

## بالانسینگ ژنراتور واحد ۸ نیروگاه برقابی کارون ۳

**مهدی نوذریپور**

دانشجو دکتری مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد  
Mehdinozarpour2139@gmail.com

**سیدحمید صالحی ریحانی**

مدیر عامل سد و نیروگاه کارون ۳  
Seyed1525@gmail.com

**هادی نوذریپور**

کارشناس ارشد کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد  
hnozarpour64@gmail.com

### چکیده

آنبالانسی یکی از عوامل اصلی ایجاد ارتعاش در ماشین های دوار است. براساس شکل و میزان این عدم انطباق، آنبالانسی های بسیار متنوعی ایجاد می گردد که عواملی همچون انعطاف پذیری روتور، طول و شعاع روتور و نحوه توزیع جرم در طول روتور و شدت آنبالانسی که خود با توان دوم سرعت چرخشی روتور متناسب است در تعیین نوع آنبالانسی تاثیر گذار است. عملیات بالانس که برای ایجاد انطباق بین محور دوران روتور با محور مرکز ثقل روتور صورت می گیرد می تواند طیف وسیعی از بالانس استاتیکی ساده تا بررسی رفتار دینامیکی روتور و بالانس در خلأ را شامل شود. بعد از انجام تست ارتعاشات به روش FFT مشخص گردید مقادیر واحد ۸ نیروگاه از حد مجاز نسبت به استاندارد ۵-۱۰۸۱۶ بالاتر بوده و آنبالانسینگ صورت گرفته است. سپس با استفاده از روش بالانسینگ دینامیکی دوصفحه ای که در ادامه توضیح داده خواهد شد واحد به حالت نرمال رسیده و بالانس گردید.

**کلمات کلیدی:** بالانسینگ، ارتعاشات، FFT

## مقدمه

وقتی که در طول یک روتور توزیع جرم در جهت شعاعی نسبت به محور چرخان یکسان نباشد آنبالانسینگ ایجاد می شود. اگر روتوری آنبالانس بوده و همچنین مواردی دیگری نیز داشته باشد، لازم است ابتدا آن موارد بر طرف گردد و سپس نسبت به بالانس کردن آن اقدام شود. اگر بعد از چند بار تلاش، موفق به بالانس روتور نشوید احتمال دارد در یک جایی خطایی رخ داده است و یا اینکه تلاش می کردید یک مسئله غیر آنبالانس را با بالانس کردن برطرف کنید. تجهیزاتی برای ایجاد بالانس در سیستم های دوار بدون ایجاد وقفه در کار، تولید و آزمایش شده است. روش های مختلفی برای ایجاد بالانس ارائه شده است که در آنها فقط از اندازه گیری ارتعاشات استفاده می شود. ژنراتورهای بزرگ، توربین ها، فن ها، پمپ ها و کمپرسورها از کاربردهای بالقوه هستند: (Van de vegte, 1978). در یک سیستم دوار دارای چند رتور کاهش ارتعاش در یاتاقان یک مشکل بهینه سازی محسوب می شود که با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای حل آن تحت محدودیت های مناسب استفاده می شود. از این رو دامنه ی تحمل به عنوان تابع هدف و تعداد روتورها به عنوان متغیرهای طراحی نسبت به روتور اول تعریف می شود: (Taplak et al., ۲۰۱۱). الگوریتم شناسایی برای اجرای بالانس با سرعت بالا در سیستم روتور انعطاف پذیر پشتیبانی شده بر روی یاتاقانهای معمولی ایجاد شده است، در حالی که سیستم را زیر سرعت بحرانی خود می چرخاند. این سیستم با یاتاقان های مغناطیسی فعال (AMB) به عنوان محرک و همچنین محرک تحریک یکپارچه شده است. یک روش ضریب تأثیر پیشرفته (AICM) ایجاد شده است که از ضرایب نفوذ بدست آمده در سرعت بالا و عدم بالانس مشخص شده در سرعت کم برای تخمین موثر جرم تعادل مورد نیاز برای بالانس روتور انعطاف پذیر با سرعت بالا استفاده می کند. ضرایب نفوذ لازم است فقط یک بار بدست آیند، در حالی که با شناسایی عدم تعادل در سرعت پایین می توان به صورت دوره ای جرم های تعادل را تخمین زد: (Ranjan, ۲۰۲۰).

## آنبالانسینگ در واحد

بعد از انجام تست ارتعاشات به روش  $FFT^1$  و تحلیل آن، مشخص گردید در قسمت آپر براکت واحد ۸ مقدار جابجایی پیک تو پیک در بالاترین محدوده ی زون B استاندارد ۵-۱۰۸۱۶ قرار دارد جدول (۱). لذا بعد از بررسی دقیق و هماهنگی های صورت گرفته تصمیم بر آن شد که بالانسینگ در واحد ۸ انجام شود.

جدول (۱): نتایج تست ارتعاشات

Unit8	بیرینگ	$V_{rms}$	$S_{p-p}$
	TGB <sub>abs</sub>	$67.70 \frac{\mu m}{s}$	$9.748 \mu m$
	UGB <sub>abs</sub>	$579.44 \frac{\mu m}{s}$	$83.43 \mu m$
	LGB <sub>abs</sub>	$116.75 \frac{\mu m}{s}$	$16.81 \mu m$
	End Winding	$5.56 \frac{mm}{s}$	$25.02 \mu m$

## سنسورهای مورد نیاز

برای انجام بالانسینگ از سنسورهای شتاب سنج و برای سنجش میزان دور و زاویه ی فاز از تاکو متر نیز استفاده می شود که مشخصات آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصات سنسورهای مورد استفاده

Manufacturer	Type	Serial	Sensitivity
kistler	8705A50M1	6176256	102.1 mv/g
Bruel & Kjaer	8341	51997	101.0 mv/g
Bruel & Kjaer	360 M	100221	1V/V

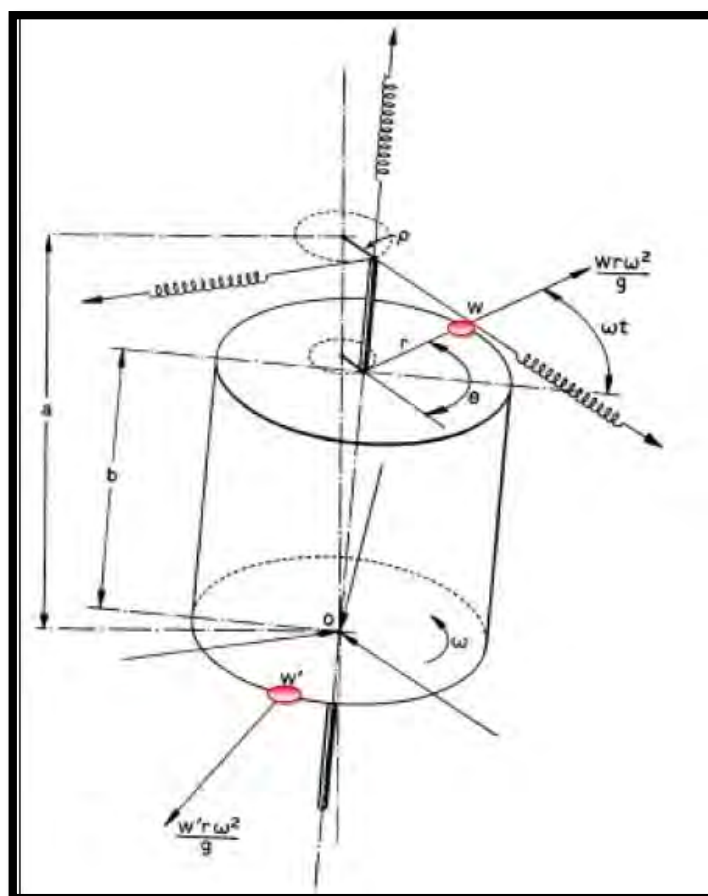
### استاندارد بالانسینگ

در واحدهای برقی با توجه به جرم و ممان اینرسی بالای روتور جهت بالانسینگ می بایست روتور را بالانس نمود. برای این کار حرکت زاویه ای جسم صلب را از رابطه ی (۱) می توان بدست آورد.

$$H = I\omega \quad (1)$$

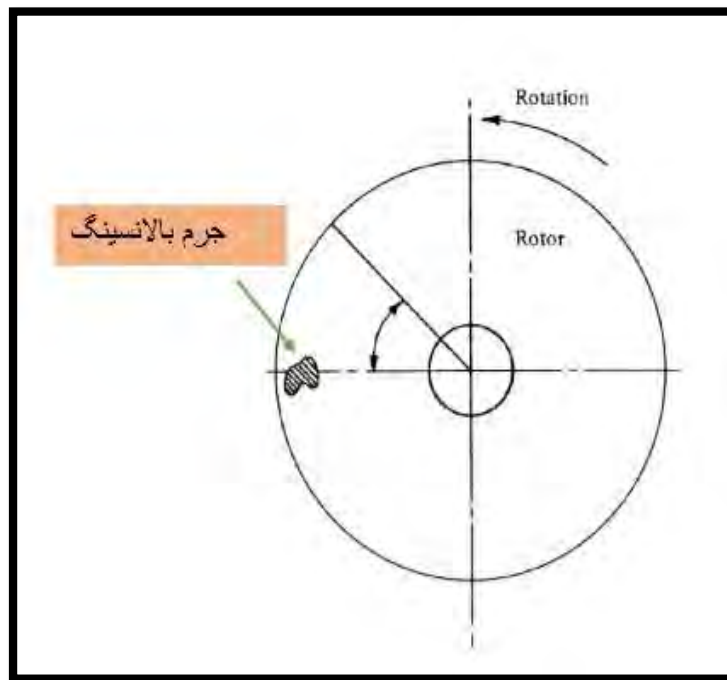
در رابطه ی فوق  $H$  مومنتوم زاویه ای،  $\omega$  سرعت زاویه ای و  $I$  ممان اینرسی می باشد که از رابطه ی (۲) بدست می آید. شکل (۱).

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2)$$



شکل (۱): روتور و محل قرار گیری وزنه ها

در نیروگاه برقی با توجه به جرم و ممان اینرسی بالای روتور، جهت بالانسینگ می بایست روتور را بالانس نمود شکل (۲).



شکل (۲): بالانسینگ روتور

برای بالانسینگ واحدهای برقی از استاندارد ISO 1940-1 استفاده می شود. یکی از مواردی که در این استاندارد بسیار مهم می باشد انتخاب گرید مناسب می باشد. لذا G1 بهترین حالت است ولی بیشتر برای ماشین هایی با سرعت بالا استفاده می شود. در نیروگاه های برقی G2.5 محافظه کارانه تر از G6.3 است و هنگام استفاده از G6.3 در سرعت های بالا ممکن است دچار آنبالانسی شویم. در حالت کلی از استاندارد G برای نشان دادن حد مجاز برای بالانسینگ (نیاز یا عدم نیاز) استفاده می شود. برای ژنراتور الین داده ها در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): گرید بالانس ها

ISO 1940 Balance Grade		ISO G1	ISO G2.5	ISO G6.3
Centre of Rotor	Permissible Residual Specific Unbalance ( $\mu\text{m}$ )	51	127	321
	Permissible Residual Imbalance, U (T.m)	28.4	71.0	179.0
	Equivalent Residual Weight, m (kg)	8.0	19.9	50.2
Upper Rotor-Rim	Permissible Residual Imbalance, Uperu (T.m)	13.1	32.7	82.3
	Equivalent Residual Weight, mu (kg)	3.7	9.2	23.1
Lower Rotor-Rim	Permissible Residual Imbalance, Uperu (T.m)	15.3	38.3	96.6
	Equivalent Residual Weight, ml (kg)	4.3	10.8	27.1

### مراحل آماده سازی برای انجام بالانس

ابتدا تاپ کاور مورد نظر را برداشته تا شرایط مهیا شود. سپس سوراخ هایی را در محل مورد نظر بر روی آپر براکت و لاور براکت برای نصب سنسورهای شتاب سنج ایجاد می کنند شکل (۳).



شکل (۳): عمل سوراخ کاری برای نصب سنسور

این سنسورها توسط بولت M6 در لاور براکت و آپر براکت ثابت می کنند تا از ایجاد خطا در حین محاسبه جلوگیری شود شکل (۴) و (۵).



شکل (۵): نصب سنسور در لاور

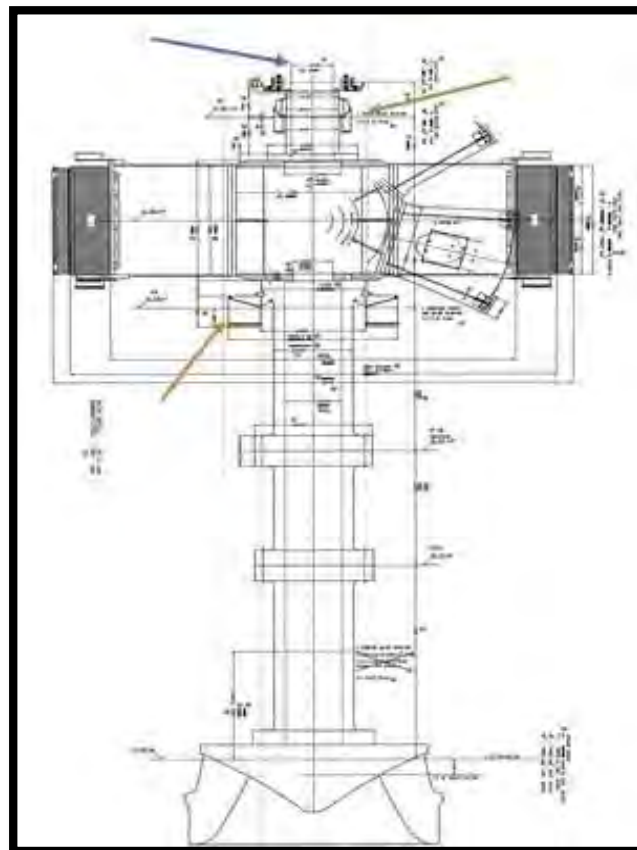


شکل (۴): نصب سنسور در لاور براکت

فواصل یاتاقان ها و روتور ریم و مقدار وزن روتور در رجدول (۴) و همچنین محل قرار گیری سنسورها در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول (۴): مقدار وزن روتور و فاصله ی آن از یاتاقان ها

مقادیر	نام اجزا
۵۵۷.۵	وزن روتور (T)
۱۸۷.۵	سرعت دوران (RPM)
۱.۰۲	فاصله ی UGB تا بالای روتور ریم (m)
۲.۱۶۵	فاصله ی UGB تا مرکز روتور ریم (m)
۳.۳۱۰۵	فاصله ی UGB تا پایین روتور ریم (m)
۴.۱۰	فاصله ی UGB تا LGB (m)



شکل (۶): شماتیک ژنراتور الین و محل نصب سنسورها

بعد از نصب سنسور قطب ها را شماره گذاری می کنند. سپس تاکومتر<sup>۲</sup> (سرعت سنج) را بر روی اسلیپ رینگ نصب می کنیم. باید توجه شود که رفلکتور بر روی چرخنده ی بالای ژنراتور نصب شود که روبروی فیلد لید تحریک ژنراتور باشد زیرا آنجا قطب یک می باشد شکل (۷).

<sup>2</sup>Tachometer



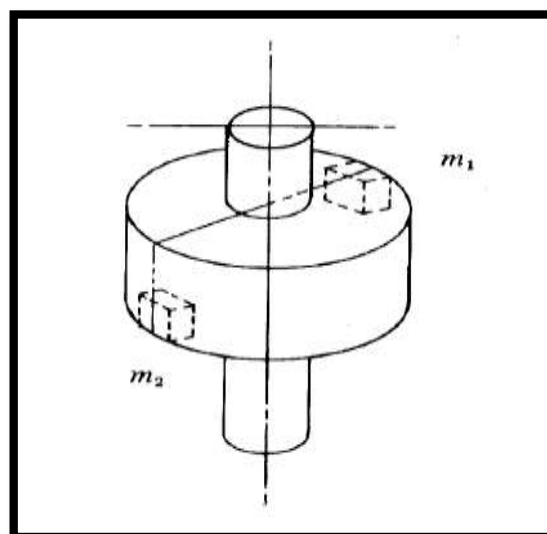
شکل (۷): نصب تاکومتر

در واحدهای برقایی با توجه به جرم و ممان اینرسی بالای روتور جهت بالانسینگ می بایست روتور را بالانس کرد. یکی از عواملی که در بالانس تک صفحه ای یا دو صفحه ای تاثیر دارد محل قرارگیری تراست بیرینگ است. اگر تراست در بالای روتور باشد از بالانس تک صفحه ای می توان استفاده نمود اما اگر در زیر روتور باشد (ژنراتور الین) معمولا از بالانس دینامیک دو صفحه ای استفاده می شود. لذا برای بالانس دینامیکی اثرات نیروهای گریز از مرکز یا اینرسی را بایستی حذف کنیم.

### شرح انجام کار

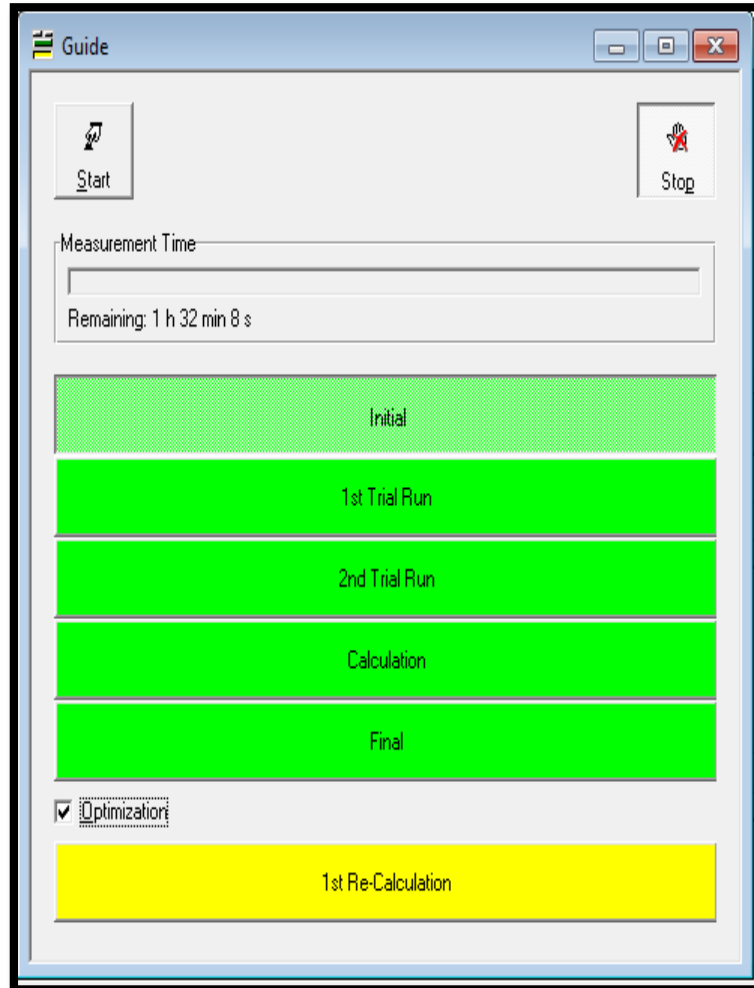
برای انجام کار از بالانس دوصفحه ای استفاده شده است شکل (۸). در بالانس دو صفحه ای روند کار به صورت زیر می باشد.

- ۱- Initial
- ۲- ۱۰۰۰ ۰۰۰۰۰۰ ۰۰۰۰
- ۳- ۲۰۰۰ ۰۰۰۰۰۰ ۰۰۰۰
- ۴- Calculation
- ۵- Final





شکل (۸): نمای از بالانس دو صفحه ای  
در صورت نیاز از حالت Optimization می توان محاسبات را برای چند مرحله ادامه داد شکل (۹).

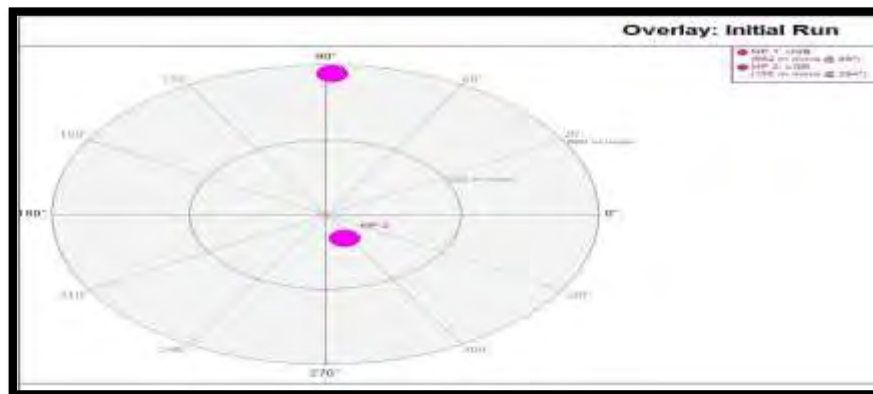


شکل (۹): مراحل انجام بالانسینگ  
در مرحله ی Initial واحد را رولینگ کرده فرض اولیه بر حسب مکان و زاویه ایجاد می کند. جدول (۵) و شکل (۱۰) مقدار Initial Run در آپر براکت و لاور براکت بر روی یک شکل نمایش داده شده است.

جدول (۵): مقادیر Initial Run

Run	Upper Guide Bearing		Lower Guide Bearing	
	Magnitude [mm/sec] 0-to- pk, rms	Phase Angle, $\Phi$ [Deg]	Magnitude [mm/sec] 0- to-pk, rms	Phase Angle, $\Phi$ [Deg]
Initial	۰.۵۶۲	۸۹	۰.۱۰۵	۲۹۴





شکل (۱۰): Initial در آپر و لاور

بعد از تعیین موقعیت باید در مرحله ی اول و دوم Trial وزنه ای دلخواه ابتدا در آپر سپس در لاور قرار داده و رولینگ می شود. می تواند وزنه ی انتخابی ۰,۰۰۱ جرم روتور در نظر گرفته شود. اما وزنه های انتخابی در Trial Weight در جدول (۶) نشان داده شده است.

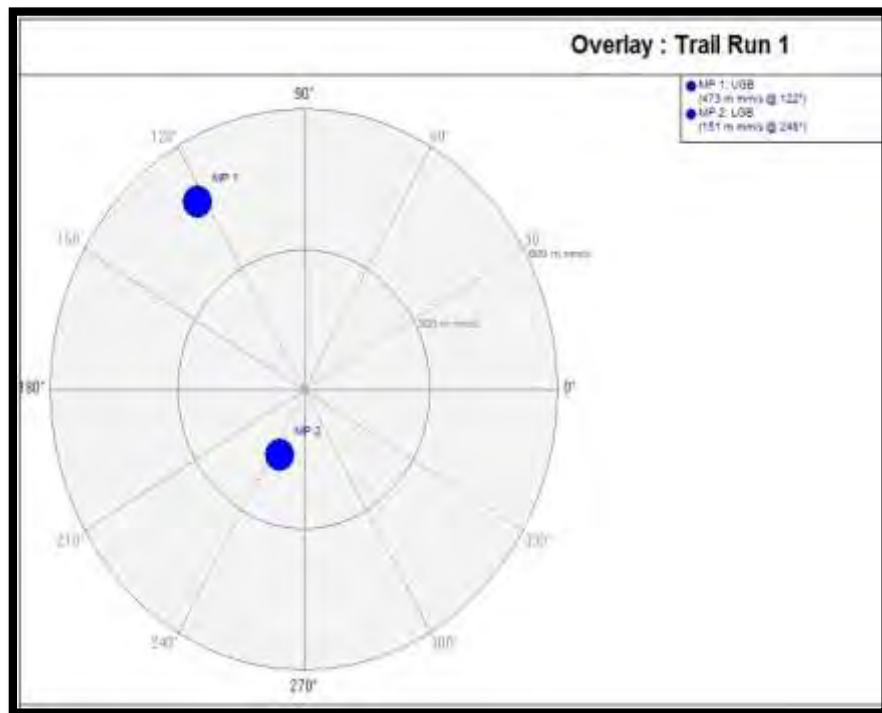
جدول (۶): وزنه های انتخابی

Trial Weight	Upper Guide Bearing			Lower Guide Bearing		
	Mass (kg)	Phase Angle, $\Phi$ [Deg]	pole	Mass (kg)	Phase Angle, $\Phi$ [Deg]	pole
۱۰۰۰ ۰۰۰۰۰۰	۴۳.۵	۱۲۴	۱۲			
۲۰۰۰ ۰۰۰۰۰۰				۵۹	۱۲۴	۱۲

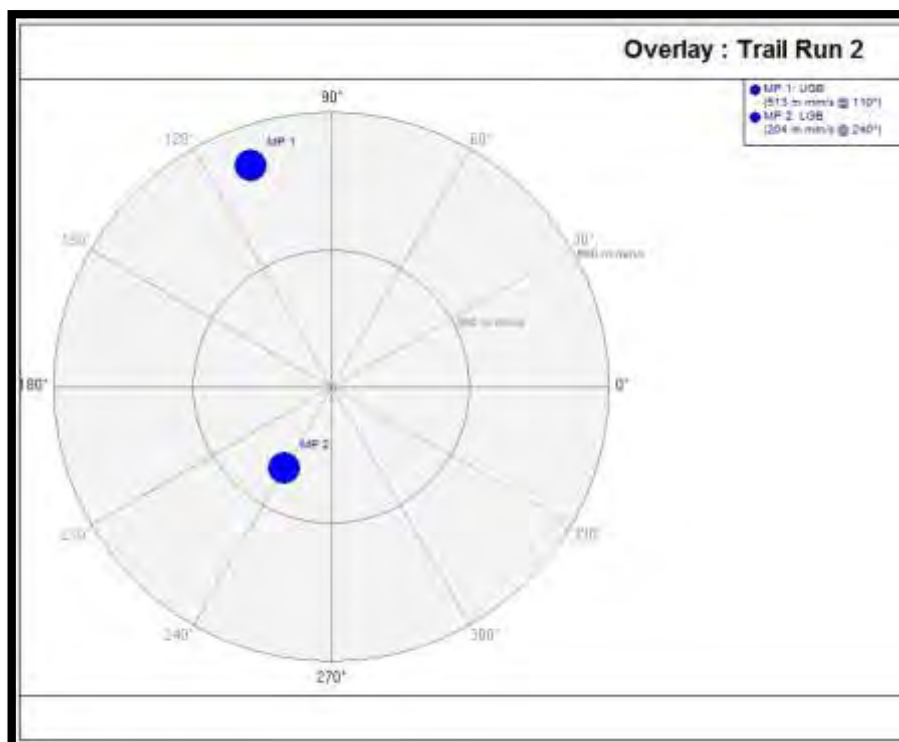
ضمناً باید توجه داشت بالانسینگ در حالت Load انجام نمی شود زیرا اولاً باید در طول انجام بالانسینگ چندین بار به شبکه متصل شد و یا اینکه واحد تریب بخورد که این مسئله مشکلاتی برای دیسپاچینگ ملی ایجاد می کند. ثانیاً در حالت Load معمولاً ارتعاشات کمتر است. لذا برای انجام بالانسینگ باید واحد در حالت تحریک انجام شود. محل وزنه گذاری مانند شکل (۱۱) و (۱۲) پشت استاتور ریم می باشد. در حالت Trial Weight شرایط واحد در شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): وزنه گذاری در لاور



شکل (۱۳): مقادیر آپر و لاور براکت در حالت Trial1

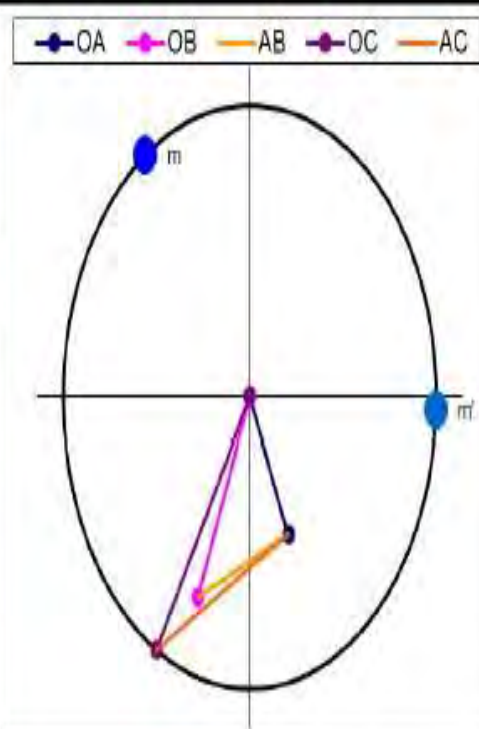
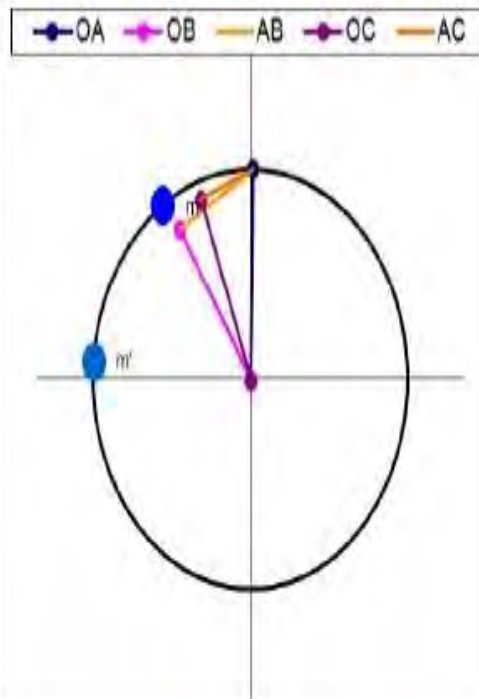


شکل (۱۴): مقادیر آپر و لاور براکت در حالت Trial2

حال با انجام Calculation توسط نرم افزار تقریباً مقدار و موقعیت وزنه در لاور و آپر براکت برای بالانس واحد را می توان مشخص نمود شکل (۱۵).

## 2-Plane Balancing

Initial Run (OA)			
Plane 1		Plane 2	
Amplitude	Phase ( $\alpha$ )	Amplitude	Phase ( $\alpha$ )
0.5624	89	0.1046	294
Trial Weight 1			
Mass (m)	Phase ( $\theta$ )		
43.5	124		
Trial Run 1 (OB)			
Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
0.4735	122	0.1512	248
AB			
Length ( $ AB $ )	Angle ( $\phi$ )	Length ( $ AB $ )	Angle ( $\phi$ )
0.31	211.66	0.11	204.23
Remove Trial Weight?			Yes
Trial Weight 2			
		Mass (m)	Phase ( $\theta$ )
		59	124
Trial Run 2 (OC)			
Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
0.5134	110	0.2045	240
AC			
Length ( $ AC $ )	Angle ( $\phi$ )	Length ( $ AC $ )	Angle ( $\phi$ )
0.20	203.31	0.17	209.39
Correction Weight			
Remove Trial Weight 1?			Yes
Remove Trial Weight 2?			Yes
Correction Weight			
$m'$	$\theta'$	$m'$	$\theta'$
164.81	174.95	176.78	357.36



شکل (۱۵): نتایج حاصل از Calculation در بالانس دو صفحه ای

با توجه به اینکه وزنه های مورد نیاز دارای مقادیر زیادی هستند لذا در ۳ مرحله بالانسینگ را انجام داده و در هر بار از مرحله ی Final مقدار جزئی از وزنه ها را استفاده می کنیم. تقسیم بندی وزنه ها در جدول (۷) آورده شده است.

جدول (۷): تقسیم بندی وزنه ها در هر مرحله

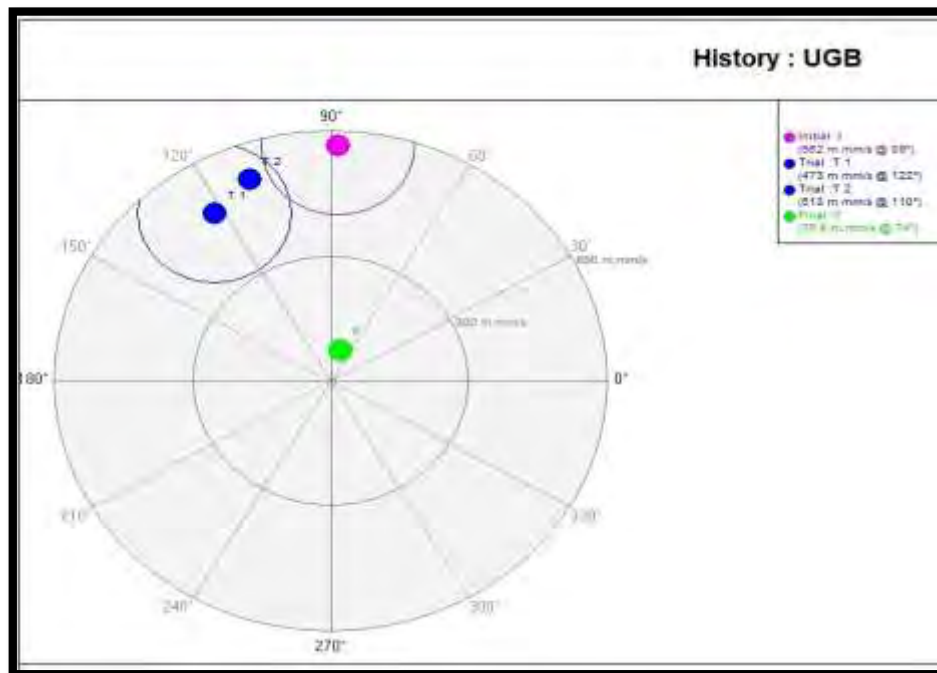
Final	Upper Guide Bearing		Lower Guide Bearing	
	Mass(Pole 16) kg	Mass(Pole 17) kg	Mass(Pole 3) kg	Mass(Pole 31) kg
Final 1	۱۳	۱۳	۱۶.۵	۱۶
Final 2	۱۵	۱۵	۱۷.۵	۱۷
Final 3	۵۰	۵۸	۶۲.۵	۶۲.۵
مجموع	۷۸	۸۶	۹۶.۵	۹۵.۵

### نتایج بالانسینگ

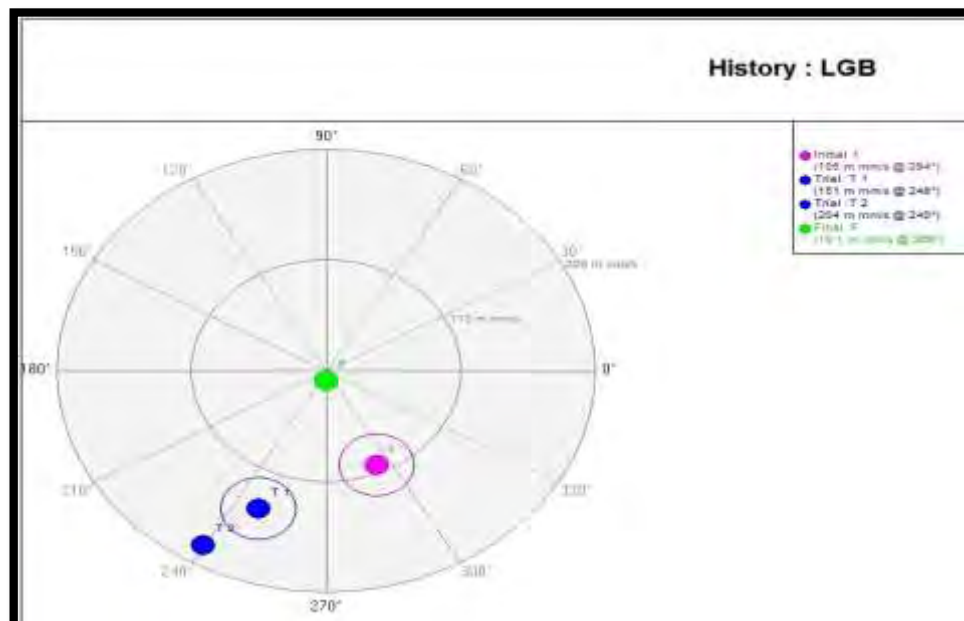
قبل از انجام بالانسینگ مقادیر در جدول (۱) لحاظ شده است. اما با هر مرحله بالانسینگ مشخص گردید مقادیر در آپر براکت و لاور براکت کم شده و ژنراتور الین نیروگاه برقابی کارون ۳ تا حد نهایی بالانس می شود. نتایج نهایی بالانسینگ در جدول (۸) و در شکل (۱۶) برای آپر براکت و شکل (۱۷) برای لاور براکت نشان داده شده است.

جدول (۸): نتایج بر روی پرتابل واحد بعد از هر مرحله وزنه گذاری

مراحل	UGB (mm/s)	LGB (mm/s)
قبل از بالانس	۰.۵۵۳	۰.۴۴۴
مرحله اول وزنه گذاری	۰.۴۱۴	۰.۴۳۵
مرحله دوم وزنه گذاری	۰.۳۵۲	۰.۴۰۲
مرحله سوم وزنه گذاری	۰.۳۴۳	۰.۳۶۱
در حالت فول لود	۰.۳۱۱	۰.۳۱۷



شکل (۱۶): نتایج نهایی آپر برکت



شکل (۱۷): نتایج نهایی لاور برکت

ضمناً مقدار آپر ولاور برکت توسط نرم افزار در قبل از بالانس و بعد از آن در جدول (۹) نشان داده شده است.

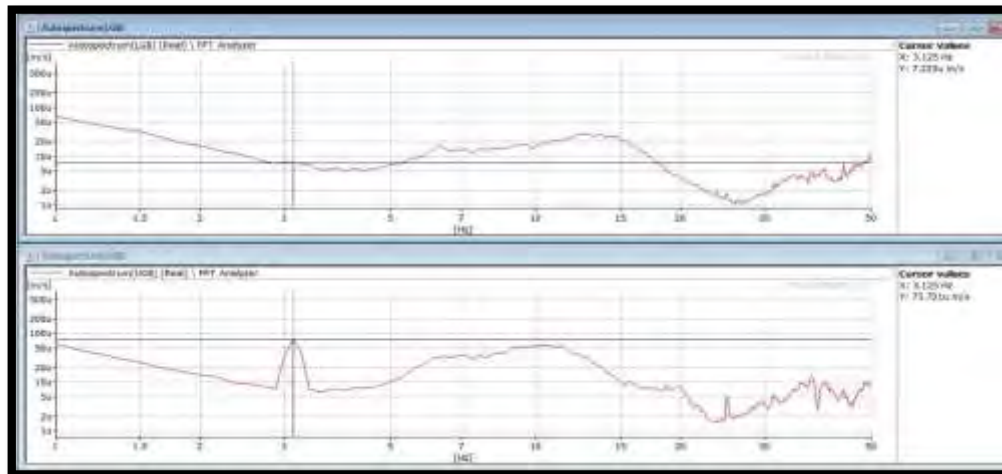
جدول (۹): نتایج قدیم و جدید بیرینگ ها

بیرینگ	قبل از بالانس (mm/s)	بعد از بالانس (mm/s)
UGB	۰.۵۷۹	۰.۰۷۶



LGB	۰.۱۱۶	۰.۰۱۰
-----	-------	-------

بعد از بالانس واحد جهت صحت از انجام کار مجدداً تست ارتعاشات به روش FFT گرفته شد شکل (۱۸).



شکل (۱۸): نمودار تست ارتعاشات بعد از انجام بالانسین

– منابع انتهای مقاله:

- جو فورسینا، ۱۳۹۶، گزارش تست ارتعاشات، آرشیو فنی و مهندسی سازمان آب و برق خوزستان
- J. Van de Vegte R.T. Lake. (1978). Balancing of rotating systems during operation. Journal of Sound and Vibration. Vol. 57. No. 225-235
- H. Taplak and S. Erkeyab. (2011). Passive balancing of a rotating mechanical system using genetic algorithm. Transactions B: Mechanical Engineering. Vol. 19 (6), 1502–1510
- Ranjan, Gyan and Tiwari, Rajiv. (2020). On-site high-speed balancing of flexible rotor-bearing system using virtual trial unbalances at slow run. International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 183. 105786