

تحلیل بارگذاری محوری بلبرینگ تماس زاویه ای با استفاده از سیمولیشن نرم افزار سالیدورک

میلاذ فراهانی علوی^۱، وحید مرادی^{۲*}، سعید مظلومی^۳، بهنام عبادی زاویه^۴

۱- گروه مهندسی خودرو، انزلی

۲- گروه مهندسی خودرو، انزلی

۳- گروه مهندسی خودرو، انزلی

۴- گروه مهندسی خودرو، انزلی

چکیده

مقدار بار وارد بر بلبرینگ یکی از پارامترهای مهم و تعیین کننده در انتخاب بلبرینگ ها است. همچنین بلبرینگ های بدون قفسه هم که به دلیل نداشتن قفسه تعداد ساچمه ها یا رول های بیشتری دارند از قابلیت آن بلبرینگ در حمل بار از بلبرینگ های دارای قفسه است. این بلبرینگ ها فقط بارهای محوری را تحمل می کنند. در این مقاله تحلیل بارگذاری محوری روی بلبرینگ تماس زاویه ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. رینگ های نصب شده بر روی شفت بلبرینگ واشرهای شفت نامیده می شوند و آن هایی که روی هوزینگ نصب می شوند، واشر هوزینگ نامیده می شوند. بلبرینگ های کف گرد در دو نوع یکطرفه که فقط بارهای محوری را می توانند در یک جهت تحمل کنند و نوع دوطرفه که بارهای محوری را در دو جهت تحمل می کنند همچنین عملکرد آن ها برای محورهای عمودی بهتر است. بلبرینگ های کف گرد یکطرفه دارای یک واشر شفت، یک واشر نشیمنگاه و مجموعه قفسه و ساچمه ها می باشند. این بلبرینگ ها تفکیک پذیر بوده و واشر ها را می توان مستقل از مجموعه ساچمه ها نصب کرد.

واژگان کلیدی: بلبرینگ، بار محوری، بارگذاری، تماس زاویه ای، شفت

۱- مقدمه

بیشتر پیشرفت های مهندسی بدون وجود بلبرینگ که اصطکاک را تا حد بسیار زیادی کاهش می دهند، امکان پذیر نمی باشد. با پیشرفت صنایع ماشین سازی اهمیت بلبرینگ آشکار گردیده شده است و اساس کلی که اکنون بلبرینگ بر اساس آن ساخته میشود از زمانهای قدیم باقی مانده و پیشگامان این صنعت در زمان امپراتوری روم بوده اند. اولین بلبرینگ مربوط به بلبرینگ است که از چوب ساخته شده بود و دارای ساچمه های برنزی بود و از نظر شکل کاملاً شبیه بلبرینگ های امروزی بود و در کشتی امپراتور روم بکار رفته شده است. بعد از آن لئوناردو داوینچی محاسباتی راجع به یاتاقان های غلطکی لغزشی انجام داد و از روی آن نمونه هایی ساخت. در اواخر قرن نوزدهم با توسعه صنعت دوچرخه سازی اولین تقاضا برای یاتاقان های بدون اصطکاک مطرح گردید و اولین کارخانه های ساچمه سازی در انگلستان و آلمان تاسیس شدند و در آمریکا نیز به نسبت خیلی کم بلبرینگ ساخته شد ولی تقاضا به آن حدی نبود که بتوان تولید کلی را شروع کرد. بعدها دانشمندی بنام "رابرت استریک" تحقیقات اساسی در مورد مهندسی بلبرینگ انجام داد و در همین زمان گسترش صنعت اتومبیل سازی تقاضا برای بلبرینگ را افزایش داد و در بین سالهای ۱۹۰۲ تا ۱۹۱۲ بیش از هفت نوع بلبرینگ ساخته شد.

بلبرینگ یا یاتاقان توپی گونه ای از چرخنده و از خانواده یاتاقان ها هستند که کاربرد وسیعی در ابزارهای مختلف مانند دیسک های سخت رایانه، اسکیت ها، صنایع بزرگ، خودروها، موتورها و غیره دارند. در این مقاله بر روی بلبرینگ های تماس زاویه ای تحقیق و بررسی انجام گرفته است. عملکرد قطعات این نوع بلبرینگ در جهت استفاده در صنعت خودروسازی و دیسک های سخت رایانه ای تشریح شده و در مرحله بعد طرحی جهت بهره وری از این مدل بلبرینگ های خود تنظیم برای صنایع فاقد این نوع بلبرینگ آورده شده است. همچنین بر روی چگونگی نصب و قرار گیری این بلبرینگ تجزیه و تحلیل انجام گرفته و مزایای استفاده از این تکنولوژی نوین در صنعت خودروسازی تشریح شده است. [۱-۸] هوانگ و همکارانش [۴-۱] پیش بینی های عمر باقی مانده برای توپ بلبرینگ بر اساس نقشه های سازماندهی خود و روش های شبکه عصبی برگشتی را مورد بررسی قرار دادند. آنان در این آزمایش از روش های شبکه عصبی که یکی از اجزای کلیدی مورد نیاز عمر مفید یاتاقان و نقشه پیش بینی تنظیم یک شاخص تخریب مناسب، استفاده کرده است. نتایج تجربی حاصل از این آزمایش نشان می دهد که روش های پیشنهادی جدید به طور قابل توجهی بهتر از دیگر روش ها می باشند. هرنوت و همکارانش [۵-۸] محاسبه ماتریس سختی زاویه تماس بلبرینگ با استفاده از رویکرد تحلیلی را مورد بررسی قرار دادند. آنان در این محاسبه ی خود ماتریس سختی تحمل برای بلبرینگ ها را در پنج درجه آزادی بارهای گریز از مرکز، تماس غیر هرنوتی، یاتاقان نورد، ژيروسکوپیک و ملاحظیات مختلف و پیچیده بررسی کردند نتایج تحلیل ماتریس سختی زاویه تماس بلبرینگ را نشان می دهد. تحلیل ماتریس سختی بسیار آسان تر از دیگر محاسبه ها می باشد.

۲- عملکرد بلبرینگ تماس زاویه ای

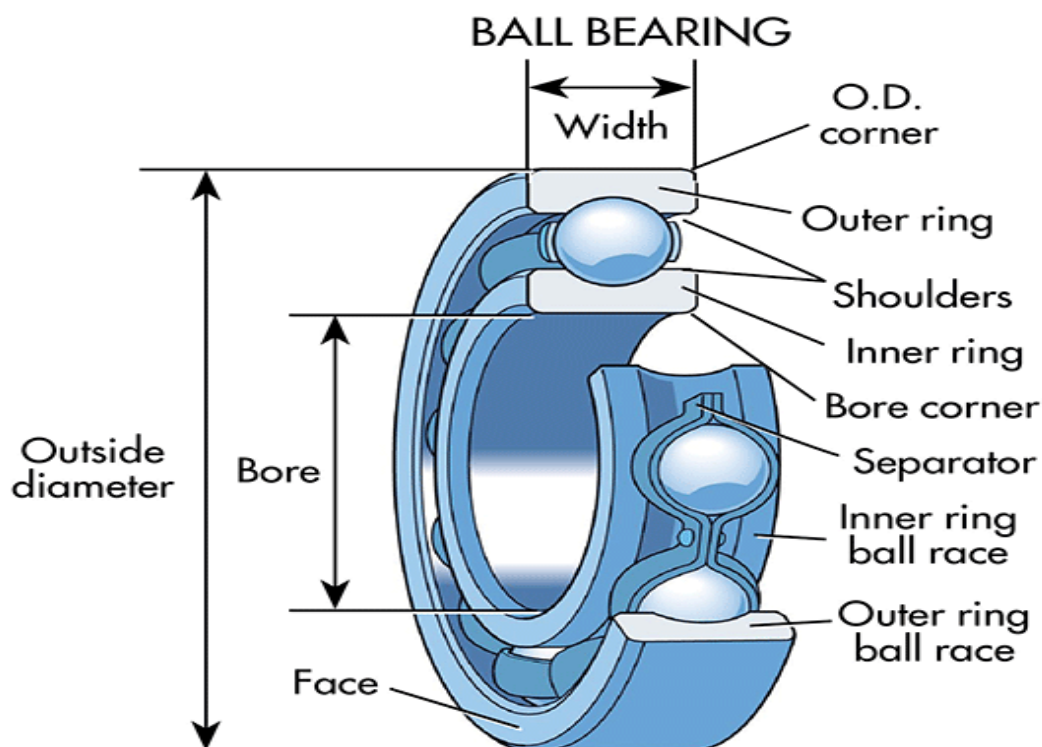
این نوع بلبرینگ ها علاوه بر تحمل بار شعاعی، بار محوری را در یک جهت می توانند تحمل کنند. در یک بلبرینگ بار از لایه خارجی به گوی ها اعمال می شود و از آنجا فشار به لایه داخلی منتقل می گردد. با توجه به کرووی گوی ها، نقطه تماس شان با لایه های درونی و بیرونی بسیار کوچک خواهد بود، در نتیجه می توانند بسیار نرم حرکت کنند؛ از سوی دیگر با توجه به کوچک بودن محل تماس، اگر فشار بیش از حدی به گوی ها وارد شود می تواند موجب تغییر شکل یا خرد شدن آن ها گردد، اعمال بار شعاعی بر بلبرینگ باعث ایجاد یک نیروی محوری نیز می شود که باید به طریقی مهار شود. به همین دلیل معمولاً این نوع بلبرینگ ها به صورت دوتایی بکار برده می شوند. بلبرینگ های تک ردیفه تماس زاویه ای معمولاً به دو صورت استاندارد تولید

می شوند. گروه اول بدون پسوند در جلوی شماره اصلی خود برای مواقعی استفاده می شوند که بلبرینگ به صورت تکی در موقعیت خود نصب می شود. گروه دوم با پسوند CB در مواردی است که بلبرینگ به صورت دوتایی نصب می شود. این گروه که عموماً اندازه های بزرگ بلبرینگ ها را شامل میشود به گونه ای جهت مصارف عمومی با یکدیگر مطابقت داده شده اند که بعد از نصب به لقی دلخواه از پیش تعیین شده رسیده و توزیع بار بر روی آنها به طور یکنواخت صورت گیرد در پسوند CB فوق الذکر، C نشان دهنده وجود لقی، B معرف مقدار آن می باشد. لقی های کمتر با CC و بالاتر با CA مشخص می شوند. وجود بار اولیه در بلبرینگ نیز با علامت GA, GB, GC مشخص می شود استفاده از دو بلبرینگ تماس زاویه ای در یک محل به خاطر موقعیت دهی محوری شافت از دو سمت و نیز در مواقعی است که استفاده از یک بلبرینگ برای مقدار بار اعمال شونده کافی نباشد.



شکل ۱: نمایی از بلبرینگ تماس زاویه ای برای استفاده در صنعت

با توجه به شکل ۱ بلبرینگ تماس زاویه ای دارای کنس یا حلقه های داخلی و بیرونی زاویه دار می باشند. یعنی دو کنس داخلی و خارجی امکان تحمل بارهای شعاعی و محوری ها نسبت به یکدیگر زاویه ای را می سازند که برای بلبرینگ امکان تحمل بارهای شعاعی و محوری همزمان را فراهم می آورد. هر مقدار که زاویه تماس بلبرینگ تماس زاویه ای بزرگتر باشد، قدرت تحمل بار محورب بیش تر خواهد بود.



شکل ۲: شماتیک داخلی بلبرینگ تماس زاویه ای

۲-۱- بلبرینگ های تماس زاویه ای از نظر نوع و طرح

*بلبرینگ های تماس زاویه ای یک ردیفه

*بلبرینگ های تماس زاویه ای دو ردیفه

*بلبرینگ های تماس زاویه ای با چهارنقطه تماس

۲-۲- علل خرابی بلبرینگ

مقدار بار بیشتر از حد پیش بینی شده

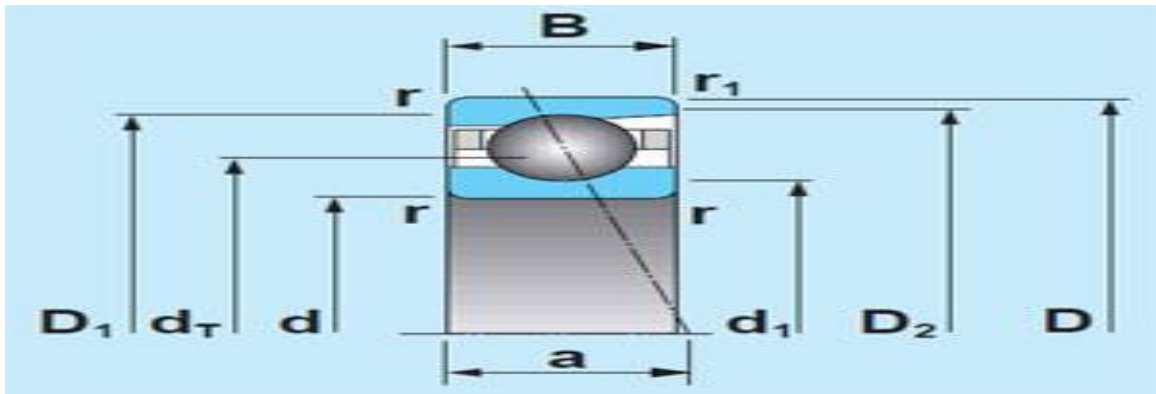
روانکاری ناقص یا نامناسب

استفاده نادرست

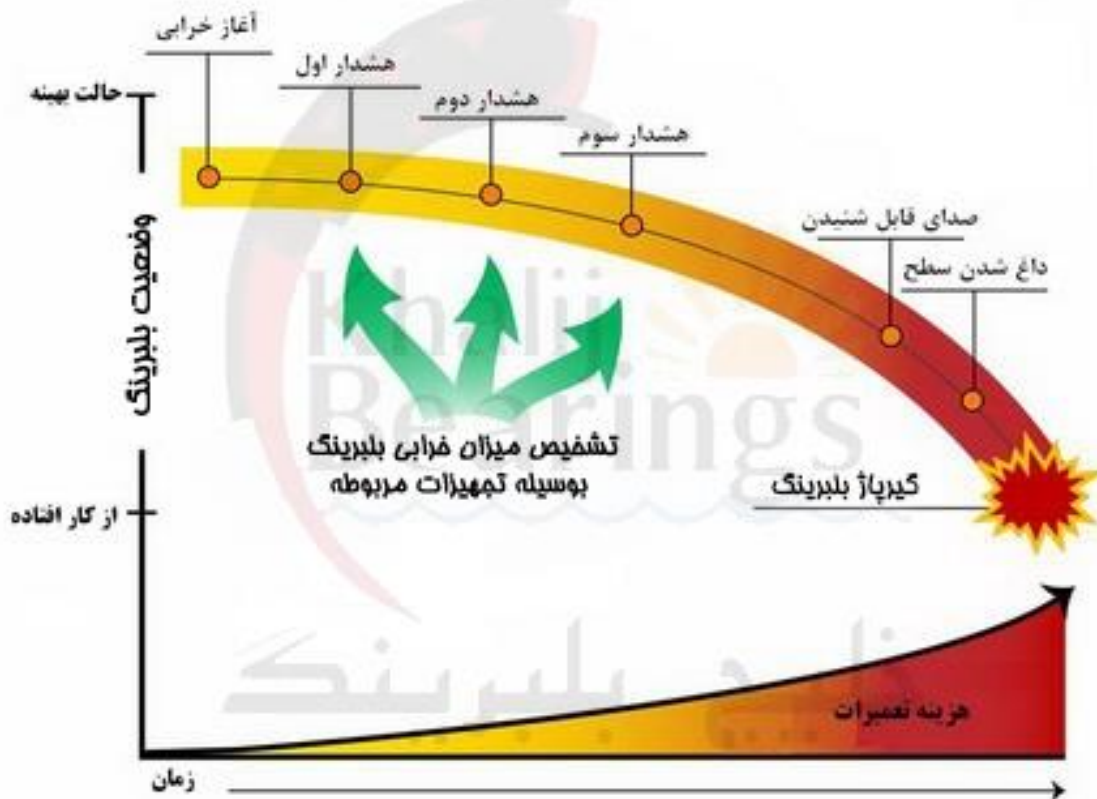
آب بندی غیر مؤثر

انطباق خیلی فشرده و در نتیجه لقی داخلی کمتر از حد لازم

جدول ۱: جداول انتخاب بلبرینگ ها

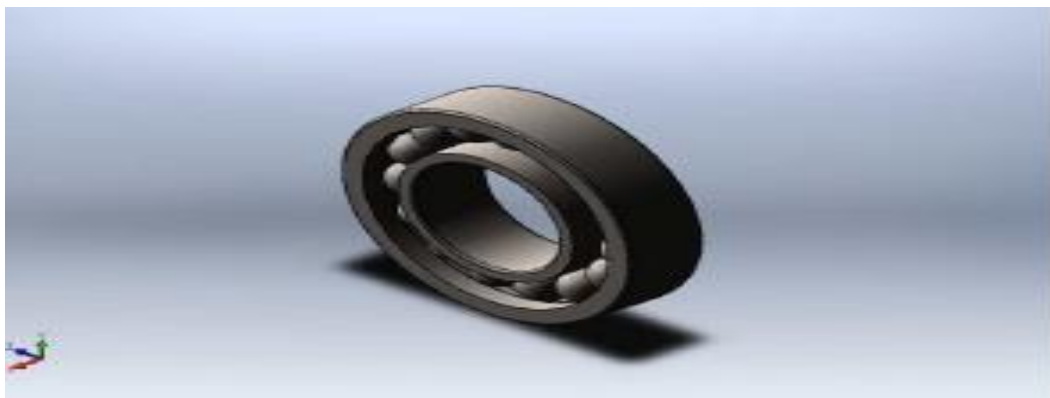


Basic Bearing	Primary dimensions					Limiting speeds		Load ratings		Abutment dimensions			Effective load centre a mm	Internal volume cm ³	PCD of lubrication jets d _T (DIN 628-6) mm	Mass Kg
	d	D	B	r min	r ₁ min	oil/air rev/min	grease rev/min	dynamic C _r	static C _{0r}	d ₁ min	D ₁ max	D ₂ max				
7903CTRSU 7903A5TRSU	17	30	7	0,3	0,15	71 400 59 300	44 200 36 800	5 000 4 750	2 940 2 800	19,5	27,5	28,8	6,6 9,0	0,9	21,8	0,016
7904CTRSU 7904A5TRSU	20	37	9	0,3	0,15	58 800 50 100	36 400 31 000	6 950 6 600	4 250 4 050	22,5	34,5	35,8	8,3 11,1	1,8	26,1	0,037
7905CTRSU 7905A5TRSU	25	42	9	0,3	0,15	50 700 44 400	31 400 27 500	7 850 7 450	5 400 5 150	27,5	39,5	40,8	9,0 12,3	2,0	31,1	0,042
7906CTRSU 7906A5TRSU	30	47	9	0,3	0,15	45 200 39 800	27 900 24 600	8 300 7 850	6 250 5 950	32,5	44,5	45,8	9,7 13,5	2,3	36,1	0,049
7907CTRSU 7907A5TRSU	35	55	10	0,6	0,3	39 900 35 200	24 700 21 800	12 100 11 400	9 150 8 700	40	50	52,5	11,0 15,5	3,6	42,6	0,074
7908CTRSU 7908A5TRSU	40	62	12	0,6	0,3	36 000 31 500	22 300 19 500	15 100 14 300	11 700 11 200	45	57	59,5	12,8 17,9	5,6	47,9	0,108
7909CTRSU 7909A5TRSU	45	68	12	0,6	0,3	32 400 28 400	20 000 17 600	16 000 15 100	13 400 12 700	50	63	65,5	13,6 19,2	6,2	53,4	0,128
7910CTRSU 7910A5TRSU	50	72	12	0,6	0,3	31 100 26 300	18 600 16 300	16 900 15 900	15 000 14 200	55	67	69,5	14,2 20,2	6,7	57,9	0,129
7911CTRSU 7911A5TRSU	55	80	13	1,0	0,6	26 900 23 600	16 600 14 600	19 100 18 100	17 700 16 800	61	74	75	15,5 22,2	8,5	64,0	0,179
7912CTRSU 7912A5TRSU	60	85	13	1,0	0,6	24 900 21 600	15 400 13 400	19 400 18 300	18 700 17 700	66	79	80	16,2 23,4	9,3	69,0	0,191
7913CTRSU 7913A5TRSU	65	90	13	1,0	0,6	23 000 20 000	14 200 12 400	20 200 19 100	20 500 19 400	71	84	85	16,9 24,6	9,9	74,0	0,205
7914CTRSU 7914A5TRSU	70	100	16	1,0	0,6	20 700 17 600	12 800 10 900	28 100 26 500	27 800 26 300	76	94	95	19,4 27,8	16,1	80,9	0,335
7915CTRSU 7915A5TRSU	75	105	16	1,0	0,6	19 300 16 300	11 900 10 100	28 600 26 900	29 300 27 700	81	99	100	20,1 29,0	17,1	85,5	0,354
7916CTRSU 7916A5TRSU	80	110	16	1,0	0,6	18 100 15 000	11 100 9 300	29 000 27 300	30 500 29 000	86	104	105	20,7 30,2	18,2	90,5	0,372
7917CTRSU 7917A5TRSU	85	120	18	1,1	0,6	16 500 13 900	10 200 8 800	39 000 36 500	40 500 38 500	92	113	115	22,7 32,9	24,7	98,8	0,533
7918CTRSU 7918A5TRSU	90	125	18	1,5	0,6	15 400 13 200	9 500 8 400	41 500 39 500	46 000 43 500	97	118	120	23,4 34,1	25,6	102,8	0,559
7919CTRSU 7919A5TRSU	95	130	18	1,5	0,6	14 400 12 700	9 000 8 200	42 500 40 000	48 000 45 500	102	123	125	24,1 35,2	26,9	107,7	0,584



شکل ۳: نمودار عمر بلبرینگ نسبت به زمان

با توجه به شکل ۳ هر بلبرینگی بنا بر عوامل محیطی و نوع کارایی طول عمر قابل حصولی دارد. البته تحقیقات نشان می دهد که بنا به دلایل مختلف، اکثر بلبرینگ ها به حداکثر طول عمر خود نمی رسند. عوامل مهمی در چرخه عمر بلبرینگ ها وجود دارند که با شناخت آنها می توان طول عمر بلبرینگ ها را افزایش داد. این عوامل عبارتند از: طریقه نصب، روان کاری، تراز، کنترل شرایط محیطی و در نهایت پیاده سازی بلبرینگ. با اعمال شرایط نگهداری درست و استفاده از ابزار مناسب، می توان طول عمر بلبرینگ را افزایش و در نتیجه هزینه تعمیر و نگهداری دستگاه ها را کاهش داد.



شکل ۴: نمایی از شکل مدل تحلیلی

Model Information



Model name: angular contact ball bearing_68_din
Current Configuration: PreviewCf

Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
BallsDetailed 	Solid Body	Mass: 0.00153006 kg Volume: 1.98709e-07 m ³ Density: 7700.01 kg/m ³ Weight: 0.0149946 N	C:\SOLIDWORKS Data\browser\DIN\bearing s\ball bearings\angular contact ball bearing_68_din.sldprt Jul 31 05:30:42 2018

Solid Bodies			
نام اسناد و ارجاع	تحلیل شده به عنوان	خواص حجمی	مسیر سند / تاریخ اصلاح شده
 توب جزئیات	بدن جامد	جرم: 0.00153006 kg جلد: 1.98709e-07 m ³ چگالی: 7700.01 kg/m ³ وزن: 0.0149946 N	C:\SOLIDWORKS Data\browser\DIN\bearing s\ball bearings\angular contact ball bearing_68_din.sldprt Jul 31 05:30:42 2018

جدول ۲: اطلاعات داده شده به مسئله توسط نرم افزار تجاری سالیدورک

Study Properties

Study name	Static 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SOLIDWORKS document (C:\SOLIDWORKS Data\brower\DII\bearings\ball bearings)

Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	11/m ²

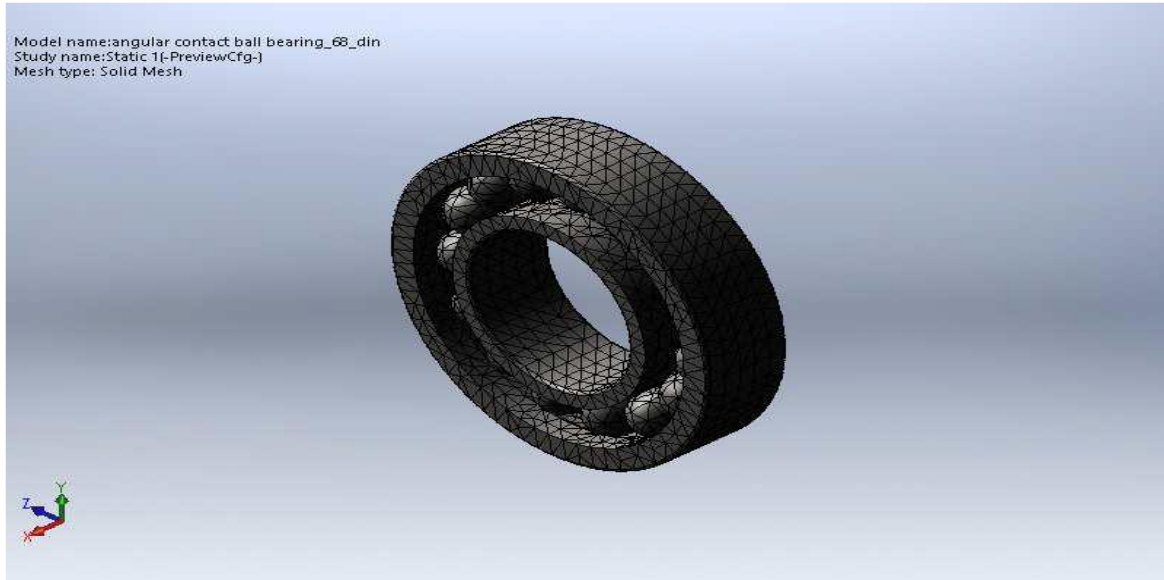
Study Propertie			
Study name	نام درس	Static 1	استاتیگ 1
Analysis type	نوع تجزیه و تحلیل	Static	استاتیگ
Mesh type	نوع مش	Solid Mesh	جامد مش
Thermal Effect:	اثر حرارتی:	On	فعال
Thermal option	گزینه حرارتی	Include temperature loads	شامل بارهای درجه حرارت
Zero strain temperature	دمای فشار صفر	298 Kelvin	293 کلوین
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	شامل اثرات فشار مایع از جریان شبیه سازی	Off	غیرفعال
Solver type	نوع حل کننده	FFEPlus	FFEPlus
Inplane Effect:	اثر هواپیما	Off	غیرفعال
Soft Spring:	بهار نرم	Off	غیرفعال
Inertial Relief:	جبران سکون	Off	غیرفعال
Incompatible bonding options	گزینه های اتصال غیر سازگار	Automatic	خودکار
Large displacement	جابجایی زیاد	Off	غیرفعال
Compute free body forces	محاسبه نیروهای بدن آزاد	On	فعال
Friction	اصطکاک	Off	غیرفعال
Use Adaptive Method:	از روش سازگاری استفاده کنید	Off	غیرفعال
Result folder	پوشه نتیجه	SOLIDWORKS document (C:\SOLIDWORKS Data\brower\DIN\bearings\ball bearings)	سند SOLIDWORKS (C:\SOLIDWORKS Data\brower\DIN\bearings\ball bearings)

Units		واحدها
Unit system:	سیستم واحد	SI (MKS)
Length/Displacement	طول / جابجایی	mm
Temperature	درجه حرارت	Kelvin
Angular velocity	سرعت زاویه ای	Rad/sec
Pressure/Stress	فشار / استرین	N/m ²

۳- مدل تحلیلی

در این قسمت یک مدل تحلیلی برای تحلیل بارگذاری عمودی روی بلبرینگ به روش المان محدود ارائه شده است که بتواند رفتار سطح مقطع و تغییرات بلبرینگ در اثر اعمال بار محوری را پیش بینی نماید. مزیت مدل تحلیلی ارائه شده این است که در یک زمان محاسباتی بسیار کم تر نسبت به شبیه سازی اجزای محدود پیش بینی خوبی از هندسه و عملکرد بلبرینگ را مهیا می سازد. همچنین علاوه بر فهم بهتر نسبت به مکانیک شکل دهی نمونه، با مطالعه مدل تحلیلی فرآیند، درک بهتری برای

تفسیر نتایج بلبرینگ حاصل خواهد شد. شکل ۴ سیستم نرم افزاری در این مدل را نشان می دهد که جنس بلبرینگ از استیل آهن بوده و نوع تحلیل ایزوتروپیک الاستیک انعطاف پذیر خطی با ضریب پواسون ۰,۲۸ و مدول الاستیسیته 2.1×10^{11} و چگالی 7700 kg/m^3 برای تحلیل مذکور به کار برده شده است و فشار وارده بر روی بلبرینگ برای بارگذاری 11 m^2 می باشد.



شکل ۵: نمایی از قطعه شبکه بندی شده با استفاده از نرم افزار تجاری سالیدورک

با توجه به شکل ۵ قطعه مذکور با استفاده از نرم افزار تجاری سالیدورک قطعه را به هزاران قسمت تقسیم کرده تا آنالیز المانی بهتری انجام شود و میزان نیروهای وارده به هر قسمت از سطح بلبرینگ اعمال شود و روند حل مسئله بهتر انجام شود.

جدول ۲: داده های مسئله برای مش زنی توسط نرم افزار تجاری سالیدورک

Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	0.583843 mm
Tolerance	0.0291921 mm
Mesh Quality Plot	High

Mesh information - Details

Total Nodes	21954
Total Elements	12584
Maximum Aspect Ratio	142.5
% of elements with Aspect Ratio < 3	92
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.0318
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:05
Computer name:	MORTEZA

Mesh information			
Mesh type	نوع مش	Solid Mesh	جامد مش
Mesher Used:	مشرقی استفاده شده	Standard mesh	مش استاندارد
Automatic Transition:	انتقال اتوماتیک:	Off	غیرفعال
Include Mesh Auto Loops:	شامل حلقه های مش مش:	Off	غیرفعال
Jacobian points	نقاطی Jacobian	4 Points	4 امتیاز
Element Size	اندازه عنصر	0.583843 mm	
Tolerance	تحمل	0.0291921 mm	
Mesh Quality Plot	طرح کیفیت مش	High	خوب

Mesh information - Details		
Total Nodes	مجموع گره ها	21954
Total Elements	عناصر مجموع	12584
Maximum Aspect Ratio	حداکثر نسبت ابعاد	142.5
% of elements with Aspect Ratio < 3	درصد عناصر یا نسبت ابعاد > 3	92
% of elements with Aspect Ratio > 10	% از عناصر یا نسبت ابعاد < 10	0.0318
% of distorted elements (Jacobian)	% از عناصر تحریف شده (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	زمان انجام مش (hh:mm:ss):	00:00:05
Computer name:	نام کامپیوتر:	MORTEZA

Resultant Forces

Reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	5.77673e-09	7.33256e-09	-1.59579e-08	1.84876e-08

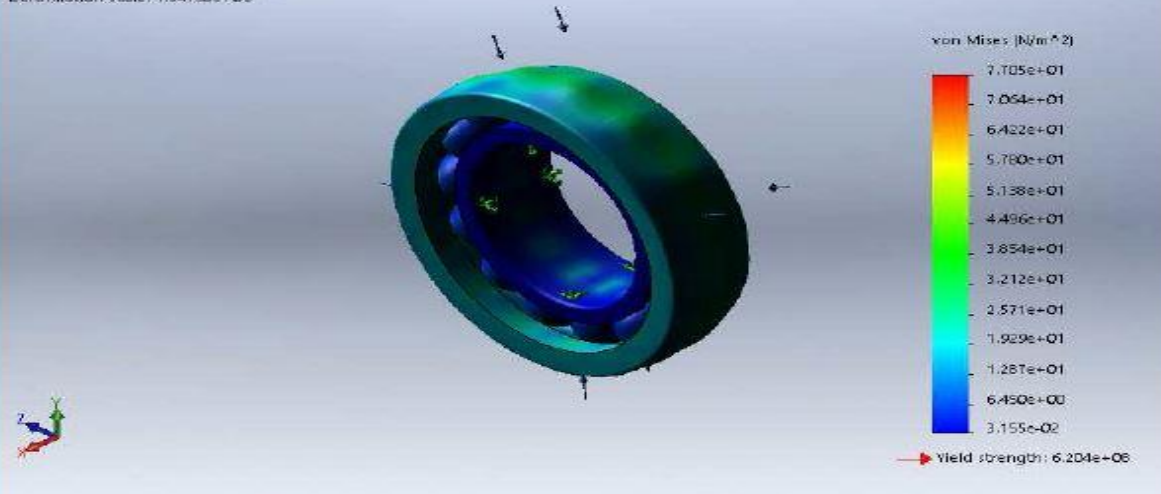
Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0

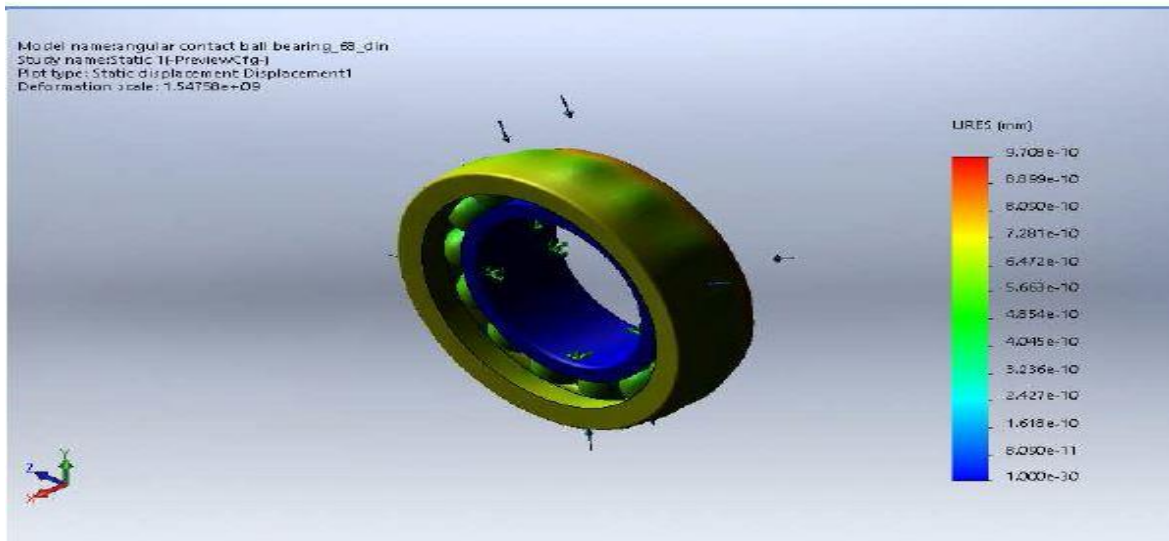
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	3.155e-02 N/m ² Node: 9488	7.705e+01 N/m ² Node: 19226

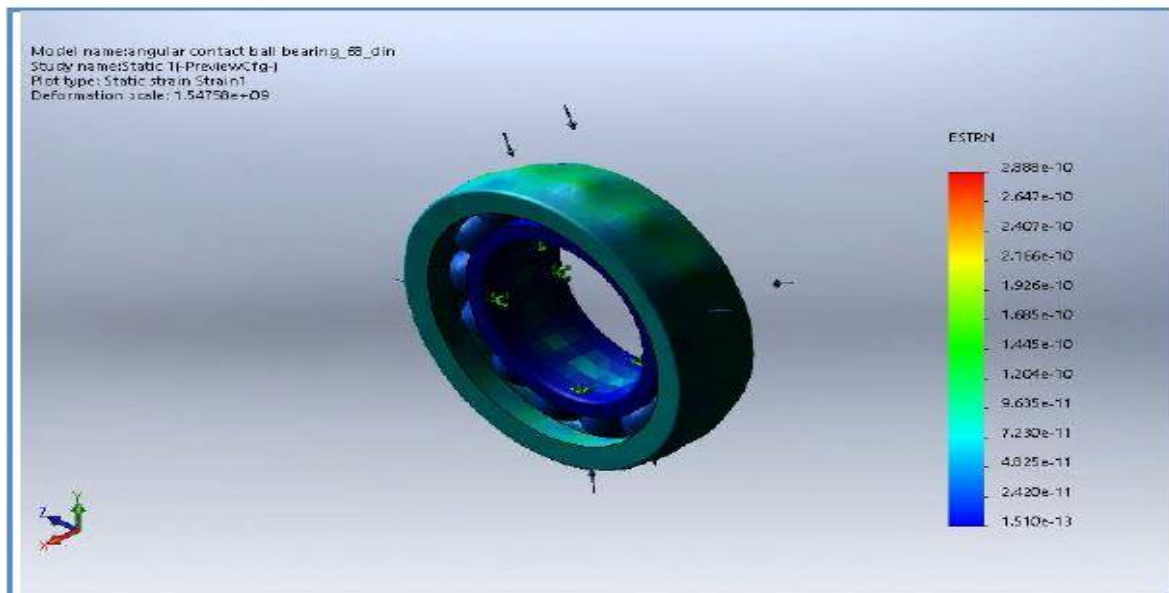
Model name: angular contact ball bearing_88_d.in
 Study name: Static 1(Preview) (1g)
 Plot type: Static nodal stress Stress1
 Deformation scale: 1.54758e+09



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+00 mm Node: 1105	9.708e-10 mm Node: 11644



Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	1.510e-13 Element: 11031	2.888e-10 Element: 4997



شکل ۶: نمایی از نتیجه گیری در ۳ حالت اعمال بار بر روی سطح بلبرینگ

۴- نتیجه گیری

با پیشرفت صنایع ماشین سازی اهمیت بلبرینگ آشکار گردیده شده است و اساس کلی که اکنون بلبرینگ بر اساس آن ساخته میشود. بیشتر پیشرفت های مهندسی بدون وجود بلبرینگ که اصطکاک را تا حد بسیار زیادی کاهش می دهند، امکان پذیر نمی باشد. بلبرینگ کف گرد و بلبرینگ چهار نقطه تماس برای تحمل بارهای محوری خالص کم تا متوسط مناسب می باشند. بلبرینگ کف گرد یکطرفه فقط بار محوری در دو جهت نیاز به بلبرینگ کف گرد دوطرفه است. در این پژوهش بر روی تحلیل بار محوری وارد بر بلبرینگ تحقیق انجام گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. روش تحلیل بار محوری با استفاده از سیمولیشن حرارتی نرم افزار سالیدورک، روشی ساده و مناسب برای تحلیل حرارتی اجزای مختلف موتور است.

۲. در روش تحلیل بار محوری با استفاده از سیمولیشن تنش نرم افزار سالیدورک هر چه تعداد گره ها بیشتر باشد دقت محاسبات بالاتر بوده و همچنین زمان حل افزایش می یابد.

مراجع

[۱] H. Qiu, J. Lee, J. Lin, G. Yu, Robust performance degradation assessment methods for enhanced rolling element bearing prognostics, *Advanced Engineering Informatics* ۱۷ (۲۰۰۳) ۱۲۷-۱۴۰.

[۲] P.W. Tse, Y.H. Peng, R. Yam, Wavelet analysis and envelope detection for rolling element bearing fault diagnosis-their effectiveness and flexibilities, *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME* ۱۲۳ (۲۰۰۱) ۳۰۳-۳۱۰.

[۳] X. Lou, K.A. Loparo, Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference, *Mechanical Systems and Signal Processing* ۱۸ (۲۰۰۴) ۱۰۷۷-۱۰۹۰.

[۴] T. Williams, X. Ribadeneira, S. Billington, T. Kurfess, Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing *Mechanical Systems and Signal Processing* ۱۵ (۲۰۰۱) ۹۷۹-۹۹۳.

[۵] International Standards Organization, ۱۹۹۱, International Standard ISO ۲۸۱/۱, "Rolling Bearings-Dynamic Load Ratings and Rating Life-Part ۱, Calculation methods."

[۶] Houpert, L., ۱۹۹۰, "Prediction of Bearing, Gear and Housing Performances," *Proceedings of the Rolling Bearing Practice Today Seminar*, I. Mech. E., London, February ۱۹۹۰.

[۷] Houpert, L., ۱۹۹۷, "A Uniform Analytical Approach for Ball and Roller Bearings Calculations," *ASME J. Tribol.*, ۱۱۹, pp. ۸۵۱-۸۵۸.

[۸] Palmgren, A., ۱۹۵۹, *Ball and Roller Bearing Engineering*, Burkbank.