

## تحلیل سه‌بعدی نورد مقاطع با استفاده از روش حد بالا

کارن ابری نیا<sup>۱\*</sup> و سید علیرضا فضلی‌راد<sup>۲</sup>

( // // // )

چکیده

واژه‌های کلیدی:

مقدمه

[ ]

Lahoti

[ ]

[ - ]

Kusumoto Saito

[ ]

[ ]

### تئوری : مدل تحلیلی

Kennedy .

[ ]

[ ] Hill

Kim, Kobayashi and Altan

[ ]

Bezier

هندسه پیشنهاد شده برای منطقه تغییر شکل فرایند در شکل (۱) نشان داده شده است. چنین فرض شده است که ناحیه تغییر شکل در مقاطع ورودی و خروجی به دو صفحه  $OXY$  و  $O'X'Y'$  محدود شده است ذره‌ای همچون  $P$  در این ناحیه بر روی خط جریان  $BB'$  از ورودی به خروجی حرکت کرده و  $\frac{OB}{OA} = \frac{O'B'}{O'A'}$ . همچنین فرض شده است که در تمام مسیر حرکت ذره  $P$  بر روی خط جریان رابطه تناسب بالا حفظ می‌شود. بنابراین شکل هندسی خطوط جریان بیان کننده شکل هندسی ناحیه تغییر شکل خواهد بود. سطح  $OAA'O'$  که شامل خطوط جریانی مشابه  $BB'$  است، سطح جریان نامیده شده است و چنین فرض شده است که مواد در امتداد این صفحه بدون شکستگی یا ناپیوستگی در سرعت حرکت می‌کنند [۱۳].

برای طراحی منحنی‌ها Bezier برای توابع ضرایب برداری از چند جمله‌ای‌های موسوم به Bernstein استفاده کرده است [۱۲]. وی برای هر خم نقطاتی به نام نقاط کنترل تعریف کرده به نحوی که خم درجه  $n$  دارای  $n$  نقطه کنترل  $V_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  است. این نقاط برای منحنی

Hsiang, Lin

[ ]

Bayoumi

[ ]



تحلیل فرایند در مقاطع مشخص

$$W_i = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_V (\dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2} dV \quad ( )$$

[ ]

$$W_i = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_V \left( \frac{\dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2}{2} + \dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2 + \dot{\epsilon}_{zx}^2 \right)^{1/2} |J| \cdot dudqdt \quad ( )$$

۱- مربع به بیضی

( )

|J|

...  $\dot{\epsilon}_{xx}$

$\bar{\sigma}$  .

[ ]

$$W_e = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_0^1 \int_0^1 (V_x^2 + V_y^2)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,q)} \Big|_{t=0} dudq \quad ( )$$

$z_0$

$$W_x = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_0^1 \int_0^1 (V_x^2 + V_y^2)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,q)} \Big|_{t=1} dudq \quad ( )$$

$$y = f(x)$$

$$y = y_c$$

y

$$W_f = \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_0^1 \int_0^1 \sqrt{(V_t - V_r)^2 + V_y^2} \Big|_{u=1} \cdot \sec \alpha \cdot \frac{\partial(x,z)}{\partial(q,t)} \Big|_{u=1} \cdot dq \cdot dt \quad ( )$$

( )

$$(y_c - f(x))^2 = (y - y_c)^2 + (z_0 - z)^2 \quad ( )$$

z y

$$\sec \alpha = \frac{\sqrt{(N_1^2 + N_2^2 + N_3^2)}}{N_2} \quad ( )$$

$$\vec{N} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial q} \Big|_{u=1} \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \Big|_{u=1}$$

$\vec{N}$

$N_3 \quad N_2 \quad N_1$

$\bar{\sigma}$

$z_0$

$y_c$

2s

2b

2a

Bezier

Bezier

$$M' = \frac{\pi V_e s^2 u}{4 \cos^2(\frac{\pi q}{4}) [(f_q' g_u' - f_u' g_q') - \frac{h_q'}{h_t'} (f_i' g_u' - f_u' g_i') - \frac{h_u'}{h_t'} (f_q' g_i' - f_i' g_q')]} \quad ( )$$

$$M'' = \frac{\pi V_e s^2 u}{4 \cos^2(\frac{\pi q}{4}) [(f_q'' g_u'' - f_u'' g_q'') + \frac{h_q''}{h_t''} (f_i'' g_u'' - f_u'' g_i'') + \frac{h_u''}{h_t''} (f_q'' g_i'' - f_i'' g_q'')]} \quad ( )$$

$V_e$

( )

( )

$u = 1$

$q = 1$

$$\vec{r}(u, q, t) = \vec{r}''(u, q, t)_{q=1}$$

$t \quad u$

۲- نورد دایره به بیضی  
( )

.2b

$r$

2a

$$\vec{v}_0 = ustg\varphi \cdot \vec{i} + us \cdot \vec{j}$$

$$\vec{v}_1 = a_1 ustg\varphi \cdot \vec{i} + b_1 us \cdot \vec{j} + c_1 z_0 \cdot \vec{k}$$

$$\vec{v}_2 = a_2 ustg\varphi \cdot \vec{i} + b_2 u (y_c - \sqrt{(y_c - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - s^2 tg^2 \varphi})^2 - z_0^2 tg^2 \varphi}) \cdot \vec{j} + c_2 (z_0 - z_0 utg\varphi) \cdot \vec{k}$$

$$\vec{v}_3 = ustg\varphi \cdot \vec{i} + u (y_c - \sqrt{(y_c - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - s^2 tg^2 \varphi})^2 - z_0^2 tg^2 \varphi}) \cdot \vec{j} + (z_0 - z_0 utg\varphi) \cdot \vec{k}$$

( )

( )

$$\varphi = \frac{\pi q}{4}$$

( )

$$\vec{r}'(u, q, t) = (1-t)^3 \vec{V}_0' + 3t(1-t^2) \vec{V}_1' + 3t^2(1-t) \vec{V}_2' + t^3 \vec{V}_3' \quad ( )$$

$$\vec{r}'(u, q, t) = f'(u, q, t) \vec{i} + g'(u, q, t) \vec{j} + h'(u, q, t) \vec{k} \quad ( )$$

$$\vec{V}_0'' = us \cdot \vec{i} + ustg\varphi \cdot \vec{j}$$

$$\vec{V}_1'' = a_1 us \cdot \vec{i} + b_1 ustg\varphi \cdot \vec{j} + c_1 z_0 \cdot \vec{k}$$

$$\vec{V}_2'' = a_2 u (a \sqrt{1-m^2}) \cdot \vec{i} + b_2 u (bm) \cdot \vec{j} + c_2 z_0 \cdot \vec{k}$$

$$\vec{V}_3'' = u (a \sqrt{1-m^2}) \cdot \vec{i} + u (bm) \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k}$$

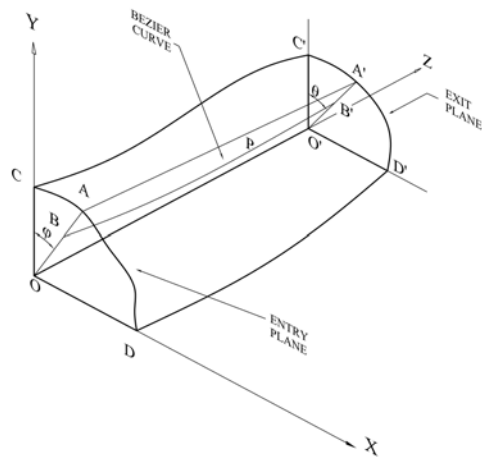
( )

$$\vec{r}''(u, q, t) = (1-t)^3 \vec{V}_0'' + 3t(1-t^2) \vec{V}_1'' + 3t^2(1-t) \vec{V}_2'' + t^3 \vec{V}_3'' \quad ( )$$

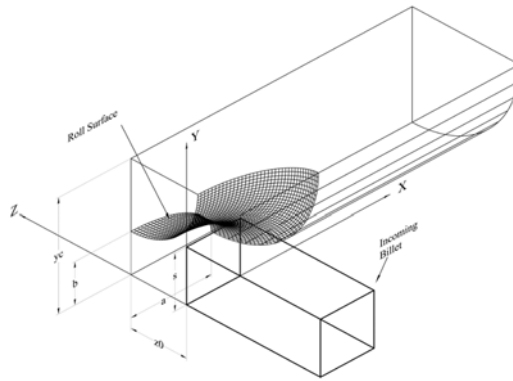
$$\vec{r}''(u, q, t) = f''(u, q, t) \vec{i} + g''(u, q, t) \vec{j} + h''(u, q, t) \vec{k} \quad ( )$$

Z

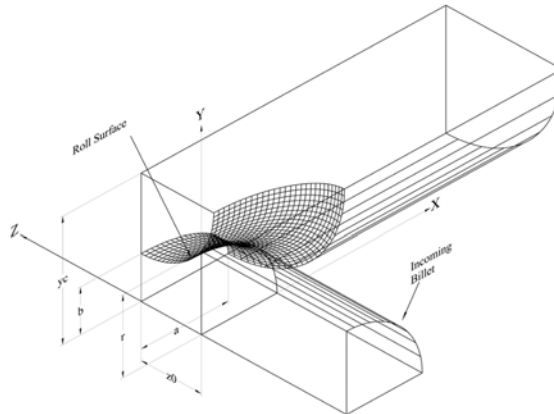
$$M = \frac{\pi V_e s^2 u}{4 \cos^2(\frac{\pi q}{4}) [(f_q g_u - f_u g_q) - \frac{h_q}{h_t} (f_i g_u - f_u g_i) - \frac{h_u}{h_t} (f_q g_i - f_i g_q)]} \quad ( )$$



شکل ۱: شکل هندسی پیشنهادی برای منطقه تغییر شکل در نورد یک مقطع دلخواه به یک مقطع دلخواه دیگر.



شکل ۲: یک چهارم منطقه تغییر شکل در نورد مربع به بیضی.



شکل ۳: یک چهارم منطقه تغییر شکل در نورد دایره به بیضی.

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 &= ur \sin \varphi \cdot \vec{i} + ur \cos \varphi \cdot \vec{j} && \text{Bezier} \\ \vec{V}_1 &= a_1 ur \sin \varphi \cdot \vec{i} + b_1 ur \cos \varphi \cdot \vec{j} + c_1 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}_2 &= a_2 ua \sin \varphi \cdot \vec{i} + b_2 ub \cos \varphi \cdot \vec{j} + c_2 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}_3 &= ua \sin \varphi \cdot \vec{i} + ub \cos \varphi \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k} \end{aligned} \quad ( )$$

۴- نورد مستطیل به لوزی

$$\varphi = \frac{\pi q}{2}$$

( ) ( )

$$\frac{2h_0}{2a} \quad \frac{2w_0}{2b}$$

Bezier

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 &= uh_0 tg \varphi \cdot \vec{i} + uh_0 \cdot \vec{j} \\ \vec{V}_1 &= a_1 uh_0 tg \varphi \cdot \vec{i} + b_1 uh_0 \cdot \vec{j} + c_1 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}_2 &= a_2 a \frac{h_0}{2w_0} \tan \varphi \cdot \vec{i} + b_2 u \frac{b(2w_0 - h_0 \tan \varphi)}{2w_0} \cdot \vec{j} + c_2 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}_3 &= ua \frac{h_0}{2w_0} \tan \varphi \cdot \vec{i} + u \frac{b(2w_0 - h_0 \tan \varphi)}{2w_0} \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k} \end{aligned}$$

( ) ( )

۳- نورد بیضی به دایره

$$\begin{aligned} \vec{V}'_0 &= uw_0 \cdot \vec{i} + uw_0 \tan \varphi \cdot \vec{j} \\ \vec{V}'_1 &= a'_1 uw_0 \cdot \vec{i} + b'_1 uw_0 \tan \varphi \cdot \vec{j} + c'_1 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}'_2 &= a'_2 ua \left( \frac{2h_0 - w_0 \tan \varphi}{2h_0} \right) \cdot \vec{i} + b'_2 ub \frac{w_0 \tan \varphi}{2h_0} \cdot \vec{j} + c'_2 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}'_3 &= ua \left( \frac{2h_0 - w_0 \tan \varphi}{2h_0} \right) \cdot \vec{i} + ub \frac{w_0 \tan \varphi}{2h_0} \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k} \end{aligned}$$

( ) ( )

( ) Z



$$\begin{aligned} \vec{V}_0 &= ua \sin \varphi \cdot \vec{i} + ub \cos \varphi \cdot \vec{j} \\ \vec{V}_1 &= a_1 ua \sin \varphi \cdot \vec{i} + b_1 ub \cos \varphi \cdot \vec{j} + c_1 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}_2 &= a_2 ur \sin \varphi \cdot \vec{i} + b_2 ur \cos \varphi \cdot \vec{j} + c_2 z_0 \cdot \vec{k} \\ \vec{V}_3 &= ur \sin \varphi \cdot \vec{i} + ur \cos \varphi \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k} \end{aligned}$$

( )

$$M = \frac{\pi u V_e h_0^2}{4 \cos^2(\frac{\pi q}{4}) [(f'_q g_u - f_u g'_q) - \frac{h'_q}{h_i} (f_i g_u - f_u g_i) - \frac{h_u}{h_i} (f_q g_i - f_i g_q)]}$$

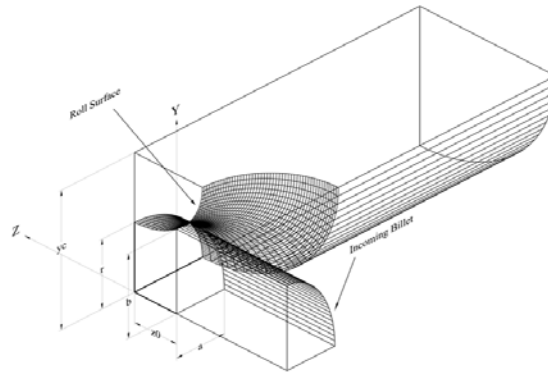
( )

$$\varphi = \frac{\pi q}{2}$$

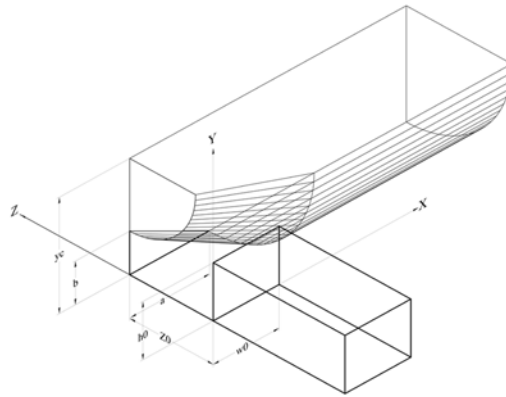
( ) ( )

$$M' = \frac{-\pi u V_e w_0^2}{4 \cos^2(\frac{\pi q}{4}) [(f'_q g'_u - f'_u g'_q) - \frac{h'_q}{h'_i} (f'_i g'_u - f'_u g'_i) - \frac{h'_u}{h'_i} (f'_q g'_i - f'_i g'_q)]}$$

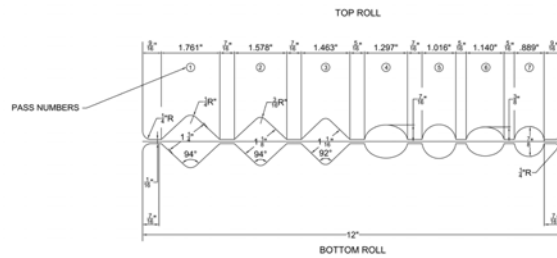
( )



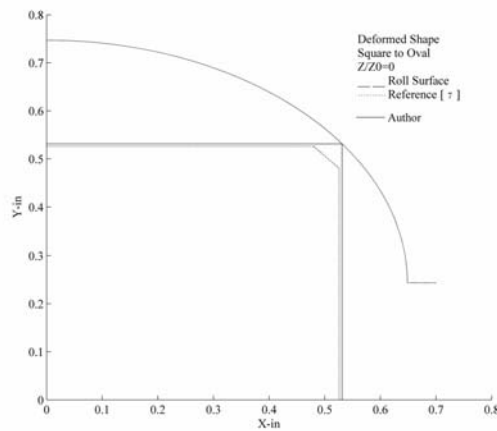
شکل ۴: یک چهارم منطقه تغییر شکل در نورد بیضی به دایره.



شکل ۵: یک چهارم منطقه تغییر شکل در نورد مستطیل به لوزی.



شکل ۶: شبیه‌سازی مقاطع مختلف به روش حد بالا [۷].



شکل ۷: شکل پیش‌بینی شده برای مقطع ورودی  $\frac{Z}{Z_0} = 0$  در نورد مربع به بیضی.



( )

$u = 1$

( )

( )

( ) ( )

### نتایج و بحث و بررسی

[ ]

#### ۱- نورد مربع به بیضی

[ ]

[ ]

( )

( )

$1090^{\circ}C$

AISI1080

( )

[ ]

$$\bar{\sigma} = 77.5 \bar{\epsilon}^{0.192} MPa$$

( )

8in

( )

( )

( )

( )

$$(q = 1 - \frac{A_{ex}}{A_e})$$

$m=0.2, 0.4, 0.6, 0.75$

( )

KN.m

$$\frac{z}{z_0} = 1.0 \quad \frac{z}{z_0} = 0$$

z

(

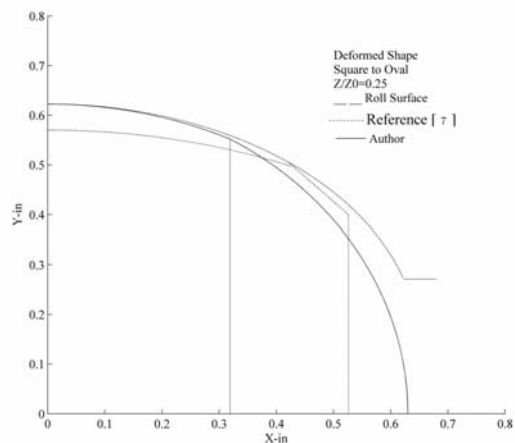
$z_0$  z

( )

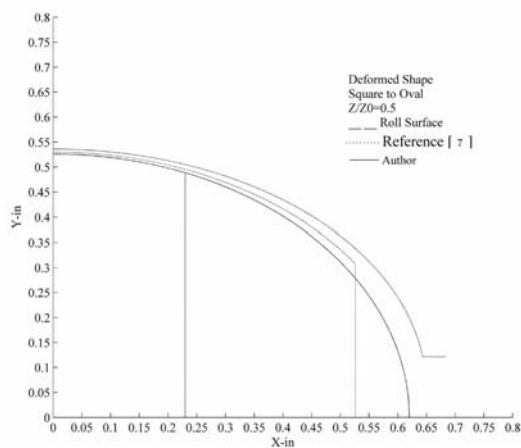
[ ]

$$\frac{P_{av}}{\bar{\sigma}}$$

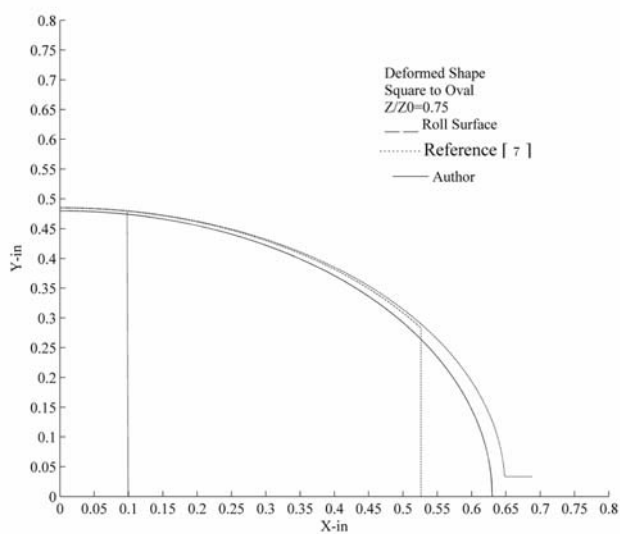
[ ]



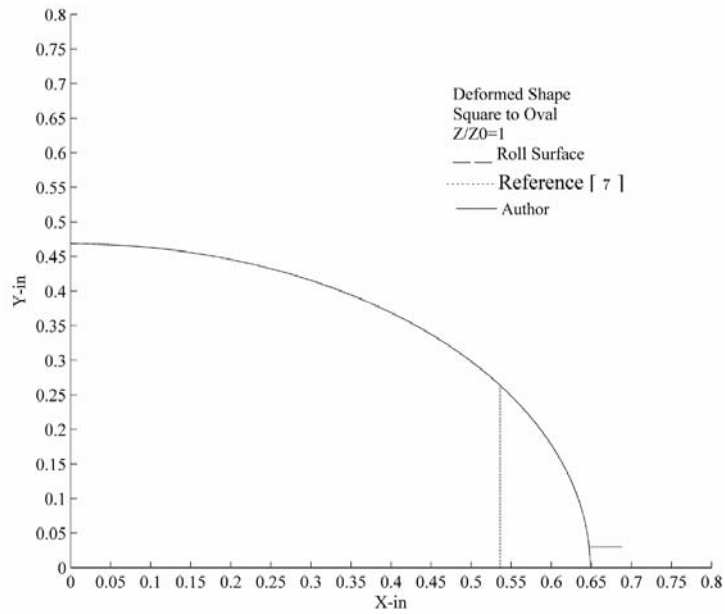
شکل ۸: شکل پیش‌بینی شده برای مقطع  $\frac{Z}{Z_0} = 0.25$  در نورد مربع به بیضی.



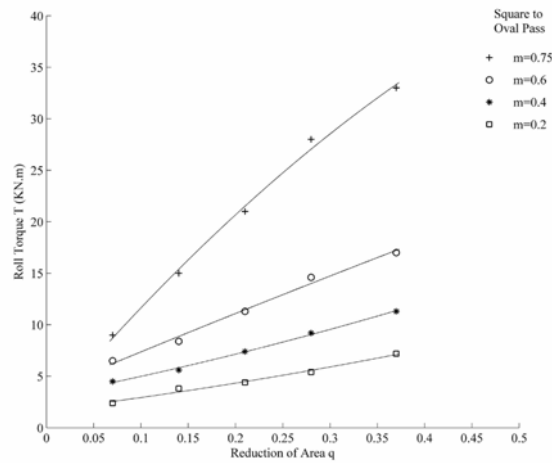
شکل ۹: شکل پیش‌بینی شده برای مقطع  $\frac{Z}{Z_0} = 0.5$  در نورد مربع به بیضی.



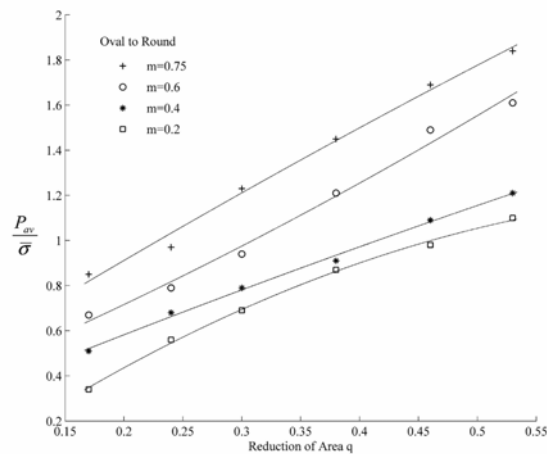
شکل ۱۰: شکل پیش‌بینی شده برای مقطع  $\frac{Z}{Z_0} = 0.75$  در نورد مربع به بیضی.



شکل ۱۱: شکل پیش بینی شده برای مقطع خروجی  $\frac{Z}{Z_0} = 1$  در نورد مربع به بیضی.



شکل ۱۲: گشتاور مورد نیاز در نورد مربع به بیضی برای مقادیر مختلف کاهش سطح مقطع و ضریب اصطکاک.



شکل ۱۳: نسبت فشار متوسط به تنش سیلان در نورد مربع به بیضی برای مقادیر مختلف کاهش سطح مقطع و ضریب اصطکاک.

جدول ۱: نورد مربع به بیضی [۷].

$2.69 \times 10^{-2} (m)$	
$3.29 \times 2.38 \times 10^{-4} (m^2)$	(      ×      )
0.75	
15	(%)
$0.158 \times 10^{-2} (m)$	
$0.254 (m/s)$	

جدول ۲: نورد دایره به دایره در چهار مرحله [۲].

$30.1 \times 10.4 (mm^2)$	$43 \times 14.8 mm^2$	
$20.1 \Phi (mm)$	$29.5 \Phi (mm)$	
$280 (mm)$	$280 (mm)$	
22%	26.87%	
154rpm	78rpm	
2mm	3mm	

جدول ۳: مقایسه فشار و سرعت خروجی به دست آمده از روش حد بالا، آزمایش [۲] و روش خطوط سیلان [۱۱] در نورد دایره به بیضی.

$V_{ex} (m/s)$	$P_{av} (MPa)$	m	
1.089	101.8	0.374	[ ]
1.228	104.5	0.374	
1.119	102	0.374	[ ]

جدول ۴: مقایسه فشار و سرعت خروجی به دست آمده از روش حد بالا، آزمایش [۲] و روش خطوط سیلان [۱۱] در نورد دایره به بیضی.

$V_{ex} (m/s)$	$P_{av} (MPa)$	m	[ ]
2.216	122	0.313	[ ]
2.236	126.7	0.313	
2.228	122.2	0.313	[ ]

جدول ۵: نورد دایره به دایره در چهار مرحله [۲].

14.2Φ(mm)	20.1Φ(mm)	
10.4×30.1(mm <sup>2</sup> )	14.8×43(mm <sup>2</sup> )	
285(mm)	280(mm)	
35.5%	36.51%	
198.5rpm	105rpm	
2mm	2.5mm	

جدول ۶: مقایسه فشار و سرعت خروجی به دست آمده از روش حد بالا، آزمایش [۲] و روش خطوط سیلان [۱۱] در نورد بیضی به دایره.

$V_{ex} (m/s)$	$P_{av} (MPa)$	m	[ ]
1.458	113.8	0.468	[ ]
1.507	116.6	0.468	
1.493	106	0.468	[ ]

جدول ۷: مقایسه فشار و سرعت خروجی به دست آمده از روش حد بالا، آزمایش [۲] و روش خطوط سیلان [۱۱] در نورد بیضی به دایره.

$V_{ex}(m/s)$	$P_{av}(MPa)$	m	[ ]
2.903	136.2	0.378	[ ]
3.022	141.9	0.378	
2.899	120	0.378	[ ]

( )

( ) ( )

( ) ( )

[ ]

[ ]

)

(

[ ]

۲- نورد دایره به بیضی

[ ]

۳- نورد بیضی به دایره

[ ]

[ ]

[ ]

( )

( )

[ ]

[ ]

( ) ( ) ( )

( )

[ ]

[ ]

## نتیجه گیری

- 1 - Lange, K. Editor, (1985). *Handbook of Metal Forming*, SME Publications.
- 2 - Wusatowski, Z. (1969). *Fundamentals of Rolling*, Pergamon Press, New York.
- 3 - Trinks, W. (1941). *Roll Pass Design*, Penton Publication Company.
- 4 - Teselikov, A. I., Nikitin, G. S., and Rokotyán, S. E. (1981). *The Theory of Lengthwise Rolling*, Mir Publisher, Moscow.
- 5 - Lahoti, G. D. and Kobayashi, S. (1974). "On Hill's General Method of Analysis for Metalworking Processes." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 16, PP. 521.
- 6 - Saito, Y., Kusumoto, Y., Hattori, T. and Kato, K. (1984). "Deformation Analysis in Shape Rolling Using an Upper Bound Method." *Journal of Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II. 11, 1190-1199
- 7 - Kennedy, K. F. (1986). *A Method for Metal Deformation and Stress Analysis in Rolling*, PhD Thesis, Ohio State University.

- 8 - Hill, R. (1963). "A general method of analysis for metal deformation processes." *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 11, PP. 305-326.
- 9 - Kim, N., Kobayashi, S. and Altan, T. (1992). "Three Dimensional Analysis and Computer Simulation of Shape Rolling by the Finite and Slab Element Method." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 32, PP. 315-327.
- 10 - Hsiang, S. H., Lin, S. L., "Application of 3D FEM-Slab Method to Shape Rolling." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 1155-1177.
- 11 - Bayoumi, L. S. (1998). "Flow and stresses in round-oval-round pass sequence." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, 1998, PP. 1223-1234.
- 12 - Qiulin, D. and Davis, B. J. (1987). *Surface Engineering Geometry for Computer-Aided Design and Manufacture*, Ellis Horwood Ltd., John Wiley & Sons, 1987.
- 13 - Abrinia, K. and Bloorbar, H. (2000). *A new improved upper bound solution for the extrusion of shaped sections using CAD techniques.* COMPLAS VI Conference- Barcelona Spain.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Slab method
- 2 - Flow surfaces