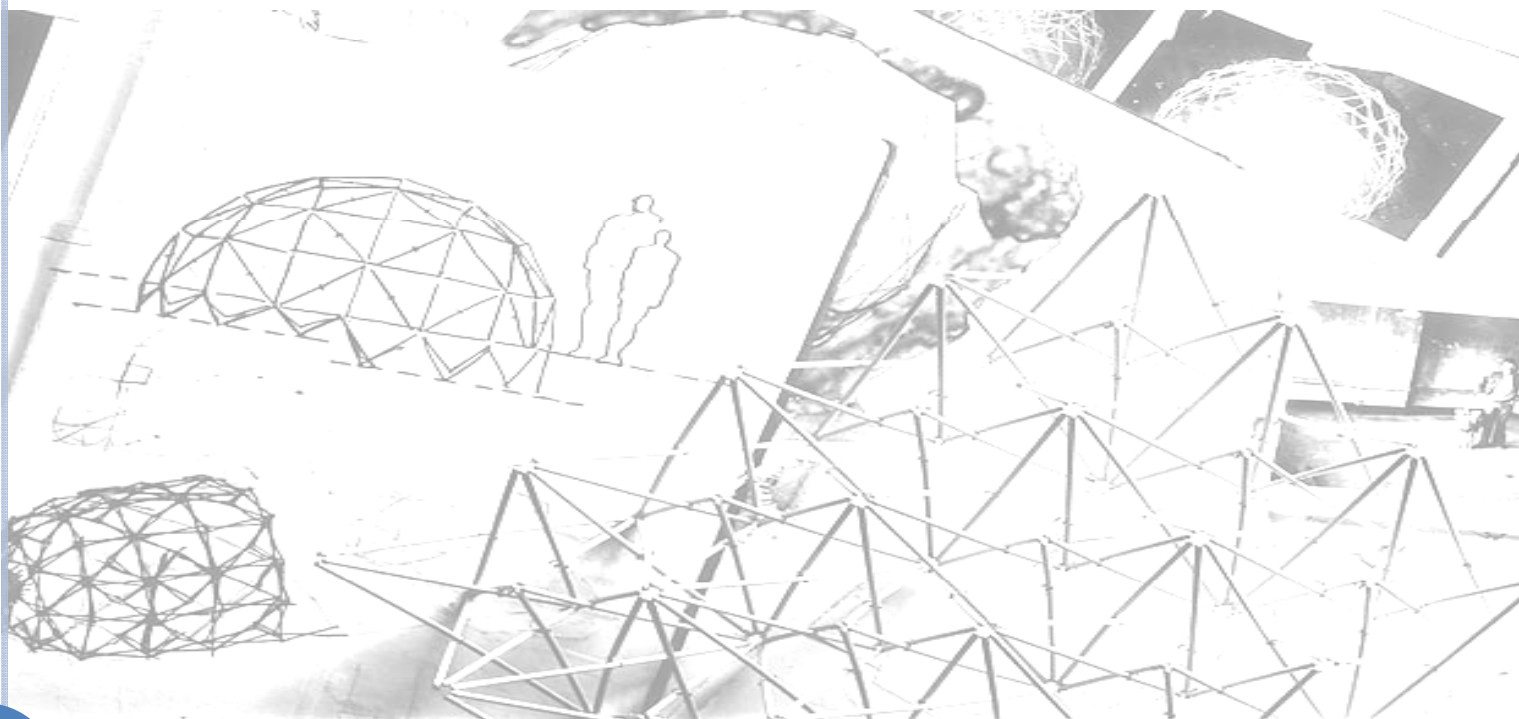


# ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK TOPOLÓGIÁJA, MÉRNÖKI ALKALMAZÁSA ÉS SZERKEZETI ANALÍZISE



**A Magyarországon és Franciaországban párhuzamosan folytatott kutatói  
munka munkaközi beszámolója**

**Témavezetők: Prof. Adnan Ibrahimbegovic, Dr. Farkas György**

**A témában még segítettek: Dr. Hegedűs István, Luc Davenne**

### Irodalom-kutatás:

- Szerkezeti részek merevtest-szerű mozgásával kinyitható tetőszerkezetek;
- Nyitható-csukható ponyvaszerkezetek;
- Pneumatikus szerkezetek
- Szétnyitható rácsszerkezetek
  - „ollós” szerkezetű nyitható-csukható szerkezetek
  - befeszülő, átpattintható szerkezetek;
  - hajtogatható *tensegrity* szerkezetek.

### Analitikus és numerikus módszertan megalapozása:

- Nagy elmozdulások kis alakváltozások számítása;
- Nagy elmozdulások, nagy alakváltozások számítása;
- Nemlineáris stabilitásvesztés, kritikus pontok keresése, posztkritikus vizsgálat.

### Numerikus példák:

- Alappélda a nemlineáris stabilitásvesztés és az átpattanás jelenségének megértéséhez;
- Zeigler-féle átpattintható alapegység vizsgálata;
- Antiprizmatikus rúdszerkezet vizsgálata.

### •Bevezetés

- *Kutatási munka áttekintése*
- *A nyitható csukható szerkezetekről*
- *Motiváció*

### •Kinyitható tetőszerkezetek

### •Számítási problémák és módszertan

### •Antiprizmatikus rúdszerkezetek

### •Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete

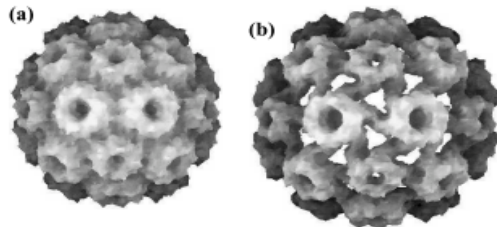


Olyan előregyártott szerkezetek, amelyek **nagy alakváltozásra képesek**, vagyis egy általában **csukott, kompakt alakzatból** egy előre meghatározott, kiterjedt alakzatra hajthatók, amelyben stabilak és teherbírók.

A természetben előforduló nyitható-csukható szerkezetek:

- vírus kapszidok
- levelek
- rovarszárnyak

Kép forrása: Reddy at al



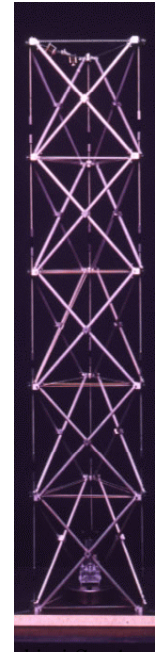
Képek forrása: Kishimoto (et al) - New Deplosable Membrane Structure Models Inspired by Morphological Changes in Nature



Ember által készített nyitható-csukható szerkezetek:

- Kisebb léptékű szerkezetek: szék, esernyő, kerítés
- Űrkutatásban alkalmazott bonyolultabb szerkezetek: toronyszerkezetek, napelemtáblák, reflektorantennák
- Építészeti és mérnöki szerkezetek: sátrak, hordozható menedékek, szétnyitható tetőszerkezetek, kinetikus kiállítási kijelzők.

Kép forrása: Deployable Structures Laboratory



Kép forrása: Giulio Barbieri S.p.A

## A NYITHATÓ-CSUKHATÓ SZERKEZETEK RŐL

### •Bevezetés

- Kutatási munka áttekintése
- A nyitható csukható szerkezetekről
- Motiváció

### •Kinyitható tetőszerkezetek

### •Számítási problémák és módszertan

### •Antiprizmatikus rúdszerkezetek

### •Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete

Megfelelő **ellenállóképesség** a hasznos terhekkel szemben a működési alakzat(ok)ban + megfelelő **"hajlékonyság"**, amely a kinyitást összecsuksztást lehetővé teszi!





Kivitelezési módszer (egyszerű, gyors, vagy éppen biztonságos);

Szállíthatóság, átalakíthatóság ( $V_{nyitott} > V_{csukott}$ );



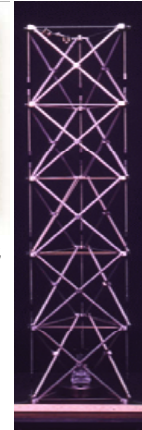
Pneumatikus hangár



Kipattanó kijelző (Nomadic Display)



Kipattanó stent



Deployable Mast  
[Pellegrino]



Hamanizuki Park



Nara Centennial Hall

Alkalmazkodás az időjárási viszonyokhoz.



BMW 3 cabrio



Oita Main Stadium

## MOTIVÁCIÓ – KINYITHATÓSÁG ELŐNYEI

### • Bevezetés

- A nyitható csukható szerkezetekről
- Kutatási munka áttekintése
- Motiváció

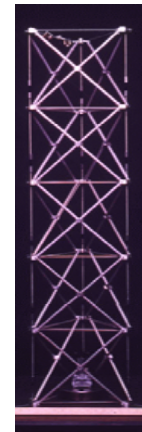
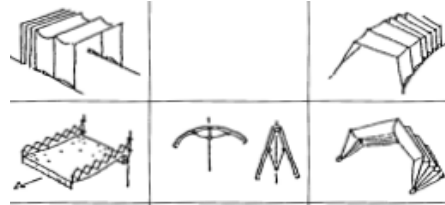
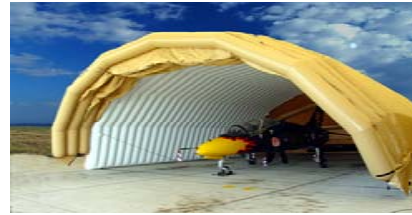
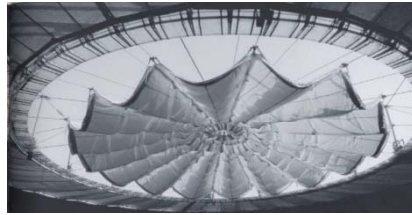
### • Kinyitható tetőszerkezetek

### • Számítási problémák és módszertan

### • Antiprizmatikus rúdszerkezetek

### • Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete





# KINYITHATÓ TETŐSZERKEZETEK

• Bevezetés

• Kinyitható tetőszerkezetek

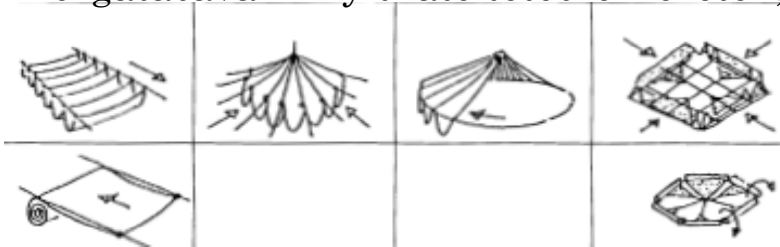
- Szerkezeti típusok nagyvonalakban
- Befeszülő-átpattanó szerkezetek

• Számítási problémák és módszertan

• Antiprizmatikus rúdszerkezetek

• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete

• Szerkezeti részek merevtest-szerű mozgatásával kinyitható tetőszerkezetek;



• Nyitható-csukható ponyvaszerkezetek;

• Pneumatikus szerkezetek;

• Szétnyitható rácsszerkezetek:

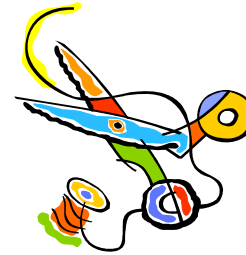
- „ollós” szerkezetű nyitható-csukható szerkezetek, pantográf szerkezetek;
- hajtogatható tensegrity szerkezetek;
- befeszülő, átpattintható szerkezetek.





# ○ Ollószerű nyitató-csukható szerkezetek

- Alapegység: SLE
- Másodlagos egység:



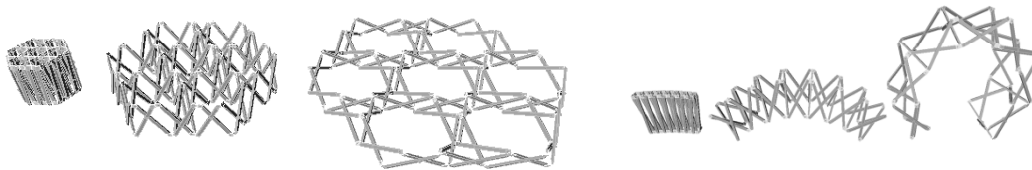
Háromszögalapú piramis egység



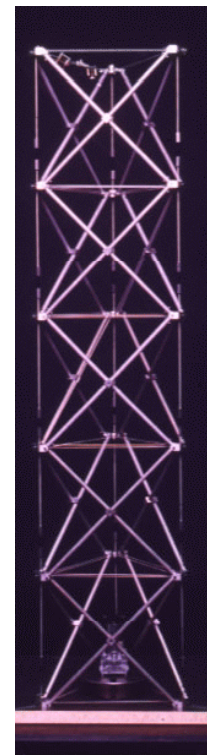
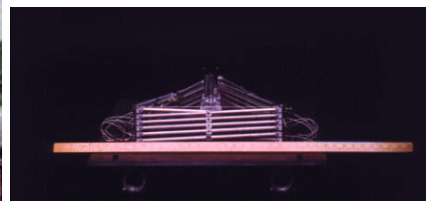
Négyzetes piramis egység



Rézsütös egység



S. Pellegrino



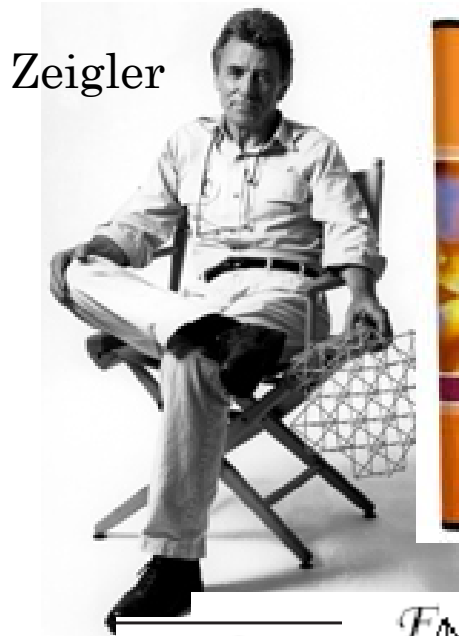
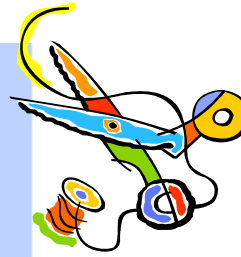
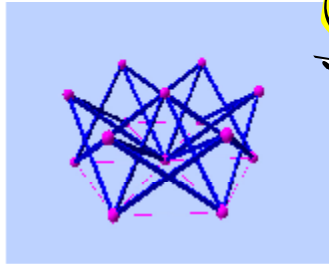
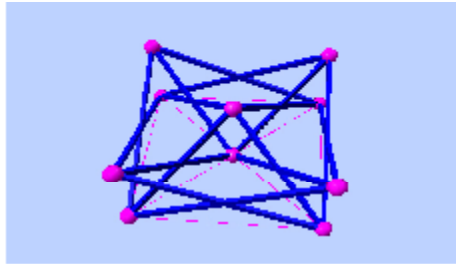
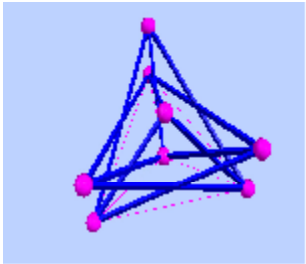
## BEFESZÜLŐ-ÁTPATTANÓ SZERKEZETEK

- Bevezetés
- **Kinyitható tetőszerkezetek**
  - Szerkezeti típusok nagyvonalakban
- Befeszülő-át pattanó szerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Numerikus példák
- Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete



# Befeszülő-átpattanó szerkezetek alapelve

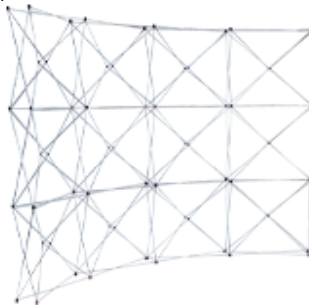
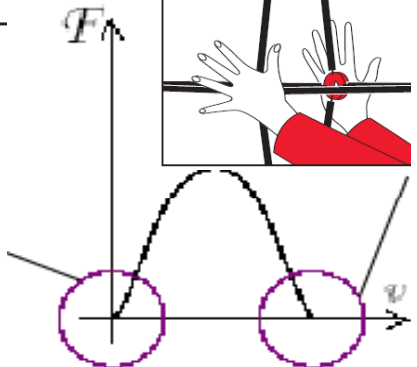
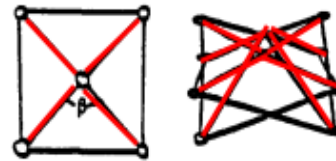
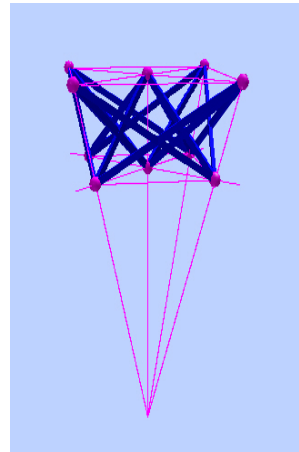
Zeigler, Krishnapillai, Logcher , Rosenfeld, Gantes



Zeigler



Nomadic Display



## BEFESZÜLŐ-ÁTPATTANÓ SZERKEZETEK

•Bevezetés

•Kinyitható tetőszerkezetek

- Szerkezeti típusok nagyvonalakban
- Befeszülő-átpattanó szerkezetek

•Számítási problémák és módszertan

•Antiprizmatikus rúdszerkezetek

•Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete



- Nyitható-csukható szerkezetekkel kapcsolatos számítási nehézségek
  - Komplex szerkezetek → modell verifikáció nehézkes
  - Nem szimmetrikus, nem sima anyagtulajdonságok;
  - **Súrlódási és más disszipációs tulajdonságok modellezési nehézsége;**
  - Sajátfeszültségi állapot jelenléte;
  - **Geometriai optimalizáció;**
  - **Nagy elmozdulások, lokális és globális stabilitásvesztés.**



- ~~Megmerevítés elve (egyensúlyi egyenlet a terheletlen tartóalakra felírva)~~
- ~~Lineáris kompatibilitási egyenletek~~

## SZÁMÍTÁSI PROBLÉMÁK ÉS MÓDSZERTAN

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek

### Számítási problémák és módszertan

- Nemlineáris numerikus vizsgálat alapegyenletei
- Nemlineáris stabilitásvesztés
- Kritikus pont keresése
- Ívhossz módszer

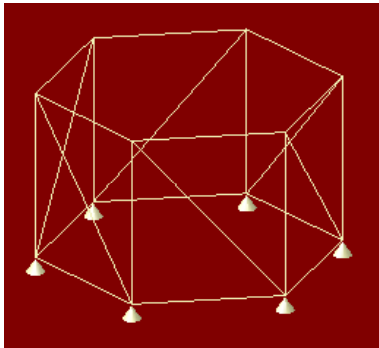
### • Antiprizmatikus rúdszerkezetek

- **Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete**





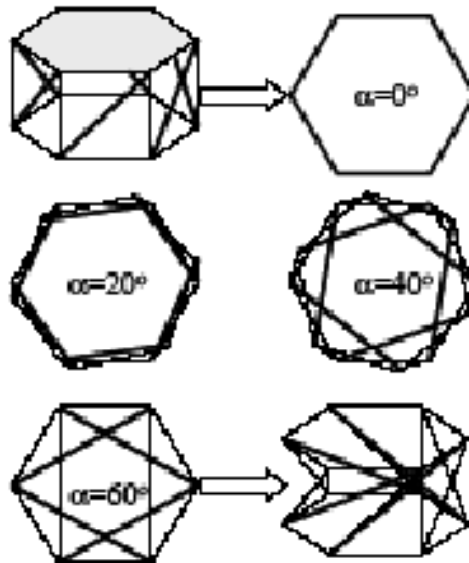
## ◦ Izogonális antiprizma



$$G-s + q = 0$$

[Tarnai]

$$G = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 & H \\ H & A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H & A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H & A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H & A \end{pmatrix}$$



$$A = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ 0 & c & d \\ 0 & e & f \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} g & 0 & 0 \\ h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$a, b, c, d, e, f, g = f(n, R, h, \alpha)$$

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek

- Számítási problémák és módszertan

- Antiprizmatikus rúdszerkezetek

- Topológia

- Mérnöki alkalmazás
- Szerkezeti számítás

- Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete



# o Izogonális antiprizma elforgatása [Tarnai]

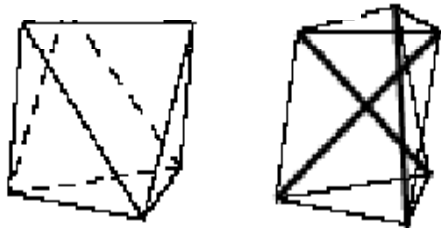
Szingularitás keresése:  $\text{Det}(G) = 0$

•Páratlan n esetén:

$$\theta_1 := \frac{(n+2)\pi}{2n} + 2k\pi$$

$$\theta_2 := \frac{(3n+2)\pi}{2n} + 2k\pi$$

Nullitás: 1  $\rightarrow$   
 statikailag és kinematikailag  
 (egyszeresen) határozatlan szerkezet  
 (egyparaméteres sajátfeszültségi  
 állapotban, egy szabadságfokú  
 infinitezimális mechanizmus)

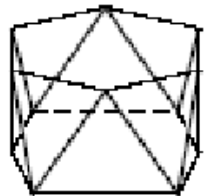


n=3  
 (tensegrity triplex)

•Páros n esetén:

$$\theta_1 := \frac{(n+2)\pi}{2n} + 2k\pi$$

$$\theta_2 := \frac{(3n+2)\pi}{2n} + 2k\pi$$



infinitezimális mechanizmus

$$\theta_3 := \frac{\pi}{n} + 2k\pi$$

$$\theta_4 := \frac{(n+1)\pi}{n} + 2k\pi$$

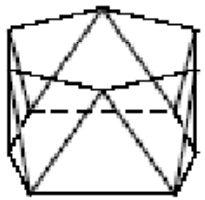
véges mechanizmus

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek

- Topológia
  - Mérnöki alkalmazás
  - Szerkezeti számítás

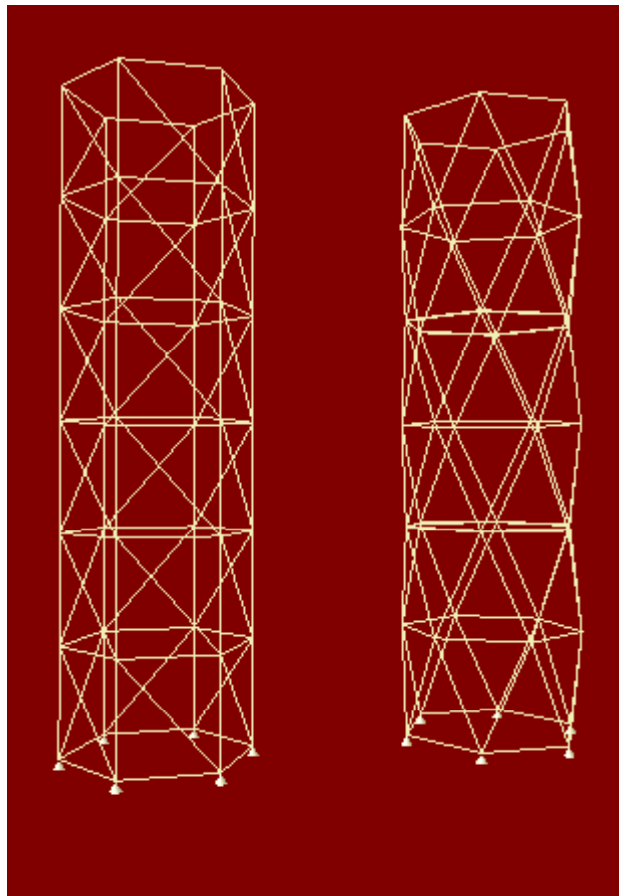
•Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete





$$\theta_3 := \frac{\pi}{n} + 2k\pi$$

G nullitása 1 függetlenül az emeletek számától



Kinematikailag egyszerűen határozatlan

Statikailag határozott

Statikailag egyszerűen határozatlan  
(egyparaméteres sajátfeszültségi állapotban lehet)

## ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK ALKALMAZÁSA

• Bevezetés  
• Kinyitható tetőszerkezetek

• Számítási problémák és módszertan

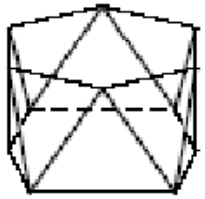
• Antiprizmatikus rúdszerkezetek

- Topológia
- Mérnöki alkalmazás
- Szerkezeti számítás

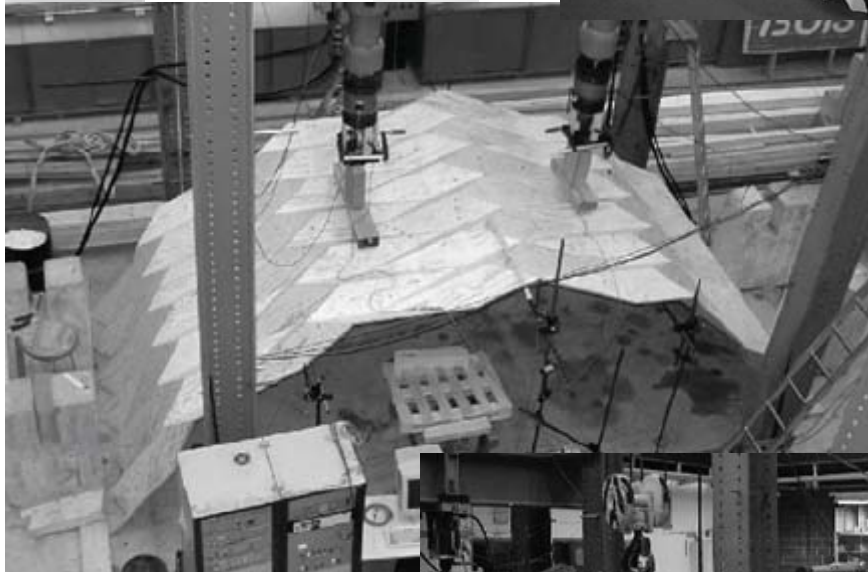
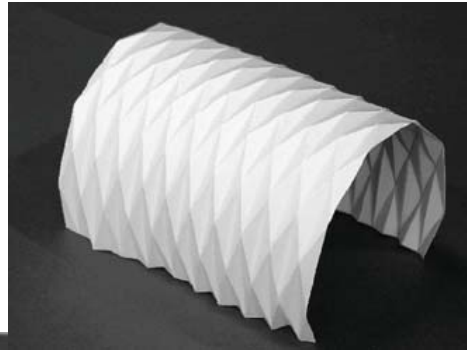
• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete







$$\theta_3 := \frac{\pi}{n} + 2k\pi$$

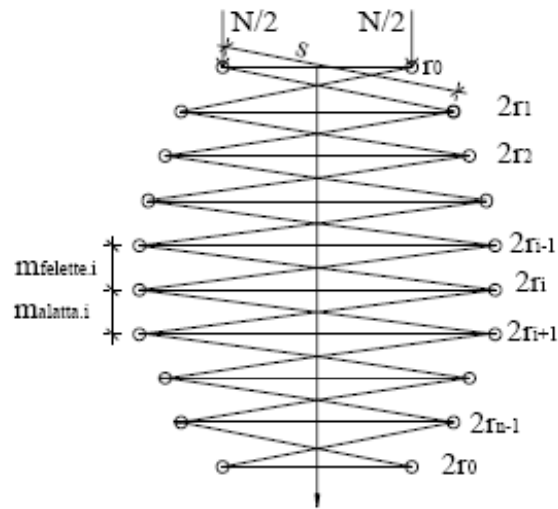
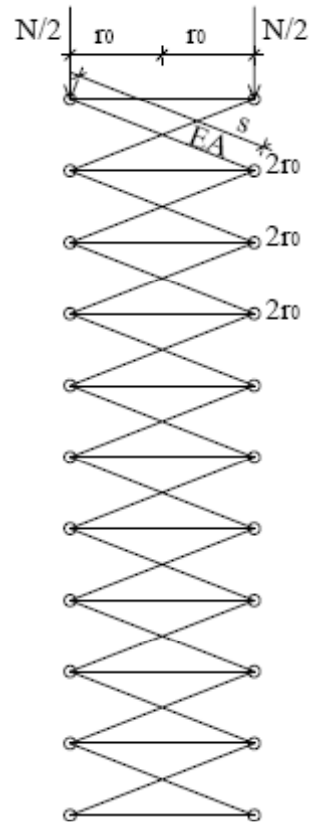


## ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK ALKALMAZÁSA

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
  - *Topológia*
  - *Mérnöki alkalmazás*
  - *Szerkezeti számítás*

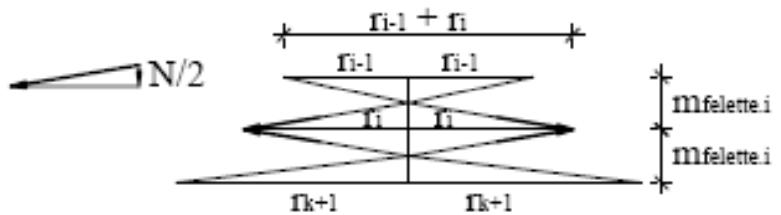
- Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete

# ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK SZÁMÍTÁSA 2D



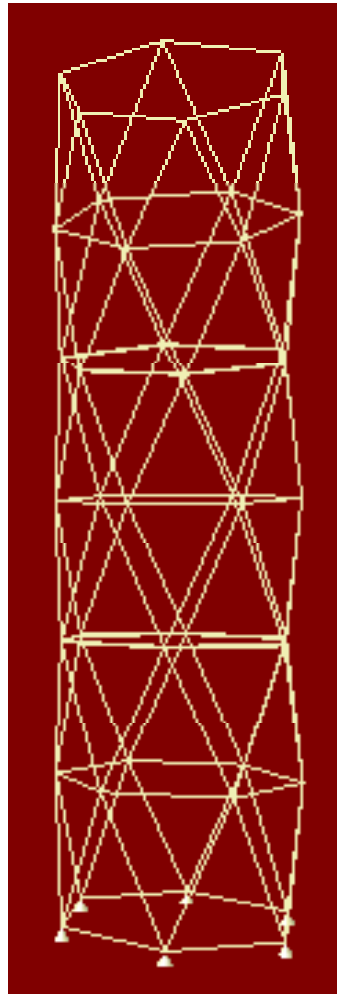
$$m_{\text{alatta}_i} := \sqrt{s \cdot 0^2 - (r_i + r_{i+1})^2}$$

$$m_{\text{felette}_k} := \sqrt{s \cdot 0^2 - (r_k + r_{k-1})^2}$$



A j-edik vízszintes (rugalmas) rudat a fölötte és alatta fekvő ferde rúdpár rúdereje feszíti meg:

$$R_j := \frac{N \cdot 0}{2} \cdot \left[ \frac{(r_{j-1} + r_j)}{m_{\text{felette}_j}} + \frac{(r_{j+1} + r_j)}{m_{\text{alatta}_j}} \right]$$



- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
  - Topológia
  - Mérnöki alkalmazás
  - Szerkezeti számítás
    - 2D példa
    - 3D példa

• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete



A rúderő okozta megnyúlás alapján a vízszintes rudak megváltozott hossza ( $r_0(1+R/EA)$ ):

$$r'_0 := r_0$$

$$r'_j := r_0 \left[ 1 + \frac{N_0}{2 \cdot EA} \left[ \frac{(r_{j-1} + r_j)}{\sqrt{s_0^2 - (r_j + r_{j-1})^2}} + \frac{(r_{j+1} + r_j)}{\sqrt{s_0^2 - (r_j + r_{j+1})^2}} \right] \right]$$

$$r'_n := r_0 \left[ 1 + \frac{N_0}{2 \cdot EA} \cdot \frac{(r_{n-1} + r_n)}{\sqrt{s_0^2 - (r_n + r_{n-1})^2}} \right]$$

Definiáljuk a következő hibafüggvényeket:  $h_i = r_i - r'_i$

Newton iterációval számítva:

- $r$  kezdeti értékének felvétele;
- $h = r - r'$  számítása;
- Jakobi mátrix meghatározása ( $J = \partial h_i / \partial r_j$ );

$$J = \begin{bmatrix} \diagdown & & \\ & \diagdown & \\ & & \diagdown \end{bmatrix}$$

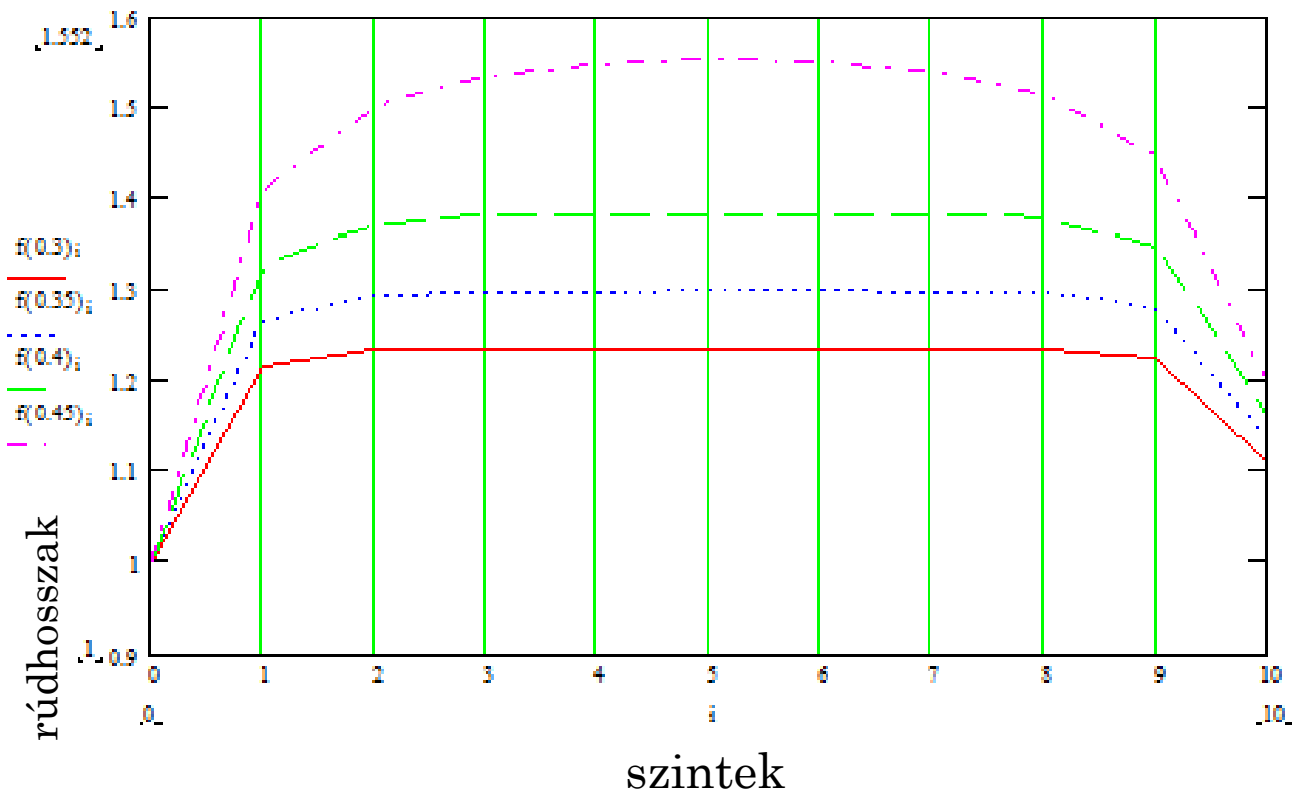
- $r$  felvett értékének módosítása:  $r = r - J^{-1}h$ ;
- Következő iteráció számítása  $h < \varepsilon$  esetén.

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
  - Topológia
  - Mérnöki alkalmazás
  - Szerkezeti számítás
    - 2D példa
    - 3D példa

• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete





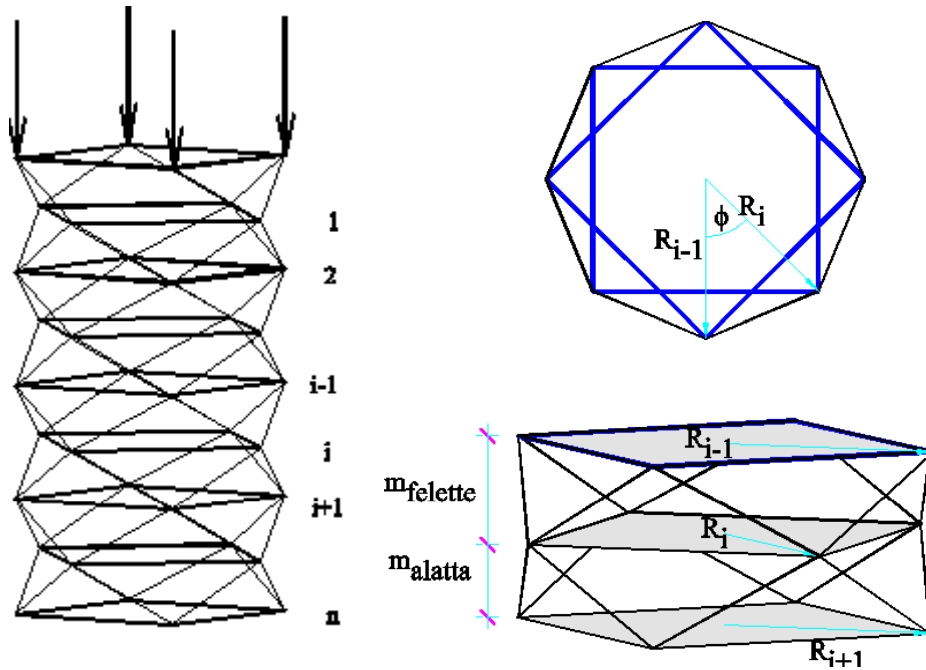


## ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK SZÁMÍTÁSA 2D

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
  - *Topológia*
  - *Mérnöki alkalmazás*
  - **Szerkezeti számítás**
    - 2D példa
    - 3D példa

• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete



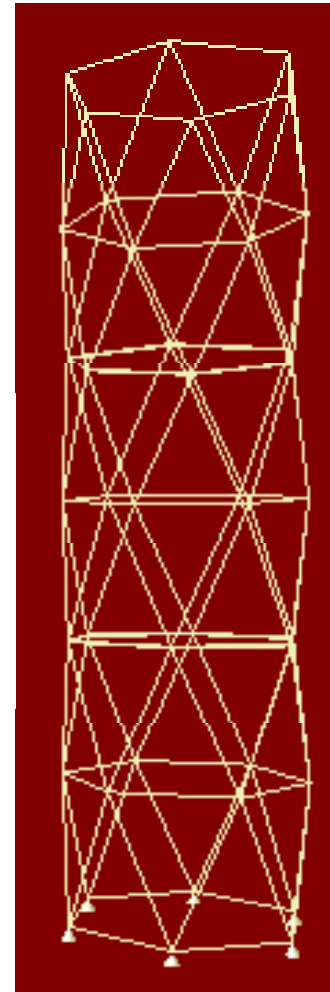


$$m_{alatta_i} := \sqrt{S_0^2 - (R_{i+1} \cdot \sin(\phi))^2 - (R_i - R_{i+1} \cdot \cos(\phi))^2}$$

$$m_{felette_k} := \sqrt{S_0^2 - (R_{k-1} \cdot \sin(\phi))^2 - (R_k - R_{k-1} \cdot \cos(\phi))^2}$$

A j-edik szinten a vízszintes (rugalmas) rudat a fölötte és alatta fekvő ferde rúdok rúdereje feszíti meg:

$$F_j := \frac{N_0}{m_s} \left( \frac{R_j - R_{j+1} \cdot \cos(\phi)}{m_{alatta_j}} \cdot \frac{1}{\sin(\phi)} + \frac{R_j - R_{j-1} \cdot \cos(\phi)}{m_{felette_j}} \cdot \frac{1}{\sin(\phi)} \right)$$



## ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK SZÁMÍTÁSA 3D

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
  - Topológia
  - Mérnöki alkalmazás
  - Szerkezeti számítás
    - 2D példa
    - 3D példa

• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete



A rúderő okozta megnyúlás alapján a vízszintes rudak megváltozott hossza ( $r_0(1+R/EA)$ ):

$$r'_j := r_0 \left[ 1 + \frac{N_0}{m_s \cdot EA} \cdot \left[ \frac{R_j - R_{j+1} \cdot \cos(\phi)}{\sqrt{S_0^2 - (R_{j+1} \cdot \sin(\phi))^2 - (R_j - R_{j+1} \cdot \cos(\phi))^2}} \cdot \frac{1}{\sin(\phi)} \dots + \frac{R_j - R_{j-1} \cdot \cos(\phi)}{\sqrt{S_0^2 - (R_{j-1} \cdot \sin(\phi))^2 - (R_j - R_{j-1} \cdot \cos(\phi))^2}} \cdot \frac{1}{\sin(\phi)} \right] \right]$$

$$r'_n := r_0 \left[ 1 + \frac{N_0}{m_s \cdot EA} \cdot \frac{R_n - R_{n-1} \cdot \cos(\phi)}{\sqrt{S_0^2 - (R_{n-1} \cdot \sin(\phi))^2 - (R_n - R_{n-1} \cdot \cos(\phi))^2}} \cdot \frac{1}{\sin(\phi)} \right]$$

Definiáljuk a következő hibafüggvényeket:  $h_i = r_i - r'_i$

Newton iterációval számítva:

- $r$  kezdeti értékének felvétele;
- $h = r - r'$  számítása;
- Jakobi mátrix meghatározása ( $J = \partial h_i / \partial r_j$ );

$$J = \begin{bmatrix} \diagdown & & \\ & \diagdown & \\ & & \diagdown \end{bmatrix}$$

- $r$  felvett értékének módosítása:  $r = r - J^{-1}h$ ;
- Következő iteráció számítása  $h < \varepsilon$  esetén.

• Bevezetés  
• Kinyitható tetőszerkezetek

• Számítási problémák és módszertan

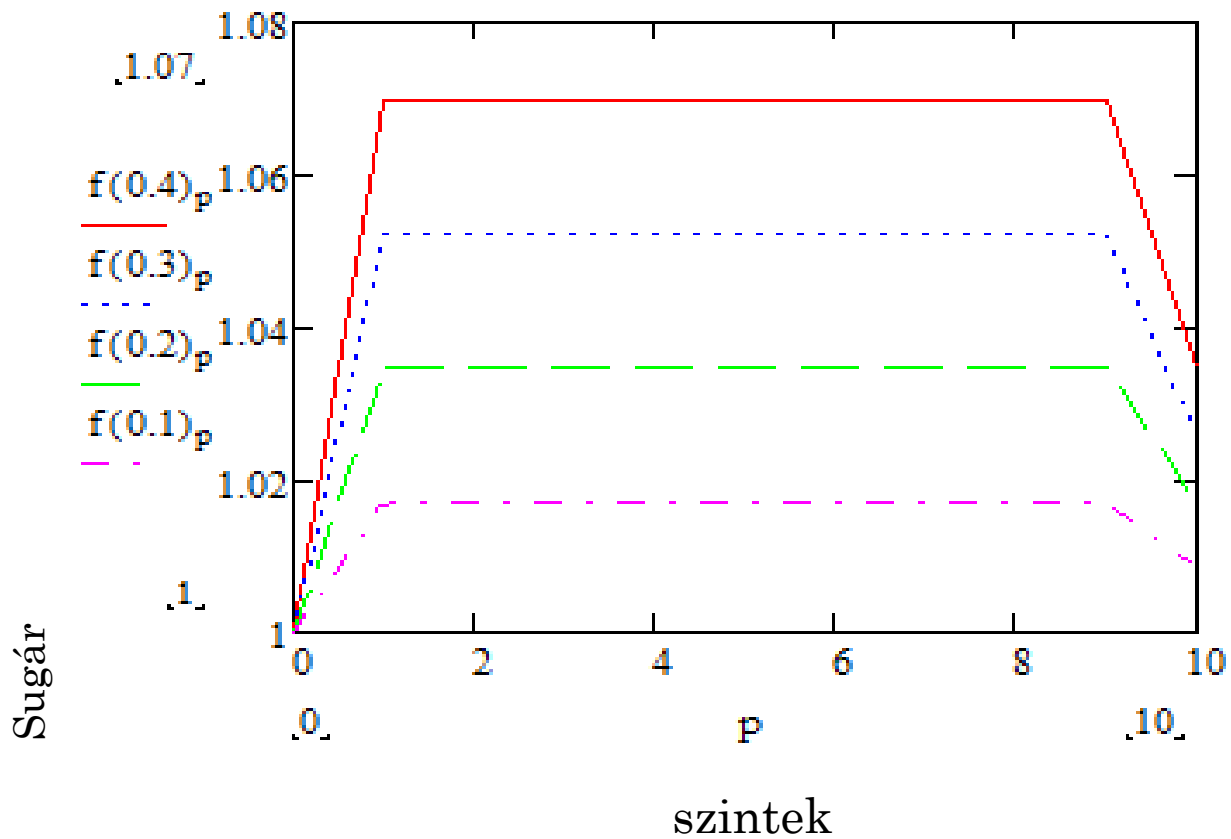
• Antiprizmatikus rúdszerkezetek

- Topológia
- Mérnöki alkalmazás
- Szerkezeti számítás
  - 2D példa
  - 3D példa

• Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete







## ANTIPRIZMATIKUS SZERKEZETEK SZÁMÍTÁSA 3D

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
  - Topológia
  - Mérnöki alkalmazás
  - Szerkezeti számítás
    - 2D példa
    - 3D példa

• Összefoglalás,  
kutatási munka  
előirányozott  
menete



- **Összefoglalás, a kutatási munka előirányozott menete**
  - Irodalomkutatás eredményei
    - Publikált eredmény:
  - Friedman Noémi, Dr. Farkas György - *Összecsukható-Kinyitható Rúdszerkezetek a Mérnöki alkalmazásban* (A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei 2004).
  - Friedman Noémi, Dr. Farkas György - *Újszerű könnyűszerkezetek — kezdeti próbálkozások az összehajtogatható szerkezetek általános mérnöki alkalmazására* (Innovative lightweight structures — first steps in the direction of using deployable structures for general engineering applications) Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, EPKO 2005 konferenciakiadványa
  - N. Friedman, A. Ibrahimbegovic, Gy. Farkas: *A Study on Deployable Structures Enabling a Quick Constructional Method*, Proceedings NATO-ARW, GF Sarajevo, 2008
  
- **Újszerű tudományos eredmények:**
  - Publikált eredmény:
  - A. Ibrahimbegovic, A. Kucerova, D. Brancherie, M. Hautefeuille, J.B. Colliat, N. Friedman, M.Zlatac: *Civil Engineering Structures: Multiscale Damage representation, identification, controlled destruction and quick reconstruction, Damage Assessment and Reconstruction after War or Natural Disaster* pp3-28, Springer edition, ISBN 978-90-481-2384-1
    - Publikálandó eredmény:
  - Átpattanó szerkezetek posztkritikus állapotának dinamikai vizsgálata
  
- **A jövőben remélt kutatási eredmények:**
  - Antiprizmatikus szerkezetek átpattanási sorrendjének vizsgálata
  - Átpattanó nyitható-csukható szerkezetek optimalizálása, normalizálása (keresztmetszeti optimalizálás, és disszipáció optimalizálás; a biztonságosság kérdése Eurocode alapján, parciális tényezők meghatározása)

## ÖSSZEFOGLALÁS, A KUTATÁS FOLYTATÁSA

- Bevezetés
- Kinyitható tetőszerkezetek
- Számítási problémák és módszertan
- Antiprizmatikus rúdszerkezetek
- **Összefoglalás, kutatási munka előirányozott menete**



*KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!*