

بسمه تعالی

درس مکانیزم و اجزا  
دانشگاه فنی و حرفه ای  
مرکز آموزش عالی فنی انقلاب اسلامی

مدرس: محمد رضا قاسمی بوسجین

منابع درس:

طراحی اجزای ماشین - نویسندگان: اسپاتز، شاپ، هورن برگر مترجم: هدایت موتابی  
طراحی اجزا - نویسنده: شیگلی مترجم: بیژن دیبایی نیا  
طراحی مکانیزم ها - نویسندگان: اردمن، سندور مترجم: عباس راستگو

# جدول زمان بندی و نمره

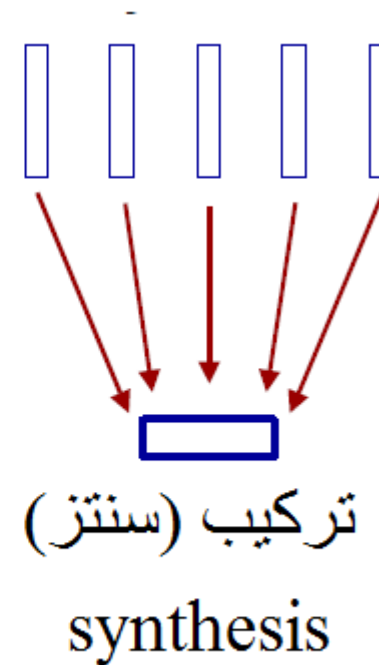
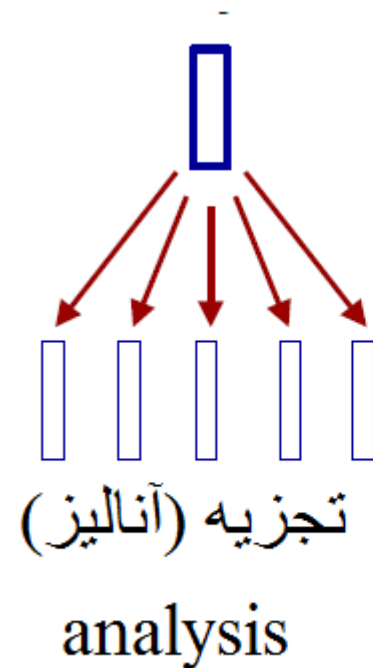
مبحث	تعداد جلسات تدریس
اهرم بندی، اتصالات و درجات آزادی	۶ جلسه
بادامک	۲ جلسه
چرخنده ها و سیستم های دوار	۲ جلسه
یاتاقان ها	۱ جلسه
کلاچ و ترمز	۱ جلسه
فنر و کوپلینگ	۱ جلسه
پیچ و مهره	۱ جلسه
جوشکاری	۱ جلسه

مورد	سقف تقریبی نمره
امتحان پایانی	حدود ۱۴ نمره
حضور و فعالیت کلاسی	حدود ۲ نمره
حل تمرین و پروژه	حدود ۴ نمره

## آنالیز و سنتز در سیستم

رویکرد اول تجزیه و تحلیل است. واژه ی آنالیز به معنای شکستن است. همان طور که از معنای واژه مشخص است در این نوع رویکرد برای حل یک مسئله یا بررسی یک سیستم هر کدام از اجزا به صورت جدا گانه ارزیابی و تحلیل می شوند.

رویکرد دوم ترکیب یا سنتز می باشد. واژه ی سنتز به معنی کنار هم قرار دادن است. در این رویکرد برای بررسی یک سیستم، رابطه ی بین اجزا و چگونگی ارتباط و تعامل آن ها با یکدیگر در نظر گرفته می شود.





## اهرم بندی

مکانیزم مجموعه ای از میله ها و مفصل هاست که این ترکیب در مشخصه های سینماتیکی (مانند جهت و سرعت و شتاب) تغییر ایجاد می کند.

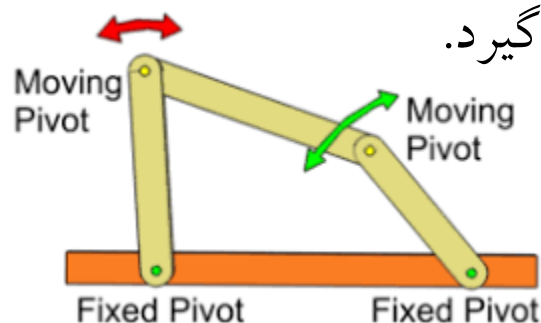
مکانیزم صفحه ای :

-انتها باز

-انتها بسته

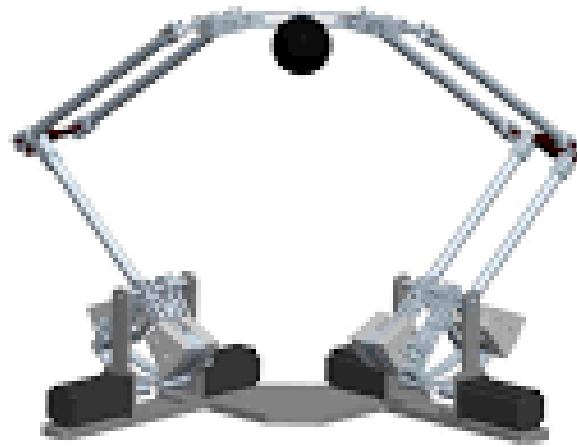


مکانیزم اگر با کنترل حرکات مختلفی را انجام دهد می تواند تبدیل به رباتیک شود.  
اهرم بندی ها نوع ساده تری از مکانیزم ها هستند که فقط اهرم و مفصل را در بر می گیرد.

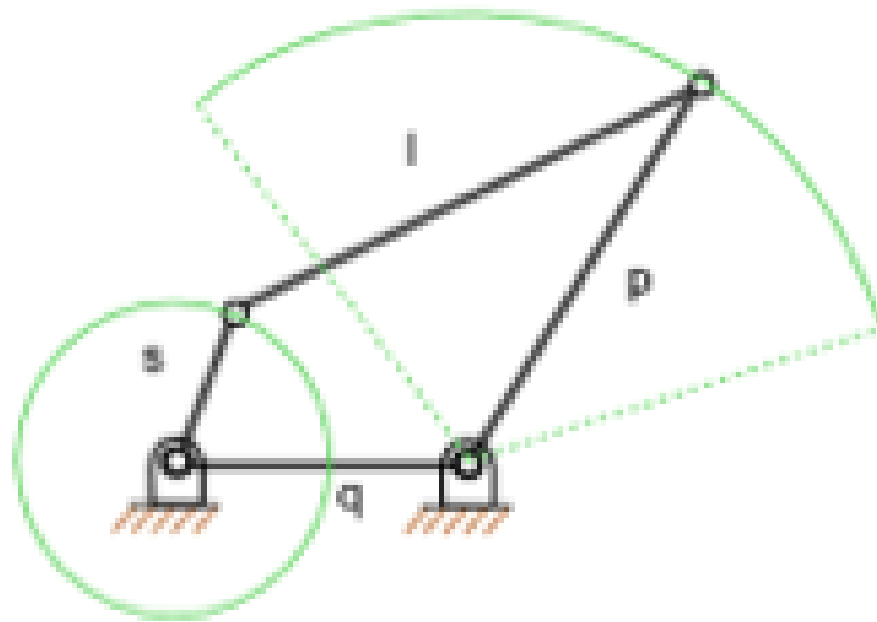


نمونه ای از اهرم بندی انتها بسته

---



اهرم بندی های معروف: اهرم بندی های ۴ میله ای



Crank-rocker

لنگ: Crank  
آونگ: Rocker

## درجه آزادی

درجات آزادی: تعداد حرکت های ورودی مستقل مورد نیاز برای تعیین موقعیت تمام میله های اهرم بندی نسبت به زمین

معادله گرویدر

$$f = 3(n-1) - 2 \dot{J}_1 - \dot{J}_2$$

تعداد درجات آزادی مکانیزم (صفحه ای)

تعداد اتصالات ۱ درجه آزادی

تعداد اتصالات ۲ درجه آزادی

$n$  = تعداد میله ها (با لحاظ زمین بعنوان یک عضو ثابت)



نمونه ای از درجات آزادی ربات در فضای سه بعدی



فعالیت:

---

یک مکانیزم را معرفی کرده و درجات آزادی آنرا تعیین نمایید.

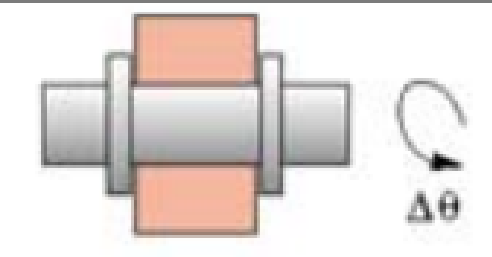
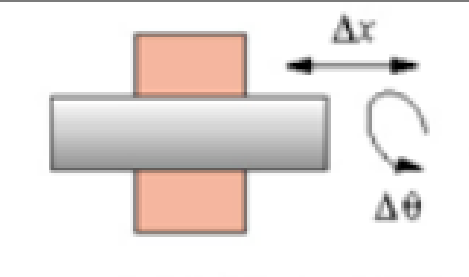
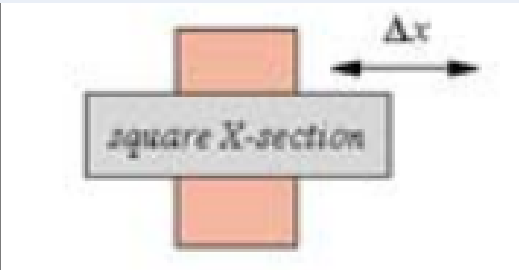
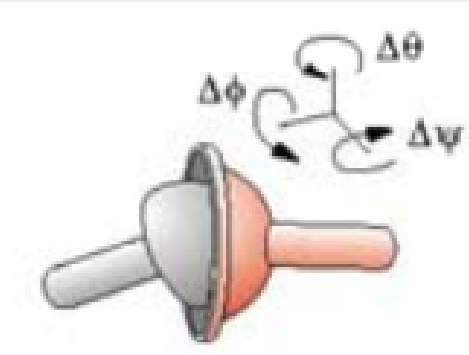
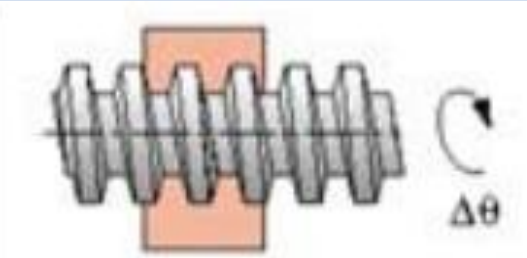
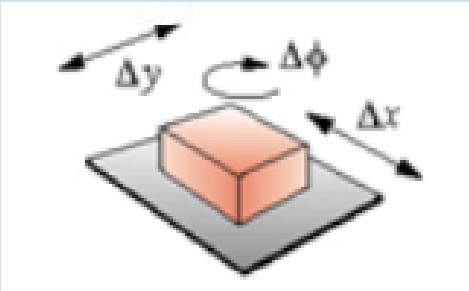
نکته: مباحث مطرح شده در این کلاس در محدوده مکانیزم ها و قیود صفحه ای خواهند بود که در حالت نرمال می توانند تا سه درجه آزادی داشته باشند.

شامل :

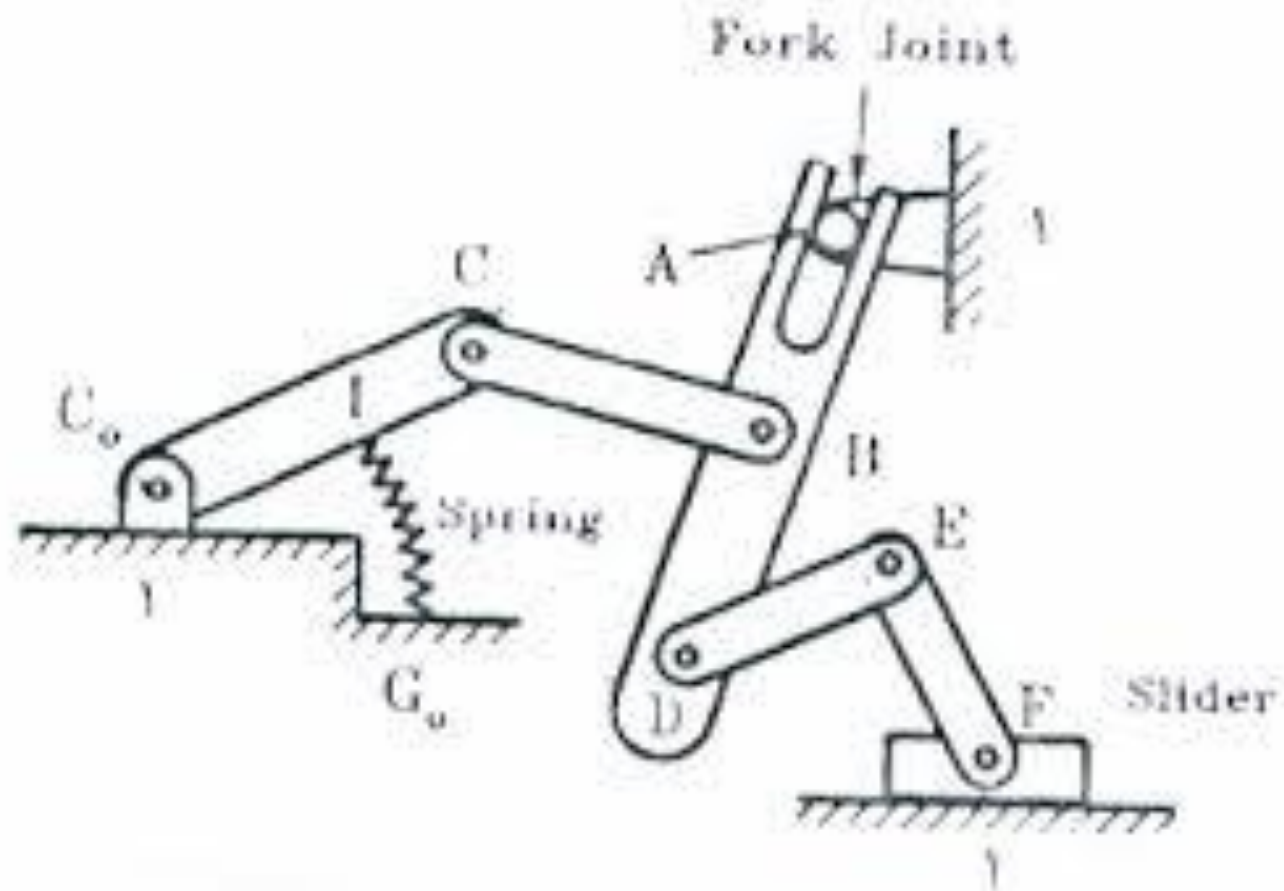
دو حرکت در راستای محورهای اصلی  $X$  و  $Y$

و یک دوران حول محور عمود بر صفحه

تعدادی از انواع اتصالات با ذکر درجات آزادی در صفحه بعد قابل مشاهده است.

نوع اتصال	درجه آزادی	نوع اتصال	درجه آزادی
	1		2
	1		3
	1		3

تعداد درجات آزادی اهرم بندی زیر را محاسبه نمایید.



حل مثال ۱:

---

در اینجا، هفت عضو وجود دارد

شامل: ۵ میله اهرمی

۱ لغزنده

۱ عضو ثابت (زمین)

بنابراین طبق معادله گروبلر:

$$n=7$$

همچنین هفت اتصال مرتبه پایین (۱ درجه آزادی) وجود دارد

شامل: ۶ پین با نام های

C<sub>0</sub>, C, B, D, E, F

۱ لغزنده در نقطه

F

یک اتصال مرتبه بالای غلتشی-لغزشی (۲ درجه آزادی) در نقطه

A

همچنین یک اتصال سه درجه آزادی فکری وجود دارد که تاثیری در حل ندارد (چون ضریب آن در معادله گروبلر صفر است).

بنابراین مطابق معادله خواهیم داشت:

$$f = 3 * (7 - 1) - 2 * 7 - 1 * (1) = +3$$

$$f = 3(n-1) - 2j_1 - j_2$$

تعداد درجات آزادی مکانیزم (صفحه ای)

تعداد اتصالات ۱ درجه آزادی

تعداد اتصالات ۲ درجه آزادی

بنابراین کل این مکانیزم ۳ درجه آزادی دارد و با مشخص شدن سه پارامتر مستقل می توان موقعیت قسمت های مختلف این مکانیزم را مشخص کرد.

نکته ۱: اهرم بندی هایی وجود دارند که درجات آزادی محاسبه شده آنان صفر می باشد که این نمایانگر سازه است. یعنی دیگر یک مکانیزم قابل حرکت نداریم و یک سازه استاتیکی داریم.

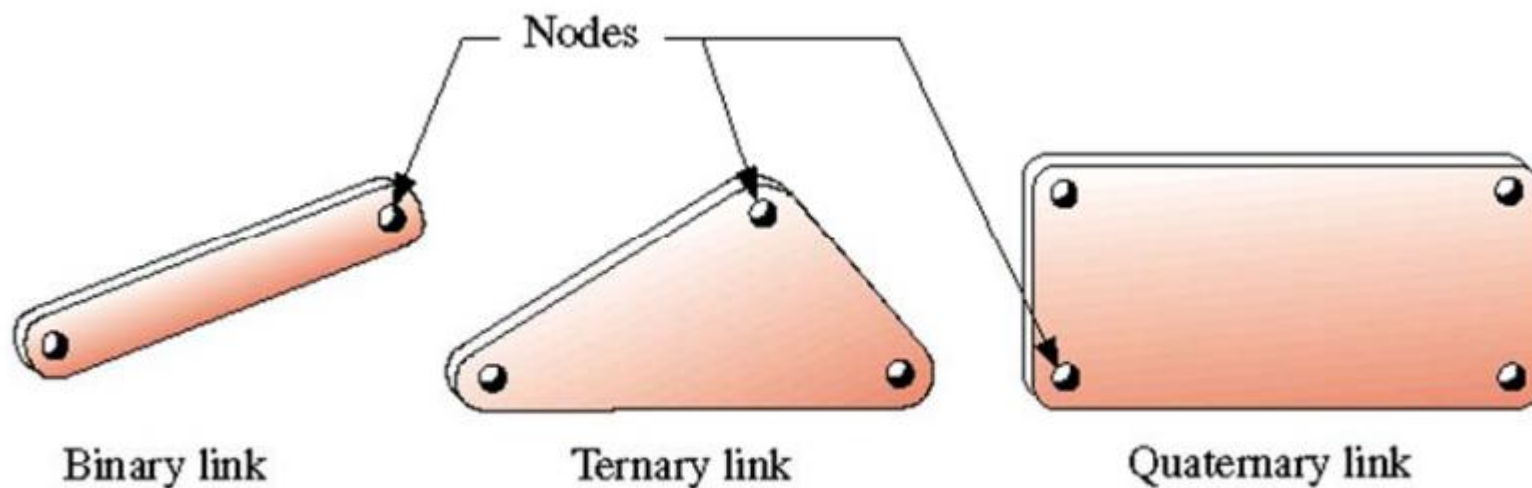
نکته ۲: همچنین اهرم بندی هایی وجود دارد که درجات آزادی به دست آمده برای آنان عدد منفی است که نمایانگر سازه نامعین است. یعنی قید یا قیود اضافی وجود دارد که با حذف آنها اهرم بندی تبدیل به سازه معین می شود.

نکته ۳: سازه های اشاره شده در نکات بالا هرگز قادر به حرکت بخاطر تناسب خاصی که بین اضلاعشان وجود دارد نیستند. (مانند اسکلت فلزی های به کار رفته در ساختمان ها)

– مکانیزمهای متداول شامل اهرم بندیها، بادامکها، چرخدنده ها، تسمه و زنجیرها می باشند.

– Linkage از بازوها (links) و اتصالات (joints) تشکیل شده است.

– بازو link جسم صلبی است که حداقل دارای دو گره node باشد.





اتصال joint امکان حرکت بین دو بازو را فراهم می کند.

اتصال که جفت سینماتیکی نیز نامیده می شود، به صورت های مختلفی طبقه بندی می شود:

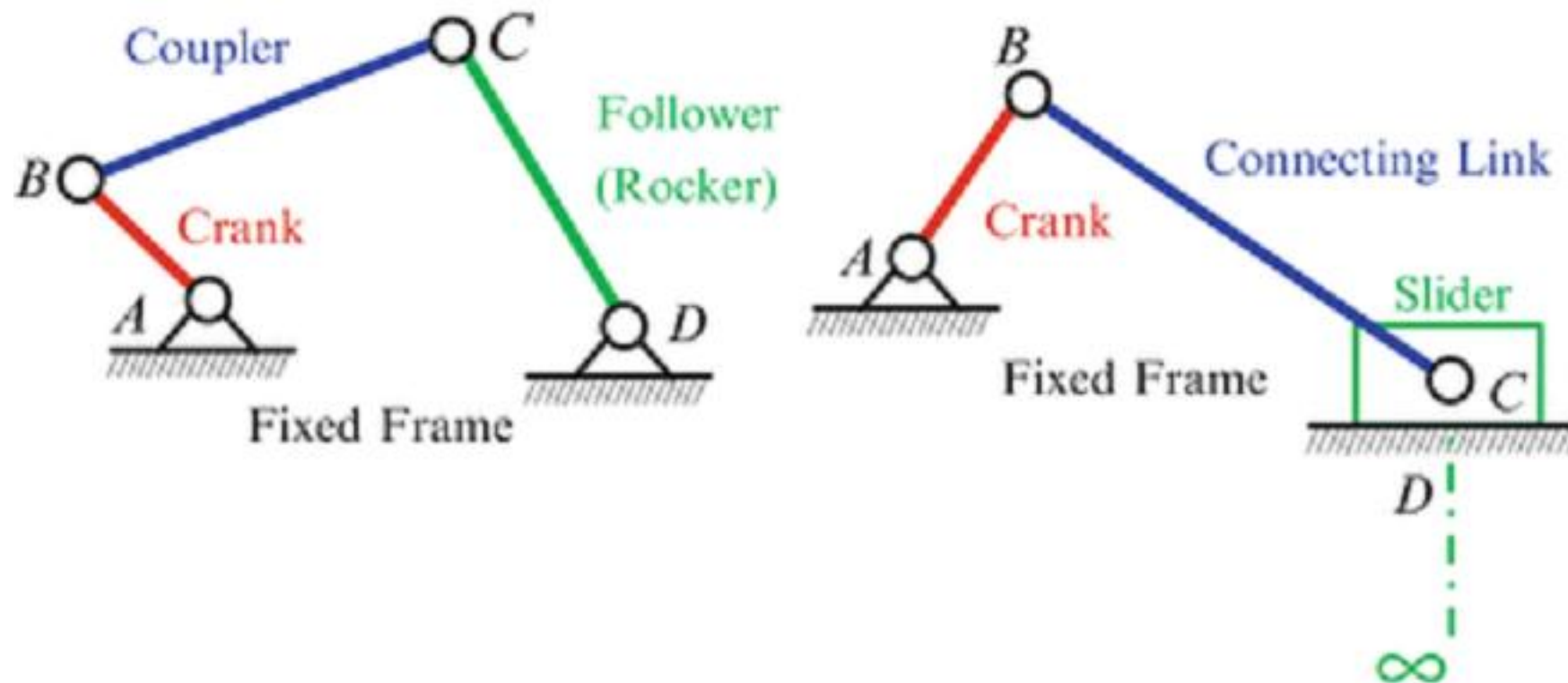
- نوع تماس بین اجزاء: نقطه ای، خطی، یا سطحی
- تعداد درجات آزادی امکان پذیر در اتصال
- تعداد بازوهای متصل شده که مرتبه اتصال نیز نامیده می شود.
- نوع محصور بودن: قید نیرویی یا قید شکلی

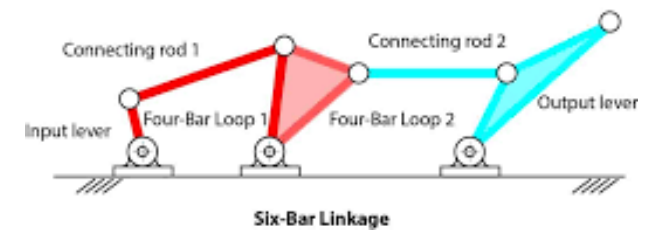
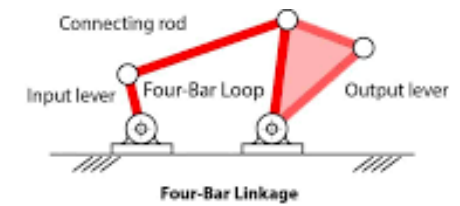
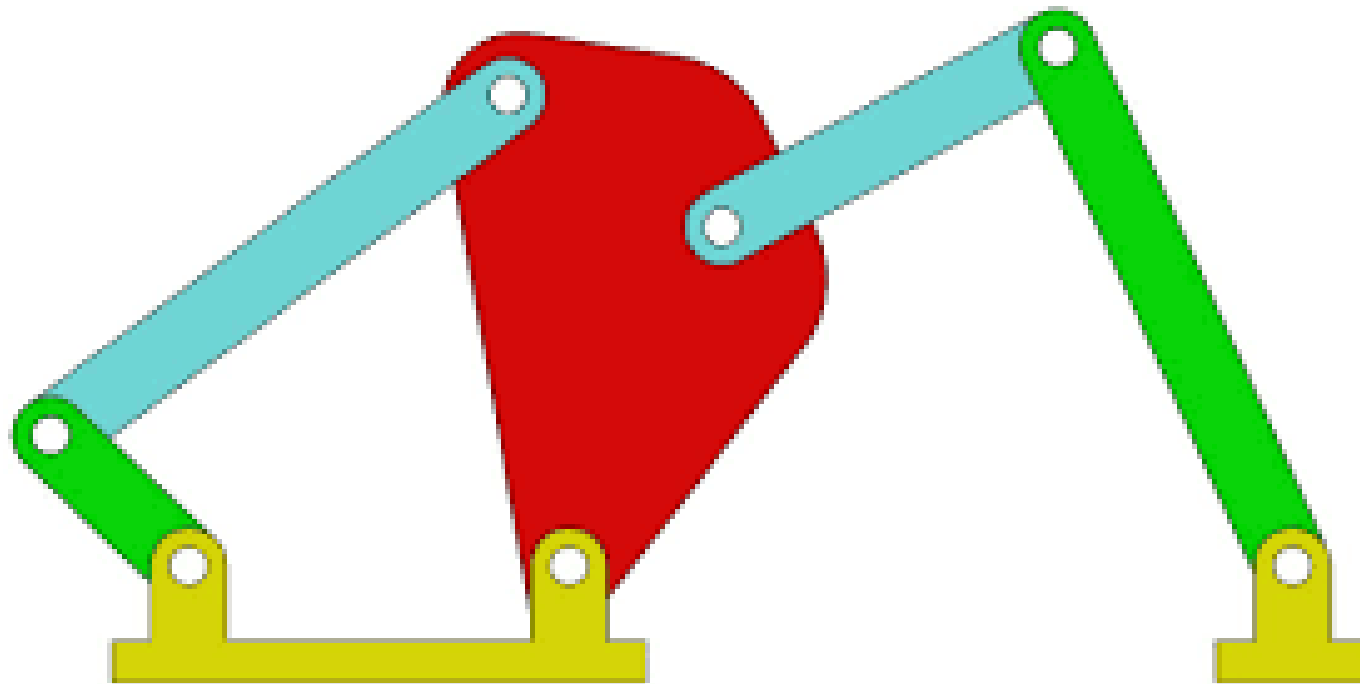
Lower pair: تماس در کل یک سطح

Higher pair : تماس در روی یک نقطه یا در امتداد یک خط

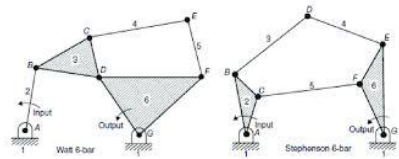
## نامگذاری اهرم ها در اهرم بندی چهارمیله ای و لنگ و لغزنده

Crank : بازوئی که دوران کامل دارد و به زمین پین شده است. (لنگ)  
Coupler : بازوئی که حرکت توام خطی-دورانی دارد و به زمین پین نشده است.  
Ground : زمین و هر بازوئی که نسب به قاب اصلی ثابت شده باشد.  
Rocker : بازویی که دوران نوسانی دارد. (آونگ)





# اهرم بندی های شش میله ای معروف



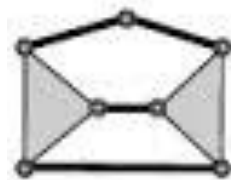
Watt Chain



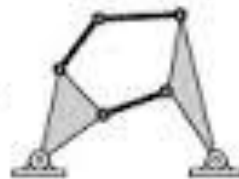
Watt I



Watt II



Stephenson Chain



Stephenson I



Stephenson II



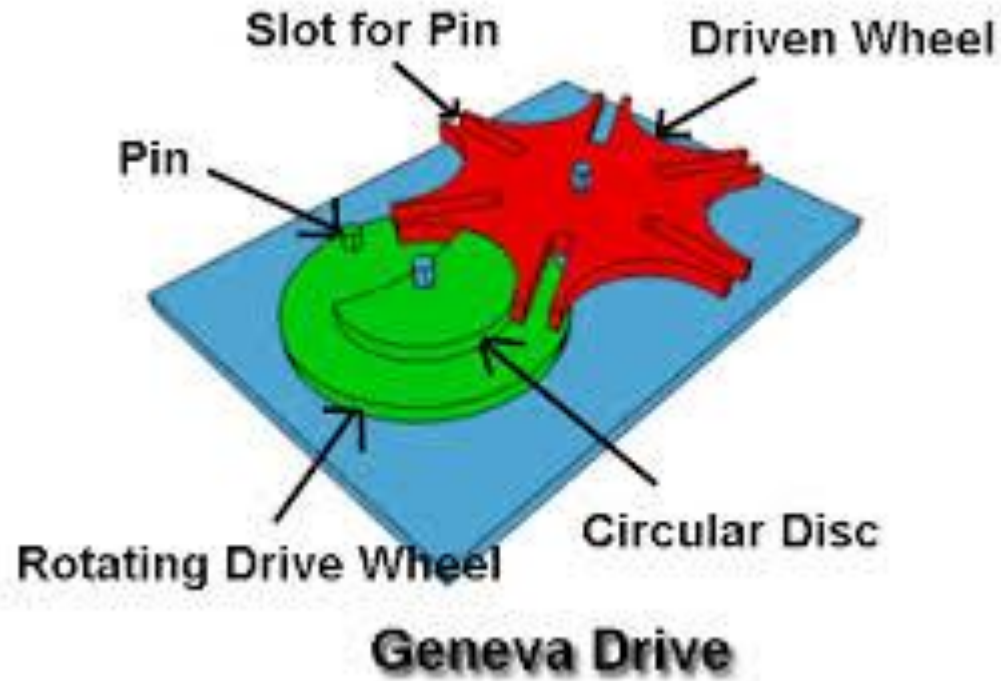
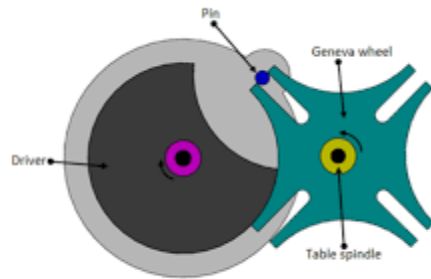
Stephenson III

## چند نوع از انواع مکانیزم ها

### Geneva Mechanism (مکانیزم چرخ جنوا)

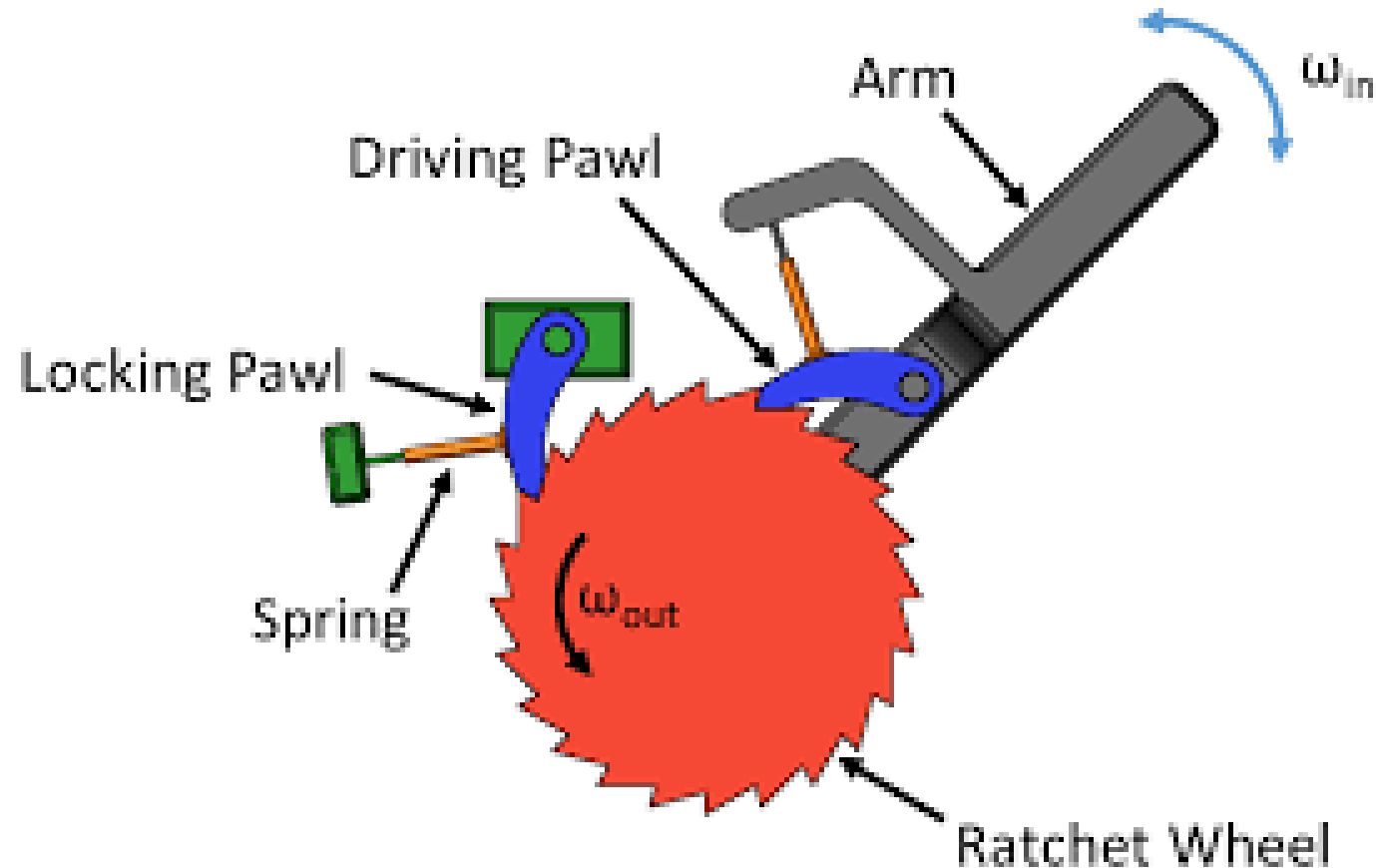
در این مکانیزم، ورودی معمولاً توسط یک موتور با سرعت دورانی ثابت تامین می شود.

Geneva mechanism



# Ratchet and Pawl

پین شده است و حرکت نوسانی می تواند داشته باشد. Ratchet Wheel حول مرکز Arm  
Ratchet Wheel در جهت خلاف عقربه های ساعت به حرکت در آمده و در جهت دیگر مکانیزم قفل است.



این مکانیزم در موارد ذیل استفاده می شود:

- آچار جفجه
- وینچ
- سنگ فرز

## سرعت و حرکت نسبی

همانطور که می دانیم، به سرعت یک متحرک نسبت به متحرک دیگر سرعت نسبی گفته می شود.

در حقیقت سرعت هر متحرک را نسبت به یک مرجع یا دستگاه می سنجیم.  
حال با توجه به این مرجع دو حالت رخ میدهد:

- ۱- اگر این مرجع ساکن باشد، به این سرعت، سرعت مطلق یا همان سرعت جسم گفته می شود.
- ۲- اگر این مرجع متحرک باشد، به این سرعت، سرعت نسبی گفته میشود.

کسی که داخل ماشین متحرک قرار دارد سرعت اجسام دیگر را نسبت به خودش می سنجد که متحرک است یعنی سرعتی که بدست می آورد سرعت نسبی است.

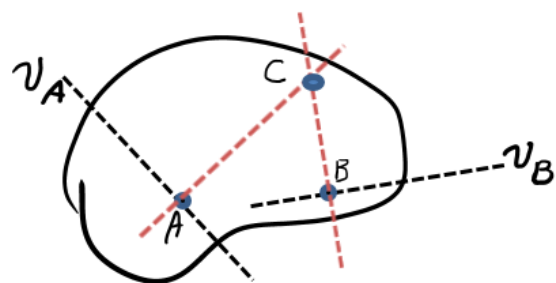
### مفهوم حرکت نسبی:

وقتی زوایای موقعیت کلیه بردارهای متعلق به اهرم ها از محورهای مختصات مرجع ثابت اندازه گیری می شود، زوایا مطلق هستند.  
اگر محورهای مختصات مرجع ثابت نباشد موقعیت ها نسبی است.

نکته: اختلاف حرکت بین نقاط مختلف یک اهرم و حرکت نسبی بین اهرم های مختلف در حل مسایل تغییر مکان و سرعت مهم است.

## مرکز آنی دوران

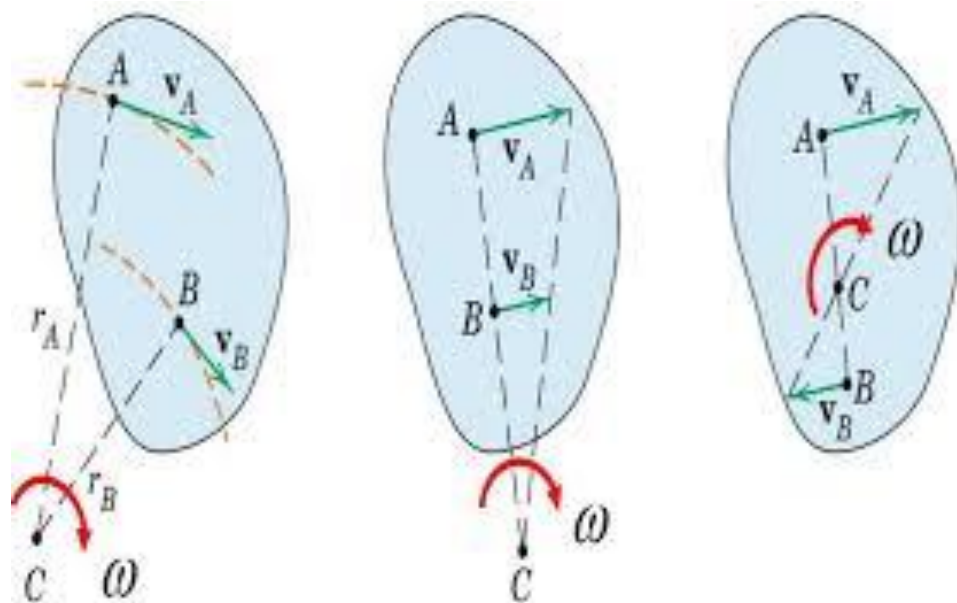
**مرکز آنی دوران:** نقطه ای است روی جسم یا گسترش یافته آن که سرعت مطلقش صفر است.



نکته ۱: اگر امتداد سرعت دو نقطه از یک اهرم مشخص باشد می توان مرکز آنی دوران را پیدا کرد.  
از هر نقطه به امتداد سرعت همان نقطه عمود می کنیم محل برخورد این دو خط، مرکز آنی دوران جسم است.

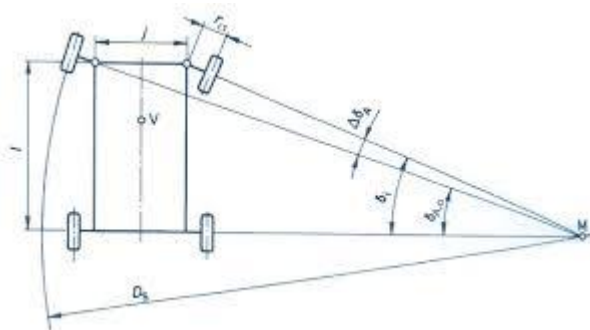
نکته ۲: اگر مرکز آنی دوران یک اهرم،  $C$ ، مشخص باشد و سرعت یک نقطه مانند  $A$  از آن هم معلوم باشد، سرعت زاویه ای و سرعت هر نقطه دیگر از آن اهرم را می توان یافت.

سرعت هر نقطه روی اهرم عمود است بر پاره خطی که از آن نقطه و مرکز آنی می گذرد و اندازه سرعت برابر است با اندازه آن پاره خط در سرعت زاویه ای اهرم و جهت آن از روی جهت سرعت زاویه ای بدست می آید.





## مرکز آنی سرعت - در اهرم بندی



مرکز لحظه ای یا مرکز آنی، نقطه ای است که در آن هیچ سرعت نسبی بین دو اهرم ( در اهرم بندی) در آن لحظه وجود ندارد.

مرکز آنی سرعت، نقطه ای است مشترک بین دو اهرم که سرعت مطلق آن روی دو اهرم برابر باشد به عبارت دیگر نقطه ای است مشترک بین دو اهرم که در آن نقطه دو اهرم هیچ سرعت نسبی نسبت به یکدیگر نداشته باشند.

این نقطه متعلق به دو جسم است و نقطه ای است که در آن لحظه یک جسم نسبت به دیگری حول آن نقطه دوران می کند. (لولای لحظه ای بین دو جسم).

هر دو عضو فقط یک مرکز آنی سرعت دارند. و بنابراین یک مکانیزم  $n$  عضوی دارای مراکز آنی به تعداد زیر است:

$$N = \frac{1}{2} * n (n-1)$$

---

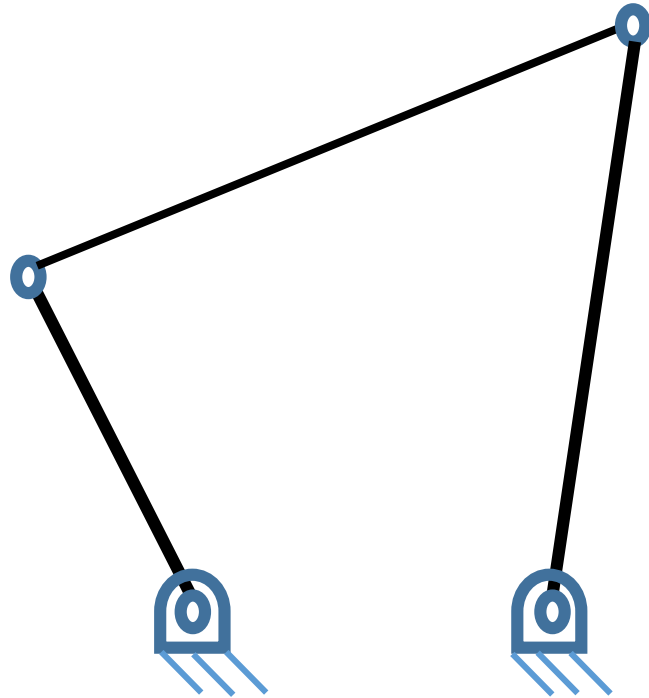
قضیه کندی (پیدا کردن مراکز آنی سرعت):  
برای سه جسم مستقل در حرکت صفحه ای، سه مرکز آنی سرعت وجود دارد و این سه مرکز آنی سرعت روی یک خط راست هستند.

چند نکته در مورد مراکز آنی سرعت (پیدا کردن مراکز آنی سرعت):

مراکز آنی سرعتی که به وضوح تعیین می شوند.

- اجسامی که در تماس غلتشی هستند نقطه تماس، مرکز آنی سرعتشان است.
- اجسامی که به هم لولا شده اند، لولایشان مرکز آنی سرعت است.
- مرکز آنی سرعت لغزنده ای و اهرمی که لغزنده روی آن می لغزد در مرکز انحنا اهرم قرار دارد.
- مرکز آنی سرعت اجسامی که با هم تماس لغزشی دارند در راستای خط عمود بر دو منحنی در نقطه تماس قرار دارد.

مراکز آنی سرعت اهرم بندی مقابل را به روش ترسیمی پیدا کنید. (مفصل ها و اهرم ها را نامگذاری کرده و سپس مراکز آنی را تعیین کنید.)



## شماتیک روش ترسیمی به دست آوردن مراکز آنی در اهرم بندی ۴ میله ای

با استفاده از روش ترسیمی، مرکز آنی برای مکانیزم چهار میله ای طی مراحل زیر به دست می آید.

الف) طبق فرمول تعداد مراکز آنی عبارت است از:

$$N = 4*(4-1) / 2 = 6$$

ب) مراکز آنی عبارتند از :

مرکز آنی بین عضو ۱ و ۲

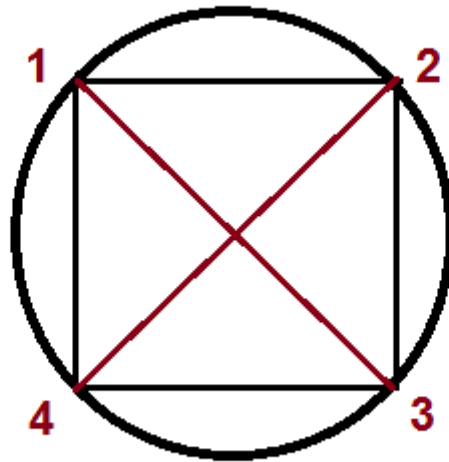
مرکز آنی بین عضو ۱ و ۳

مرکز آنی بین عضو ۱ و ۴

مرکز آنی بین عضو ۲ و ۳

مرکز آنی بین عضو ۲ و ۴

مرکز آنی بین عضو ۳ و ۴



ج) چهار مورد زیر که مربوط به اعضای مجاور هم می باشد به وضوح از تصاویر مشخص است:

مرکز آنی بین عضو ۱ و ۲

مرکز آنی بین عضو ۱ و ۴

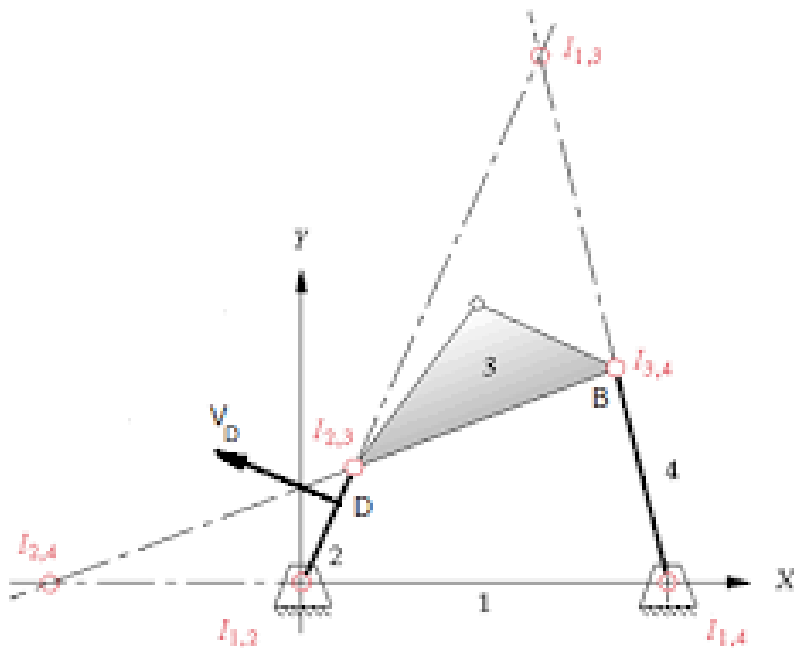
مرکز آنی بین عضو ۲ و ۳

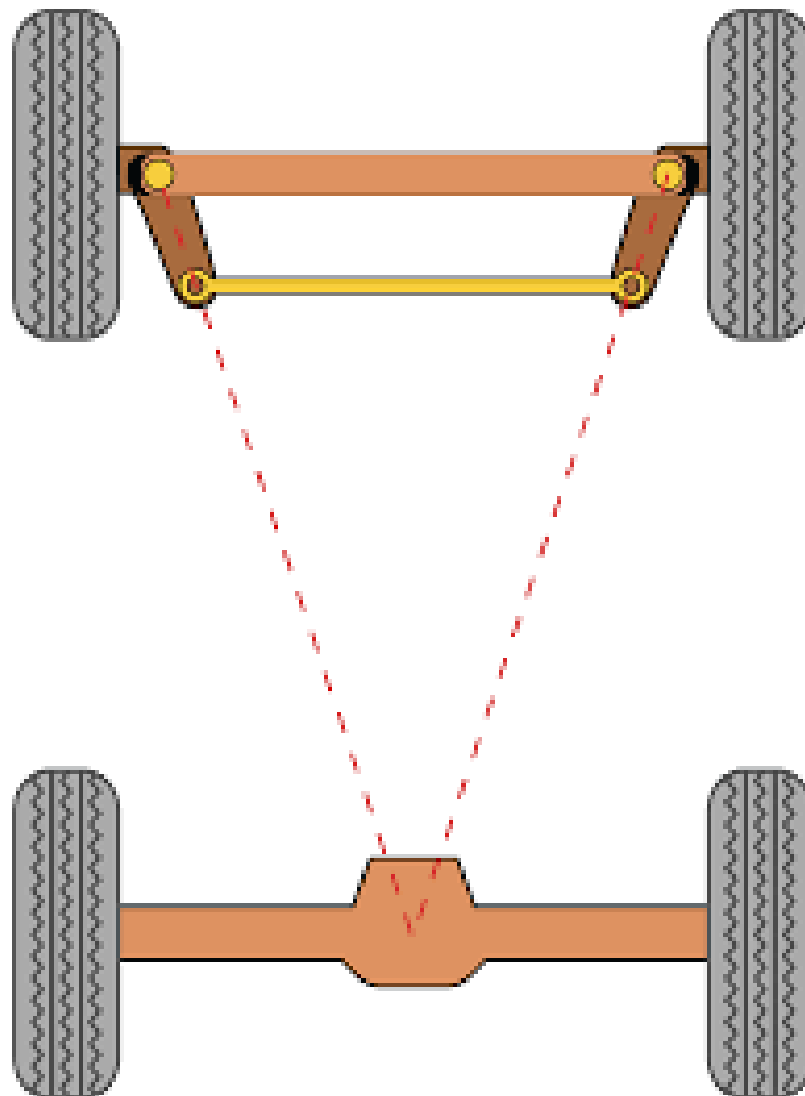
مرکز آنی بین عضو ۳ و ۴

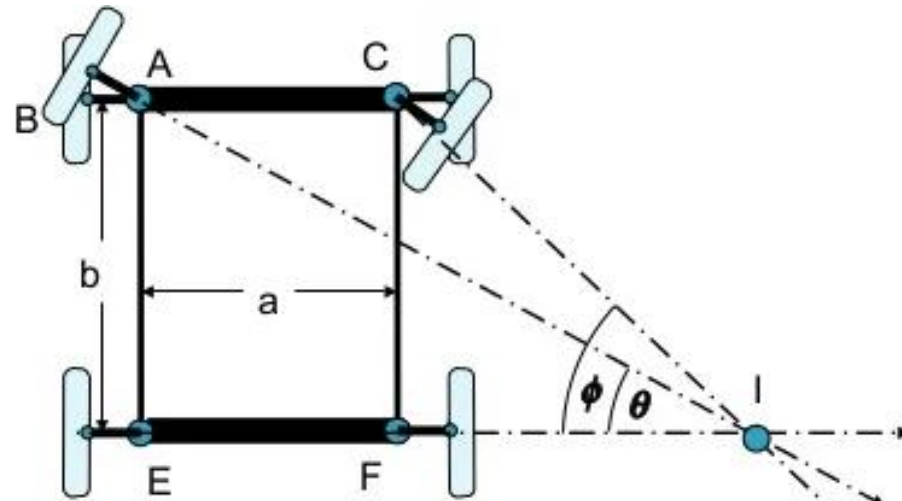
د) دو مورد زیر با روش ترسیمی مطابق شکل مقابل (منطبق با قضیه کندی) به دست می آید.

مرکز آنی بین عضو ۱ و ۳

مرکز آنی بین عضو ۲ و ۴







$$\cot \theta = \frac{EI}{AE} = \frac{EF + FI}{AE} = \frac{a + FI}{b}$$

$$\cot \phi = \frac{FI}{CF} = \frac{FI}{b}$$

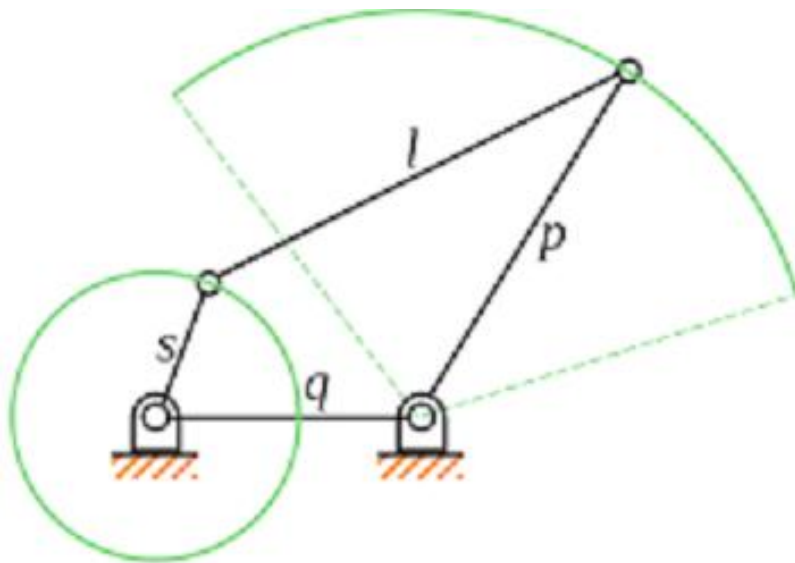
$$\therefore \cot \theta - \cot \phi = \frac{a + FI}{b} - \frac{FI}{b} = \frac{a}{b}$$

خودرویی را انتخاب کرده و با در نظر گرفتن فواصل واقعی بین چرخ های آن، و با فرض استفاده از هندسه آکرمن در سیستم فرمان آن، محاسبه کنید که اگر چرخ نزدیک به میدان این خودرو با زاویه ۴۵ درجه در حال فرمان گیری باشد، چرخ دور از میدان در آن لحظه چه زاویه فرمان گیری را داراست.



### قانون گراشف (Grashof)

مجموع کوتاهترین و بلندترین اهرم یک اهرم بندی چهارمیله ای صفحه ای، نمی تواند بزرگتر از مجموع دو اهرم دیگر باشد اگر قرار است چرخش نسبی پیوسته بین دو اهرم وجود داشته باشد.



$S$  = طول کوتاهترین بازو

$L$  = طول بلندترین بازو

$Q$  و  $P$  = طول بازوی های دیگر

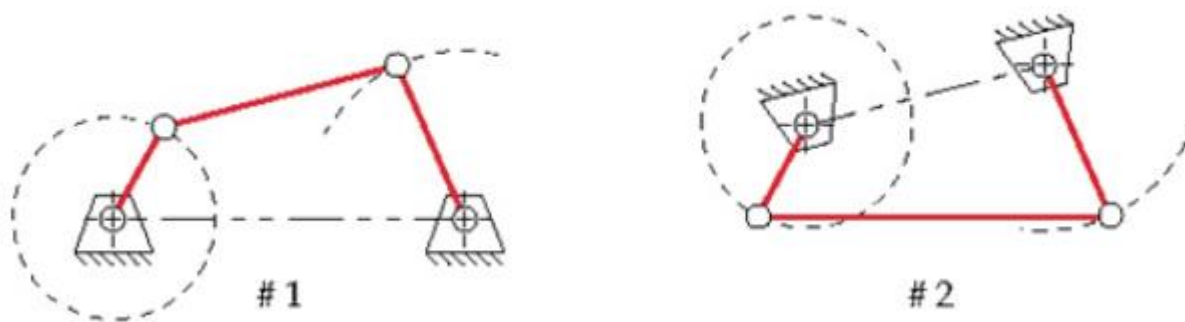
گراشف رابطه ساده ای است که رفتار دورانی مکانیزم چهار میله ای را پیش بینی می کند.

اگر  
$$S+L \leq P+Q$$

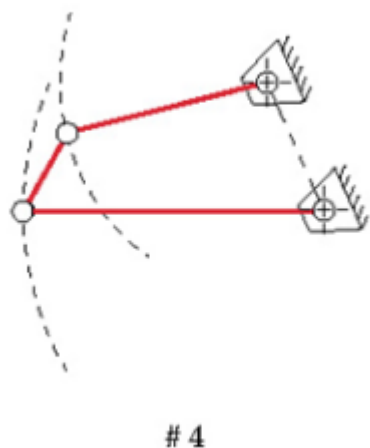
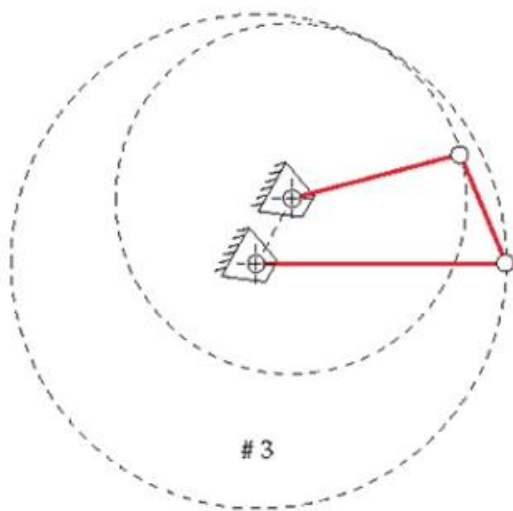
مکانیزم گراشف نامیده شده و حداقل یک بازو دوران کامل نسبت به زمین دارد.

حالت نامساوی گراشف سه مدل دارد:

الف) بازوی ثابت (زمین) مجاور کوتاهترین بازوست، در این حالت کوتاهترین بازو دوران کامل داشته (لنگ) و بازوی دیگر که به زمین پین شده نوسان دارد (آونگ).



ب) زمین کوتاهترین بازوست که در این صورت لنگ دوپل داریم و دو بازوی متصل به زمین دوران کامل دارند.



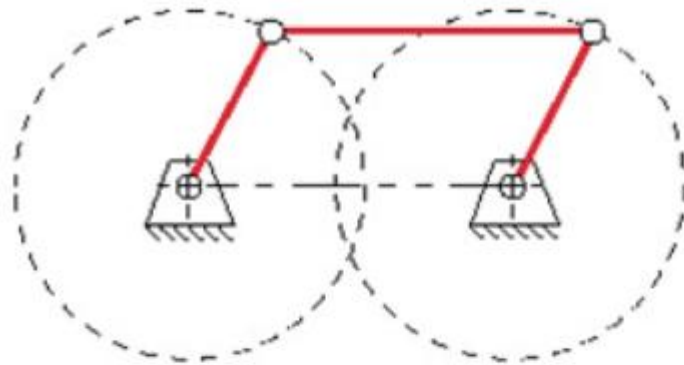
ج) اگر زمین در روبروی کوتاهترین بازو قرار گیرد، آونگ دوپل داریم. دو بازوی متصل به زمین حرکت آونگی داشته و فقط بازوی کوپلر (مقابل زمین) دوران کامل دارد (لنگ).

اگر در معادله گراشف حالت تساوی برقرار باشد:

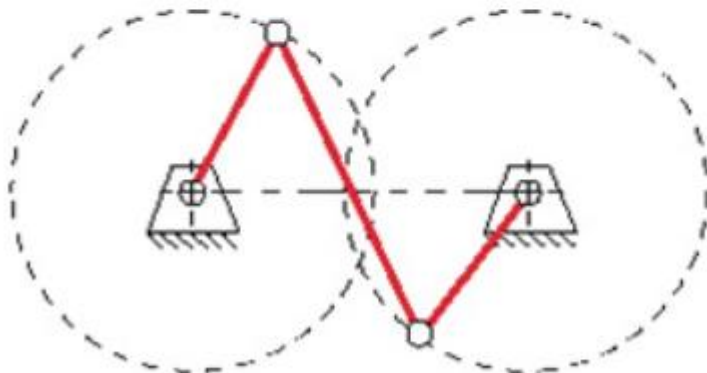
$$S+L = P+Q$$

مکانیزم دارای دو نقطه تبدیل در یک دوران می باشد وقتی که بازوها هم راست باشند.

در این نقطه رفتار خروجی غیر قابل پیش بینی است:



Parallelogram form

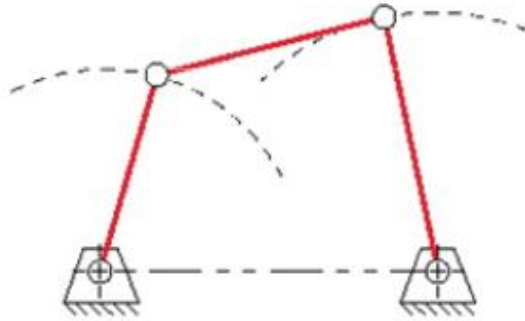


Antiparallelogram form

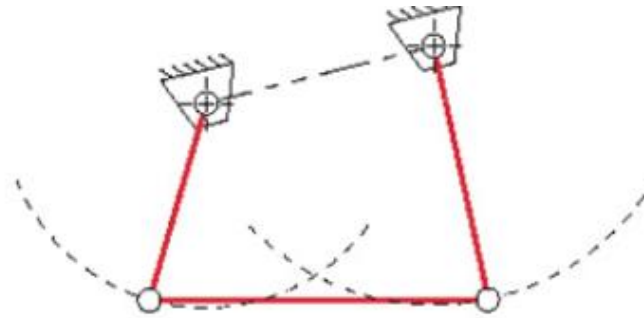
اگر

$$P+Q < S+L$$

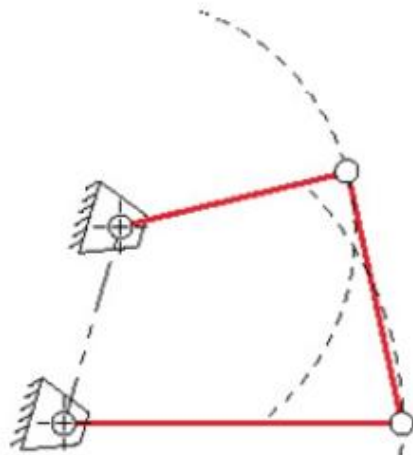
مکانیزم غیر گراشف نامیده شده و هیچ بازوئی دوران کامل نسبت به سایر بازوها (لنگ) ندارد.  
و همه بازوها حرکت نوسانی (سه حرکت آونگی) دارند.



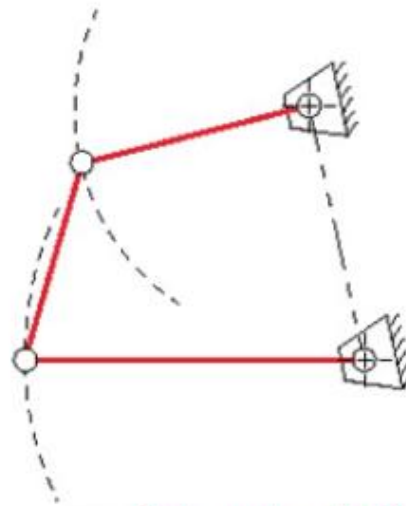
Triple-rocker #1 (RRR1)



Triple-rocker #2 (RRR2)



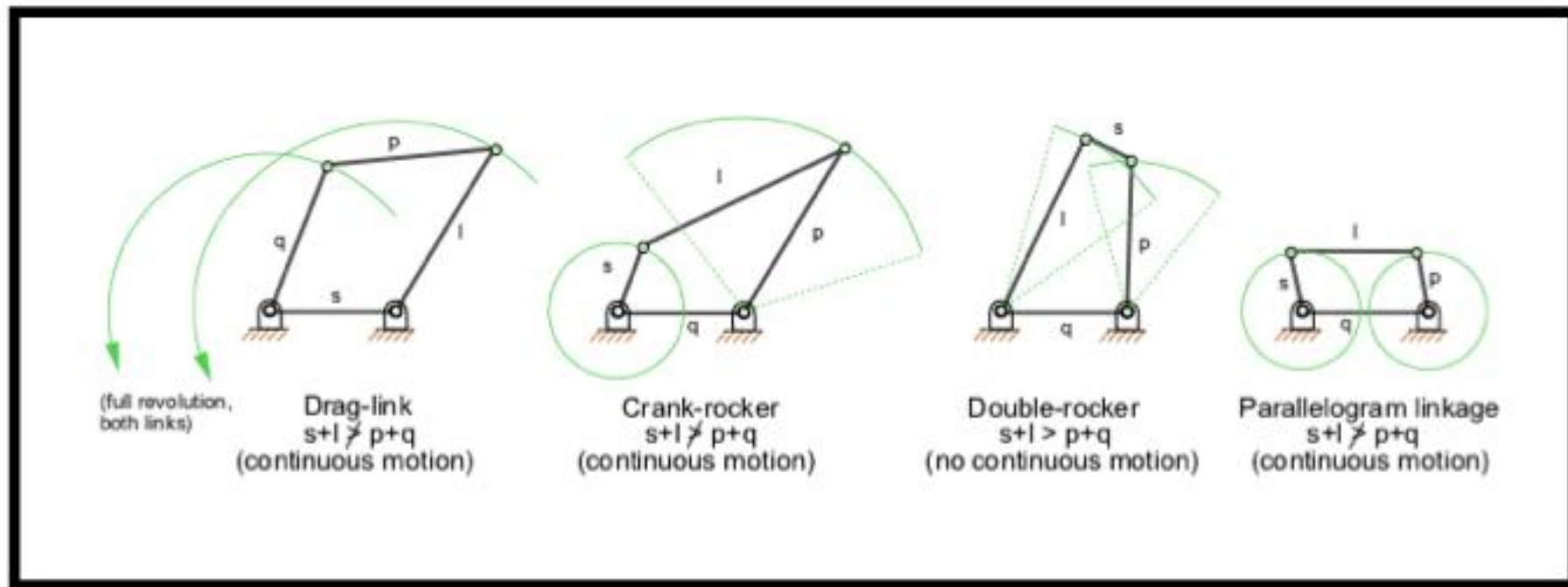
Triple-rocker #3 (RRR3)



Triple-rocker #4 (RRR4)

## تمرین و پروژه

چهار اهرم بندی در شکل زیر نشان داده شده اند.  
تعیین کنید کدامیک از قانون گراشف پیروی نمی کند.  
با چوب بستنی یکی از مکانیزم ها را ساخته و از عملکرد آن فیلم تهیه کنید و یا انیمیشن آنرا با نرم افزار بازسازی نمایید.



## اتصالات کامل در مکانیزم ها

در مکانیزم روبرو تمام اتصالات از نوع کامل می باشد.

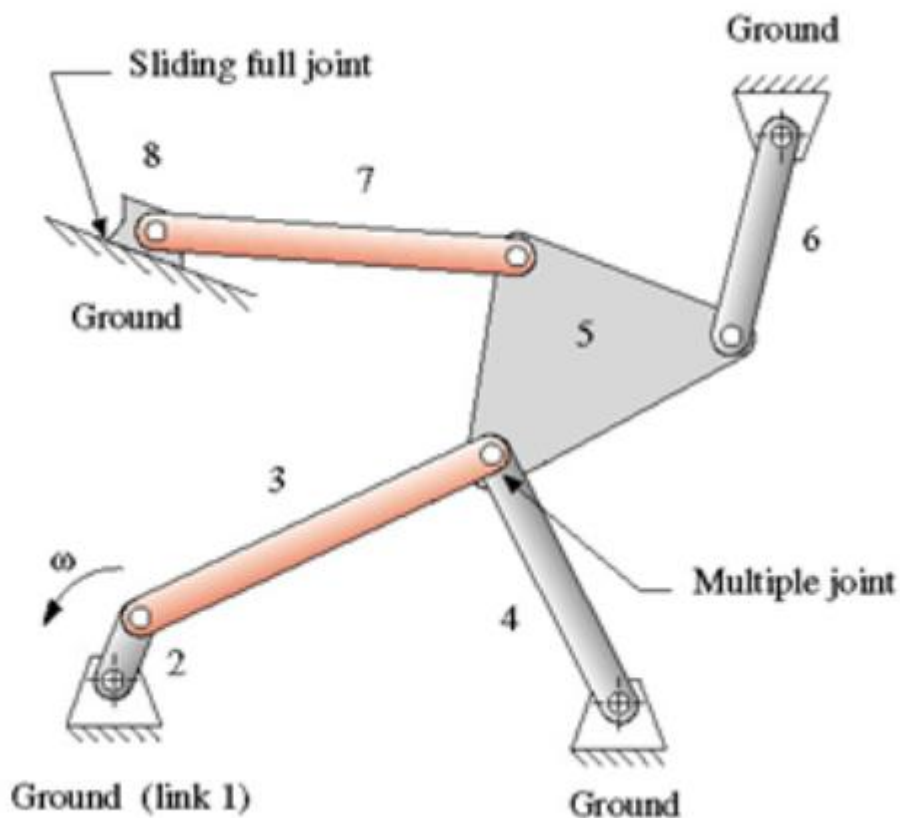
**Full joint**

بنابراین طبق رابطه درجه آزادی برابر است با:

$$DOF = 3(8-1) - 2(10) = 1$$

نکته: در محل تلاقی اعضای ۳، ۴ و ۵ در حقیقت یک اتصال کامل یک درجه آزادی بین ۳ و ۴ و یک اتصال بین اعضای ۴ و ۵ وجود دارد.

**Multiple joint**



$$L = 8, \quad J = 10$$

$$DOF = 1$$

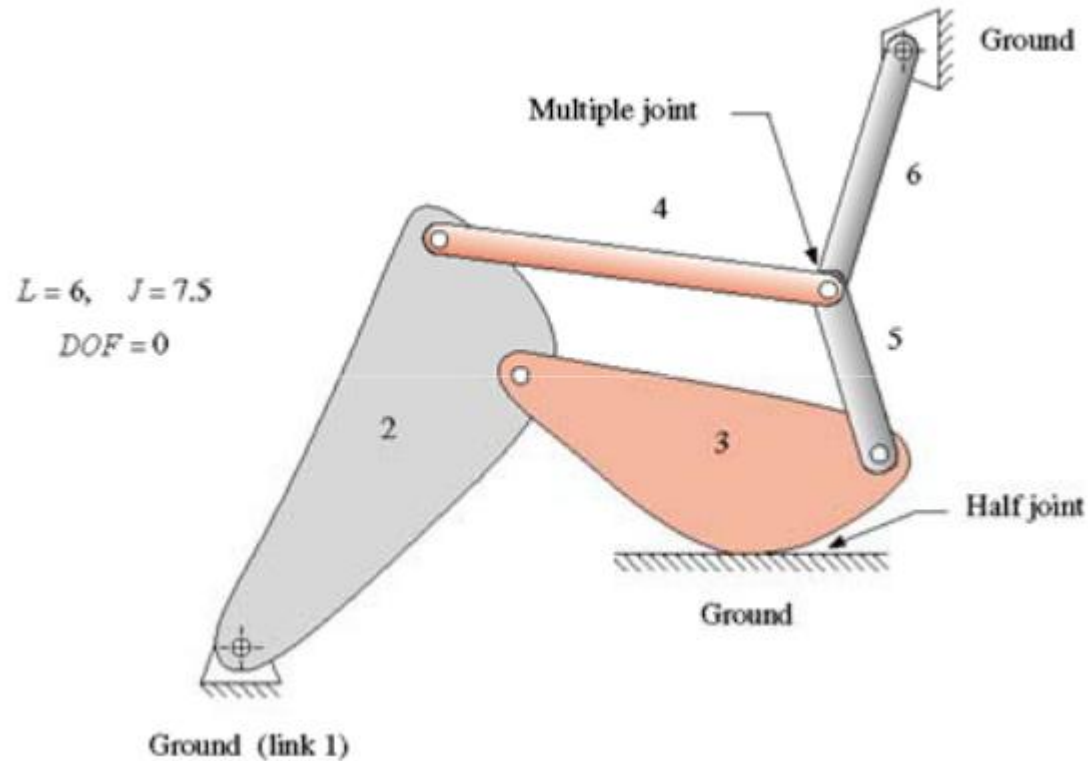
## اتصالات نیمه در مکانیزم ها

در مکانیزم روبرو یک اتصال لغزشی- غلتشی وجود دارد که نیمه اتصال است.

Half joint

بنابراین طبق رابطه خواهیم داشت:

$$DOF = 3(6-1) - 2(7.5) = 0$$





## پروژه: اهرم بند های شش میله ای

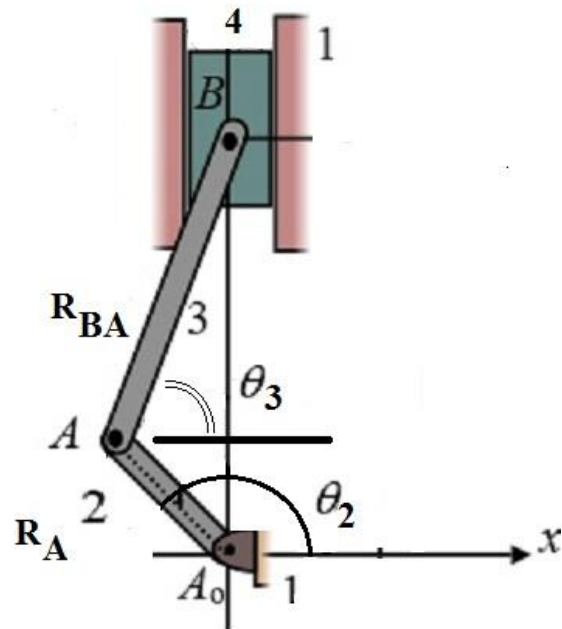
از اهرم بندی های معروف شش میله ای اهرم بندی وات و استیفن است. یک اهرم بندی شش میله ای که در مکانیزمی بکار رفته بیابید (ترجیحا با نمایش انیمیش) و تعداد درجات آزادی آنرا تحلیل نمایید.

## تحلیل سرعت اهرم بندی (به روش ترسیمی)

مثال: حرکت اهرم بندی لنگ- لغزنده مطابق شکل می باشد.  
اندازه ها مشخص است.

بازوی شماره ۲ با سرعت زاویه ای معلوم  $\omega_2$  در راستای پادساعتگرد دوران می کند.  
سرعت لغزنده شماره ۴ را به دست آورید.

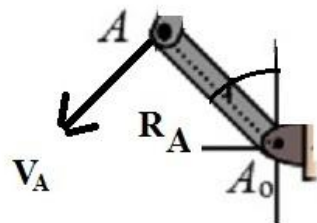
قرارداد: گردش در راستای پادساعتگرد مثبت لحاظ می شود.



سرعت مطلق نقطه  $A$  در اهرم شماره ۲ به دست می آید.

$$V_A = R_A * \omega_2$$

بردار سرعت مطلق در نقطه  $A$  عمود بر بازوی شماره ۲ می باشد.



سرعت مطلق نقطه  $A$  در اهرم شماره ۳ به دست می آید.

چون اتصال اهرم ۲ و ۳ در نقطه  $A$  یک لولا است. بنابراین

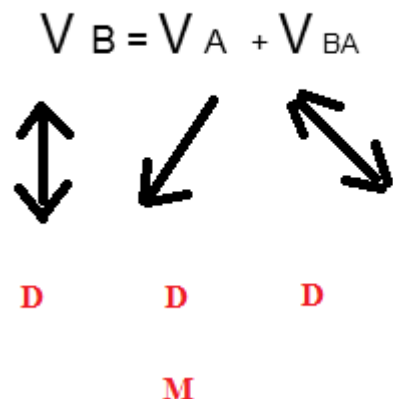
$$V_{A2} = V_{A3}$$

سرعت نقطه B3 با استفاده از سرعت نقطه A3 به دست می آید.

هر دو نقطه بر روی اهرم ۳ قرار دارند. بنابراین

$$V_B = V_A + V_{BA}$$

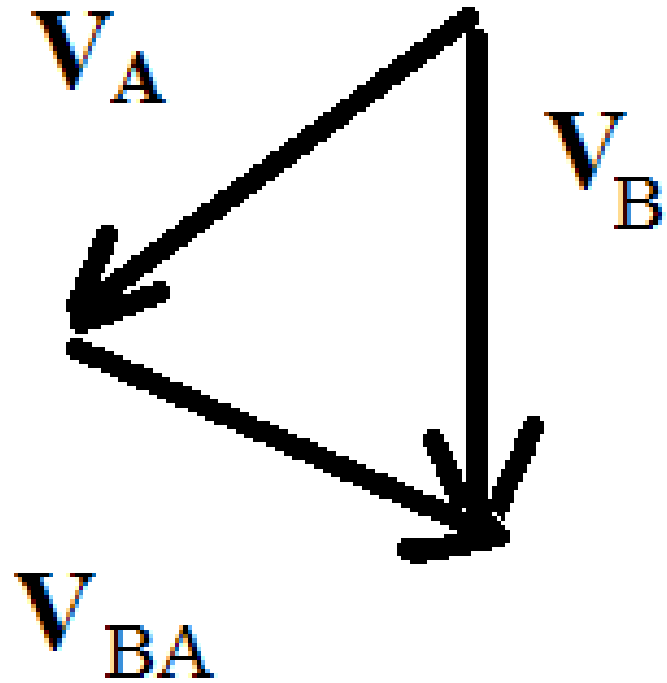
این معادله برداری شامل دو معادله مستقل خطی در راستای X و Y است.



در حل این معادله برداری، حرف D در زیر هر بردار نشانگر مشخص بودن جهت بردار است. حرف M در زیر هر بردار، نشانگر مشخص بودن اندازه بردار است. بنابراین در معادله دو کمیت مجهول وجود دارد که با روش ترسیمی به دست می آیند.

نکته با توجه به عمودی بودن حرکت در نقطه B جهت آن مشخص است. همچنین جهت  $V_{BA}$  مشخص و عمود بر اهرم ۳ است.

با انتخاب مقیاس مناسب برای  $V_A$  مابقی سرعت ها به دست می آیند. (با اندازه گیری)



در نهایت سرعت در نقطه B لغزنده با مشخص بودن  $V_B$  اهرم ۳ بدست می آید. چون سرعت نقطه B در اهرم ۳ و بر روی لغزنده برابر می باشد.

تمرین ۱ :

---

اگر در مثال ۱ سرعت دورانی لنگ برابر ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و پادساعتگرد باشد.

طول شعاع لنگ ۲۰ سانتی متر

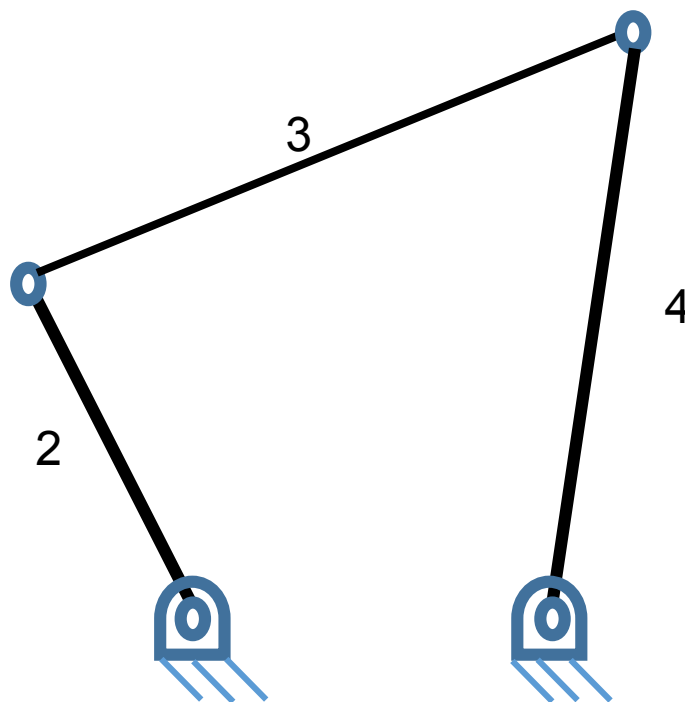
طول دسته شاتون ۳۰ سانتی متر

در لحظه ای که  $\theta_3$  برابر ۶۰ درجه است ، سرعت خطی پیستون را بدست آورید.



تمرین ۲ :

اگر اهرم شماره ۲ با سرعت  $\omega_2$  در راستای پادساعتگرد گردش کند، سرعت دورانی اهرم ۴ را به دست آورید.



## تحلیل نیرویی در اهرم بندی

در جلسات گذشته تحلیل سرعت در اهرم بندی ها بحث گردید.

در این جلسه، تحلیل نیرویی انجام می گیرد.

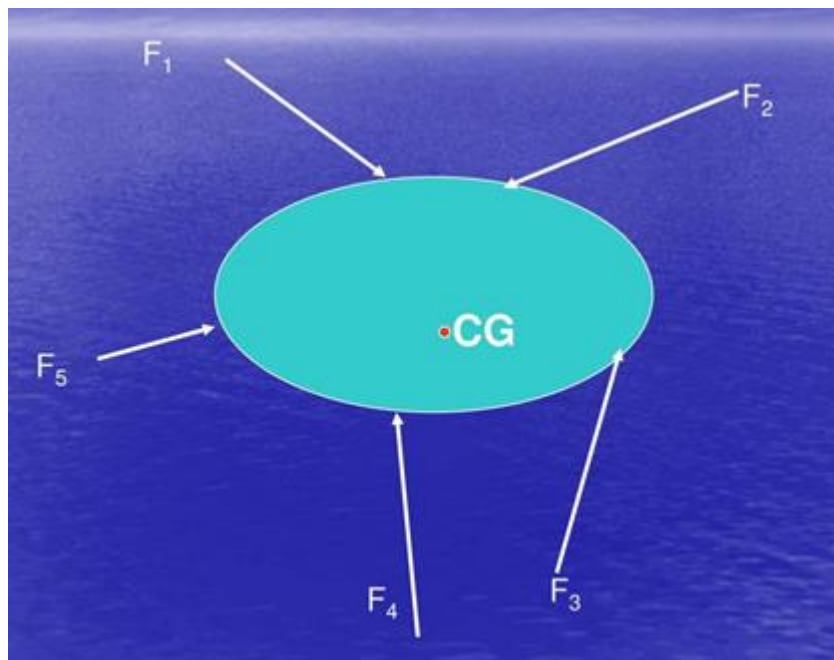
هدف، تحلیل نیروی موجود در هر قطعه از اهرم بندی می باشد.

تحلیل استاتیکی بدون در نظر گرفتن وزن اهرم ها مدنظر می باشد.

بدنه اهرم بندی ها تحت نیروها، صلب می باشند(مفروضات تحلیل).

اولین گام در نظر گرفتن معادلات تعدادل استاتیکی برای مکانیزم می باشد.

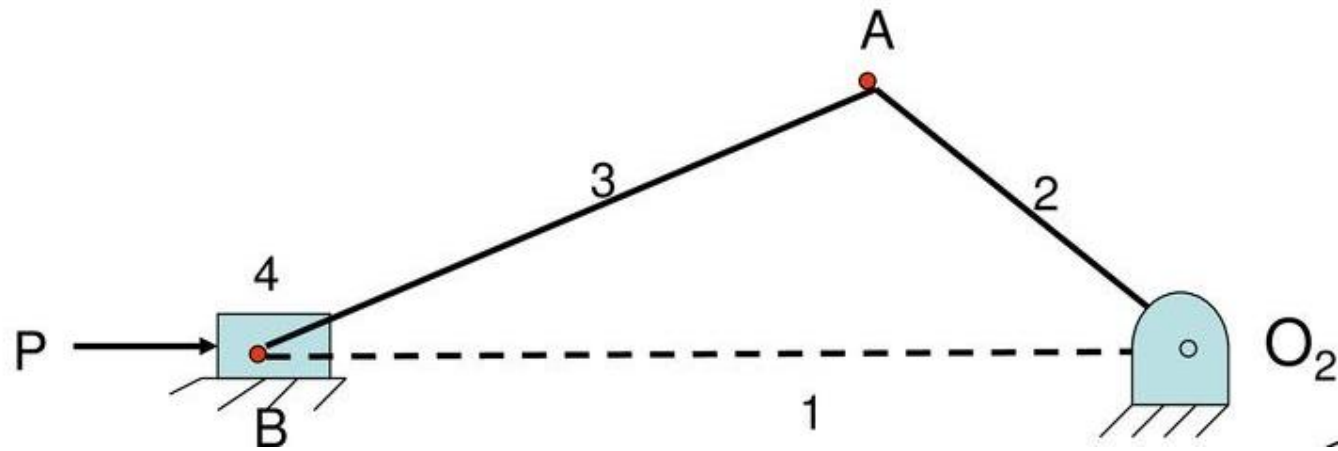
همانطور که در درس استاتیک مطرح گردید، شرط تعدادل استاتیکی آن است که نیروها و گشتاورهای وارد بر جسم در تعدادل باشند، بنابراین:



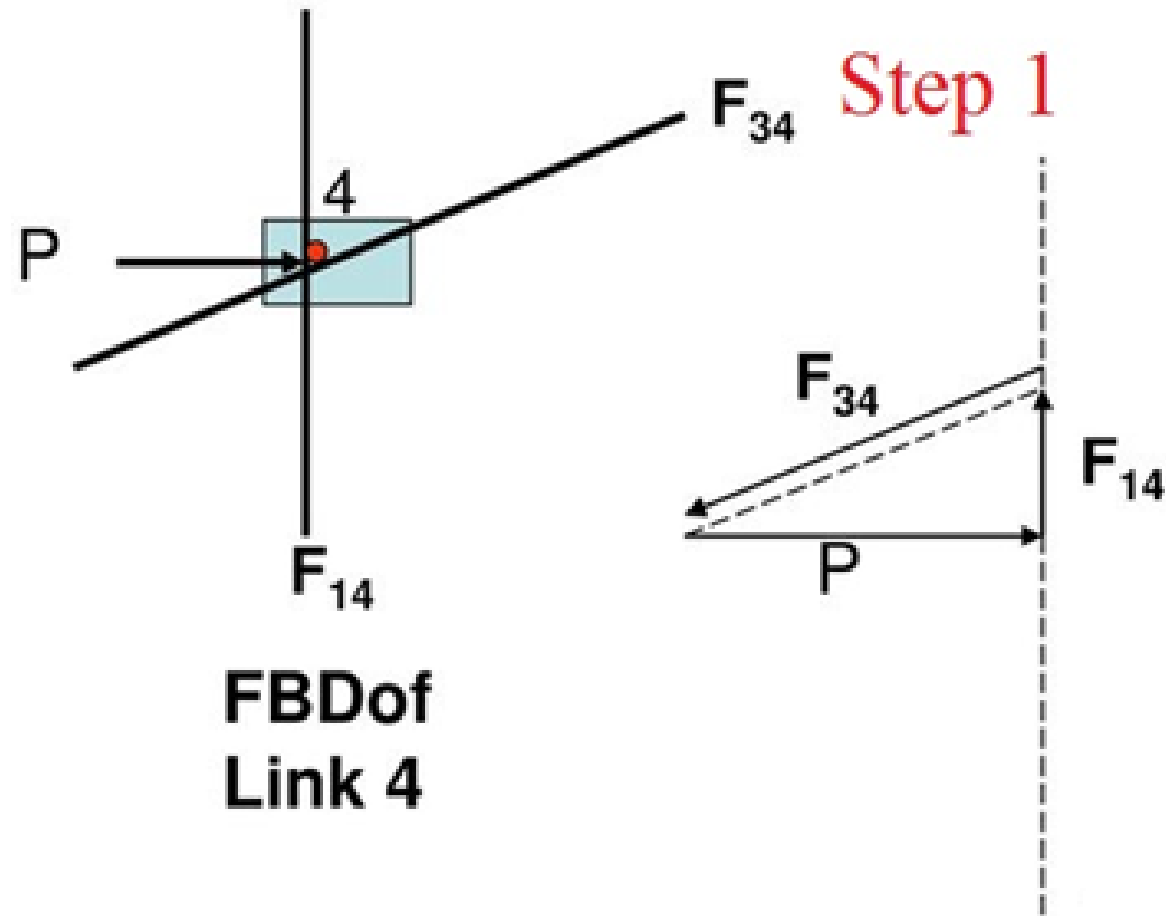
$$\sum F_i = 0$$

$$\sum M_i = 0$$

مثال: اگر نیروی  $P$  طبق شکل مقابل به لغزنده وارد شود، نیروهای وارده بر سایر اجزای مکانیزم را بصورت استاتیکی تحلیل نمایید.  
(با روش ترسیمی).



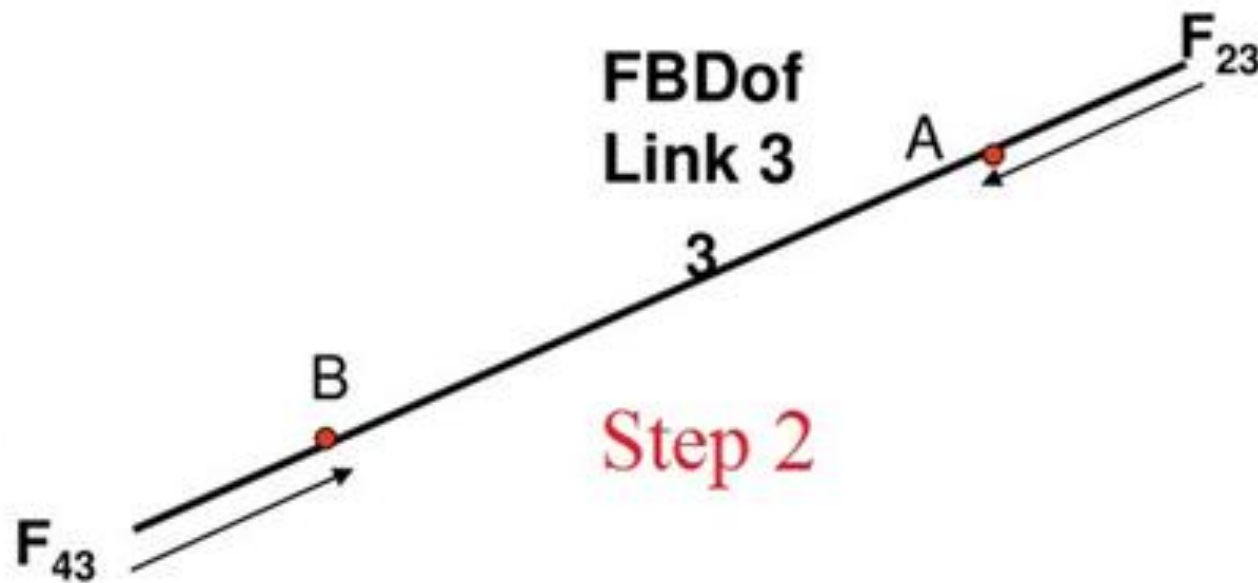
جواب مثال: تحلیل نیرویی در مکانیزم - مرحله ۱



در مرحله اول: نیروهای وارد بر عضو شماره ۴ (لغزنده) ترسیم می گردد. با توجه به معلوم بودن نیروی  $P$  و همچنین راستای دو نیروی دیگر، مطابق روش ترسیمی دو نیروی دیگر تعیین می گردد.

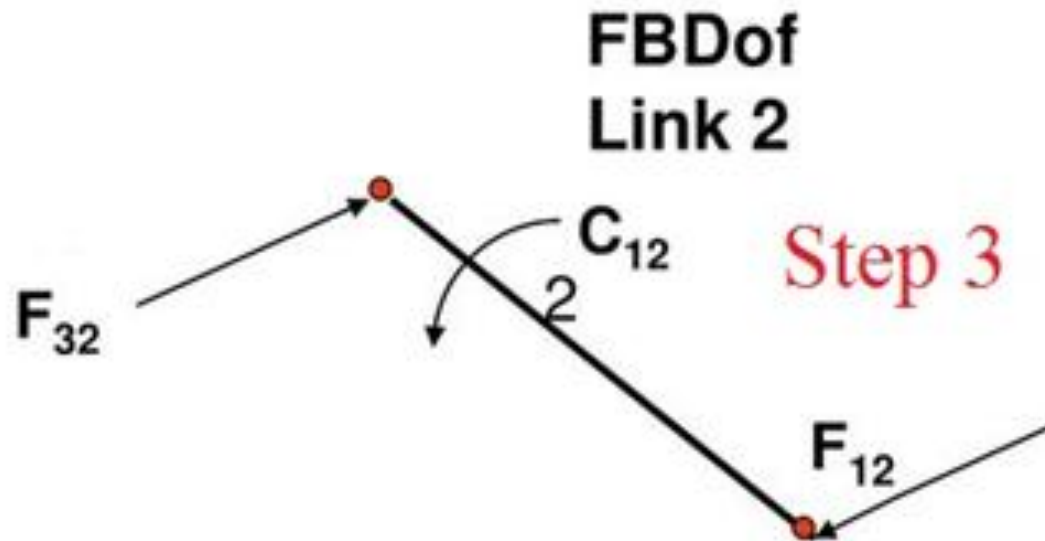
جواب مثال: تحلیل نیرویی در مکانیزم - مرحله ۲

در مرحله دوم: عضو شماره ۳ به ناچار یک عضو دونیروی است که با توجه به معلوم بودن نیروی  $F_{43}$  در آن، نیروی  $F_{23}$  به سادگی، برابر و در مخالف جهت آن نیرو به دست می آید.



جواب مثال: تحلیل نیرویی در مکانیزم - مرحله ۳

در مرحله سوم: نیروهای وارد بر عضو شماره ۲ ترسیم می گردد. نیروی  $F_{12}$  برابر و در جهت مخالف نیروی  $F_{32}$  خواهد بود. اما با توجه به اینکه این دو نیرو در یک راستا قرار ندارند، طبق معادله تعادل گشتاور زیر، گشتاور مقاومی برابر با  $C_{12}$  خواهیم داشت.  $R_2$  طول فاصله عمودی بین دو نیرو می باشد.



$$\sum M_{O2} = 0$$

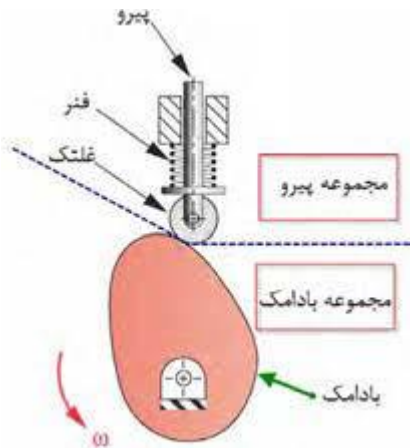
$$F_{32} * R_2 - C_{12} = 0$$

$$\rightarrow F_{32} * R_2 = C_{12}$$

## بادامک

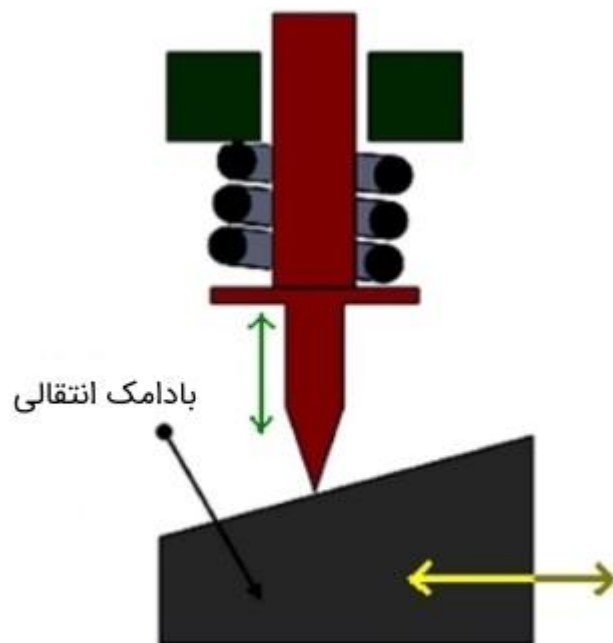


- مکانیزمی برای تبدیل یک حرکت به حرکت دیگر می باشد.
- بادامک معمولاً برای تبدیل حرکت چرخشی به حرکت خطی مورد استفاده قرار می گیرد.
- به طور کلی، هنگامی که دو عضو، از طریق تماس در سطوح مختلف، به یکدیگر متصل باشند، مفصل بادامکی تشکیل می شود.
- بادامک (معمولاً عضو ورودی) در هنگام چرخش، با میله ای (معمولاً عضو خروجی) ارتباط دارد که «پیرو» نامیده می شوند.
- از بادامک ها به طور گسترده در موتورهای احتراق داخلی، ماشین های چاپ، صنایع نساجی و غیره استفاده می شود.





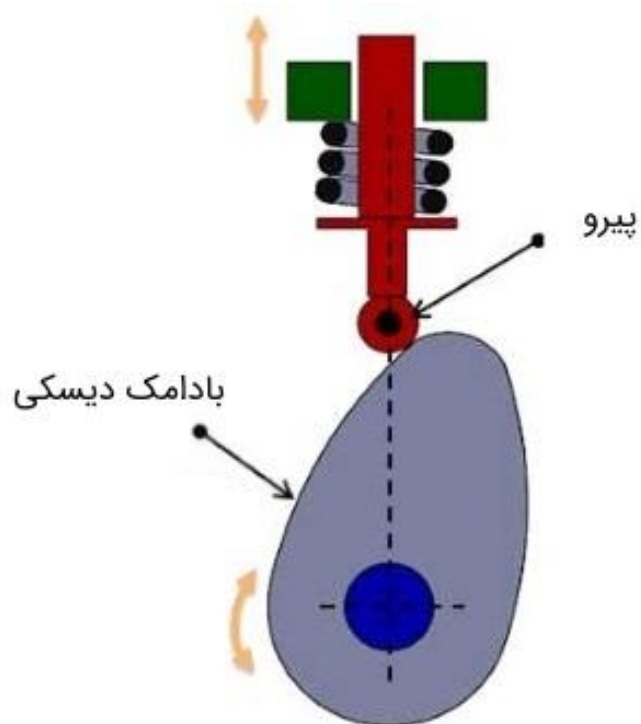
**بادامک انتقالی :** ظاهری به شکل گوه دارد. این بادامک، به صورت انتقالی حرکت می‌کند. در این وضعیت، پیرو حرکت انتقالی یا رفت و برگشتی خواهد داشت.



**بادامک‌های استوانه‌ای:** شیار روی محیط بادامک (استوانه) ایجاد شده و پیرو فقط می‌تواند روی این شیار حرکت کند. در این مدل، حرکت پیرو به صورت نوسانی یا رفت و برگشتی خواهد بود. کاربرد اصلی این نوع بادامک، تبدیل حرکت چرخشی به حرکت خطی در راستایی موازی با محور چرخش است. در برخی طراحی‌ها، بیش از یک شیار روی سطح استوانه ایجاد می‌شود. در نتیجه، بادامک می‌تواند بیش از یک پیرو را به حرکت در بیاورد.



**بادامک دیسکی:** که حرکت چرخشی دارد و پیرو در صفحه‌ای عمود به محور چرخش بادامک، حرکت رفت و برگشتی انجام می‌دهد. این بادامک، که به نام‌های شعاعی یا صفحه‌ای هم شناخته می‌شود، هم ساده بوده و هم فضای کمی را اشغال می‌کند و بنابراین بسیار متداول است. به علت متداول بودن این نوع بادامک، محاسبات این درس، براساس این مدل ارائه می‌گردد.

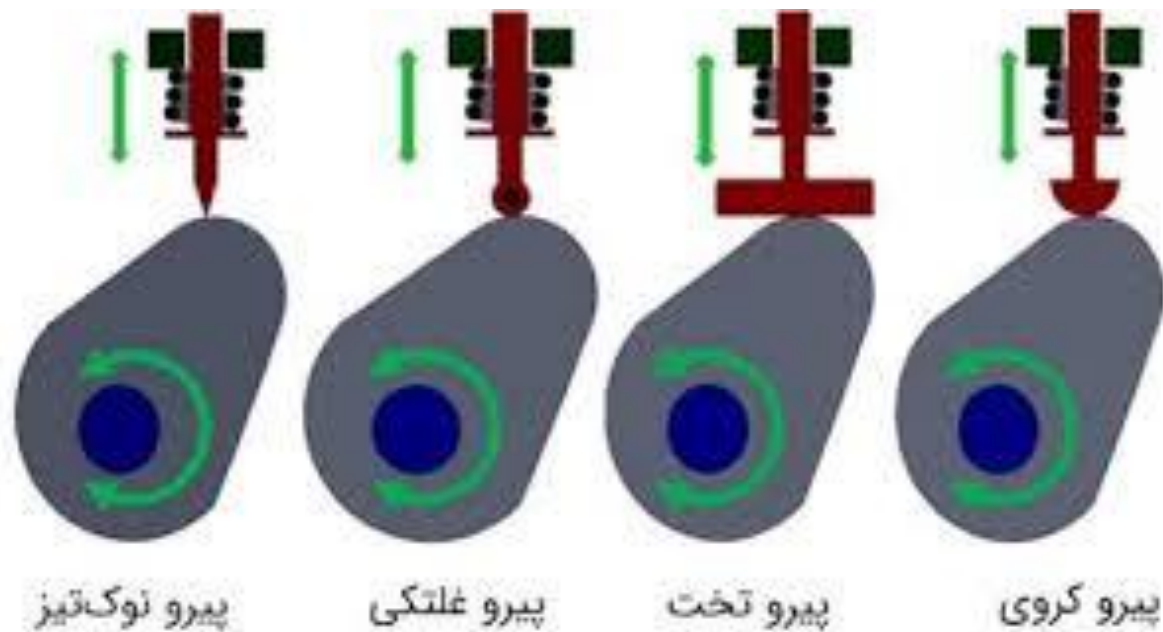


**پیرو نوک‌تیز:** بین سطح تماس بادامک و پیرو، حرکت لغزشی وجود دارد. در عمل به ندرت از این پیرو استفاده می‌شود. زیرا کوچک بودن ناحیه تماس، موجب سایش شدید بادامک می‌شود.

**پیرو غلتکی:** یکی از انواع پرکاربرد پیرو است. این نوع پیرو، از یک غلتک استوانه‌ای تشکیل شده که روی سطح بادامک می‌غلتد. به خاطر حرکت غلتشی بین سطوح تماس، نرخ سایش در مقایسه با پیرو نوک‌تیز، به شدت کاهش می‌یابد. در کاربردهایی که فضای بیشتری در دسترس باشد، این پیروها به طور وسیع به کار می‌روند.

**پیرو کروی:** نوع دیگری تحت عنوان پیرو کروی شناخته می‌شود. سطح تماس پیرو با بادامک، به شکل بخشی از یک کره است. همین ساختار کروی، از ایجاد نیروی تراست جانبی جلوگیری می‌کند. این سطح کروی، همچنین قادر است انحراف و ناهمترازی‌ها را خنثی کند. البته به دلیل ماهیت تماس، نسبت به پیرو غلتکی، اصطکاک بیشتری دارد.

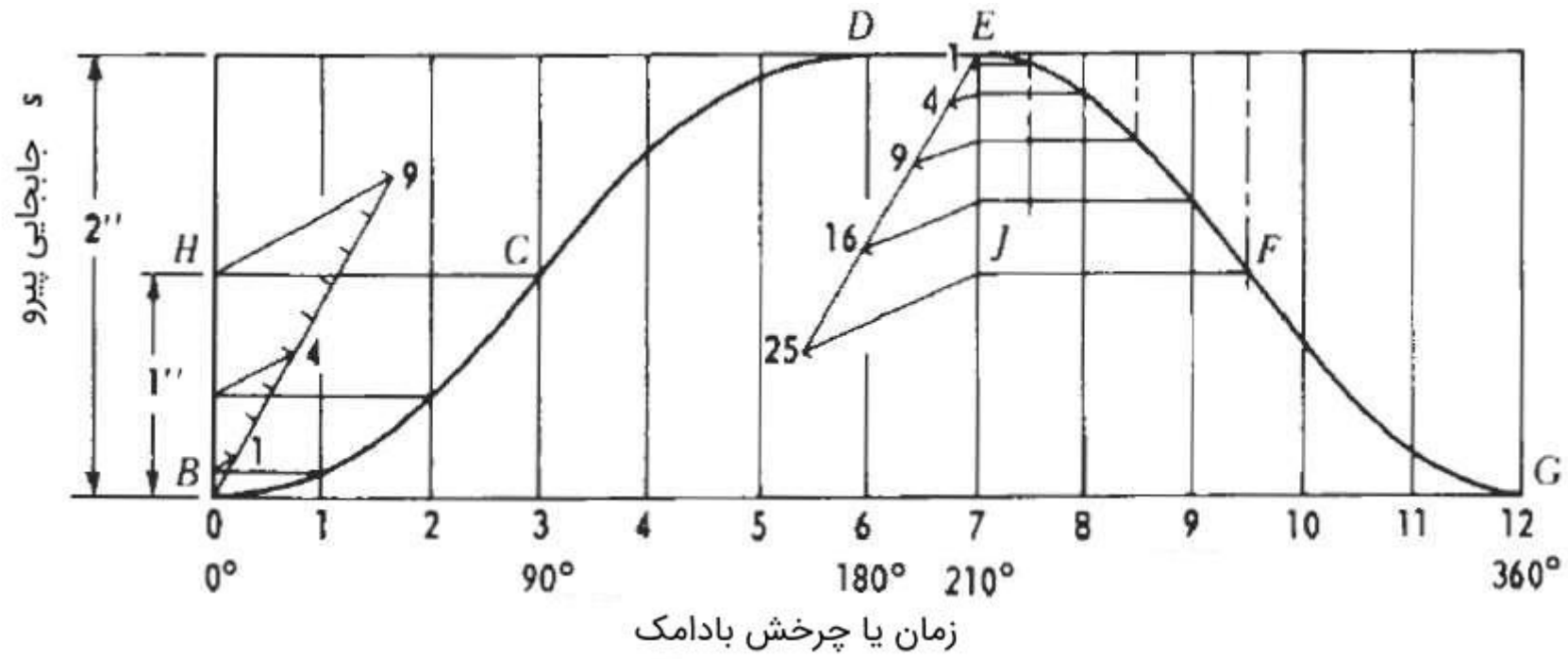
**پیرو تخت:** صفحه تختی در انتهای پیرو قرار گرفته و تماس از این ناحیه انجام می‌شود. در اینجا هم نوع حرکت از نوع لغزشی است. در نتیجه اصطکاک نسبت به پیرو غلتکی، خیلی بیشتر است. در کاربردهایی که نیاز به حرکت سریع باشد، از پیرو تخت استفاده می‌شود. با این وجود، هرگونه ناهمترازی یا انحراف در پیرو، باعث ایجاد تنش‌های شدید سطحی می‌شود. یکی از نقاط ضعف این پیرو، نیروی تراست جانبی است که به دلیل وجود اصطکاک در سطح تماس، وارد می‌شود.



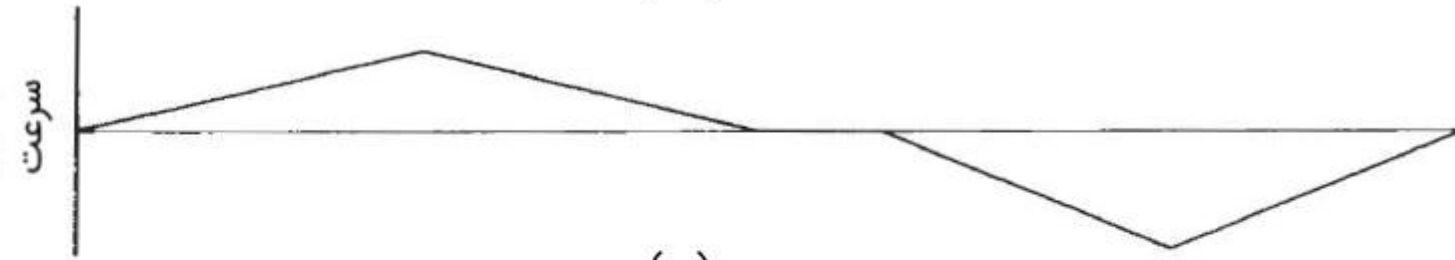
نموداری که جابجایی پیرو را به عنوان تابعی از زمان رسم کرده باشد، نمودار جابجایی نامیده می‌شود. نمونه‌ای از این نمودار در شکل مشاهده می‌شود. محور افقی، درجه چرخش بادامک را نشان می‌دهد. این نمودار، یک دور چرخش کامل نشان می‌دهد. با توجه به اینکه سرعت چرخش بادامک (برحسب دور در دقیقه) ثابت است، بازه‌های تقسیم شده روی محور طولی، می‌توانند معیاری از زمان سپری شده را نیز ارائه کنند. محور عمودی، نشان دهنده جابجایی پیرو است. نمودار جابجایی، شکل بادامک را تعریف می‌کند. در تحلیل و طراحی یک بادامک، این نمودار اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

از آنجایی که این نمودار، در حقیقت، یک نمودار جابجایی برحسب زمان به شمار می‌آید، با یک و دو بار مشتق‌گیری از آن می‌توان به ترتیب، نمودارهای سرعت و شتاب برحسب زمان را نتیجه گرفت. شتاب پیرو در بادامک‌هایی که با سرعت زیاد کار می‌کنند، اهمیت بالایی دارد. زیرا شتاب تأثیر مستقیمی روی نیروهای اینرسی دارد و در نهایت منجر به ارتعاشات، نویز، تنش و سایش می‌شود.

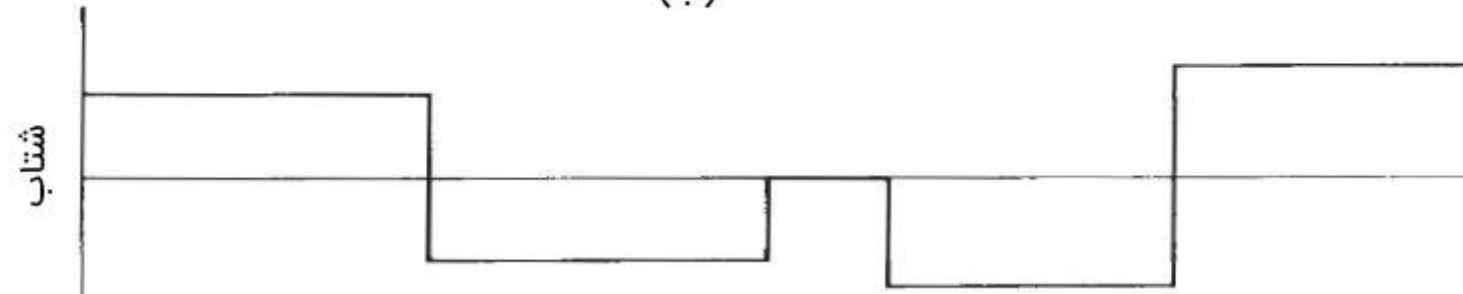
مشتق شتاب برحسب زمان را جرک می‌نامیم و آن را به عنوان پالس یا آهنگ تغییر شتاب تعریف می‌کنیم. جرک، معیاری از آهنگ تغییر نیروی اینرسی فراهم می‌کند و در نهایت، شاخصی از ضربه در بارگذاری به حساب می‌آید. مقدار بی‌نهایت جرک، منجر به بروز ارتعاش در پیرو شده و روی عمر بادامک تأثیر می‌گذارد.



(الف)



(ب)



(پ)

مثال هایی برای هریک از مکانیزم های بادامک و پیرو مختلف نام ببرید که در صنعت استفاده می گردد.

## نمودارهای طراحی بادامک

هدف طراح بادامک این است که نمودار تغییر مکان پیرو را توجیه کند.

چند نوع مرسوم حرکت پیرو عبارتند از:

- حرکت پیرو با شتاب ثابت
- حرکت پیرو با سرعت ثابت اصلاح شده
- حرکت پیرو با هارمونیک ساده
- حرکت پیرو به صورت سیکلوئیدی



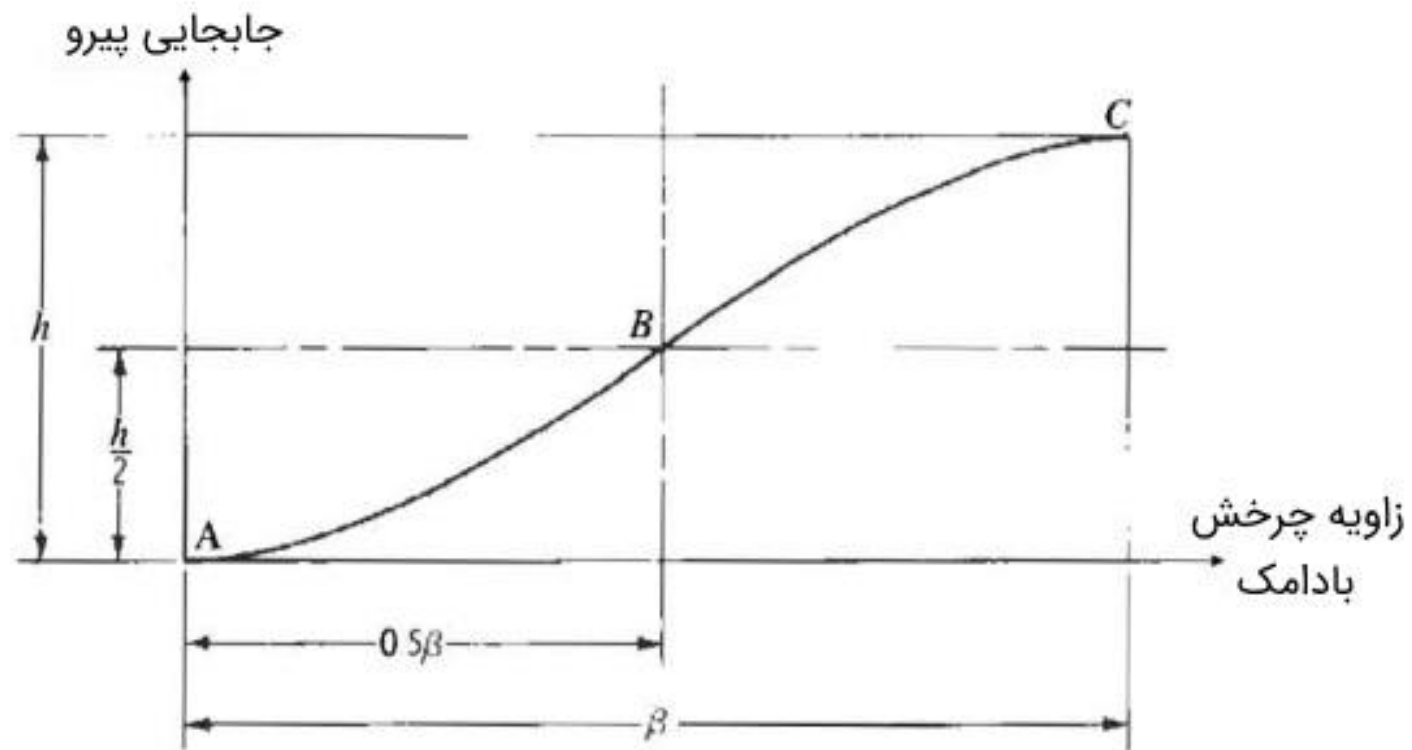
## حرکت پیرو با شتاب ثابت

جابجایی جسمی که با شتاب ثابت حرکت می‌کند، با کمک رابطه  $s = 1/2At^2$  به دست می‌آید. در این رابطه،  $t$  زمان حرکت و  $A$  هم شتاب است. نمودار این معادله یک سهمی است. از آنجایی که شتاب ثابت است، جابجایی  $S$  با مقدار  $t^2$  متناسب خواهد بود. شتاب در بخشی از مسیر، مثبت، در بخشی دیگر، منفی و در بخشی هم صفر است.

در تحلیل حرکت بادامک، بهتر است جابجایی، سرعت و شتاب پیرو را به جای زمان، برحسب زاویه چرخش بادامک  $\theta$  بیان شود.

در نمودار جابجایی نشان داده شده، منحنی  $AB$  نشان دهنده بالا رفتن پیرو با شتاب (ثابت) مثبت است. در منحنی  $BC$  پیرو با شتاب (ثابت) منفی بالا می‌رود. کل جابجایی پیرو با  $h$  نشان داده شده است. در این فاصله، بادامک به اندازه  $\beta$  درجه چرخیده است.

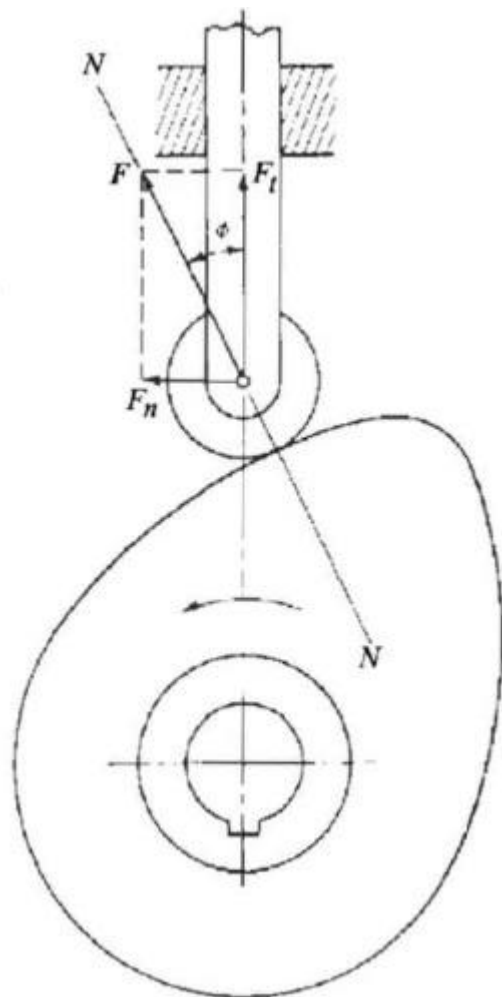
رابطه بین زمان و سرعت زاویه‌ای به صورت  $\theta = \omega \times t$  تعریف می‌شود.



نکته: حرکت با سرعت ثابت اصلاح شده به معنی این است که پیرو در بازه‌های زمانی مساوی، جابجایی‌های مساوی داشته باشد. بنابراین، نمودار جابجایی بر حسب زمان به صورت خطوط راست خواهد بود.

## زاویه فشار

زاویه بین خط عمود مشترک در نقطه تماس بادامک و پیرو و مسیر حرکت پیرو، زاویه فشار نامیده می‌شود. در شکل، زاویه فشار با نماد  $\phi$  نشان داده شده است.



نیروی  $F$  نیرویی است که بادامک به پیرو وارد می‌کند. این نیرو به دو مؤلفه  $F_t$  در جهت مماسی و  $F_n$  در جهت عمودی تقسیم شده است. این دو جهت، نسبت به مسیر حرکت پیرو سنجیده می‌شود. مؤلفه عمودی، یک نیروی تراست جانبی ناخواسته است. همان‌طور که از شکل به نظر می‌رسد، با کم کردن زاویه فشار، می‌توان این نیرو را کاهش داد.

در طراحی‌ها برای عملکرد بهتر، زاویه فشار از  $30^\circ$  درجه فراتر نمی‌رود. ولی اگر مقدار نیرو، کوچک باشد و یاتاقان‌ها دقیق عمل کنند، می‌توان زاویه فشار را بیشتر از این هم انتخاب کرد.

نکته: کوچکترین دایره ای که می‌توان مماس بر سطح بادامک و هم مرکز با محور بادامک ترسیم نمود، دایره مبنا است.

---

آزمایش پیرو و بادامک

فیلم موجود در لینک زیر برای این آزمایش پیشنهاد می گردد:

<https://www.aparat.com/v/A0LyQ>

## چرخ دنده (Gears)

وسیله‌ای است برای انتقال توان دَوَرانی از یک محور به محور دیگر که طی آن، مقدار گشتاور یا سرعت دَوَرانی یا جهت چرخش یا راستای محوری می‌تواند تغییر کند.

روی محیط چرخ دنده، دندانه‌هایی با فاصله مساوی ایجاد شده است. این دندانه‌ها پس از درگیر شدن با دندانه‌های چرخ دنده مجاور، نیرو را بین یکدیگر منتقل می‌کنند.

هنگامی که دو چرخ دنده در کنار هم به کار رود، چرخ دنده کوچکتر که تعداد دندانه کمتری دارد، معمولاً پینیون نامیده می‌شود.



## انواع چرخنده - چرخ دنده ساده

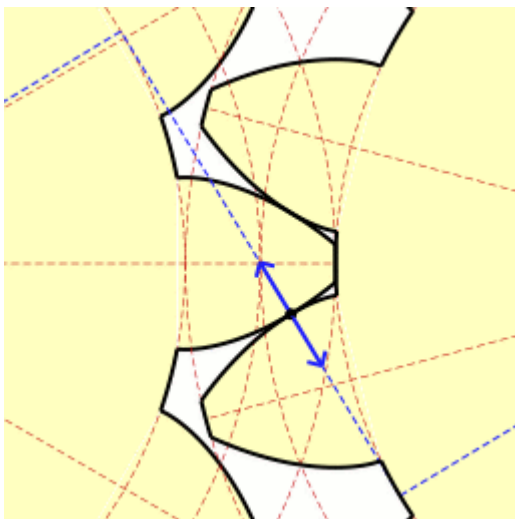
چرخ دنده ساده، یکی از پرکاربردترین انواع چرخ دنده ها است که دندانه‌های مستقیم دارد و روی محورهای موازی سوار می‌شود.

به محض اینکه دو دندانه از چرخ دنده مقابل با یکدیگر درگیر شوند، با نیروی زیادی به هم ضربه می‌زنند. این ضربه، موجب تولید صدا و تمرکز تنش روی دندانه‌ها می‌شود.

در دندانه‌های این چرخ دنده، در هر لحظه فقط یکی از دندانه‌ها از هر چرخ دنده متقابل، به طور کامل درگیر می‌شود.

در این گونه از چرخ دنده‌ها، هیچ نیرویی در جهت محور ایجاد نمی‌شود.

چرخ دنده ساده در کاربردهایی که نیاز به تغییرات زیاد سرعت و گشتاور باشد، مناسب است. در برخی موارد، تعداد زیادی از این چرخ دنده‌ها برای تغییر سرعت و گشتاور استفاده می‌شود.



## انواع چرخ‌دنده - چرخ دنده مارپیچ

خطوط دندانه‌ها در این چرخ دنده‌های استوانه‌ای، به صورت مارپیچ هستند. در هر دو مورد محورهای موازی و غیر موازی می‌توان از آنها استفاده کرد.

به دلیل شکل مارپیچی دندانه‌ها، درگیر شدن چرخ‌دنده‌ها با تماس نقطه‌ای آغاز شده و تدریجاً افزایش می‌یابد. در نتیجه انتقال نیرو یکنواخت‌تر و ارتعاشات و سایش هم کمتر اتفاق می‌افتد. از طرفی، همواره بیش از یک دندانه از هر چرخ دنده درگیر است، در نتیجه نیروی وارد به هر دندانه کاهش و ظرفیت انتقال نیروی این نوع چرخ دنده افزایش می‌یابد.

این نوع چرخ دنده در مقایسه با نوع ساده، صدای کمتری تولید می‌کند. کمتر بودن صدا به خصوص در سرعت‌های بالا قابل درک می‌باشد.

البته زاویه‌دار بودن دندانه‌ها باعث ایجاد نیروی محرک محوری و گرما می‌شود و راندمان را کاهش می‌دهد. به منظور کاهش اثر نیروی محوری، باید از یاتاقان مناسب استفاده گردد.

یکی از روش‌های جلوگیری از ایجاد نیروی محوری، استفاده از چرخ‌دنده مارپیچ دابل (جناغی) است و دو چرخ دنده مارپیچ با جهت مخالف، در کنار هم قرار می‌گیرند تا نیروی های محرک ایجاد شده در راستای محوری، خنثی گردند.



## انواع چرخ‌دنده - چرخ دنده مخروطی

این چرخ دنده‌ها ظاهری مخروط مانند دارند و برای محورهای متقاطع مناسب هستند. چرخ دنده های مخروطی در جاهایی که زاویه بین دو محور متقاطع، ۹۰ درجه است، بیشترین کاربرد را دارند، ولی در زاویه‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از کاربردهای چرخ دنده مخروطی، در دیفرانسیل بسیاری از خودروهاست.





## انواع چرخنده - چرخ دنده حلزونی

برای نسبت های کاهش سرعت زیاد از ۲۰:۱ تا ۳۰۰:۱ از چرخ دنده های حلزونی استفاده می شود. این چرخ دنده ها در نتیجه کاهش سرعت، گشتاور را نیز به مقدار زیادی افزایش می دهند.

با نصب مناسب و روغن کاری منظم، چرخنده حلزونی یکی از نرم ترین و کم صداترین انواع چرخ دنده ها خواهند بود.

ویژگی مهم این چرخ دنده ها این است که انتقال نیرو فقط از حلزون به چرخ حلزون انجام می شود. در بیشتر طراحی ها، چرخ حلزون قادر به چرخاندن حلزون نمی باشد که به عنوان ویژگی خودترمزی شناخته می شود. هرچه زاویه پیشروی در حلزون کمتر باشد، این خاصیت بیشتر می شود. از خاصیت خودترمزی برای جلوگیری از حرکت برعکس، بطور مثال در سیستم نوار نقاله، استفاده می گردد.



## انواع چرخ‌دنده - چرخ دنده شانه ای Rack & Pinion

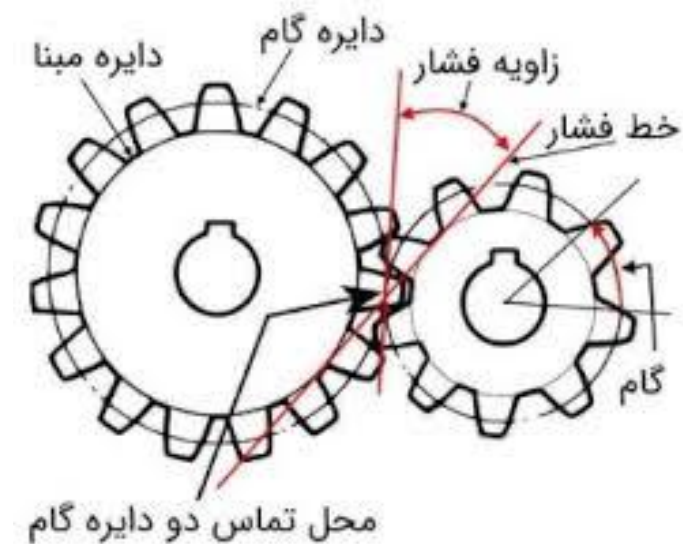
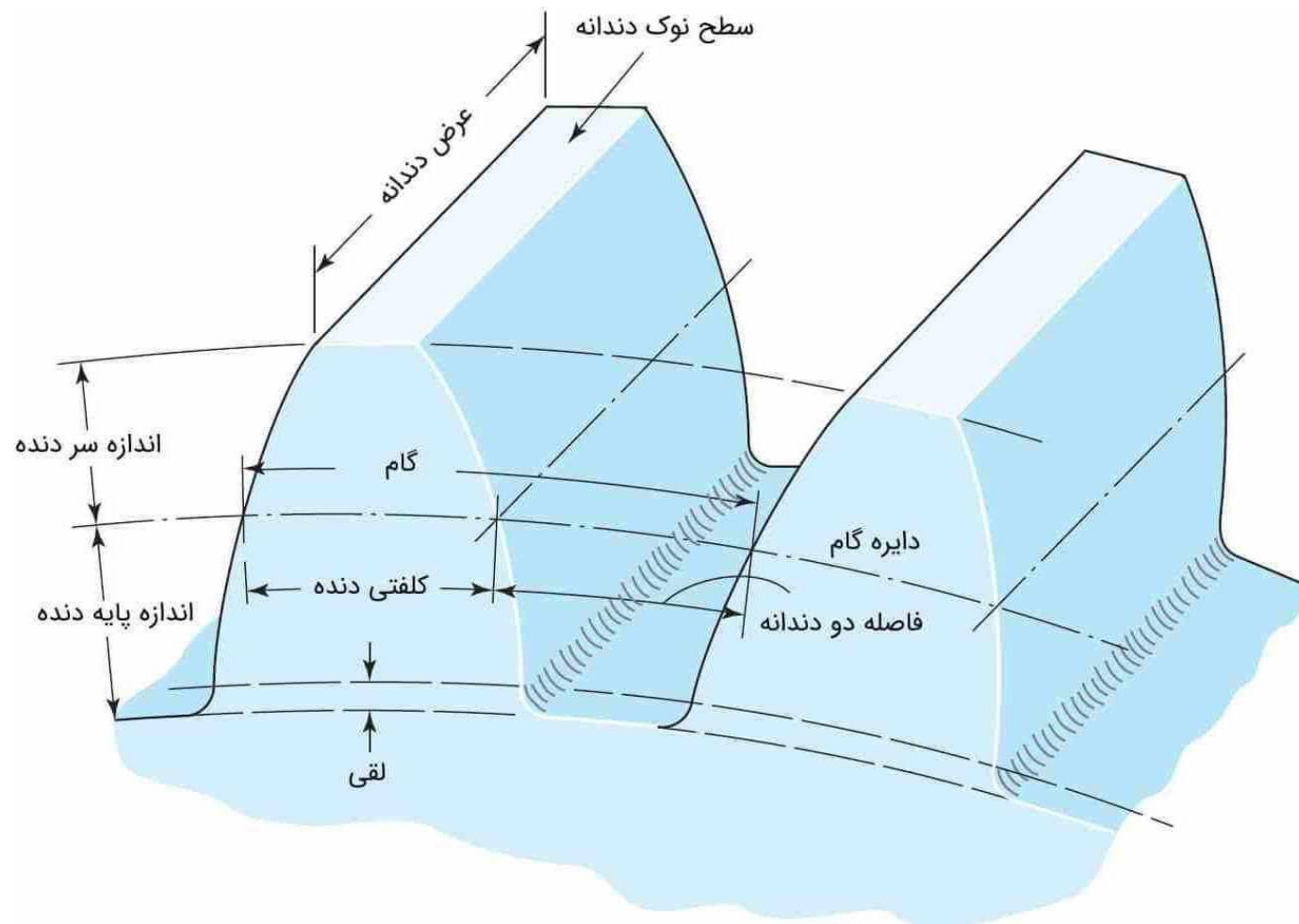
چرخ دنده شانه‌ای به منظور تبدیل حرکت دایره ای به حرکت خطی یا برعکس به کار می‌رود. معمولاً این چرخ دنده‌ها به همراه یک چرخ‌دنده ساده (پینیون) مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین دلیل به کل مجموعه، شانه و پینیون گفته می‌شود.

دندانه‌های روی چرخ دنده می‌تواند مستقیم یا مارپیچ باشد.

یکی از کاربردهای این نوع چرخ دنده‌ها در ترازوهای عقربه‌ای است. مثال دیگر چرخ‌دنده شانه‌ای، فرمان اتومبیل است. با چرخاندن فرمان، پینیون متصل به آن شروع به چرخش می‌کند. در نتیجه این حرکت دایره‌ای، چرخ‌دنده شانه‌ای در جهت طولی (چپ یا راست)، به حرکت درمی‌آید.



## پارامترهای هندسی چرخ دنده ساده



**گام:** فاصله یک نقطه روی دندان تا نقطه متناظرش در دندان مجاور بعدی را گام (Pitch) چرخ دنده می‌نامند. این فاصله با  $p$  نشان داده می‌شود. مجموع کلفتی دنده و فاصله دو دندان مجاور برابر با گام است.

• **دایره مبنا:** دایره مبنا دایره‌ای است که دندانها روی آن قرار گرفته‌اند.

• **دایره گام:** هنگامی که دو چرخ دنده باهم درگیر می‌شوند، دو دایره فرضی وجود دارد که به هم مماس هستند. این دو دایره، دایره گام و قطر آنها نیز، قطر گام نامیده می‌شوند. برای به دست آوردن گام، محیط دایره گام را به تعداد دندانها تقسیم می‌کنیم.

• **خط فشار:** خطی که به هر دو دایره مبنا مماس است، خط فشار نامیده می‌شود. زاویه بین خط فشار و خط تماس دایره‌های گام، به عنوان زاویه فشار شناخته می‌شود. در طراحی‌ها، زاویه فشار معمولاً 14.5 ، 20 و 25 درجه در نظر گرفته می‌شود.

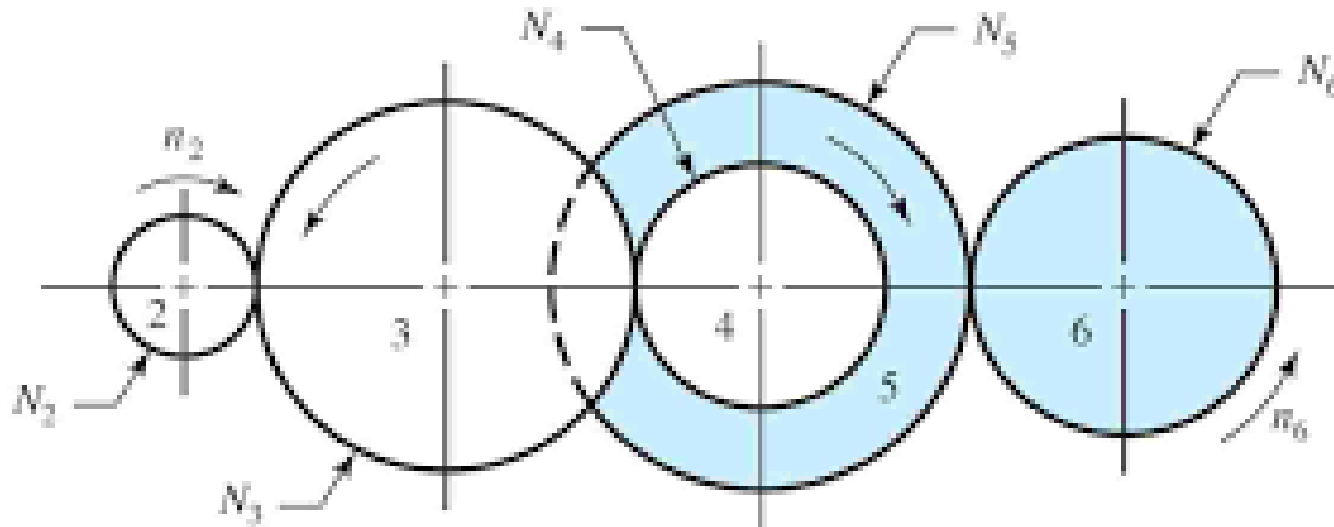
• **مدول چرخ دنده:** یکی از مهمترین مشخصه‌های هر چرخ دنده که معیاری از سائز آن چرخ دنده را بیان می‌کند، مدول (Module) چرخ دنده نامیده می‌شود. مدول چرخ دنده به صورت نسبت قطر دایره گام (برحسب میلی‌متر) به تعداد دندانها تعریف می‌شود. مدول چرخ دنده را همچنین می‌توان با تقسیم گام به عدد پی محاسبه کرد. این مشخصه، عموماً عددی بین 0.3 تا 25 میلی‌متر است. شرط اینکه دو چرخ دنده با هم درگیر شوند، این است که مدول یکسان داشته باشند.

هنگامی که دو چرخ دنده باهم درگیر می‌شوند، دایره‌های گام آنها بدون لغزش روی هم می‌غلطند. بنا به قرار داد، در نام‌گذاری‌ها عدد ۱ به قاب و چهارچوب ماشین اختصاص داده می‌شود. پس از آن، چرخ دنده‌ها با شروع از عدد ۲ نام‌گذاری می‌شوند. شعاع دایره گام هریک از دو چرخ دنده را  $r_2$  و  $r_3$  می‌نامیم. هر دو دایره به ترتیب با سرعت زاویه‌ای  $\omega_2$  و  $\omega_3$  در حال چرخش هستند. رابطه کلی زیر در درگیری بین چرخ دنده‌ها حاکم می‌باشد.

$n$  سرعت بر حسب دور در دقیقه،  $N$  تعداد دندانه و  $d$  هم قطر دایره گام را نشان می‌دهد.

و  $T$  گشتاور انتقالی می‌باشد.

$$\frac{n_3}{n_2} = \frac{N_2}{N_3} = \frac{d_2}{d_3} = \frac{T_2}{T_3}$$



## تمرین ۱:

---

اگر در شکل صفحه قبل تعداد دندانه ها به ترتیب برابر باشد با :

چرخ دنده شماره ۲	۲۰ دندانه
چرخ دنده شماره ۳	۵۰ دندانه
چرخ دنده شماره ۴	۳۰ دندانه
چرخ دنده شماره ۵	۵۰ دندانه
چرخ دنده شماره ۶	۳۰ دندانه

و چرخدنده شماره ۲ یا سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه و ساعتگرد بچرخد،  
الف) سرعت و جهت چرخش چرخ دنده ۶ را محاسبه کنید.

اگر گشتاور ۱۰۰ نیوتن.متر برچرخدنده شماره ۲ اعمال شود،  
ب) گشتاور موجود در چرخ دنده ۵ چقدر است.

نابالانسی یکی از عوامل اصلی ایجاد ارتعاش در ماشین های دوار است. نابالانسی باید از لقی یاتاقان ها، کمانش روتور و یا ناهمراستایی تفکیک گردد.

آخرین مرحله ساخت یک روتور عملیات بالانس است. علاوه بر این، مواردی باعث تغییر بالانس روتور در طول دوره کارکرد آن می شود. معمولاً این نوع نابالانسی ها را در محل روتور و بدون باز کردن آن و با اندازه گیری لرزش و محاسبات مرتفع می سازند (بالانس در محل).



بطور کلی نابالانسی از عدم انطباق محور مرکز ثقل (نه فقط مرکز ثقل) یک روتور بر محور دوران آن روتور بوجود می آید. عوامل ایجاد نابالانسی را می توان بصورت خلاصه زیر برشمرد:

الف) عوامل ناشی از تولید

- خارج از مرکزی - خارجی و داخلی
- وجود حفره های ریخته گری
- عدم تقارن قطعات بعلت نوع کاربرد
- انطباق های خارج از مرکز
- انحراف مرکز ثقل بدلیل لقی شافت و سوراخ کلید
- حرکت نسبی قطعات دوار مانند مکانیزم ها

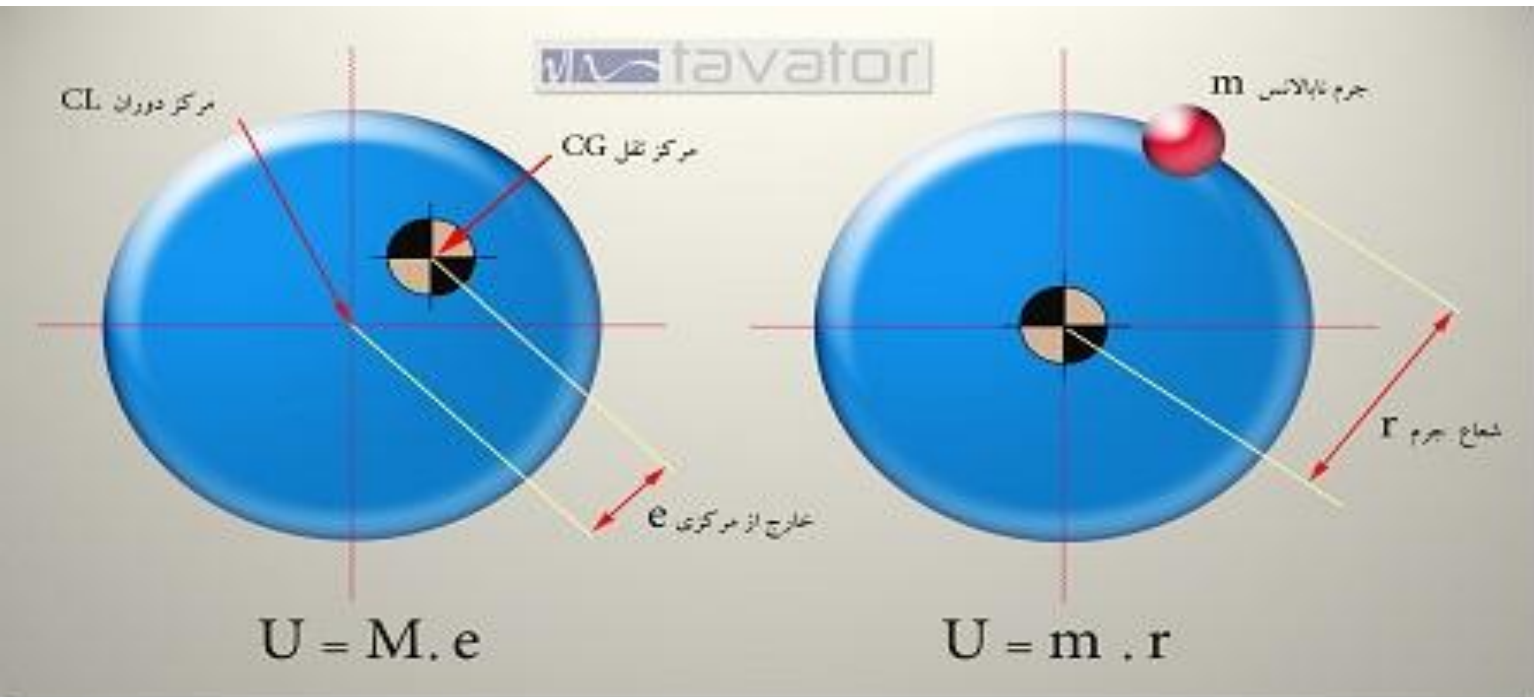
ب) عوامل ناشی از کار روتور

- جرم گرفتن غیر یکنواخت
- سایش غیر یکنواخت
- کمانش روتور
- تعمیر روتور بصورتی که جرمی به آن اضافه یا کم شود
- شوک های حرارتی (جوشکاری و..)
- جابجایی یا انباشت مواد در فضاهای خالی
- ترک ها
- تغییر شکل های ناشی از آزاد شدن تنش های درونی



با توجه به شکل و میزان عدم انطباق، نابالانسی های متنوعی ایجاد می گردد که عواملی همچون انعطاف پذیری روتور، طول و شعاع روتور، نحوه توزیع جرم در طول روتور و شدت نابالانسی (متناسب با توان دوم سرعت چرخشی روتور) در تعیین نوع آن تاثیر گذار است. عملیات بالانس برای ایجاد انطباق بین محور دوران روتور با محور مرکز ثقل روتور صورت می گیرد.

در هر صفحه از روتور، می توان نابالانسی را بصورت خارج از مرکزی مرکز ثقل آن صفحه از روتور نسبت به محور دوران در نظر گرفت. این مقدار نابالانسی را می توان با جرم  $m$  در شعاع  $r$  معادل در نظر گرفت و جرم بالانس را در مقابل آن نصب نمود یا همین مقدار را از آن محل کم نمود تا عملیات بالانس صورت گیرد.



تعداد صفحاتی که باید بعنوان صفحه بالانس انتخاب شود بسته به نوع روتور متفاوت است. بر این اساس انواع بالانس بصورت زیر قابل تعریف است:

الف) بالانس روتورهای صلب

1. بالانس تک صفحه ای

2. بالانس دو صفحه ای

3. بالانس چند صفحه ای

ب) بالانس روتورهای انعطاف پذیر

1. تقریب با روتورهای صلب

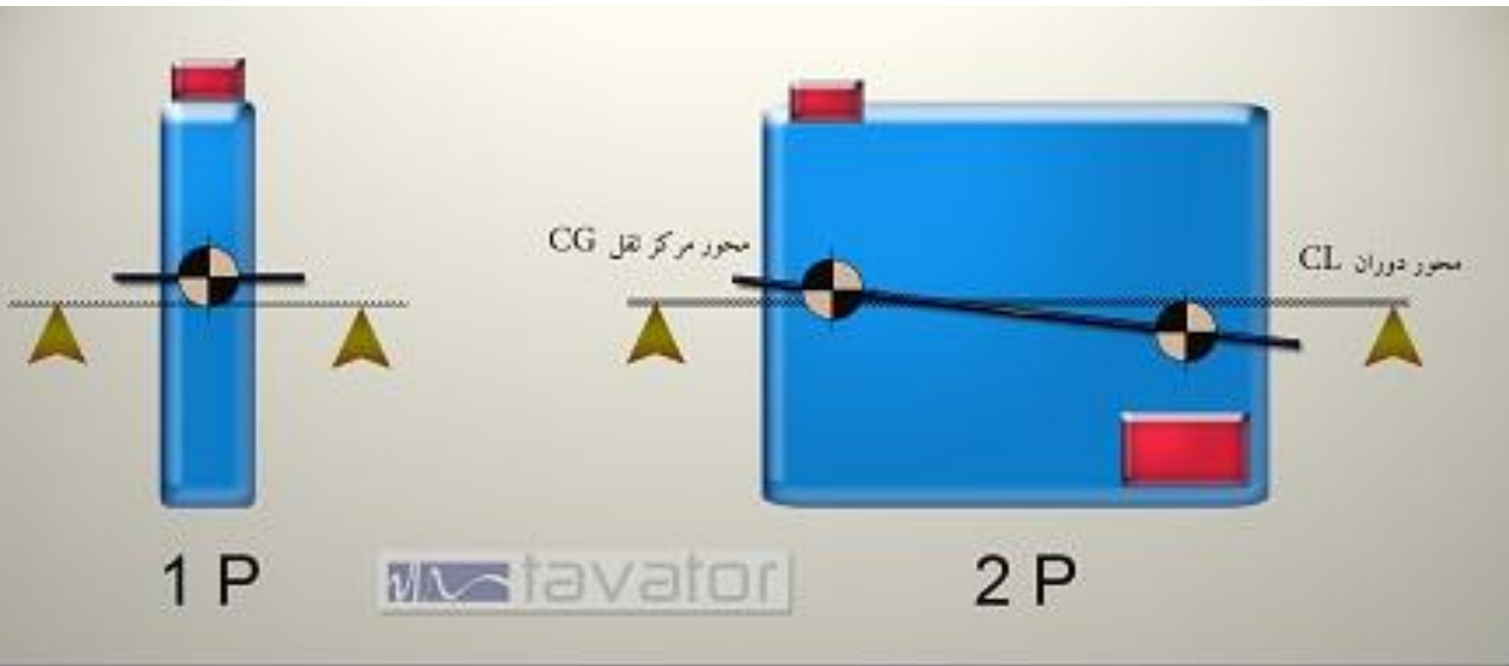
2. بالانس مودال

3. بالانس در خلا

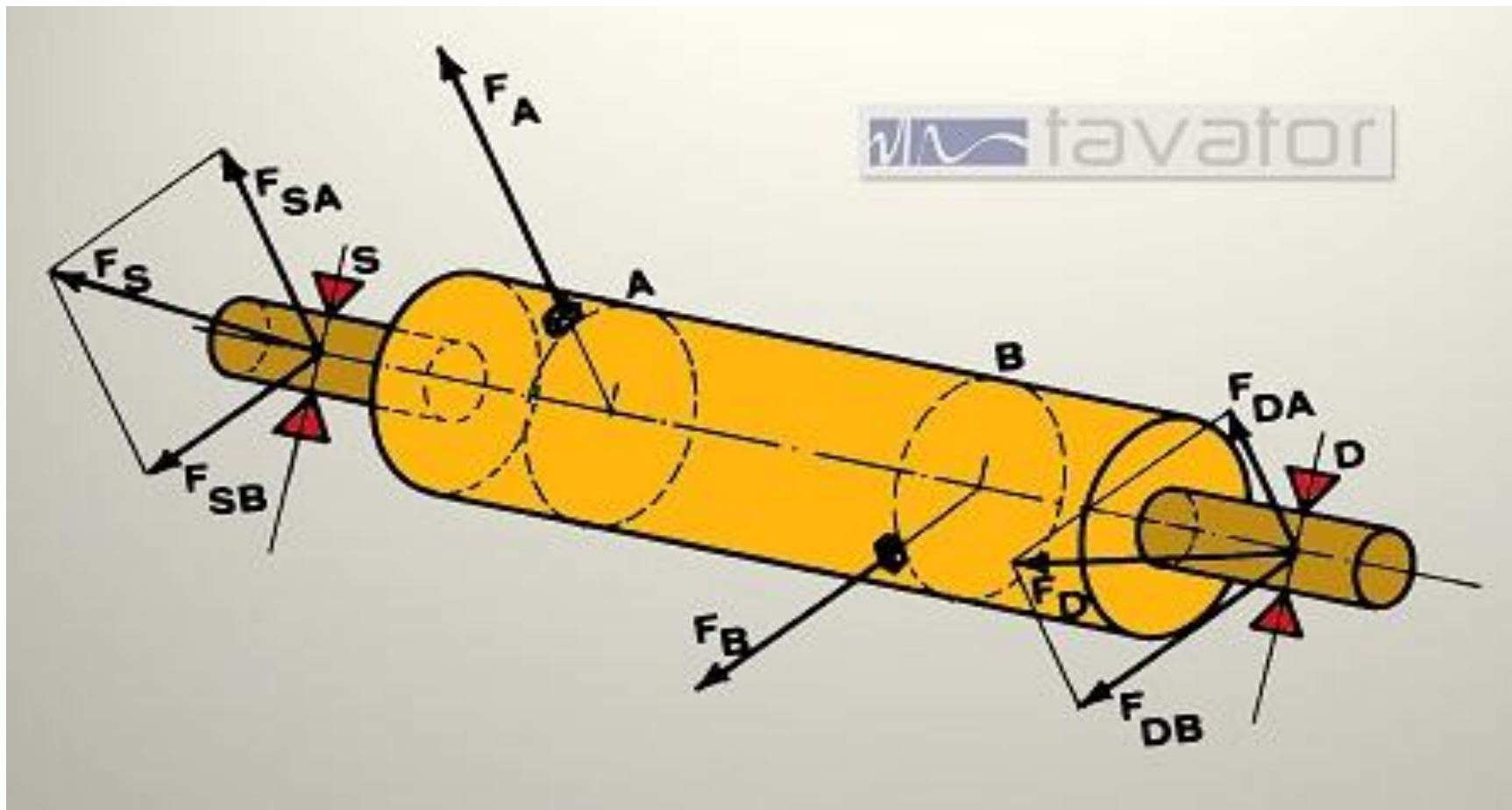
## بالانس روتورهای صلب- تک صفحه ای و دو صفحه ای

بطور کلی روتورهایی که زیر سرعت بحرانی اول روتور کار می کنند بعنوان روتورهای صلب شناخته می شوند و روتورهایی که هنگام راه اندازی حداقل از اولین فرکانس بحرانی خود عبورکنند تحت عنوان روتور های انعطاف پذیر شناخته می شوند مانند بسیاری از توربوماشین های بزرگ یا پر سرعت.

اغلب روتورهای معمول در صنعت از نوع روتورهای صلب هستند که ساده ترین آنها روتورهای تک صفحه ای می باشد. این روتورها عرض بسیار کمتری نسبت به قطر روتور دارند. در این نوع روتورها می توان مرکز ثقل را متمرکز در یک نقطه در نظر گرفت. روتورهای صلبی که طول قابل ملاحظه ای نسبت به قطر دارند (بیشتر از یک هفتم قطر) نمی توان از یک نقطه برای تعریف مرکز ثقل استفاده نمود. بنابراین برای تعریف مرکز ثقل حداقل لازم است دو نقطه تعریف شود و این دو مرکز ثقل، محور مرکز ثقل را بوجود می آورد. در این حالت برای بالانس نیاز است حداقل دو صفحه اصلاحی اختیار شود و عملیات بالانس دو صفحه ای برای این منظور استفاده می شود.



در بعضی از روتورهای صلب اگر چه خود روتور بصورت دو صفحه ای قابل بالانس است، اما وجود بیش از دو یاتاقان برای روتور (مانند میل لنگ اتومبیل) الزام بالانس در صفحات بیشتر (به ازاء هر یاتاقان اضافی یک صفحه اضافه می شود) را بوجود می آورد. در این صورت نیاز به بالانس چند صفحه ای می باشد.



روتورهای انعطاف پذیر را ممکن است بتوان (در بعضی موارد خاص) با تقریب روتورهای صلب و با عملیات بالانس در محل تنظیم نمود.

برای اجرای یک عملیات بالانس کامل در روتورهای انعطاف پذیر، نیاز به انجام بالانس مودال است. در این روش باید رفتار دینامیکی روتور (توزیع سختی، میرایی، جرم روتور و تکیه گاه های آن، فرکانس های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی روتور و مجموعه ماشین) شناسایی گردد.

اگر چه بالانس مودال را می توان در محل کار روتور، با شناسایی رفتار دینامیکی روتور و دسترسی به صفحات مودال، انجام داد. معمولاً بعد از انجام تعمیرات روی روتورهای سنگین، برای ایمنی و اطمینان، روتور توسط سیستم های بالانس در خلا تنظیم می گردد. در این حالت، دسترسی بهتری به صفحات اصلاحی مودال فراهم شده و از عملکرد قطعات تعمیراتی در سرعت کاری بالای روتور اطمینان حاصل می گردد.

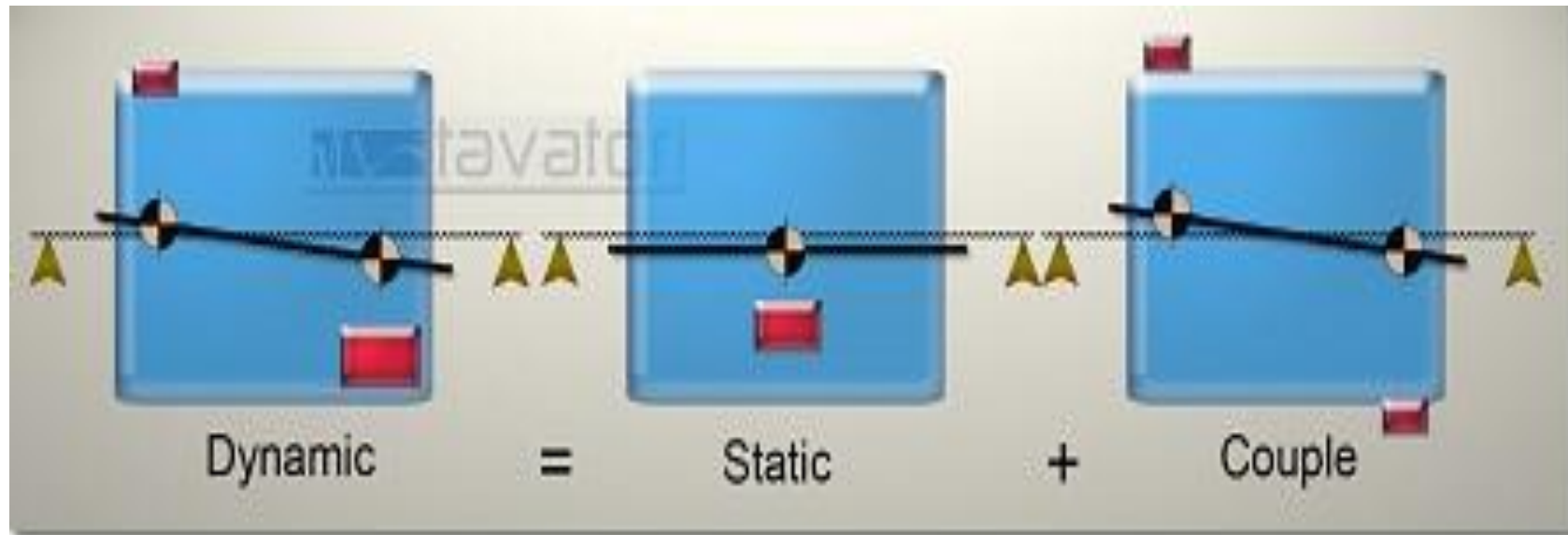
## بالانس استاتیکی و دینامیکی

هر بالانس تک صفحه ای را می توان بعنوان یک بالانس استاتیکی در نظر گرفت و با ارزیابی اثر ثقلی نابالانسی، مقدار و محل آن را شناسایی و اصلاح نمود.

در روتورهای پر سرعت و یا سنگین (بعلت اثرات اصطکاک و...) امکان ارزیابی استاتیکی بصورت دقیق وجود ندارد. در این حالت لازم است با اندازه گیری اثر نیروی گریز از مرکز، روتور را به روش دینامیکی بالانس نمود.

نابالانسی های دو صفحه ای به بالا را نمی توان به روش استاتیکی بالانس نمود و لازم است با اندازه گیری اثر نیروی نابالانسی (که می تواند لرزش تکیه گاه های روتور باشد) روتور را بالانس نمود.

هر نابالانسی دو صفحه ای یک نابالانسی دینامیکی است که از دو جزء نابالانسی کوپل و نابالانسی استاتیکی تشکیل می گردد. یک نابالانسی کوپل از دو نابالانسی یکسان اما با  $180^\circ$  درجه اختلاف جهت و در دو صفحه دور از هم تشکیل می گردد.



ماشین های بالانس عمومی امروزی در دو طرح اصلی یاتاقان ثابت و یاتاقان معلق تولید می گردند. ماشین های یاتاقان ثابت با یکبار کالیبره شدن قادر است سایر روتورها را نیز بالانس کند اما ماشین های یاتاقان معلق باید برای هر روتور کالیبره گردد (با استفاده از جرم آزمایشی).

اما ماشین های یاتاقان ثابت نیاز به سرعت های دورانی بالاتر برای دستیابی به دقت های بالاتر دارند در صورتی که ماشین های یاتاقان معلق در سرعت های دورانی پایین نیز از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار هستند، بنابراین محرک این نوع روتورها انرژی کمتری مصرف می کند.

خارج کردن یک روتور از ماشین و ارسال به کارگاه بالانس (مخصوصاً در ماشین های بزرگ) منجر به صرف هزینه های گزاف و توقف ماشین و کاهش تولید می گردد. بهترین روش در این حالت، انجام بالانس در محل بدون باز کردن روتور می باشد.

در این حالت یاتاقان ها و تکیه گاه های روتور نقش ماشین بالانس را بازی کرده و با اندازه گیری دامنه و فاز حرکت این یاتاقان ها و محاسبه تاثیر میزان جرم نابالانسی آزمایشی مشخص، امکان تعیین مقدار و موقعیت نابالانسی فراهم می گردد.

بالانس درجا معمولاً بعد از تعمیرات یا نابالانس شدن روتور پس از مدتی کار کردن انجام می گردد و روتورهای تولیدی در کارخانجات در آخرین مرحله تولید، روی ماشین بالانس مناسب، تنظیم می گردند.





---

بالانسر های امروزی عمدتاً با تکیه بر قابلیت های میکروپروسورها، علاوه بر اینکه دامنه و فاز را بصورت آنالوگ اندازه گیری می کنند، دارای ویژگی های پردازش دیجیتال برای انجام عملیات فیلترینگ، محاسبات، نمایش گرافیکی، گزارش گیری و ثبت در کامپیوتر می باشند.



یک دستگاه دوار که در کارگاه (یا مکان دیگر) با آن آشنا هستید را انتخاب و نحوه درست بالانس آن را مورد تحقیق قرار داده و گزارش خلاصه ای برای آن آماده نمایید.