آزمایشگاه دینامیک و ارتعاشات

شامل ٤ آزمایش:

۱- بالانس استاتیکی و دینامیکی

۲- سرعت بحرانی در محورهای دوار

۳- ژیروسکوپ

٤- گاورنرهای مکانیکی

نیمسال دوم سال تحصیلی ۹۹-۹۸

بالانس استاتیکی و دینامیکی

فهرست دستورالعمل دستگاه بالانس استایک و دینامیک

هدف 1

مقدمه 1

شرح دستگاه 1

نحوه تنظیم محل قرارگیری بلوک ها بر روی محور 1

بالانس استاتیکی 2

بالانس دینامیکی 2

اجزای تشکیل دهنده دستگاه 2

هدف :

بررسی تعادل استاتیکی و دینامیکی اجسامی که دارای حرکت دورانی هستند و همچنین پیدا کردن محل وضعیت عضوهای مزبور.

مقدمه :

می توان شروع تکنولوژی بالانسینگ را به ابتدای پیدایش ماشینهای دوار مربوط دانست. محورهایی که با سرعت زیادی دوران می کنند باید به دقت بالانس شوند, درغیر این صورت محور تبدیل به یک منبع ارتعاش خواهد شد که در سرعت های بالا منجر به شکست و ایجاد حادثه خواهد شد. امروزه با تمام دقتی که در ساخت قطعات دوار بکار برده می شود، به ندرت اتفاق می افتد که قطعه بالانس باشد. در واقع در قسمت ساخت، زیاد مقرون به صرفه نیست که روی این مسئله دقیق شوند و بهتر است که قطعه بعد از ساخت بالانس گردد.

مسئله بالانس بودن به خصوص در توربین های گازی که با سرعت های بسیار بالا (درحدود 15000 تا 50000 دور در دقیقه) دوران می کنند, قابل توجه است و کوچکترین غیربالانسی در محورهای این توربین ها باعث حادثه بزرگ خواهد شد.

شرح دستگاه :

مجموعه دستگاه شامل یک محور فولادی بالانس است که بر روی فریم اصلی سوار شده است.

یک سر محور فولادی به موتور و انتهای دیگرمحور (شفت), داخل بلبرینگ که بر روی پایه ای سوار است, قرار می گیرد.

چهار عدد دیسک (بلوک), نیز جزئی از دستگاه بالانسینگ می باشند. بر روی هر یک از دیسک ها, یک سوراخ تعبیه شده است که برنجی هایی با جرم های مختلف درون آن قرار گرفته است. (به عنوان نامیزان). با باز کردن پیچ تثبیت پایه, انتهای محور آزاد شده و می توان دیسک ها را روی آن سوار کرد. دیسک ها به راحتی روی شفت بسته می شوند.

به منظور جابجا نمودن هر یک از دیسک ها، ابتدا باید پیچ سفت کننده، کمی باز شود. ضمناً لزومی ندارد که پیچ کاملاً باز شود. محل قرارگیری دیسک ها و زاویه قرارگیری جرم نامیزان به ترتیب توسط شاخص طولی و زاویه سنج قابل تنظیم است. برای خروج هر یک از دیسک ها پیچ سفت کننده کاملا باز خواهد شد و هر یک از دیسک ها از شیار انتهایی شفت خارج می شوند.

توسط فلکه پیچی (کلاچ)ابتدای محور, می توان از گردش محور در زمان تنظیم زاویه قرار گیری دیسک جلوگیری نمود. به منظور بررسی تعادل دینامیکی شفت, توسط یک کلاچ, شفت به موتور کوپل می شود.

نحوه تنظیم محل قرارگیری دیسک ها بر روی محور :

یک نمایانگر زاویه ای (زاویه سنج) و شاخص طولی، وضعیت زاویه ای و مکانی جرم نامیزان هر یک از دیسک ها را روی محور مشخص می کند. نحوه تنظیم محل قرارگیری دیسک ها به این ترتیب است که ابتدا فلکه پیچی ابتدای محور را باز نمایید تا محور (شفت) آزادانه دوران نماید. شاخص را در ابتدای محور (محل قرارگیری زاویه سنج یا همان صفر خط کش) قرار دهید. محور را حرکت دهید تا جاییکه عدد زاویه مورد نظر (مثلا صفر درجه) در مقابل شاخص قرار گیرد. در این حالت محور را با بستن فلکه پیچی ثابت نمایید. دیسک را حرکت دهید تا به فاصله طولی مورد نظر جهت نصب برسد. حال با محکم کردن پیچ ، دیسک را در جای خود ثابت نمایید. دیسک های دیگر نیز به همین ترتیب روی محور سوار می شوند. پس از نصب دیسک ها بر روی محور، فلکه پیچی را باز کنید تا محور بتواند آزادانه حرکت کند.

شعاع قرارگیری جرم های نامیزان در همه دیسک ها 40 mm است و مقدار آنها مطابق زیر است :

دیسک 1 : وزنه 16 گرمی

دیسک 2 : وزنه 26 گرمی

دیسک 3 : وزنه 34 گرمی

دیسک 3 : وزنه 38 گرمی

بالانس استاتیکی :

در حالت بررسی بالانس استاتیکی، پس از نصب بلوک ها و باز نمودن فلکه پیچی(کلاچ)، محور را کمی منحرف نمایید. به عبارت دیگر محور را با دست به اندازه چند درجه دوران داده و رها کنید. برای بالانس استاتیکی باید بتوان در هر موضع دلخواهی، محور را به حال سکون نگه داشت. اگر محور به موضع اولیه بازگشت از نظر استاتیکی بالانس نیست و باید زاویه قرارگیری حداقل یکی از دیسک ها را تغییر داد. توجه نمایید که در حالت بررسی بالانس استاتیک محور با موتور ارتباط نداشته باشد.

بالانس دینامیکی :

در حالت بررسی بالانس دینامیکی، شفت اصلی, توسط یک الکتروموتور به حرکت در می آید. جهت ایجاد ارتباط بین شفت و محور موتور، یک کلاچ تعبیه شده است که به راحتی و با دست این ارتباط برقرار می شود. با قرار دادن کلید on/off در حالت on ، و فشار دادن کلید سبز رنگ, موتور شروع به حرکت می کند و با برداشتن دست از روی کلید سبز رنگ، موتور از حرکت باز می ایستد. دور موتور ثابت است. در صورتی که سیستم از نظر دینامیکی بالانس نباشد، دستگاه به نوسان در می آید.

اجزای تشکیل دهنده دستگاه :

1- شاسی اصلی
2- الکتروموتور
3- محور فولادی بالانس
4- چهار عدد دیسک (بلوک) با جرم نامیزان

5- نمایانگر زاویه ای متصل به شاسی اصلی
6- شاخص اندازه گیری طول
7- کلاچ جهت انتقال قدرت از موتور به شفت (باید در حالت تست بالانس دینامیکی نصب شود).
8- کلید روشن و خاموش کردن دستگاه
9- کلید فشاری جهت روشن و خاموش کردن الکتروموتور

فهرست دستور آزمایش های دستگاه بالانس استایک و دینامیک

هدف 1

تئوری 1

روش انجام آزمایش 3

سوالات 5

هدف :

بررسی تعادل استاتیکی و دینامیکی اجسامی که دارای حرکت دورانی هستند و همچنین پیدا کردن محل وضعیت عضوهای مزبور.

تئوری :

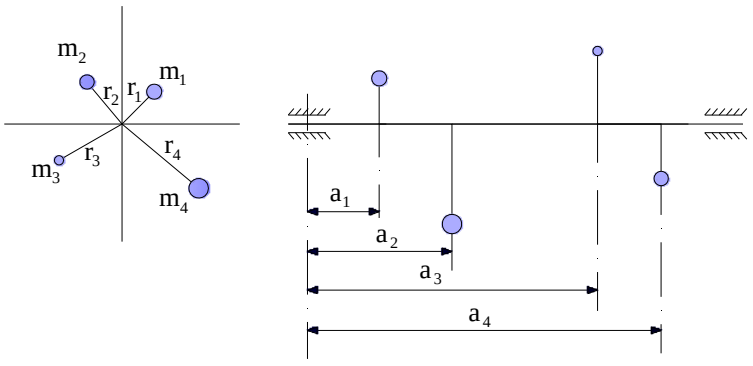
یک محور با جرم هایی که بر روی آن سوار شده, می تواند به صورت استاتیکی و یا دینامیکی بالانس باشد. اگر یک محور به صورت استاتیکی بالانس باشد, در آن صورت محور در هر سرعتی بدون ارتعاش قادر به چرخش خواهد بود.

الف) بالانس استاتیک

برای اینکه یک سیستم چرخان تعادل استاتیکی داشته باشد, لازم است که برآیند نیروهای اینرسی ناشی از دوران حول محور صفر باشد. برای این منظور باید مرکز جرم سیستم یا روتور بر روی محور دوران قرار داشته باشد. در صورتیکه یک سیستم شامل چند جرم مطابق شکل (1) داشته باشیم, شرط بالانس استاتیک به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum m_i r_i Cos\theta_i = 0$$
$$\sum m_i r_i Sin\theta_i = 0$$

که در آن روابط r فواصل جرمها از مراکز دوران و θ زاویه بستن جرمها نسبت به یک مرجع مشخص می باشد.

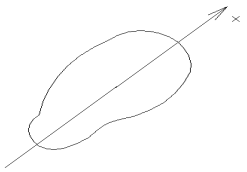


شکل (1)

ب) بالانس دینامیک

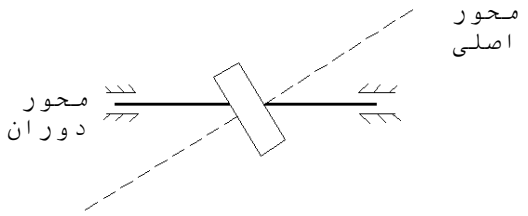
برای اینکه یک سیستم تعادل دینامیکی داشته باشد, لازم است علاوه بر نیروهای اینرسی, کوپل های ناشی از این نیروها نیز در حال تعادل باشند. برای این منظور لازم است علاوه بر اینکه مرکز جرم بر روی محور دوران قرار می‌گیرد، محور دوران، محور اصلی سیستم باشد. جسم زیر را که حول محور x در حال دوران می‌باشد را در نظر بگیرید. اگر

ممانهای اینرسی حاصلضرب $I_{xy} = I_{xz} = 0$ باشد، محور x که محور دوران جسم است، محور اصلی سیستم نیز خواهد بود.



شکل (2)

حال دیسک زیر که به طور مایل بر روی محور دوران قرار گرفته است را در نظر بگیرید. مرکز جرم این دیسک بر روی محور دوران می‌باشد، اما محور آن محور اصلی نمی‌باشد.



شکل (3)

برای سیستمهایی که شامل چند جرم می‌باشند شرط بالانس دینامیکی به‌صورت زیر در خواهد آمد:

$$\sum m_i r_i Cos\theta_i = O \qquad \sum m_i r_i aCos\theta_i = O$$
$$\sum m_i r_i Sin\theta_i = O \qquad , \qquad \sum m_i r_i aSin\theta_i = O$$

که a فاصله هر جرم از یک مبدا دلخواه در راستای محور می‌باشد. برای تحلیل مسائل بالانس محورهـای دوار دو روش محاسباتی و ترسیمی موجود است که در اینجا به ذکر هر دو می پردازیم.

1)روش محاسباتی

ابتدا نیروهای گریز از مرکز وارد بر جرم ها را به دو مولفه افقی و عمودی تجزیه می کنیم. برایند کلیه نیروها بایـد صـفر باشد.

$$\sum F_x = 0$$
$$\sum F_y = 0$$

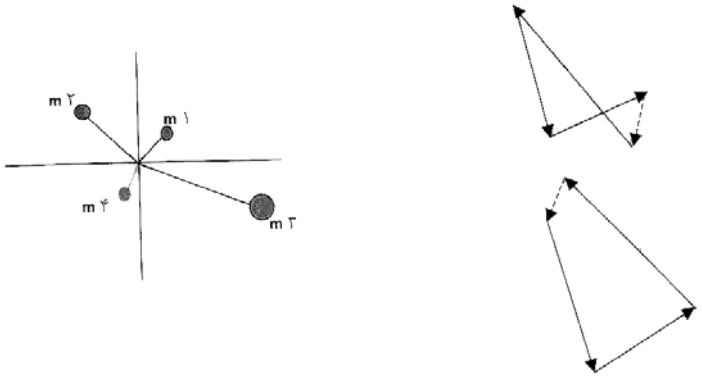
سپس گشتاورهای حاصل از هر دو گروه نیروهای افقی یا عمودی حول هر نقطه باید باهم در حال تعادل باشند. در واقع باید مجموع گشتاورها، حول محور x و حول محور y برابر صفر باشد:

$$\sum F_i a_i \sin\theta_i = 0$$
$$\sum F_i a_i \cos\theta_i = 0$$

که F در روابط فوق نیروی گریز از مرکز است و a و θ به ترتیب فاصله و زاویه جرم ها نسبت به مبدأ مختصات می باشند.
باتوجه به اینکه نیروی اینرسی برابر $F_i = m_i r_i \omega^2$ می باشد، بنابراین Fi متناسب با $(m_i r_i)$ می باشند. با مشخص بودن موقعیت زاویه ای دوتا از جرمها می توان موقعیت زاویه ای دو جرم دیگر را نیز پیدا نمود. همچنین اگر موقعیت مکانی دو جرم نیز معلوم باشد, می توان محل قرارگیری دو جرم دیگر را نیز بوسیله روابط بالا تعیین کرد.

2)روش ترسیمی

شکل (4) استفاده از روش ترسیمی را برای یافتن جرم متعادل کننده (بالانس کننده) سیستم نشان می دهد. چنانکه در شکل مشاهده می شود کافی است, برای گشتاور مربوط به هر جرم با انتخاب مقیاس مناسب یک بردار به همان بزرگی و در جهت قرارگیری جرم (زاویه نسبت به مبدأ مشخص) رسم کرد. ترتیب رسم بردارها می تواند دلخواه باشد ونهایتاً مجموعه سه بردار و بردار مربوط به گشتاور در جرم بالانس کننده سیستم یک چند ضلعی بسته را می سازد.
به این ترتیب زاویه بستن جرم مجهول سیستم مشخص می گردد. به عنوان مثال در شکل زیر جرم 4 باید در جهتی که با خط چین نشان داده شده بسته شود که با استفاده از هرکدام از دوچند ضلعی رسم شده , بدست آمده است.



شکل (4)

پس از پیدا کردن مقادیر زاویه مربوط به دو جرم متعادل کننده, در این روش (ترسیمی) احتیاجی نیست که بردارهای گشتاور به اجزای آنها تجزیه شوند.
بردارهایی به اندازه های $m_n r_n a_n ... m_2 r_2 a_2, m_1 r_1 a_1$ که متناسب با گشتاورهای $F_n a_n ... F_2 a_2, F_1 a_1$ و موازی با بردارهای $m_i r_i$ می باشند، رسم می کنیم. درست همانطور که در حالت بالانس استاتیکی عمل نمودیم. باید توجه داشت که بیشتر از دو مجهول را با استفاده از این روش نمی توان یافت.

روش انجام آزمایش :

با توجه به برابر بودن شعاع قرارگیری جرم نامیزان در چهار بلوک و اینکه طرف دوم روابط برابر صفر می‌باشد، روابط بالانس استاتیکی و دینامیکی به صورت زیر در می‌آید :

$$\sum_{i=1}^{n} m_i Cos\theta_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_i Sin\theta_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_i a_i Sin\theta_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_i a_i Cos\theta_i = 0$$

1. دو زاویه از چهار زاویه θ_1 و θ_2 را فرض کرده و ازطریق ترسیمی و با کمک از پرگار حلقه بسته را ترسیم و دو زاویه دیگر را بدست آورید. $(\theta_1 = 0°,\ \theta_2 = 90°)$

2. با فرض دو مقدار برای دو فاصله a_1 تا a_4 و با مقادیر θ_i بدست آمده از قسمت قبل, دوفاصله دیگر را به کمک رابطه بالانس دینامیکی بدست آورید.

توجه : اختلاف بزرگترین فاصله a و کوچکترین آنها نباید از طول محور بیشتر و کمترین اختلاف بین فواصل a نباید از ضخامت وزنه ها (حدود 1.3 cm) کمتر گردد.

جدول (2)

شماره وزنه	1	2	3	4
a				
θ				

3. وزنه‌ها را طبق مقادیر بدست آمده a در روی محور دستگاه ببندید و بالانس بودن استاتیکی و دینامیکی سیستم را کنترل نمایید (برای بالانس استاتیکی باید بتوان در هر موضع دلخواهی، محور را به حال سکون نگه داشت و برای بالانس دینامیکی پس از روشن کردن موتور، از عدم لغزش محور, می توان به بالانس دینامیکی بودن پی برد). در صورتیکه سیستم بالانس نشده باشد, علت را جستجو کند.

4. زوایای بدست آمده از طریق ترسیمی را به روش تحلیلی از روابط فوق بدست آورده و با مقادیر بدست آمده از طریق ترسیمی، در جدول (3) تنظیم و مقایسه نمایید.

$$\sum m_i Cos\theta_i = 0$$
$$\sum m_i Sin\theta_i = 0$$

راهنمایی :

$$Sin\theta = \frac{2tg\theta/2}{1+tg^2\theta/2} \quad , \quad Cos\theta = \frac{1-tg^2\theta/2}{1+tg^2\theta/2}$$

جدول (3)

------	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	a_1	a_2	a_3	a_4
ترسیمی								
تحلیلی								

سوالات :

1. آیا اگر یک سیستم از نظر استاتیکی بالانس نباشد می‌تواند از نظر دینامیکی بالانس باشد.
2. می‌دانید که معمولا" تایر اتومبیل را فقط از نظر استاتیکی بالانس می‌کنند، علت را بیان کنید.
3. آیا همیشه می‌توان با افزودن یا کاستن فقط یک جرم در یک صفحه در یک روتور نابالانس، آن را بالانس دینامیکی نمود.
4. با توجه به سوال فوق بگویید اینکه گفته می‌شود که یک روتور در یک صفحه یا دو صفحه نابالانسی دارد به چه معناست.

سرعت بحرانی در محورهای دوار

فهرست دستورالعمل دستگاه دور بحرانی

هدف 1

مقدمه 1

شرح دستگاه 1

روش کار با دستگاه 2

هدف :

بررسی ارتعاشات عرضی تیرها و بدست آوردن سرعت بحرانی محورها

مقدمه :

هرگاه محوری تحت بارگذاری قرار گیرد, مرکز جرم آن از امتداد مراکز یاتاقانهایش خارج خواهد شد. حال اگر این محور شروع به چرخش کند به ازای سرعت یا سرعت های دورانی معین تغییر شکلهای بزرگی در آن بوجود می آید. این پدیده را چرخش و سرعت های مربوطه را دورهای بحرانی می گویند. این عدم انطباق معمولا در همه سیستم ها حتی در سیستم های دقیق نیز وجود دارد. هنگامی که محور شروع به چرخش می کند, مرکز جرم روی مسیر دایره ای حرکت کرده و آن حرکت, زمانی پایدار خواهد بود که نیروی مخالفت کننده با نیروی جانب مرکز $mr\omega^2$ تامین گردد. این نیرو توسط خمش محور تامین خواهد شد و لذا تغییر فرم محور تا جایی ادامه پیدا می کند که نیروی الاستیک تولید شده در آن برابر نیروی جانب مرکز حاصل از حرکت دورانی شود .

شرح دستگاه :

دستگاه دارای یک شاسی است که روی آن یک الکتروموتور نصب شده است. شفت موتور به یک سه نظام متصل می باشد که وظیفه آن گرفتن یک سر نمونه آزمایش (به عنوان تکیه گاه شماره 1) می باشد. نمونه آزمایش میله ای از جنس استیل به طول *105 cm* و قطر *6 mm* می باشد.

دو پایه شماره 2 و 3 جهت جلوگیری از انحراف بیش از حد میله در نظر گرفته شده است و به عنوان محافظ عمل می نماید. پایه انتهایی (شماره 4) به وسیله پیچ استقرار در جای خود ثابت می شود. دو وزنه با جرمهای *500 gr* و 500 گرم در محل های دلخواه نصب می شوند. دستگاه در جهت طولی مدرج شده است که با استفاده از آن, فاصله بین پایه ها و محل نصب وزنه ها، اندازه گیری می شود.

محور به وسیله الکتروموتور به گردش در می آید. بوسیته ولوم کنترل دور می توان دور موتور را تنظیم کرد و در نمایشگر مربوطه بر حسب rpm مشاهده کرد.

روش کار با دستگاه :

1- پس از اتصال دستگاه به جریان برق شهر, توسط کلید *on/off* , جریان برق در دستگاه برقرار می گردد.

2- جهت نصب نمونه، سه نظام توسط آچار سه نظام باز شده، میله پس از عبور از یاتاقان های پایه ها, توسط آچار سه نظام به موتور کوپل می شود.

3- همزمان با عبور میله از میان یاتاقان ها, وزنه یا وزنه ها در محل مورد نظر قرار داده شده و بر روی میله ثابت می شود. توجه شود که وزنه ها باید طوری بین پایه ها قرار گیرند که فاصله وزنه از پایه محافظ 2 یا 3, حداکثر *2 cm* باشد.

4- با چرخاندن ولوم دورکنترل ،دور موتور تنظیم می شود.

5- جهت خاموش کردن دستگاه کلید on/off را بزنید.

فهرست دستور آزمایش های دور بحرانی

هدف 1

تئوری 1

روش انجام آزمایش 3

خواسته های آزمایش 4

سوالات 4

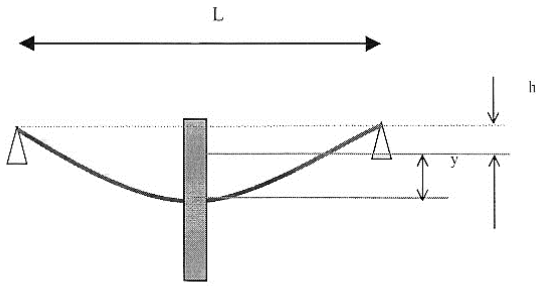
نمونه محاسبات 5

هدف :

بررسی ارتعاشات عرضی تیرها و بدست آوردن سرعت بحرانی محورها

تئوری :

الف) جرم متمرکز در وسط تیر



شکل (1)

در این قسمت افت استاتیکی محور ناشی از دیسک M را عامل خروج از مرکز جرم, در نظر می گیریم. با توجه به شکل (1) داریم :

$$F = M\omega^2(h+y) \qquad (1)$$

h : انحراف استاتیکی

y : انحراف دینامیکی

ω : سرعت زاویه ای

$$F = k_b.y \qquad (2)$$

که K_b ضریب سختی محور است. با ترکیب روابط (1) و (2) خواهیم داشت :

$$\frac{y}{h} = \frac{1}{(k_b / M\omega^2)-1} \qquad (3)$$

باتوجه به رابطه فوق هرگاه $\frac{K_b}{M\omega^2} = 1$ باشد, آنگاه $y \to \infty$ و سرعت زاویه ای برابر سرعت زاویه ای بحرانی خواهد بود که از رابطه زیر به دست می آید :

$$\omega_c = \sqrt{\left(\frac{K_b}{M}\right)} \qquad (4)$$

هرگاه ω برابر ω_c گردد, پدیده چرخش اتفاق می افتد. حال با توجه به روابط مقاومت مصالح داریم :

$$h = \frac{MgL^3}{48EI} \to K_b = \frac{48EI}{L^3} \qquad (5)$$

که در آن E مدول الاستیسیته میله است و I ممان اینرسی سطح مقطع میله می باشد که از رابطه $I = \frac{\pi}{64} D^4$ بدست می آید. با جایگذاری K_b در رابطه $\omega_c = \sqrt{\left(\frac{K_b}{M}\right)}$ داریم :

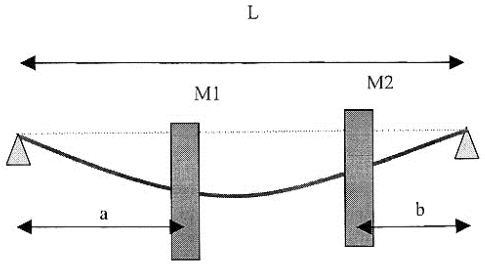
$$\omega_c = \sqrt{\frac{48EI}{ML^3}} \quad \left(rad/s\right) \qquad (6)$$

$$N_c = 1.102\sqrt{\frac{EI}{ML^3}}(rps) \equiv 66.159\sqrt{\frac{EI}{ML^3}}(rpm) \qquad (7)$$

rps : دور بر ثانیه

rpm : دور بر دقیقه

ب) دو جرم در فواصل a و b



شکل (2)

در اینجا برای محاسبه دور بحرانی محور از روش ریلی استفاده می کنیم. از مقاومت مصالح داریم :

زمانیکه بار در b وارد شود :

$$y(x) = \frac{Wbx}{6EIL}\left(L^2 - x^2 - b^2\right) \qquad x \le (L-b) \qquad (8)$$

با توجه به رابطه بالا برای محاسبه انحراف های استاتیکی در فواصل a و b از دو سر تیر داریم :

$$\begin{cases} y_1 = y_1' + y_1'' \\ y_2 = y_2' + y_2'' \end{cases} \qquad (9)$$

انحراف استاتیکی در فاصله a ناشی از جرم $y_1' = M_1$

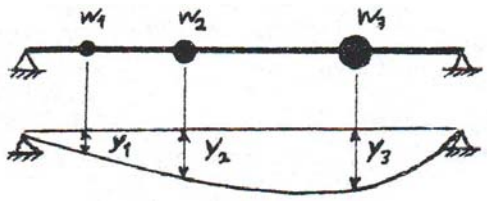
انحراف استاتیکی در فاصله b ناشی از جرم $y_2' = M_2$

انحراف استاتیکی در فاصله a ناشی از جرم $y_1'' = M_2$

انحراف استاتیکی در فاصله b ناشی از جرم $y_2'' = M_1$

برای بررسی و محاسبه فرکانس طبیعی مدهای اول ارتعاشی یک سیستم دارای هر تعداد جرم از روش رایلی استفاده می کنیم. رایلی فرض کرد که مد اول ارتعاش منطبق با همان شکل تیر در وضعیت استاتیکی می باشد.

تیری مانند شکل زیر فرض کنید :



شکل (3)

با استفاده از روش انرژی , فرکانس طبیعی اول را به دست می آوریم :

$$U_{\max} = T_{\max}$$

انرژی پتانسیل حداکثر در حالت استاتیکی: $U_{\max} = \frac{g}{2}\left(M_1 Y_1 + M_2 Y_2 + M_3 Y_3\right)$

انرژی جنبشی ماکزیمم در حالت هارمونیک: $T_{\max} = \frac{\omega_n^{\,2}}{2}\left(M_1 Y_1^2 + M_2 Y_2^2 + M_3 Y_3^2\right)$

بنابراین برای هر تعداد جرم , فرکانس مد اول مطابق رابطه فوق به دست می آید :

$$\omega_1^2 = \frac{g \sum M_i y_i}{\sum M_i y_i^2} \qquad (10)$$

اگر فواصل a و b و جرمهای M_1و M_2 برابر باشد, برای ω_c داریم :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{y}} \qquad (11)$$

و $y = y_1 = y_2$ انحراف های استاتیکی میله در فواصل a و b می باشد.

روش انجام آزمایش :

ابتدا دستگاه را به برق وصل کنید و آزمایش را مطابق یکی از موارد الف, ب و ج تنظیم کرده و سپس توسط ولوم کنترل دور, دور را افزایش دهید.

الف) دیسک های به جرم M را در وسط شفت قرار داده فاصله بین یاتاقان ها راتنظیم نموده (حداقل فاصله بین پایه های 1و2 و نیز 3 و 4 , 4 سانتیمتر می باشد.) و سپس موتور را روشن کرده و به آرامی دور را زیاد می کنیم تا دور بحرانی شفت مشخص شود.

جدول (1) $M = \ldots .$

$L(cm)$	$a(cm)$	$N_c(rpm)$ تجربی	$N_c(rpm)$ تئوری

ب) دیسک های به جرم M را در فواصل مساوی از پایه های 1 و 4 قرار داده و دور بحرانی شفت را به وسیله دورسنج از دستگاه بخوانید : $a = b = 14cm$

$M_1 = M_2 = \ldots .$ جدول (2)

$L(cm)$	$a(cm)$	$b(cm)$	$N_c(rpm)$ تجربی	$N_c(rpm)$ تئوری

ج) دیسک هایی به جرم M را در فواصل $a = 14cm$ و $b = 24cm$ از پایه های 1 و 4 قرار داده و دور بحرانی شفت را از دستگاه بخوانید.

$M_1 = M_2 = \ldots .$ جدول (3)

$L(cm)$	$a(cm)$	$b(cm)$	$N_c(rpm)$ تجربی	$N_c(rpm)$ تئوری

خواسته های آزمایش :

1. مقادیر دور بحرانی در قسمتهای الف , ب و ج را از روش تئوری محاسبه کرده و مقادیر آنرا با مقادیر بدست آمده از بالا مقایسه کنید و درصد خطا را بدست آورید. (برای محاسبات طول شفت را فاصله بین پایه های 1 و 4 در نظر بگیرید.)
2. با در نظر گرفتن اینکه طول شفت فاصله بین پایه های 1 و 4 است, محاسبات را انجام داده و مقادیر بدست آمده را با مقادیر عملی مقایسه کنید و درصد خطا را بدست آورید.
3. به نظر شما شرایط سوال اول برای محاسبات تئوری درست می باشد یا سوال دوم ؟ دلیل خود را بیان کنید.

سوالات آزمایش :

1. سرعت بحرانی چیست؟
2. تاثیر قطر محور روی سرعت بحرانی چیست؟
3. عوامل بوجود آمدن سرعت بحرانی چیست؟
4. آیا یک شفت دوار تنها یک دور بحرانی دارد؟ درصورتیکه پاسخ شما منفی است برای محاسبه دورهای بحرانی دیگر چه راهی پیشنهاد می کنید؟

نمونه محاسبات :

حالت الف)

$$\omega_c = \sqrt{\frac{48EI}{ML^3}} \quad \left(rad/s\right)$$

$$N_c = 1.102\sqrt{\frac{EI}{ML^3}}\left(rps\right) \equiv 66.159\sqrt{\frac{EI}{ML^3}}\left(rpm\right)$$

$$M = 0.5\,kg$$
$$EI = 12.723$$
$$L = 0.6\,m$$

$$\Rightarrow N_c = 66.159\sqrt{\frac{12.723}{(0.5)(0.6)^3}} = 718 \quad (RPM) \equiv 12.6\ (Hz)$$

حالت ب)

$$M_1 = M_2 = 0.5\,kg$$
$$EI = 12.723$$
$$L = 0.6\,m$$
$$a = 14\ cm$$
$$b = 14\ cm$$

$$y(x) = \frac{Wbx}{6EIL}\left(L^2 - x^2 - b^2\right) \qquad x \le (L-b)$$

$$y_1' = \frac{(0.5)(9.81)(0.14)(0.14)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.14)^2 - (0.14)^2\right] = 0.000673\,m = 0.673\,mm$$

$$y_2' = \frac{(0.5)(9.81)(0.14)(0.46)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.46)^2 - (0.14)^2\right] = 0.000888\,m = 0.888\,mm$$

$$y_1'' = \frac{(0.5)(9.81)(0.14)(0.46)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.46)^2 - (0.14)^2\right] = 0.000888\,m = 0.888\ mm$$

$$y_2'' = \frac{(0.5)(9.81)(0.14)(0.14)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.14)^2 - (0.14)^2\right] = 0.000673\,m = 0.673\,mm$$

$$y_1 = y_1' + y_1'' = 1.561\ mm$$

$$y_2 = y_2' + y_2'' = 1.561\ mm$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(9.81)(0.5)(1.561+1.561)(10)^{-3}}{(0.5)((1.561)^2+(1.561)^2)(10)^{-6}}} = \sqrt{\frac{30626.82}{4.873}} = 79.278\ \left(rad/s\right)$$

$$\equiv 757\ (RPM) \equiv 13.3\ (HZ)$$

حالت ج)

$M_1 = M_2 = 0.5\,kg$
$EI = 12.723$
$L = 0.6\,m$
$a = 14\ cm$
$b = 24\ cm$

$$y(x) = \frac{Wbx}{6EIL}\left(L^2 - x^2 - b^2\right) \qquad x \le (L-b)$$

$$y_1' = \frac{(0.5)(9.81)(0.24)(0.14)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.14)^2 - (0.24)^2\right] = 0.001017\,m = 1.017\,mm$$

$$y_2' = \frac{(0.5)(9.81)(0.24)(0.36)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.36)^2 - (0.24)^2\right] = 0.001598\,m = 1.598\,mm$$

$$y_1'' = \frac{(0.5)(9.81)(0.14)(0.46)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.46)^2 - (0.14)^2\right] = 0.000888\,m = 0.888\ mm$$

$$y_2'' = \frac{(0.5)(9.81)(0.14)(0.24)}{(6)(0.6)(12.723)}\left[(0.6)^2 - (0.24)^2 - (0.14)^2\right] = 0.001017\,m = 1.017\,mm$$

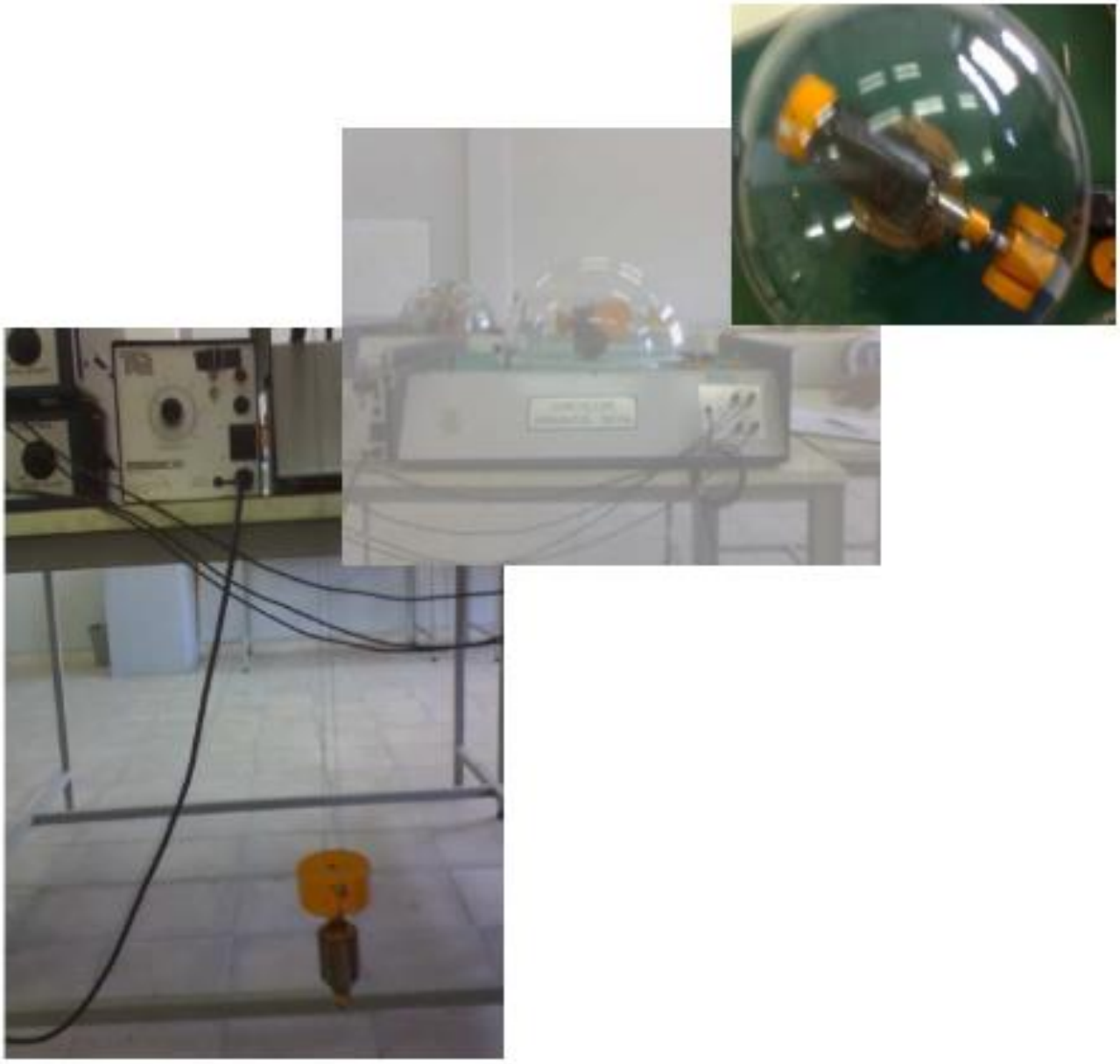
$y_1 = y_1' + y_1'' = 1.905\ mm$

$y_2 = y_2' + y_2'' = 2.615\ mm$

$$\omega_1^2 = \frac{g\sum M_i y_i}{\sum M_i y_i^2}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(9.81)(0.5)(1.905+2.615)(10)^{-3}}{(0.5)((1.905)^2+(2.615)^2)(10)^{-6}}} = 62.96\ \left(rad/s\right) \equiv 601.24\ (RPM) \equiv 10.58\ (HZ)$$

ژیروسکوپ



فهرست دستورالعمل دستگاه ژیروسکوپ

هدف 1

مقدمه 1

شرح دستگاه 1

اجزای تشکیل دهنده دستگاه 1

هدف :

نشان دادن خاصیت ژیروسکوپی و تحقیق رابطه بین گشتاور وارد شده و سرعت های دورانی

مقدمه:

اگر جسمی حول یک محور دوار در گردش باشد و راستای محور دوران تغییر پیدا کند از خود مقاومتی نشان می‌دهد که به آن اثر ژیروسکوپی می‌گویند. کاربردهای مهم اثر ژیروسکوپی در هواپیماها، کشتی ها، سیستم های کنترل موشک ها و مسافرت های فضایی بوده که در آنجا از ژیروسکوپ برای احساس حرکت دورانی یک جسم استفاده می شود. نیروی ناشی از اثرات ژیروسکوپی، گاهی می بایست در طراحی ماشین ها در نظر گرفته شود. این نیرو ها در موقع دور زدن اتومبیل ها در یاتاقان های موتور یک اتومبیل، در توربین های زیر دریایی ها به هنگام غوطه ور شدن کشتی در یک دریای سنگین و در شفت موتور یک هواپیمای جت، موقعی که تغییر جهت می دهد، بروز می کند.

شرح دستگاه :

دستگاه از یک مجموعه دوار تشکیل شده است که می تواند به طور همزمان در دو جهت سرعت زاویه ای اعمال کند. بـه وسیله وزنه متحرک روی محور افقی، نیز می توان گشتاوری معادل گشتاور ژیروسکوپی اعمال نمود .

سرعت دوران هر یک از موتورها، توسـط کنترلـر دور روتـور و کنترلـر دور قـاب، قابـل تنظـیم بـوده و مقـدار آن توسـط نمایشگرهای دیجیتال بر حسب "دور بر دقیقه" (RPM) قابل مشاهداست.

نحوه کار به این صورت است که ابتدا جریان برق توسط کلید "روشن/خاموش" دستگاه، برقرار می شـود. قبـل از شـروع آزمایش با تغییر محل وزنه بر روی محور، تعادل محور برقرار می شود. سپس با جابجایی وزنه بر روی محور، گشتاور مورد نظر اعمال می گردد. در این لحظه، زاویه قرارگیری محور افقی نسبت به حالت تعادل، متفاوت است.با تغییـر دور روتـور و قاب، طبق دستور آزمایش، تعادل محور برقرار می شود. در واقع دور موتورها به نحوی تغییر می کند که محور افقی مجددا در حالت تعادل قرار گیرد.

اجزای تشکیل دهنده دستگاه:

1. موتور گرداننده حول محور افقی
2. قاب حامل موتور گرداننده محور افقی
3. موتور گرداننده قاب حول محور عمودی
4. مجموعه روتور و دیسک
5. وزنه تعادل متحرکی به جرم *100 gr* که بر روی میله قاب قرار گرفته است.
6. کنترلر های دور روتور و قاب بر حسب rpm
7. نمایشگرهای دیجیتال دور روتور و قاب بر حسب rpm
8. کلید روشن و خاموش کردن دستگاه
9. قاب محافظ

در ضمن، فاصله بین شیارهایی که بر روی میله روتور درج شده است $5\ mm$ می باشد.

همچنین قطر دیسک مدور 100 mm است.

فهرست دستور آزمایش های ژیروسکوپ

هدف 1

تئوری 1

نحوه انجام آزمایش 3

مرحله اول آزمایش 3

مرحله دوم آزمایش..... 4

ا لف : بررسی تغییرات دورانی قاب به ازای تغییرات سرعت دورانی روتور در گشتاور ثابت 4

ب : بررسی تغییرات گشتاور به ازای تغییرات سرعت دورانی قاب (ω_p) در ω_r ثابت 5

ج : بررسی تغییرات گشتاور به ازای تغییرات سرعت دورانی روتور (ω_r) در ω_p ثابت 5

سوالات..... 6

هدف :

نشان دادن خاصیت ژیروسکوپی و تحقیق رابطه بین گشتاور وارد شده و سرعتهای دورانی

تئوری:

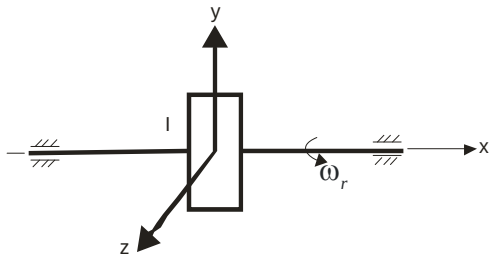
برای یک جسم اگر دو دوران حول دو محور مختلف داشته باشیم، هر یک از این دوران ها، یک تغییر اندازه حرکت زاویه‌ای ایجاد می‌کند. پس گشتاور وارده برابر با تغییر اندازه حرکت زاویه‌ای می‌باشد :

گشتاور لازم $\vec{T} = \frac{d\vec{H}}{dt}$

اندازه حرکت زاویه‌ای $\vec{H} = I\vec{\omega}$

شکل (1) را در نظر بگیرید که جرمی به ممان اینرسی I حول محور ثابت x با مقدار سرعت دورانی ثابت ω_r گردش میکند :

$\vec{\omega}_r = \omega_r \vec{i}$



شکل (1)

طبق روابط بالا داریم :

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}}{dt} = I\frac{d\vec{\omega}_r}{dt} = I.\omega_r \frac{d\vec{i}}{dt} = 0$$

چون $\frac{d\vec{i}}{dt} = 0$ می‌باشد و I ممان اینرسی سیستم است، بنابراین $\vec{T} = 0$ است و جسم بدون هیچ گشتاوری به حرکت خود ادامه میدهند. حال اگر همان سیستم قبل در درون یک قاب قرار داشته باشد که قاب حول محور دیگری در گردش باشد (شکل 2)، به عبارت دیگر مقدار سرعت زاویه‌ای ω_r ثابت ولی جهت آن تغییر کند داریم :

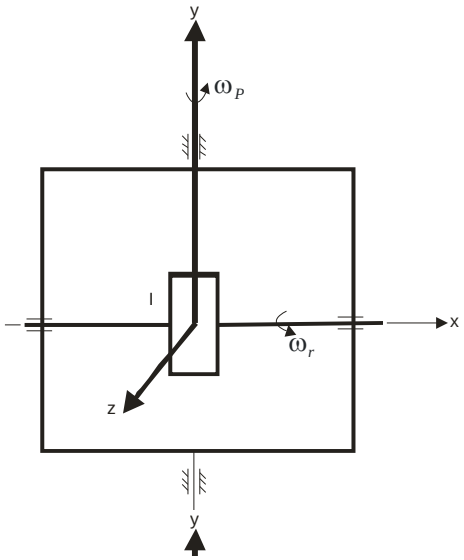
سرعت زاویه‌ای روتور $\vec{\omega}_r = \omega_r \vec{i}$

سرعت زاویه‌ای قاب $\vec{\omega}_p = \omega_p \vec{j}$

$$\vec{T} = I\frac{d\vec{\omega}_r}{dt} = I\omega_r \frac{d\vec{i}}{dt}$$

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{\omega}_p \times \vec{i}$$

$$\vec{T} = I\omega_r\left(\vec{\omega}_p \times \vec{i}\right) = I\omega_r\omega_p\left(\vec{j} \times \vec{i}\right) = -I\omega_r\omega_p\,\vec{k}$$



شکل (2)

این گشتاور، گشتاوری است که باید به قاب اعمال شود تا بتواند حرکت مزبور را انجام دهد. (در این دستگاه توسط وزنه اعمال می شود). عکس‌العمل گشتاور فوق گشتاور ژیروسکوپی است :

گشتاور ژیروسکوپی $\vec{T'} = -\vec{T} = I\omega_r\omega_p\,\vec{k}$

$$\vec{T'} = -I\left(\vec{\omega}_p \times \vec{\omega}_r\right) = I\omega_r\omega_p\,\vec{k}$$

در این روابط ω_r, ω_p باید بر حسب rad/s استفاده شوند.

نحوه انجام آزمایش

الف : بررسی تغییرات دورانی قاب به ازای تغییرات سرعت دورانی روتور در گشتاور ثابت

1-ابتدا وزنه تعادل متحرک را که بر روی میله قاب قرار گرفته است در وضعیت تعادل قرار دهید، به طوری که مجموعه کاملاً به صورت افقی قرار گیرد. شیار محل مورد نظر را به خاطر بسپارید.

2-سپس با استفاده از پیچ وزنه آن را آزاد کرده و به اندازه مثلاً 2 شیار وزنه را جابجا نمایید. در این حالت گشتاور اعمالی به سیستم بدین صورت محاسبه می گردد.

$T=R.W\ \ (N.m)$ $\qquad\qquad$ $R=2*5=10\ mm$

3-دستگاه را روشن نمایید. سرعت روتور را در هر مرحله بر روی عدد دلخواهی قرار دهید و سپس سرعت قاب (ω_p) را به حدی برسانید تا محور روتور به صورت افقی قرار گیرد. مقادیر ω_r و ω_p را در جدول (4) یادداشت نمایید.

4-پس از انجام آزمایش موتور ها را خاموش نمایید.

5-مقدار $\frac{1}{\omega_p}$ را از دو طریق آزمایشی و تئوری محاسبه نمایید:

$$\frac{I}{\omega_p} = \frac{I\omega_r}{T}$$ تئوری

$$\frac{I}{\omega_p} = \frac{60}{2\pi\ N_p}$$ آزمایشی (N : دور بر دقیقه)

6-مقدار درصد خطا را محاسبه کرده و جدول (4) را تکمیل نمایید :

$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{مقدار آزمایشی} - \text{مقدار تئوری}}{\text{مقدار تئوری}} * 100$$

جدول (4)

$\omega_r(rpm)$					
$\omega_p(rpm)$					
$1/\omega_p$ آزمایشی					
$1/\omega_p$ تئوری					
(٪) خطا					

7-نمودار $\frac{1}{\omega_p}$ را بر حسب ω_r برای دو حالت آزمایشی و تئوری در یک دستگاه مختصات رسم نمایید.

8-معادله بهترین خط را بدست آورید و نمودارهای فوق را با یکدیگر مقایسه نمایید و علت تفاوت را بیان نمایید.

ب : بررسی تغییرات گشتاور به ازای تغییرات سرعت دورانی قاب (ω_p) در ω_r ثابت.

1- سرعت دورانی روتور را روی عددی ثابت نمایید.

2- به ازای گشتاورهای مختلف که با قرار دادن وزنه در نقاط مختلف روی محور، در هر مرحله اعمال میشود، مقدار ω_p و سپس گشتاورهای آزمایشی و تئوری را محاسبه نموده و جدول (5) را تکمیل کنید.

R مطابق مرحله قبل محاسبه می گردد.

$T = W.R\ \ (N.m)$ آزمایشی

$T = I\omega_p\omega_r\ \ (N.m)$ تئوری

جدول (5) $\omega_r = \ldots . (rpm)$

$R\ (mm)$	5	10	15	20
T آزمایشی $(N.m)$				
T تئوری $(N.m)$				
$\omega_P\ (rpm)$				

3- نمودار T بر حسب ω_p را در دو حالت آزمایشی و تئوری در یک دستگاه مختصات رسم و دو نمودار فوق را با یکدیگر مقایسه و علت تفاوت را بیان نمایید.

ج : بررسی تغییرات گشتاور به ازای تغییرات سرعت دورانی روتور (ω_r) در ω_p ثابت

1- سرعت دورانی قاب را روی عددی تنظیم کنید.
2- همانند قسمت الف، با تغییر محل وزنه، گشتاورهای مختلف را اعمال کنید و جدول (6) را تکمیل نمایید.

جدول (6) $\omega_p = \ldots . (rpm)$

$R\ (mm)$	5	10	15	20
T آزمایشی $(N.m)$				
T تئوری $(N.m)$				
$\omega_r\ (rpm)$				

3- نمودار T بر حسب ω_r را در دو حالت آزمایشی و تئوری در یک دستگاه مختصات رسم نموده و دو نمودار فوق را با یکدیگر مقایسه نمایید و علت تفاوت را بیان کنید.

سوالات :

1- میدانیم که اگر دوچرخه ساکنی را رها نماییم از حالت تعادل خارج شده و به زمین می‌افتد ولی اگر دوچرخه‌ای را در حال حرکت رها نماییم، تعادل خود را حفظ می‌کند، علت را با توضیح کامل بیان نمایید.

2- چند مورد از موارد استفاده ژیروسکوپ را برای کنترل حرکت ها بیان نمایید.

گاورنرهای مکانیکی

فهرست دستورالعمل دستگاه گاورنر

هدف 1

مقدمه 1

شرح دستگاه 1

هدف :

- بررسی سیستم‌های فرمان دهنده مکانیکی و اصول کار آن‌ها.
- شناخت و مشاهده کاربردهای نیروی گریز از مرکز.

مقدمه:

گاورنر وسیله ای است که سرعت یک موتور را بدون توجه به تغییرات بار روی موتور، یکنواخت نگاه می دارد. یک موتور فاقد گاورنر، با افزایش بار روی آن، آهسته عمل می کند و برای بازگرداندن آن به سرعت اصلی، سوخت بیشتری نیاز است. از طرفی، یک گاورنر (با کنترل سوخت رسانی به آن) می تواند از کارکردن خیلی سریع یا خیلی آهسته موتور جلوگیری کند.

شرح دستگاه :

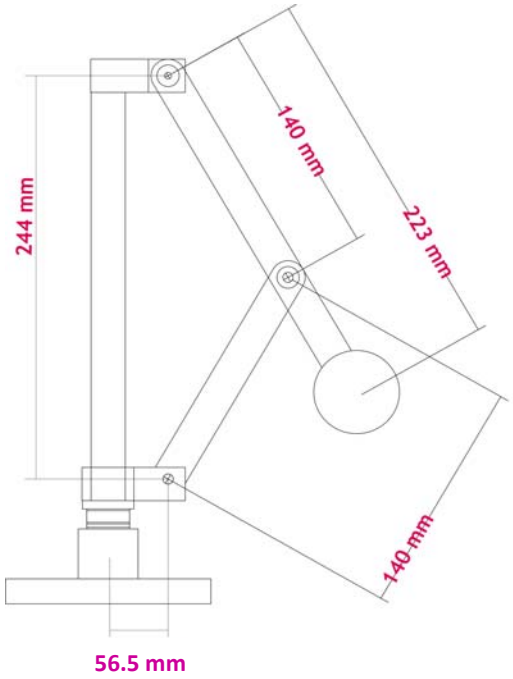
دستگاه شامل دو نوع گاورنر پرتر و پروئل می باشد که به یک موتور محرک با قابلیت تغییر دور کوپل می شوند.

اگر گاورنر دلخواه روی دستگاه نصب نشده بود ،برای نصب گاورنر دلخواه باید پیچ های شصتی روی گاورنر نصب شده را باز کرد و گاورنر دلخواه را جایگزین آن نمود و مجددا پیچ های شصتی را محکم کرد.

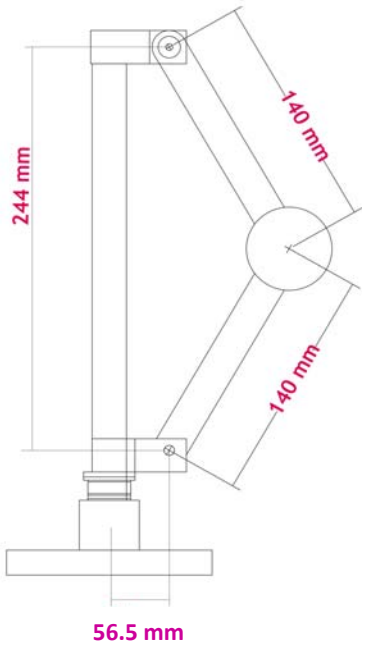
سرعت دوران گاورنرها به وسیله ولوم کنترل دور مربوطه، تنظیم شده و توسط نمایشگر دیجیتال نمایش داده می‌شود. جرم بازو و اهرم در مقابل جرم وزنه ها ناچیز فرض می شود.

مقدار جابجایی قطعه کشویی گاورنرها توسط شاخص اندازه گیری طول، اندازه گیری می شود.فاصله هر دو خط متوالی روی محور 5mm است.

ابعاد اصلی گاورنر های پروئل و پرتر مطابق شکل (2) می باشد.



گاورنر پروئل



گاورنر پرتر

شکل 1 : ابعاد اصلی گاورنر های پروئل و پرتر

جرم قطعات کشویی متحرک در طول محور گاورنر ها به این شرح است :

جرم قطعه کشویی گاورنر پروئل : *430 gr*

جرم قطعه کشویی گاورنر پرتر : *430 gr*

جرم هر جفت وزنه گاورنرها : *200 gr*

فهرست دستور آزمایش های دستگاه گاورنر

هدف 1

تئوری 1

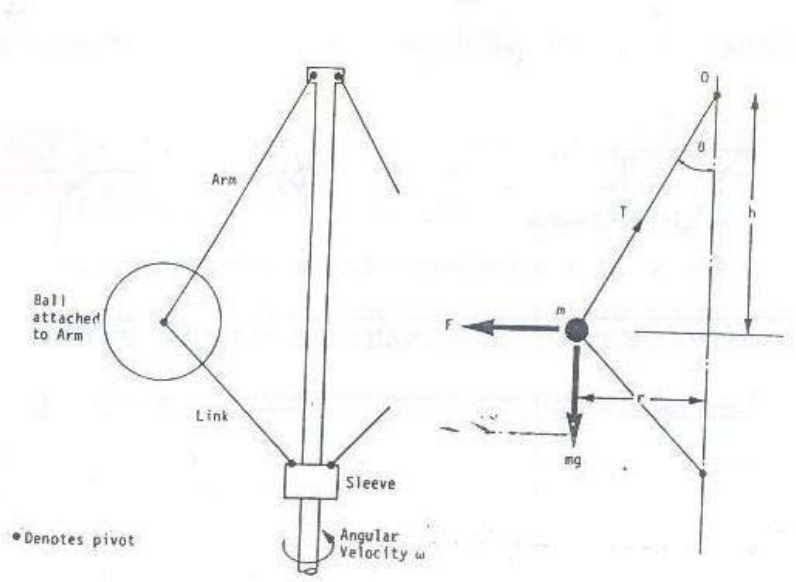
روش انجام آزمایش..... 4

هدف :

- بررسی سیستم‌های فرمان دهنده مکانیکی و اصول کار آن‌ها.
- شناخت و مشاهده کاربردهای نیروی گریز از مرکز.

تئوری :

گاورنر ساده: که البته شامل گاورنرهای همراه دستگاه نمی‌باشد. جرم بازو، اهرم و کشویی در مقابل جرم وزنه‌ها ناچیز فرض می شود. هرگاه محور دستگاه با سرعت ثابت ω دوران نماید، از نوشتن شرایط تعادل (مثلا گشتاورگیری حول نقطه بالایی گاورنر)، می‌توان روابط حاکم بر گاورنرها را داشت. تصویر این نوع گاورنر در شکل (1) آمده است.



شکل 1: طرح شماتیک گاورنر ساده

گاورنر پرتر :

در این نوع گاورنر از وزن کشویی *(M)* صرف‌نظر نمی‌شود. با کمک تصویر این نوع گاورنر، روابط حاکم بر آن از شرایط تعادل به صورت زیر به دست می آید. *(M=430 gr)*

$$\omega^2 = \frac{g}{h}[1 + 0.5\frac{M}{m}(1 + \frac{\tan\varphi}{\tan\theta})]$$

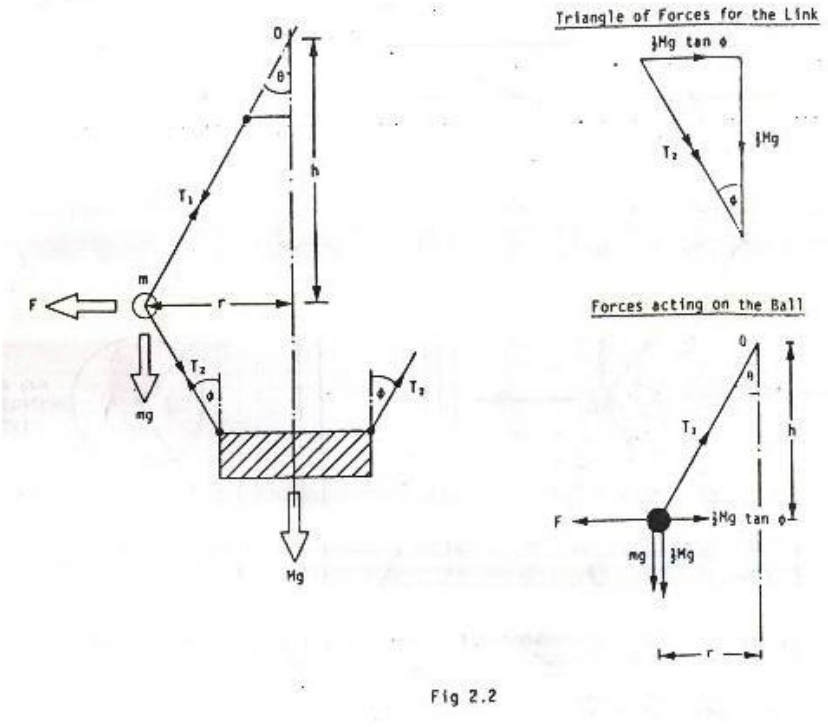
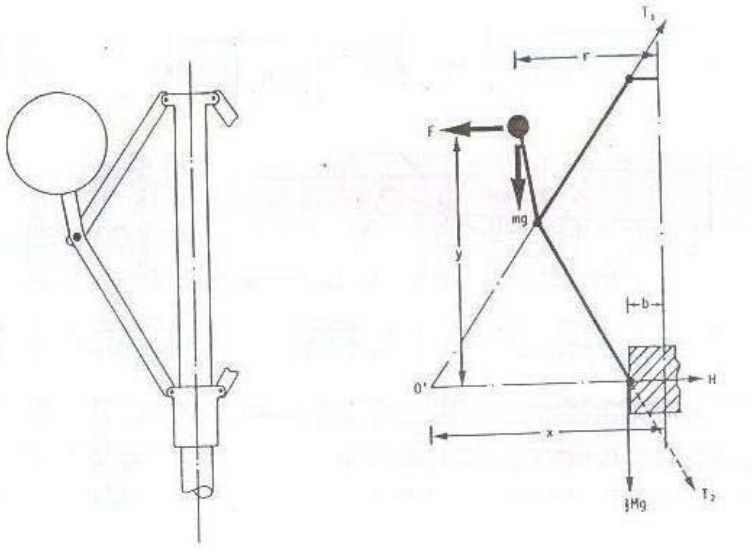


Fig 2.2

شکل 2: طرح شماتیک گاورنر پرتر

گاورنر پروئل:

در این نوع گاورنر هم مشابه پرتر، از وزن کشویی *(M)* صرف‌نظر نمی‌شود، علاوه بر آن وزنه‌ها به جای قرارگیری بر روی مفصل، بر امتداد بازو نصب شده‌اند. برای درک بهتر مطلب روابط حاکم بر این نوع گاورنر را از شرایط تعادل به دست آورید.*(M=430 gr)*



شکل 3: طرح شماتیک گاورنر پروئل

حساسیت *(Sensitivity)* و عدم حساسیت *(Insensitiveness)* در گاورنر:

طبق تعریف یک گاورنر را حساس می‌گوییم هر گاه تغییرات کوچک سرعت دورانی محور منجر به تغییر مکان قابل توجه موقعیت کشویی گردد. در نتیجه یک گاورنر حساس در محدوده کوچکی از سرعت عمل خواهد نمود.

گاورنر را همزمان *(isochronous)* گویند هرگاه دارای حساسیت نامحدود (فوق‌العاده زیاد) باشد. در نتیجه گاورنری دارای محدوده کاری صفر خواهد بود (از حیث سرعت).
معمولا برای سادگی بیشتر حساسیت را بدین ترتیب تعریف می‌کنند:

$$\text{حساسیت} = \frac{\text{سرعت متوسط}}{\text{محدوده}}$$

عدم حساسیت : در یک وضعیت معین کشویی, محدوده‌ای از سرعت وجود دارد که در طی آن کشویی حرکت نمی‌کند؛ گویند گاورنر در این محدوده غیرحساس است. ضریب عدم حساسیت عبارتست از:

$$C_{is} = \frac{\Delta\omega}{\omega}, \quad \omega = \text{میانگین سرعتهای رفت و برگشت در موقعیت معین}$$

سؤال: عامل ایجاد عدم حساسیت چیست؟ علت تفاوت سرعت های رفت و برگشت را برای یک کشویی، دقیقا" بیان نمایید.

سوال: روی نمودار، وضعیت کشویی (محور افقی) – سرعت محور (محور عمودی)، حساسیت و عدم حساسیت را نمایش دهید.

پایداری:

هرگاه یک گاورنر پایدار باشد، بایستی متناسب با ازدیاد سرعت، شعاع قرارگیری وزنه‌ها افزایش یابد. به علاوه با توجه به $F = mr\omega^2$ و یا $m\omega^2 = \frac{F}{r}$ ، مقدار نسبت $\frac{F}{r}$ تنها در صورتی افزایش می‌یابد که سرعت افزایش F از سرعت افزایش r بیشتر باشد. به عبارت ریاضی شرط پایداری به طور ساده که : $\frac{dF}{dr} \rangle \frac{F}{r}$ باشد.

لذا جهت مقایسه گاونرها می‌توان از ترم $\frac{\left(\frac{dF}{dr} - \frac{F}{r}\right)}{F/r}$ استفاده نمود که هرگاه مثبت باشد گاورنر پایدار است و هر چه بزرگتر باشد پایداری گاورنر بیشتر است.

سؤال : شرط پایداری در اینجا چیست و چگونه برقرار می‌شود؟ شرط همزمانی چیست و چگونه برقرار می شود؟

روش انجام آزمایش:

در کل در این آزمایش مشاهده و فهم پدیده، مهم‌تر از درگیر شدن با اعداد و ارقام مربوط به تئوری می باشد. برای این منظور سعی کنید معادلات حاکم بر تعادل گاورنر را که اکثر آن‌ها در تئوری ارائه گشت را خود نیز یک‌بار به درستی استخراج نمایید. برای این منظور بدست آوردن معادلات حاکم بر گاورنر به عنوان تمرین به دانشجویان واگذار شده است.

برای حالت‌های مختلف سرعت دوران جداول 1 و 2 را تکمیل نمایید.

جدول 1: گاورنر پرتر

سرعت دوران						
میزان جابجایی کشویی						

جدول 3: گاورنر پروئل

سرعت دوران						
میزان جابجایی کشویی						