

بهینه سازی هیدروفویل غوطه ور در آب با استفاده از الگوریتم PSO

محمدحسن جوارشکیان^۱، علی اسماعیلی^۲

^۱دانشیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، javareskian@Ferdowsi.um.ac.ir
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، aliesmaeli30316@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق، بهینه سازی هیدروفویل غوطه ور در آب براساس الگوریتم PSO^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا جریان حول هیدروفویل هایی با ضخامت و انحنایی مختلف به ازای زوایای حمله و عمق غوطه وری متفاوت حل شده است که از یک روش عددی بر اساس الگوریتم فشار مینا و تکنیک SIMPLE برای حل معادلات ناپیراستوکس، و از ایده VOF برای شبیه سازی دو فاز آب و هوا بهره گرفته شده است. از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ و اسکیم مرتبه دوم بالادست برای طرح های تفاضلی استفاده شده است. برای نشان دادن صحت روند حل عددی، قسمتی از نتایج عددی حاضر با نتایج تجربی منتشر شده مقایسه، که تطابق خوبی را نشان داده و روند شبیه سازی را تایید می نماید. سپس براساس الگوریتم PSO بهینه سازی انجام گرفته و مقطع بهینه برای هیدروفویل ها ارائه شده است. این مقطع به گونه ای است که در تمام شرایط محیطی دارای حداکثر بازده است.

واژه های کلیدی

هیدروفویل، الگوریتم PSO، بهینه سازی، عملکرد هیدرودینامیکی.

مقدمه

افزایش نیاز به استفاده از سیستم های دریایی، محققین را به سمت مطالعه و طراحی آنها سوق می دهد. شناورهای تندرو به عنوان یکی از مهمترین این سیستم ها می باشند. یکی از مهمترین روشهای افزایش سرعت شناورها استفاده از هیدروفویل است. شناورهای هیدروفویلی گونه ای شناخته شده از شناورهای تندرو هستند که علاوه بر قابلیت حرکت با سرعت بالا، قدرت مانور دهی زیاد، پایداری خوب و عملکرد مناسبی در امواج دارند. به همین دلیل تحلیل عملکرد هیدروفویل ها مورد اهمیت قرار می گیرد. وقتی عمق فرورفتگی هیدروفویل کم شود اثر سطح آزاد دارای اهمیت شده و باید در محاسبات منظور گردد. تاریخچه استفاده از هیدروفویل ها به سال ۱۸۹۸ بر می گردد. در آن سال فورلانی^۲ در ایتالیا تلاش کرد که برای افزایش سرعت قایق از هیدروفویل ها استفاده کند. معادلات

حاکم بر جریان حول هیدروفویل ها در آن سال ها شناخته شده بود اما پیچیدگی هندسه و نیز ویژگی های جریان سبب شد که این معادلات به سادگی قابل حل نباشند. لذا از مدل های تئوری برای شناخت بیشتر مسئله استفاده کردند. به طوری که جریان پتانسیل و نیز روش تصویری توسط ولادمیروف^۳ (۱۹۳۷)، کوتجین^۴ (۱۹۵۱) و دیگران توسعه داده شد. بلاسی^۵ و همکاران به مطالعه تجربی بر روی شکست امواج پشت هیدروفویل های غرق شده پرداختند^۱. از جمله کارهای دیگری که در این زمینه انجام شده، می توان به تحقیقات داسکوسکی^۲، فلیپو^۳، کیو^۴ و همکاران^۴ و ریپی^۹ و همکاران^۵ اشاره کرد. بوروگیان^{۱۰} در طی یک کار آزمایشگاهی جریان دو بعدی حول یک هیدروفویل را تست کرد^۶. در سال ۲۰۰۵ جین و لیو^{۱۱} با در نظر گرفتن توزیع دابلت روی سطح داخلی جسم به بررسی جریان پرداختند^۷. های و ویسونو^{۱۲}، کارکتیرا^{۱۳} و همکاران^۹ نیز به صورت عددی جریان حول هیدروفویل ها را مورد بررسی قرار دادند. کیم و یاماتو^{۱۴} سعی کردند که امواج تولیدی توسط وسایل دریایی دارای هیدروفویل را تخمین زده و در سیستم کنترلی استفاده کنند^{۱۰}. اکسی و وسالوس^{۱۵} با استفاده از روش پتانسیل هیدروفویل سه بعدی را مورد بررسی قرار دادند^{۱۱}. در سال ۲۰۰۸، حسینی و همکاران سطح آزاد امواج و شکست آنها و نیز جدایش ناشی از امواج را به صورت عددی شبیه سازی کردند^{۱۲}. در سال ۲۰۰۹، دیوکی^{۱۶} و همکاران به بررسی پدیده لایه مرزی، جدایش جریان، تبدیل جریان از آرام به آشفتگی و نیز پدیده واماندگی پرداختند^{۱۳}. اما برای افزایش بازدهی عملکرد هیدروفویل ها بدست آوردن مقطعی که در تمام شرایط جریان بهینه ترین حالت را داشته باشد از اهمیت زیادی برخوردار است. به طوری

^۲ Vladimirov
^۴ Kotchin
^۵ Blasi
^۶ Daskovsky
^۷ Filipov
^۸ Kouh
^۹ Rhee
^{۱۰} Bourgoyne
^{۱۱} Chen and Liu
^{۱۲} Hay and Visonneau
^{۱۳} Carcaterra
^{۱۴} Kim and Yamato
^{۱۵} Xie and Vassalos
^{۱۶} Ducoin

^۱ Particle Swarm Optimization
^۲ Forlanini

$$\left[\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}) = S_{pq} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (7)$$

به طوری که \dot{m}_{pq} دبی جرمی انتقال یافته از فاز p به فاز q و \dot{m}_{qp} دبی جرمی انتقال یافته از فاز q به فاز p می باشد. S_{pq} نیز ترم چشمه می باشد که در این مسئله مقدار آن صفر است. α بیانگر درصد حجمی در یک سلول از فاز q می باشد. معادله درصد حجمی برای فاز اولیه قابل حل نخواهد بود. لذا درصد حجمی فاز اولیه بر اساس رابطه زیر بدست می آید:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (8)$$

معادله درصد حجمی می تواند به هر دو روش ضمنی و صریح حل شود که در این تحقیق به روش ضمنی حل شده است.

الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یکی از الگوریتم های بسیار پر کاربرد در زمینه بهینه سازی می باشد. در ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر و تغییر شکل بهینه‌ی دسته آنها به کار گرفته شد. این روش سراسری کمینه‌سازی است که از آن می‌توان با مسائلی که جواب آنها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. در PSO، ذره هایی در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذره ها در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و ذرات مجاور آنها است. به طوری که موقعیت هر ذره از توده ذرات بر روی چگونگی جستجوی دیگر ذرات اثر می‌گذارد. در ابتدا یک سرعت ابتدایی به ذرات اختصاص داده شده و ذرات بر اساس این سرعت در فضای پاسخ تغییر مکان می دهند. در هر سیکل حرکتی، هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته، تنظیم می‌کند. سرعت و مکان جدید هر ذره بر اساس رابطه ۹ و ۱۰ بدست می آید. به طوری که w ضریب وزنی، V سرعت، S مکان، c_1, c_2 ضرایب ثابت، $pbest$ بهترین مکان هر ذره از ابتدای حرکت تا تکرار j ، $gbest$ بهترین مکان در میان کل ذرات و \vec{a} نیز بیانگر هر ذره است.

$$V_i^{j+1} = aV_i^j + c_1.R_1(pbest_i - s_i^j) \quad (9)$$

$$+ c_2.R_2(gbest - s_i^j) \quad (10)$$

$$s_i^{j+1} = s_i^j + V_i^{j+1}$$

بهترین مکان بر مبنای یک ملاک شایستگی تعریف می شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند. نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی مطلوب میل می‌کنند. در این مقاله ضخامت، انحنای هیدروفویل، زاویه حمله و عمق غوطه وری آن به عنوان پارامترهای مورد استفاده برای بهینه سازی هیدروفویل در نظر گرفته شده است.

که تاکنون این امر مورد بررسی قرار نگرفته است. این تحقیق معطوف به بهینه سازی هیدروفویل ها می باشد و در انتها شکل هیدروفویل بهینه ارائه می شود، به طوری که این مقطع دارای بیشترین عملکرد در شرایط مختلف می باشد. در ابتدا شبیه سازی جریان حول هیدروفویل های مختلف تحت شرایط متفاوت انجام شده و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده و سازگاری خوبی را نشان می‌دهد. از نتایج به دست آمده برای بهینه سازی شکل هیدروفویل و به دست آوردن بهترین خمیدگی، بهترین ضخامت، بهترین زاویه حمله و بهترین عمق غوطه وری استفاده شده است. بهینه سازی به روش الگوریتم PSO بوده و مبنای بهینه سازی به دست آوردن بیشینه نسبت برآ به L/D می باشد.

معادلات اساسی

به منظور شبیه سازی جریان اطراف بال در نزدیکی سطح باید معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان حل شود که شامل معادلات بقا، ممنتوم و انرژی می باشد.

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho \vec{v} \times \vec{v} - \vec{T}) = S_v \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho \vec{v} \phi - \vec{q}) = S_\phi \quad (3)$$

به طوریکه ρ چگالی، \vec{v} سرعت، ϕ متغیر بدون بعد، \vec{T} تانسور تنش و \vec{q} بردار شار پخشی می باشند. تانسور تنش برای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر به صورت زیر است:

$$\vec{T} = -p\vec{I} + 2\mu\vec{D} \quad (4)$$

بر اساس قانون فوریه بردار شار پخشی برابر عبارت زیر می باشد:

$$\vec{q} = \Gamma_\phi \text{grad}(\phi) \quad (5)$$

با بکار گیری روش حجم کنترل و انتگرال گیری از معادله ۳ و با تغییر انتگرال حجمی به انتگرال سطحی و استفاده از قضیه دیورژانس، فرم نهایی معادله گسسته شده به صورت زیر در می آید:

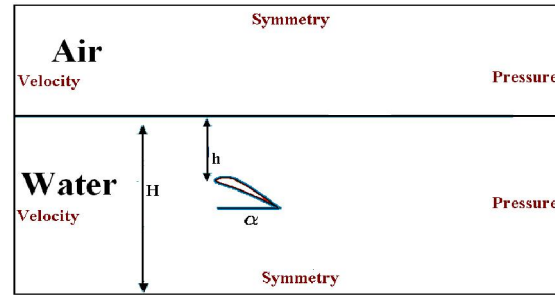
$$I_e - I_w + I_n - I_s = S_\phi \delta V \quad (6)$$

که در آن I شار عبوری از سطوح سلول می باشد که شامل شار جابه جایی و پخشی است. شار پخشی با استفاده از طرح تفاضلی مرکزی گسسته سازی شده است. بدست آوردن شار جابه جایی توجه خاصی را می طلبد و موضوع طرح های تفاضلی مختلف توسعه داده شده است. در این تحقیق برای بدست آوردن شار جابه جایی از اسکیم بالادست مرتبه دوم استفاده شده است.

الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق SIMPLE بوده و مدل توربولانسی از نوع $k - \epsilon$ می باشد. برای مدل سازی جریان دو فازی نیز از VOF^{۱۷} استفاده شده است. در روش VOF، در محل تماس دو فاز معادله پیوستگی درصد حجمی^{۱۸} برای یک فاز یا هر دو فاز حل می شود. اگر تعداد فازها q باشد این معادله عبارتند از:

شبکه بندی و شرایط مرزی

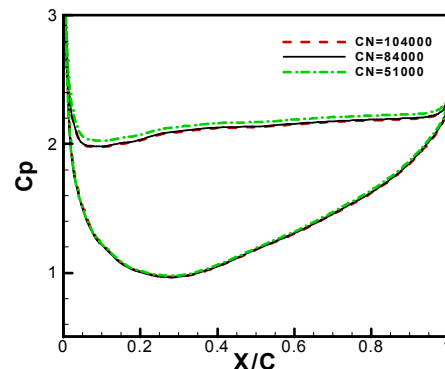
حوزه حل جریان در شکل ۱ نشان داده شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده به این صورت است که شرط مرزی ورودی برای هر دو فاز سرعت و شرط مرزی خروجی از نوع فشار می باشد. برای فاز آب شرط فشار استاتیکی اعمال شده است. شرط مرزی مشترک بین دو فاز، یک مرز داخلی بوده و سطح بالا و پایین نیز متقارن در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: حوزه حل و شرایط مرزی جریان

فشار در ناحیه ای که هوا قرار دارد، برابر فشار اتمسفر $P=101325 \text{ atm}$ در نظر گرفته شده است. سرعت ورودی بر اساس عدد فرود بدست آمده به طوری که در این تحقیق از $FC=1$ استفاده شده است. عدد فرود بر حسب طول وتر هیدروفویل می باشد. لذا سرعت جریان به ترتیب $V=3.13 \text{ m/s}$ بدست می آید. سرعت ورودی برای آب و هوا نیز یکسان در نظر گرفته شده است.

شبکه استفاده شده از نوع H می باشد و ابعاد حوزه حل نیز به اندازه کافی مناسب در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی عددی در ابتدا لازم است که استقلال از شبکه مورد بررسی قرار بگیرد. لذا جریان حول هیدروفویل NACA 4412 به ازای سه شبکه مختلف حل شد. عدد فرود این جریان برابر یک $FC=1$ ، سرعت جریان $V=3.13 \text{ m/s}$ ، عمق فرورفتگی $h/c=1$ و زاویه حمله هیدروفویل نیز 5° در نظر گرفته شده است.

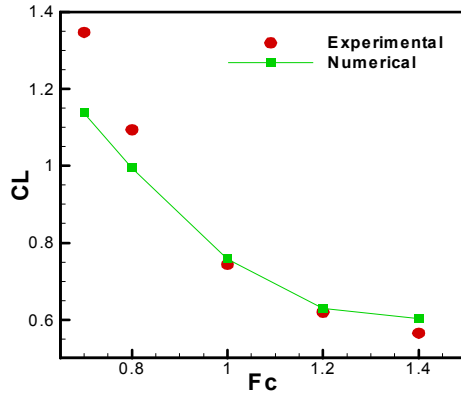


شکل ۲: بررسی استقلال شبکه

همانطور که از شکل ۲ مشخص است در تعداد سلول های ۸۴۰۰۰ مسئله به استقلال رسیده و با ریزتر کردن شبکه دیگر تغییرات چندانی ایجاد نمی شود.

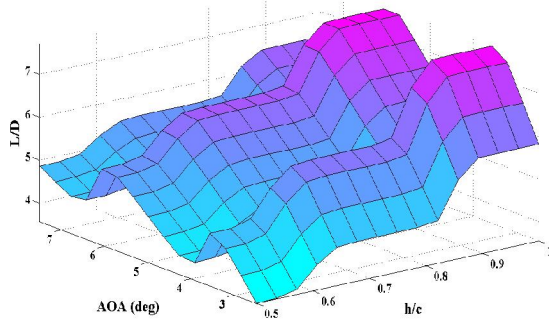
نتایج

در شبیه سازی های عددی لازم است که صحت حل عددی نشان داده شود. در این تحقیق نیز به بررسی صحت حل پرداخته شده است. نتایج ضریب برا حول NACA 4412 با زاویه حمله 5° درجه و $h/c=1$ در شکل ۳ نشان داده شده است. مقایسه نتایج تجربی [۴] و عددی در شکل فوق، تطابق خوبی را نشان می دهد.

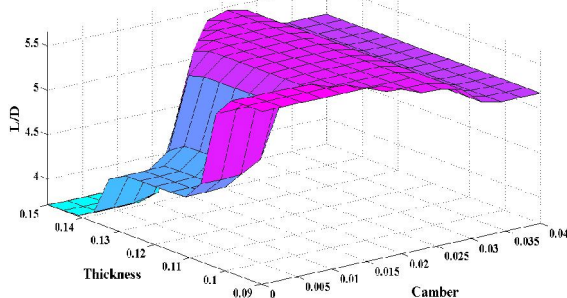


شکل ۳: مقایسه حل عددی حاضر با نتایج تجربی

حال با اطمینان از صحت حل عددی می توان به بررسی پارامترهای مورد نظر پرداخت. شکل ۴ تغییرات نسبت برا به پسا را بر حسب عمق غوطه وری و زاویه حمله نشان می دهد. به طوری که با افزایش زاویه حمله نسبت برا به پسا افزایش می یابد. همچنین با افزایش عمق غوطه وری نیز این نسبت روند افزایشی دارد.



شکل ۴: رفتار نسبت L/D بر حسب عمق غوطه وری و زاویه حمله



شکل ۵: رفتار نسبت L/D بر حسب ضخامت و انحنای هیدروفویل

شکل ۵ تغییرات نسبت برا به پسا را بر حسب ضخامت و انحنای متفاوت هیدروفویل ها نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که با افزایش ضخامت هیدروفویل نسبت برا به پسا روند کاهشی دارد ولی

مقطع برای هیدروفویل های غوطه ور در آب می باشد و بیشترین نسبت برا به پسا را تولید می کند.

مراجع

- [1] Blasi, P. De, Romano, G. P., Felice, F. Di, and Lalli, F., 2000. "Experimental Study of Breaking Wave Flow Field Past a Submerged Hydrofoil by LDV". *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 10, No. 4, (ISSN 1053-5381).
- [2] Daskovsky Mark, 2000. "The Hydrofoil in Surface Proximity, Theory and Experiment". *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 27, pp. 1129-1159.
- [3] Filippov, S.I., 2001. "Flow Past a Submerged Hydrofoil". *Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 36, No. 3, pp. 489-496.
- [4] Kouh, J. S., Lin, T. J., Chau, S.W, 2002. "Performance an Alysis of Two-Dimensional hydrofoil under Free Surface". *Journal of National Taiwan University*, Vol. 86.
- [5] Rhee, S. H., Kim, S. E., Ahn, H., Oh, J., and Kim, H., 2003. "Analysis of a Jet-Controlled High-Lift Hydrofoil With a Flap". *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 2117-2136.
- [6] Bourgoyne Dwayne. A., 2003. "Flow Over a Hydrofoil with Trailing Edge Vortex Shedding at High Reynolds Number". *Doctor of Philosophy*, (Mechanical Engineering) in The University of Michigan,.
- [7] Chen, C. K., and Liu, H., 2005. "A Submerged Vortex Lattice Method for Calculation of the Flow Around Three-Dimensional Hydrofoil". *Journal of Ship Mechanics*, Vol. 9, No. 2.
- [8] Hay, A., and Visonneau, M., 2005. "Computation of Free-Surface Flows with Local Mesh Adaptation". *International Journal for Numerical Method Sinfluids*, pp. 785-816.
- [9] Carcaterra A., Dessi, D., and Mastroddi, F., 2005. "Hydrofoil Vibration Induced by a Random Flow: A Stochastic Perturbation Approach". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, pp. 401-432.
- [10] Kim, S., H., and Yamato, H., 2005. "The Estimation of Wave Elevation and Wave Disturbance Caused by the Wave Orbital Motion of a Fully Submerged Hydrofoil Craft". *Journal of Marine Science Technology*, Vol. 10, pp. 22-31, DOI 10.1007/ s00773-004-0183-9.
- [11] Xie, N., and Vassalos D., 2007. "Performance Analysis of 3D Hydrofoil Under Free Surface". *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 34, pp.1257-1264.
- [12] Sadathosseini, S. H., Mousaviraad, S. M., Firoozabadi, B., and Ahmadi, G., 2008. "Numerical Simulation of Free Surface Waves and Wave Induced Separation". *Journal of Scientia Iranica*, Sharif University of Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 323.
- [13] Ducoin, A., Andre, J., Astolfi A., Deniseta, F., and Sigrist, J. F., 2009. "Computational and Experimental Investigation of Flow Over a Transient Pitching Hydrofoil". *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, pp. 728-743.

با افزایش انحنای هیدروفویل ها این نسبت افزایشی است. اما برای افزایش بازدهی و یافتن بهترین ضخامت، انحنای زاویه حمله و عمق غوطه وری لازم است که بهینه ترین مقطع ارائه شود. لذا با استفاده از الگوریتم PSO بهینه سازی انجام گرفته است و مشخصات بهینه ترین حالت در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات بهینه ترین حالت هیدروفویل غوطه ور در آب

AOA(deg)	h/c	Camber	Thickness	L/D
3.5	0.98	0.04	0.1	7.54

شکل مربوط به این هیدروفویل دارای سطح مقطع NACA4410 بوده و به ازای زاویه حمله 3.5° و $h/c=0.98$ ماکزیمم نسبت برا به پسا تولید می کند و به عنوان بهینه ترین حالت است. روش PSO مقدار بیشینه نسبت برا به پسا را برابر ۸.۵ در این حالت پیش بینی نموده است. البته الگوریتم PSO مقدار انحنای هیدروفویل بهینه را 0.035 پیش بینی کرده است اما به دلیل محدودیت ساخت هیدروفویلی با این انحنای، مقطع NACA4410 انتخاب شده است.

بعد از پیش بینی بهینه ترین مقطع برای وسایل پرنده اثر سطحی از الگوریتم PSO، شبیه سازی جریان حول هیدروفویل مذکور در زاویه حمله و فاصله به دست آمده انجام شده و نسبت $L/D=7.54$ به دست آمد که خطای حاصل برابر مقدار زیر است:

$$Error = \left| \frac{L/D(CFD) - L/D(PSO)}{L/D(CFD)} \right| = 12\%$$

با توجه به مقدار کم خطا، می توان بیان کرد که روش مورد استفاده برای بهینه سازی مناسب بوده و می توان به نتایج آن اعتماد کرد. لذا در پایان برای هیدروفویل های غوطه ور در آب مقطع NACA4410 پیشنهاد می شود که در صورت استفاده ماکزیمم بازده را فراهم می کند.



شکل ۶: موج ایجاد شده در سطح آزاد در شرایط $h/c=1$, $AOA=2.5^\circ$ (—) 4412, (—) NACA4410

شکل ۶ مقایسه ای بین موج های تولیدی توسط هیدروفویل های 4410 و 4412 را نشان می دهد. این شکل بیان می کند که هیدروفویل 4410 موج قوی تری تولید می کند.

نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به نیاز روزافزون به استفاده از وسایلی که در تمامی شرایط ماکزیمم بازدهی را داشته باشد لازم است که بهینه ترین حالت مشخص شود. با توجه به اهمیت وسایل دریایی و تاثیر عملکرد بر نحوه کاربرد آنها، بهینه ترین مقطع هیدروفویل ارائه شده است. در پایان نیز نشان داده شده که مقطع NACA4410 بهینه ترین