

## طراحی بهینه هندسه شکاف روتور موتورهای القایی نوع قفسه محافظ

### خلاصه

این مقاله به بررسی طراحی بهینه شکاف های روتور قفسه محافظ و میل های مسی موتورهای القایی پر قدرت با توجه به مقادیر گشتاور پیچشی راه انداز، گشتاور خرابی، مقادیر نامی بازده و عامل نیرو و همینطور گرمایش روتور می پردازد. سه هندسه شکاف های روتور و سطح مقطع میل ها، حفظ همان سطح مقطع، مورد بررسی قرار می گیرند: شکل مستطیلی، شکل پله دار و شکل پله-سوراخ. این بررسی مبتنی بر تحلیل آلمان محدود موتور القایی در شرایطی است که تنها شکاف های روتور و ترکیب سطح مقطع میل ها از کاربردی به کاربرد دیگر تغییر می کند. مقایسه نتایج شبیه سازی ثابت می کند که افزایش مهم گشتاور پیچشی راه انداز و مقدار بالای بازدهی موتورهای القایی نوع قفسه محافظ مسی را می توان در مورد شکل پله-سوراخ سطح مقطع میل های روتور، بدون کاهش چشمگیر گشتاور خرابی، به دست آورد. معیار ارزیابی هندسه بهینه میل های روتور و مقدار بهینه سطح مقطع میل ها مورد بررسی قرار می گیرند.

### 1. مقدمه

طراحی بهینه موتورهای القایی کلاسیک با توجه به گشتاور الکترومغناطیسی باید به ترتیب دو لازمه متناقض مقدار بالای گشتاور پیچشی راه انداز و مقدار بالای گشتاور خرابی را برآورده سازد. در مورد موتورهای القایی قفسه محافظ، این ویژگی های به شدت به هندسه شکاف روتور [1]، [3]، [5] وابسته هستند.

اینم مقاله نتایج مطالعه ای مربوط به تأثیر هندسه شکاف روتور شکل سطح مقطع میل ها بر گشتاور پیچشی راه انداز، گشتاور خرابی، بازدهی و عامل نیروی موتور القایی پر قدرت با قفسه محافظ مسی [2]، [4] را ارائه می کند.

## 2. مدل عددی

همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، موتور القایی قفسه محافظ سه فاز 500 kW، 750 rpm، 6 kV، 50 Hz و سه شکل سطح مقطع میل های روتور در نظر گرفته می شوند. سطح میل های روتور و سطح مقطع حلقه انتهایی، بعد شعاعی هسته مغناطیسی روتور و ویژگی های پوسته برای تمام کاربردهای عددی یکسان هستند.

بررسی تأثیر اشکال متنوع شکاف های روتور بر عامل های موتور بر تحلیل آلمان محدود دو بعدی استوار است که از جفت گیری مدار- میدان استفاده می کند. مدل عددی متناظر موتور قادر است تا تمام جنبه های خاص مرتبط با میدان الکترومغناطیسی، نظیر اشباع هسته های مغناطیسی، اثر پوست در میل های روتور و غیره، را به حساب آورد.

## 3. تحلیل نتایج شبیه سازی

### A. میل های مستطیلی شکل

در مورد شکل مستطیلی سطح مقطع میل ها، شکل 1 الف، افزایش نسبت  $h_2/a_2$  بین ارتفاع و ضخامت میل های روتور از افزایش هر واحد گشتاور پیچشی راه انداز  $(M_p/M_n)$ ، شکل 2، و کاهش هر واحد جریان راه انداز  $(I_p/I_n)$ ، شکل 3، اطمینان حاصل می کند. ترکیب عمیق-میل گرد، با خصوصیات نسبت  $h_2/a_2 = 55/94$  از مقادیر بالای گشتاور پیچشی راه انداز و مقادیر کاهش یافته جریان راه انداز در مقایسه با اشکال دارای مقادیر  $h_2/a_2$  کمتر از 2 اطمینان حاصل می نماید.

افزایش گشتاور پیچشی راه انداز با نسبت  $h_2/a_2$ ، شکل 2، اثری مطلوب است، اما به قیمت کاهشی قابل توجه در هر واحد گشتاور خرابی  $(M_{max}/M_n)$ ، شکل 4.

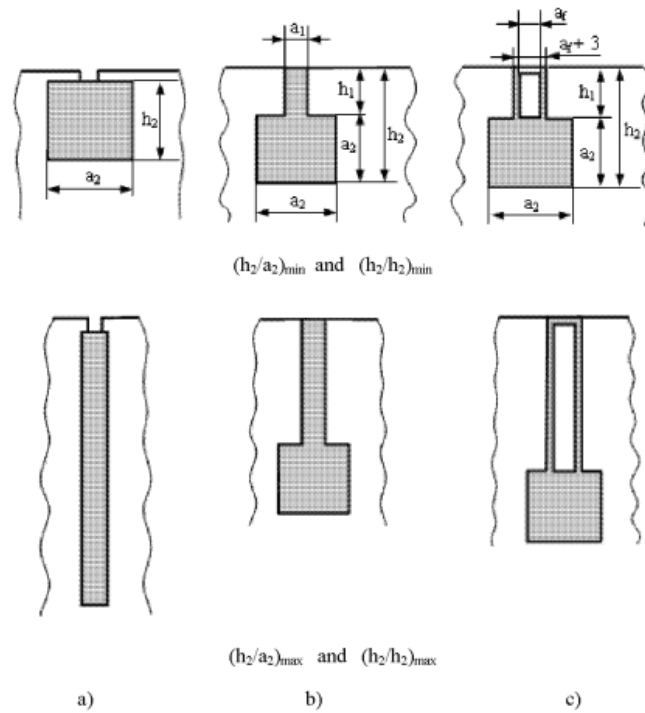


Figure 1. Slot geometries and limit shapes of rotor bars cross-section  
 a) rectangular shape; b) stepped shape; c) step-holed shape

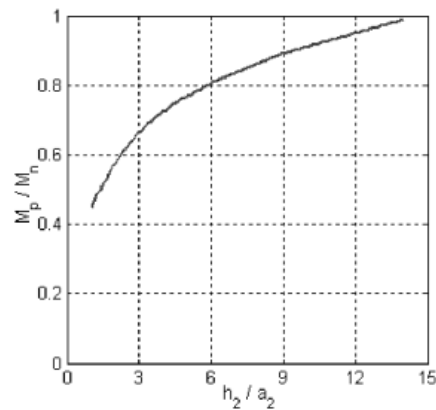


Figure 2. Per unit starting torque ( $M_p/M_n$ ) versus ratio  $h_2/a_2$  for rectangular shape bar cross-section

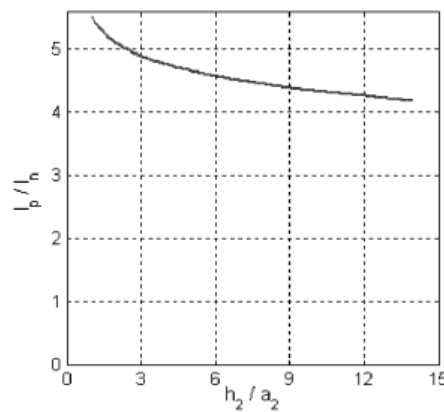


Figure 3. Per unit starting current ( $I_p/I_n$ ) versus ratio  $h_2/a_2$  for rectangular shape bar cross-section

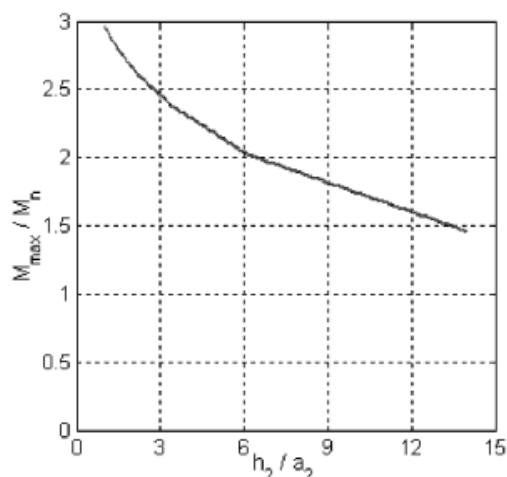


Figure 4. Per unit breakdown torque ( $M_{max}/M_n$ ) versus ratio  $h_2/a_2$

دو ویژگی الکترومغناطیسی گشتاور- لغزش ( $M-s$ ) که در شکل 5 نشان داده شده است، با حدود  $(h_2/a_2)_{min}$  کمتر و  $(h_2/a_2)_{max}$  بالاتر هندس سطح مقطع میل های مستطیلی، شکل a1، که در این بررسی مورد مطالعه قرار گرفته، منطبق هستند؛ به عبارت دیگر، میلی تقریباً مربعی، با  $a_2 = 15\text{mm}$  و  $h_2 = 14.92\text{mm}$ ، خط پر، و بار مستطیلی عمیقی، با  $a_2 = 4\text{mm}$  و  $h_2 = 55.93\text{mm}$ ، خط نقطه چین.

افزایش نسبت  $h_2/a_2$  سطح مقطع میل به میزان قابل توجهی بر توزیع چگالی جریان در راه اندازی موتور اثر می گذارد (شکل های 6-9).

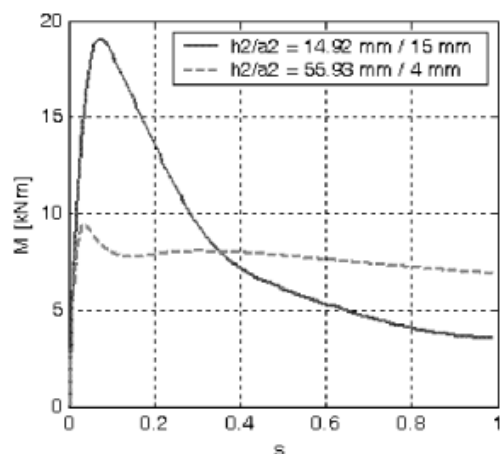


Figure 5. Electromagnetic torque versus slip for rectangular bars

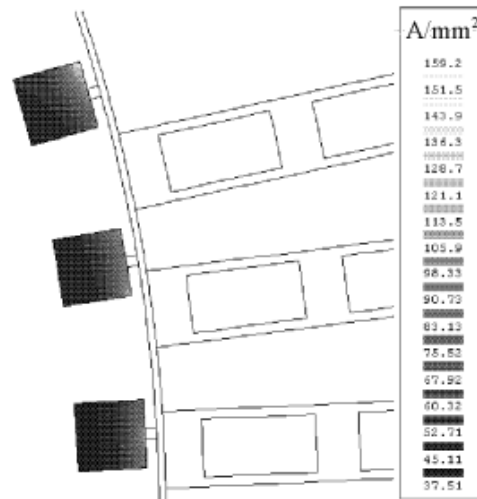


Figure 6. Current density chart in rectangular bars at motor start-up for  $(h_2/a_2)_{min}$

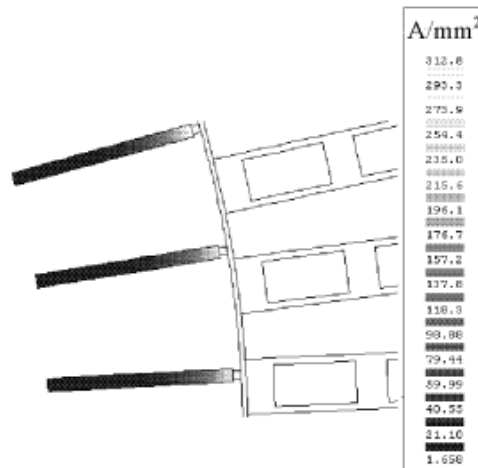


Figure 7. Current density chart in rectangular bars at motor start-up for  $(h_2/a_2)_{max}$

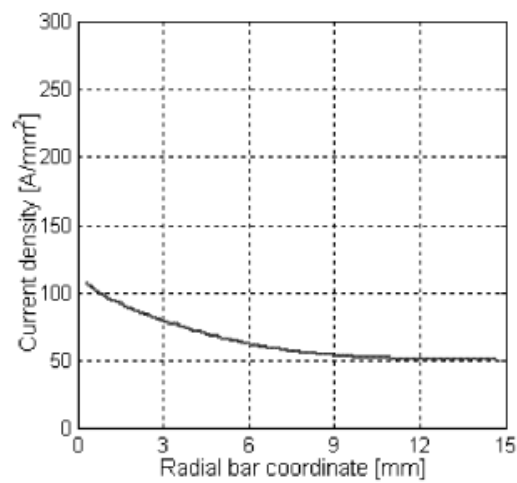


Figure 8. Radial variation of current density in the rotor bars for almost square shape bars

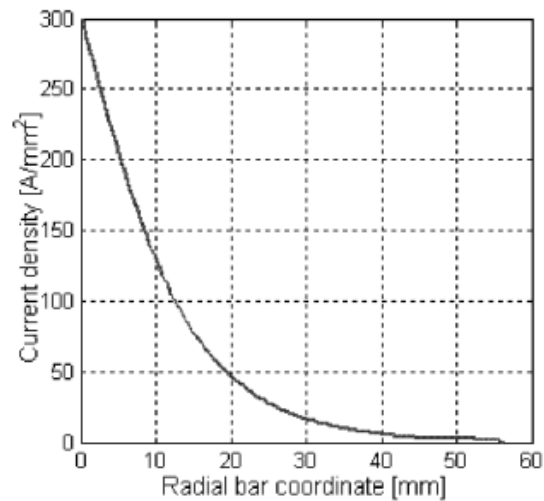


Figure 9. Radial variation of current density in the rotor bars for very deep bars

### B. میل های پله دار

در مورد شکل پله دار سطح مقطع میل ها، شکل  $b_1$ ، ارتفاع  $h_1$  پله میل بالایی عامل هندسه سطح مقطع میل و  $h_2$  ارتفاع کل میل پله دار است. ضخامت پله بالایی دارای مقداری ثابت،  $a_1 = 3\text{mm}$ ، است. پله پایینی میل دارای شکلی چهارگوش است.

نمودار چگالی جریان در میل های روتور مربوط به راه انداز موتور، شکل 10، و منحنی تغییر شعاعی این چگالی جریان، شکل 11، برای میل دارای حداقل میزان  $(h_1/h_2)_{\min} = 10/32.92 = 0.418$ ، افزایشی را در حداکثر میزان چگالی جریان در مقایسه با هندسه میل مستطیلی نشان می دهد.

همانطور که در شکل های 12 و 13 نشان داده شده است، افزایش نسبت  $h_1/h_2$  بیش از مقدار بهینه  $(h_1/h_2)_{\text{opt}} = 18/31.03 = 0.58$  بی معنی است، چون پس از این حد، هر دو گشتاور راه انداز و خرابی کاهش می یابند.

خصوصیات الکترومغناطیسی گشتاور- لغزش ( $M-s$ ) که در تصویر 14 نشان داده شده است، با حداقل میزان  $(h_1/h_2)_{\min} = 10/32.92 = 0.418$  و مقدار بهینه  $(h_1/h_2)_{\text{opt}} = 0.58$  منطبق هستند. مقایسه این منحنی ها

با منحنی های شکل 5 نتایج زیر را حاصل می کند:

- اگر میل های تقریباً چهارگوش، با نسبت  $h2/a2 = 14.92/15 = 0.994$  با میل های سطح مقطع پله دار با  $min = 10/32.92 = 0.418(h1/h2)$  جایگزین شوند، گشتاور راه انداز  $58/4\%$  افزایش یافته و گشتاور خرابی  $41\%/3$  کاهش می یابد.

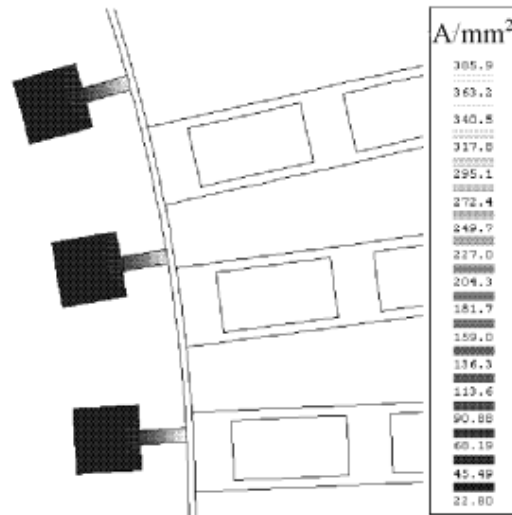


Figure 10. Current density chart in the rotor bars for stepped shape geometry

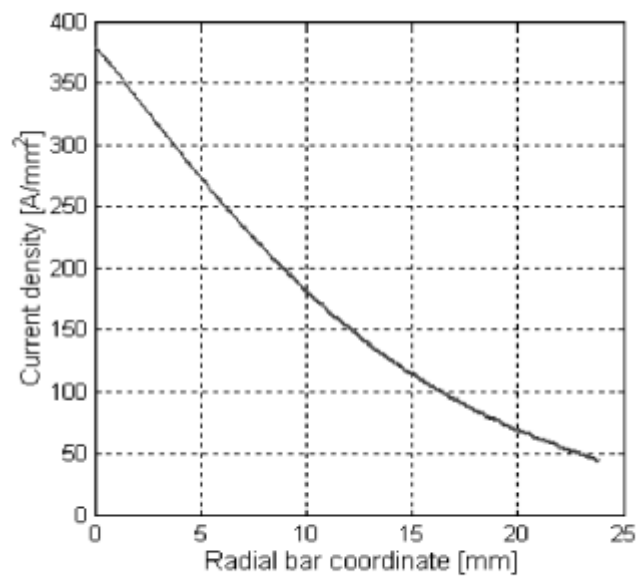


Figure 11. Radial variation of current density in the rotor bars for stepped shape geometry

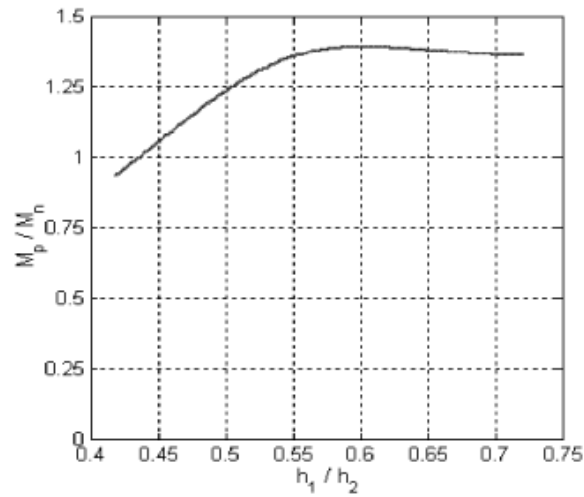


Figure 12. Per unit starting torque ( $M_p/M_n$ ) versus ( $h_1/h_2$ ) for stepped shape bars

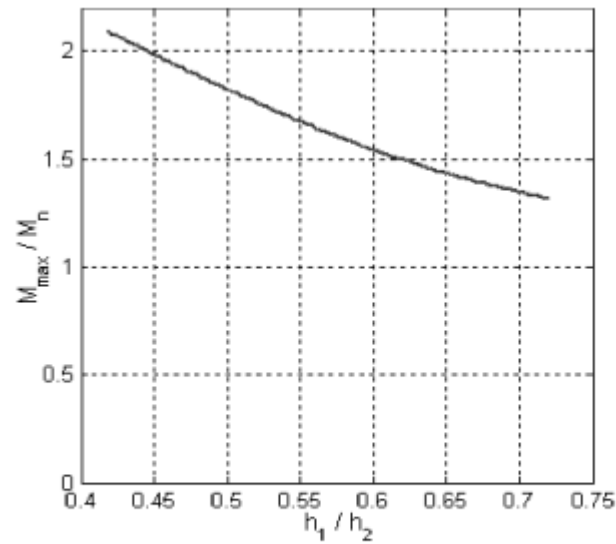


Figure 13. Per unit breakdown torque ( $M_{max}/M_n$ ) versus ( $h_1/h_2$ ) for stepped shape bars

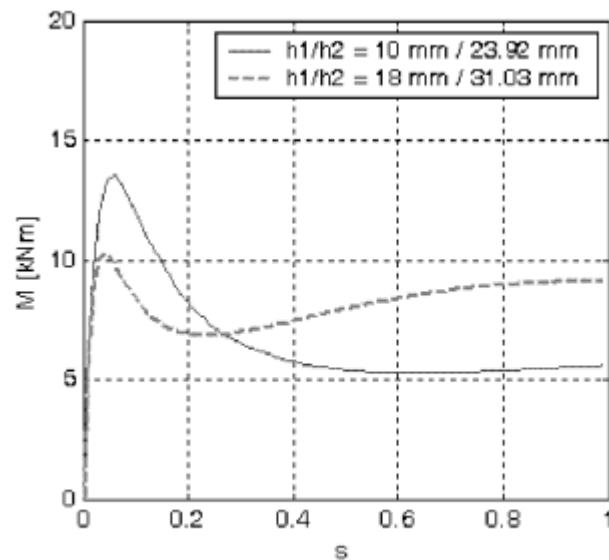


Figure 14. Electromagnetic torque versus slip for stepped shape bars



- اگر میل های مستطیلی عمیق با  $h_2/a_2 = 55.92/4 = 13.98$  با میل های سطح مقطع بهینه پله دار با  $(h_1/h_2)_{opt} = 0.85$ ، جایگزین شوند، گشتاور راه انداز  $32/6\%$  و گشتاور خرابی نیز  $9/2\%$  افزایش می یابند. زمانی که میل های مستطیلی را با میل های بهینه پله دار تعویض می کنیم، هر دو گشتاور راه انداز و خرابی افزایش می یابند.

### C. میل های پله - سوراخ

در مورد شکل پله- سوراخ سطح مقطع میل ها، شکل c1، ضخامت کل دو دیواره پله میل بالایی برابر است با ضخامت  $a_1 = 3\text{mm}$  پله میل بالایی، شکل b1. ارتفاع  $h_1$  پله میل بالایی عامل هندسه سطح مقطع میل و  $h_2$  ارتفاع کل میل است. پله پایینی میل دارای شکلی چهارگوش است.

برای میل های پله- سوراخ با  $(h_1/h_2)_{min} = 0.421$ ، شکل 15، حداکثر میزان چگالی جریان در راه انداز موتور در مقایسه با میل های پله دار، شکل 10، کاهش می یابد.

وجود سوراخ میل مسئول افزایش ضخامت ناحیه بالایی شکاف روتور در مقایسه با میل های پله دار است. در نتیجه، مقدار راکتانس نشت مدار روتور کاهش یافته و به دنبال آن، مقدار گشتاور خرابی افزایش می یابد.

افزایش عامل  $h_1/h_2$  میل های پله- سوراخ بیش از مقداری بهینه معنایی ندارد، چون هر دو گشتاورهای راه انداز و خرابی کاهش می یابند (شکل های 16 و 17). در مورد ضخامت سوراخ میل  $a_f = 4\text{mm}$ ، این مقدار برابر است

با  $(h_1/h_2)_{opt} = 0.687$ ، و مقدار متناظر گشتاور راه انداز برابر است با  $M_p/M_n = 1.294$ .

افزایش ضخامت سوراخ منجر به کاهشی ناچیز در گشتاور راه انداز، شکل 16، و افزایشی چشمگیرتر در گشتاور خرابی، شکل 17، می شود.

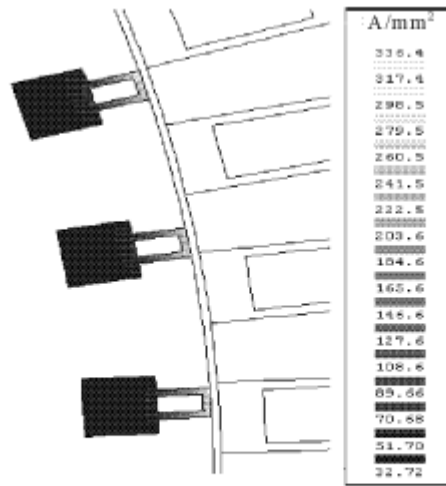


Figure 15. Current density chart in step-holed bars at motor start-up

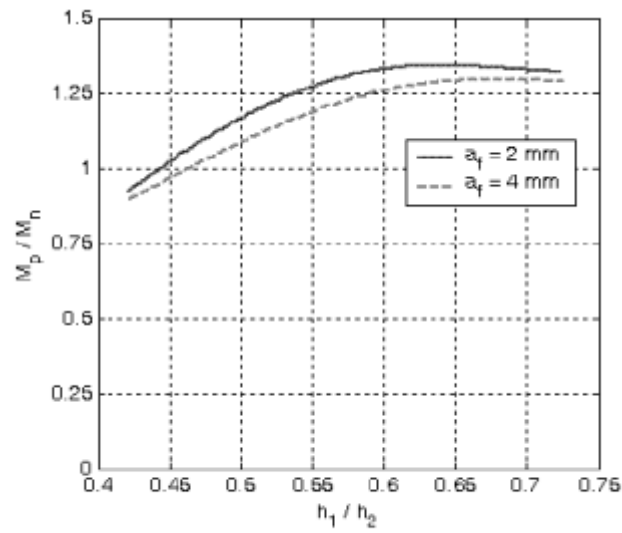


Figure 16. Per unit starting torque ( $M_p/M_n$ ) versus ( $h_1/h_2$ ) for step-holed bars

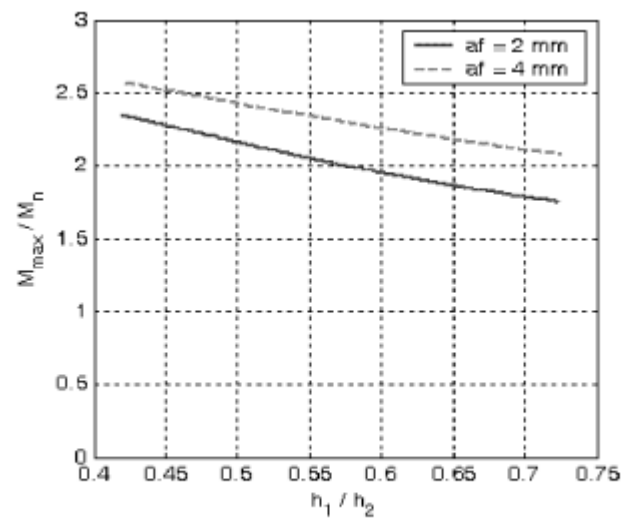


Figure 17. Per unit breakdown torque ( $M_{max}/M_n$ ) versus ( $h_1/h_2$ ) for step-holed bars

خصوصیات الکترومغناطیسی گشتاور- لغزش که در شکل 18 نشان داده شده است، با حداقل میزان  $(h_1/h_2)_{\min} = 10/23.7 = 0.421$  و مقدار  $h_1/h_2 = 18/30.8 = 0.584$  نزدیک به مقدار بهینه میل های

پله دار، متناظر هستند. با مقایسه نتایج نشان داده شده در شکل 14، به یافته های زیر می رسیم:

- اگر میل های پله دار با  $(h_1/h_2)_{\min} = 0.418$  با میل های پله-سوراخ با تقریباً همان مقادیر ارتفاع نسبی،  $(h_1/h_2)_{\min} = 0.421$ ، تعویض شوند، گشتاور راه انداز تغییر نمی کند، اما گشتاور خرابی افزایش چشمگیر 8/22% را می یابد؛

- اگر میل های سطح مقطع بهینه پله دار، با 0.58 با میل های پله-سوراخ با تقریباً همان مقادیر ارتفاع نسبی  $h_1/h_2 = 18/30.8 = 0.584$ ، تعویض شوند، افزایش گشتاور خرابی بیشتر است، 2/43%، اما گشتاور راه انداز تا 2/12% کاهش می یابد.

تحلیل مقایسه ای این سه مورد نشان می دهد که شکل پله-سوراخ، با مقادیر  $h_1/h_2$  کمتر، اما نه کمتر از مقدار بهینه، بهترین راه حل را برای موتورهای نیازمند مقادیر بالای گشتاورهای راه انداز و خرابی را ارائه می کند.

نتایج عددی مربوط به خصوصیات اسمی موتور بار خارجی در جدول 1، حاکی از یافته های زیر هستند:

(الف) در صورتی که میل های مستطیلی از سطح مقطع تقریباً چهارگوش، با  $(h_2/a_2)_{\min} = 0.994$ ، به شکل مستطیلی بسیار عمیق، با  $(h_1/a_2)_{\max} = 13.98$ ، تغییر نمایند، نتایج حاصل کاهشی بسیار اندک را در بازدهی موتور، کاهش ناچیز عامل نیرو و افزایشی غیرقابل اجتناب، حدود 15%، در اتلاف های ژول در قفسه محافظ روتور را اثبات می کند. همانطور که قبلاً نشان داده شد، این تغییر موجب گشتاور راه انداز دوبرابر بیشتر و گشتاور خرابی دو برابر کمتر می شود (شکل 5).

(ب) در مورد میل های پله دار، افزایش نسبت  $h_1/h_2$  تا مقدار بهینه تقریباً اثری بر بازدهی موتور ندارد. در مقایسه با میل مستطیلی بسیار عمیق، ترکیب میل پله دار بهینه دارای تقریباً همان مقادیر عامل های بازدهی فعال و اتلاف های ژول در مدار روتور تا 4/2% می باشد؛

(ج) در مورد میل های پله-سوراخ، مقادیر عامل های فعال حداکثر و در مورد مقدار عامل  $h_1/h_2$  تقریباً مستقل هستند.

در نتیجه، شکل پله-سوراخ سطح مقطع میل های روتور با مقادیر  $h_1/h_2$  کمتر، اما نه کمتر از مقدار بهینه، راه حلی مناسب را نیز با توجه به عامل های فعال موتور ارائه می کند.

TABLE I.  
RATED LOAD MOTOR CHARACTERISTICS ( $P_2 = 500 \text{ kW}$ )

	Rectangular shape bars, Fig. 1a		Stepped shape bars, Fig. 1b		Step-holed bars, Fig. 1c, $a_f = 4 \text{ mm}$	
	$(h_2/a_2)_{\min} = 0.994$	$(h_2/a_2)_{\max} = 13.98$	$(h_1/h_2)_{\min} = 0.418$	$(h_1/h_2)_{\text{opt}} = 0.58$	$(h_1/h_2)_{\min} = 0.422$	$h_1/h_2 = 0.584$
$I_n [\text{A}]$	58.40	64.10	60.40	62.60	58.50	58.90
$n_n [\text{rpm}]$	741.5	740.3	741.1	740.7	741.5	741.5
$\eta_n [\%]$	95.40	95.10	95.30	95.20	95.40	95.40
$\cos\phi_n$	0.860	0.790	0.830	0.800	0.860	0.850
$M_0 [\text{kNm}]$	6.455	6.482	6.475	6.459	6.468	6.443
$P_{r20} [\text{kW}]$	5.818	6.669	6.094	6.388	5.829	5.848

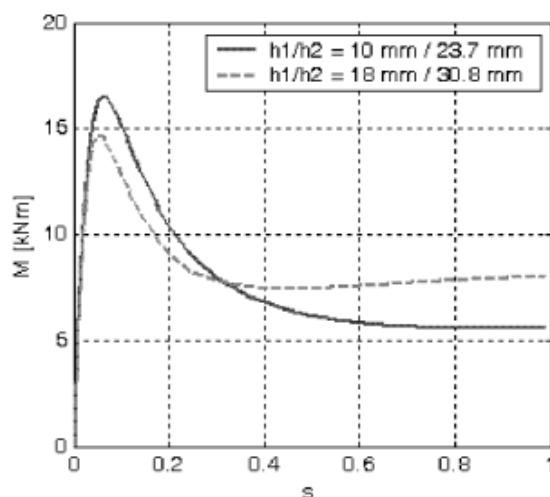


Figure 18. Electromagnetic torque versus slip for step-holed shape bars

### D. افزایش ناحیه سطح مقطع میل ها

افزایش 50٪ سطح مقطع میل های پله-سوراخ روتور با مقادیر بهینه نسبت  $h_1/h_2$  به کاهش تنها 1/85٪ گشتاور راه انداز، افزایش 2/96٪ گشتاور خرابی و افزایش بسیار اندک 0/38٪ بازدهی موتور و 0/06٪ عامل قدرت منجر می شود. در عوض، اتلاف های ژول در میل های روتور تا 30/2٪، از W5914 تا W4130، کاهش می یابد. بنابراین، مقدار بهینه سطح مقطع میل های روتور مقداری است که برای آن دمای روتور در عملیات اسمی بار خارجی موتور دارای حداکثر مقدار قابل قبول است.

#### 4. نتیجه گیری

در مورد شکل مستطیلی سطح مقطع میل ها، اگر نسبت بین ارتفاع و ضخامت میل بدون تغییر سطح مقطع افزایش یابد، گشتاور راه انداز افزایش و جریان راه انداز کاهش می یابد. این تأثیرات مثبت با کاهش گشتاور خرابی و کاهش ناچیز عامل های فعال موتور مرتبط هستند.

در مقایسه با میل های مستطیلی، مقادیر بیشتر گشتاور راه انداز و تا حدودی همان مقادیر عامل های فعال موتور با میل های پله دار به دست می آیند. در این مورد، کاهش گشتاور خرابی با ارتفاع میل به زیادی میل های مستطیلی عمیق نیست.

به خاطر افزایش مقاومت میل ها در طول راه اندازی موتور، میل های پله-سوراخ نیز مقادیر بالای گشتاور راه انداز را تضمین می کنند. علاوه بر این، راکتانس نشت روتور، در این مورد، کمتر از میل های پله دار است و کاهش گشتاور خرابی با افزایش ارتفاع میل روتور اهمیت کمتری نسبت به میل های مستطیلی شکل عمیق یا میل های پله دار دارد. عامل های فعال موتور با میل های پله-سوراخ، مطابق با میل های دارای سطح مقطع تقریباً چهارگوش، به مقادیر حداکثر نزدیک هستند.

از آن جا که اثر سطح مقطع میل بر اتلاف های ژول بسیار مهم تر از اثر آن بر کار موتور و عامل های فعال است، مقدار بهینه این سطح میزانی است که برای آن گرمایش روتور در کارکرد اسمی بار خارجی موتور با مقدار حداکثر قابل قبول دمای روتور متناظر است.

#### REFERENCES

- [1] Brojboiu, M., "Concerning the influence of the rotor bar geometry on torque. In addition, the rotor leakage reactance in this case the induction motor performances", Proc. of 5th TELSIKS'01 International Conference, Sept. 2001.
- [2] Peters, D.T.; Cowie, J.G.; Brush Jr., E.F.; Van Son, D.J., "Copper in the squirrel cage for improved motor performance", Proc. of IEMDC'03 Conference, Vol. 2, June 2003.
- [3] J. L. Kirtley Jr., "Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity", Proc. of IEM'04 Conference, Sept. 2004
- [4] R. Kimmich, M. Doppelbauer, J. L. Kirtley, D. T. Peters, J. G. Cowie, E. F. Brush Jr., "Performance Characteristics of Drive Motors Optimized for Die-Cast Copper Cages", Proc. of EEMODS'05, Heidelberg, 2005.
- [5] O.A. Turcanu, T. Tudorache, V. Fireteanu., "Influence of squirrel-cage bar cross-section geometry on induction motor performances", Proc. of SPEEDAM'06, May 2006.