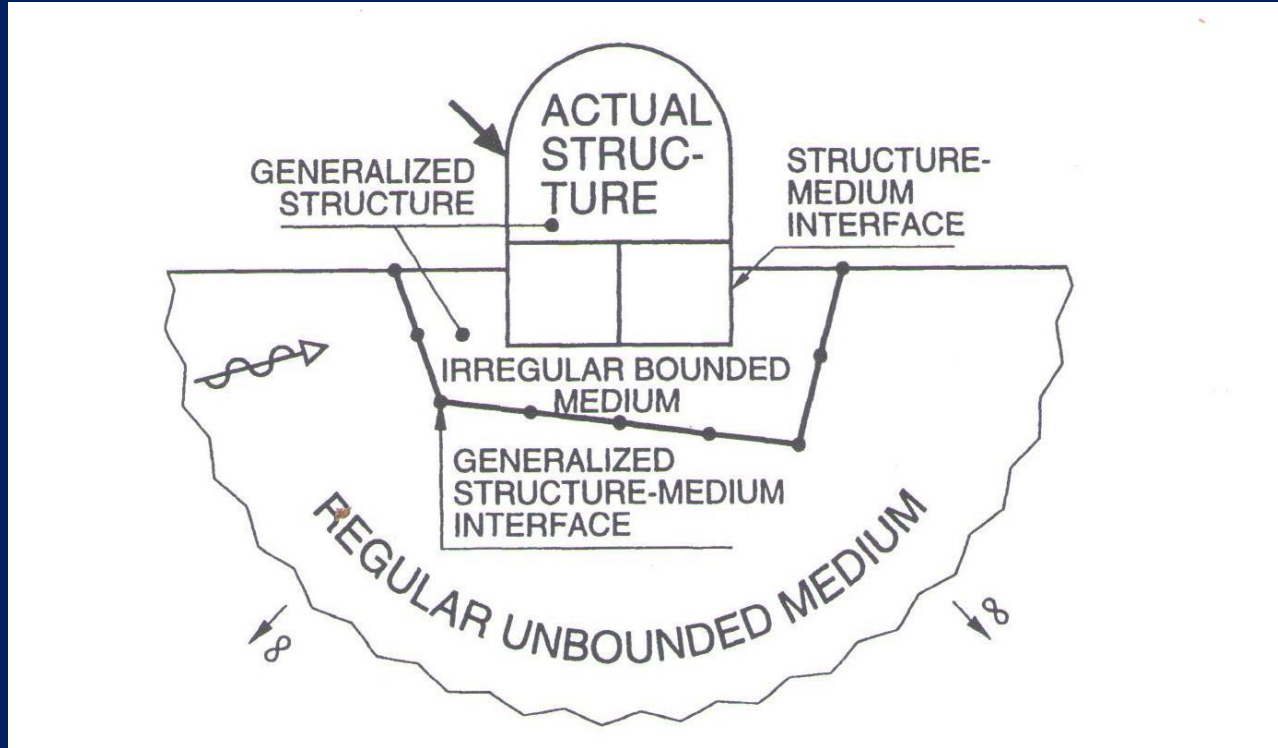


# آنالیز دینامیکی چهار سازه مهم در برابر نیروی زلزله سوئیس و ایران با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

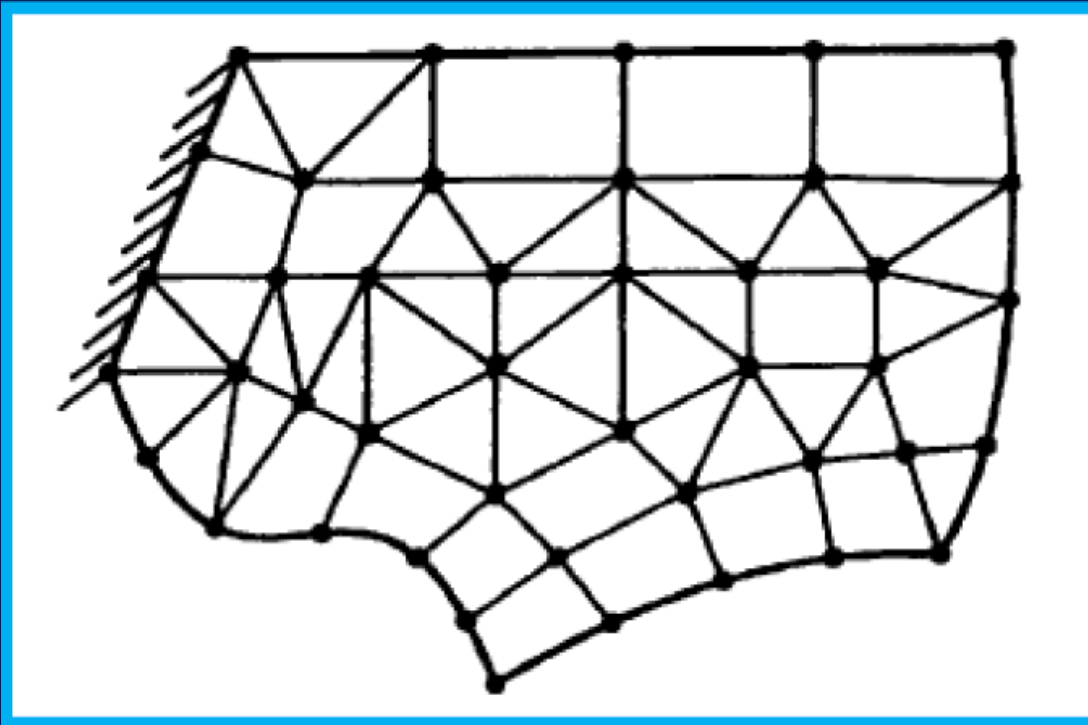
دکتر ساسان محاسب  
عضو هیئت علمی دانشگاه تهران  
استاد دانشکده علوم و فنون نوین  
استاد مدعو دانشگاه ام آی تی کمبریج آمریکا

- صورت مسأله
- روش‌های دقیق
- روش اجزای محدود (FEM)
- روش اجزای مرزی (BEM)
- روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده (SBFEM)
- روش‌های تقریبی
- مدل مخروط
- مدل‌های جرم متمرکز
- کاربردها
- پروژه سیلو در زوریخ، سوئیس
- پروژه هتل آزادی در تهران
- برج Davos، سازه ۲۸۰۰ متری در سوئیس
- نتایج



تعریف مسئله اندرکنش دینامیکی سازه و محیط غیرپیوسته

گسسته سازی فضای مورد بررسی  
در روش المان محدود  
(FEM)

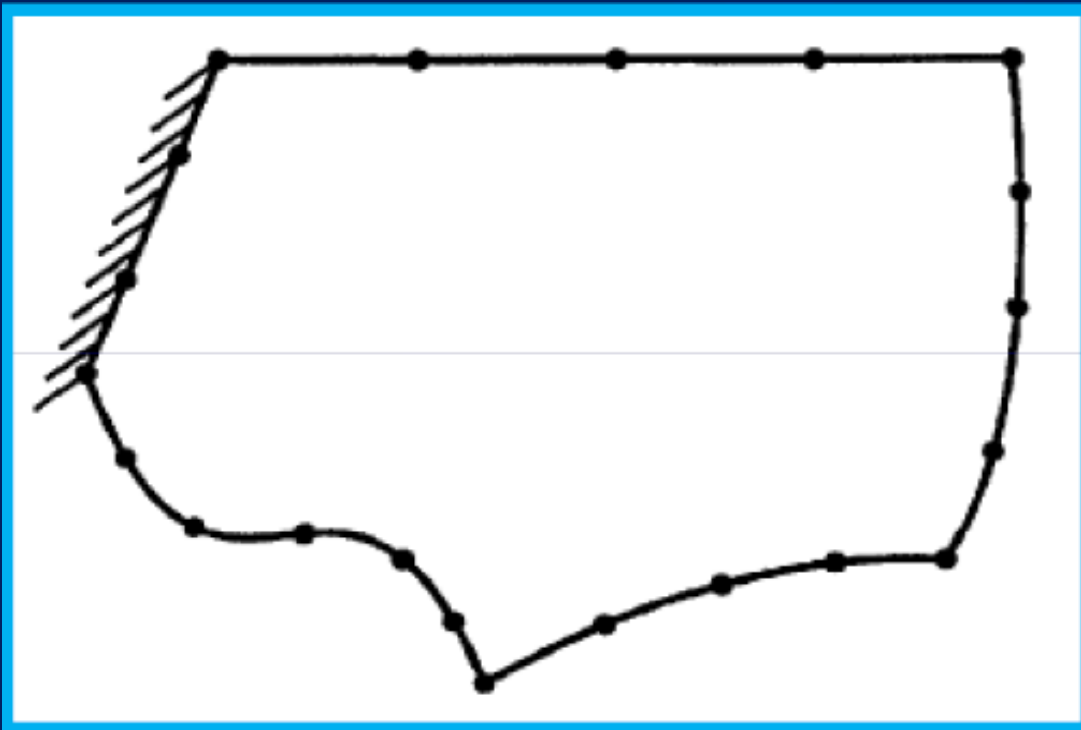


- گسسته سازی فضای مورد بررسی
- توابع شکل جابجایی ها بصورت تکه ای و محلی
- ماتریس سختی
- گردآوری ماتریسها / banded / sparse
- حل دستگاه معادلات
- قابلیت بکارگیری برای سیستم های بزرگ
- قابلیت بکارگیری برای محیط های غیر همگن و مواد ایزوتروپیک

# روش های عددی

---

گسسته سازی فضای مورد بررسی  
در روش المان مرزی  
(BEM)



○ گسسته سازی تنها در مرز

○ کاهش ابعاد و تبدیل مسائل سه بعدی به دو بعدی و مدل‌های دو بعدی به تک بعدی

○ نیازمند حل دقیق و پیچیده و منتج به پاسخ تکینگی

○ نیازمند توابع شکل در هر المان مرزی برای جابجایی‌ها و کشش‌های سطحی

○ غیرمستقارن و متراکم بودن معادلات حاکم بدست آمده

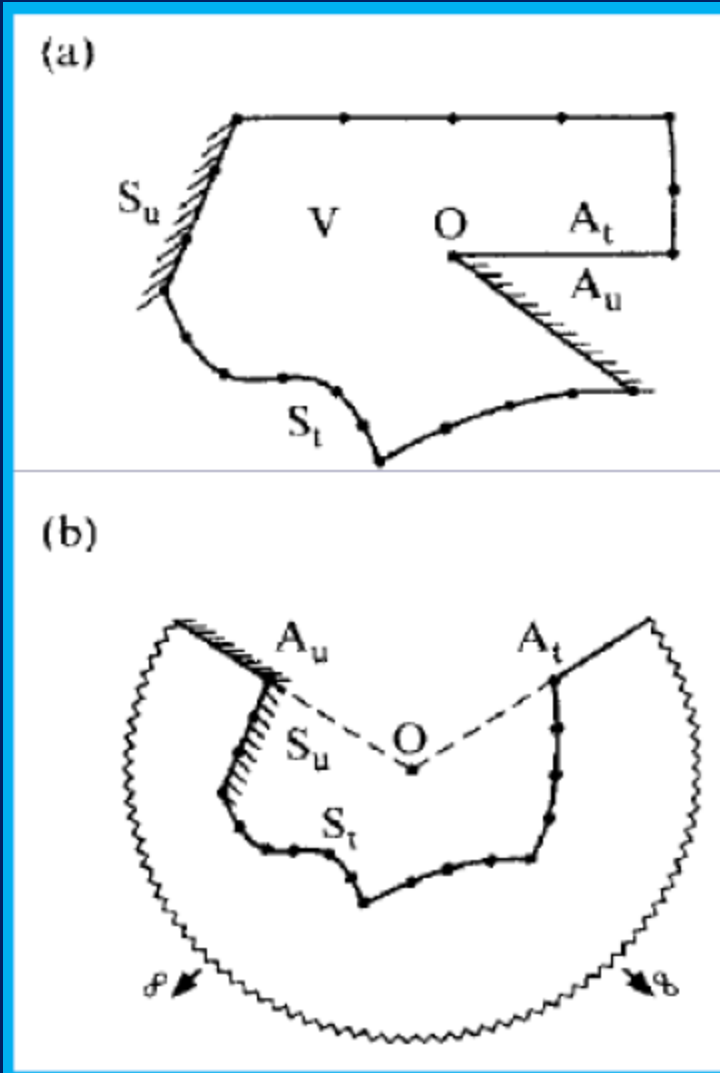
○ ارضاء شرایط مرزی در بینهایت

○ نامناسب برای مصالح ناهمگن ناهمسان‌گرد

# روش اجزا محدود مرزی مقیاس شده روش جدید حل عددی

تعریف مسأله

- حوزه کراندار
- حوزه بی کران





## روش اجزای محدود

- عدم نیاز به حل بنیادی
- سیستم معادلات نتیجه شده به صورت متقارن، کم حجم، و نواری شکل
- همگرایی با افزایش تعداد المانها

## روش اجزای مرزی

- کاهش یک بعد از بعد فضایی
- کاهش تلاش محاسباتی و عملیات آماده سازی دادهها

## روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده

- ترکیب مزایای روش های FEM و BEM
- تبدیل معادله دیفرانسیل جزئی به معادله دیفرانسیل معمولی
- راه حل تحلیلی با مختصه شعاعی به عنوان متغیر مستقل

- توسعه در سال‌های اخیر
- حوزه کراندار و حوزه بی کران
- مسائل استاتیکی و دینامیکی
- مسائل دوبعدی و سه بعدی
- توسعه راه حل‌های تحلیلی در حوزه فرکانس و زمان توسط  
EPFL در Song و Wolf

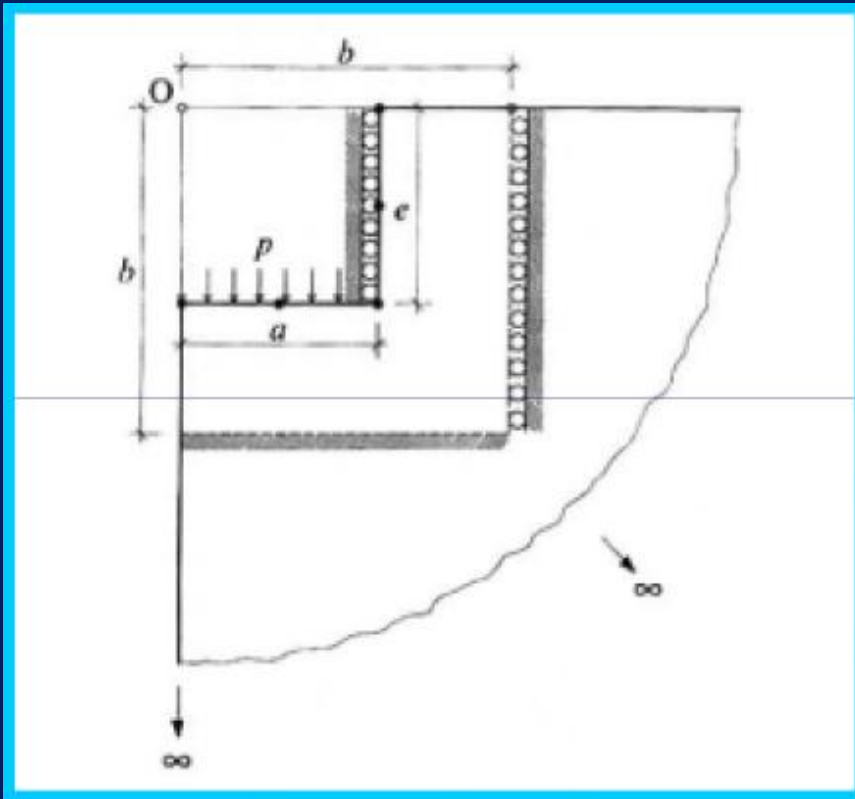
# مزایای اجزای محدود مرزی مقیاس شده در مقایسه با روش‌های اجزای محدود و اجزای مرزی

SBFEM	BEM	FEM	
X	X		کاهش یک بعد از بعد فضایی به سبب جداسازی تنها مرز محیط، کاهش تلاش محاسباتی و عملیات آماده‌سازی داده‌ها
X			دستیابی به راه حل تحلیلی داخل حوزه
X		X	عدم نیاز به حل بنیادی، گسترش دامنه کاربرد و اجتناب از انتگرال‌های تکین
X	X		ارضای دقیق شرط تابش در بی‌نهایت با مدل‌سازی محیط نامحدود (نامحدود یا نیمه نامحدود)
X			عدم تقسیم‌بندی مرزهای آزاد و ثابت و وجوه مشترک بین مصالح مختلف
X	X		عدم وجود تقریب به جز در اجزای محدود سطحی در مرز

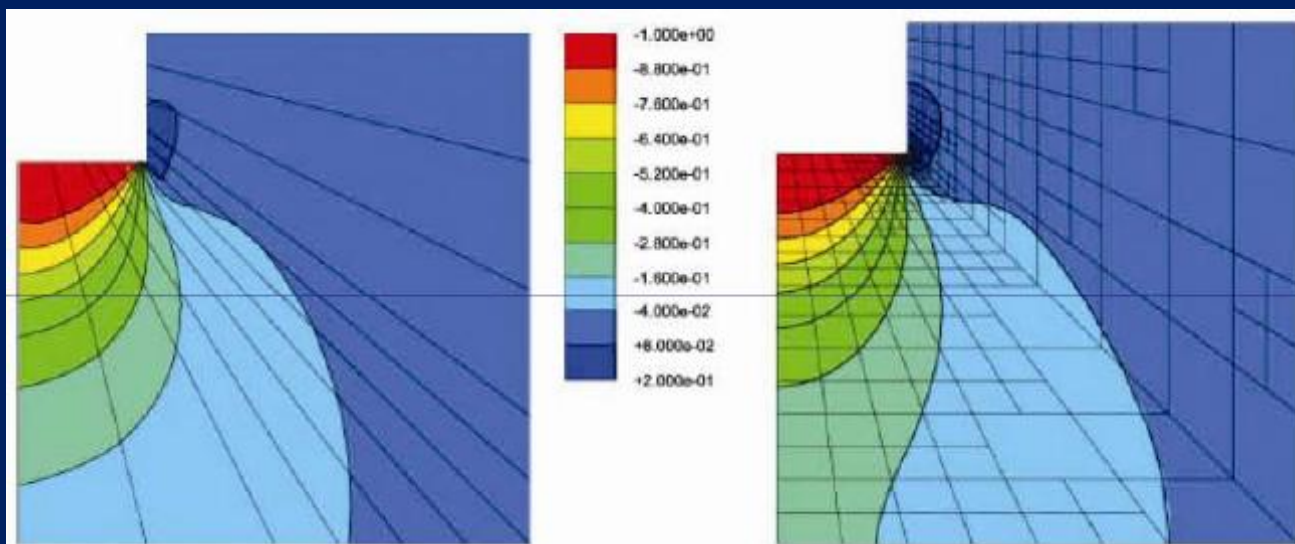
# مزایای اجزای محدود مرزی مقیاس شده در مقایسه با روش‌های اجزای محدود و اجزای مرزی

SBFEM	BEM	FEM	
X	(X)	X	ماتریس متقارن سختی دینامیکی و پاسخ ضربه واحد در حوزه بی کران
X	(X)	X	ماتریس متقارن سختی استاتیکی و جرم در حوزه کراندار (ابرجزء)
X		X	پردازش بارهای حجمی بدون تقسیم‌بندی اضافی حوزه و در نتیجه بدون تقریب‌های اضافی
X			محاسبه مستقیم تمرکز تنش و عامل‌های شدت تنش برپایه تعریف آنها
X		X	عدم وجود فرکانس‌های ویژه ساختگی برای محیط نامحدود
X		X	همبسته بودن مستقیم به واسطه سرهم نمودن استاندارد سازه جداسازی شده با اجزای محدود با محیط نامحدود

## مثال ها



پی استوانه‌ای مدفون در  
نیم‌فضا



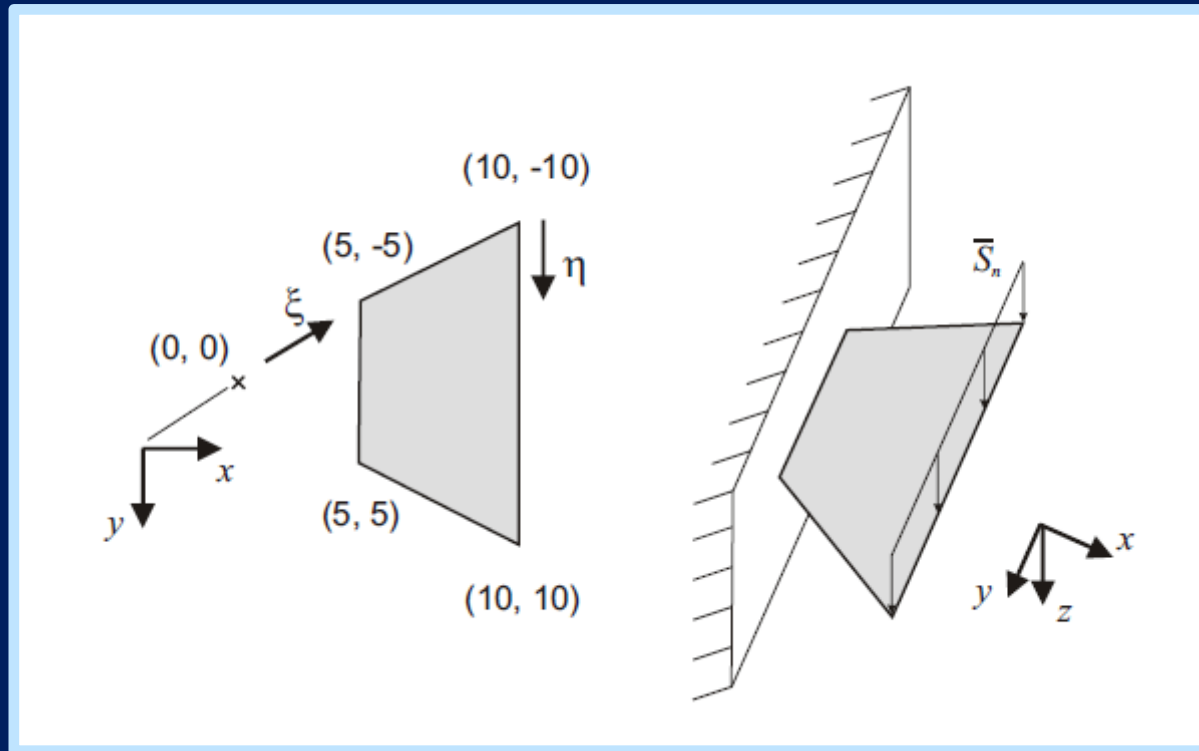
تنش قائم در خطای هدف ۵٪: تحلیل به روش اجزای محدود مرزی مقیاس شده (چپ) و تحلیل به روش اجزای محدود (راست) (مش بندی a).

Mesh	Truncation $b$	DOF	Time	$\eta^*$	Iterations	Displacement
$a$	$4a$	1411	4979	5.00	7	-0.2636
$b$	$8a$	1597	5675	4.98	7	-0.2994
$c$	$16a$	1875	6833	4.84	7	-0.3162
$d$	$32a$	2089	8317	4.78	7	-0.3244
$e$	$64a$	2325	9396	4.75	7	-0.3284
$f$	$\infty$	34	2998	4.99	4	-0.3318

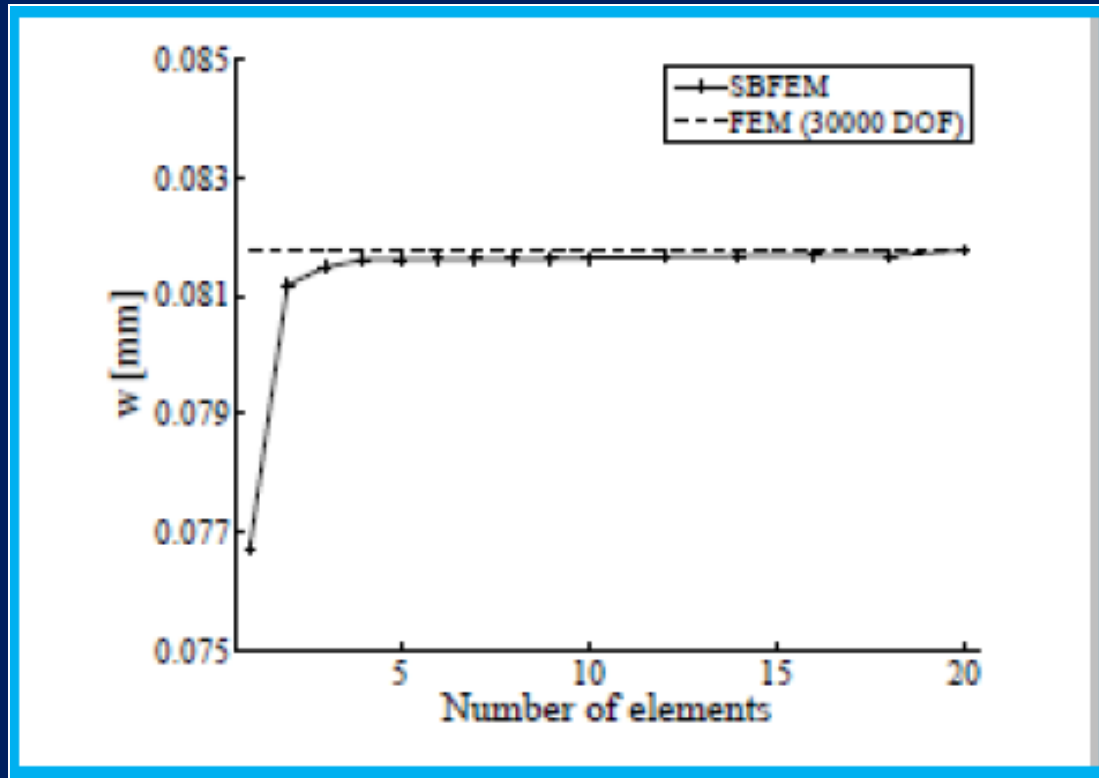
کارایی و دقت محاسباتی تحلیل‌های اجزای محدود انطباق‌پذیر (مش بندی  $a$  تا  $e$ ) و تحلیل اجزای محدود مرزی مقیاس‌شده انطباق‌پذیر (تورینه  $f$ )



# مدلی از یک صفحه با سطح مقطع دوزنقه ای

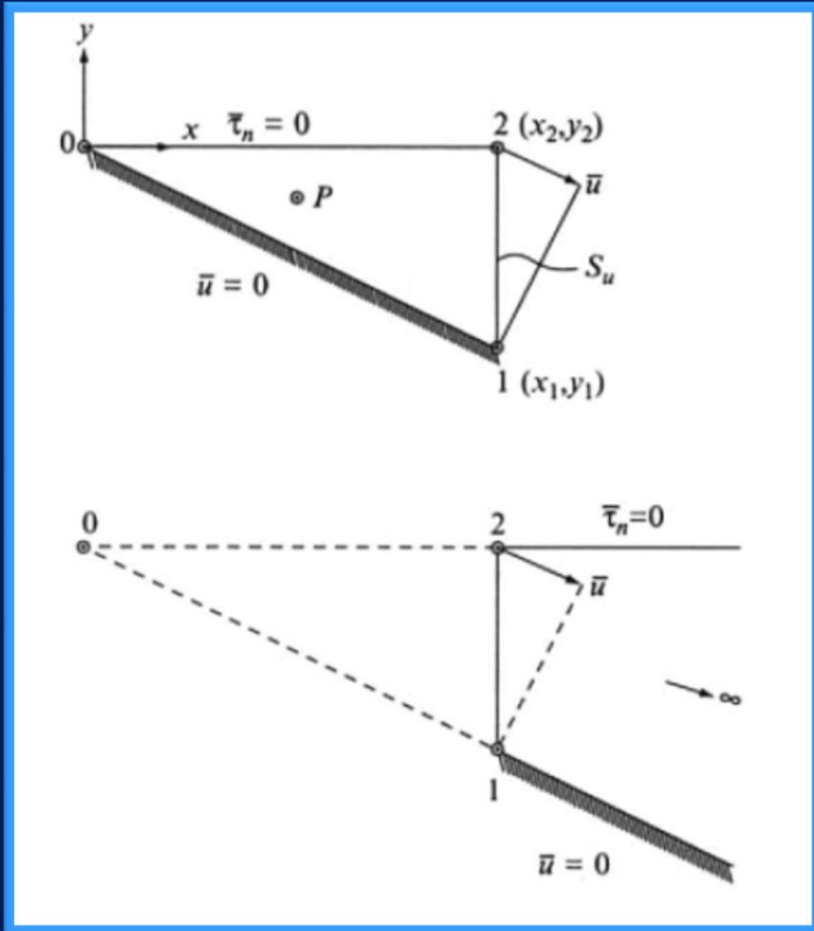


(TH Darmstadt, Germany)



## بررسی همگرایی

حرکت خارج از صفحه گوه



حرکت خارج از صفحه گوه  
ناقص نیمه بی نهایت

## معادله تعادل

$$\tau_{x,\hat{x}} + \tau_{y,\hat{y}} - \rho\ddot{u} + p = 0 \quad (4.1)$$

که در آن بار حجمی  $p$  بر واحد حجم عمود بر صفحه  
(واحد نیرو بر واحد حجم)

$$\{\tau\} = \begin{Bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{Bmatrix} = G \begin{Bmatrix} u_{,\hat{x}} \\ u_{,\hat{y}} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

## بازنویسی معادله ۴,۱

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \\ \frac{\partial}{\partial \hat{y}} \end{Bmatrix}^T \{\tau\} - \rho\ddot{u} + p = 0 \quad (4.3)$$

جایگذاری معادله ۴,۲ در معادله ۴,۱

$$u_{,x\hat{x}\hat{x}} + u_{,y\hat{y}\hat{y}} - \frac{1}{c_s^2} \ddot{u} + \frac{P}{G} = 0 \quad (4.4)$$

با سرعت موج برشی

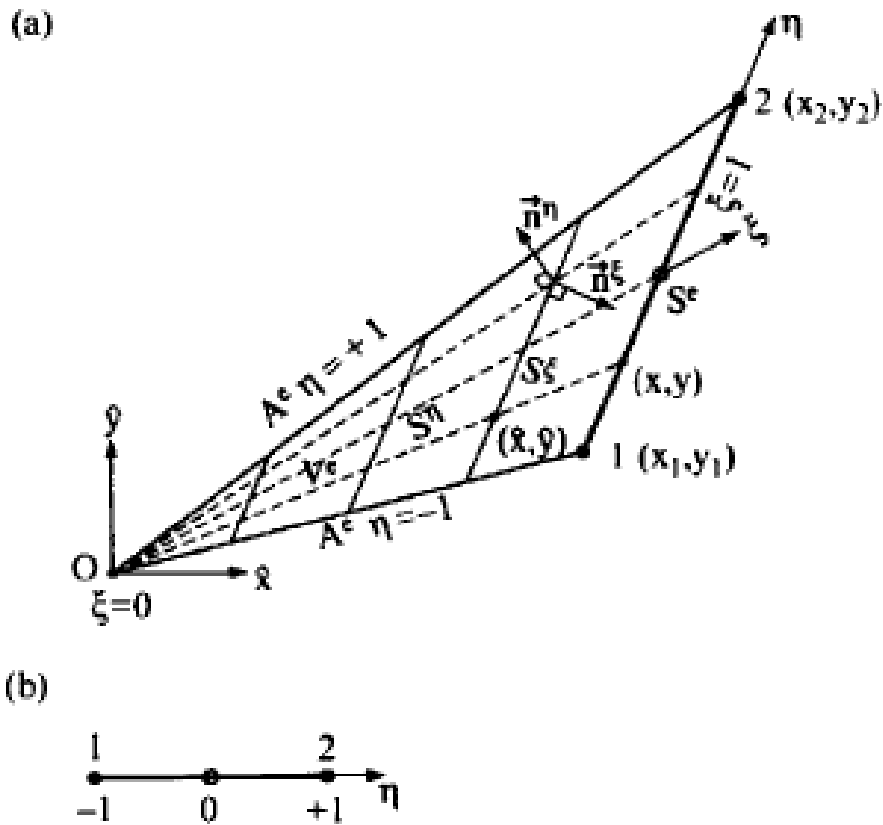
$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.5)$$

کشش سطحی نشان دهنده تنش برشی

$$\tau_n = \{n\}^T \{\tau\} = Gu_{,n} \quad (4.6)$$

$$u = \bar{u} \text{ on } S_u \quad (4.7a)$$

$$\tau_n = \bar{\tau}_n \text{ on } S_t \quad (4.7b)$$



جابجایی در روش المان محدود مرزی مقیاس شده

$$E^0 \xi^2 u_2(\xi)_{,\xi\xi} + E^0 \xi u_2(\xi)_{,\xi} - E^2 u_2(\xi) + \xi^2 F_2^b = 0 \quad (1.186)$$

$$u_2(\xi) = \xi^\alpha \quad (1.189)$$

$$E^0 \alpha^2 - E^2 = 0 \quad (1.190)$$

$$\alpha_{1/2} = \pm \sqrt{\frac{E^2}{E^0}} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{12(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}} \quad (1.191)$$

$$u_2(\xi) = c_1 \xi^{\alpha_1} + c_2 \xi^{\alpha_2} \quad (1.192)$$

$$u_2(\xi) = \bar{u} \xi^{\alpha_2} \quad (1.201)$$

# مدل‌های فونداسیون بر مبنای مدل‌های فیزیکی ساده (مخروط‌ها)

## • عمومیت

- ✓ فونداسیون به اشکال مستطیلی، دایروی و دلخواه
- ✓ نیم‌فضا، چندلایه، لایه بر روی یک نیم‌فضا
- ✓ فونداسیون‌های سطحی و مدفون، فونداسیون شمعی

## • دقت

- ✓ دقت مهندسی کافی به میزان ۲۰٪
- ✓ تایید شده توسط مدل‌های دقیق

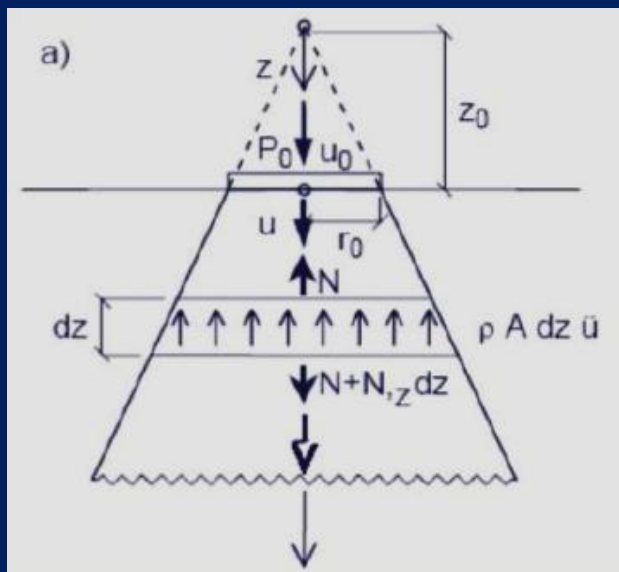
## • کاربری

- ✓ پروژه‌های متعدد در تعداد زیادی از دفاتر مهندسی



## مبانی مخروط‌ها

- در مهندسی سازه، المان‌های باربر از جمله ستون‌ها توسط ستون‌های یک‌بعدی بر مبنای تئوری مقاومت مصالح مدل می‌شوند.
- پل‌ها و سازه‌های قابی نیز با استفاده از تیرها و ستون‌ها مدل‌سازی می‌شوند. معمولاً مدل‌های پیوسته سه‌بعدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.
- مدل‌های مخروطی بر مبنای تئوری مقاومت مصالح یک‌بعدی هستند.
- با استفاده از مدل‌های مخروطی، فونداسیون‌های سطحی و مدفون بر روی نیم‌فضا و یا ساختگاه‌های چندلایه شبیه‌سازی می‌شوند.

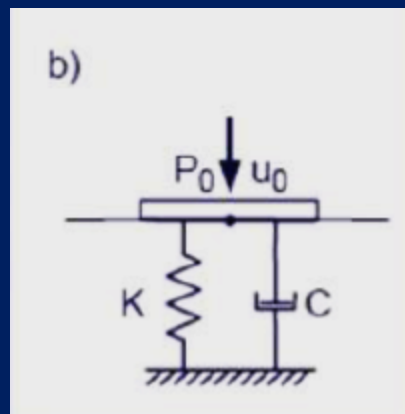


- دیسک بر روی نیم فضای همگن

- مخروط ناقص نیمه نامحدود در حرکت قائم

- انتشار موج به سمت بیرون

- تعادل یک المان بینهایت کوچک



- پارامتر متمرکز متشکل از یک فنر و میراگر

- میدان تغییر مکان  $u(z,t)$

- امواج تغییر حجمی با حرکت جز به موازات جهت انتشار امواج

$$c_p = \sqrt{\frac{E_c}{\rho}}$$

- سرعت موج تغییر حجمی

- موج در مخروط انتشار می یابد.

- یک مسأله الاستیسیته سه بعدی به مدل یک بعدی کاهش می یابد.

- فرضیات: کرنش ثابت درون سطح مقطع

- معادله حرکت یک المان بی نهایت کوچک:

$$-N(z, t) + N(z, t) + N(z, t)_{,z} dz - \rho A(z) dz \ddot{u}(z, t) = 0$$

- رابطه نیرو-تغییر مکان:

$$N(z, t) = \rho c_p^2 A(z) u(z, t)_{,z}$$

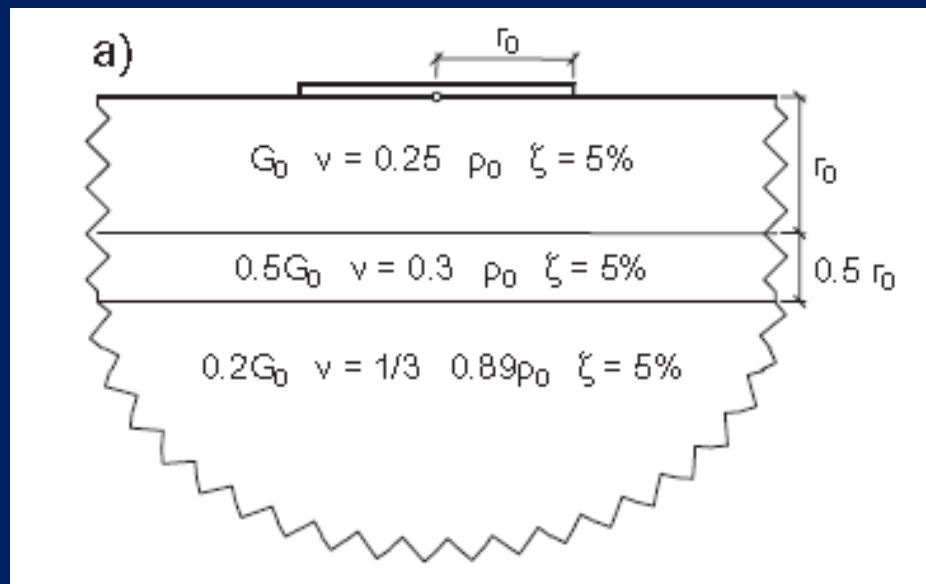
- جایگزینی رابطه نیرو-تغییر مکان در معادله اول:

$$u(z, t)_{,zz} + \frac{2}{z} u(z, t)_{,z} - \frac{1}{c_p^2} \ddot{u}(z, t) = 0$$

- بازنویسی معادله فوق:

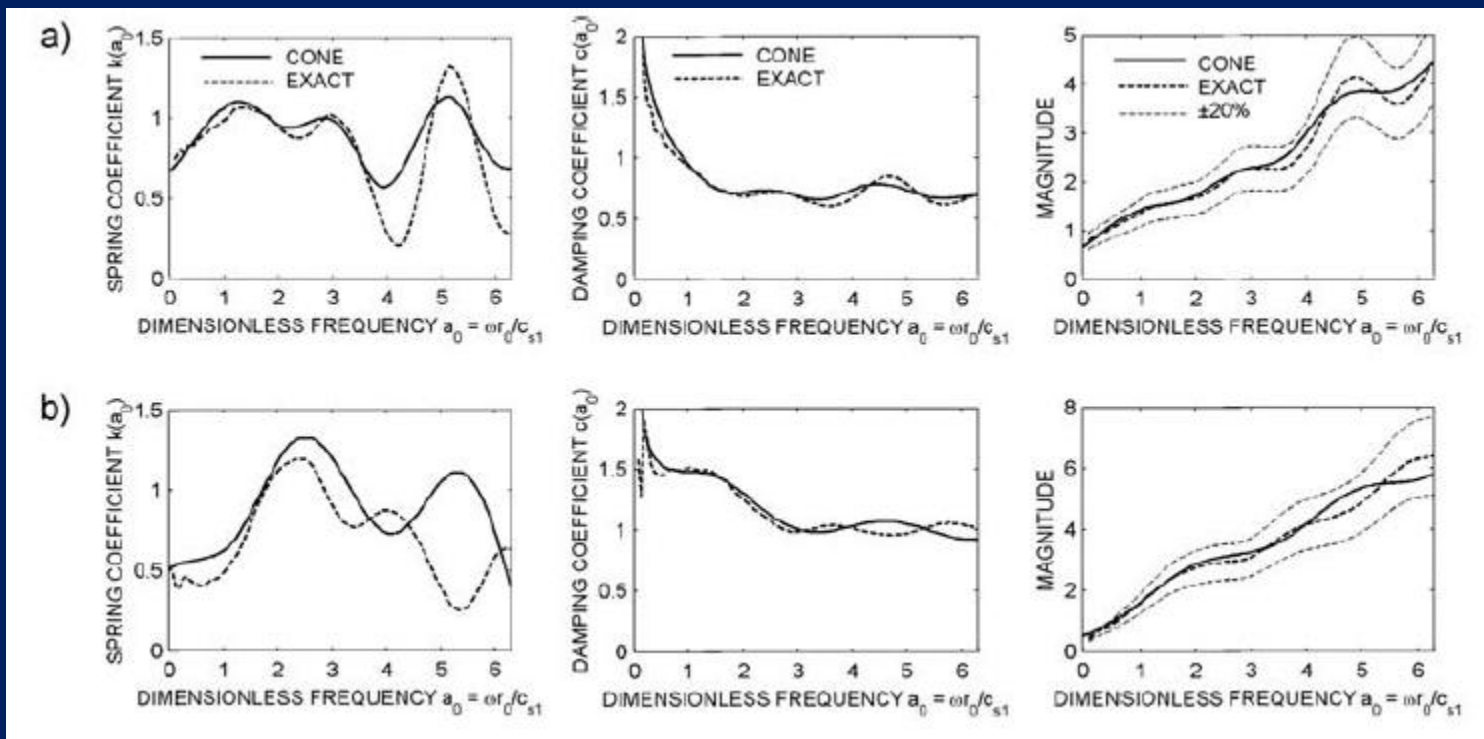
$$(zu(z, t))_{,zz} - \frac{1}{c_p^2} (z \ddot{u}(z, t)) = 0$$

## فونداسیون سطحی بر روی یک نیم فضای چند لایه



- فونداسیون سطحی بر روی یک نیم فضای چند لایه
- دو لایه واقع بر روی یک نیم فضای انعطاف پذیر
- انتشار امواج به صورت قائم به سمت بی نهایت
- میرایی شعاعی در جهت قائم

# ضرایب سختی دینامیکی دیسک بر روی دولایه واقع بر روی یک نیم فضای انعطاف پذیر



(a) افقی

(b) قائم

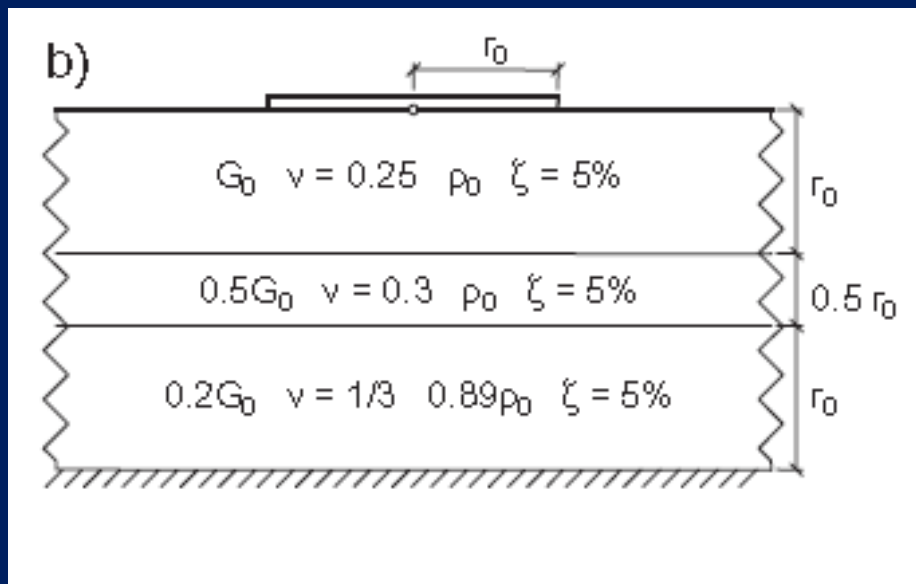
## فونداسیون سطحی بر روی یک نیم فضای چند لایه

- سه لایه واقع بر روی یک تکیه گاه گیردار

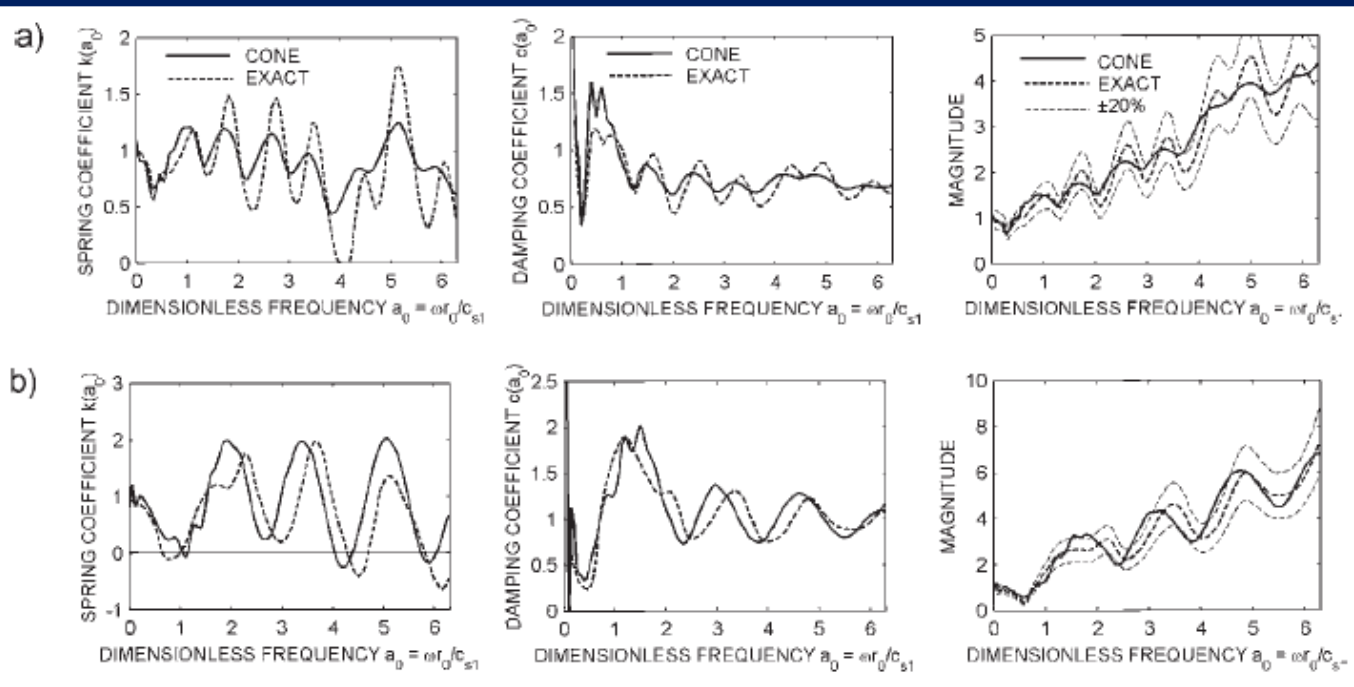
- انعکاس کلی تمامی امواج

- انتشار امواج به سمت بی نهایت در جهت افقی

- عدم وجود میرایی شعاعی در جهت قائم



# • ضرایب سختی دینامیکی دیسک بر روی سه لایه گیردار در تکیه‌گاه

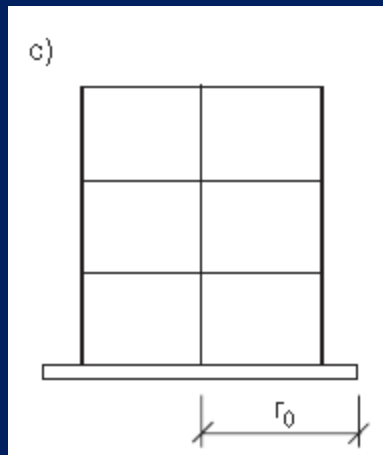
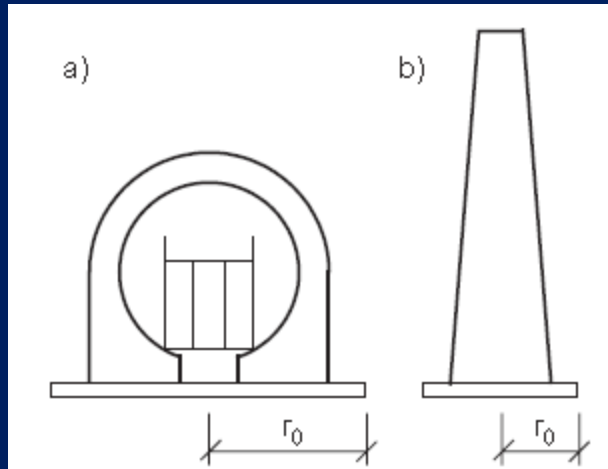


(a) افقی

(b) قائم

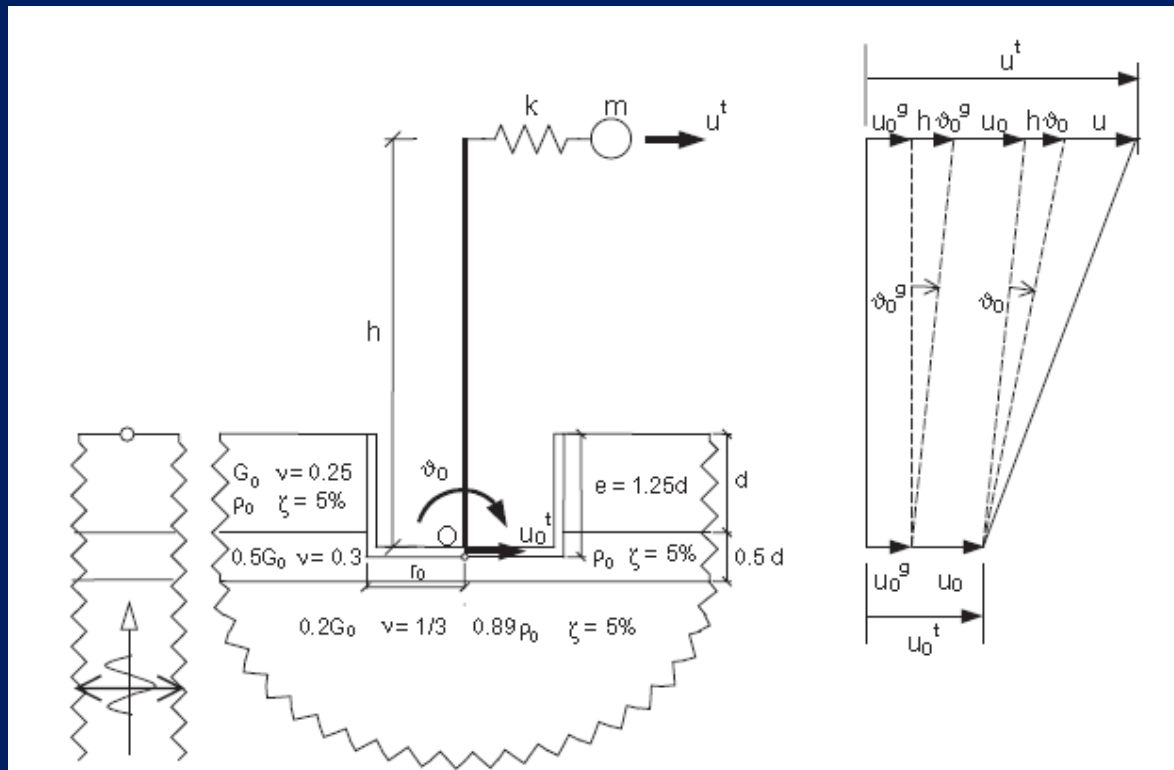


## تحلیل لرزه‌ای یک سازه مدفون در نیم‌فضای چندلایه



- تحلیل لرزه‌ای یک ساختمان را آکتور مدفون در نیم‌فضای چندلایه
- تحلیل لرزه‌ای یک دودکش مدفون در نیم‌فضای چندلایه
- تحلیل لرزه‌ای یک قاب ساختمانی مدفون در نیم‌فضای چندلایه

## تحلیل لرزه‌ای یک سازه مدفون در نیم‌فضای چندلایه

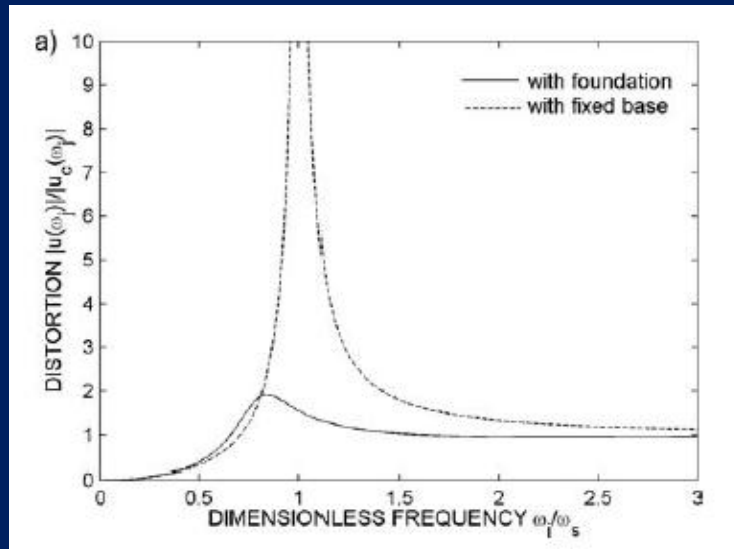


- سازه‌ها با سیستم جرم  
فردیک درجه آزادی  
مدل شده‌اند.

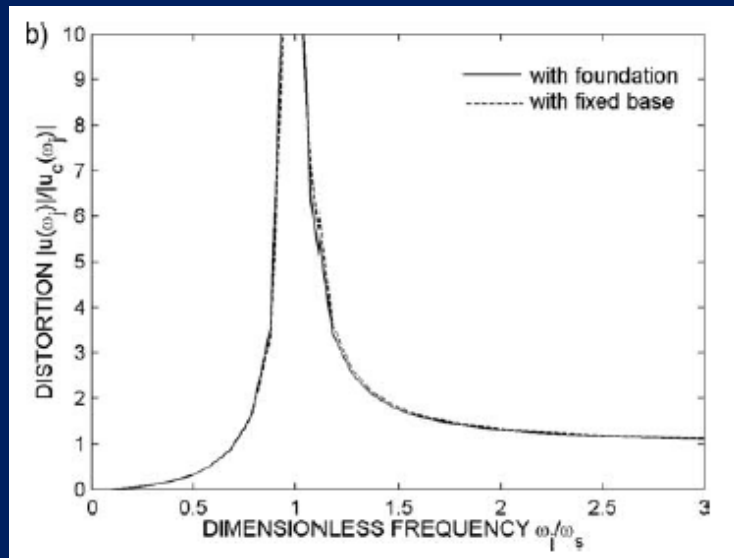
- خاک از دولایه واقع  
بر روی یک نیم‌فضای  
همگن تشکیل شده است.

- تنها زلزله افقی اعمال  
شده است.

# اعوجاج سازه‌ای به عنوان یک تابع فرکانس تحریک

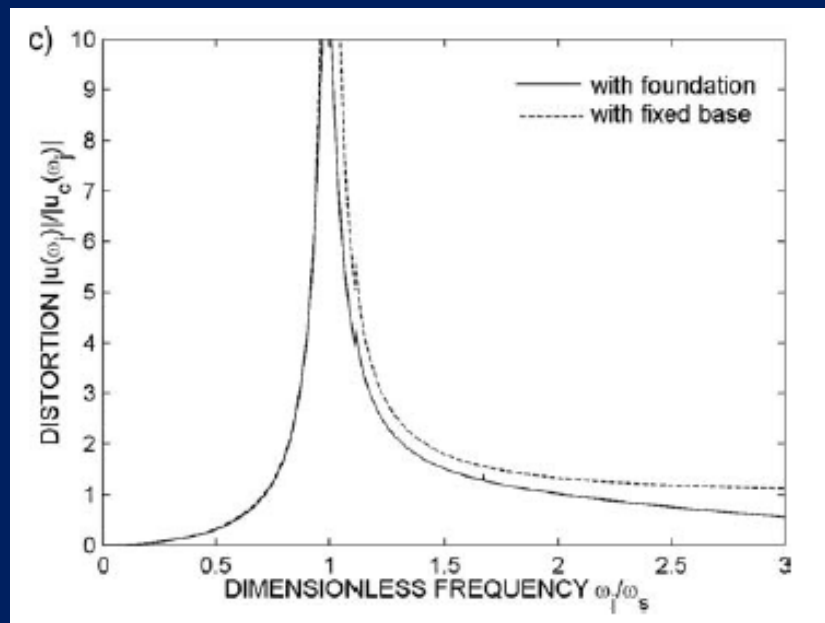


(a) ساختمان رآکتور



(b) دودکش

# اعوجاج سازه‌ای به عنوان یک تابع فرکانس تحریک



(c) قاب

- کاهش شدید نیروها برای ساختمان رآکتور
- کاهش متوسط برای قاب سازه‌ای
- عدم کاهش قابل توجه برای دودکش

	Reactor building	Chimney stack	Frame
Structural distortion $w_{\max}$ (mm) (with base fixed)	5.7 (17.0)	13.6 (13.9)	0.70 (0.79)

استفاده از فناوری های نوین در طراحی لرزه ای بلندترین سازه زوریخ، سوئیس

✓ پروژه سیلو





سیلوی با ارتفاع ۳۸ متر



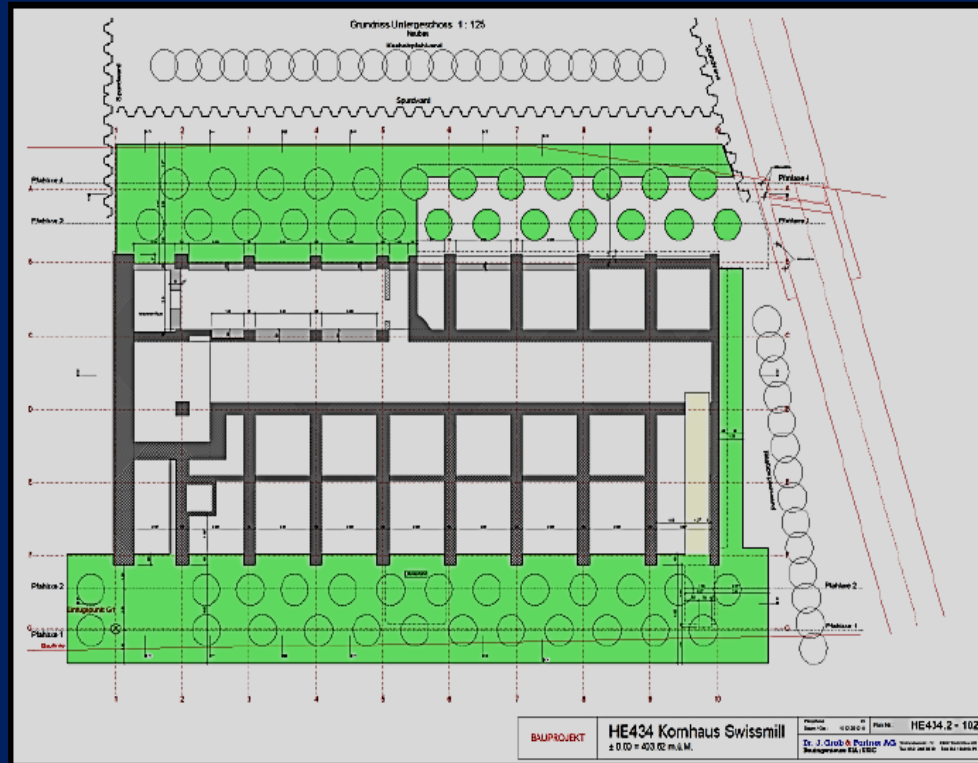
سیلوی طراحی شده به ارتفاع ۱۳۰ متر



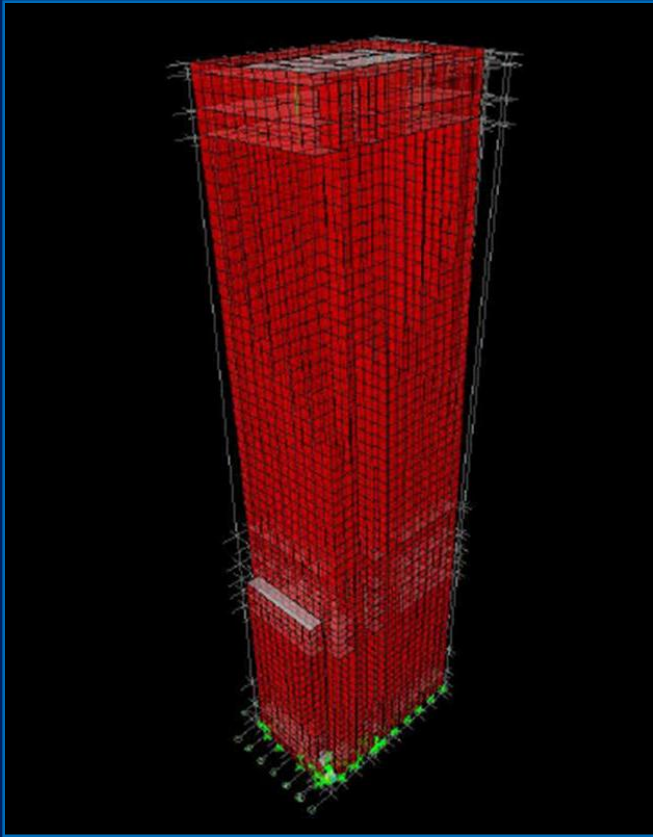
سیلوی جدید  
(سبز رنگ)

سیلوی سابق  
(خاکستری رنگ)





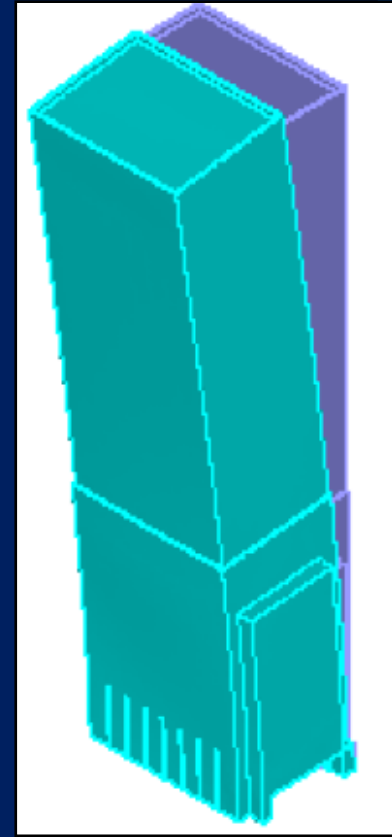
جزئیات موقعیت شمع ها



✓ مدل ETABS

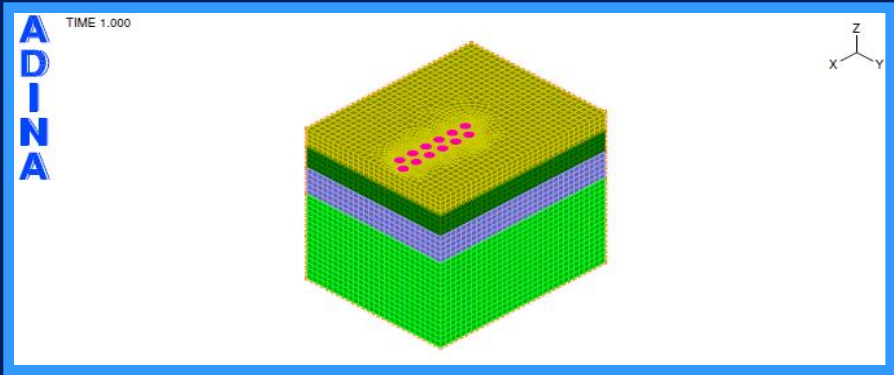
✓ مد اول

✓  $F1 = 0.58 \text{ Hz}$

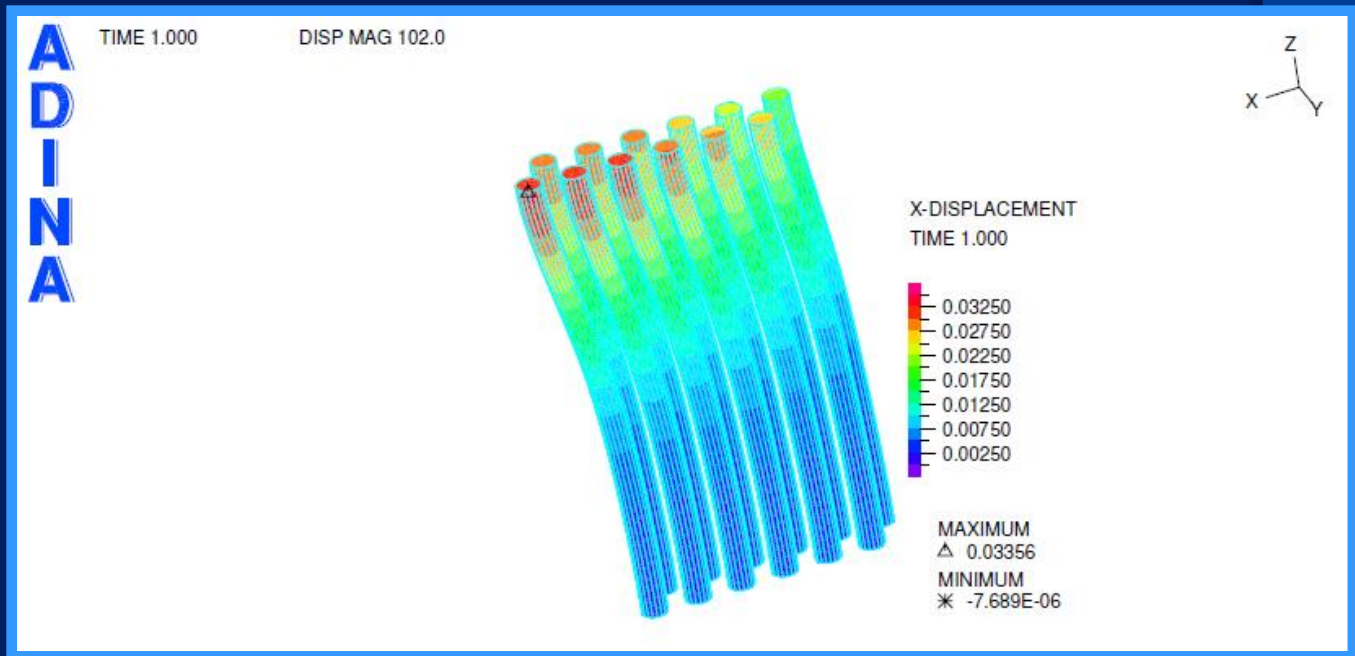


✓ مدل ADINA

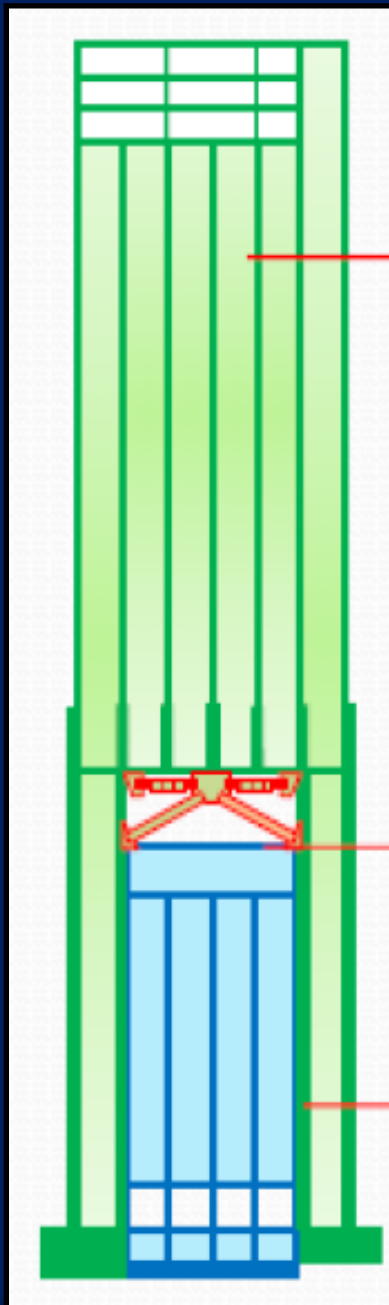
✓  $F1 = 0.6 \text{ Hz}$



مدل المان محدود لایه های  
خاک و شمع ها



تغییر شکل شمع ها



سیلوی جدید

دمپرها

سیلوی سابق

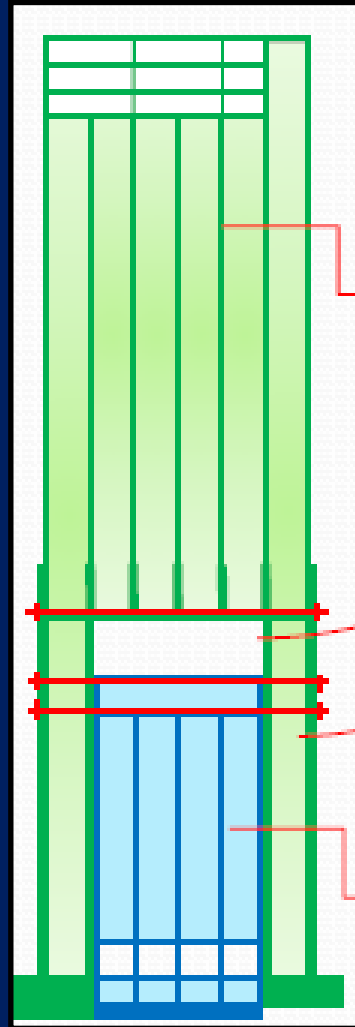


استفاده از دمپ‌های ویسکوز در هتل آزادی

• استفاده از کابل های CFK

• اتصال سیلوی قدیمی به سیلوی جدید





سیلوی جدید

CFK پیش تنیده

کابل پیش تنیده

سیلوی سابق



فوریه ۲۰۱۴



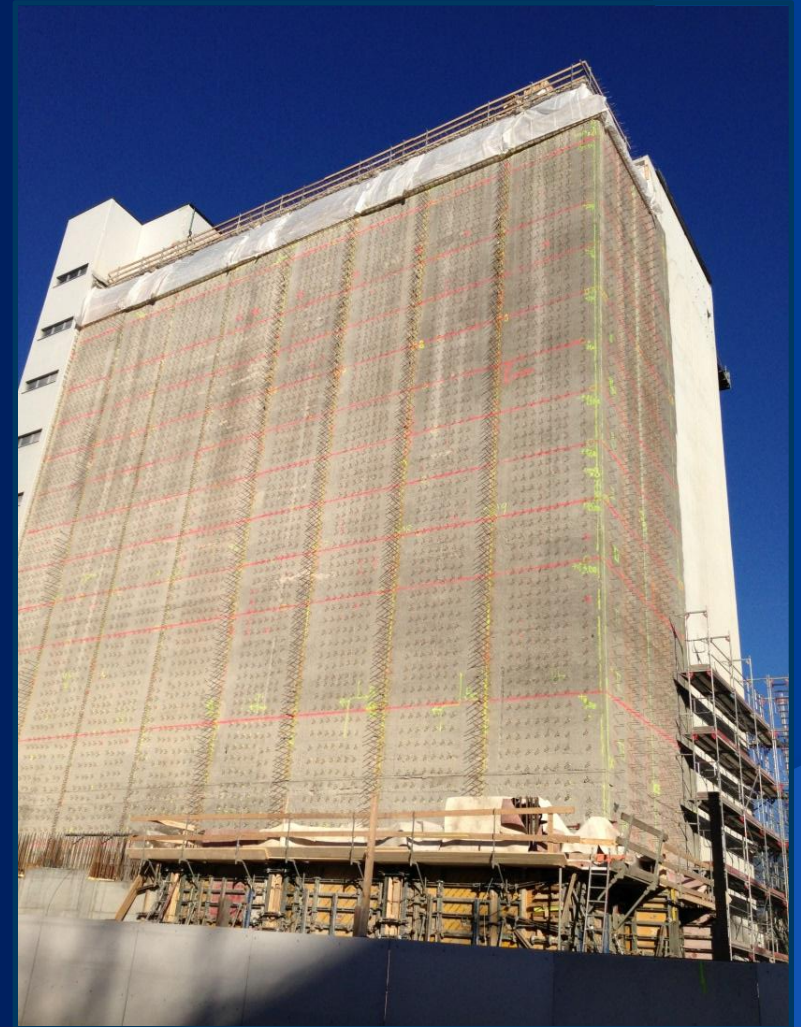
- خاک منطقه ضعیف
- سرعت موج برشی ۱۰۰ متر بر ثانیه
- پایه در عمق ۴۰ متری





فوریه ۲۰۱۴

- ستون های ضعیف در طبقه اول
- فونداسیون با پی گسترده
- دیوارهای با ضخامت کم



## مراحل ساخت در مارس ۲۰۱۴



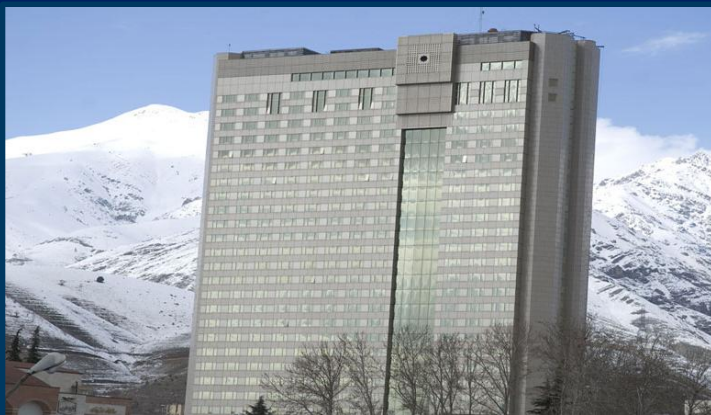
## مراحل ساخت در آوریل ۲۰۱۴





# استفاده از فناوری های نوین در بازسازی لوزه ای هتل آزادی

## ■ پروژه هتل آزادی



■ سازه بتنی با دیوارهای برشی ،  
ساخته شده در سال ۱۹۷۰

■ هتل ۲۸ طبقه

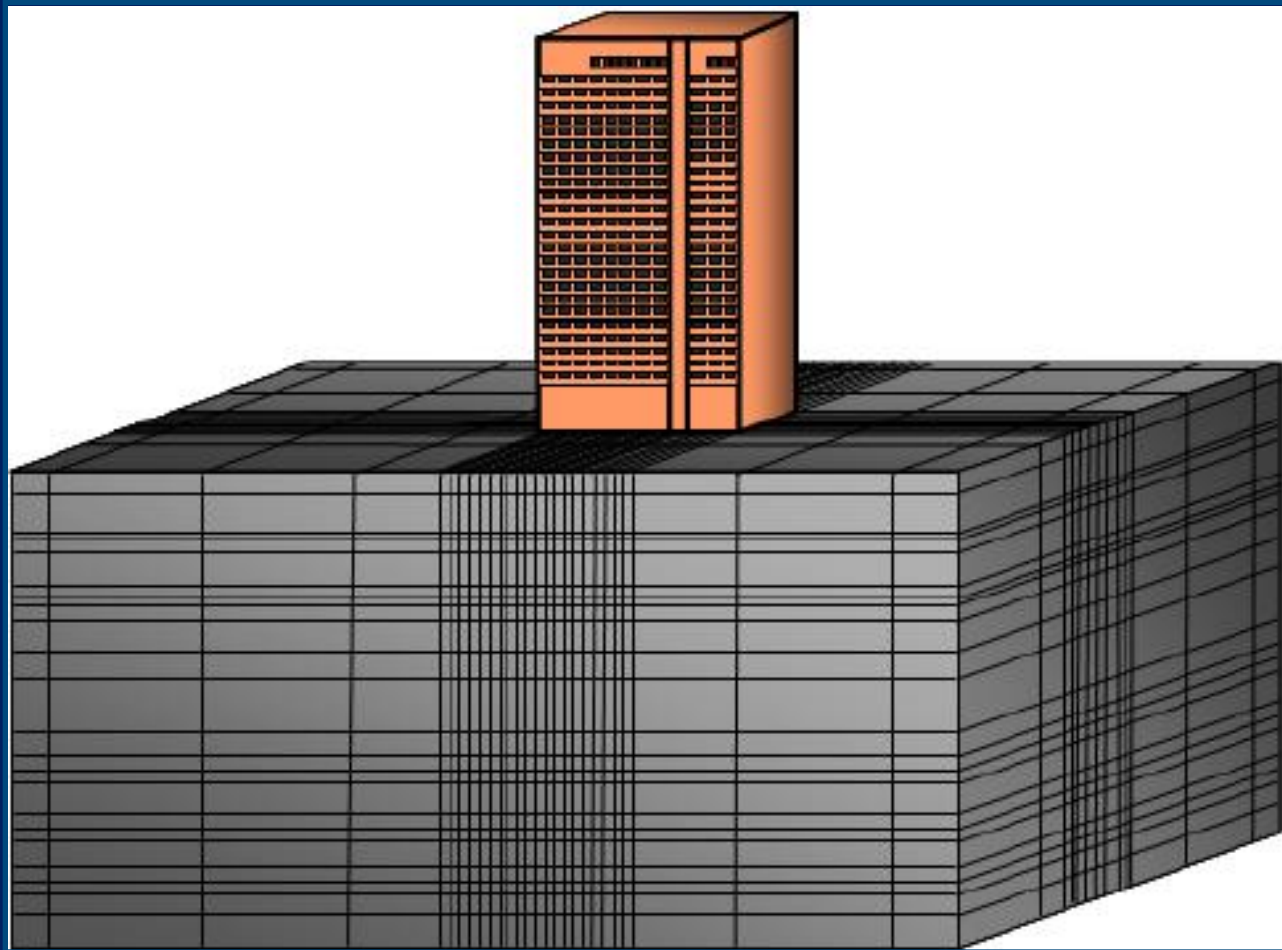
■ بتن با استحکام محوری پایین

■ واقع شده در منطقه لرزه خیز

■ خاک نامساعد



## مدل المان محدود سازه و خاک



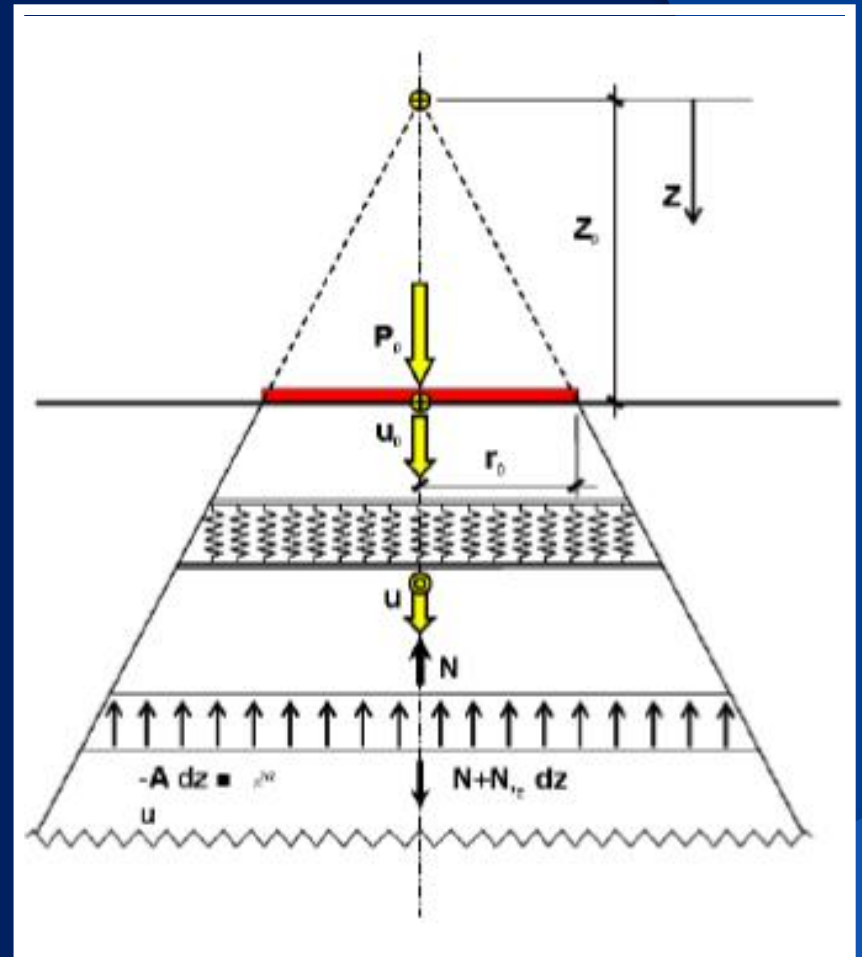
■ مدل سازی خاک به روش مخروطی

■ روش مخروط برای درجات آزادی  
در راستای قائم

■ شفافیت مفهومی با درک فیزیکی

■ ویژگی های فیزیکی رضایت بخش

■ دقت مهندسی کافی

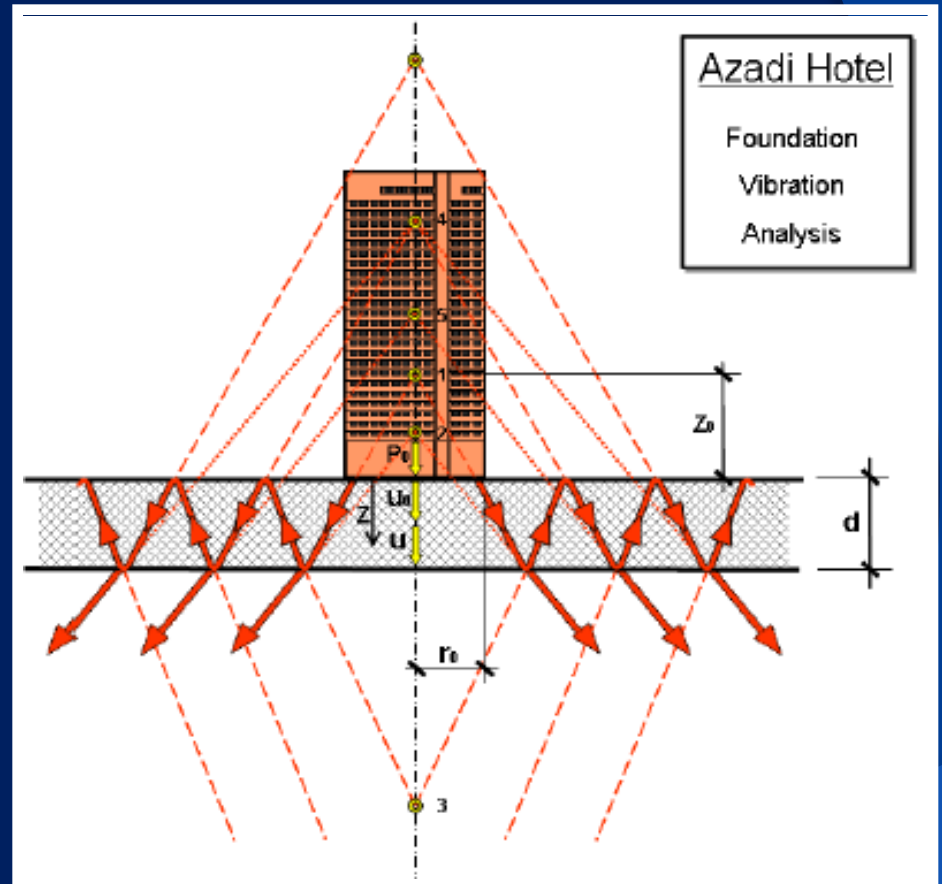


■ انعکاس موج

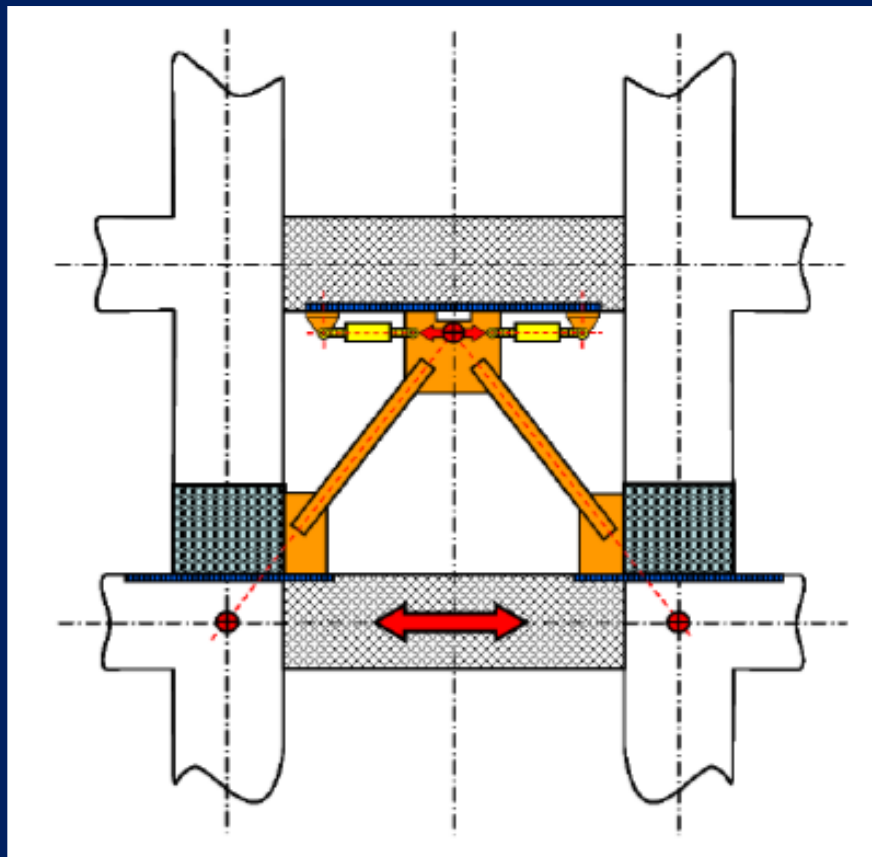
■ انکسار موج

■ مدل سازی خاک هتل آزادی  
به روش مخروط

■ مدل سازی سازه بعنوان لایه ای  
همگن بر روی نیم فضا







■ مقاوم سازی هتل آزادی

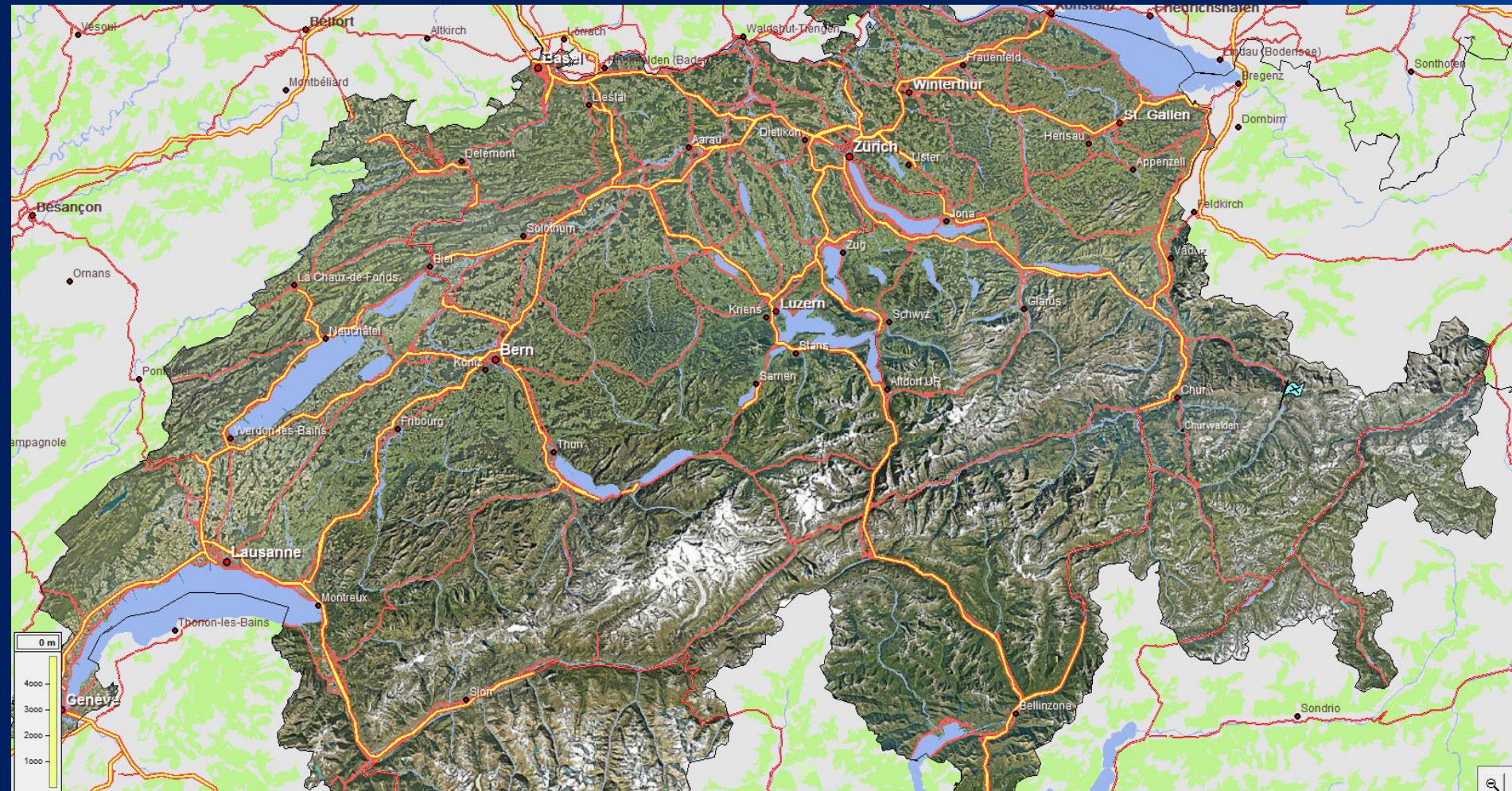
■ مهاربندها

■ استفاده از دمپرهای هیدرولیک در کف و طبقه اول

■ نصب jacket فولادی بر ستون ها و تیرها



# برج Davos در سوئیس



نقشه سوئیس



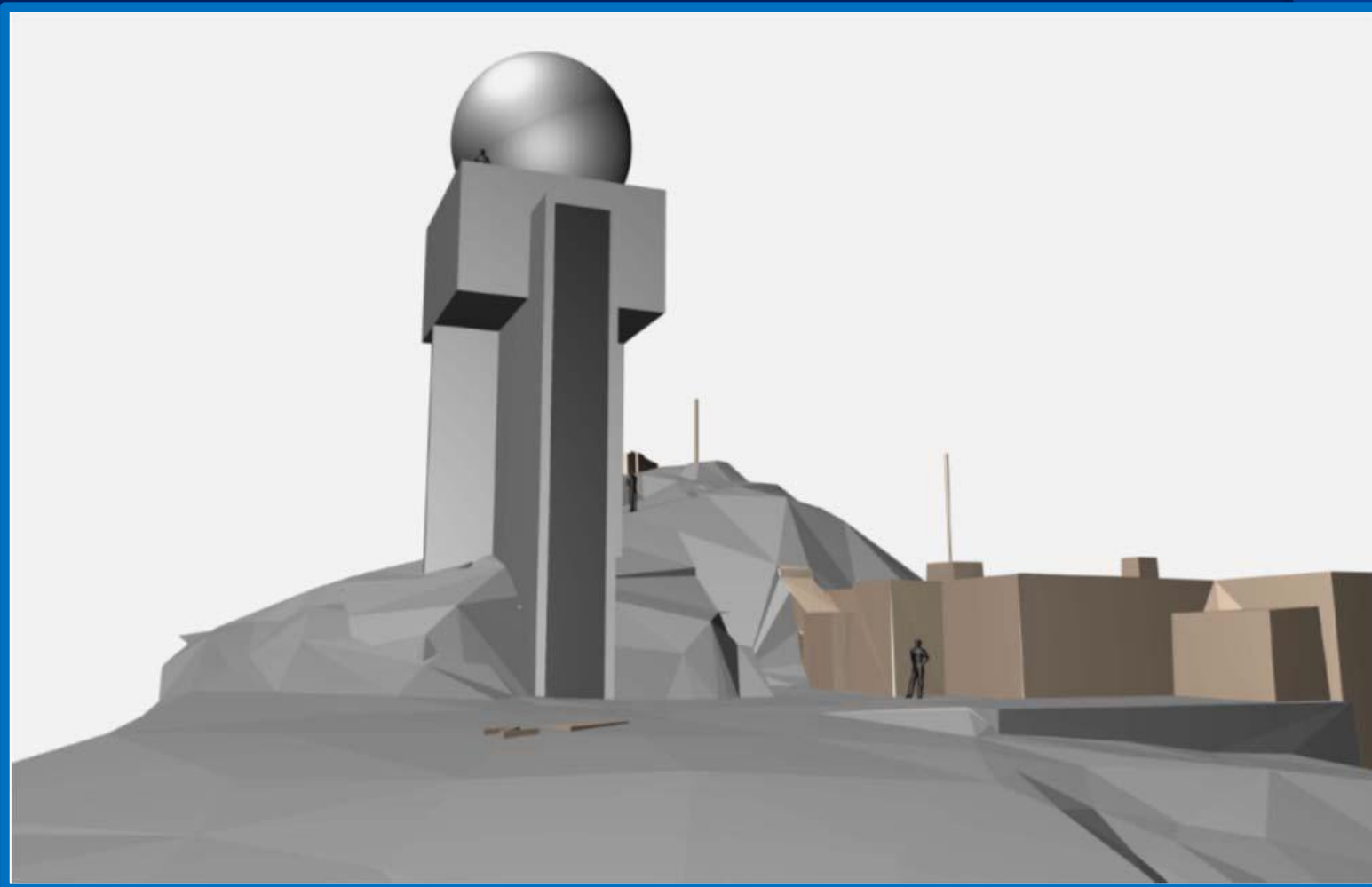




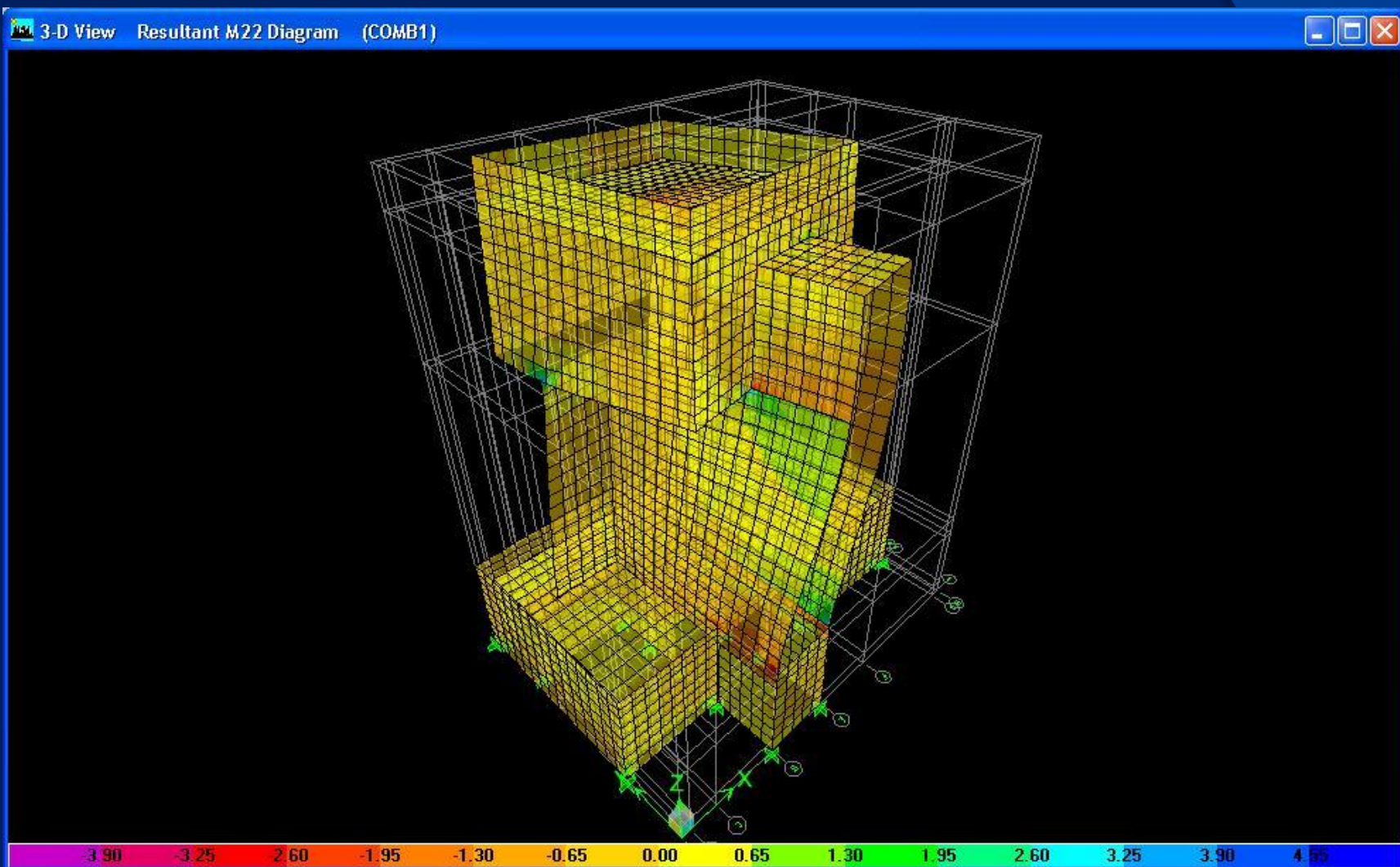
نمایی از برج Davos در کنار کوه Weissfluh



نمایی از قله های Weissfluh

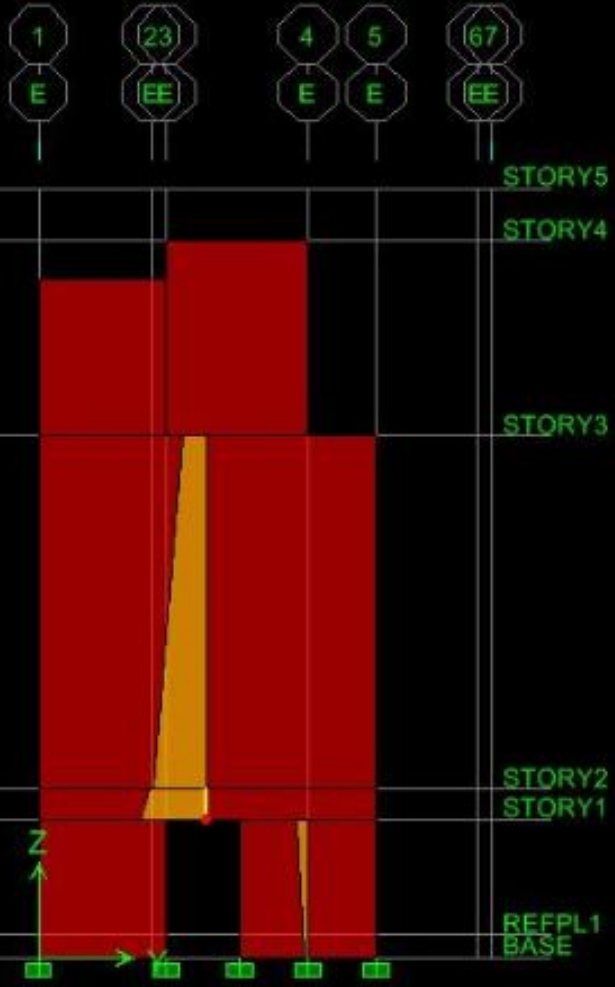


شبيه سازی تصاویر از واحد رادار



نیروهای خمشی در اثر پیچش





**Member Force Diagram**

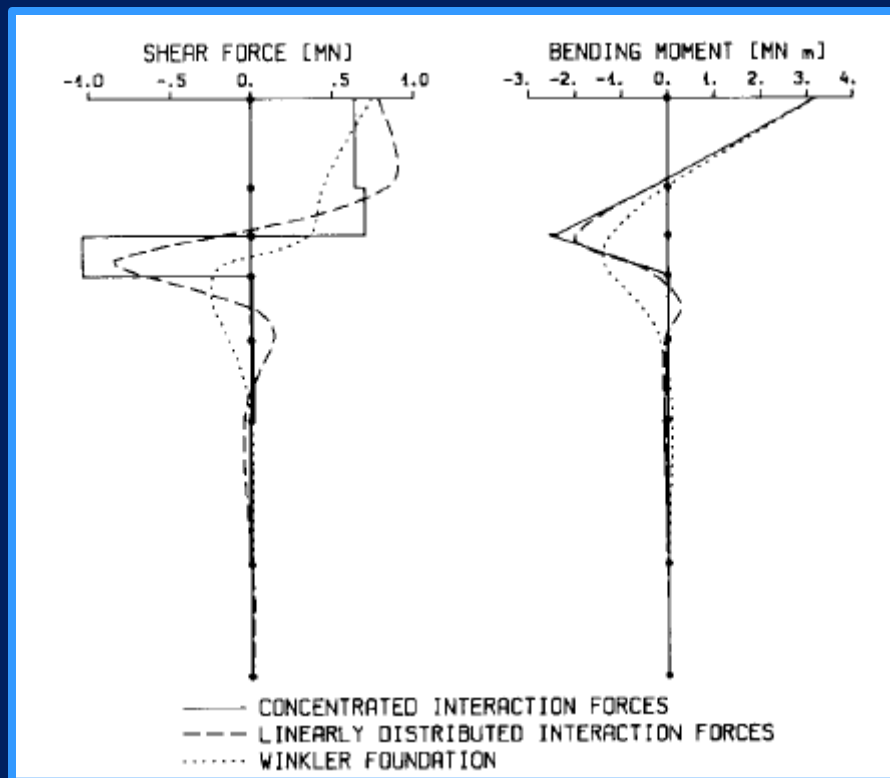
WALL PIER: P3  
 Story Level: STORY2

distance:  value: 145.04

Move cursor over diagram for values

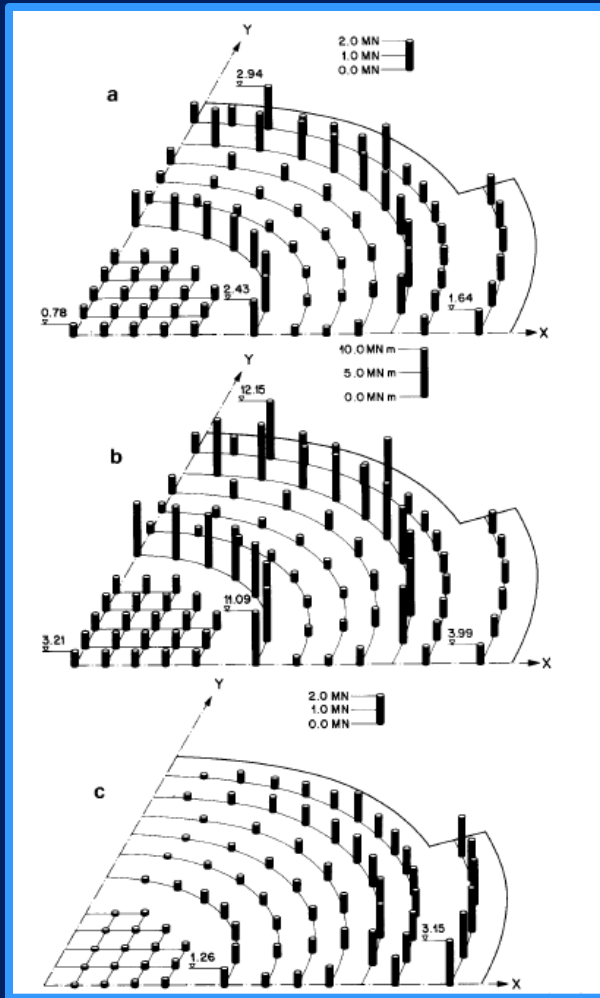
دیاگرام مومنتوم در دیوارها

## مقایسه توزیع نیرو در شمع ها





## ماکزیم نیروی محوری در سر شمع ها



Ref. Seismic analysis of the pile foundation of the reactor building of the NPP ANGRA 2, John P. Wolf, and G. A. von Arx, Nucl. Eng. Des. 65 (1981) 329-341

## نتایج مدل مخروطی

- کاربرد همه روزه در یک دفتر مهندسی برای تحلیل اندرکنش دینامیکی خاک و سازه و ارتعاش فونداسیون
- روش مخروطی با استفاده از تیرها و ستون‌های مخروطی
- جایگزین نمودن فرمول‌بندی دقیق و پیچیده الاستودینامیک سه‌بعدی با تئوری ساده و یک بعدی مقاومت مصالح

## ✓ روش‌های دقیق:

- مناسب پروژه‌های بزرگ و مدل‌های بحرانی و در مواردی که روش مخروطی قابل اعمال نیست
- عمدتاً مناسب مسائل مکانیک محاسباتی می‌باشد تا مسائل مهندسی عمران