

طراحی آسانسور با مکانیزم حرکتی بال اسکرو جهت کاربرد در صنعت ساختمان

جواد راستی^{*۱}

۱- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده

با رشد سریع جمعیت، نیاز به آسانسورها رو به گسترش است. نوع مرسوم آسانسور ساختمانی، نوع کششی است که نیاز به چاهک آسانسور، موتورخانه و همچنین وزنه تعادل دارد. آسانسورهای هیدرولیکی برای بار زیاد و طبقات کم بکار می روند که نیاز به موتورخانه روی بام ندارند. سیستم های پیچی نیز مانند پیچ قدرتی بیشتر برای بالابره های صنعتی کاربرد دارد که دلیل آن سرعت کم، تلفات اصطکاکی و تولید حرارت در سرعت بالاتر و همچنین احتمال کماتش است. بال اسکرو دارای حرکت نرم، بدون صدا و ارتعاش و همچنین تلفات اصطکاکی بسیار کم می باشد که می تواند سرعت بالاتری نسبت به پیچ قدرتی داشته باشد و لذا برای آسانسور کاربردی شود. بدین منظور به طراحی آسانسوری برای حمل شش نفر در سه طبقه با سیستم حرکتی بال اسکرو و با سرعت 0.6 m/s پرداخته شده است. طراحی مفهومی آسانسور و اجزاء آن، انتخاب بال اسکرو و مهره مناسب، طراحی چرخدنده مخروطی دنده مستقیم و تعیین سرعت و توان موتور در دو حالت با و بدون وزنه تعادل ارائه شده است. مقایسه این سیستم با سیستم مرسوم کششی نشان می دهد که در حالت بدون وزنه تعادل، در سرعت یکسان با سیستم کششی کابلی، این روش به موتوری با توان بالاتر نیاز دارد اما اگر سرعت به 0.45 m/s کاهش داده شود موتوری با توان کمتر از سیستم کششی کابلی نیاز است که با توجه به حذف چاهک آسانسور، موتورخانه و وزنه تعادل در جایی که سرعت پایین مشکل ساز نباشد توجیه دارد و کاربرد آن در منازل ساده تر خواهد بود. در صورت کاربرد وزنه تعادل توان موتور بسیار کاهش یافته و با استفاده از اینورتور از برق تک فاز منازل می توان این سیستم را بکار برد.

کلمات کلیدی: آسانسور، بال اسکرو، چرخدنده مخروطی، پیچ بلبرینگی، بالابر

*نویسنده مسئول: جواد راستی

پست الکترونیکی: rastinik@gmail.com ؛ rasti@qut.ac.ir

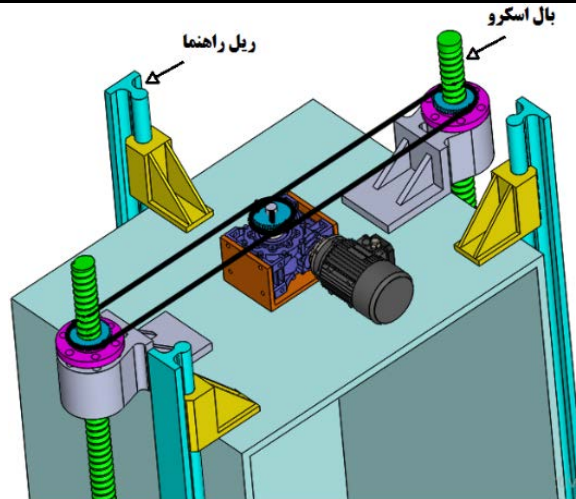
تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

در حال حاضر آسانسورهای مختلفی با توجه به نوع کاربرد، تعداد طبقات، ظرفیت مورد نیاز و میزان هزینه کرد مورد نظر به کار می رود که مرسوم ترین آنها آسانسورهای کششی گیربکس دار^۱ یا گیرلس و آسانسورهای هیدرولیکی است. سیستمهای دیگر نظیر پنوماتیکی، قیچی (ضربدری)، دنده شانه ای، پیچ قدرتی و پیچ ساچمه ای (بال اسکرو) نیز کاربرد داشته اند. به طور کلی آسانسورها می توانند با یا بدون موتورخانه، با یا بدون وزنه تعادل و به شکل متداول یا پانوراما اجرا شوند. نوع پانوراما برای دیدن مناظر در نمای ساختمان یا داخل پاساژها به کار می رود. نوع کششی همواره با وزنه تعادل بکار می رود [۳-۱]. پای و همکارانش [۴] سیستم آسانسورهای بدون موتورخانه^۲ (MRL) را مورد ارزیابی نقادانه قرار داده اند. این آسانسورها در حال حاضر به عنوان یک طرح جدید در آسانسور با مزایای ویژه قلمداد می شوند [۵]. در این آسانسورها موتور روی ریلها قرار می گیرد و ریلها از نوع متداول سپری شکل به فرم I تغییر داده شده اند [۶]. کلیک و کورباتی نیز دلیل تقاضا برای آسانسورهای هیدرولیکی را بررسی کرده اند [۷]. اصولاً سیستم هیدرولیکی برای بار زیاد و طبقات کم مناسب است. سرعت آسانسور هیدرولیکی در محدوده ۰/۰-۲/۸ m/s است و در حالت با پیستون مستقیم و غیر مستقیم به ترتیب تا ارتفاع ۱۷ و ۲۴ متر قابل کاربرد است و در این آسانسورها به موتورخانه روی بام نیاز نیست. در ساختمان های مسکونی که تعداد طبقات آن ها از روی طبقه اصلی بیش از ۲ طبقه بوده و یا فاصله بین طبقه اصلی و کف آخرین آپارتمان بیش از ۷ متر باشد پیش بینی آسانسور توصیه شده است. اگر فقط یک آسانسور بکار رود توصیه بار مجاز آن حداقل ۶۳۰ kg و حداقل سرعت ۰/۶۳ m/s می باشد. آسانسورها امروزه واقعیت جدایی ناپذیر شهرهای با جمعیت متوسط به بالا می باشند و از مولفه های ساختاری در مهندسی شهرهای هوشمند محسوب می شوند [۸].

پیچ قدرتی بیشتر برای بالابرها صنعتی کاربرد دارد که دلیل آن سرعت کم، تلفات اصطکاکی و تولید حرارت در سرعت بالاتر و همچنین احتمال کماتش است. نوع بال اسکرو کمتر مورد تحقیق قرار گرفته است. بال اسکرو با توجه به کارگیری ساچمه دارای حرکت نرم، بدون صدا و ارتعاش و همچنین تلفات اصطکاکی بسیار کم می باشد که می تواند سرعت بالاتری نسبت به پیچ قدرتی داشته باشد و لذا برای آسانسور کاربردی شود. در کار حاضر به طراحی آسانسوری با مکانیزم حرکتی پیچ ساچمه ای (بال اسکرو)^۳ پرداخته شده است. طرح مورد نظر شامل یک موتور ترمز دار است که روی سقف کابین آسانسور نصب می شود. این موتور توسط کوپلینگ به گیربکس چرخنده مخروطی با دنده های مستقیم^۴ وصل می شود و خروجی گیربکس به دو چرخنده متصل است که توسط تسمه دندانه دار^۵ چرخش موتور را به مهره های گردان بال اسکرو منتقل می کنند. گیربکس حلزونی هر چند مزیت خودقفل کنی دارد ولی اینجا کاربرد ندارد. دلیل آن نسبت کاهش سرعت زیاد آن است که بطور متداول از ۱ به ۲۰ تا ۱ به ۷۵ موجود است. در سیستم بال اسکرو چون گام پیچ زیاد نیست مهره باید با سرعت بالا بچرخد و لذا کاربرد چرخنده حلزونی این سرعت را تامین نمی کند. گیربکس چرخنده مخروطی استفاده شده دارای نسبت تبدیل ۱ به ۳ است. دو بال اسکرو در طرفین کابین استفاده شده است تا هم نیروی کمتری به هر کدام وارد شده و لذا ابعاد و هزینه هر کدام کاهش یابد و هم برآیند نیروها به مرکز کابین بدون گشتاور خمشی وارد شود. البته همزمان کردن^۶ حرکت مهره ها مهم بوده و بایستی با سیستم الکترونیکی کنترل شود. بقیه قطعات از جمله ریل، ترمز، متعلقات کابین و غیره با سیستم مرسوم آسانسور کششی کابلی تفاوت چندانی نداشته و همان اصول می تواند بکار رود. طرح مورد نظر و نحوه نصب اجزاء مختلف کنار هم در شکل ۱ دیده می شود. طراحی ها در نرم افزار سالیدورک انجام شده است.

^۱ Geared traction elevator^۲ Machine room-less elevator^۳ Ball screw^۴ Straight threaded bevel gears^۵ Time belt^۶ Synchronizing



شکل ۱: نمای کلی از آسانسور طراحی شده با مکانیزم بال اسکرو.

۲- محاسبات و طراحی

در این مقاله به طراحی آسانسوری برای حمل ۶ نفر در ۳ طبقه پرداخته می شود. ابتدا ابعاد و اندازه های استاندارد آسانسور بر مبنای استاندارد EN-81 و مبحث ۱۵ مشخص می شود [۹]. سپس با توجه به نیروهای وارد بر آسانسور و سرعت مورد نیاز، بال اسکرو و مهره مناسب، انتخاب شده است. در انتخاب بال اسکرو از کاتالوگ محصولات شرکت هایپوین استفاده شده است [۱۰]. در مرحله بعد طراحی گیربکس مخروطی دنده مستقیم بر اساس اصول کتاب طراحی اجزاء ماشین شیگلی [۱۱] انجام می شود. سپس توان و سرعت موتور به دست آمده و بر اساس کاتالوگ شرکت ABB موتور ترمزدار مناسب انتخاب شده است [۱۲]. با توجه به مشابهت بقیه موارد طراحی از جمله ریلها و ترمز و غیره با سیستمهای مرسوم به آنها پرداخته نشده است.

۲-۱- ابعاد و وزن آسانسور

با توجه به طراحی آسانسور برای حمل ۶ نفر در سه طبقه ابتدا ابعاد کابین از استاندارد EN-81 و مبحث ۱۵ به دست می آید. کابین جزئی از آسانسور است که مسافر یا بار را درون خود جا می دهد. سطح مفید کابین سطحی است که برای ایستادن مسافر و گذاشتن بار به کار می رود و مساحت کابین برای جلوگیری از اضافه بار باید محدود گردد. سطح کابین در اینجا با توجه به ۶ نفر برابر ۱/۱۷ متر مربع و بر اساس جرم متوسط هر نفر به میزان ۷۵ کیلوگرم برابر ۱/۳ متر مربع می شود. عرض، عمق و ارتفاع کابین به ترتیب برابر ۱۱۰۰، ۱۱۰۰ و ۲۲۰۰ میلیمتر می شود. نیروهای وارد بر آسانسور برابر مقدار زیر به دست می آید:

$$F = (K + 1.25Q) \times (g + a) \cong 12000 \text{ N} \quad (1)$$

در این رابطه K جرم کابین به همراه قطعات روی آن است که بر مبنای تجربه و راهبرد مرجع [۱] حدود ۶۰۰ کیلوگرم برآورد می شود. مقدار Q جرم نفرات در آسانسور است که برابر ۴۵۰ کیلوگرم می باشد. پارامتر g شتاب جاذبه (برابر ۹/۸۱ m/s²) و a شتاب آسانسور برابر ۰/۵ m/s² در نظر گرفته شد که شتاب مناسبی برای جایابی انسان است و بر اساس مشاوره با اساتید لحاظ شد. لذا نیروی کل برابر ۱۲ kN می شود. سرعت جایابی آسانسورهای حمل انسان با توجه به نیاز بر حسب تعداد طبقات و ظرفیت آسانسور تغییر می کند، به عنوان مثال در برج میلاد این سرعت ۷ m/s و در برج سپهر بانک صادرات ۴ m/s است اما در ساختمان های مسکونی معمولاً در محدوده ۰/۵-۲ m/s

در نظر گرفته می شود. در اینجا طراحی بر اساس سرعت 0.6 m/s انجام شد. طراحی ها به ترتیب برای بال اسکرو، گیربکس مخروطی و در نهایت موتور در دو حالت با وزنه تعادل و بدون آن انجام شده و با سیستم کششی مرسوم مقایسه شده است.

۲-۲- انتخاب بال اسکرو و مهره:

بال اسکروها پیچهایی با مهره بلبرینگی هستند که وظیفه اصلی آنها تبدیل حرکت دورانی به خطی و یا تبدیل گشتاور دورانی به نیروی محوری و برعکس می باشد (شکل ۲).



شکل ۲: بال اسکروهای متداول در صنعت با مهره فلنجی و مهره گرد.

پیچ های قدرتی با دنده مربعی یا دنده دوزنقه ای ACME نیز همین کار را می کنند. در صنعت به این پیچ ها لید اسکرو^۱ گفته می شود. اما مزیت بال اسکروها بر این پیچ ها کاهش تلفات اصطکاکی، گرم شدن ناچیز، حرکت آرام و بدون صدا و ارتعاش و دقت در حرکت و موقعیت یابی است. بال اسکروها در ساخت بسیاری از ماشین آلات با کنترل دیجیتالی نظیر ماشینهای کنترل عددی بکار می روند. در کار حاضر انتخاب بال اسکروها بر اساس کاتالوگ شرکت هایوین انجام می شود زیرا بال اسکروهای ساخت این شرکت دقت ساخت بالایی داشته و در بازار ایران به وفور یافت می شوند. دقت ساخت این بال اسکروها به سه دسته سنگ زده شده دقیق، نوردی دقیق و نوردی معمولی تقسیم می شوند که با نشان Cx نامگذاری شده اند و هر چه x کمتر باشد دقت ساخت بالاتر است (جدول ۱). در اینجا با توجه به عدم نیاز به دقت مکان یابی بالا، نوع نوردی معمولی با دقت ساخت C6-C10 مناسب است. در طرح حاضر نوع C7 با دقت حدود $50 \mu\text{m}$ در مسافت 300 mm انتخاب شد که برای آسانسور دقت بالایی می باشد.

جدول ۱: دقت بال اسکروها در نوع سنگ زده شده و نوردی در طول ۳۰۰ میلیمتری بر حسب میکرومتر.

نوع بال اسکرو	سنگ زده شده									
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	نوردی			
خطا در ۳۰۰ میلیمتر \varnothing_{300p}	۳/۵	۵	۶	۸	۱۲	۱۸	۲۳	۵۰	۱۰۰	۲۱۰

مهره بال اسکروها بر اساس مکانیزم برگشت ساچمه ها به چهار دسته لوله خارجی^۲، لوله داخلی^۳، حلقه انتهایی^۴ و نوع Super s تقسیم می شوند که با توجه به طول زیاد بال اسکرو مورد نیاز (طول بیش از $1/5 \text{ m}$) چرخاندن بال اسکرو برای انتقال خطی مهره روی آن صحیح نبوده

^۱ Lead screw

^۲ External recirculation tube

^۳ Internal recirculation tube

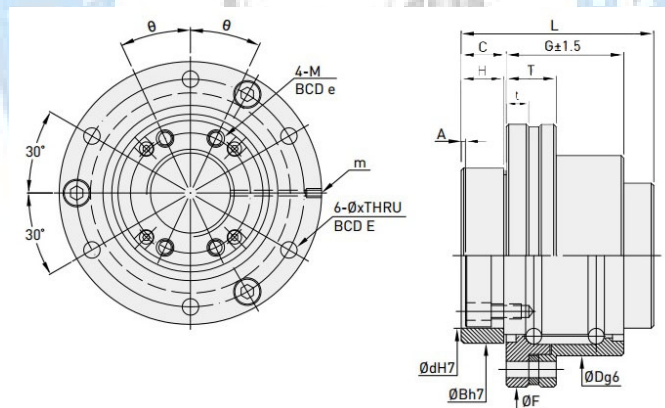
^۴ End cap

و بایستی مهره گردان بکار رفته و بال اسکروی ثابت استفاده شود. نوع متداول مهره ای که دارای این قابلیت است نوع حلقه انتهایی می باشد زیرا مکانیزم برگشت ساچمه درون خود مهره طراحی شده و به حلقه های انتهایی آن می توان چرخنده متصل کرد (شکل ۳).



شکل ۳: مهره بال اسکرو از نوع گردان و حلقه انتهایی.

انتخاب بال اسکرو و مهره بر اساس میزان بار اعمالی متوسط، عمر مورد انتظار، پیش بار اعمالی بر مهره و سرعت جابجایی مهره می باشد. بال اسکروی پیشنهادی با کد 2R40-40S2-DFSHR1 از کاتالوگ هایوین صفحه ۱۵۳ [۱۰] انتخاب شد. در این کد عدد ۲ به معنای دو راهه بودن و R راستگرد بودن مهره است. بال اسکرو دارای قطر خارجی ۴۰ mm بوده گام آن نیز ۴۰ mm است. قطر ساچمه ۶/۳۵ mm است و لذا قطر ریشه ۳۳/۷ mm می باشد. مکانیزم برگشت حلقه انتهایی با دو مسیر برگشت هر کدام ۱/۸ دور است. پارامتر R1 در این کد به معنای چرخان بودن مهره می باشد. مشخصات کامل فنی این مهره در شکل ۴ دیده می شود.



Model	Bearing		Nut				Flange			Bolt				Bush				Oil hole	
	Dynamic Load(kgf)	Static Load(kgf)	D	G	L	C	F	T	t	BCD-E	BCD-e	θ	M	X	d	B	H		A
40-40S2	4800	8148	110	62	98	22.5	140	20	9	123	61	25	M8x1.25P	9	73	90	21.5	3	M6x0.75P

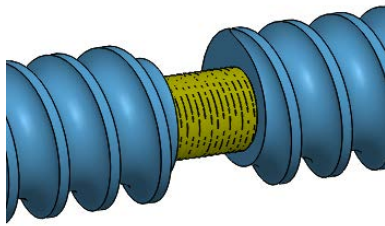
شکل ۴: مشخصات فنی مهره بال اسکروی انتخاب شده [۱۰].

در رابطه با طول بال اسکرو با توجه به ابعاد در دسترس شرکت هایوین (جدول ۲) در قطر ۴۰ mm طول ۵/۶ m انتخاب می شود که برای ایجاد کورس حرکتی آسانسور برای ۳ طبقه بایستی دو بال اسکرو بصورت سر به سر و خیلی دقیق به هم متصل شوند (هر طبقه ۳/۵ m و در کل ۱۰/۵ m). در نحوه اتصال مطابق شکل ۵ بایستی شیار گامها در امتداد هم قرار گیرند. در محاسبات، استحکام پیچ رابط برای تحمل بار

بایستی بررسی شود. لازم به ذکر است قطر استاندارد شده و موجود بال اسکرو بالاتر از 40 mm در بازار موجود نبوده و به صورت سفارشی تولید می شود. بررسی بال اسکروهای مهره گردان مدل NHK چین نیز عدم تولید بال اسکرو با قطر بالاتر از 40 mm را تایید می کند.

جدول ۲: طول استاندارد بال اسکروهای شرکت هایوین (m) بر حسب قطر خارجی و دقت ساخت.

قطر خارجی (mm) / دقت	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۶	۲۰	۲۵	۲۸	۳۲	۳۶	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۳	۷۰	۸۰	۱۰۰
C6	۰/۴	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۵	۱/۸	۲/۵	۳	۳	۴	۴	۴	۵/۶	۵/۶	۶/۹	۷/۱	۱۰	۱۰
C7	۰/۴	۰/۸	۱	۱/۲	۳	۳	۴	۴	۴/۵	۴/۵	۵/۶	۵/۶	۵/۶	۵/۶	۶/۹	۷/۱	۱۰	۱۰



شکل ۵: نحوه اتصال دو بال اسکرو با پیچ به نحوی که شیارهای حرکت ساچمه در امتداد هم باشند.

مطابق شکل ۴ ظرفیت استاتیکی و دینامیکی بال اسکرو به ترتیب برابر 8148 kgf و 4800 kgf می باشد. لذا ضریب ایمنی استاتیکی بال اسکرو برابر است با:

$$S_f = 8148 * 9.81 / (12000 / 2) = 13.3 \quad (2)$$

با توجه به گام بال اسکرو برابر 40 mm و سرعت حرکت آسانسور برابر 0.6 m/s لذا سرعت چرخش مهره برابر 900 rpm می شود. پیش بار لازم برای حذف خلاصی در بار 12 kN بر اساس کاتالوگ برابر است با:

$$P = F_a / 2.8 = 6000 / 2.8 = 2140 N \quad (3)$$

لذا نیروی کل وارد بر بال اسکرو مطابق زیر خواهد بود:

$$F_t = 6000 + 2140 = 8140 N \quad (4)$$

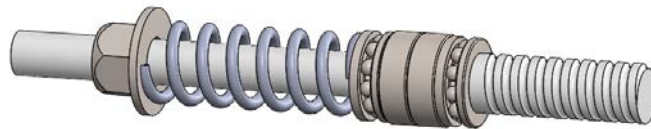
همچنین عمر بال اسکرو و مهره با قابلیت اعتماد 90٪ برابر است با [10]:

$$L_h = \left(\frac{C}{F_t}\right)^3 \times \frac{10^6}{n_{av} \times 60} = \left(\frac{4800 * 9.81}{8140}\right)^3 \times 10^6 / (900 * 60) = 3584 \text{ ساعت} \quad (5)$$

که با فرض 5 ساعت کار مداوم در روز، به مدت حدود دو سال با قابلیت اعتماد 90٪ کار خواهد کرد و پس از آن نیاز به بازبینی و تعویض مهره خواهد داشت.

۲-۲-۲- تکیه گاه بال اسکرو:

در دوانتهای بال اسکرو تکیه گاه های نوع BK و BF بکار می رود. با توجه به طول زیاد و قطر نسبتاً کم (ضریب لاغری بالا) بال اسکرو دچار کماتش خواهد شد. لذا طراحی به گونه ای انجام می شود که بال اسکرو از قسمت بالا ثابت شود یعنی بال اسکرو تحت کشش و نه فشار قرار گیرد. به این ترتیب در قسمت فوقانی تکیه گاه نوع BK بکار رفته و در قسمت پایین نوع BF استفاده می شود. مونتاژ باید به گونه ای انجام شود که امکان حرکت محوری برای بال اسکرو از میان تکیه گاه ها باشد. برای جذب شوکهای حرکتی، سیستم تعلیق و فنر بندی در تکیه گاه نوع BK بکار می رود (شکل ۶). در تکیه گاه فوقانی BK از چهار بلبرینگ نوع تماس زاویه ای استفاده شد. البته می توان از ترکیب بلبرینگهای شیپار عمیق و بلبرینگ کف گرد (Trust) نیز استفاده شود. نوع تکیه گاه مناسب مدل WBK 30 DFF انتخاب شد که در جدول ۳ خصوصیات مکانیکی آن دیده می شود. ملاحظه می شود که نیروی محوری مجاز آن ۸۶ kN است که نسبت به نیروی طراحی ۶ kN ضریب ایمنی ۱۴ دارد.



شکل ۶: تکیه گاه نوع BK و سیستم تعلیق در قسمت فوقانی بال اسکرو.

جدول ۳: نوع تکیه گاه بکار رفته در اتصال فوقانی بال اسکرو و مشخصات فنی آن

قطر (mm)	استاندارد	ظرفیت دینامیکی kN	نیروی مجاز محوری kN	پیش بار kN	صلبیت N/μm	حداکثر گشتاور N.m
30	WBK 30 DFF	۴۷/۵	۸۶	۶/۷	۲۰۱۰	۰/۵

مشخصات فنر مناسب نیز بر اساس روابط کتاب طراحی اجزاء شیگلی [۱۱] به شرح زیر است:

فنر دو سر تخت و سنگ خورده بعد از تنظیم نهایی (set removed) از نوع فولاد کروم وانادیم A232 شماره ۷/۰ که قطر آن از جدول الف- ۲۸ کتاب طراحی اجزاء شیگلی برابر ۰/۴۹ in (۱۲/۴۴ mm) به دست می آید. قطر متوسط $D=53$ mm در نظر گرفته می شود و لذا $C=D/d=4.26$ که در محدود ۴ تا ۱۲ قرار دارد. محاسبات زیر ضریب ایمنی را نشان می دهد.

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} = \frac{2005}{12.44^{0.168}} = 1312 \text{ MPa} \rightarrow \tau_{all} = 0.65 \times S_{ut} = 853 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{all}}{n_s} = \frac{4C + 2}{4C - 3} \frac{8(1 + \epsilon)F_{max}D}{\pi d^3} \rightarrow \frac{853}{n_s} = \frac{4 \times 4.26 + 2}{4 \times 4.26 - 3} \frac{8(1 + 0.15) \times 6000 \times 53}{\pi \times 12.44^3} \rightarrow n_s = 1.3$$

با فرض اینکه حداکثر جابجایی مجاز فنر ۳۰ mm در حین کار باشد لذا:

$$k = \frac{F_{max}}{\delta_{max}} = \frac{6000}{30} = 200 \frac{N}{mm} \rightarrow k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \rightarrow 200 = \frac{12.44^4 \times 77200}{8 \times 53^3 \times N_a} \rightarrow N_a = 8 \rightarrow N_t = 10$$

پیچ رابط واسط بین دو بال اسکرو نیز پیچ با گام ریز M24×2 (قطر خارجی ۲۴۰ mm و گام ۲ mm) بکار رفت. سطح موثر این پیچ برابر mm^2 ۳۸۴ (قطر موثر ۲۲/۱ mm) و استحکام پایه (proof strength) آن بر اساس جنس فولاد متوسط کربن برابر ۳۳ ksi (۲۲۷ MPa) می باشد. محاسبات ضریب ایمنی بر اساس تنش خمشی وارد بر دنده ها و همچنین تنش برشی در میانه یک دنده به صورت زیر است:

$$\sigma_b = \frac{2 * 0.38 F}{\pi d_r p} = \frac{2 * 0.38 * 6000}{\pi * 22.1 * 2} = 32.8 \text{ MPa}, n_b = \frac{227}{32.8} = 6.9$$

$$\tau = \frac{3 F}{\pi d_r n_t p} = \frac{3 * 6000}{\pi * 22.1 * 20 * 2} = 6.5 \text{ MPa}, n_t = \frac{0.4 * 227}{6.5} = 14$$

(۸) [۱۱]

این محاسبات برای طول پیچ از هر طرف برابر ۲۰ گام یعنی ۴۰ mm در نظر گرفته شده است (کل طول پیچ برابر ۸ cm). حال سوالی که پیش می آید این است که در هنگام سوراخ داخل بال اسکرو و قلاویز کردن آن چه تضمینی وجود دارد که بعد از محکم کردن پیچ واسط داخلی یکی از بال اسکروها و سپس محکم کردن بالا اسکرو بعدی، رزوه های بال اسکرو در یک راستا قرار گیرند؟ برای رفع این مشکل یک راه این است که هنگام سوراخکاری داخل بال اسکرو طول مشخصی با قطر بزرگتر از پیچ سوراخ شود، مثلاً در هر بال اسکرو طول ۱ cm، در اینصورت در این فاصله ۲ cm با محکم پیچاندن بال اسکرو برای اینکه رزوه ها در یک راستا قرار گیرند پیچ تحت یک کشش اولیه قرار می گیرد که با توجه به ضریب ایمنی بالا مشکلی ایجاد نخواهد شد. مسئله دیگر کم شدن مقطع بال اسکرو در محل رزوه شدن است. با توجه به مساحت باقیمانده یعنی $\frac{\pi}{4}(33.7^2 - 24^2) = 440 \text{ mm}^2$ و استحکام تسلیم بال اسکرو (جنس فولاد Ck45) برابر ۶۰ ksi (۴۱۰ MPa) لذا حد تحمل نیرو برابر ۱۸۰ kN می شود که نسبت به ۶ kN اعمالی بسیار بالاست.

۲-۳- مشخصات گیربکس و موتور:

از نیازمندی ها و محاسبات بخش قبل نتیجه گرفته شد که مهره بایستی با سرعت ۹۰۰ rpm چرخیده و به هر مهره نیروی حداقلی ۸۱۴۰ N وارد می شود (مجموع نیروی کاری و نیروی پیش بار). با لحاظ کردن نیروی اصطکاکی ریل های راهنما نیرویی معادل ۲۰ kN در نظر گرفته شد که بایستی توسط موتور و گیربکس تامین شود. گشتاور مورد نیاز بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$T_a = \frac{F_b \times l}{2\pi\eta} \quad (9)$$

که در این رابطه F_b همان نیروی مجموع فوق، l گام مهره (۴۰ mm) و η بازدهی مکانیکی است (حدود ۰/۹) و لذا گشتاور برابر ۱۴۲ N.m می شود. گیربکس از نوع مخروطی با دنده مستقیم در نظر گرفته شد. محاسبات این گیربکس بر اساس کتاب طراحی اجزاء شیگلی بر اساس چند مدول انجام شد و در هر مورد ضرایب ایمنی در برابر بار یا تنش سایشی و تنش خمشی بدست آمد. جدول ۴ این ضرایب ایمنی را نشان می دهد. در مدول ۶ mm که ضرایب ایمنی مناسب است محاسبات آورده شده است.

جدول ۴: ضرایب ایمنی در برابر سایش و خمش برای مدول های مختلف چرخنده مخروطی

مدول (mm)	ضریب ایمنی در برابر سایش		ضریب ایمنی در برابر خمش (نسبت به تنش یا بار)
	نسبت به تنش	نسبت به بار	
۴	۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۵۱
۵	۱/۰۲	۱/۰۱	۰/۹۴
۶	۱/۲۷	۱/۱۳	۱/۵۵
۷	۱/۵۳	۱/۲۴	۲/۳۵

محاسبات برای مدول برابر ۶ mm به نحو زیر بوده است:

زاویه فشار 20° و زاویه شفت 90° ، تعداد دندانه پینیون $N_p=15$ (بر اساس عدم تداخل حداقل تعداد دندانه پینیون برای چرخ با بیش از ۳۰ دندانه برابر ۱۳ است که عدد ۱۵ در نظر گرفته شد)، تعداد دندانه چرخ $N_g=45$ ، نسبت تبدیل $m_g=3$ ، سرعت پینیون 2700 rpm ، سرعت چرخ 900 rpm (متصل به مهره بال اسکرو توسط تسمه دندانه دار و فولی در دو طرف با قطر مساوی)، پهناي صورت دندانه (b) برابر $10m=60 \text{ mm}$ ، قطر پینیون و چرخ در قسمت تاج به ترتیب برابر 90 mm و 270 mm ،

$$W_t = \frac{2T}{d_p} = 142 \text{ N}$$

$$\sigma_H = Z_E \left(\frac{W_t K_A K_\theta K_H \beta Z_x Z_{xc}}{b d_p Z_l} \right)^{0.5} = 190 \left(\frac{142 \times 1.35 \times 1.56 \times 1.27 \times 0.73 \times 1.5}{60 \times 90 \times 0.075} \right)^{0.5} = 898 \text{ MPa} \quad \text{تنش اعمالی سایشی}$$

$$\sigma_{Hlim} = 2.35 H_B + 162.89 \quad \text{استحکام سایشی فولاد تمام سخت شده با حداقل سختی سطح ۳۰۰ برینل با کیفیت بالا}$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_{NT} Z_w}{K_{\theta} Z_z} = \frac{868 \times 1.32 \times 1}{1 \times 1} = 1145 \text{ MPa} \quad \text{تنش مجاز سایشی}$$

$$S_H = \frac{\sigma_{HP}}{\sigma_H} = 1.27 \quad \text{ضریب ایمنی سایشی نسبت به تنش}$$

$$\sqrt{S_H} = 1.13 \quad \text{ضریب ایمنی سایشی نسبت به بار}$$

(۱۰)

$$\sigma_F = \frac{W_t K_A K_{\theta} K_H \beta Y_x}{b \cdot m \cdot Y_{\beta} \cdot Y_J} = \frac{142 \times 1.35 \times 1.18 \times 1.27 \times 0.54}{60 \times 6 \times 1 \times 0.182} = 67.4 \text{ MPa} \quad \text{تنش اعمالی خمشی}$$

$$\sigma_{Flim} = 0.3 H_B + 14.48 \quad \text{استحکام خمشی فولاد تمام سخت شده با حداقل سختی سطح ۳۰۰ برینل با کیفیت بالا}$$

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_{NT}}{K_{\theta} Y_z} = \frac{104.5 \times 1}{1 \times 1} = 104.5 \text{ MPa} \quad \text{تنش مجاز خمشی}$$

$$S_F = \frac{\sigma_{FP}}{\sigma_F} = 1.55 \quad \text{ضریب ایمنی خمشی نسبت به تنش و بار}$$

انتخاب موتور بر اساس سرعت مهره گردان (۹۰۰ rpm) و گشتاور مورد نیاز بالا بردن (رابطه (۹)) می باشد. توان مورد نیاز برابر است با:

$$P = T\omega = 142 \times 2\pi \times \frac{900}{60} = 13.37 \text{ kW} = 18 \text{ HP} \quad \text{توان مورد نیاز} \quad (۱۱)$$

که این توان برای حالت بدون کاربرد وزنه تعادل می باشد که توان نسبتاً بالایی است. همچنین سرعت چرخش موتور بایستی برابر سرعت پینیون باشد که برابر ۲۷۰۰ rpm می باشد. با توجه به کاتالوگ موتوژن تبریز موتور انتخابی موتور سه فاز تیپ 160L2B می باشد که توان آن برابر ۱۵ KW و سرعت آن ۲۹۲۵ rpm و گشتاور نامی آن ۴۹ N.m می باشد که با سه برابر شدن در گیربکس به ۱۴۷ N.m می رسد که از ۱۴۲ N.m مورد نیاز بالاتر است. وزن این موتور ۸۲ kg است. البته این موتور ترمزدار نمی باشد و چون در این طرح نیاز به موتور ترمزدار با قدرت ترمز کافی است موتور انتخابی بر اساس کاتالوگ موتور شرکت ABB از نوع M3ARF 160 M انتخاب می شود که دارای توان ۱۵ KW، سرعت ۲۹۳۰ rpm و گشتاور نامی ۴۹ N.m می باشد. گشتاور ترمز این موتور ۲۰۰ N.m است که با توجه به تغییر سرعت در گیربکس این گشتاور سه برابر می شود و لذا با ضریب ایمنی مناسبی بر گشتاور ۱۴۲ N.m که آستانه گشتاور برای غلبه بر وزن محسوب می شود چیره شده و آسانسور را نگه می دارد. وزن این موتور برابر ۱۳۴ Kg است که جزء وزن کابین (۶۰۰ Kg) در نظر گرفته می شود. البته می توان با کاهش گام بال اسکرو موتوری با قدرت کمتر استفاده کرد، اما سرعت آسانسور کاهش می یابد که زیر سرعت ۰/۶ m/s دیگر منطقی و قابل کاربرد نیست. البته می توان با حذف گیربکس و اتصال مستقیم موتور به مهره گردان های بال اسکرو سرعت را تا سه برابر افزایش داد اما هم در ساختمان مسکونی نیاز به این سرعت بالا نیست و هم اینکه گیربکس ارتعاشات موتور را حذف کرده و به عنوان فیوزی بین مهره و موتور عمل کرده و همچنین قدرت ترمز موتور را تا حد زیادی افزایش می دهند که از لحاظ ایمنی قابل توجه است. برای کاهش توان مورد نیاز موتور می توان وزنه های تعادل در سیستم را حذف نکرد. البته این عدم حذف باعث هزینه بر شدن سیستم از جهت هزینه های خود وزنه ها و همچنین گایدهای آن و استقرار آن در سیستم می باشد. وزنه های تعادل مورد نیاز دارای جرم زیر می باشند:

$$Z = \left(K + \frac{Q}{2} \right) = 600 + \frac{450}{2} = 825 \text{ kg} \quad (۱۲)$$

و لذا نیرویی که موتور باید بر آن غلبه کند با احتساب نیروی پیش بار مهره بال اسکرو و تلفات اصطکاکی ریل های راهنما برابر است با:

$$F = (F_{old} - Z(g + a)) \times \left(1 + \frac{1}{2.8} \right) \times 1.25 = (12 - 0.825 \times 10.31) = 6 \text{ kN} \quad (۱۳)$$

لذا نیروی وارد بر هر بال اسکرو 3 KN خواهد بود. با فرض کاربرد همان بال اسکرو و مهره قبلی مشخصات گیربکس و موتور به شرح جدول خواهد بود.

مشخصات موتور:

$$T_a = \frac{F_b \times l}{2\pi\eta} = \frac{6 \times 40}{2\pi \times 0.9} = 42.5 \text{ N.m}$$

$$P = T\omega = 42.5 \times 2\pi \times \frac{900}{60} = 4 \text{ kW} = 5.4 \text{ HP}$$
(۱۴)

لذا موتور انتخابی دارای توان 4 kW و سرعت حداقلی 2700 RPM خواهد بود که از کاتولوک شرکت ABB موتور M3ARF 112 M انتخاب شد که دارای توان 4 kW و سرعت 2850 RPM می باشد و گشتاور آن 13.4 N.m است که به سه برابر شدن در گیربکس 40.2 N.m می شود. گشتاور ترمز هم 86 N.m است که با سه برابر شدن در گیربکس کاملاً حتی در شرایط پاره شدن کابل اتصال وزنه های تعادل، وزن کابین و نفرت را مهار می کند. سرعت انتقال هم با کاربرد این موتور برابر ۰/۶۳۳ m/s خواهد بود که از مقدار حداقلی ۰/۶۳۳ m/s آیین نامه نظام مهندسی ساختمان بر اساس مبنای استاندارد EN-81 و مبحث ۱۵ مقررات ملی ساختمان کمی بیشتر است. مشخصات گیربکس:

گیربکس از همان نوع مخروطی دندانه مستقیم با مدول ۴ در نظر گرفته شد که تعداد دندانه پینیون و چرخ به ترتیب ۱۵ و ۴۵ و قطر پینیون و چرخ در قسمت تاج به ترتیب برابر ۶۰ mm و ۱۸۰ mm می شود. ضرایب ایمنی در برابر سایش نسبت به تنش و بار به ترتیب ۱/۴ و ۱/۲ و ضریب ایمنی در برابر خمش برابر ۱/۸ می شود.

در نهایت اجزاء طراحی شده جهت آسانسوری برای حمل ۶ انسان (۴۵۰ Kg) در سه طبقه (۱۰/۵ m) با وزن کابین و قطعات ۶۰۰ Kg و با شتاب ۰/۵ m/s² و سرعت ۰/۶ m/s به شرح جدول ۵ می باشد. جدول ۶ نیز همین موارد را با به کارگیری وزنه تعادل نشان می دهد.

جدول ۵: مشخصات اجزاء طراحی شده برای آسانسور حمل ۶ نفر در سه طبقه با مکانیزم بالاسکرو (سرعت ۰/۶ m/s)

مشخصات موتور	مشخصات گیربکس	مشخصات بالاسکرو و مهره
نوع M3ARF 160 M شرکت ABB	نوع مخروطی دندانه مستقیم	نوع 2R40-40S2-DFSHR1
سرعت 2930 rpm	مدول: ۶ mm	قطر خارجی: ۴۰ mm و گام: ۴۰ mm
توان 15 KW	تعداد دندانه پینیون: ۱۵	مکانیزم مهره گردان End Cap
گشتاور نامی 49 N.m	تعداد دندانه چرخ: ۴۵	دو طول ۵/۶ m برای سه طبقه که با پیچ میانی به هم وصل می شوند.
گشتاور ترمز 200 N.m	قطر پینیون و چرخ: ۹۰ و ۲۷۰ mm	حداقل عمر ۵ سال روزی ۵ ساعت
وزن 134 Kg	سرعت پینیون (حداقل - وصل به موتور): ۲۷۰۰ rpm	تکیه گاه WBK 30 DFF در سمت بالا و در سمت پایین نوع BF
	سرعت چرخ (وصل به مهره): ۹۰۰ rpm	استفاده از فنر در بالا جهت حذف شوک
	ضریب ایمنی سایش و خمش: ۱/۱۳ و ۱/۵۵	

جدول ۶: مشخصات اجزاء طراحی شده برای آسانسور حمل ۶ نفر در سه طبقه با مکانیزم بالاسکرو و با کاربرد وزنه تعادل

مشخصات موتور	مشخصات گیربکس
نوع M3ARF 112 M شرکت ABB	نوع مخروطی دندانه مستقیم
سرعت 2850 rpm	مدول: ۴ mm
توان 4 KW	تعداد دندانه پینیون: ۱۵
گشتاور نامی 13.4 N.m	تعداد دندانه چرخ: ۴۵
گشتاور ترمز 86 N.m	قطر پینیون و چرخ: ۶۰ و ۱۸۰ mm
وزن 38 Kg	سرعت پینیون (حداقل - وصل به موتور): ۲۷۰۰ rpm
	سرعت چرخ (وصل به مهره): ۹۰۰ rpm
	ضریب ایمنی سایش و خمش: ۱/۴ و ۱/۸

جدول ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در مقایسه با سیستم کابلی مرسوم، در حالت بدون وزنه تعادل موتوری با توان و قدرت بالاتر نیاز است که منطقی نیست. البته می‌توان با کاهش گام بال اسکرو به 30 mm توان مورد نیاز موتور را تا حد 11 KW کاهش داد اما سرعت نیز به 0/45 m/s کاهش می‌یابد. با اضافه شدن وزنه های تعادل براکت آن نیز بایستی نصب شود. کابلها نیز اضافه می‌شوند و خود تامین وزنه ها به میزان حدود یک تن نیز هزینه بر است. اما با کاربرد وزنه های تعادل قدرت مورد نیاز موتور به حدود 4 kW می‌رسد و اندازه و قیمت گیربکس نیز کاهش می‌یابد. چنین موتوری برای کاربرد ساختمانی مناسب تر است. جهت استفاده در منازل مسکونی بایستی سیستمی برقی نیز در نظر گرفته شود تا از برق تک فاز توسط ترکیبی از اینورتر، خازن و سلف، تاخیر فازی ایجاد شده و برق سه فاز مورد نیاز موتور از همان برق تک فاز تامین شود. بطور معمول در آسانسورهای با سیستم کشش کابلی، توان و سرعت موتور مورد استفاده به ترتیب برای حمل ۶ و ۸ نفر انسان عبارت است از: 6 kW، 900 rpm و 7/5 kW، 900 rpm که با یک گیربکس حلزونی کوپل می‌شود. در مقایسه با موتور محاسبه شده در جدول ۶ برای آسانسور با سیستم حرکتی بال اسکرو توان مورد نیاز موتور کمی کاهش یافته است و در کنار دیگر مزایا از جمله حذف موتورخانه و چاهک و همچنین کاهش سر و صدا و سادگی اجرا این سیستم جهت ساختمانهای تا نهایت ۳ طبقه می‌تواند توصیه شود. نکته نهایی در طراحی این سیستم بکارگیری یک موتور کوچک در قسمت پایینی بال اسکروها می‌باشد که در صورت قطع برق با تامین برق DC از یک منبع برق اضطراری (UPS) بتواند کابین را به نزدیکترین درب خروجی برساند.

۳- نتیجه گیری

در این تحقیق طراحی آسانسوری با مکانیزم حرکتی بال اسکرو بررسی و طراحی شد. این آسانسور برای حمل شش نفر در ۳ طبقه در نظر گرفته شد و با محاسبات مشخصات بال اسکرو و مهره مناسب، تکیه گاه و یاتاقان های مناسب و سیستم تعلیق در تکیه گاه ها و همچنین مشخصات موتور و گیربکس مناسب بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت یکسان با سیستم کششی کابلی این روش به موتوری با توان بالاتر نیاز دارد که دلیل آن نبود وزنه تعادل است اما اگر سرعت به 0/45 m/s کاهش داده شود موتوری با توان کمتر از سیستم کششی کابلی نیاز است که با توجه به حذف چاهک آسانسور، موتورخانه و وزنه های تعادل این سیستم توجیه یافته و اجرای آن در منازل مسکونی ساده تر خواهد بود. در صورت به کارگیری وزنه های تعادل به موتوری با توان 4 KW نیاز خواهد بود که می‌توان از برق تک فاز منزل با استفاده از اینورتر و خازن برق سه فاز مورد نیاز را تامین کرد.

سپاسگزاری

این طرح با حمایت مادی و معنوی معاونت محترم امور آموزشی و پژوهشی دانشگاه صنعتی قم و در قالب طرح پژوهشی داخلی انجام شده است.

مراجع:

- [1] Janovský, L. (1999). Elevator mechanical design, 3rd ed. Elevator world, pp: 12-30. ISBN 1-886-536-26-0
- [2] Gibson G.W. (2012). Elevator Hoist-way Equipment: Mechanical and Structural Design, Elevator World, pp: 106-110.
- [3] Bangash, M.Y.H. and Bangash T. (2007) Lifts, Elevators, Escalators and moving Walkways / Travelators. Netherlands: Taylor & Francis/Balkema, P.O. Box 447, 2300 AK Leiden, pp: 104-165. ISBN 0-203-02076-6, 2007

- [4] Pai, A. and Nair, R. and George, P. and Subir, S. (2015). A Critical Review and Investigation of Machine Room Less (MRL) Elevators. J Appl Mech Eng, Vol. 4:3, p. 166. DOI: 10.4172/2168-9873.1000166
- [5] Tetlow, K. (2007). New elevator technology: The machine room less elevator. New York: McGraw Hill construction, pp: 11-15.
- [6] Andrew, J.P. and Kaczmarczyk, S. (2000). Systems Engineering of Elevators, Elevator Books, chap. 10-13.
- [7] Celik, F. and Korbahti, B. (2006). Why Hydraulic elevators are so popular. Asansör Dünyasi, p. 48
- [8] Omkar, M. Sh. and Divyani, V. Sh. and Surabhi, G. P. (2017). A Survey Paper on Design & Control of an Elevator for Smart City Application. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 6, Issue 4, pp. 3021-27, DOI:10.15662/IJAREEIE.2017.0604039
- [9] Office for the Development and Promotion of National Building Regulations, (2001). National Building Regulations, Chap. 15.
- [10] Hiwin catalogue, (2012). Ballscrews technical information. www.hiwin.com.tw.
- [11] Budynas, R. G. and Nisbett, J. K. (2011) Shigley's mechanical engineering design. 9th ed. McGraw-Hill series in mechanical engineering. pp. 500-800, ISBN 978-0-07-352928-8.
- [12] BB LV Motors / Cat. BU, (2006). Low Voltage General Purpose Motors. <http://new.abb.com/motors-generators>

