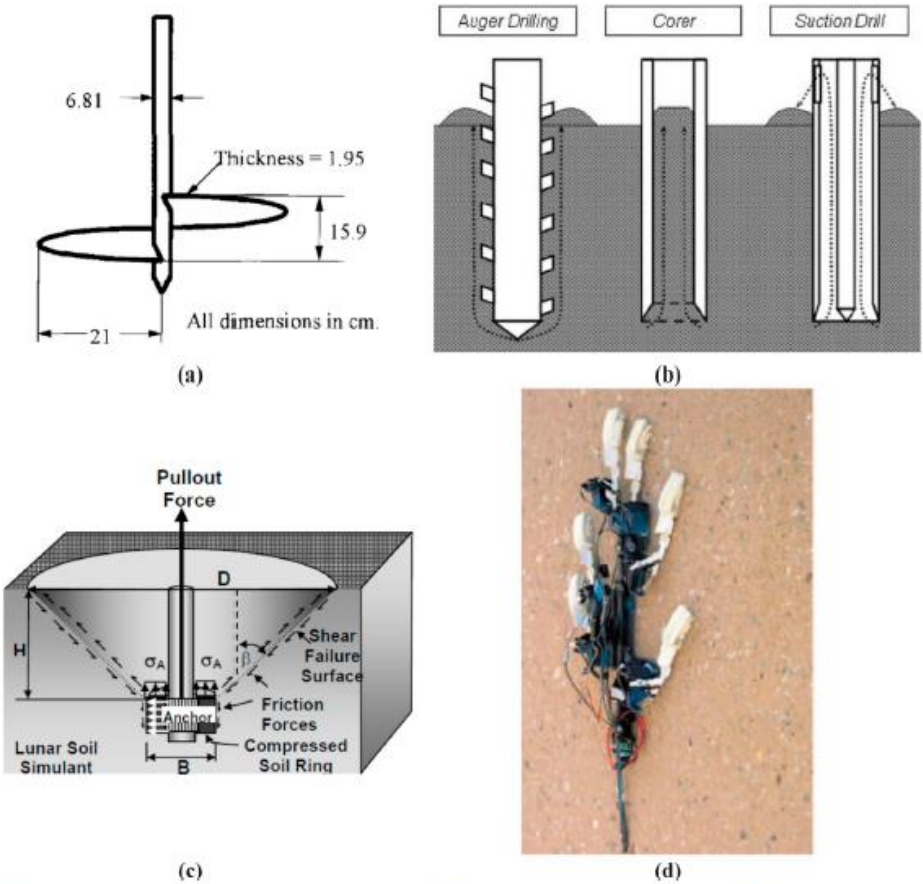


Fig. 3. Anchoring and drilling techniques. a) Helical anchoring, Klosky et al. [87]; b) Suction drilling, Kömle et al. [89]; c) Circular wedge anchoring, Chang et al. [90]; d) Claw anchoring, Ebert & Larochelle [91].

Σεισμική επικινδυνότητα

Αποστολές Apollo 1969-1977

Εγκατέστησαν σειсмоγράφους σε 4 περιοχές

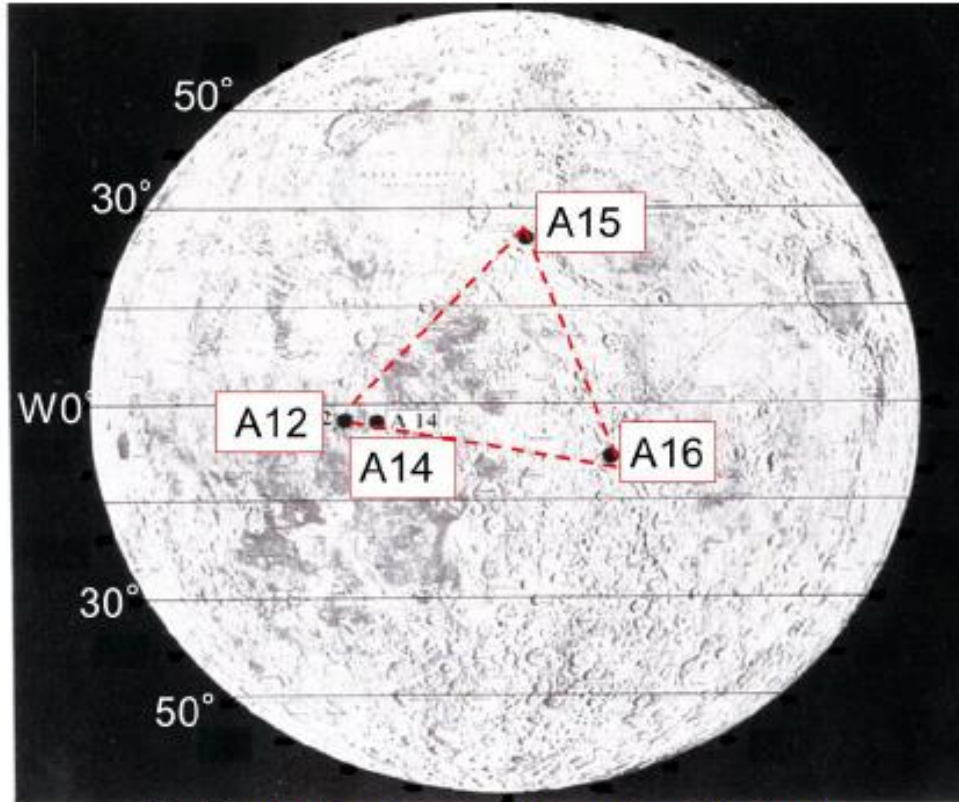
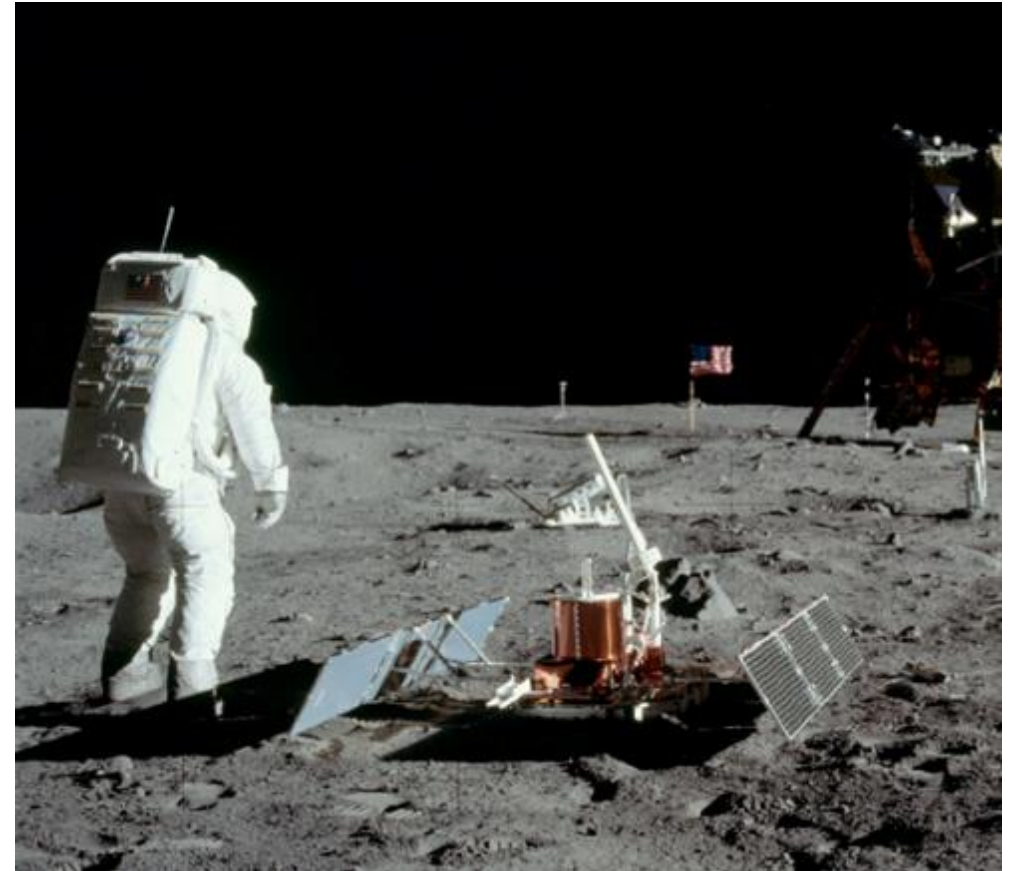


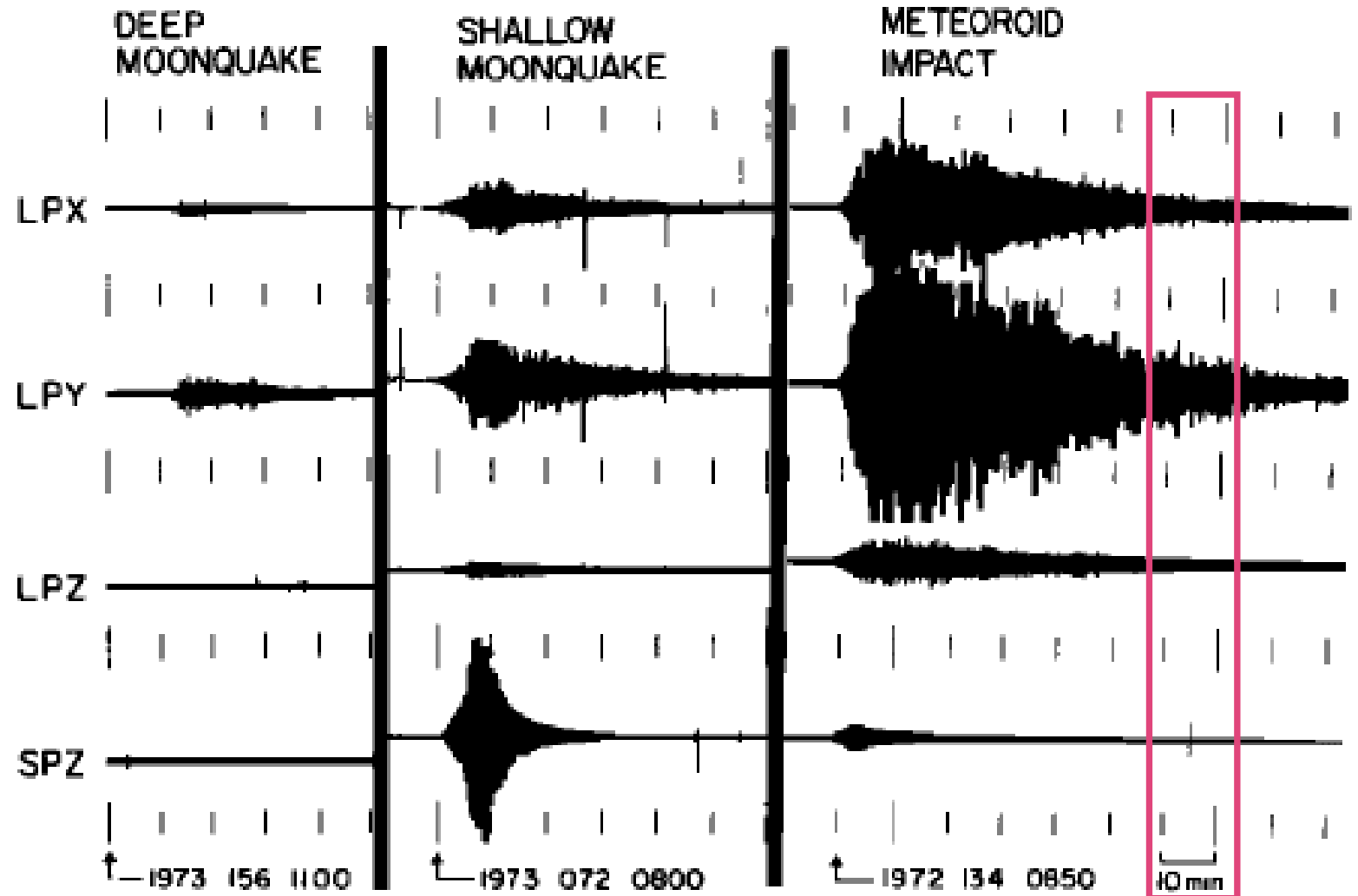
Fig.1 Apollo Passive Seismic Experiment Network
(Edited figure from reference [1])



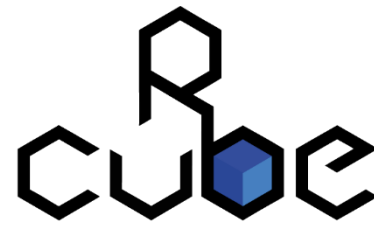
Σεισμική επικινδυνότητα

Παρατηρήστε τις
μεγάλες
διάρκειες!!!

(τυπικές διάρκειες
στην Γη για
σεισμικές
αναλύσεις:
< 1 λεπτό!)



Σεισμική επικινδυνότητα

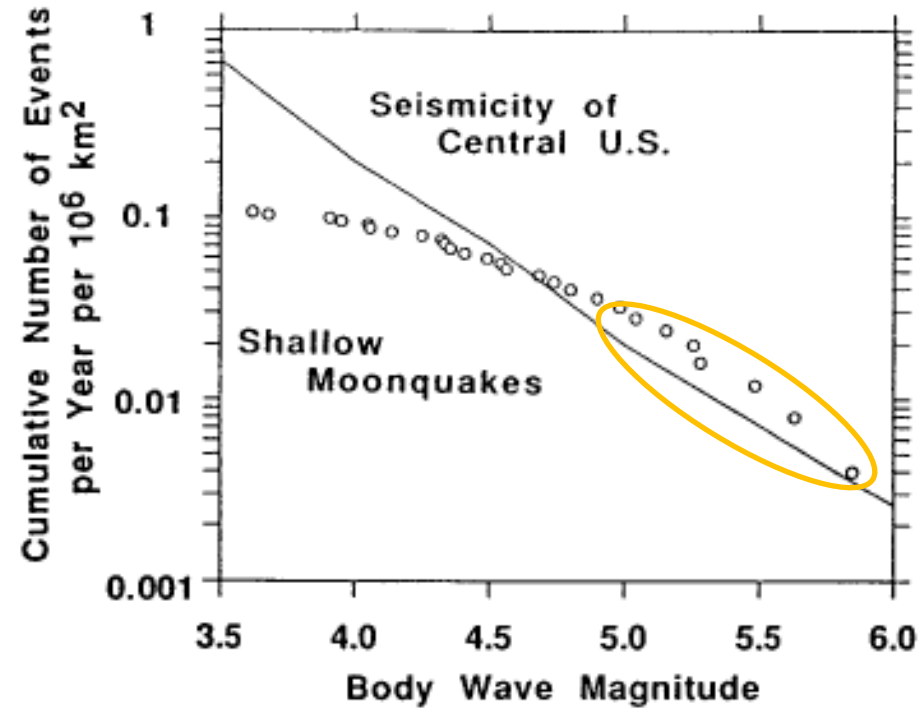


ResearchRobustnessResilience

A SEISMIC RISK FOR THE LUNAR BASE

Jürgen Oberst and Yosio Nakamura

*Institute for Geophysics and Department of Geological Sciences
The University of Texas at Austin
Austin TX 78713*



8 χρόνια ως περίοδος παρακολούθησης είναι μικρή

Μεγαλύτερα γεγονότα αναμένονται σε μεγαλύτερες περιόδους καταγραφής

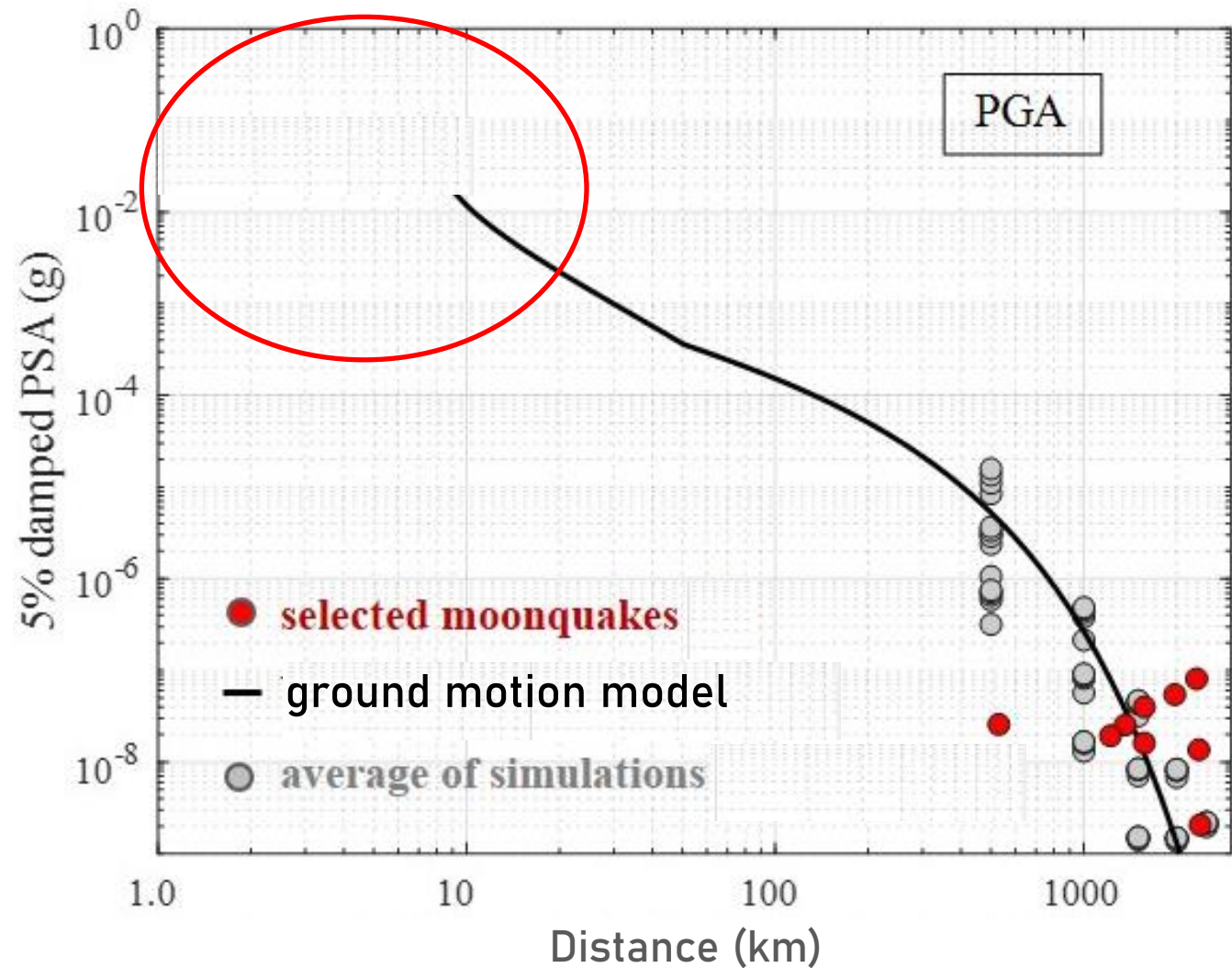
Κατασκευές στη Σελήνη θεωρούνται ως κρίσιμες αναφορικά με:

- Επιτρεπόμενες βλάβες
- Περίοδο επαναφοράς

+ ισχυρές διεγέρσεις από πτώσεις και κρούσεις μετεωριτών!

Σεισμική επικινδυνότητα

Σύγκριση των φασματικών τιμών PSA για 5% απόσβεση υπολογισμένες από επιλεγμένες χρονοϊστορίες επιφανειακών σεισμών (shallow moonquakes, κόκκινες κουκκίδες) με αυτές από ένα ενδεικτικό μοντέλο πρόβλεψης εδαφικής κίνησης (συνεχής γραμμή) και με μέσες τιμές από στοχαστικές προσομοιώσεις σε παρόμοιες αποστάσεις και για παρόμοια μεγέθη (γκρι κουκκίδες).



Σεισμική επικινδυνότητα

Έγιναν προσομοιώσεις με το SMSIM (Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes)

Επιλέχθηκαν κάποιες
χρονοϊστορίες με βάση 3 σενάρια:

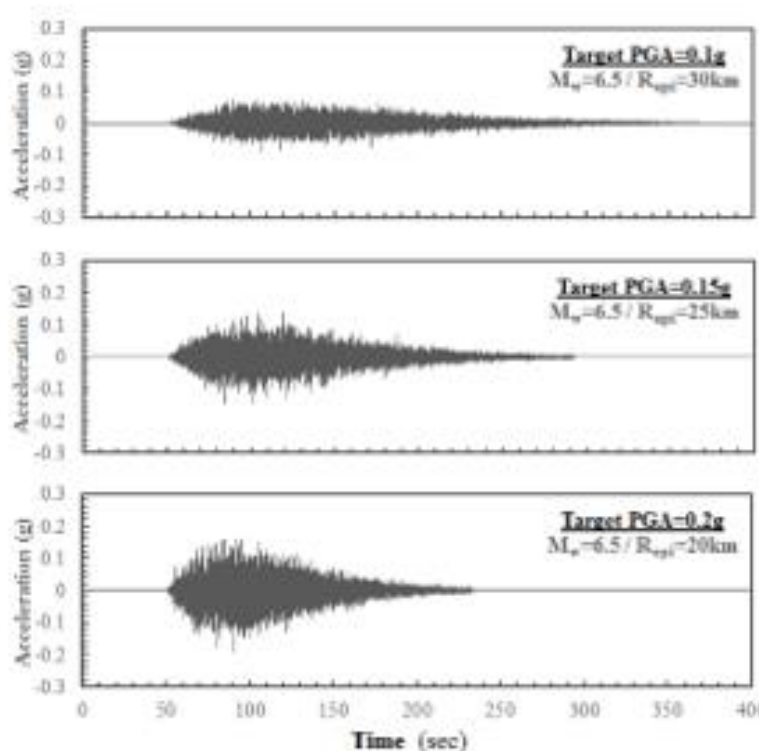
1) $M_w = 6.5; R_{epi} = 30km$

2) $M_w = 6.5; R_{epi} = 25km$

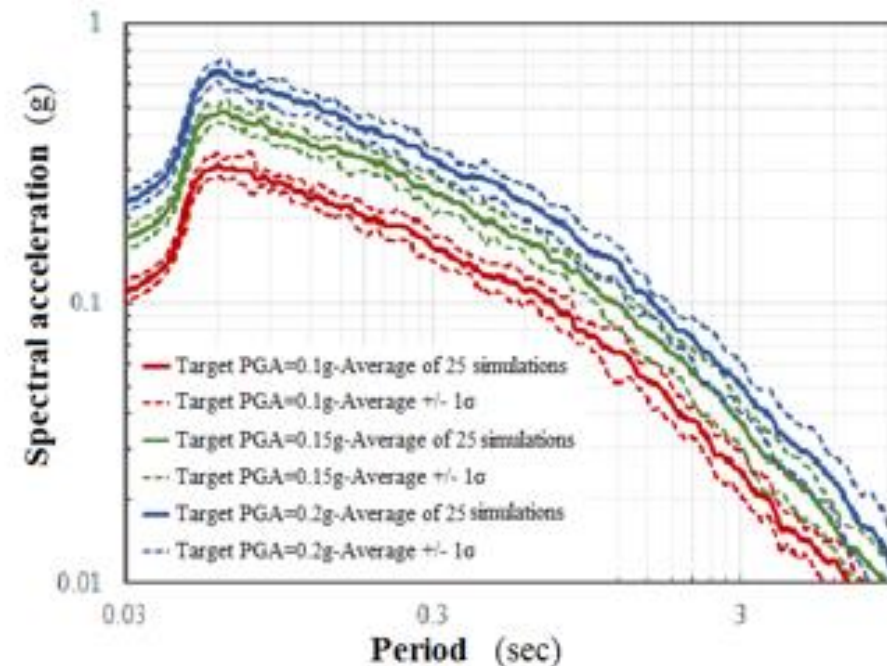
3) $M_w = 6.5; R_{epi} = 20km$

και με στοχευόμενα PGA 0.1g, 0.15g
και 0.2g.

Λείπει ένας χάρτης σεισμικής
επικινδυνότητας, όπως και
προσομοιώσεις εδαφικών
διεγέρσεων από κρούσεις
μετεωριτών.



(a)



(b)

Figure 5: (a) Example of single lunar-consistent ground-motion realisations based on stochastic simulations for the three moonquake scenarios considered in this study and (b) Average response spectra $\pm 1\sigma$ across the 25 ground motion realisations, for the three target PGA values.

Ρεγόλιθος ως δομικό υλικό



Τρισδιάστατη εκτύπωση μονολιθικών κατασκευών από
ρεγόλιθο

3D printing with moondust

Athanasios Goulas and Ross J. Friel

Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough, UK

Abstract

Purpose – The purpose of this paper is to investigate the effect of the main process parameters of laser melting (LM) type additive manufacturing (AM) on multi-layered structures manufactured from JSC-1A Lunar regolith (Moondust) simulant powder.

Design/methodology/approach – Laser diffraction technology was used to analyse and confirm the simulant powder material particle sizes and distribution. Geometrical shapes were then manufactured on a Realizer SLM™ 100 using the simulant powder. The laser-processed samples were analysed via scanning electron microscopy to evaluate surface and internal morphologies, X-ray fluorescence spectroscopy to analyse the chemical composition after processing, and the samples were mechanically investigated via Vickers micro-hardness testing.

Findings – A combination of process parameters resulting in an energy density value of 1.011 J/mm² allowed the successful production of components directly from Lunar regolith simulant. An internal relative porosity of 40.8 per cent, material hardness of 670 ± 11 HV and a dimensional accuracy of 99.8 per cent were observed in the fabricated samples.

Originality/value – This research paper is investigating the novel application of a powder bed fusion AM process category as a potential on-site manufacturing approach for manufacturing structures/components out of Lunar regolith (Moondust). It was shown that this AM process category has the capability to directly manufacture multi-layered parts out of Lunar regolith, which has potential applicability to future moon colonization.

Keywords Advanced manufacturing technologies, Ceramic multi-Component materials, Laser additive manufacturing, Lunar regolith, On site resource utilization, Space additive manufacturing

Paper type Research paper

Κατασκευές από διαφορετικά δομικά μέλη (πλίνθοδομές)
από ρεγόλιθο με συμπίεση και θερμική επεξεργασία

SCIENTIFIC REPORTS

Direct Formation of Structural Components Using a Martian Soil Simulant

Brian J. Chow¹, Tzehan Chen², Ying Zhong² & Yu Qiao^{1,2}

Table 1. Mechanical properties of the laser-sintered lunar regolith considered in this study.

Material property	Units	Value (set-1)	Value (set-2)
Density	kg/cm ³	2300 [13]	2900 [35]
Young's modulus	MPa	287.3 [13]	403.3 [35]
Compressive strength	MPa	4.2 [13]	5.4 [35]
Tensile Strength	MPa	0.42	0.54
Poisson's ratio	-	0.2/0.25	0.2/0.25

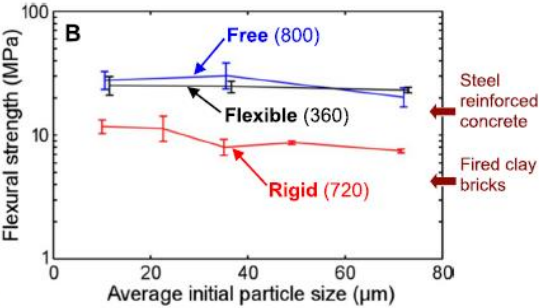


Figure 1. (A) A photo of solid Mars-1a beam quasi-statically compacted with rigid boundary condition. The curved ends show the boundaries of the steel mold. The width of the sample is ~1 cm. (B) Flexural strength of compacted Mars-1a as a function of the initial average particle size. The average particle sizes are computed as the nominal midpoint for each fractioned sieve size, i.e. the arithmetic mean of the bin sizes. The three series represent the three lateral boundary conditions (names in bold) with the maximum compression pressure (in MPa) inside parentheses.

Ρεγόλιθος ως δομικό υλικό

Λεπτόκοκκο δείγμα MMS1 (11% FeOs) and MMS2 (18% FeOs)

Καλούπι για συμπίεση/σταθεροποίηση σε διαφορες θερμοκρασιες για 10h

Τα δοκίμια μας έχουν μήκος περίπου 50mm και πάχος της τάξης μερικών χιλιοστών - μια ταξη μεγέθους μεγαλύτερα από τους Chow et al. (2017) Scientific Reports, Nature.

Σχηματισμός μικρών δοκών για δοκιμη καμψης 3-σημείων

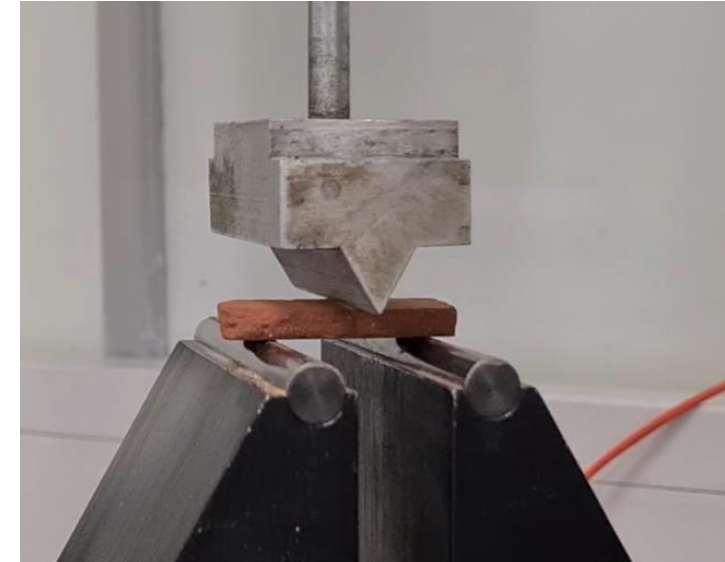
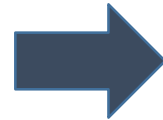
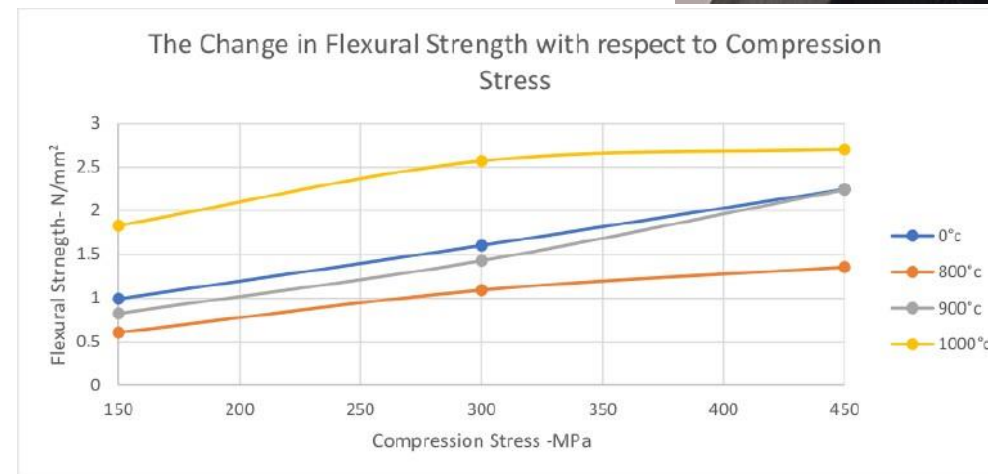
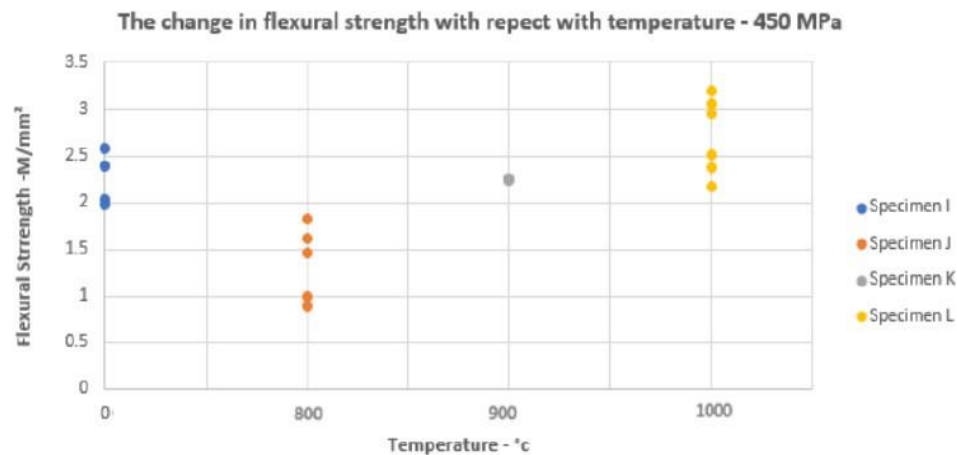


Figure 8 MMS-2 simulants being placed in a rigid mould.



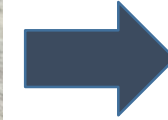
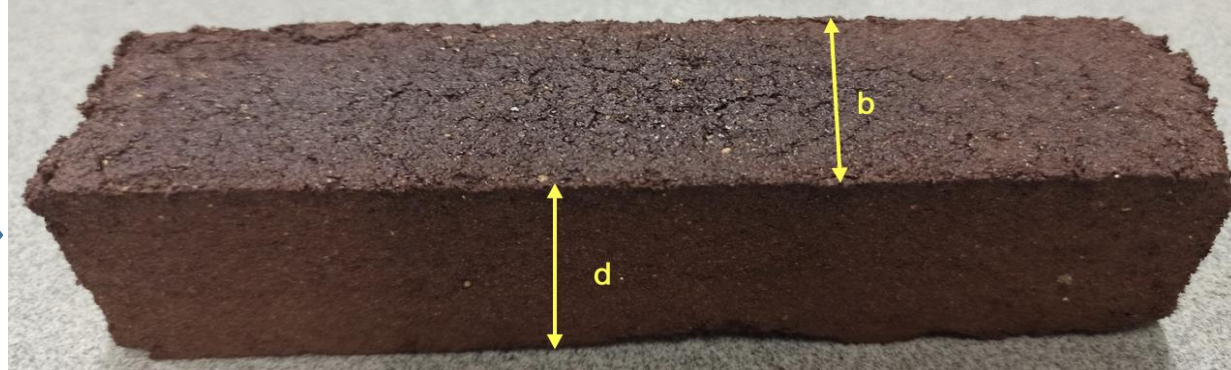
Ρεγόλιθος ως δομικό υλικό

Πρισματικά δοκίμια 160mm x 40mm x 40mm – δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από τους Chow et al. (2017) Scientific Reports, Nature.

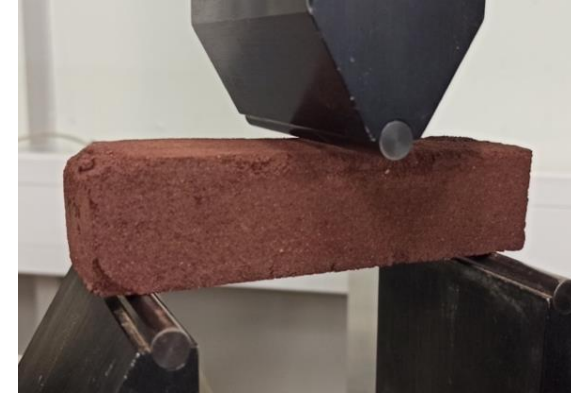
Καλούπι για συμπίεση



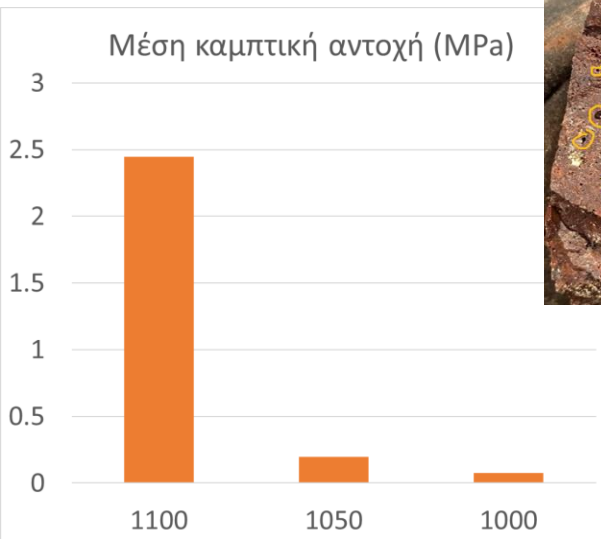
Μερική – ελεγχόμενη τήξη σε διάφορες θερμοκρασίες (1000-1050-1100 °C)



Κάμψη 3-σημείων & Θλίψη σε δύο Διευθύνσεις (ανισοτροπία στρώσεων)



Απόπειρες τήξης σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1100 °C



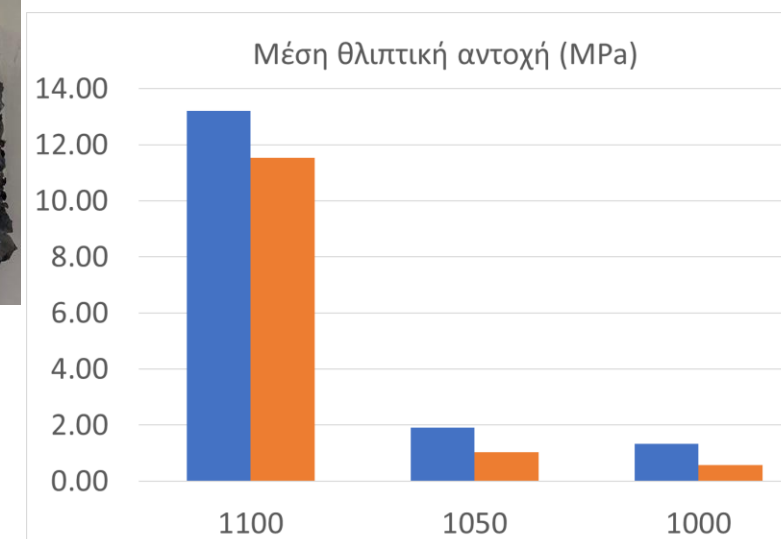
~1125 °C



~1150 °C



~1150 - 1200 °C



Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη

Αρχικές προτάσεις για μεικτά συστήματα με δικτυώματα σαν στατικό φορέα και ρεγόλιθο σαν προστασία για την ακτινοβολία.

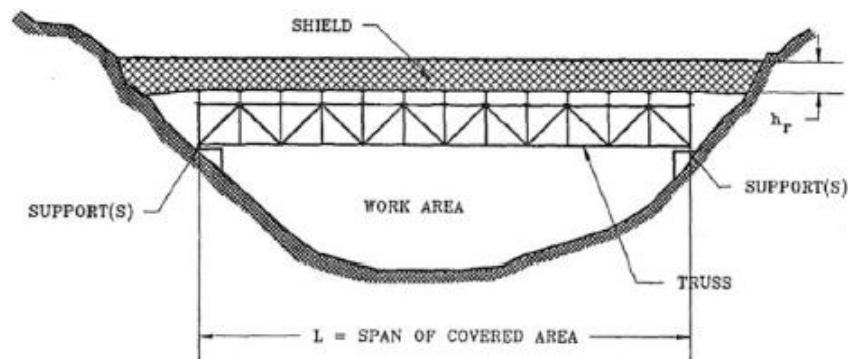


Fig. 9. Flat truss/trench Lunar base concept, Benaroya & Ettouney [129].

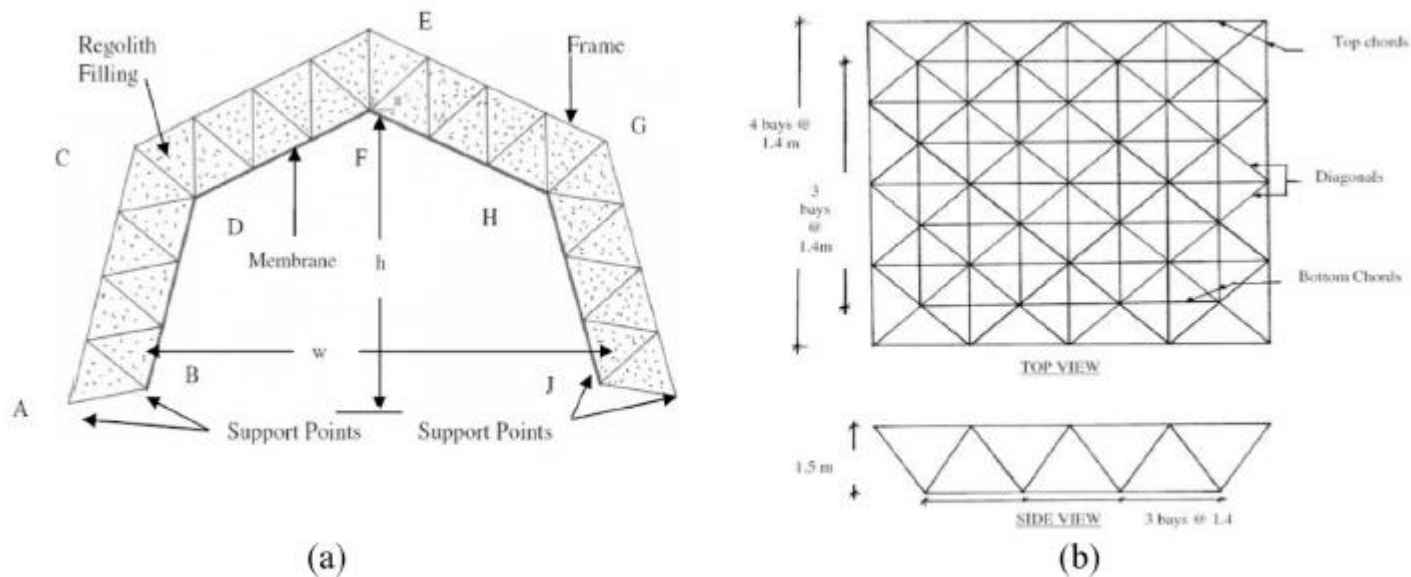


Fig. 15. Proposed structure: a) Elevation; b) Plan and side views, Malla & Chaudhuri [137].

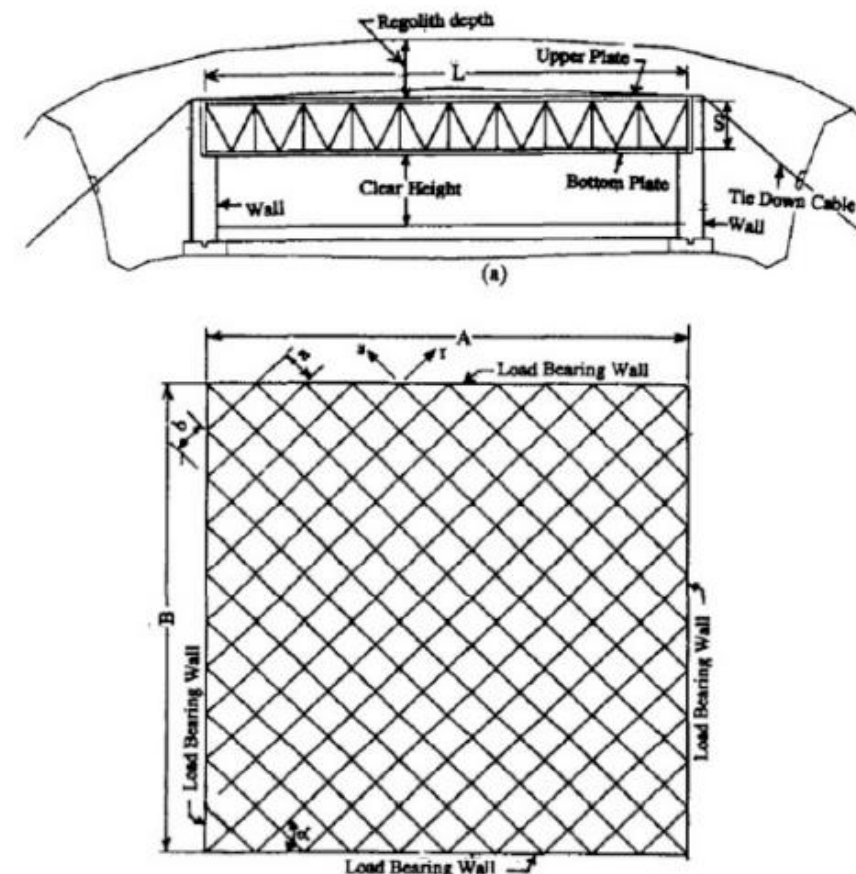


Fig. 12. Proposed double-skinned roof structure supporting a regolith cover, Malla et al. [134].

Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη

Πιο πρόσφατες ιδέες που μπορούν να αναλάβουν εκτός από την εξωτερική πίεση και το ίδιο βάρος, και τις εσωτερικές πιέσεις και ενδεχομένως και τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

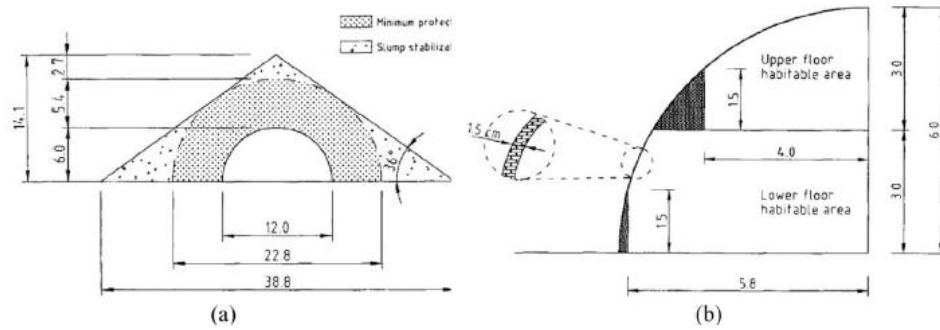


Fig. 13. a) Dimensioning of shell and regolith cover of a Lunar habitat for six people; b) minimum thickness of the cast basalt shell, Aulesa et al. [6].

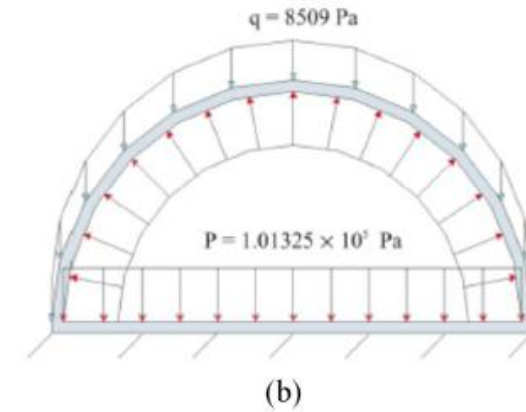
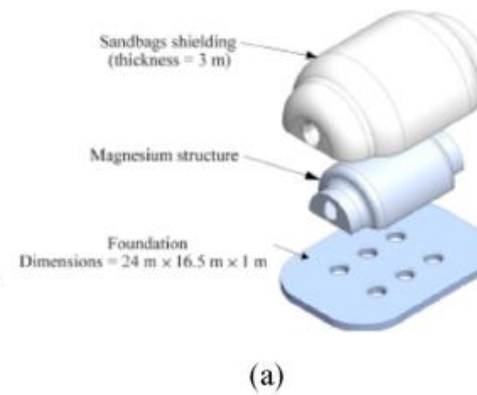
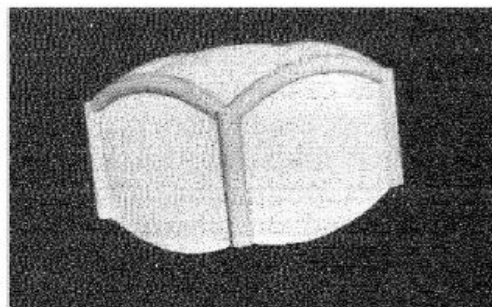


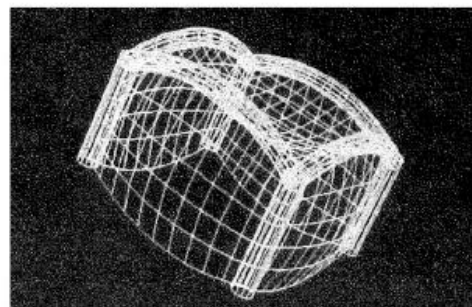
Fig. 14. a) Rendering of a Lunar habitat module; b) a three-hinged arch as a cross-section of the module; c) internal pressure and floor loading applied to the semicircular arch, Benaroya [135] & Ruess et al. [136].

Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη

Φουσκωτές (inflatable) κατασκευές σε διαφορετικές γεωμετρίες με στόχο να αναλάβουν την εσωτερική πίεση (πίεση ατμόσφαιρας στην Γη).

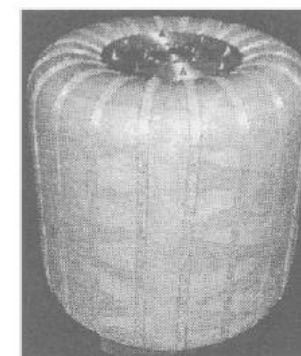


(a)



(b)

Fig. 20. a) Proposed inflatable module with Kevlar membranes, columns and arched ribs; b) wireframe of the inflatable module, Nowak et al. [147].



(a)



(b)

Fig. 24. a) Model created by filament winding; b) FE mesh for the analysis of toroidal structure, Harris & Kennedy [154].

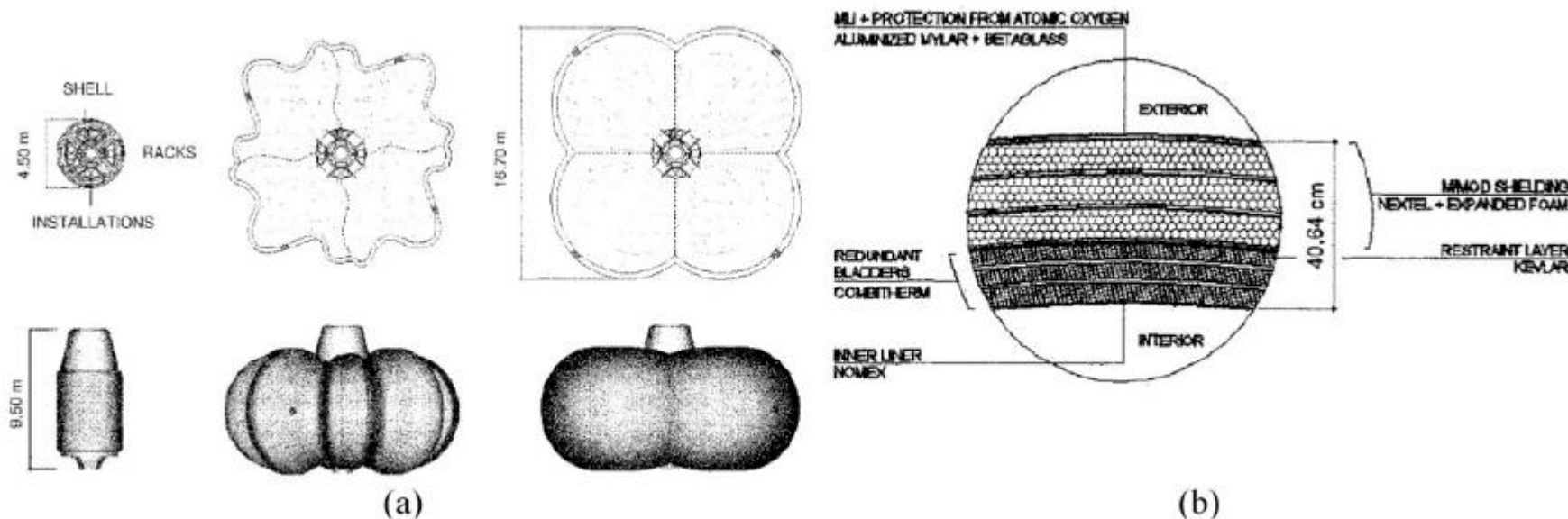
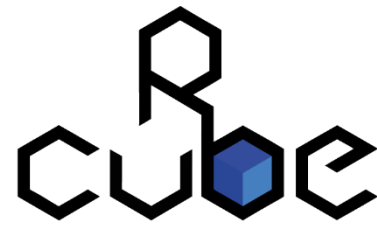


Fig. 25. a) Inflation phases of the "Astrophytum", b) the five main layers of the shell, Borin & Fiscelli [156].

Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη



ResearchRobustnessResilience

Αναπτυσσόμενα (deployable) συστήματα τα οποία αναφέρονται σε ελαφριές κατασκευές μόνο, βλ. κεραίες.

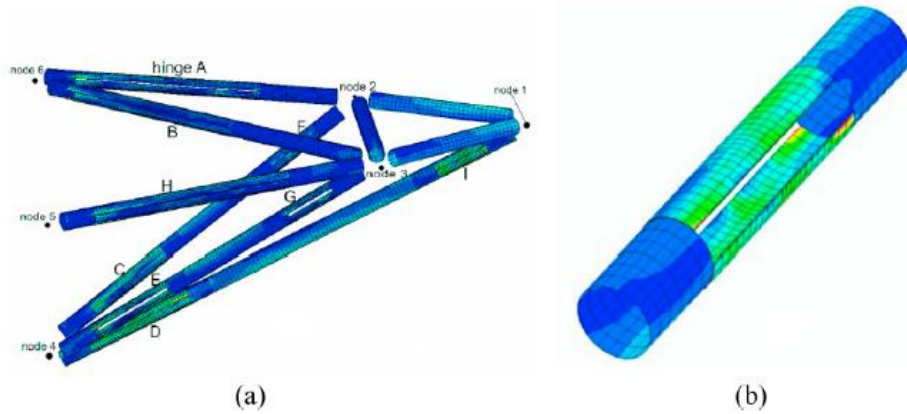


Fig. 30. a) Finite element

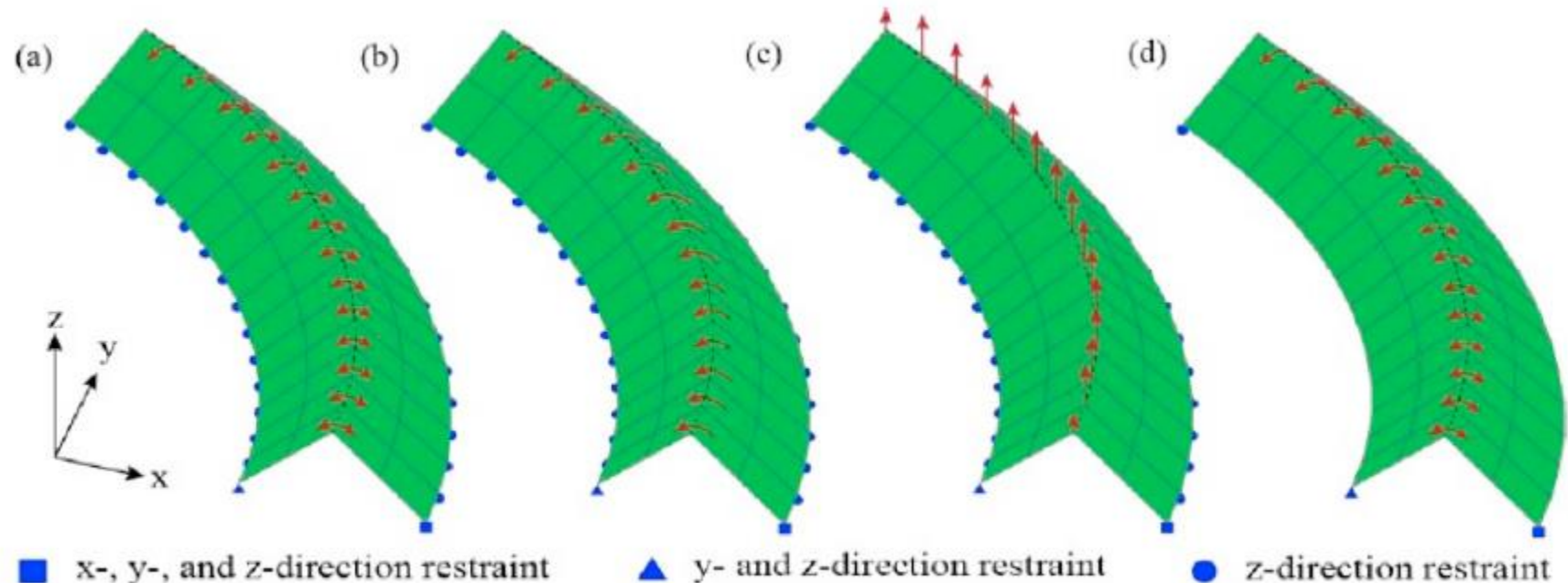


Fig. 31. Different boundary conditions applied on the structure to simulate folding: a) Applied Rotations, b) applied moments, c) applied force, and d) applied rotations and reduced z-restraints, Woodruff and Filipov [164].

Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη

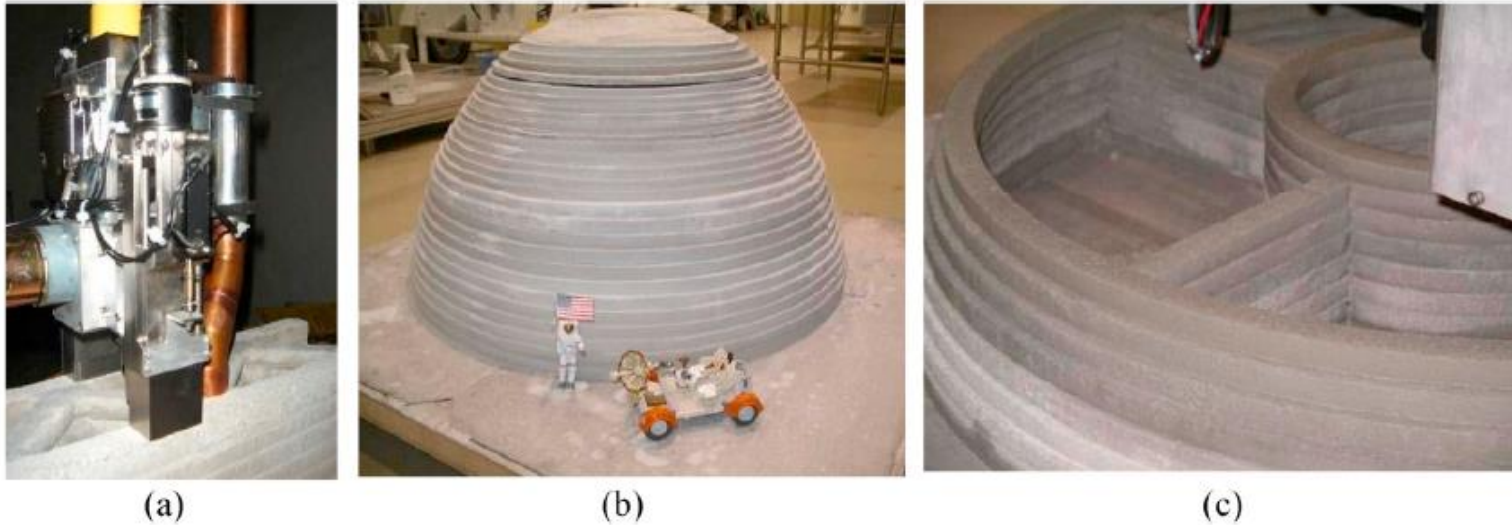


Fig. 32. Contour crafting: a) Co-extrusion CC nozzle building walls with corrugated fill; b) & c) Dome structures built by means of contour crafting, [181].

Τρισδιάστατες εκτυπωμένες κατασκευές από ρεγόλιθο που προστατεύουν το εσωτερικό από ακτινοβολία, ακραίες θερμοκρασίες ή και πτώσεις μετεωριτών. Ο φορέας μπορεί να έχει μία πολύ σύνθετη γεωμετρία για να είναι πιο ελαφριά κατασκευή

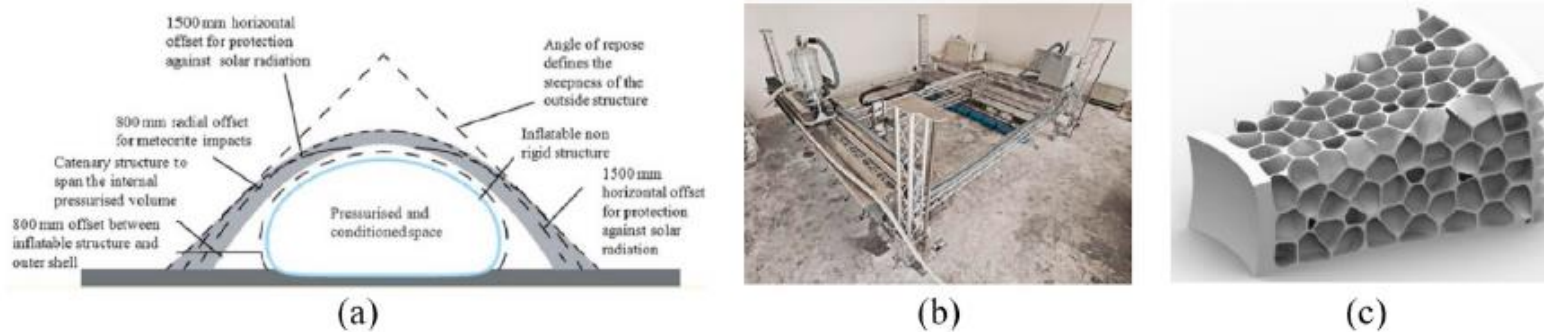


Fig. 33. a) Schematic of the outpost structure; b) D-shape printer; c) exemplar structural element, Cesaretti et al. [185].

Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη

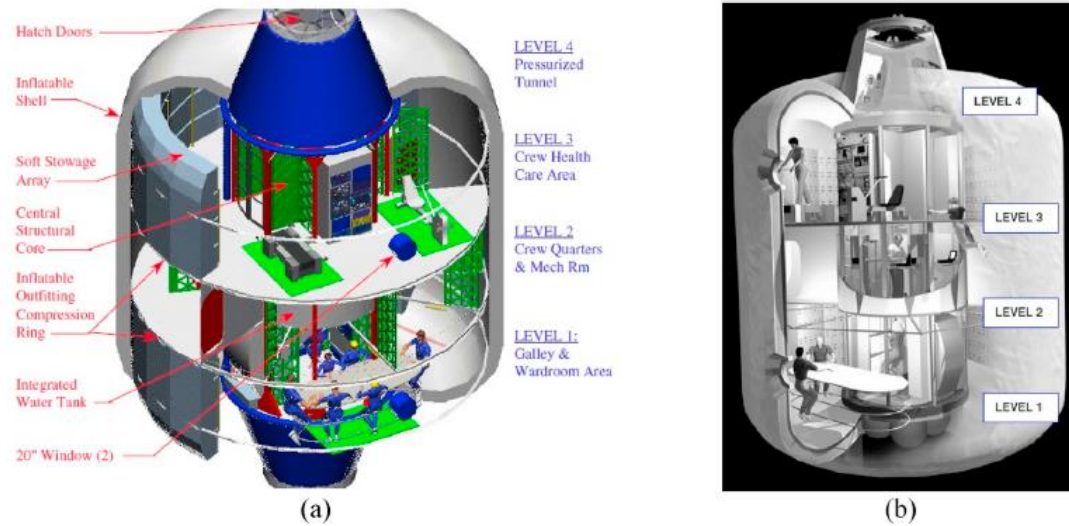


Fig. 22. a) TransHub overview; b) ISS Transhab internal view, NASA JSC S99-05363, Kennedy [152].

International Space Station

Moonvillage by ESA



Figure 3-4: Renderings of potential lunar village (credits: SOM)

Προτάσεις για κατασκευές στη Σελήνη

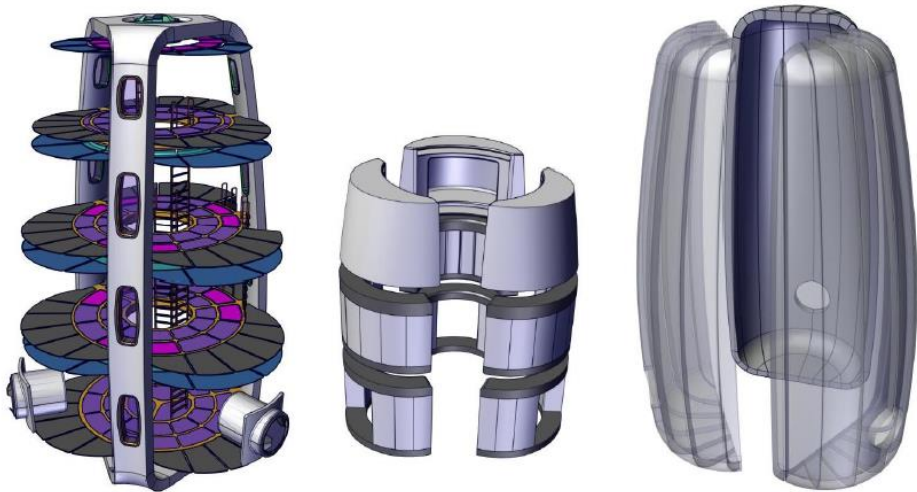


Figure 5-3: Conceptual Design by SOM, 3 main parts



Figure 5-8: The main load-carrying structure

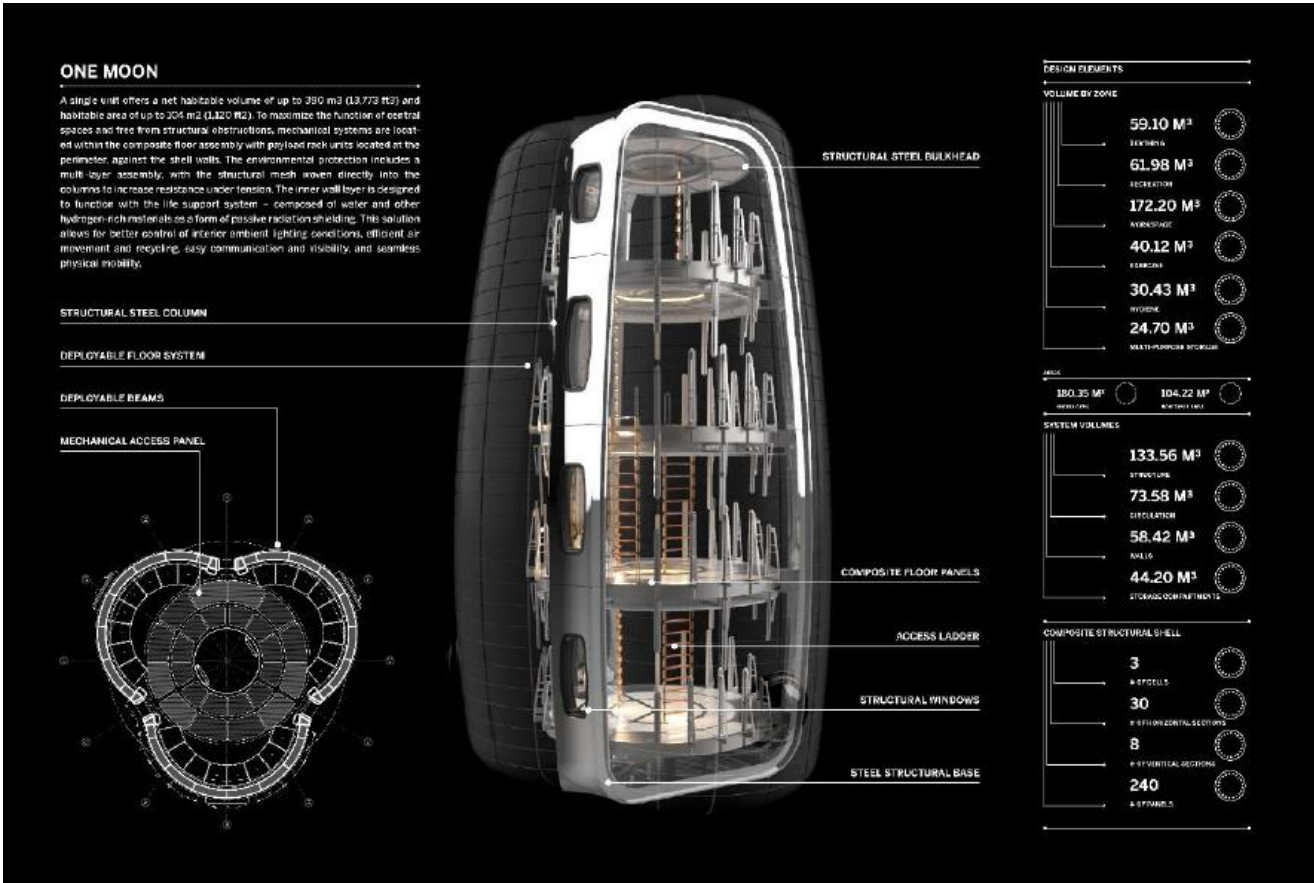
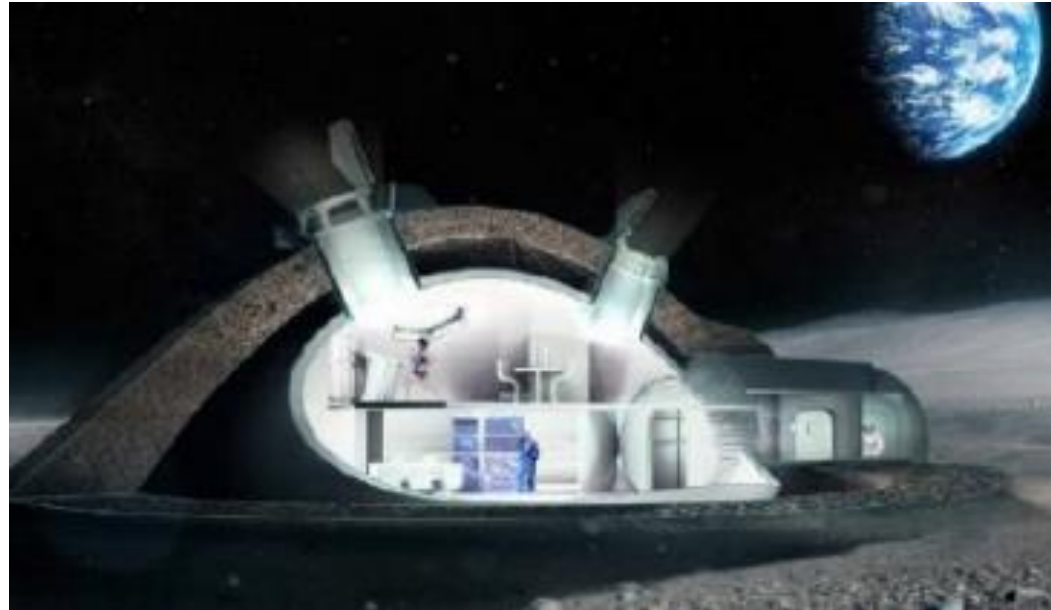


Figure 3-6: Habitat in x-ray view

Δική μας πρόταση

Η περισσότερο δημοφιλής πρόταση είναι τοξωτές κατασκευές να προστατεύουν το εσωτερικό τους από την ακτινοβολία και τις πτώσεις μικρο-μετεωριτών ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμεύουν σαν αποθηκευτικοί χώροι για πολύτιμα φορτία. Το δομικό τους υλικό θα είναι ρεγόλιθος κυρίως.

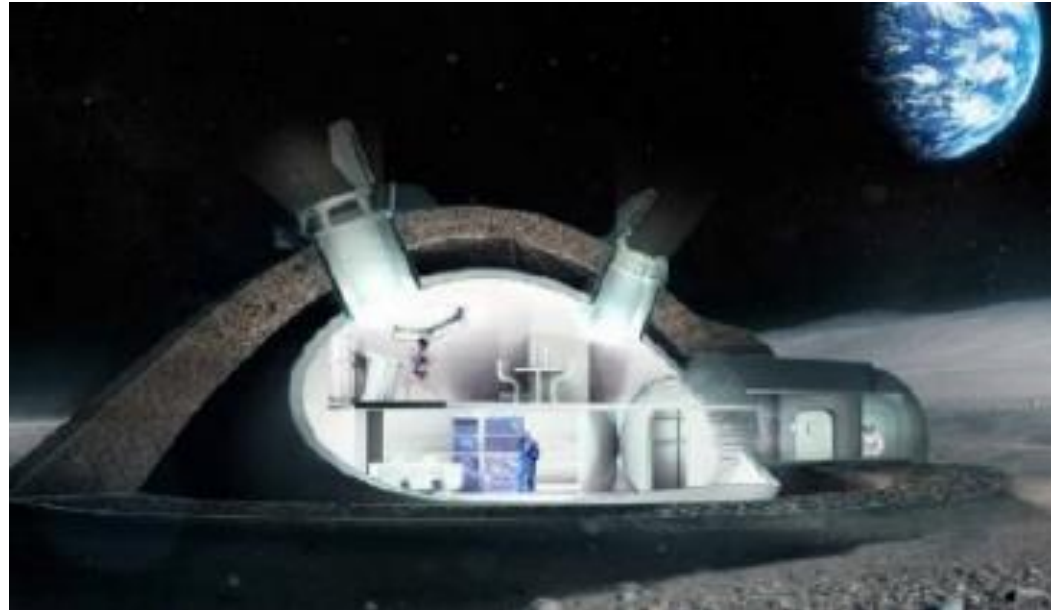


(De Kestelier et al. 2015)

Δική μας πρόταση

Η περισσότερο δημοφιλής πρόταση είναι τοξωτές κατασκευές να προστατεύουν το εσωτερικό τους από την ακτινοβολία και τις πτώσεις μικρο-μετεωριτών ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμεύουν σαν αποθηκευτικοί χώροι για πολύτιμα φορτία. Το δομικό τους υλικό θα είναι ρεγόλιθος κυρίως.

Για τι είδους τόξα μιλάμε όμως?



(De Kestelier et al. 2015)

Δική μας πρόταση

Τα τόξα είναι καμπυλωτές δομικές μορφές όπου η ευστάθειά τους εξαρτάται από την κατανομή θλιπτικών δυνάμεων καθόλο το μήκος τους.

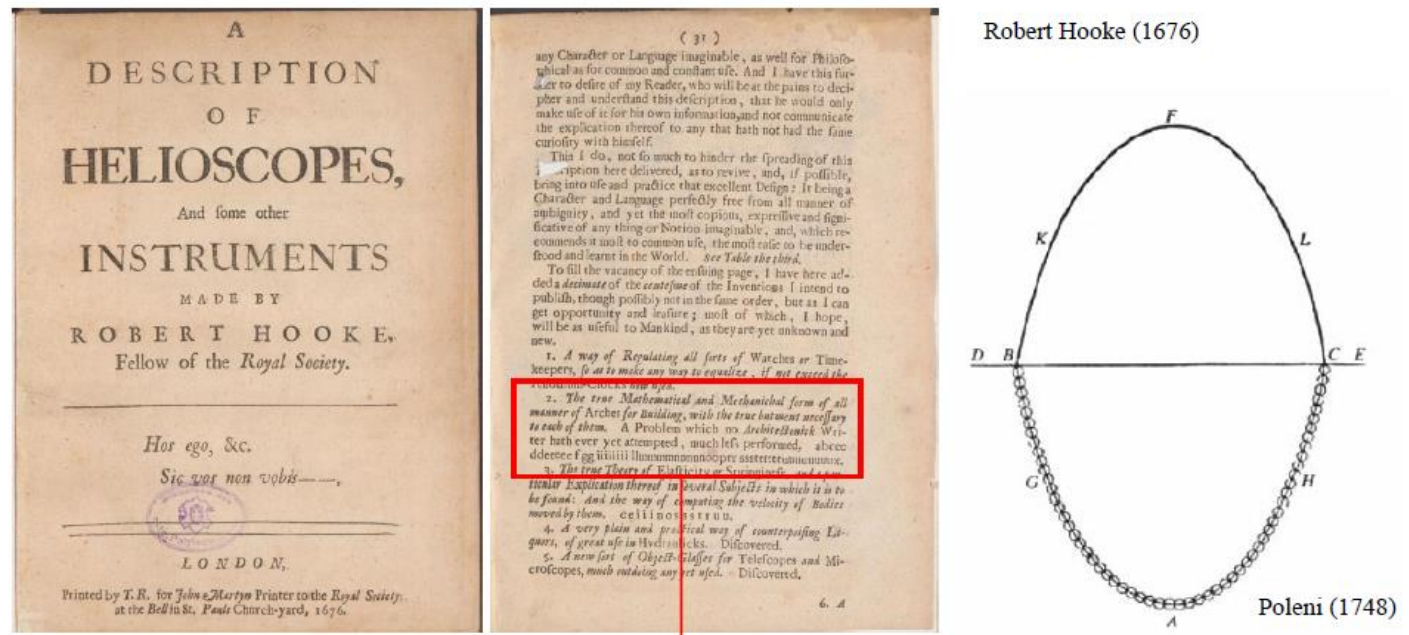


Πλίνθινα τόξα του Ramesseum
στην Αίγυπτο (AVN 2015)



Αρχαία λίθινα υδραγωγεία στη
Segovia (Rodrigues, 2015)

Δική μας πρόταση



abcccddeeeefggiiiiiiiillmmmmnnnnnooprssstttttuuuuuuuvx

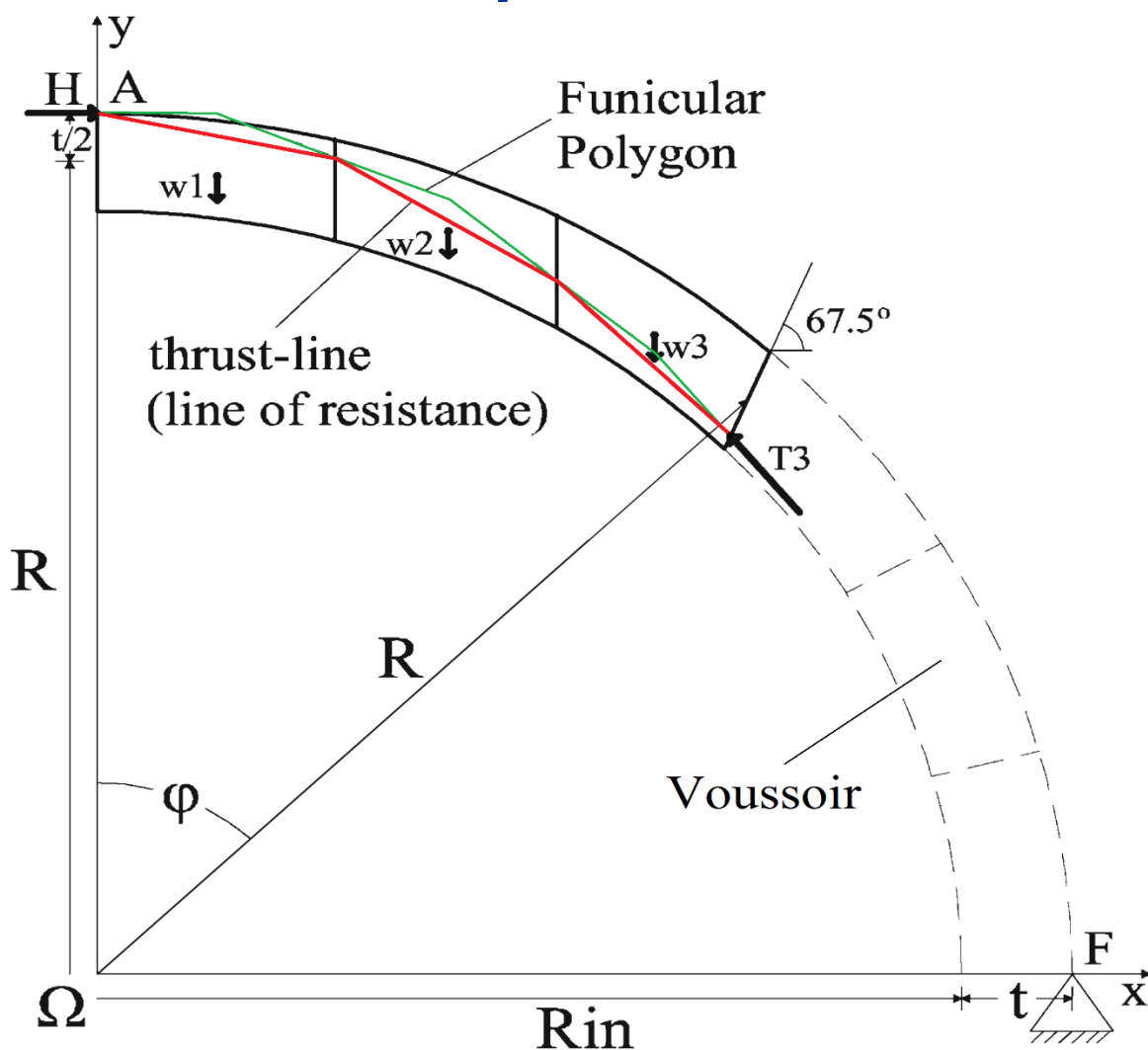
2 years after Hooke's death (1703), the executor of his will uncovered the latin anagram:

Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum



As hangs the flexible line, so but inverted will stand the rigid arch

Δική μας πρόταση



Makris & Alexakis, 2013

Σχοινοπολύγωνο (πράσινη γραμμή):

Γραμμές δράσης των συνισταμένων δυνάμεων.

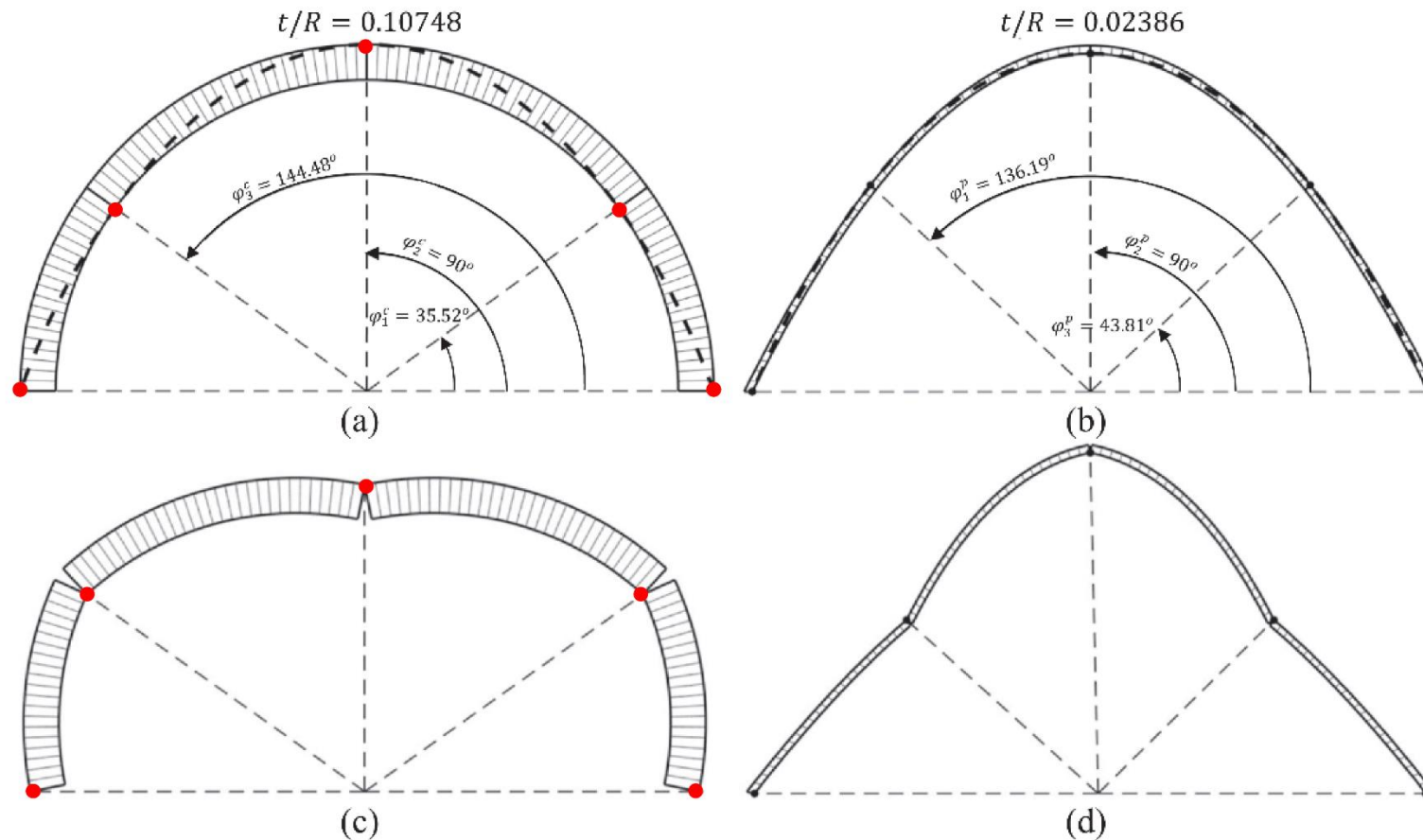
Γραμμή ωθήσεων (κόκκινη γραμμή):

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων εφαρμογής των συνισταμένων δυνάμεων σε κάθε διατομή του τόξου.

Η δομική ευστάθεια του τόξου εξαρτάται από το αν η γραμμή ωθήσεων παραμένει εντός των γεωμετρικών ορίων του τόξου.

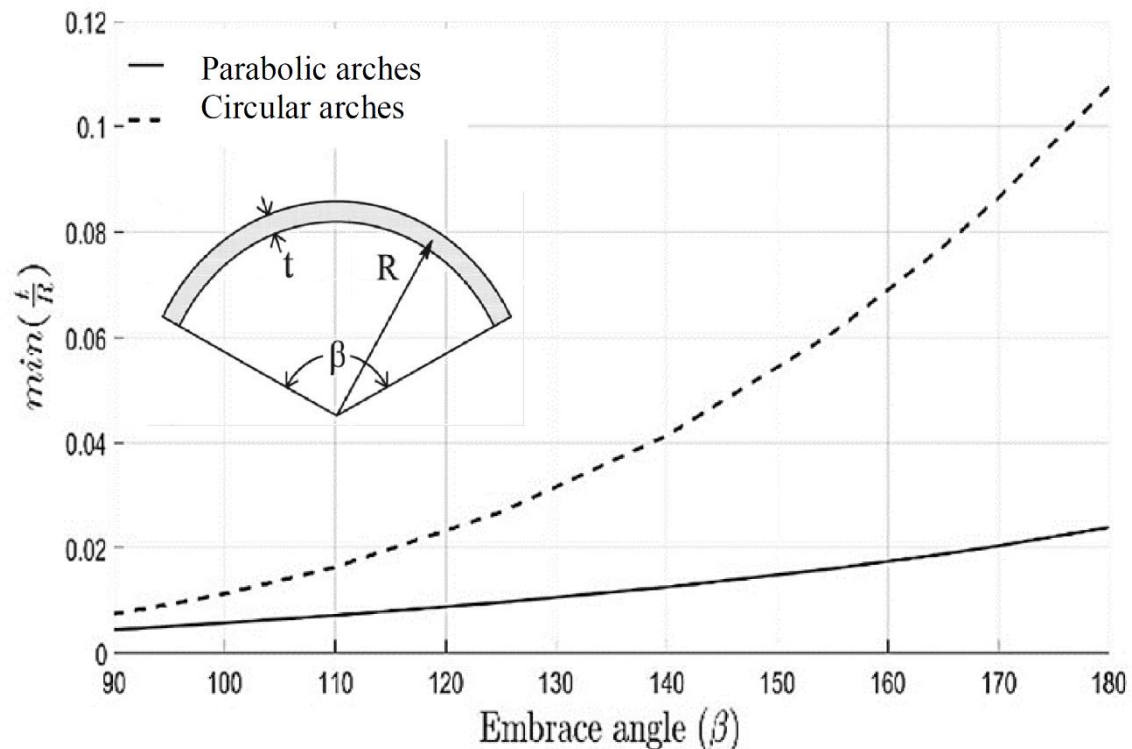
Δική μας πρόταση

Αρχικά εξετάσαμε τόξα σταθερής γεωμετρίας και συγκεκριμένα τα παραβολικά σε σχέση με τα ημικυκλικά όταν υπόκεινται στο ίδιο βάρος αλλά και σε πλευρικές φορτίσεις.

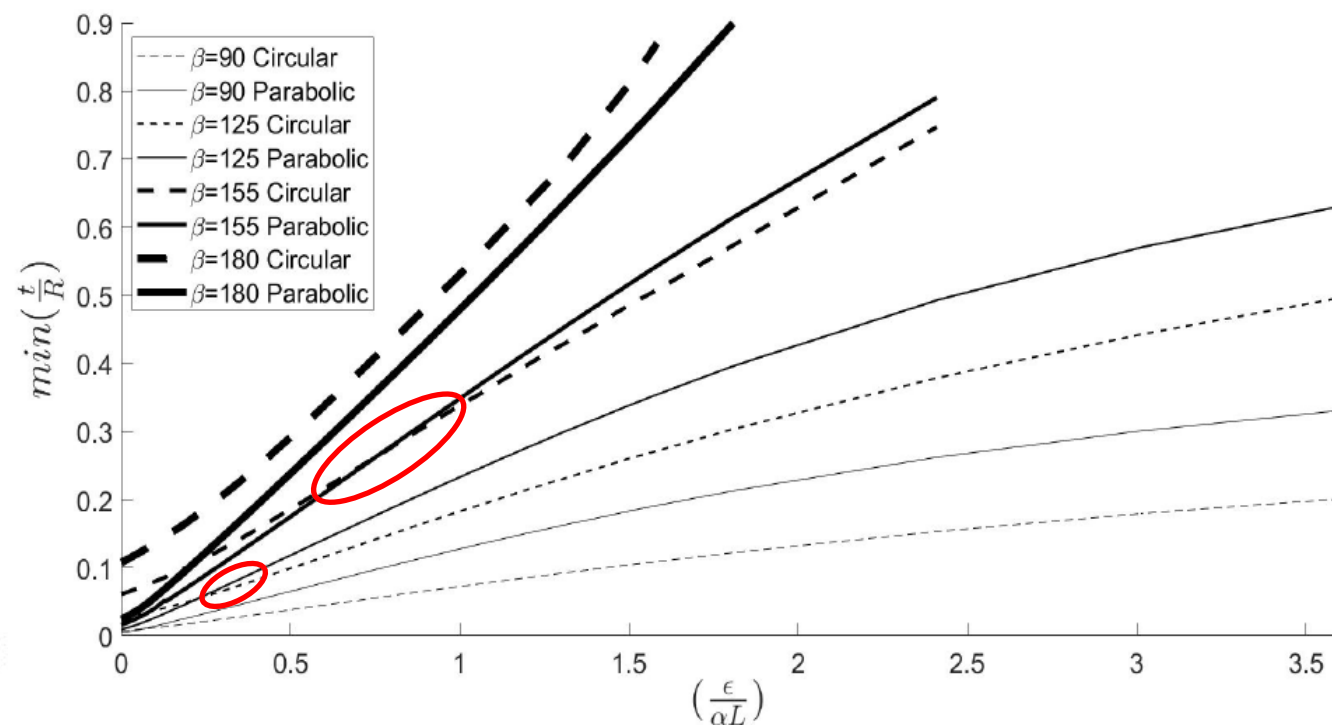


Δική μας πρόταση

Κατακόρυφα φορτία: Ίδιο βάρος



Κατακόρυφα φορτία και πλευρική φόρτιση, ϵ

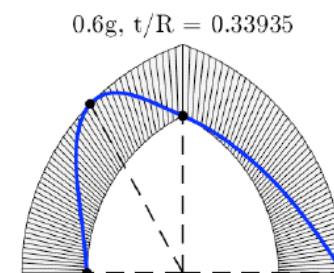
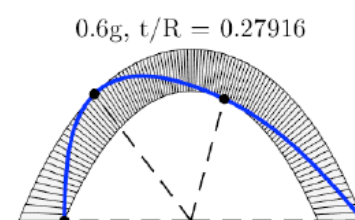
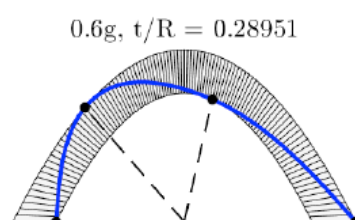
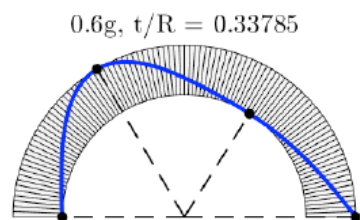
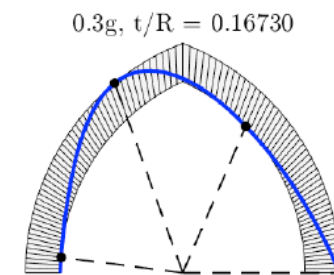
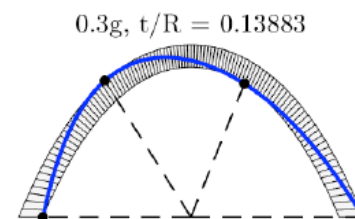
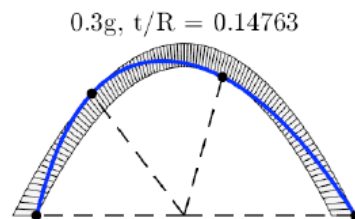
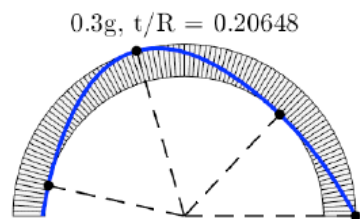


Παρατηρείται αυτοόμοια συμπεριφορά και εν γένει για μεγάλες γωνίες β τα παραβολικά έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τα ημικυκλικά.

Δική μας πρόταση

Δεδομένης της εξέλιξης της τεχνολογίας και άρα και της τρισδιάστατης εκτύπωσης που επιτρέπει μεγάλη ελευθερία στην δομική μορφή, αποφασίσαμε να προχωρήσουμε σε δομικές μορφές με μεταβαλλόμενη γεωμετρία.

Αρχίζουμε από τις γραμμές ωθήσεων τόξων διαφορετικής γεωμετρίας ότα υπόκεινται σε κατακόρυφες και πλευρικές δυνάμεις.



Semicircular

Parabolic

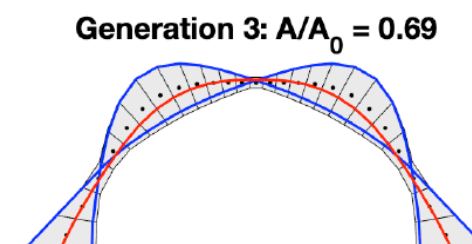
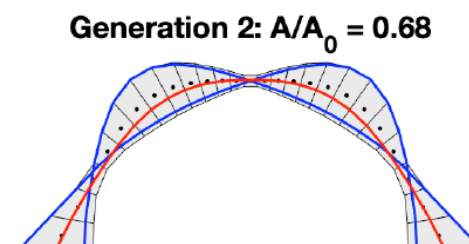
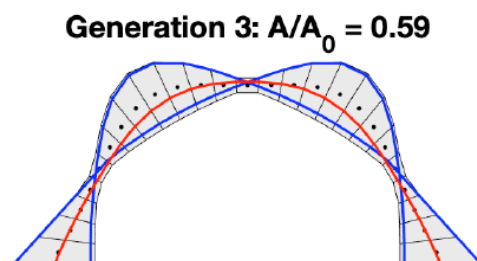
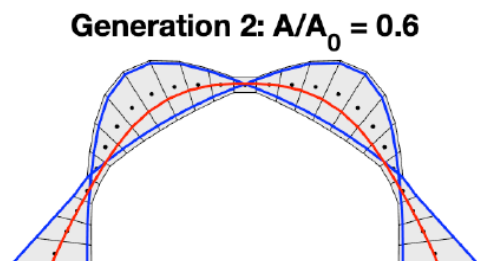
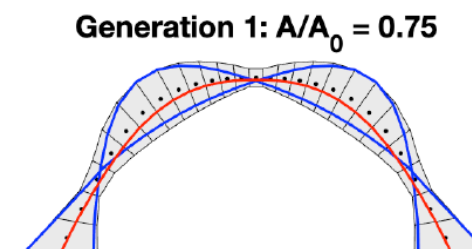
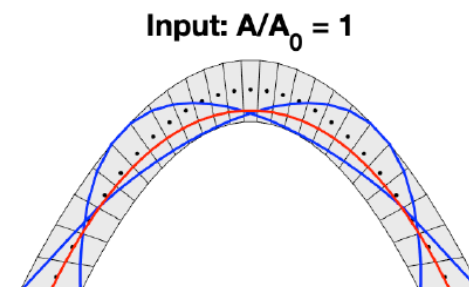
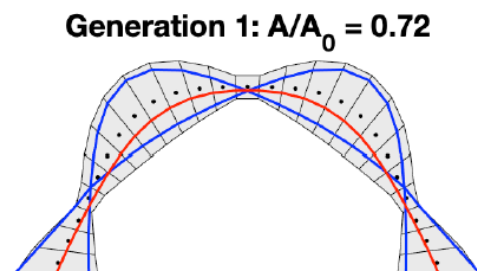
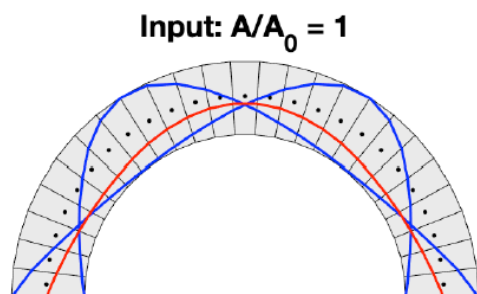
Catenary

Gothic

Δική μας πρόταση

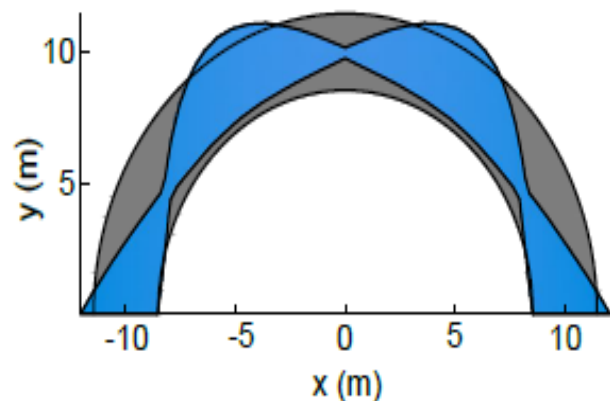
Βελτιστοποιούμε την δομική μορφή με βάση έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, που βασίζεται στις οριακές γραμμές ωθήσεων και όταν συγκλίνει δημιουργούνται τα varying-thickness arches (VTAs) ή αλλιώς muscle arches.

Τα VTAs γλυτώνουν πολύ δομικό υλικό, ενώ είναι ικανά να φέρουν τα ίδια φορτία σχεδιασμού.

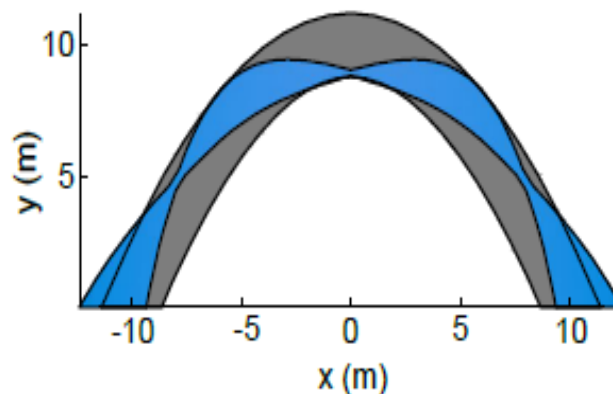


Δική μας πρόταση

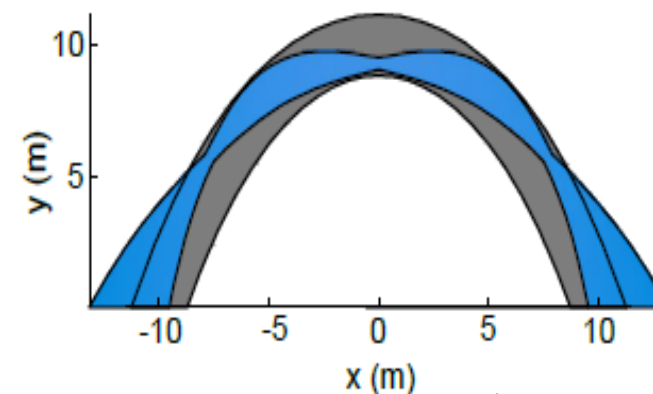
Βελτιστοποιούμε την δομική μορφή με βάση έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, που βασίζεται στις γραμμές ωθήσεων και όταν συγκλίνει δημιουργούνται τα varying-thickness arches (VTAs) ή αλλιώς muscle arches.



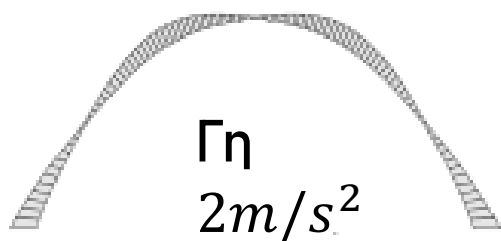
ημικυκλικό



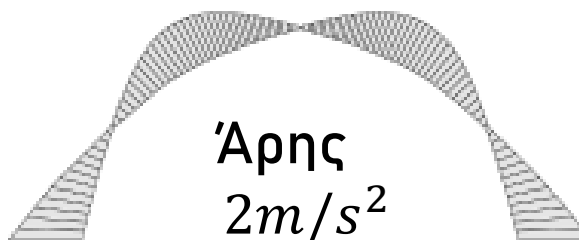
παραβολικό



αλυσοειδές



Γη
 $2m/s^2$



Άρης
 $2m/s^2$

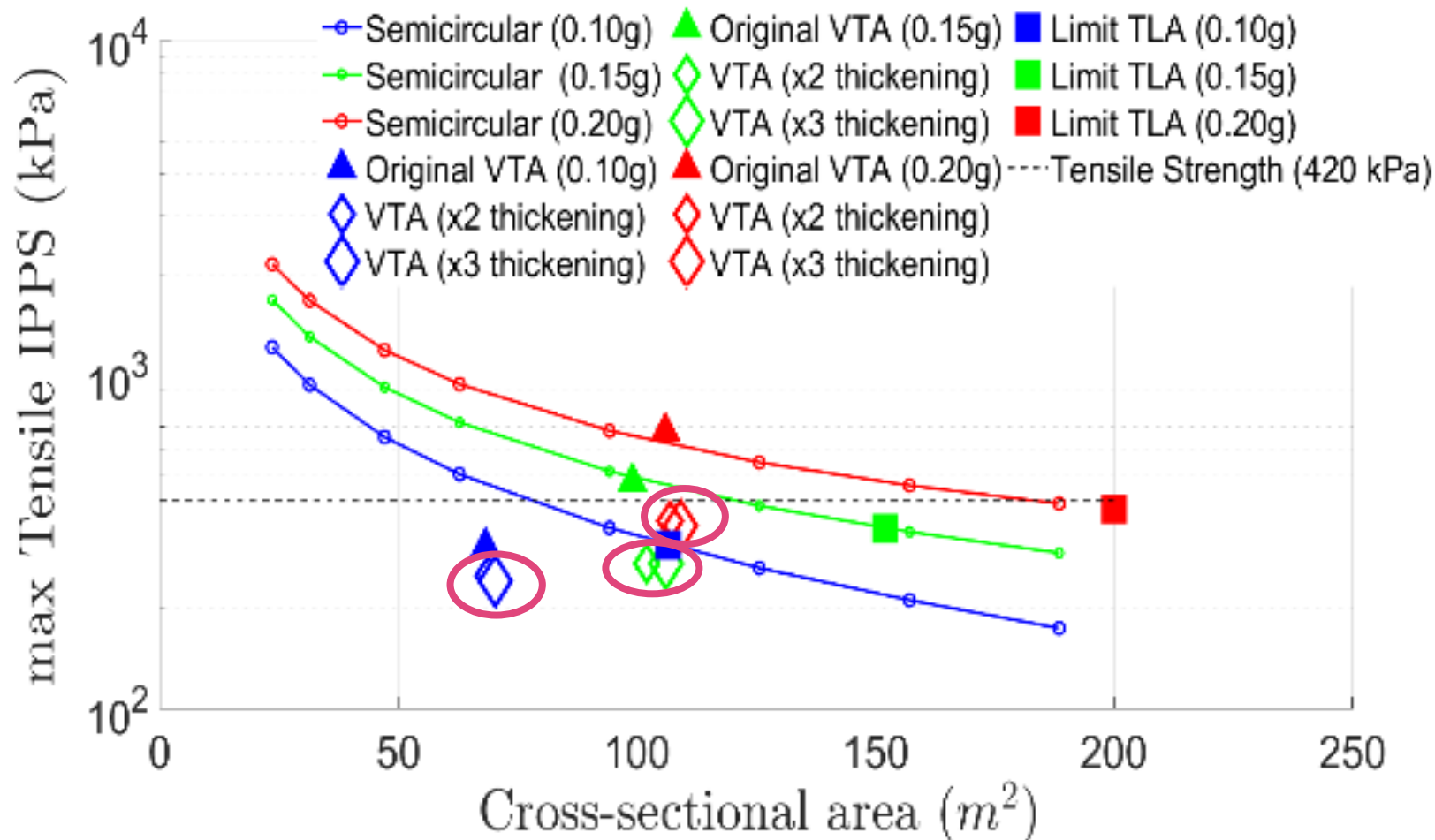


Σελήνη
 $2m/s^2$

Δική μας πρόταση

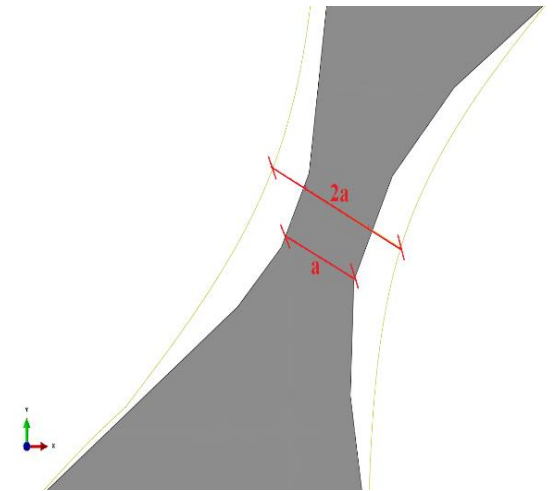
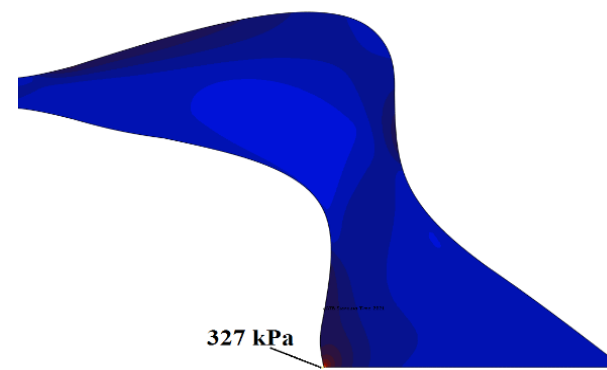
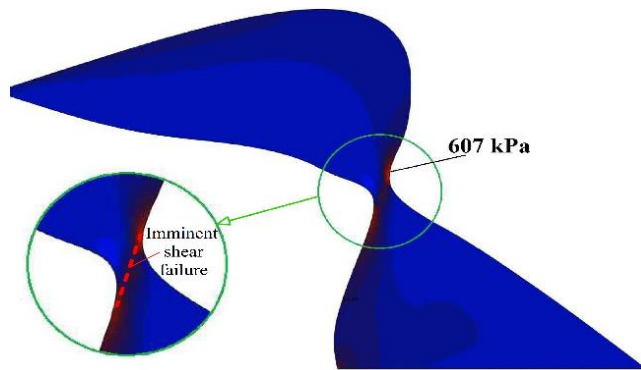
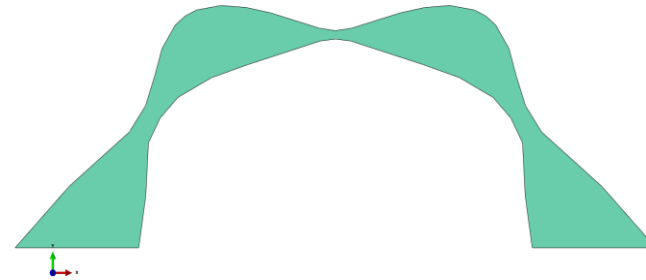
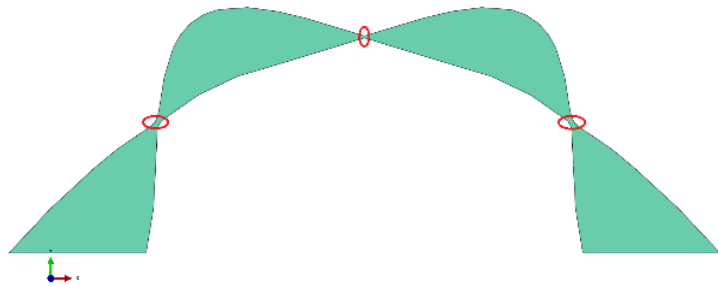
Χρησιμοποιώντας τα VTAs κάνουμε στη συνέχεια ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για να δούμε κατά πόσο μπορεί να έχουν άλλες μορφές αστοχίες –όχι γεωμετρικές, αλλά που να έχουν να κάνουν με το υλικό.

Μέγιστη εφελκυστική κύρια τάση

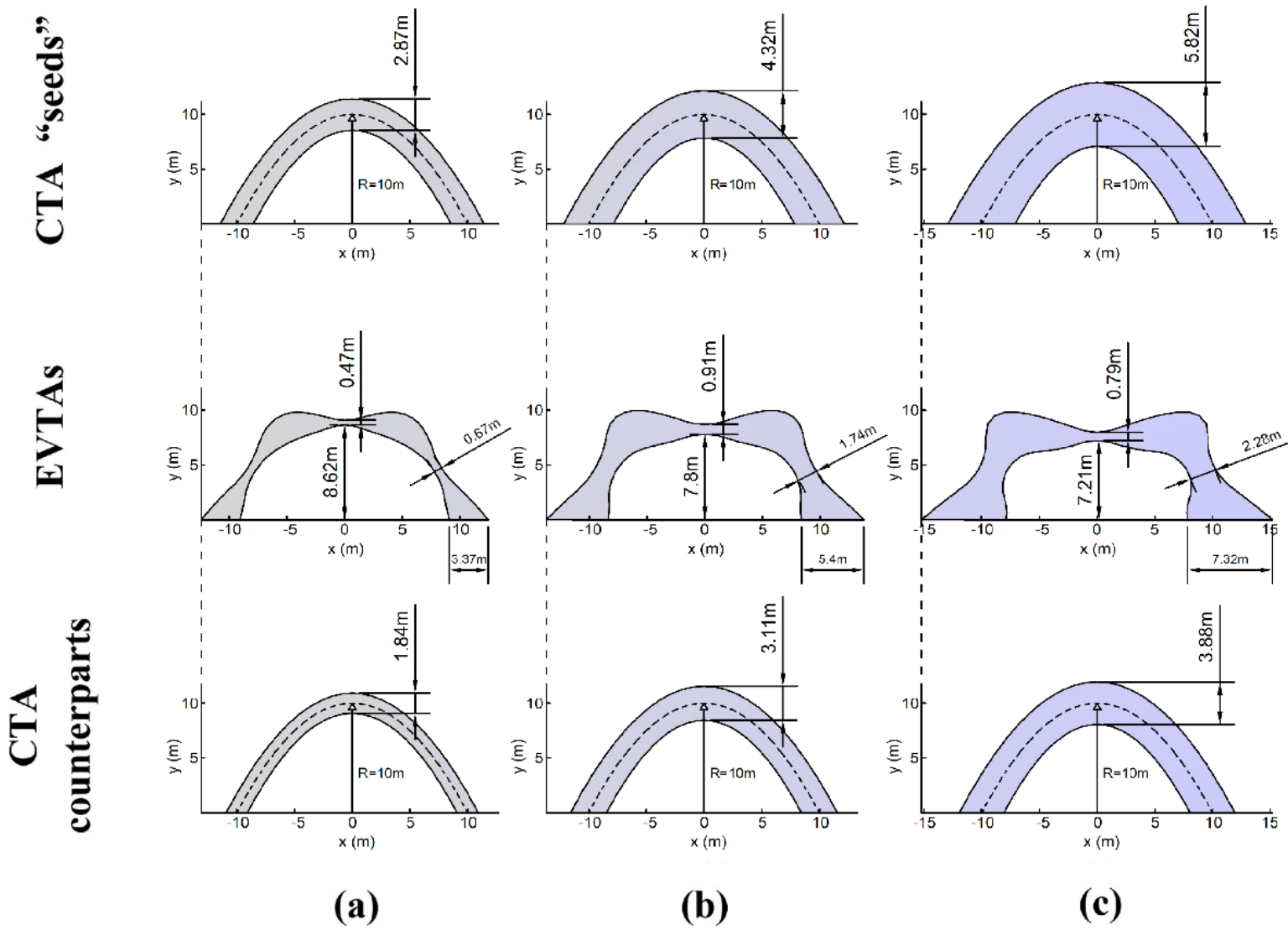


Δική μας πρόταση

Έτσι λοιπόν αυξήσαμε τοπικά το υλικό και καταλήξαμε στα enhanced varying-thickness arches (EVTAs) και με αυτό τον τρόπο οδηγήσαμε την αστοχία από τα τρωτά σημεία των VTAs στην βάση και έτσι αυξήθηκε η στατική επάρκεια των τόξων.



Δική μας πρόταση



Δική μας πρόταση

Η αύξηση της στατικής επάρκειας είναι έκδηλη και μετά από μη-γραμμική στατική ανάλυση (pushover).

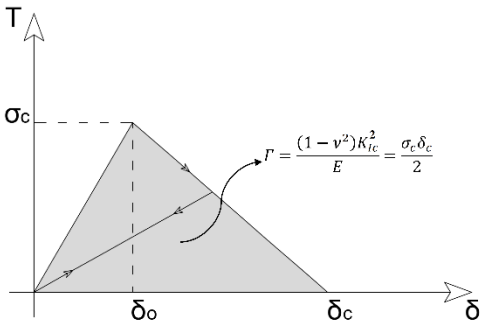
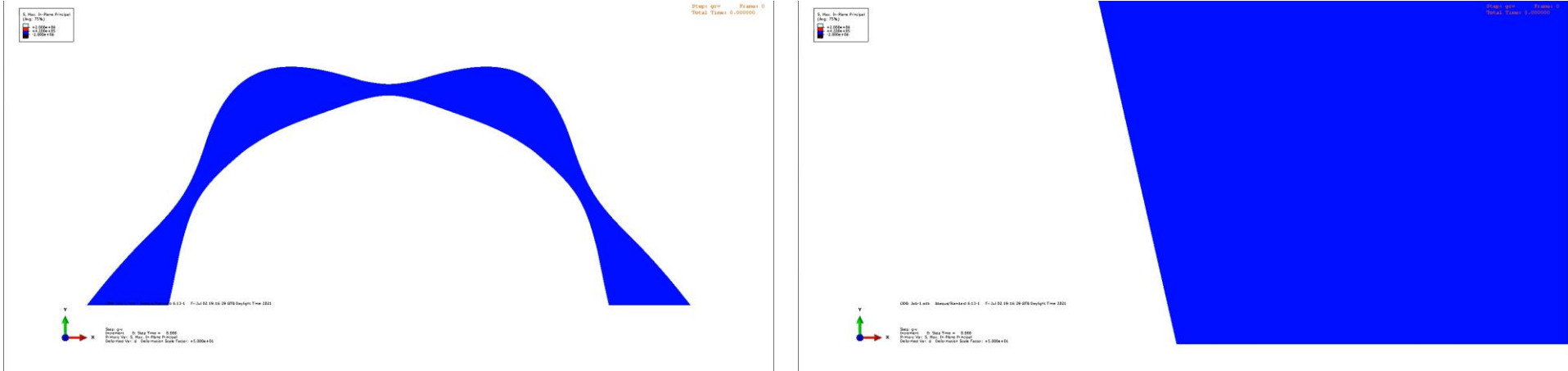


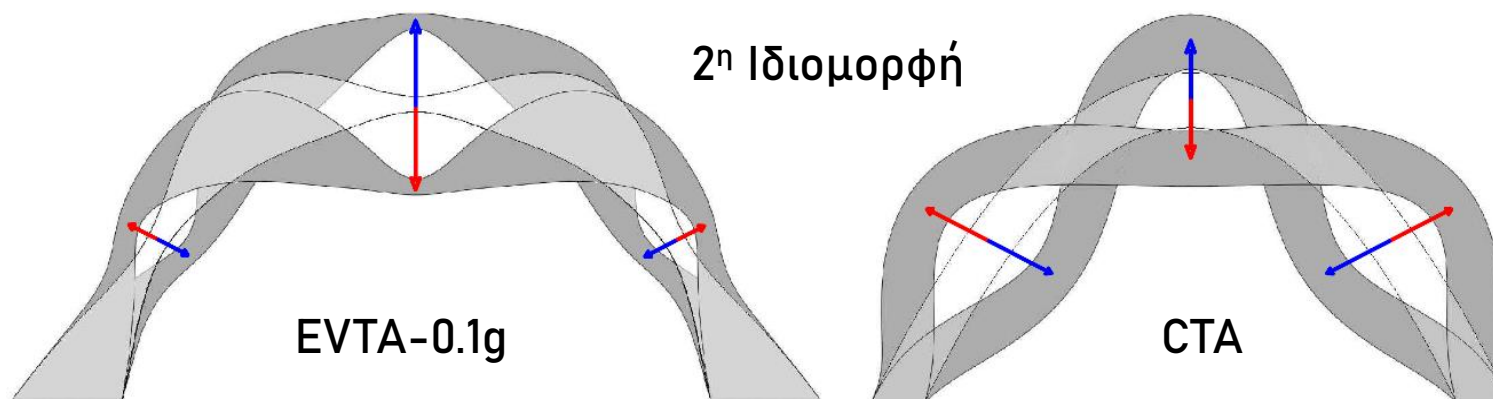
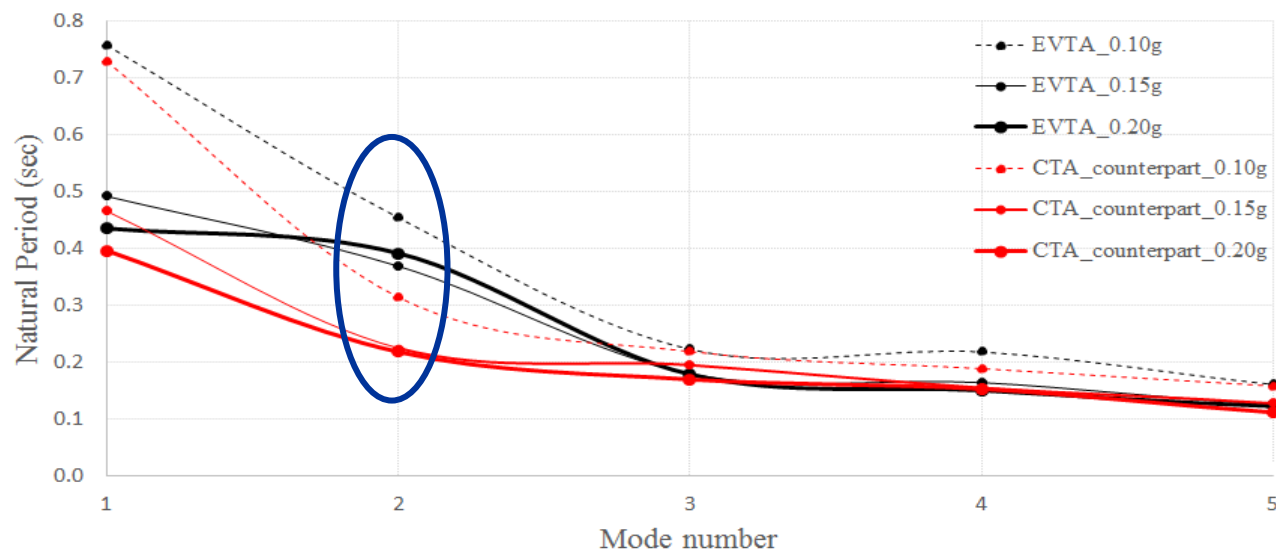
Table 2. Total lateral force capacity of the reference arches by means of pushover analysis (1st set).

Arch Type	Design lateral acceleration (g)	Cross section area (m ²)	Design force (kN)	Lateral force capacity (kN)	Lateral acceleration capacity (g)	Overstrength capacity/design
EVTA	0.1	48.95	110.45	209.02	0.189	1.89
Counterpart	0.1	48.95	110.45	114.05	0.103	1.03
EVTA	0.15	82.84	280.37	424.14	0.227	1.513
Counterpart	0.15	82.84	280.37	270.89	0.145	0.966
EVTA	0.2	103.57	467.37	575.85	0.246	1.232
Counterpart	0.2	103.57	467.37	390.46	0.167	0.835

Δική μας πρόταση

Ιδιομορφική Ανάλυση

Ιδιοπερίοδοι παραβολικών EVTAs (μαύρες καμπύλες) και παραβολικών ζευγών τους (κόκκινες καμπύλες)

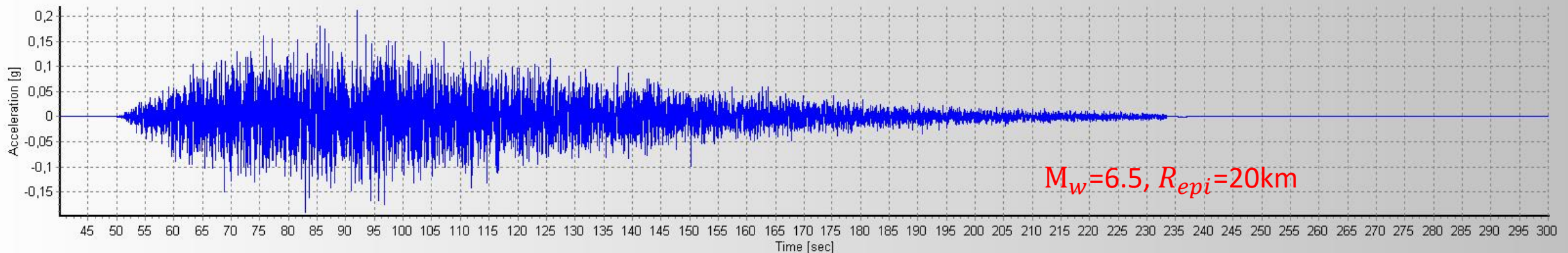
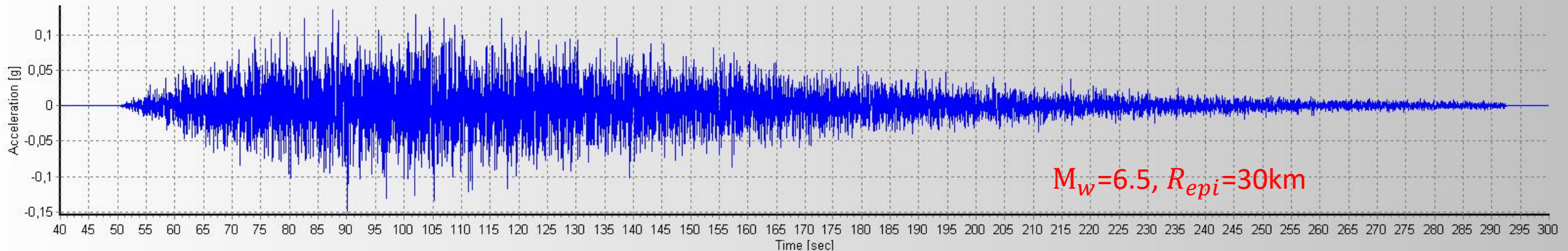


Δική μας πρόταση

Δυναμική Ανάλυση

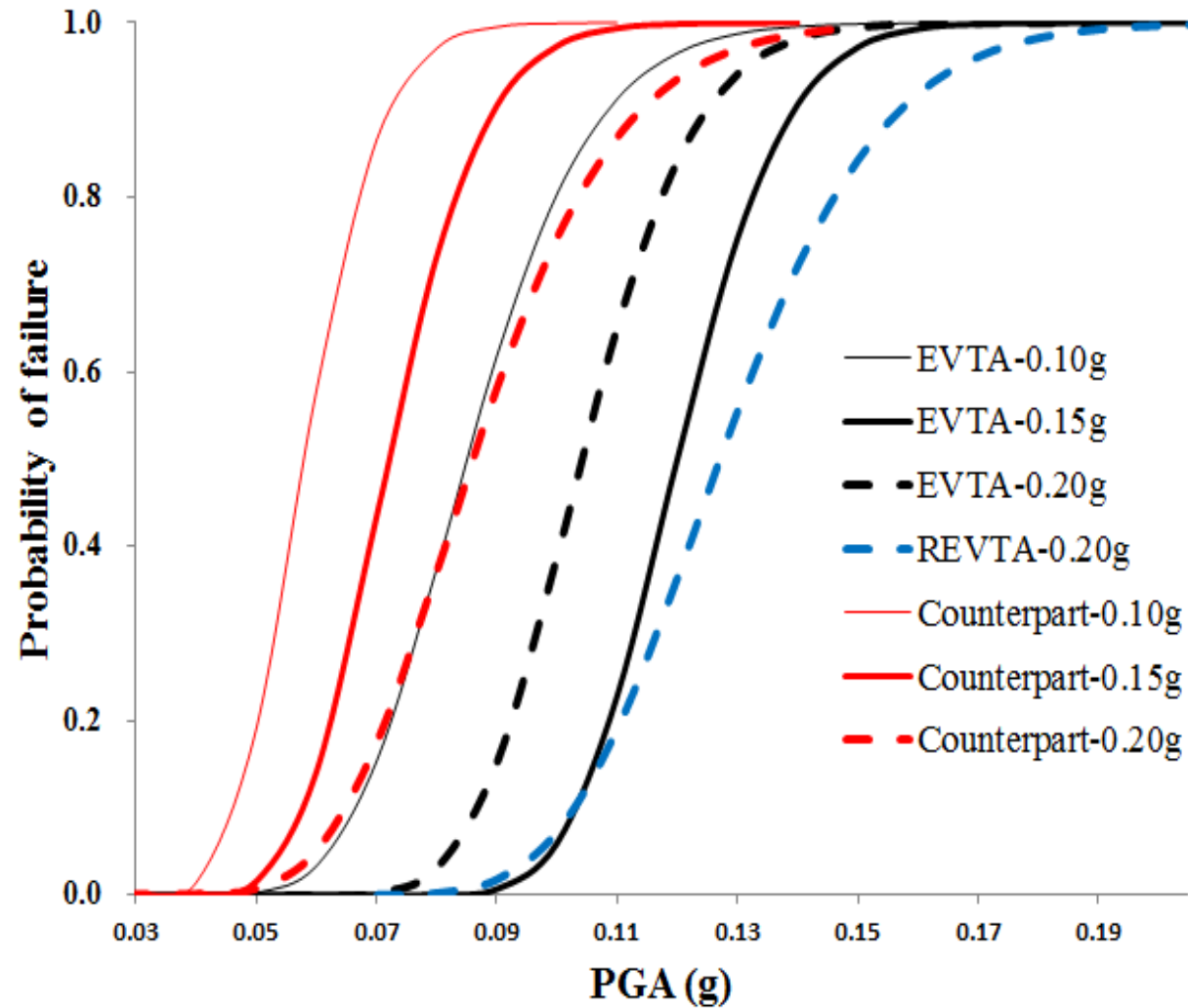
- $M_w=6.5$, $R_{epi}=20\text{km}$
- $M_w=6.5$, $R_{epi}=25\text{km}$
- $M_w=6.5$, $R_{epi}=30\text{km}$

Από αυτά τα τρία σενάρια προέκυψαν 3 ομάδες χρονοϊστοριών για να γίνουν δυναμικές αναλύσεις και στη συνέχεια καμπύλες τρωτότητας.



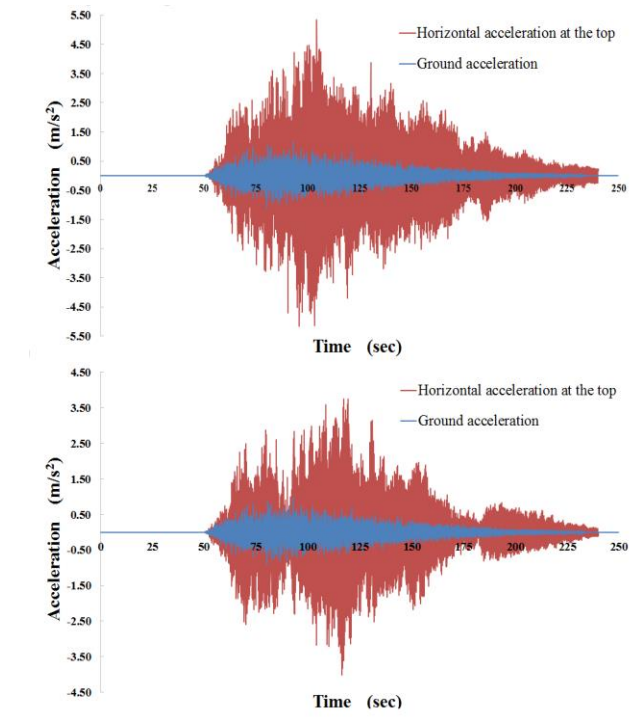
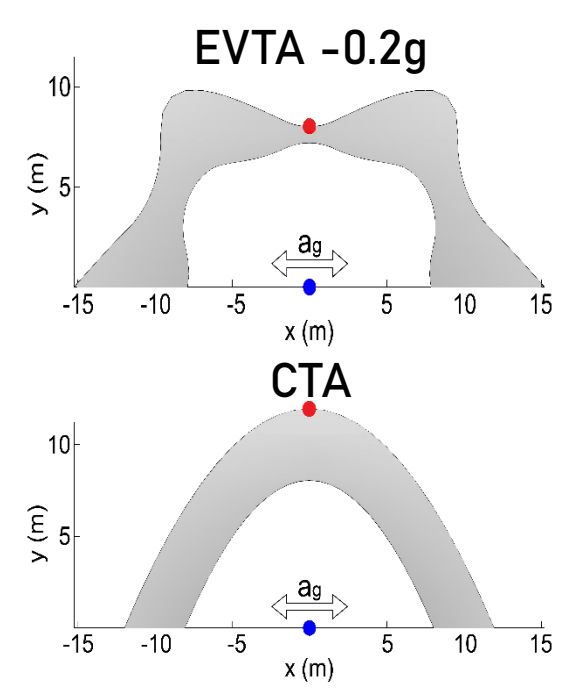
Δική μας πρόταση

Δυναμική Ανάλυση – Καμπύλες τρωτότητας

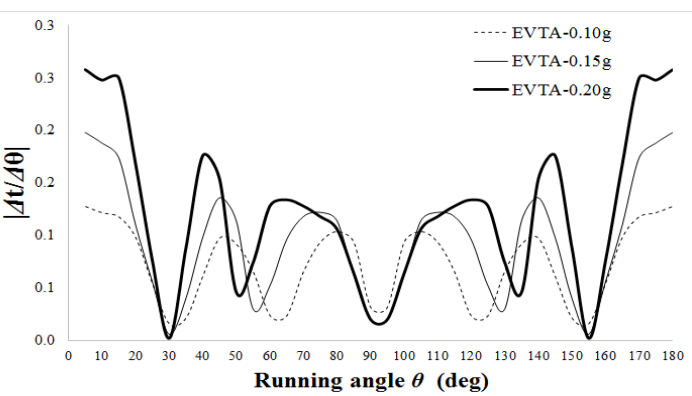
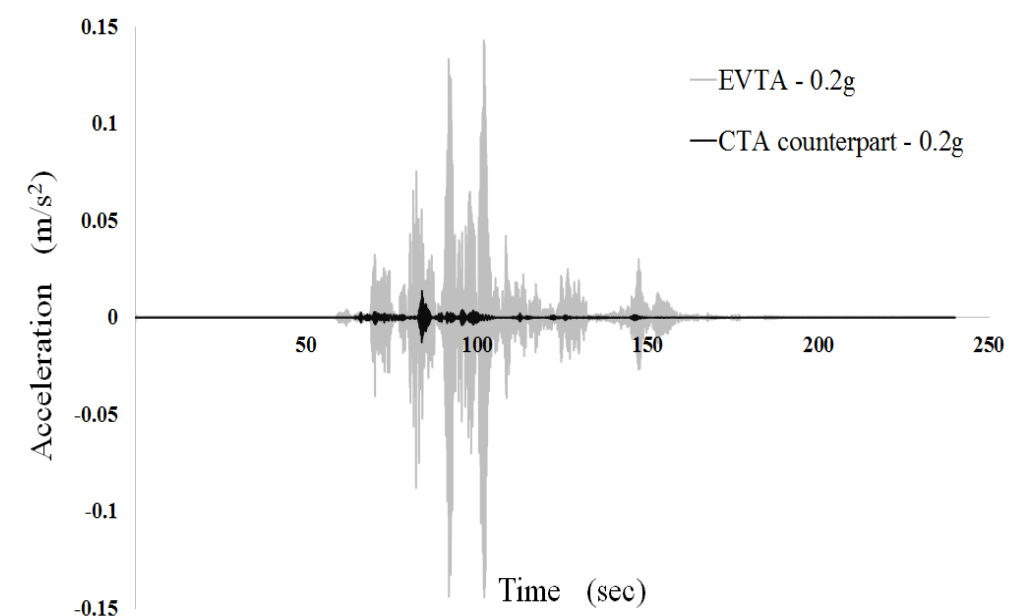


Δική μας πρόταση

Δυναμική Ανάλυση



Κατακόρυφη επιτάχυνση



Δική μας πρόταση

Τεχνητή Νοημοσύνη και μηχανική μάθηση στο στατικό και δυναμικό σχεδιασμό τόξων

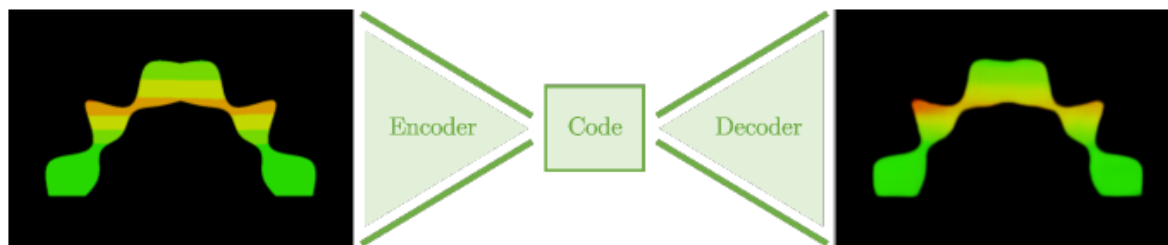
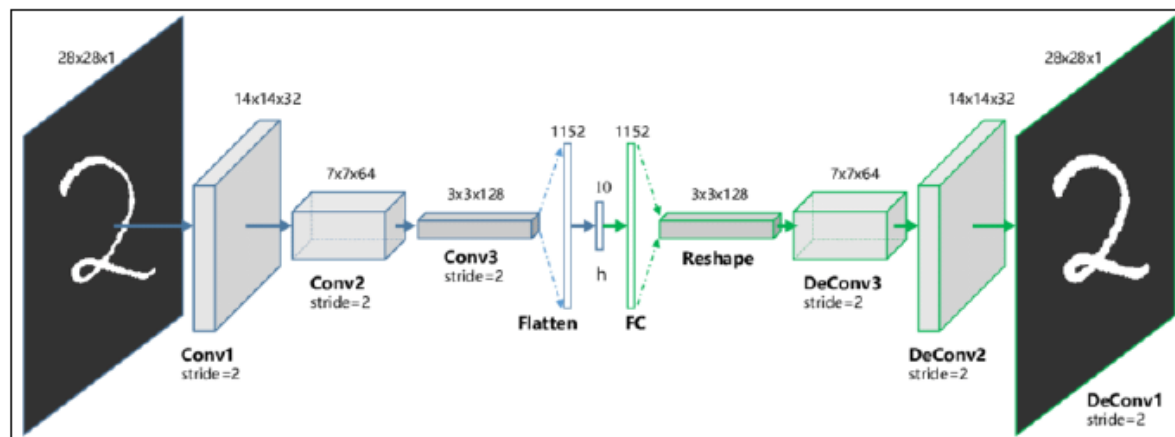
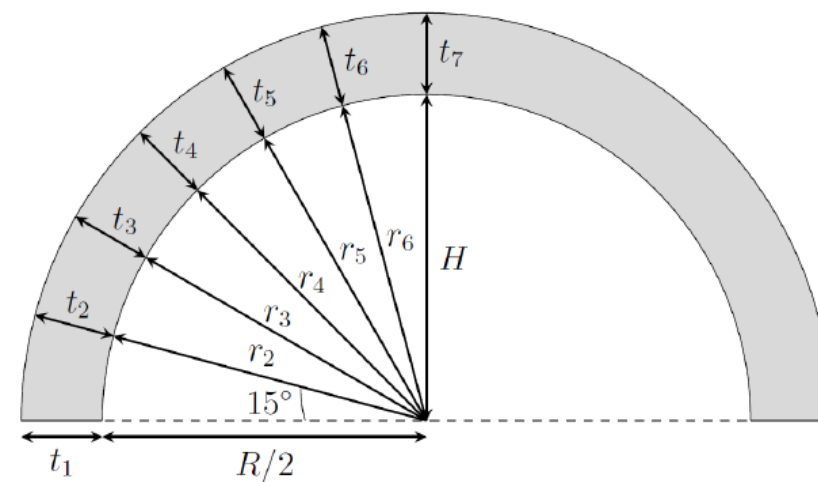
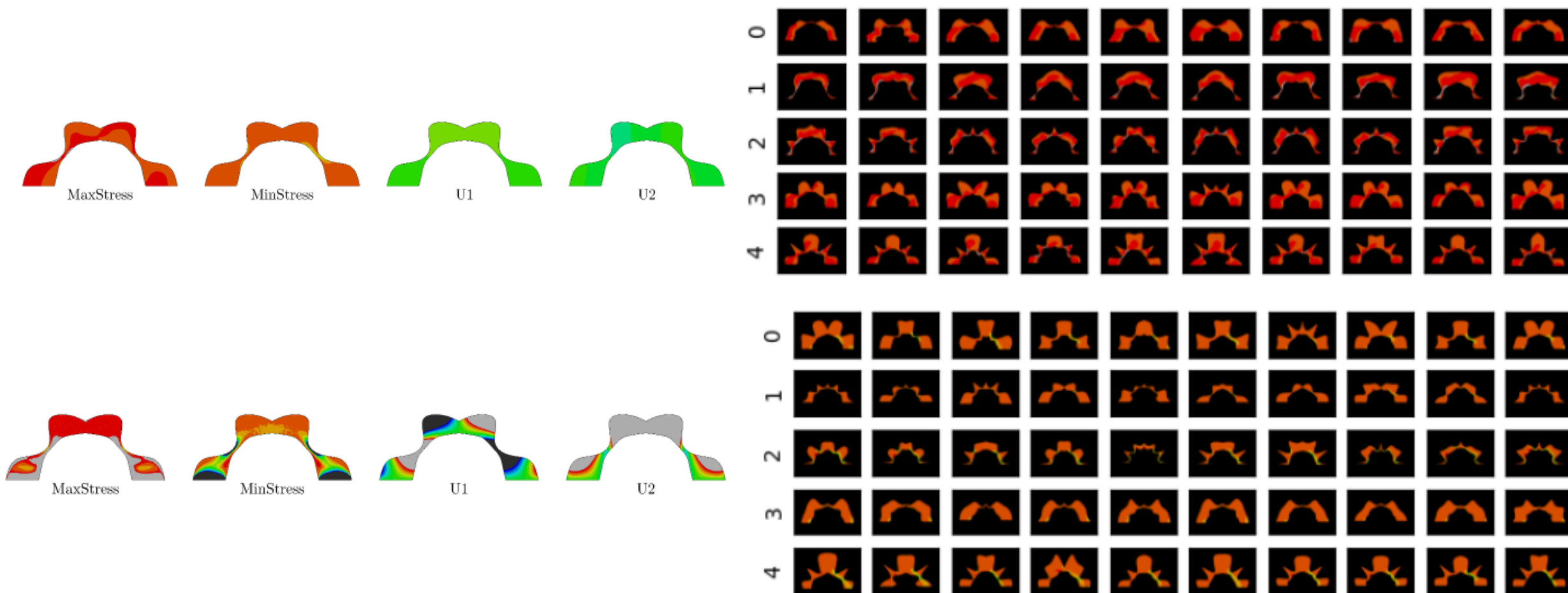


Figure 3.1: Schematic representation of the autoencoder components



Δική μας πρόταση

Τεχνητή Νοημοσύνη και μηχανική μάθηση στο στατικό και δυναμικό σχεδιασμό τόξων λαμβάνοντας υπόψη και τις θερμοκρασιακές μεταβολές



Δική μας πρόταση

Πειράματα σε μικρή κλίμακα στον φυγοκεντρητή.



Τρισδιάστατη εκτύπωση των δοκιμίων



Φυγοκεντρητής για προσομοίωση μερικής βαρύτητας

Δική μας πρόταση

Πειράματα σε μικρή κλίμακα στον φυγοκεντρητή.



Δημιουργία ενός πλήρους κανονιστικού πλαισίου για το σχεδιασμό ανθεκτικών κατασκευών έναντι φυσικών καταστροφών σε εξωγήινες περιβάλλοντικές συνθήκες.

- Μόνιμα φορτία: *ίδια βάρη, χαλαρές αποθέσεις ρεγόλιθου*
- Κινητά φορτία: *συχνές πτώσεις μετεωριτών, άνεμος χαμηλής πίεσης/υψηλής ταχύτητας (Άρης)*
- Τυχηματικές δράσεις: *κρούσεις με ρομποτικά μηχανήματα, κρούσεις μέσω μεταφοράς, κ.τ.λ.*
- Σεισμικές δράσεις: *λειτουργικότητα μετά από συνήθεις εδαφικές διεγέρσεις; Οιονεί κατάρρευση για ισχυρές εδαφικές διεγέρσεις (σχεδιασμού); Αυτό προϋποθέτει την εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (σεισμικές ζώνες)*
- Θερμοκρασιακές δράσεις: *ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές (από -170°C στους 130°C στη Σελήνη)*
- Κόπωση: *κυρίως από κυκλικές φορτίσεις πολλών κύκλων λόγω μεγάλης διάρκειας εδαφικών διεγέρσεων*

Ευχαριστώ
πολύ για την
προσοχή σας!

