
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع

سازه های هوایی

(دینامیک، ارتعاشات، مقاومت مصالح، تحلیل سازه ها)

«مهندسی هوافضا»

مولفان: میلاد شکوهمند- محمدندافی‌پور میبدی

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

این مجموعه تقدیم می‌گردد:

به مادر، پدر

مادربزرگم و خواهر عزیزم

پیشگفتار مؤلف

مهندسی هوا فضا علمی است نسبتاً جدیدی است که ریشه‌ای کهن دارد، از زمان پیدایش بشر و آن هنگام که به آسمان نگریست ورویای پرواز را در سر پروراند از همان هنگام ایده‌ها یش برای گسترش علم و هوا فضا آغاز شد.
مجموعه‌ای که اکنون در دست دارید شرح جامعی از دروس جهت کنکور کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا می‌باشد، امید است مورد استفاده داوطلبان کوشا و با انگیزه این رشته قرار گیرد.

با سپاس
میلاد شکوهمند
شهریور ماه ۱۳۸۹

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

بخش اول: تحلیل سازه‌ها

فصل اول: تعادل اجسام صلب ۱۱
فصل دوم: خرپاها ۱۸
فصل سوم: بررسی پایداری و ناپایداری قاب ها (معینی و نا معینی) ۲۲
فصل چهارم: تیرها ۲۸
فصل پنجم: کابل های معلق آویزان ۳۵

بخش دوم: مقاومت مصالح

فصل اول: آشنایی با اجزاء هواپیما ۱۰۱
فصل دوم: فصل مفاهیم تنش و کرنش ۱۱۳
فصل سوم: پیچش مقاطع ۱۳۶
فصل چهارم: تنش خمشی ۱۴۸
فصل پنجم: تنش برشی ۱۶۰
فصل ششم: ترکیب تنش‌ها و المان تنش ۱۷۱
فصل هفتم: کمانش در ستون‌ها ۱۸۰
فصل هشتم: خیز تیرها ۱۸۲

بخش سوم: تئوری ارتعاشات

فصل اول: مفاهیم ۲۳۹
فصل دوم: ارتعاشات آزاد ۲۴۲
فصل سوم: ارتعاشات اجباری با تحریک هارمونیک ۲۶۲
فصل چهارم: سیستم‌های با دو یا چند درجه‌ی آزادی ۲۴۸
فصل پنجم: ارتعاشات گذرا ۳۲۱

عنوان **صفحه**

بخش چهارم: دینامیک

فصل اول: حرکت در خط راست ۳۷۵
فصل دوم: دینامیک ذره مادی ۳۹۳
فصل سوم: تکانه و برخورد ۳۹۹
فصل چهارم: حرکت تحت تأثیر نیروی مرکزی ۴۰۳
فصل پنجم: سینماتیک جسم صلب ۴۱۴
فصل ششم: دینامیک جسم صلب ۴۲۲
فصل هفتم (مثال‌های تکمیلی): سینماتیک ذره‌ها ۴۳۹

بخش اول

تحلیل سازه‌ها

عناوین اصلی

- تعادل اجسام صلب
- خرپاها
- بررسی پایداری و ناپایداری قاب‌ها
- تیرها
- فرانظریه
- کابل‌های معلق آویزان
- تست‌های طبقه‌بندی شده

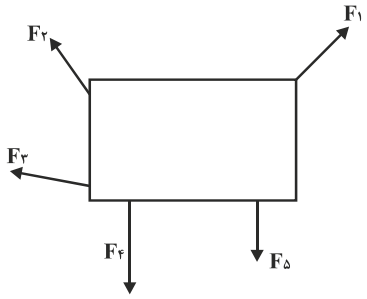
فصل اول

تعادل اجسام صلب

تعادل

اجسام صلب در صفحه

شرایط لازم و کافی برای تعادل اجسام صلب در صفحه:



$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_A = 0 \end{cases}$$

به شرط آنکه امتداد AB عمود بر محور x نباشد:

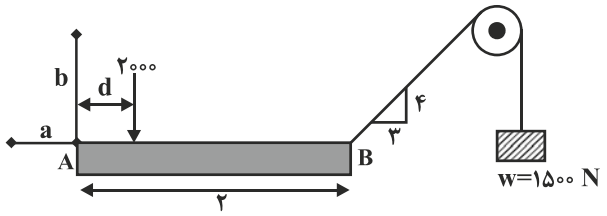
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum M_A = 0 \\ \sum M_B = 0 \end{cases}$$

به شرط آنکه A و B و C در یک امتداد نباشند:

$$\begin{cases} \sum M_A = 0 \\ \sum M_B = 0 \\ \sum M_C = 0 \end{cases}$$

مثال

تیر AB مطابق شکل از سقف و دیوار آویزان شده است و نیروی ۲۰۰۰ N را تحمل می کند.
الف) فاصلهٔ d را طوری تعیین کنید که تیر به حالت افقی بماند.
ب) در این حالت کشش کابلها را محاسبه کنید.

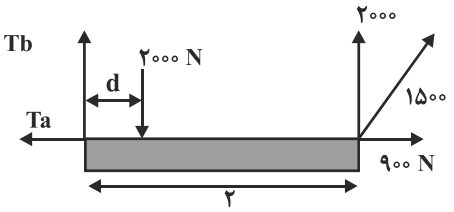


$$\sum M_A = ۰ \Rightarrow ۱۲۰۰۰ \times ۲ - ۲۰۰۰ \times d = ۰ \Rightarrow d = ۱/۲m$$

$$\sum F_x = ۰ \Rightarrow ۹۰۰ - T_a = ۰ \Rightarrow T_a = ۹۰۰N$$

$$\sum F_y = T_b - ۲۰۰۰ + ۱۲۰۰ = ۰ \Rightarrow T_b = ۸۰۰N$$

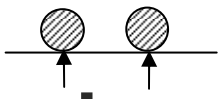
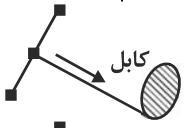
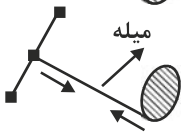
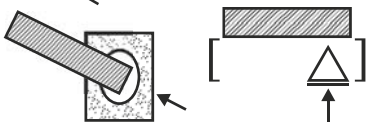
$$\sum M_B = -۸۰۰ \times ۲ - ۲۰۰ \times ۰/۸ = ۰$$

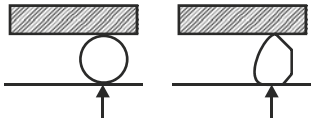


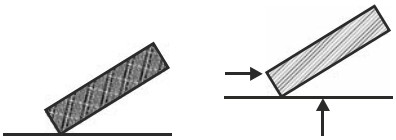
نکته : همیشه معادلات تعادل را در یک سمت نوشته و برابر صفر قرار می دهیم و بعد معلوم و مجهول را تفکیک می کنیم.

انواع تکیه گاه در صفحه :

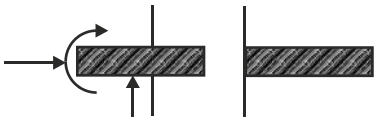
تکیه گاه : هر عامل یا قیدی که مانع حرکت جسم شود تکیه گاه می باشد.

نوع تکیه گاه		عکس العمل
۱-تکیه گاه ساده: (سطح صاف)		یک نیرو با امتداد مشخص (عمود بر سطح تماس)
۲-تکیه گاه کابلی: (کشش را تحمل می کند)		یک نیروی کششی (در امتداد کابل)
۳-تکیه گاه اتصال کوتاه: (هم کشش و هم فشار را تحمل می کند)		یک نیرو با امتداد مشخص (در امتداد میله)
۴-تکیه گاه غلتکی:		یک نیرو با امتداد مشخص (عمود بر جهت حرکت)



۵-سطح ناصاف:  یک نیرو با امتداد نامشخص (دو نیروی عمود بر هم)

۶- تکیه گاه مفصلی:  یک نیرو با امتداد نامشخص (دو نیروی عمود بر هم)

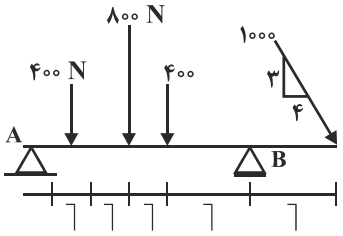
۷- تکیه گاه گیردار:  دو نیروی عمود بر هم ویک لنگر

نکته: در مسائل، اکثراً فقط سه نوع تکیه گاه ۴ و ۶ و ۷ کاربرد دارد.

نکته: هرگاه در مسائلی گفته شود یک تیر با تکیه گاه ساده یا معمولی منظور تیری با یک سر تکیه گاه مفصلی و طرف دیگر تکیه گاه غلتکی است.

مثال

مطلوبست محاسبهٔ عکس العمل تکیه گاهها در تیر نشان داده شده (از وزن تیر صرف نظر می کنیم)

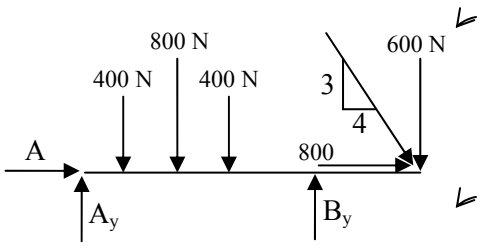


$$\sum F_x = ۰ \qquad A_x + ۸۰۰ = ۰ \qquad A_x = -۸۰۰\,N$$

$$\sum M_A \Rightarrow -۴۰۰\times۱ - ۸۰۰\times۲ - ۴۰۰\times۳ - ۶۰۰\times۵ + B_y \times ۴ = ۰ \Rightarrow B_y = ۱۵۵۰\,N$$

$$\sum F_y = ۰ \Rightarrow A_y - ۴۰۰ - ۸۰۰ - ۴۰۰ + B_y \times ۴ = ۰ \Rightarrow A_y = ۶۵۰\,N$$

$$\sum M_B = -۶۰۰\times۱ + ۴۰۰\times۱ + ۸۰۰\times۲ + ۴۰۰\times۳ - ۶۵۰\times۴ = ۰$$



مثال

میلهٔ AC دو نیروی ۴۰۰ N را مطابق شکل نگه داشته است غلطک های A و C بر روی سطوح بدون اصطحکاک ساکن هستند و کابل BD میله را نگه داشته است.

الف) مطلوبست کشش کابل BD

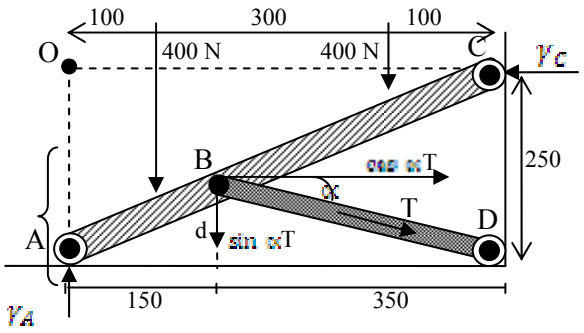
ب) عکس العمل A و C

$$\frac{d}{۲۵۰}=\frac{۱۵۰}{۵۰۰}+d=۷۵۰۰ \qquad a=\text{Arc}\tan\frac{۷۵}{۳۵۰}=۱۲/۰۹^\circ$$

$$\begin{cases}\sum M_{.}=۰\Rightarrow t\cos\alpha-r_c=۰\Rightarrow r_c=۱۴۰۰N\\ T=\dfrac{۴۰۰\times۵۰۰}{۱۷۵\cos x-۱۵۰\sin x}\Rightarrow T=۱۴۳۲N\end{cases}$$

$$\sum f_x=۰\Rightarrow t\cos\alpha-r_c=۰\Rightarrow r_c=۱۴۰۰N$$

$$\sum f_y=۰\Rightarrow t\sin\alpha-r_a+۸۰۰=۰\Rightarrow r_a=۱۱۰۰N$$

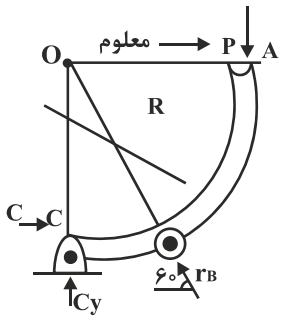


مثال

میلهٔ ABC مطابق شکل به شکل قوسی از دایره به شعاع R خک شده است و $\theta=۳۰^\circ$ است.

الف) عکس العمل در B

ب) عکس العمل در C

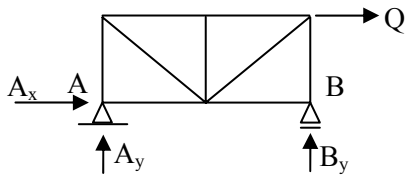
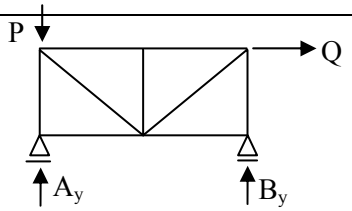
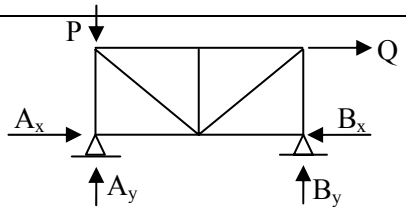
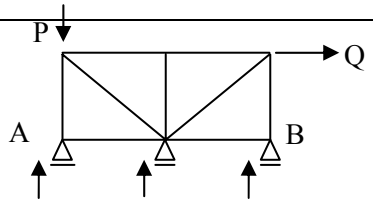
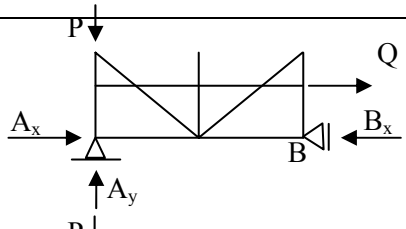
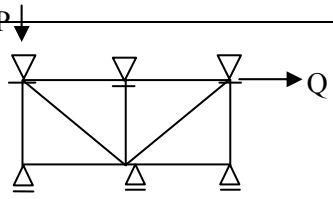


$$\begin{cases} \sum M_o = ۰ \Rightarrow +C_x \times R - p \times R = ۰ \Rightarrow C_x = p \\ \sum F_x = ۰ \Rightarrow C_x - r_s \cos ۶۰ = ۰ \Rightarrow r_s = \dfrac{C_x}{\cos ۶۰} \Rightarrow r_s = ۲p \\ \sum F_y = ۰ \Rightarrow C_y + r_s \sin ۶۰ - p \Rightarrow C_y = -۰/۷۳۲p \end{cases}$$

اجسام صلب مقیّد یا نا مقیّد

عکس العمل های تکیه گاهی معیّن یا نا معیّن

جسم صلب مقیّد : هیچگونه جابجایی یا دوران برای آن ممکن نیست.

تعداد معادلات	تعداد مجهولات		
۳	۳	مقیّد معیّن	
۳	۲	نا مقیّد (ناقص)	
۳	۴	مقیّد نا معیّن	
۳	۳	نا مقیّد (نا مناسب) سه عکس العمل موازی نا مقیّد	
۳	۳	نا مقیّد (نا مناسب) سه عکس العمل متقارب نا مقیّد	
۳	۶	نا مقیّد (نا مناسب)	

شرط آنکه یک جسم صلب در صفحه مقیّد و معیّن باشد این است که:

الف) تعداد معادلات و مجهولات برابر باشند (فقط سه عکس العمل تکیه گاهی وجود داشته باشد) (۳و۳)

ب) هر سه عکس العمل با هم موازی یا متقارب نباشند.

در اجسام صلب نامقید ناقص اگر در شرایط خاص به حالت تعادل برسد عکس العمل های تکیه گاهی قابل محاسبه است ولی در اجسام صلب نا مقید نا مناسب اگر در شرایط خاص هم به حالت تعادل برسند همهٔ عکس العمل های تکیه گاهی قابل محاسبه نیست.

اگر تعداد عکس العمل های تکیه گاهی۳ (تعداد مجهولات) کمتر از (تعداد معادلات) باشدنامقید ناقص است و اگر تعداد عکس العمل های تکیه گاهی برابر ۳ باشددو حالت دارد:

۱- هر سه با هم موازی و متقارب نیستند ⟵ جسم مقید و معین است.

۲- هر سه با هم موازی و متقارب هستند ⟵ جسم مقید نا مناسب است.

و اگر تعداد عکس العمل های تکیه گاهی بزرگتر از ۳ باشد نیز دو حالت دارد:

- تعداد عکس العمل ها
  - کمتر از ۳ ← نا مقید ناقص
  - برابر ۳
    - با هم موازی یا متقاربند ← نا مقید نا مناسب
    - با هم موازی یا متقارب نیستند ← مقید و معین
  - برابر ۳
    - موازی و متقارب هستند ← نا مقید نامناسب
    - موازی و متقارب نیستند ← مقید و نا معین

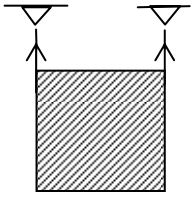
۱- همهٔ عکس العمل ها با هم موازی و متقارب نیستند ⟵ جسم مقیّد و نا معین است.

۱- همهٔ عکس العمل ها با هم موازی و متقارب باشند ⟵ جسم نامقید نامناسب است.

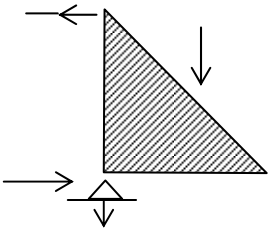
بودن فقط یک تکیه گاه گیردار نشانهٔ مقیّد بودن و معیّن بودن است و اگر تکیه گاه گیردار به همراه تکیه گاههای دیگری باشد فقط نشانهٔ مقید بودن است و معین و نا معین بودن را باید محاسبه کرد.

مثال

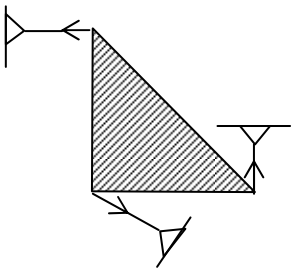
نامقید (ناقص)



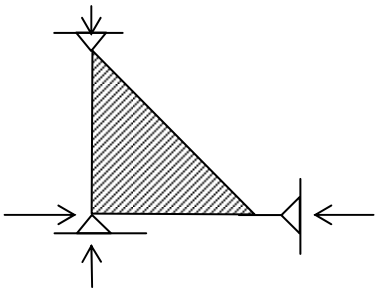
مقید معین



مقید معین



نامقید (نا مناسب)



فصل دوم

خرپاها

تعریف خرپا

سازه ای است تشکیل شده از مجموعه ای از اعضاء که در نقاطی به نام گره یا Joint به هم وصل می شوند. اتصال این اعـضاء در گره بدون اصطکاک و مفصلی فرض می شود.

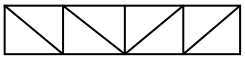
در یک خرپا فرضیات زیر همواره مورد قبول می باشد:

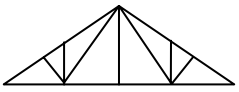
۱- اتصال اعضاء در نقاط گره مفصلی می باشد.

۲- در یک خرپا نیرو فقط در نقاط گره وارد می شود.

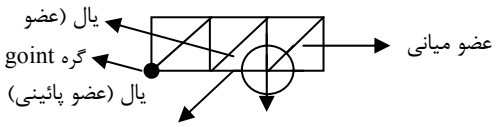
۳- در یک خرپا فقط نیروی کششی و فشاری ایجاد می شود (فقط نیروی محوری داریم و برش و گشتاور نداریم).

* خرپاها از نظر فرم

تخت  ← برای طبقات مختلف

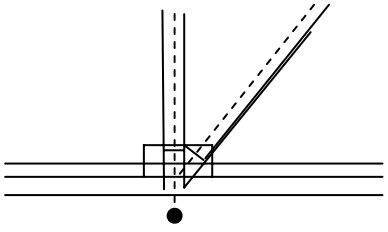
شیبدار  ← فقط برای سقف طبقه آخر یا یک طبقه

📖**نکته** : در یک خرپا یال ها معمولاً یکسره هستند و اعضای میانی تکه تکه هستند.



📖**نکته** : عضو هایی که به یک نقطه یا گره می رسند باید هم محور باشند یعنی محورهای آنها در یک نقطه به هم برسند.

📖**نکته** : بادبندها هم یک نوع خرپا هستند و تمام اصول خرپاها برای آنها صادق است.



در هر مفصل در خرپا ۲ معادله وجود دارد. پس می توان گفت:

تعداد گره ها =j و تعداد معلومات =r

همچنین داریم:

تعداد معادلات تعادل =r

تعداد اعضای خرپا =m

تعداد مجهولات =m+r

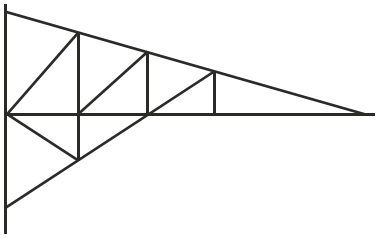
اگر m+r=2j ← معین

اگر m+r>2j ← نامعین

اگر m+r<2j ← ناپایدار

نکته : در حالت تکیه گاه صلب (گیردار) **r** و عضو**m** (متصل به تکیه گاه) باید حذف شوند.

یعنی در اینجا دیگر نقاط ۱، ۲ و ۳ گره محسوب نمی شوند.



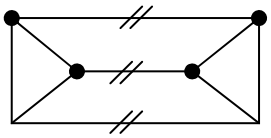
در این حالت فقط m و j هایی داریم که به تکیه گاه وصل نیستند ⟵ عضو و گره را بعد از تکیه گاه صلب باید حساب کرد. ⟵ (ولی اگر تکیه گاه غلطکی باشد به همان طریقهٔ قبلی حل می شود).

ناپایدار اعضاء موازی معین M=9

M+r=2j → R=3

J=6

→ ناپایداری



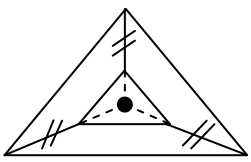
اعضای موازی

ناپایدار هم مرکز اعضاء معین M=9

M+r=2j → R=3

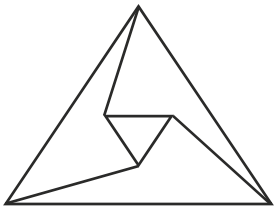
J=6

ناپایداری ⟵ اعضاء هم مرکز



نکته : اگر اعضایی که دو مثلث را در خرپا به هم وصل می کنند با هم موازی باشند یا از یک نقطه عبور کنند، خرپا ناپایدار خواهد بود.

معین و پایدار



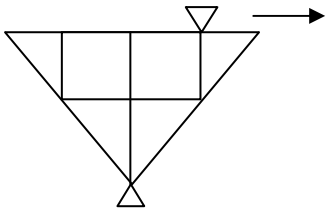
معین و پایدار

نکته : در اکثر خرپاهای ناپایدار ممکن است که با یک سری مربع یا لوزی روبرو شویم که البته همیشه اینطور نیست.

m=14

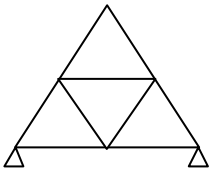
r=4 M+r=2j ⟶ معین و پایدار

J=9



چون تکیه گاهها مفصلی اند هر کدام ۲ عکس العمل دارند.

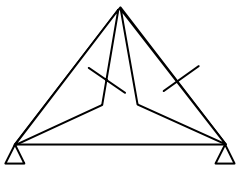
چند مثال از خرپاهای پایدار و ناپایدار



M=8
R=3
J=6

ناپایدار

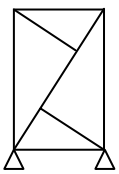
۸+۳ ≠ ۲×۶



M=11
R=3
J=7

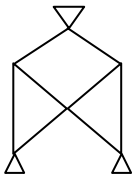
پایدار و معین

۱۱+۳ = ۲×۷



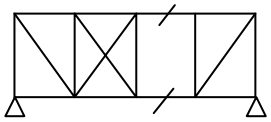
M=9
R=3
J=6

پایدار و معین



M=6
R=3
J=5

ناپایدار



M=17
R=3
J=10

ناپایدار

چون دو عضو موازی خرپاهارا
به هم وصل کرده است

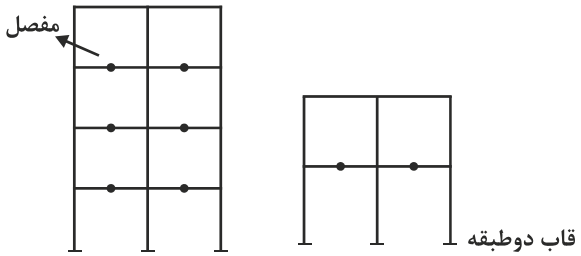
فصل سوم

بررسی پایداری و ناپایداری قاب ها (معینی و نا معینی)

منظور از قاب زمانی است که اتصالات صلب (گیردار)است.

$$3b + r = 3j$$

اعضا — عکس العمل تکیه‌گاه — گره‌ها

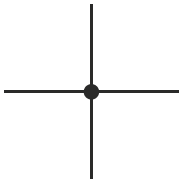


۳ گیردار		تعداد عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه=R
۲ مفصلی	$b = ۱۰$	تعداد اعضاء =B
۱ غلطکی	$r = ۹$	نیروهای داخلی =3B
	$j = ۹$	

نیروی داخلی برابر است با : نیروی برشی، محوری و گشتاور

معادله قاب	$3b+r=3j$	پایدار و معین
	$3b+r>3j$	پایدار و نامعین
	$3b+r<3j$	ناپایدار

در مورد قاب هایی که مفصل دارند : ⟵ $3b+r=3j+c$





تعداد اعضای متصل به مفصل = c

$C = ۲ - ۱ = ۱$ $C = ۴ - ۱ = ۳$

R=9 3b+r=3j+c
B=10 پایدار و نامعین
J=9 9+30 > 37+4 => 39-31=8
C=4

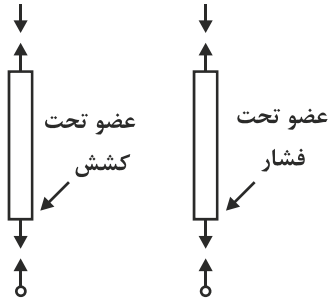
روش های حل خرپاها

۱- روش گره
۲- روش برش

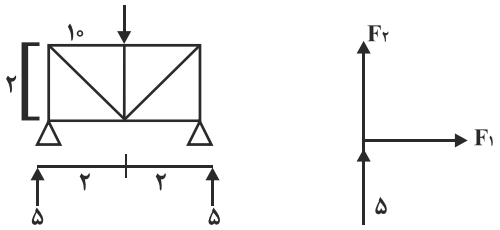
۱- روش گره : در ابتدا عکس العمل های تکیه گاهی را به دست می آوریم.

در خرپا فقط نیروی محوری داریم (کشش یا فشار) ولی در تیر ها سه نیروی داخلی داشتیم (محوری، برشی و گشتاور)

اگر فلش از گره دور شود←گره تحت کشش است



اگر فلش به گره نزدیک شود←گره تحت فشار است

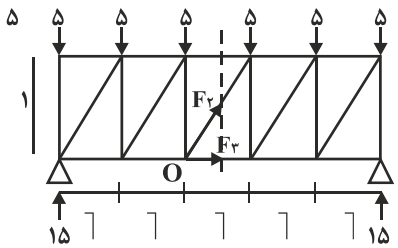


$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_1 = 0$

$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_2 = -5$ فشاری

۲- روش برش : در این روش هم مثل روش گره ابتدا عکس العمل های تکیه گاهی را به دست می آوریم.

برش باید از عضو مورد نظر عبور کند و خرپا را هم به ۲ قسمت تقسیم کند.

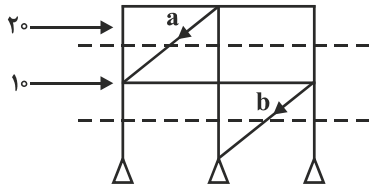


$$\sum F_y = ۰ \Rightarrow ۱۵ - ۵ - F_۲ \sin\alpha = ۰ \Rightarrow F_۲ = ۰$$

$$\sum M_o = ۰ \Rightarrow ۱۵ \times ۲ + (-۵ \times ۲) + (-۵ \times ۱) + F_۱ \times ۱ = ۰ \Rightarrow F_۱ = ۱۵$$

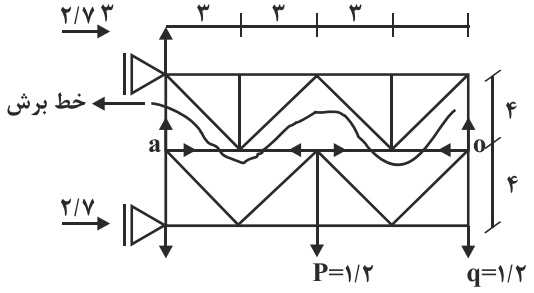
گشتاور نسبت به نقطه O

نحوهٔ برش زدن خیلی مهم است و باید تمامی عضوهای درگیر در برش اعمال شوند.

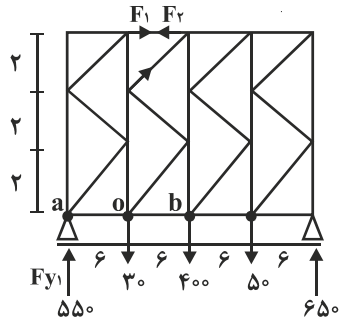


$$\sum F_x = ۰ \rightarrow F_a \cos\alpha = ۲۰ \rightarrow F_a = \ldots$$

$$\sum F_x = ۰ \rightarrow F_b \cos\alpha = ۳۰ \rightarrow F_b = \ldots$$



$$\sum M_o = ۰ \Rightarrow F_a \times ۱۲ + ۲/۴ \times ۱۲ = ۲ \times ۲/۷ \times ۴ + ۱/۲ \times ۶ \Rightarrow F_a = \ldots$$



$$\sum M_a = ۰ \Rightarrow ۳۰۰ \times \frac{۱}{۴} + ۴۰۰ \times \frac{۱}{۲} - ۵۰۰ \times \frac{۳}{۴} = F_{y_۲}$$

$$\Rightarrow ۷۵ + ۲۰۰ + ۳۷۵ = F_{y_۲} = ۶۵۰ \Rightarrow F_{y_۱} = ۵۵۰$$

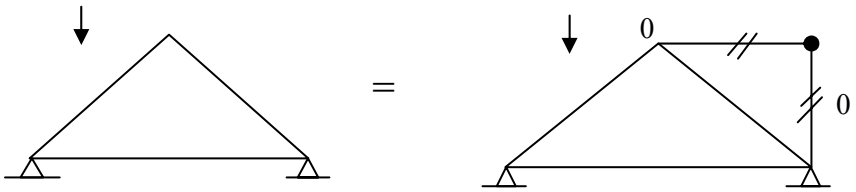
$$\sum M_o = ۰ \Rightarrow F_۱ \times ۶ + ۵۵۰ \times ۶ = ۰ \Rightarrow F_۱ = +۵۵۰$$

$$\sum M_b = ۰ \Rightarrow F_۲ \times ۶ + ۵۵۰ \times ۱۲ - ۳۰۰ \times ۶ = ۰ \Rightarrow F_۱ = +۵۵۰$$

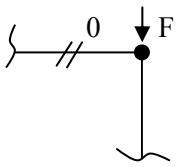
$$\sum F_y = ۰ \Rightarrow ۵۵۰ - ۸۰۰ - F_a \times \cos\alpha = ۰ \Rightarrow F_a = \frac{۶}{۲\sqrt{۱۰}} = -۲۵۰$$

حالتهای خاص در تحلیل خرپاها

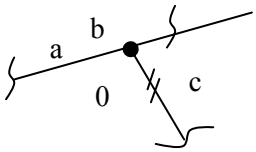
۱- هر گاه به گره ای فقط دو عضو وارد شود و نیروی خارجی در گره وجود نداشته باشد نیروی داخلی هر ۲ عضو برابر صفر است.



۲- هر گاه به گره ای فقط ۲ عضو وارد شود و نیروی خارجی در امتداد یکی از اعضا باشد نیروی عضو دیگر صفر خواهد شد و نیروی آن عضو برابر نیروی خارجی است.



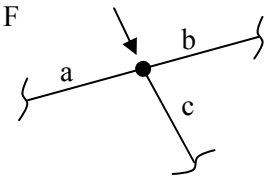
۳- هر گاه به گره ای ۳ عضو وارد شده باشد که دو عضو در یک راستا باشند و نیروی خارجی به گره وارد نشود نیرو در عضو سوم برابر صفر خواهد بود .



a=b

c=0

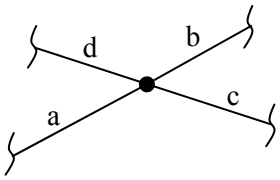
۴- هر گاه به گره ای ۳ عضو وارد شده باشد که دو عضو در یک راستا باشند و عضو سوم در راستای نیروی خارجی باشد نیرو در عضو سوم برابر نیروی خارجی است.



a=b

c=F

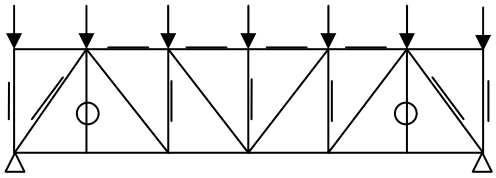
۵- هر گاه به گره ای ۴ عضو وارد شده باشد که دو به دو در یک راستا باشند و بار خارجی به گره وارد نشود نیروی اعضایی که در یک راستا باشند با هم برابر خواهد بود.



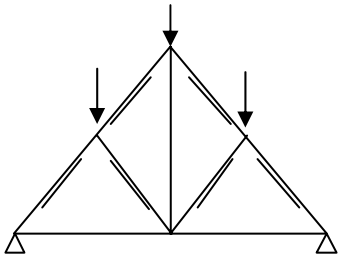
a=b

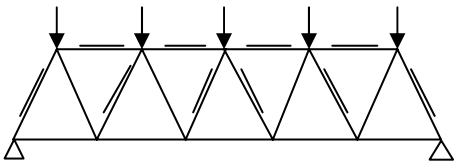
c=d

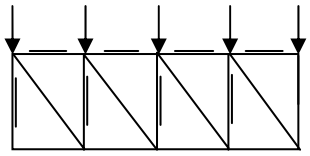
حدس زدن اعضای کششی و فشاری در خرپاها



* عضوهایی که با دو خط مشخص شده اند تحت فشارند.

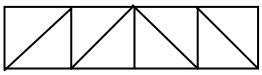




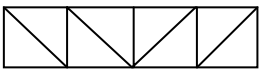


نکته : در خرپاهای تخت مثل رفتار تیر در بارهای عمودی اعضای بالایی تحت فشار و پائینی تحت کشش قرار می گیرند.

نکته : در خرپاهای تحت (و نه شیبدار) اکثراً اعضای عمودی تحت فشارند و در مورد اعضای مورب :
اعضای مورب اگر قوس گنبدی داشتند معمولاً تحت فشارند



اعضای مورب اگر قوس کاسه ای داشتند معمولاً تحت کشش اند



خرپاهای سه بعدی (Space Frame):

مجموعه ای از اعضای یک خرپا که در فضا به صورت مفصلی به یکدیگر وصل می شوند. کاربرد اصلی Space Frame ها (یا خرپاهای فضایی یا سیستم های فضا کار) این است که بتوانند سطح را پوشش دهند. (چه سطح افقی ⟵ سقف و چه به صورت عمودی ⟵ دیوار در واقع Space Frame ها یک ساختار فضایی مدولار برای تولید سقف و دیوار هستند.

مزیت های Space Frame ها یا سازه های فضا کار:

۱- ساختار مدولار (تکرار شونده) دارند و بنابراین امکان تولید انبوه می دهند.

۲- چون سازه ها به صورت سه بعدی و فضایی در مقابل نیروها مقاومت می کنند اگر نیرویی زیاد تر شود یا عضوی مشکل پیدا کند بارش را باقی اعضا می کشند و کل سازه با شکست یک عضو نمی شکند، بار در تمام اعضا تقسیم می شود.

۳- سرعت نصب بسیار بالایی دارند.

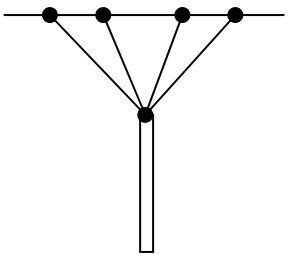
📖**نکته** : خرپاهای دو بعدی در سقف مثل تیر عمل می کنند یعنی انتقال بار مرحله به مرحله از تیرچه به تیر و ستون است ولی در **Space Frame** ها انتقال بار در یک مرحله است و تیر اصلی و فرعی و ... نداریم

📖**نکته** : بر طبق نکته بالا نتیجه می گیریم که هر گاه تیر فرعی و عضو فرعی داشتیم حتی اگر خرپا در ۲ لایه هم بود باز خرپای ۲ بعدی حساب می شود.

📖**نکته** : ارتفاع حدودی خرپاهای ۲ بعدی $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{15}$ دهانهٔ خرپا است و در مورد **Space Frame** ها حدود ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ طول دهانه است.

📖**نکته** : **Space Frame** ها برای مکان های داری یک سقف (یک طبقه) یا برای سقف طبقه آخر کاربرد دارند، یعنی روی آن نمی شود چیزی را جدا کرد.* نکته : ستون همیشه زیر گره است و در وسط عضو ولی گاهی به دلایل معماری می خواهیم ستون را کمی بگذاریم که با ستون درختی امکان پذیر است.

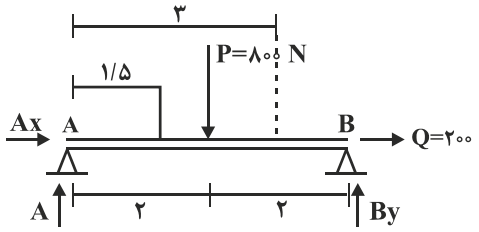
این نوع ستون در سازه های فضا کار یا Space Frame ها هم در جهت کاهش تنش در اعضای نزدیک ستون ها استفاده می شود.



فصل چهارم

تیرها

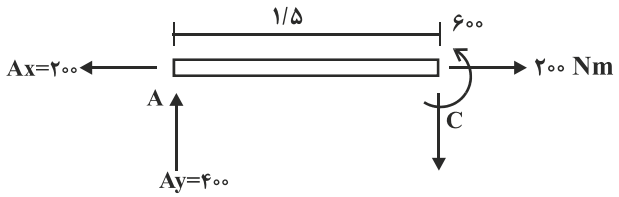
تیرها معمولاً عضوهای بلند، مستقیم و منشوری‌اند که برای نگهداری بارهای وارد بر نقاط مختلف در طول عضو طراحی می‌شوند.



$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x + 200 = 0 \rightarrow A_x = -200N$$

$$\sum M_A = 0 \rightarrow 800 \times 2 + B_y \times 4 = 0 \rightarrow B_y = 400N$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow A_y - 800 + 400 = 0 \rightarrow A_y = 400N$$



$$\sum F_x = 0 \rightarrow N = 200N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_y - 800 - V = 0 \rightarrow V = -400N$$

$$\sum F_y = 0$$

