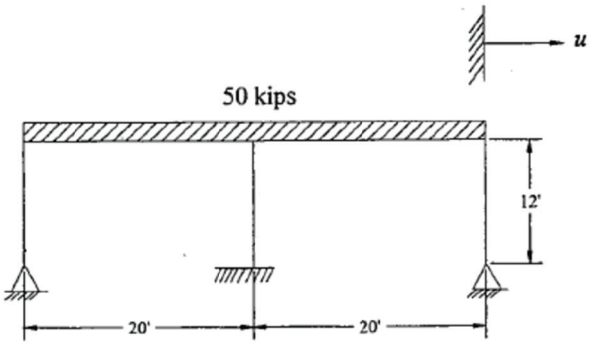
به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

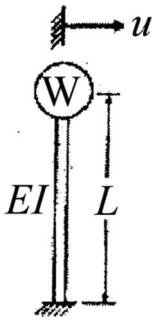
**تمرین شماره ۱ (سیستم های یک درجه آزادی بدون میرایی)**

۱- مطلوبست محاسبه فرکانس طبیعی برای حرکت افقی قاب بتنی شکل زیر با فرض صلب بودن سقف و صرف نظر کردن از وزن ستون ها. مقطع ستون ها مربعی به ضلع .in ۱۲ و E = ۳۰۰۰ ksi می باشد.




۲- در شکل زیر مدل یک تانک آب نشان داده شده است. با صرف نظر کردن از وزن پایه، مطلوبست تعیین معادله دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش افقی وزن $W$ و محاسبه فرکانس طبیعی.

$W = 200{,}000$ N
$E = 210$ GPa
$I = 0.1$ m$^4$
$L = 10$ m

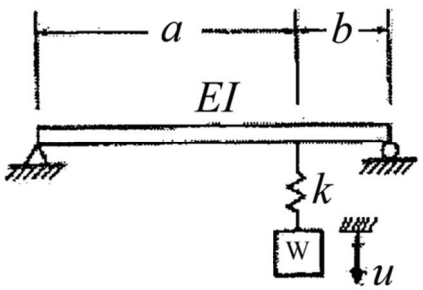



۳- در شکل زیر، در صورتی که از وزن تیر صرف نظر شود، مطلوبست:

الف) تعیین عبارتی برای فرکانس طبیعی وزن $W$ در تیر شکل زیر.

ب) تغییرمکان، سرعت وشتاب در زمان $t = 2$ s، اگر $W = 10{,}000$ N، $k = 200{,}000$ N/m، تغییرمکان اولیه $u_0 = 1.5$ cm و سرعت اولیه $v_0 = 50$ cm/s باشد.

$a = 2b = 3$ m, $E = 210$ GPa, $I = 0.1$ m$^4$



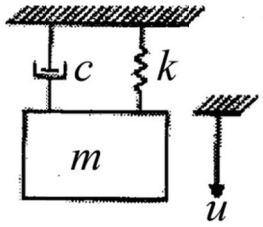
به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ۲ (سیستم های یک درجه آزادی با میرایی)**

۱- در شکل زیر، دامنه ارتعاش در هر چرخه حرکت متوالی ۸٪ کاهش می یابد. مطلوبست محاسبه ضریب میرایی $c$ برای سیستم.

$m = 15\ \text{lb.sec}^2/\text{in.}$
$k = 300\ \text{lb/in.}$




۲- در مسئله ۲ تمرین شماره ۱، آزمایش نشان داده است که یک نیروی افقی 1000 N وارد بر وزن W ایجاد یک سرعت 20 cm/s می کند. مطلوبست تعیین:

الف) نسبت میرایی ξ

ب) فرکانس طبیعی سیستم با میرایی

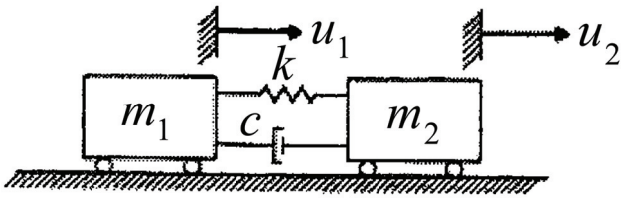
ج) کاهش لگاریتمی δ

د) نسبت دو دامنه متوالی

ه) درصد کاهش دامنه حرکت بعد از گذشت زمان 1 s

۳- مطلوبست حل مسئله ۳ تمرین شماره ۱ با فرض نسبت میرایی $\xi = 10\%$.

٤- یک سیستم با دو جرم که به صورت آزادانه ارتعاش می کنند و توسط یک فنر و یک میراگر به هم متصل شده اند مدل شده است. مطلوبست تعیین معادله دیفرانسیل حرکت برای این سیستم بر حسب حرکت نسبی دو جرم $u_r = u_2 - u_1$.



به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ۳ (پاسخ سیستم یک درجه آزادی به بارگذاری هارمونیک )**

۱- برای قاب شکل زیر با نسبت میرایی ۵٪، که تیر آن صلب فرض می شود و از وزن ستون هایش، که دارای مقطعی مربعی و توپر به ضلع ۳۰ cm می باشند، صرف نظر می گردد، مطلوبست محاسبه:

الف) دامنه حرکت پایدار برای حرکت افقی قاب و مقایسه با دامنه حرکت پایدار برای حالتی که از میرایی صرف نظر شود.

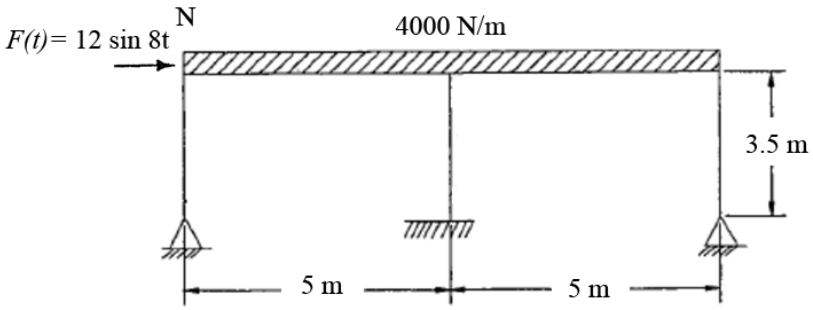
ب) حداکثر نیروی برشی دینامیکی ایجاد شده در ستون ها

ج) حداکثر نیروی منتقل شده به پایه

د) ضریب بزرگنمایی دینامیکی

ه) در صورتی که نسبت میرایی از ۵٪ به ۱۰٪ افزایش یابد قسمت های الف تا د را حل نمایید و بر روی تغییرات حاصل شده بحث کنید.

$E = 210$ GPa




۲- در شکل زیر یک قاب فولادی نشان داده شده است. ستون ها دارای مقطع قوطی مربعی به ضلع ۳۰ cm و ضخامت ۲ cm و مهاربندهای جانبی از نوع نبشی تکی با بال های مساوی به عرض ۱۰ cm و ضخامت ۱ cm می باشند. از وزن ستون ها و مهاربندهای جانبی صرف نظر می شود. نسبت میرایی برابر ۵٪ است. مطلوبست محاسبه:

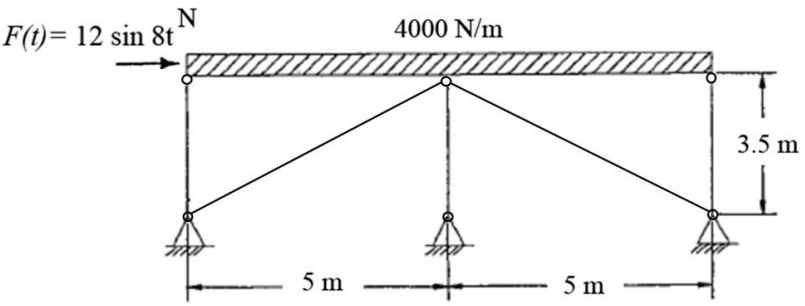
الف) دامنه حرکت پایدار برای حرکت افقی قاب و مقایسه با دامنه حرکت پایدار برای حالتی که از میرایی صرف نظر شود.

ب) حداکثر نیروی برشی دینامیکی و حداکثر نیروی محوری دینامیکی ایجاد شده در ستون ها

ج) حداکثر نیروی منتقل شده به پایه

د) ضریب بزرگنمایی دینامیکی

$E = 210$ GPa



۳- اگر قاب مسئله ۱ فقط تحت تاثیر حرکت زمین به صورت شتاب هارمونیک پی با دامنه ۰/۲۵ g و فرکانس ۱۵ Hz قرار گیرد و نسبت میرایی برابر ۵٪ باشد، مطلوبست محاسبه:

الف) قابلیت انتقال

ب) تغییرمکان تیر قاب نسبت به تغییرمکان پایه

٤- اگر قاب مسئله ٤ فقط تحت تاثیر حرکت زمین به صورت شتاب هارمونیک پی با دامنه ۰/۲۵ g و فرکانس ۱۵ Hz قرار گیرد و نسبت میرایی برابر ۵٪ باشد، مطلوبست محاسبه:

الف) قابلیت انتقال

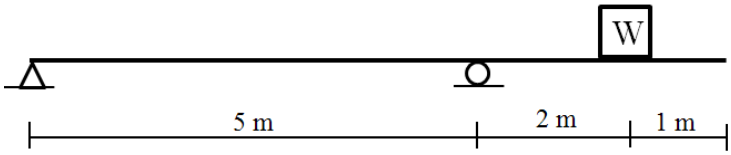
ب) تغییرمکان تیر قاب نسبت به تغییرمکان پایه

۵- در شکل زیر یک موتور به وزن $W$= 5 kips بر روی تیری قرار گرفته است. موتور با سرعت 800 rpm می چرخد و یک نیروی قائم $F(t) = 15\sin\bar{\omega}t$ بر تیر وارد می کند. مطلوبست:

الف) محاسبه فرکانس طبیعی، دامنه ارتعاش، زاویه فاز، ماکزیمم نیروی انتقال یافته به تکیه گاه ها و تنش نرمال ماکزیمم ایجاد شده در تیر.

ب) تعیین سختی یک میراگر بین موتور و تیر به طوری که شتاب انتقال یافته بین موتور و تیر به اندازه ۸۰٪ کاهش یابد. فرض می شود نسبت ضریب میرایی به سختی میراگر برابر 0.02 sec باشد.

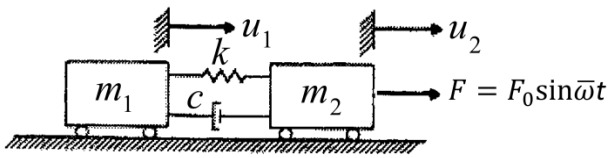
$E = 30 \times 10^6$ psi, $I = 120$ in.$^4$, $S = 12$ in.$^3$




٦- یک سیستم با دو جرم که به صورت آزادانه ارتعاش می کنند و توسط یک فنر و یک میراگر به هم متصل شده اند مدل شده است. اگر نیروی $F = F_0\sin\bar{\omega}t$ به جرم $m_2$ وارد شود، مطلوبست تعیین:

الف) معادله دیفرانسیل حرکت برای این سیستم بر حسب حرکت نسبی دو جرم $u_r = u_2 - u_1$.

ب) جواب حالت پایدار حرکت نسبی.



به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ٤ (پاسخ سیستم یک درجه آزادی به بارگذاری دینامیکی کلی)**

---

۱- در شکل زیر (سازه مسئله ۳ تمرین شماره ۱)، به دلیل وزش باد وزنه W ایجاد ضربه دینامیکی $F(t)$ خطی به شکل نشان داده شده می نماید. در صورتی که تیر دارای مقطعی به شکل مربع باشد و از وزن آن صرف نظر شود، مطلوبست محاسبه تغییرمکان ماکزیمم وزنه، ماکزیمم تنش های کششی و فشاری در تیر، و ماکزیمم نیروی ایجاد شده در فنر در دو حالت:

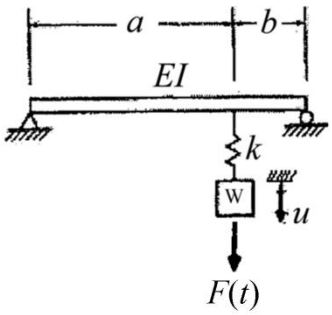
الف) با صرف نظر کردن از میرایی سیستم.

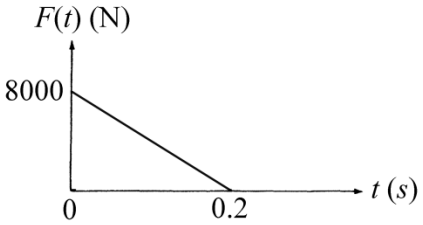
ب) با در نظر گرفتن نسبت میرایی ۱۵٪ برای سیستم.

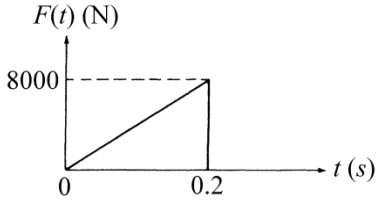
تذکر ۱: مسئله یک مرتبه نیز به این صورت حل گردد که فنر وجود نداشته باشد و وزنه به زیر تیر چسبیده باشد.

تذکر ۲: مسئله یک مرتبه برای بار خطی افزاینده و یک مرتبه برای بار خطی کاهنده حل شود و نتایج مقایسه و بر روی آنها بحث گردد.

$W$ = 10,000 N, $k$ = 200,000 N/m, $E$ = 210 GPa, $I$ = 0.1 m$^4$, $a$=2$b$=2 m




۲- برای قاب شکل زیر که تیر آن صلب فرض می شود و از وزن ستون هایش، که دارای مقطعی مربعی و توپر به ضلع ۳۰ cm می باشند، صرف نظر می گردد (قاب مسئله ۱ تمرین شماره ۳)، مطلوبست تعیین:

الف) پاسخ

ب) ماکزیمم تغییرمکان مطلق بالای قاب

ج) ماکزیمم نیروی برشی در پایین ستون ها

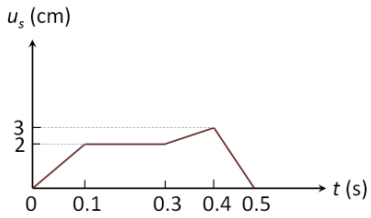
د) ماکزیمم تنش های ناشی از خمش در ستون ها

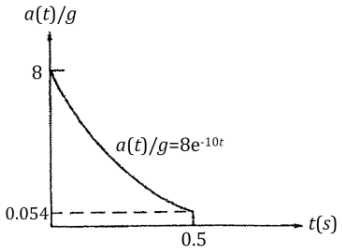
تذکر ۱: مسئله یک مرتبه با صرف نظر کردن از میرایی و یک مرتبه با در نظر گرفتن نسبت میرایی برابر ۱۰٪ حل گردد.

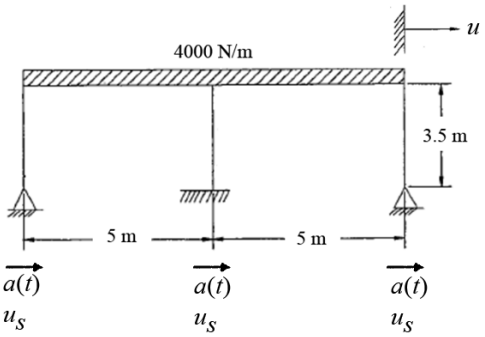
تذکر ۲: مسئله یک مرتبه تحت بارگذاری حرکت افقی پایه ($u_S$) و یک مرتبه تحت بارگذاری شتاب پایه ($a(t)$) حل گردد (برای دو حالت ذکر شده در تذکر ۱).

تذکر ۳: در حالت بارگذاری حرکت افقی پایه و نسبت میرایی ۱۰٪، مسئله بر حسب تغییرمکان نسبی بین تیر و پایه نیز حل گردد.

$E$= 210 GPa



به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ۵ (آنالیز فوریه و پاسخ در حوزه فرکانس)**

---

۱- برای قاب شکل زیر که دارای ستون های دارای مقطع مربعی و توپر به ضلع ۳۰ cm و یک تیر صلب می باشد و تحت نیروی تناوبی قرار گرفته است، با صرف نظر کردن از وزن تیر و ستون ها و با استفاده از روش آنالیز فوریه مطلوبست محاسبه:

الف) پاسخ قاب

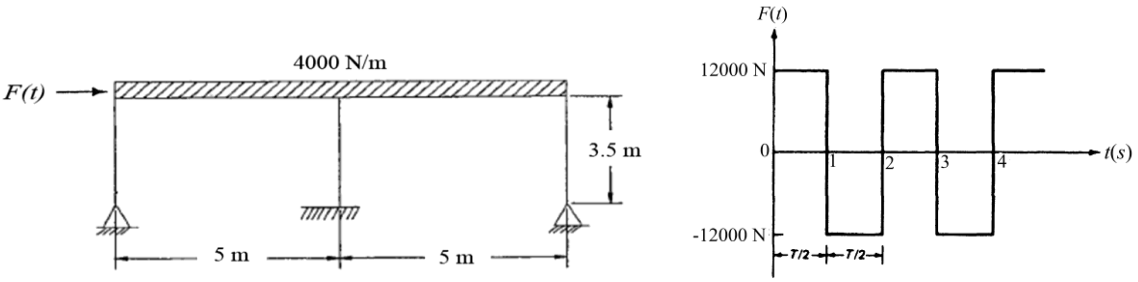
ب) حداکثر نیروی برشی دینامیکی ایجاد شده در ستون ها

ج) حداکثر نیروی منتقل شده به پایه

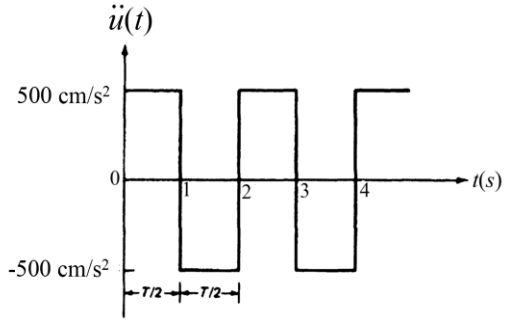
تذکر ۱: مسئله یک مرتبه با فرض سیستم بدون میرایی و یک مرتبه با فرض نسبت میرایی برابر ٦٪ حل شود.

تذکر ۲: یک مرتبه از فقط سه ترم و یک مرتبه فقط از پنج ترم سری فوریه استفاده و بر روی نتایج بحث گردد.

$E$= 210 GPa




۲- مطلوبست حل مسئله ۱ در صورتی که فقط تحت اثر شتاب تناوبی زیر در محل تکیه گاه ها قرار گیرد.

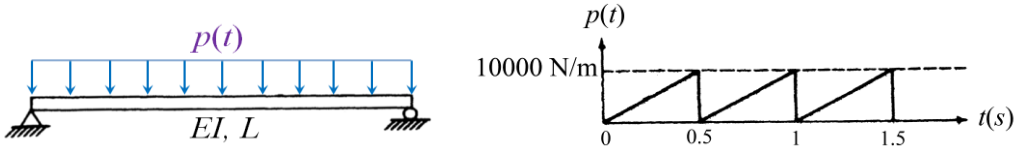



۳- در تیر دو سر ساده شکل زیر با مقطع مربعی شکل به ضلع ٤٠ cm تحت اثر بار تناوبی زیر، با استفاده از روش آنالیز فوریه و در نظر گرفتن پنج ترم اول و با صرف نظر کردن از میرایی، مطلوبست:

الف) محاسبه تعیین حداکثر تغییرمکان و حداکثر لنگر خمشی در نقاط $L/4$ و $L/2$ و حداکثر نیروهای عکس العمل تکیه گاهی.

ب) تعیین تنش تسلیم مورد نیاز مصالح بر اساس معیار خمش با ضریب اطمینان ۲.

$E$ = 210 GPa, $L$ = 4 m, $\overline{m} = 78000\ \mathrm{N/m^3}$, $p_0$= 10000 N/m, $t_d$ = 0.1 s



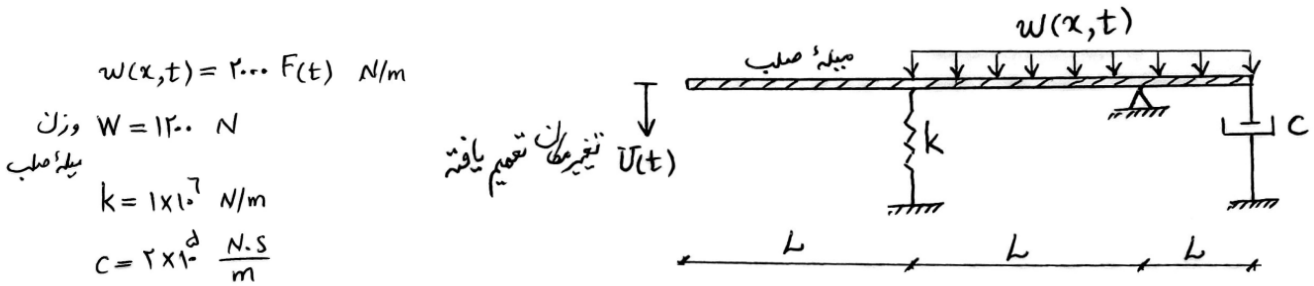
به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

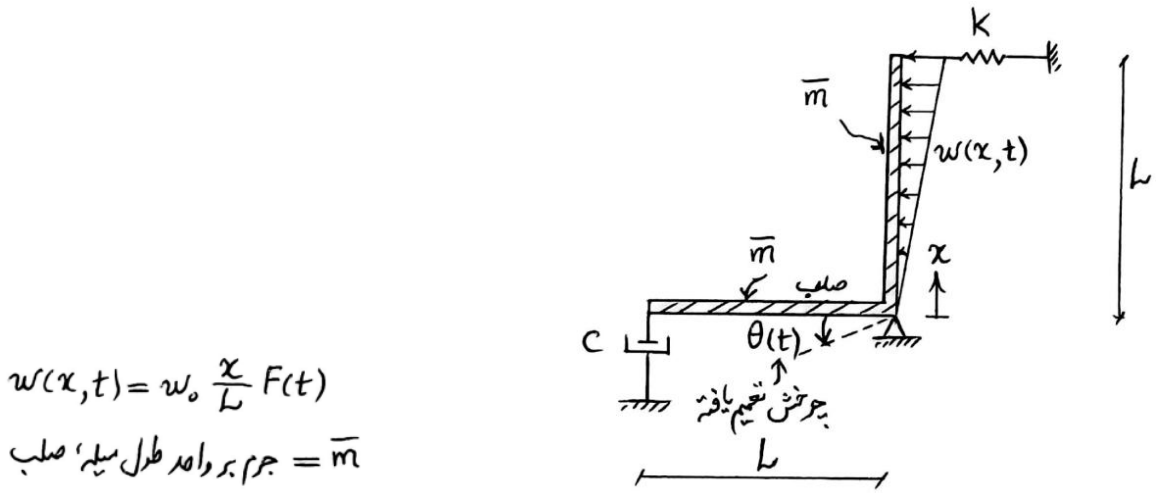
**تمرین شماره ٦ (مختصات تعمیم یافته و روش ریلی)**

---

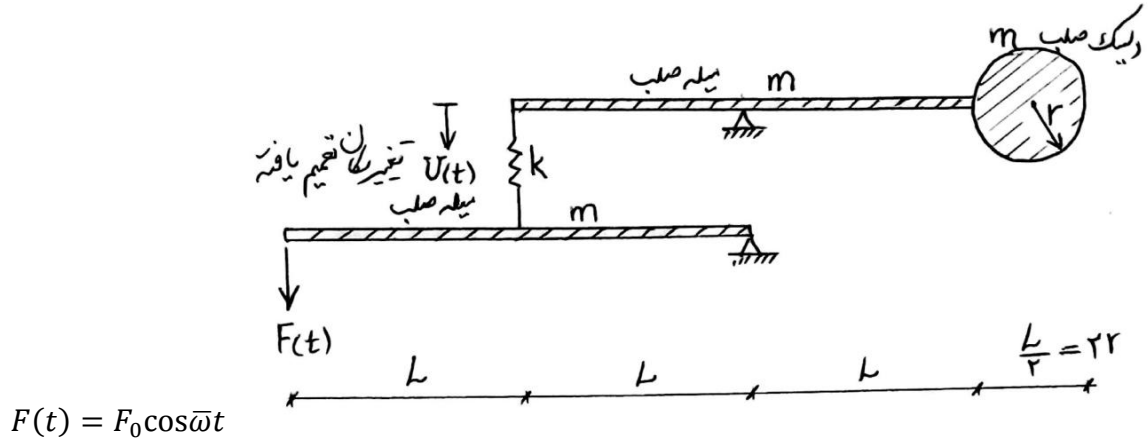
۱- برای سازه های شکل زیر مطلوبست تعیین پارامترهای تعمیم یافته $M^*$، $C^*$، $K^*$ و $F^*(t)$.




(الف)




(ب)




(ج)

۲- برای تیر شکل زیر مطلوبست محاسبه:

الف) پارامترهای تعمیم یافته

ب) پاسخ تیر

ج) ماکزیمم نیروی برشی و ماکزیمم ممان خمشی تیر

از جرم تیر برابر ۲m (۲ برابر جرم متمرکز m) است و در این مسئله $N=0$ می باشد.

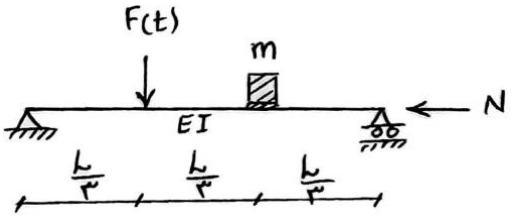
$F(t)=2000\sin 12t$ (lb)

$EI=1\times10^{14}$ kip.in$^2$

$L=12$ ft

$\phi(x)=$ برای تغییر شکل استاتیکی انتخاب شود (توابع شکل)

$m=250$ lb.sec$^2$/in.




۳- در صورتی که تیر مسئله ۲ علاوه بر بارگذاری قبلی تحت نیروی فشاری $N$ در انتهای آزاد خود قرار گیرد، مطلوبست محاسبه:

الف) پارامترهای تعمیم یافته

ب) مقدار نیروی $N$ که باعث کمانش می شود.

٤- برای قاب بتنی شکل زیر مطلوبست محاسبه:

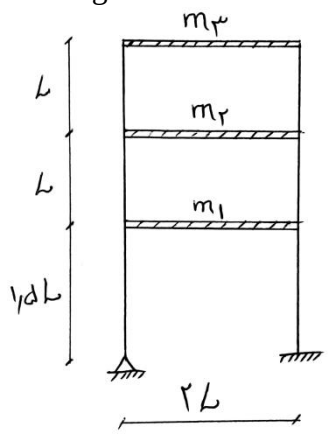
الف) پارامترهای تعمیم یافته

ب) فرکانس طبیعی

ج) ماکزیمم تغییرمکان های کف ها و نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در ستون ها.

ستون ها دارای مقطع مربعی با ضلع ٤٠ cm می باشند و نسبت میرایی تعمیم یافته برابر ۷٪ است.

$L = 3$ m, $E = 210$ GPa, $m_1=m_2=2m_3= 12000$ kg

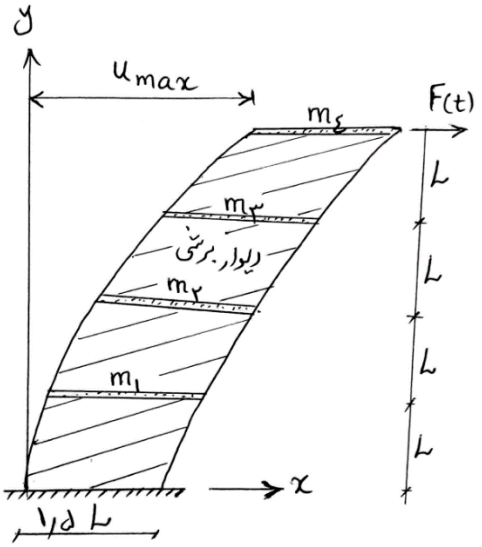



۵- مطلوبست محاسبه فرکانس طبیعی تیر مسئله ۲ به روش ریلی.

٦- مطلوبست حل مسئله ٤ به روش ریلی بهبود یافته.

٧- مطلوبست حل مسئله ٧ به روش ریلی بهبود یافته.

٨- در شکل زیر یک دیوار برشی مربوط به یک ساختمان چهار طبقه نشان داده شده است. در صورتی که کف ها صلب باشد، مطلوبست محاسبه فرکانس طبیعی دیوار برشی به روش ریلی.




$L = 12$ ft

$EI = 4 \times 10^{11}$ lb.in$^2$

$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 150$ lb.sec$^2$/in.

جرم واحد طول دیوار $\bar{m} = 15$ lb.sec$^2$/in$^2$

به نام خدا

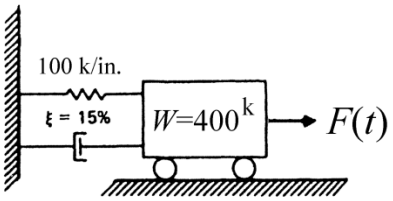
**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

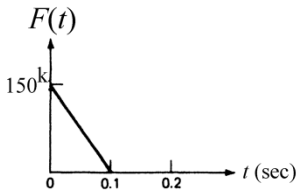
**تمرین شماره ۷ (پاسخ سازه ای غیرخطی)**

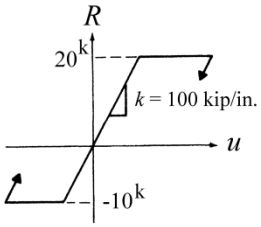
۱- برای سیستم جرم-فنر-میراگر شکل زیر که تحت اثر بارگذاری ضربه قرار گرفته است، با فرض رفتار الاستوپلاستیک و با استفاده از روش گام به گام شتاب خطی، مطلوبست محاسبه:

الف) تاریخچه تغییرمکان، سرعت و شتاب.

ب) ترسیم نمودارهای تغییرات تغییرمکان، سرعت و شتاب در برابر زمان.




۲- مطلوبست حل مسئله ۱ با فرض رفتار الاستیک و مقایسه نتایج با نتایج مسئله ۱.

۳- مطلوبست حل مسئله ۱ با فرض رفتار الاستوپلاستیک و با استفاده از روش شتاب ثابت و مقایسه نتایج با نتایج مسئله ۱.

٤- برای قاب شکل زیر که تیر آن صلب فرض می شود و از وزن ستون هایش، که دارای مقطعی مربعی و توپر به ضلع cm ۳۰ می باشند، صرف نظر می گردد (قاب مسئله ۱ تمرین شماره ۳ و قاب مسئله ۲ تمرین شماره ٤)، با فرض رفتار الاستوپلاستیک و با استفاده از روش گام به گام شتاب خطی، مطلوبست تعیین:

الف) پاسخ

ب) ماکزیمم تغییرمکان مطلق بالای قاب

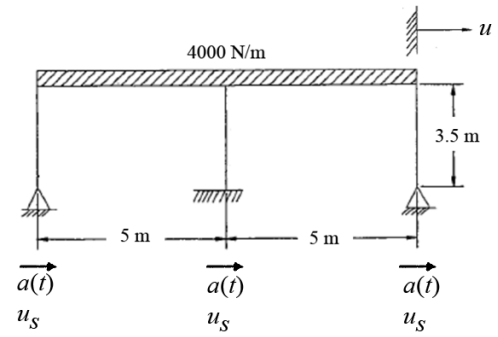
ج) ماکزیمم نیروی برشی در پایین ستون ها

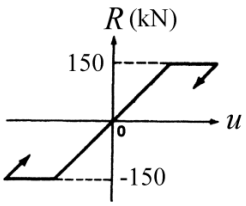
د) ماکزیمم تنش های ناشی از خمش در ستون ها

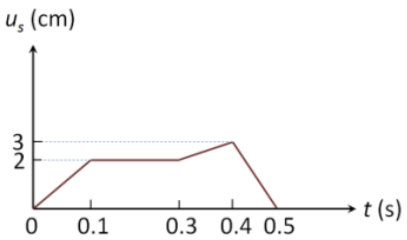
تذکر ۱: مسئله با در نظر گرفتن نسبت میرایی برابر ۱۰٪ حل گردد.

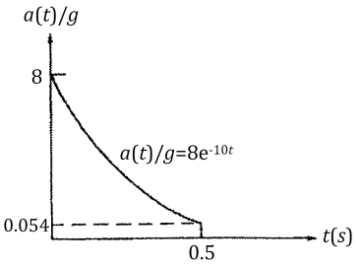
تذکر ۲: مسئله یک مرتبه تحت بارگذاری حرکت افقی پایه ($u_S$) و یک مرتبه تحت بارگذاری شتاب پایه ($a(t)$) حل گردد.

تذکر ۳: نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از مسئله ۲ تمرین شماره ٤ (پاسخ الاستیک) مقایسه گردد. $E$= 210 GPa



به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ۸ (طیف های پاسخ)**

۱- برای قاب شکل زیر با نسبت میرایی ۵٪، که تیر آن صلب فرض می شود و از وزن ستون هایش، که دارای مقطعی مربعی و توپر به ضلع ۳۰ cm می باشند، صرف نظر می گردد، در صورتیکه این سازه تحت اثر مولفه شمالی–جنوبی زلزله ۱۹٤۰ السنترو قرار گیرد، مطلوبست محاسبه:

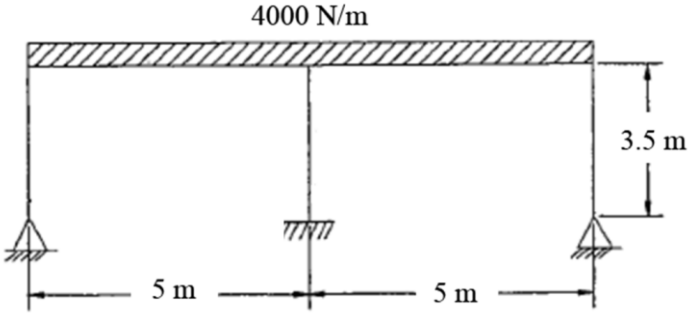
الف) تغییرمکان نسبی ماکزیمم سقف

ب) شبه سرعت ماکزیمم سقف

ج) شتاب مطلق ماکزیمم سقف

د) حداکثر نیروی برشی و ممان خمشی ستون ها

$E$= 210 GPa




۲- در شکل زیر یک قاب فولادی نشان داده شده است. ستون ها دارای مقطع قوطی مربعی به ضلع ۳۰ cm و ضخامت ۲ cm و مهاربندهای جانبی از نوع نبشی تکی با بال های مساوی به عرض ۱۰ cm و ضخامت ۱ cm می باشند. از وزن ستون ها و مهاربندهای جانبی صرف نظر می شود. نسبت میرایی برابر ۱۰٪ است. در صورتی که این سازه تحت اثر مولفه شمالی–جنوبی زلزله ۱۹٤۰ السنترو قرار گیرد، مطلوبست محاسبه:

الف) تغییرمکان نسبی ماکزیمم سقف

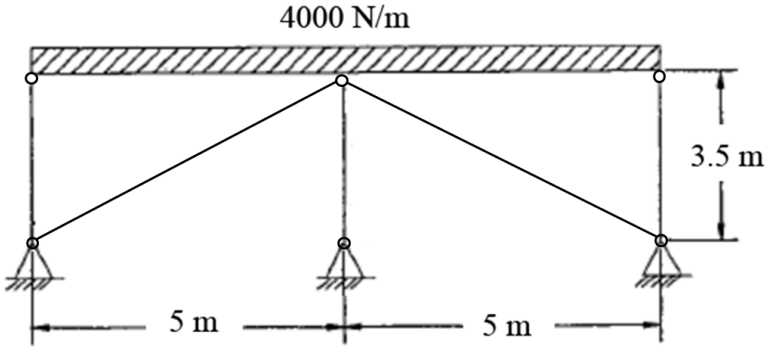
ب) شبه سرعت ماکزیمم سقف

ج) شتاب مطلق ماکزیمم سقف

د) حداکثر نیروی برشی، ممان خمشی و نیروی محوری ستون ها

ه) حداکثر نیروی محوری مهاربندهای جانبی

$E$= 210 GPa



به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

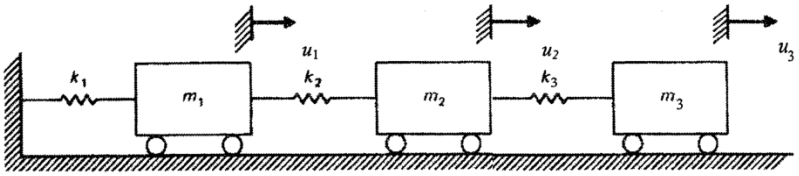
**تمرین شماره ۹ (ارتعاش آزاد یک ساختمان برشی)**

۱- یک ساختمان برشی به صورت یک سیستم سه درجه آزادی جرم و فنر مدل شده است. مطلوبست:

الف) محاسبه فرکانس های طبیعی سازه و مود شکل های متناظر با استفاده از معادلات حرکت.

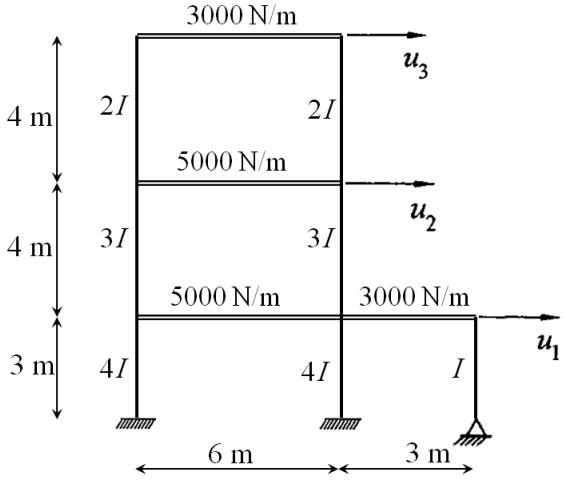
ب) تعیین فرکانس های طبیعی سازه و مود شکل های متناظر با استفاده از خارج قسمت ریلی.

$W_1=2W_2=4W_3$ = 20,000 N, $k_1=4k_2=2k_3$ = 200,000 N/m




۲- برای قاب فولادی شکل زیر با کف های صلب مطلوبست محاسبه فرکانس های طبیعی سازه و مود شکل های متناظر.

$E$ = 210 GPa, $I$ = 0.1 m$^4$



به نام خدا

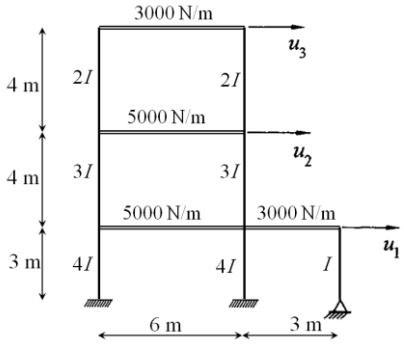
**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ۱۰ (ارتعاش اجباری ساختمان های برشی)**

۱- برای قاب فولادی با کف های صلب شکل زیر (مسئله ۲ تمرین شماره ۹) مطلوبست تعیین پاسخ به صورت تابعی از زمان اگر:

الف) یک بار ثابت افقی ۲۵۰۰۰ N به صورت ناگهانی به کف دوم وارد شود.

ب) یک شتاب ناگهانی با اندازه 0.4g به پایه وارد گردد. $E = 210$ GPa, $I = 0.1$ m$^4$

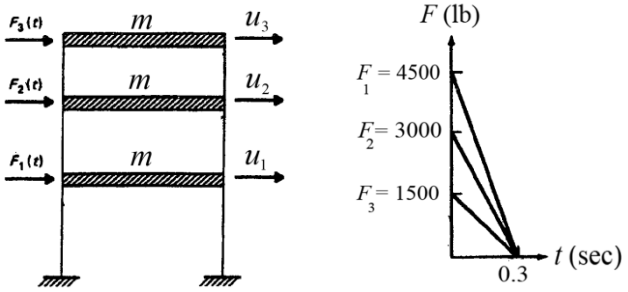



۲- برای قاب بتنی شکل زیر با کف های صلب تحت بارهای ضربه ای مثلثی، در صورتی که سختی هر طبقه برابر $k = 2000$ lb/in. و جرم هر طبقه برابر $m = 0.386$ lb.sec$^2$/in. باشد، مطلوبست تعیین ماکزیمم تغییرمکان های طبقات و ماکزیمم نیروهای برشی ستون های طبقه دوم اگر:

الف) از میرایی صرف نظر شود.

ب) میرایی با ضریب نسبت a=0.01 متناسب با سختی باشد.

راهنمایی: نیروهای برشی مودال محاسبه و به روش جذر مجموع مربعات ترکیب شوند.

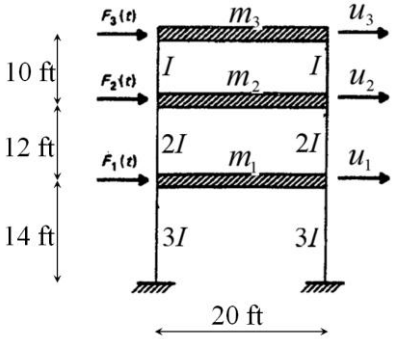



۳- برای قاب بتنی با کف های صلب شکل زیر در دو حالت بدون میرایی و بامیرایی با ضریب نسبت a=0.015 متناسب با سختی، مطلوبست تعیین پاسخ حالت پایدار برای بارگذاری های زیر:

الف) $F_3(t)=5000 \cos 3t$ (lb) $E = 21$ GPa, $I = 0.1$ m$^4$, $m_1=1.5m_2=2m_3= 0.5$ lb.sec$^2$/in.

ب) $F_1(t)=3000 \cos 2t$ (lb), $F_3(t)=5000 \cos 3t$ (lb)

ج) $F_1(t)=2500 \sin t$ (lb), $F_2(t)=1500 \sin t$ (lb), $F_3(t)=3000 \sin t$ (lb)



به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

**تمرین شماره ۱۱ (پاسخ تاریخچه زمانی سیستم های چند درجه آزادی)**

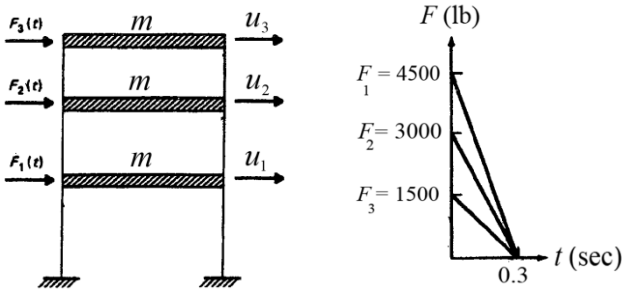
---

۱- برای قاب بتنی شکل زیر (مسئله ۲ تمرین شماره ۱۰) با کف های صلب تحت بارهای ضربه ای مثلثی، در صورتی که سختی هر طبقه برابر $k = 2000$ lb/in. و جرم هر طبقه برابر $m = 0.386$ lb.sec$^2$/in. باشد، با استفاده از روش ویلسون- $\theta$، مطلوبست تعیین تاریخچه تغییرمکان های طبقات و تاریخچه ماکزیمم نیروهای برشی ستون های طبقه دوم اگر:

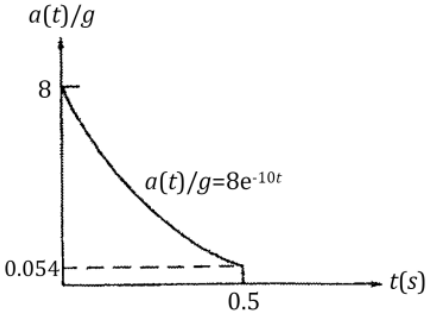
الف) از میرایی صرف نظر شود.

ب) نسبت میرایی برابر ۱۰٪ باشد.

تذکر: نمودارهای تاریخچه های بدست آمده ترسیم شوند.




۲- با استفاده از روش ویلسون- $\theta$، مطلوبست حل مسئله ۱ در صورتی که قاب بتنی تحت شتاب پایه به شکل زیر قرار داشته باشد.




۳- مطلوبست حل مسئله ۱ با استفاده از روش نیومارک $\beta$.

٤- مطلوبست حل مسئله ۲ با استفاده از روش نیومارک $\beta$.

به نام خدا

**درس دینامیک سازه ها** **مدرس: مهرداد حجازی**

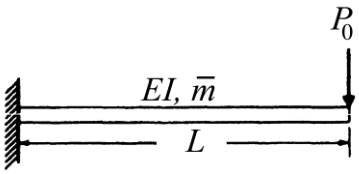
**تمرین شماره ۱۲ (آنالیز دینامیکی سیستم های با خصوصیات گسترده)**

۱- تیر طره ای شکل زیر تحت یک بار متمرکز استاتیکی $P_0$ است که ناگهان برداشته می شود. مطلوبست محاسبه ارتعاش آزاد آن به صورت یک بسط سری و تعیین اندازه اولین مود آن بر حسب $P_0$ در دو حالت:

الف) بدون میرایی

ب) با نسبت میرایی $\xi = 10\%$

$E = 30 \times 10^6$ psi, $I = 140$ in.$^4$, $L = 140$ in., $\overline{m} = 0.2$ lb $-$ sec/in.$^3$, $P_0 = 1000$ lb




۲- در صورتی که در تیر مسئله ۱، $P_0 = 1000 \sin 400t$ lb باشد، مطلوبست محاسبه:

الف) اندازه حرکت حالت پایدار برای وسط و انتهای آزاد تیر در هر یک از سه مود اول برای دو حالت بدون میرایی و با نسبت میرایی $\xi = 10\%$.

ب) حداکثر مقدار تغییرمکان و حداکثر لنگر خمشی دینامیکی تیر با در نظر گرفتن سه مود اول.

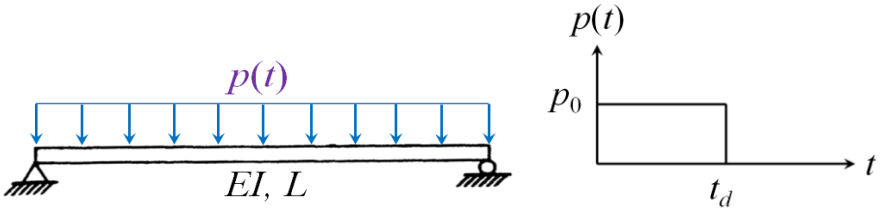
۳- در تیر دو سر ساده شکل زیر با مقطع مربعی شکل به ضلع ٤٠ cm تحت اثر بار مستطیلی مطلوبست:

الف) محاسبه تعیین حداکثر تغییرمکان و حداکثر لنگر خمشی در نقاط $L/4$ و $L/2$ و حداکثر نیروهای عکس العمل تکیه گاهی با در نظر گرفتن پنج مود اول.

ب) تعیین تنش تسلیم مورد نیاز مصالح بر اساس معیار خمش با ضریب اطمینان ۲.

پنج مود اول در نظر گرفته شود. از میرایی صرف نظر می گردد.

$E = 210$ GPa, $L = 4$ m, $\overline{m} = 78000$ N/m$^3$, $p_0 = 10000$ N/m, $t_d = 0.1$ s




٤- در صورتی که تیر مسئله ۳ به ترتیب تحت اثر بارگذاری های زیر قرار گیرد، مسئله را مجددا حل کنید، نتایج را مقایسه و بر روی آن بحث نمایید:

الف) بارگذاری شکل زیر.

ب) بار $p_0 = 10000$ به صورت استاتیکی.