بررسی تجربی اثرات پوشش هم جهت دیسک دوار بر گشتاور ناشی از اصطکاک پوسته‌ای

دکتر منوچهر راد[1] ، مهندس احمد فخار[2]

۱- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
۲- دانشجوی دکترای مکانیک (واحد علوم و تحقیقات) و هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

تأثیر کاربرد پوشش هم‌جهت مرکب در ضریب پسای دیسک دوّار با نصب پوشش به زیر دیسک در یک مخزن استوانه‌ای آب مطالعه و با ضریب پسای دیسک مرجع با هندسه کاملاً یکسان و صلب با روش‌های تئوری و تجربی مقایسه می شود. پوشش مرکّب از: (۱) نصب پارچه مخملی روی دیسک فلزی، (۲) ریختن ماده سیلیکونی روی مخمل (تشکیل شبکه) و (۳) پوشاندن زیرلایه با یک لایه نازک پلیمری، شکل می‌گیرد. نتیجه آزمایش ها در حالت‌های معیّنی کاهش پسای بیست درصدی یا بیشتر را نسبت به دیسکهای مرجع نشان داده است. دو دلیل احتمالی تأثیر پوشش به صورت ذیل می‌باشد: ۱- کاهش واقعی تبادل انرژی در لایه درهم با میرا کردن پخش شدید درهمی. ۲- افزایش قابل توجه ناحیه آرام در مرکز دیسک (تاخیر گذر آرام به درهم). سختی لایه رویی بر عملکرد پوشش تأثیر قابل ملاحظه ای دارد. خواص مکانیکی شبکه سیلیکونی نیز تأثیر زیادی در تغییر ضریب پسای پوسته‌ای دیسک دارد.

کلمات کلیدی : پوشش هم‌جهت، دیسک دوار، تاخیر گذر، جریان درهم، اصطکاک پوسته‌ای

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECTS OF COMPLIANT COATING FITTED ON ROTATING DISC ON THE TORQUE RESULTING OF SKIN FRICTION

Abstaract

The drag coefficients on discs rotating in a cylindrical tank has studied in relation to the nature of a composite coating attached to the underside of the disc, and direct comparisons were made with refrence discs of identical geometry which were completely rigid.

The composite coating was formed by: (1) bondig of velvet fabric to the metal disc with velour face outward, (2) casting a premixed silicone composition over the velvet fabric, (3) covering the silicone layer with a thin, stiff polymer film.As a result of the tests in certain cases drag coefficient was reduced by 20% or more as compared to refrence rigid discs. Two conclusions are possible: (1)True reduction of energy exchange in the turbulent boundary layer was achived, perhaps by damping of the turbulent bursting process ; (2) A significant increase in the laminar region at the center of disc was obtainded (transition of laminar to turbulent delayed). The stiffiness of the top film influenced the performance of the coating. The change of drag coefficient of discs to be strongly influenced by the dynamic mechanical properties of the silicone elastomer network.

Keywords: Compliant Coating, Rotating Disc, Transition Delay, Turbulent Flow, Skin Friction.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

مقدمه

در چند دهه اخیر به علت نیاز به صرفه‌جویی بیشتر سوخت، توجه زیادی به کاهش نیروی پسا به ویژه پسای پوسته‌ای شده است. قابل ذکر است که سهم پسای پوسته‌ای در کل نیروی پسا زیاد است، برای مثال در زیردریایی‌ها در عمق زیاد و با سرعت بالا، میزان نیروی پسای پوسته‌ای در حدود۹۰٪ نیروی پسای کل می‌باشد.

مطالعات تحلیلی و آزمایشات بسیاری نشان می‌دهند که نوعی از پوشش هم‌جهت می‌تواند اصطکاک پوستی را کاهش دهد. ساده‌ترین نوع پوشش، نوع غیرفعال است که کاربرد آن ساده و نسبتا ارزان می‌باشد. غیر از کاهش پسا، پوشش هم‌جهت، کاربردهای دیگری نیز از جمله جذب صدا در زیردریایی‌ها و موتورهای هواپیما، کاهش نوسان و ارتعاش در بدنه فلزی کشتی‌ها دارد. اقدام ابتدایی در این زمینه به وسیله آزمایشات کرامر[۵] شروع شد که پوشش هم‌جهتی بر اساس پوست دلفین ساخت. کرامر در مقالات خود ادعا کرد که با پوشش هم‌جهت، ۵۹٪ نیروی پسای پوسته‌ای را کاهش داده است. وی علت کاهش نیروی پسای پوستی را تأخیر در گذر جریان آرام به جریان درهم در رینولدز بالا دانست. اگرچه تحقیقات اخیر نشان داده که طولانی‌کردن ناحیه گذر و کاهش نیروی پسا در لایه‌های مرزی درهم توسعه‌یافته نیز ممکن است.

چندین کار تئوری[۱۰،۹،۸،۷] برای بررسی جزئیات این پدیده انجام شده که تمام این‌ها احتمال کاهش نیروی پسای پوستی را در جریان لایه مرزی کاملاً درهم با وجود پوشش هم‌جهت نشان می دهد. ویلیامز [۸] از فرض اغتشاشات دو بعدی و معادلات خطی برای تنش برشی نزدیک جدار هم‌جهت استفاده کرد و نتیجه گرفت که استفاده از سطوح هم‌جهت برای تولید موجهای کم‌سرعت، تنش برشی کمتری تولید می‌کند. در تحقیقات زیمرمان [۹] حرکت سطح به عنوان یک اغتشاش کوچک به جریان درهم اصلی کاهش ۵درصدی را برای هوا نشان داد. رابرت اش [۱۰] تحمیل یک میدان فشار را پیشنهاد کرد که انفجارهای درهمی را ساکن می‌کند و نتایج خوبی نیز درپی‌داشت. علاوه بر طول موج، دامنه و سرعت موج، حرکتهای جداره نیز برای کاهش اصطکاک پوستی اهمیت دارد. (دامنه حرکت جداره باید قدر اهمیّت ضخامت زیر لایه را داشته باشد تا بتواند فشار وارده بر دیوار را اصلاح کند). در تئوریهای پایداری [۱۱]، مشخصه‌های پوشش هم‌جهت برای پایدار کردن نوسانات جریان بیان و سه نوع از آن پیشنهاد شده است:

۱- پوشش با دیافراگم دارای شکاف هوای کوچک برای اجازه دادن به حرکت طول موج و دامنه کوچک.

۲- پوشش چند لایه که کنترل کمتری می‌خواهد. آزمایشات نشان می‌دهد بیشترین کاهش پسا روی سطوح چندلایه روی می‌دهد.

۳- پوشش با ساختار غیرایزوتروپیک متناوب: فرکانس و طول موج را کنترل می‌کند. ارزاگ [۵،۱۲] مدل فوق را برای کاهش نیروی پسا با شبیه‌سازی کامپیوتری آزمایش کرد. گراسکروتز [۱۳] شکلهای مختلفی را پیشنهاد کرد که می‌تواند باعث کاهش نیروی پسا شود.

از نظر چگونگی تأثیر پارامترهای سیستم بر تغییر پسا، تئوری های تایید شده ای وجود دارد که کاهش پسا براثر پوشش هم جهت را اثبات می کند از جمله ریلی با بررسی موج های سطح آزاد، نتایج مفیدی از چگونگی واکنش جداره هم جهت بر جریان بالای آن ارایه کرد.لاندال ۳ دسته C,B,A برای موج های دیواره-سیال ارایه کرد که هر کدام مزایای ویژه ای دارند.نوع دیگرطبقه بندی توسط کارپنتر ارایه شد که به موجهای سیال پایه وجامد پایه تقسیم بندی شد و بر اساس موجهای تولمان- شلیختینگ (TS) بررسی شد.ضمنا تئوری های پایداری هیدروالاستیکی و هیدرودینامیکی به سطح قابل قبولی از رشد رسیده اند که از طریق معادلات ناویه استوکس و معادله ار- سامرفلد قابل بررسی و حل می باشند[۲۶].

به عنوان کارهای تجربی، آزمایشات زیادی برای درک پدیده کاهش پسا و تهیّه پوشش مطلوب انجام

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

شد که تعدادی از آنها به نتایج مثبتی نیز منجر شد ولی هنوز این پدیده کاملاً شناخته نشده است. ابتدا کرامر با پوششهای پرده لاستیکی نازک تا ۵۹٪ کاهش پسا را در آب گزارش کرد [۱۴،۱۶،۱۵،۱۷]. تسلو و فیلیچوک [۱۸] و کوزلوف [۱۹] نیز کاهش پسا در آب را گزارش‌کردند کلینزنیک [۲۰] امکان کاهش پسا در لوله پوشش‌دار را بررسی کرد. در دهه۱۹۶۰ بلیک [۲۱،۲۲] کاهش پسای بالای۶۰٪ را با پوشش چندلایه در هوا نشان داد ولی فاکتورهای طراحی پوشش هم‌جهت هنوز مشخص نشده است.

برای جامع بودن آزمایشات لازم است خواص ماده پوششی از جمله مدول دینامیکی و ضریب میرایی به صورت وسیعی تغییر کند . ضمنا باید یک رابطه بین خواص ماده و کاهش پسا پیدا کنیم. هم چنین بررسی های نظری زیادی [۶] پیشنهاد می‌کنند که جدار هم‌جهت یک حرکت با دامنه کوچک داشته باشد. طول موج کوتاه و فرکانس بالا با نوسانات درهمی برخورد کرده و باعث کاهش نیروی پسا با پوشش هم‌جهت شود.

در این تحقیق کاهش اصطکاک پوستی با یک دیسک چرخان در یک مخزن استوانه‌ای مطالعه می‌شود. نیروی پسا توسط اندازه‌گیری گشتاور دیسک با پوشش هم‌جهت درحال چرخش، در سرعتهای مختلف محاسبه و با دیسک با ابعاد کاملا یکسان و صلب بدون پوشش مقایسه می‌شود.

ضریب پسای پوسته‌ای ابتدا توسط روابط و عملیات تئوری محاسبه و سپس با دستگاه آزمایشی اندازه‌گیری و در نهایت دو مقدار با هم مقایسه و نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

- روش تئوری

محاسبه پسای پوستی دیسک دوار

عدد رینولدز محلّی روی دیسک $\mathrm{Re} = \omega r^2 / v$ در سه سرعت دورانی متناظر با اعداد رینولدز زیر، مساوی و بالای $۲/۱۵\times۱۰^{۵}$ محاسبه می‌شود. برای تعیین یک رابطه تئوری برای محاسبه پسای پوسته‌ای، با گرفتن یک المان حلقه‌ای به ضخامت δ (قطر لایه مرزی) بین r و r+dr، موازنه نیروها و لنگرهای زاویه‌ای می‌شود:

$$\frac{d}{dr}\left(r\int_0^{\delta} V_r^2 dz\right)-\int_0^{\delta} V_\varphi^2 dz=-r\frac{\tau_r}{\rho}$$
$$\frac{d}{dr}\left(r^2\int_0^{\delta} V_r V_\varphi dz\right)=-\frac{\tau_\varphi r^2}{\rho} \qquad (۱)$$

با تعیین V_r, V_φ از قانون $\frac{1}{7}$ و اعمال شرایط مرزی و تعیین سرعت برآیند u ، ضریب پسا را بدست می‌آوریم:

(۲)

$$V_r=\alpha r\omega\left(\frac{z}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}\left(1-\frac{z}{\delta}\right),\quad V_\varphi=r\omega\left[1-\left(\frac{z}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}\right]$$

α: نسبت بین مؤلفه‌های شعاعی و محیطی سرعت است.

شرایط مرزی:

$$at \quad z=0; \quad V_r=0, V_\varphi=r\omega$$
$$at \quad z=\delta; \quad V_r=V_\varphi=0$$
$$u=\left(1+\alpha^2\right)^{1/2}\left(\frac{z}{\delta}\right)^{1/7} r\omega \qquad (۳)$$

با توجه به رابطه: $\tau_r=-\alpha\tau_\varphi$، می‌توان τ_r و τ_φ و سپس با انتگرال‌گیری روی دو طرف دیسک، لنگر کل وارده بر دیسک (M) را به‌دست آورده و از رابطه: $C_M=4M/\rho\omega^2R^5$، ضریب پسا را بدست آوریم:

$$C_M=0.146\,\mathrm{Re}^{-0.2} \qquad (۴)$$

این مقدار با نتایج آزمایشی به جز در محدوده اعداد رینولدز بزرگ مطابقت خوبی دارد. برای تطابق بهتر با آزمایشات، دورفمن [۲۳] فرمول جامع‌تری از ضریب پسا را ارائه کرد:

$$C_M=0.982\left(\log \mathrm{Re}\right)^{-2.58} \qquad (۵)$$

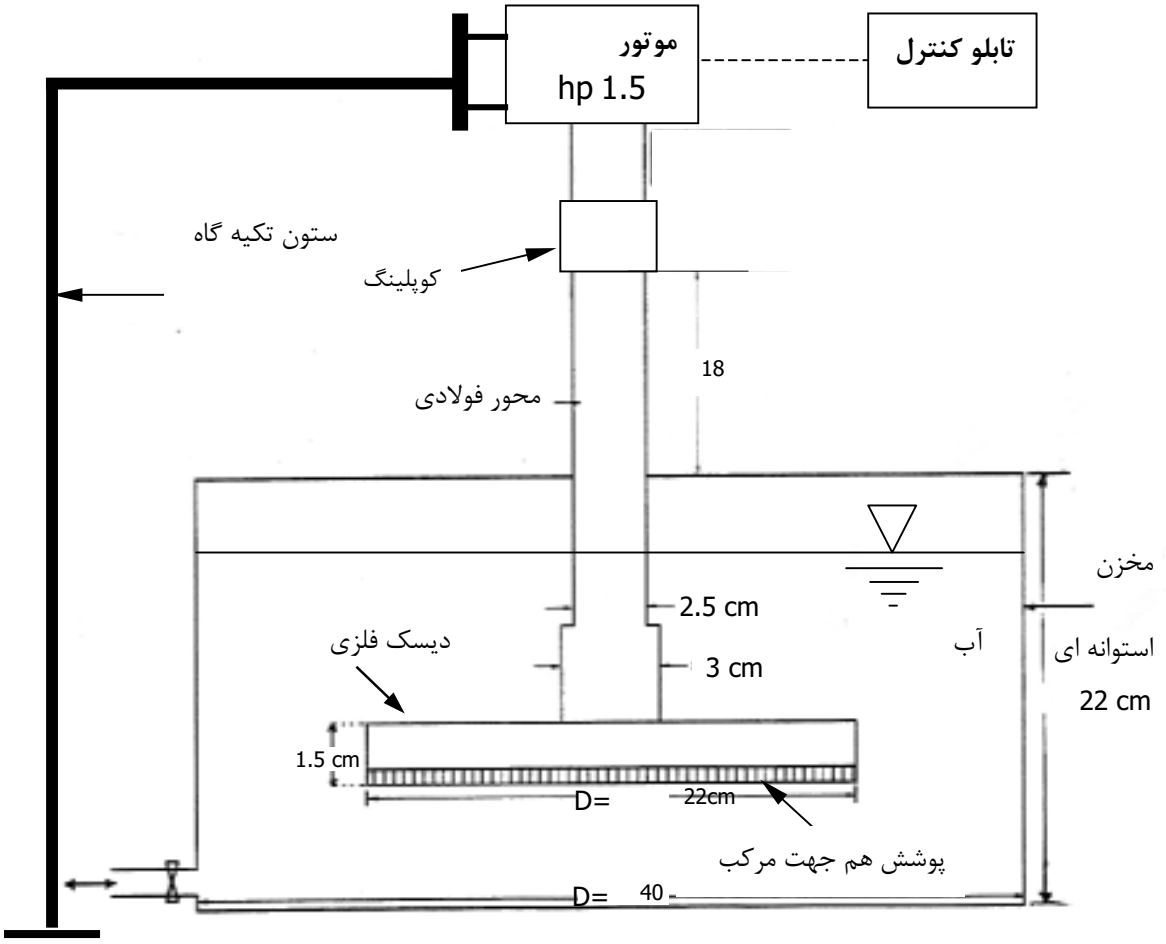
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

روش تجربی

شرح دستگاه آزمایشی: دستگاه آزمایشی(شکل‌های۱و۴) متشکل از یک مخزن استوانه‌ای محتوی آب و یک محور است که توسط الکتروموتور AC-1.5 HP چرخانده می‌شود. در انتهای محور یک دیسک فلزی قرار گرفته که روی آن پوشش هم‌جهت مرکب ساخته و نصب می‌شود. قسمت‌های کنترل و اندازه‌گیری مناسب نیز روی آن نصب شده است.

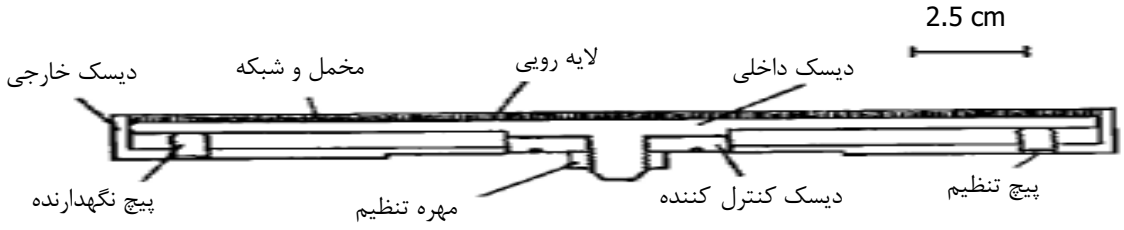
ترکیب شبکه سیلیکونی پوشش: مواد مورد استفاده برای پوشش، چند ترکیب شیمیایی از سیلیکون است که از بین مواد متعدد با نسبت های مخلوط متفاوت همراه با کاتالیزور مناسب انتخاب می‌شوند که در ادامه، آزمایش چهار نوع آن ارایه شده‌است. این پلیمرها از بازار خریداری شده و خواص مکانیکی آن‌ها [۲۴،۲۵] بررسی می‌شود.

مراحل ساخت پوشش هم‌جهت مرکب : در مطالعه حاضر، مخمل به عنوان یک ساختار غیرایزوتروپیک استفاده می‌شود.در ابتدا در خارج از مخزن، مخمل غیرایزوتروپیک روی طرف پایین دیسک که لبه‌دار ساخته شده، به نحوی با رزین اپوکسی چسبانده می‌شود که پرزهایش به سمت بیرون باشد و سپس ماده متشکله (شبکه سیلیکونی) را با کاتالیزور مربوطه مخلوط می‌کنیم و با استفاده از یک دستگاه پرس بارگذاری شامل دو صفحه پلکسی گلاس، پوشش هم‌جهت و لایه رویی (ورقه تفلون یا ...) را روی دیسک نصب می‌کنیم. بعد از ۲۴ ساعت پوشش هم‌جهت آماده آزمایش می‌شود(شکل ۲).



شکل ۱ – طرح دستگاه آزمایشی "کاهش نیروی پسا با پوشش هم جهت مرکب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]



شکل ۲- طرح دیسک هم‌جهت مرکب

اندازه گیری پسای پوسته ای

در مخزن آب، الکتروموتور به‌صورت عمودی روی ستونهای تکیه‌گاه فولادی سوار شده و محور موتور به محور نگهدارنده دیسک متصل شده است. برای شروع آزمایش، دیسک در داخل آب با سرعتهای قابل تنظیم به چرخش درمی‌آید. سرعت چرخش دیسک با استفاده از یک اینورتور(تنظیم کننده سرعت، JAPAN -3PH-LS600-1.5 KW) تنظیم و با یک دورسنج(شمارشگر دیجیتال، مدل JAPAN-AUTONICS) اندازه گرفته می‌شود. اصطکاک پوستی دیسک دورانی از ترکیب لنگر اعمال شده بوسیله موتور AC با سرعت چرخشی محاسبه می‌شود. لنگر برای چرخش دیسک در آب بوسیله شدت جریان موتور اندازه‌گیری می‌شود. رابطه‌ای خطی بین جریان موتور و لنگر موتور وجود دارد که عبارت است از:

$$T = K_T I \qquad (۶)$$

که درآن T(NM) لنگر، I(Amp) شدت جریان الکتریکی و $K_T(NM/Amp)$ضریب موتورAC است و برای هر موتور می‌توان بدست آورد. برای تعیین K_T در یک سرعت ثابت، جریان را با یک آمپرمتر(دیجیتال،OMEGA، 0-5A، 230V، JAPAN) و لنگر را مستقیماً با دینامومتر(دیجیتال، JAPAN،OMEGA)بدست می‌آوریم. این کار در چند سرعت انجام می‌شود و برای موتور مورد نظر K_T=0.92 را بدست می‌آوریم.ضمنا همزمان ولتاژ نیز با یک ولتمتر(دیجیتال، 0-750،OMEGA، JAPAN)اندازه گرفته می شود.

حال دیسک را در یک سرعت معیّن چرخانده و شدت جریان را با آمپرمتر اندازه می‌گیریم. سرعت بعدی را با دورسنج تعیین کرده، باز هم شدت جریان متناظر را اندازه می‌گیریم .به این ترتیب در تمام سرعتها، شدت جریان را اندازه می‌گیریم و منحنی را رسم می‌کنیم.(شکل۳)

نتایج ضریب پسای پوشش هم‌جهت

برای جدا کردن لنگر واقعی دیسک دورانی از لنگر اندازه‌گیری‌شده (جریان موتور) یک دیسک مرجع صلب در هوا در سرعتهای مختلف چرخانده می‌شود. در هر سرعت لنگر اندازه‌گیری‌شده در سرعتهای متناظر رسم می‌شود . صرفنظر از پسای اصطکاکی هوا، لنگرهای حاصله مساوی نیروهای پسای یاتاقانها و اصطکاک داخلی خود موتور می‌شود و نهایتاً با توجه به شکل(۳) درمی‌یابیم که بین نیروی پسا و سرعت دورانی دو رابطه خطی وجود دارند:

$$\begin{cases} I_f = 0.00017n + 0.525 \\ n \le 1200 \ \ RPM \end{cases} \qquad (۷)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

$$\begin{cases} I_f = 0.000117n + 0.5831 \\ 1200 < n < 1500 \ \ RPM \end{cases} \quad (۸)$$

که I_f جریان بواسطه اصطکاک یاتاقانها و اصطکاک داخلی ناشی از خود موتور و n سرعت دورانی دیسک (RPM) است. لنگردیسک دورانی با کم‌کردن I_f از جریان اندازه‌گیری شده در آزمایش، بدست می‌آید.

در ادامه، چهار ترکیب از مواد مختلف سیلیکونی و رقیق کننده های متفاوت با وزن های مولکولی متفاوت و ضریب میرایی کم و زیاد تهیه کرده و در زیرلایه پوشش داخل پارچه مخملی می‌ریزیم و آنها را آماده می کنیم. چهار ترکیب آماده شده دارای خواص زیر هستند:

۱- ترکیب شبکه سخت است و میرایی کم دارد.
۲- ترکیب شبکه نرم است ومیرایی کم دارد.
۳- ترکیب شبکه سخت است و میرایی زیاد دارد.
۴- ترکیب شبکه نرم است و میرایی زیاد دارد.

حال تأثیر آنها را روی کاهش پسا اندازه‌گیری می‌نماییم. نسبت کاهش پسا، D، به صورت: $D = 1 - C_N / C_R$ تعریف می‌شود که C_N ضریب پسای دیسک با پوشش و C_R ضریب پسای دیسک فلزی مرجع است.برای بررسی همه جانبه تأثیر خصوصیات مکانیکی بر کاهش پسای دیسک آزمایش‌های ذیل انجام شد:

۱- آزمایش اثر نرمی و سختی با میرایی کم ثابت.
۲- آزمایش اثر نرمی و سختی با میرایی زیاد ثابت.
۳- آزمایش اثر تغییرات فاکتور میرایی با ثابت بودن غلظت ماده سیلیکونی.

خواص مکانیکی(سختی و میرایی) ماده مرکب سیلیکونی و مخمل بدون لایه رویی در کرنش ۲٪ و در فرکانس های ۲ تا ۹۰ HZ با دستگاه‌های مخصوص اندازه گرفته شد.

شکل ۵ نشان می دهد اگر میرایی پوشش، کم و ثابت باشد، پوشش سخت نسبت به نرم، کاهش پسای بیشتری دارد.

شکل۶ نشان می دهد اگر میرایی پوشش زیاد و ثابت باشد، پوشش نرم نسبت به سخت و دیسک فلزی مرجع کاهش پسای بیشتری دارد که موافقت خوبی با پیش بینی های تئوریکی دارد(خط مستقیم). محدوده عدد رینولدز 9×10^5 الی 2×10^6، است. قابل ذکر است برای مقایسه صحیح در آزمایشات فوق، لایه رویی نصب شده بر ماده سیلیکونی و مخمل، یک ورقه تفلونی با ضخامت ۵mm می باشد. سپس چند نوع لایه رویی مختلف (تفلون۵و۱mm، لاستیک‌طبیعی۵mm و بدون لایه رویی) روی پوشش و دیسک نصب می‌کنیم و تأثیر آنها را نیز روی کاهش پسا اندازه می‌گیریم(شکل۷). قسمت های مختلف دستگاه آزمایشی و مراحل متعدد آزمایشات در شکل های (۸ تا ۱۰) نشان داده شده است.

نتیجه گیری و جمع بندی

با مقایسه نیروی پسای دیسک دارای پوشش هم‌جهت با دیسک هم اندازه بدون پوشش، نتایج و تفسیرهای زیر امکان پذیر می‌باشد :

۱- تغییر وزن مولکولی ماده سیلیکونی و تراکم الیاف پارچه (هم‌جهتی شبکه) تأثیر مهمی در خواص پوشش دارد . ضمنا لایه رویی پوشش نقش بسیار مهمی بر کاهش نیروی پسای پوستی دارد. پوشش هم‌جهت، پسای پوستی دیسک چرخان را در عدد رینولدز $۸/۹\times۱۰^۵$ تا۲۱٪ کاهش می‌دهد.

۲- پوشش با میرایی زیاد نسبت به پوشش با میرایی کم ، نیروی پسای پوستی را بیشتر کاهش می‌دهد.

۳- محدوده حداقل هم‌جهتی در پوشش وجود دارد که در کمتر از آن نیروی پسای پوسته‌ای افزایش خواهد یافت.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

۴- داخل محدوده هم‌جهتی، لایه رویی نرمتر نسبت به لایه سخت، کاهش پسای بیشتری را در بردارد.

۵- مکانیزم کاهش پسا توسط پوشش هم‌جهت بصورت زیر توجیه می‌شود:

الف) گذرجریان آرام به درهم در رینولدز بالاتر(تاخیر گذر)

ب) طولانی‌تر شدن ناحیه گذر.

ج) فروکش کردن انفجار و پخش درهمی با برخورد مطلوب بین جدار هم‌جهت و جریان درهم.

د) تأثیر هندسه سطح پوشش بر جریان در هنگام چرخش.

بر روی دیسک دورانی، عدد رینولدز از مرکز به طرف لبه دیسک افزایش می‌یابد ($\mathrm{Re} = \omega r^2 / \nu, 0 \le r \le R$). بطور عادی گذرجریان آرام به درهم در اعداد رینولدز $۲/۵ \times ۱۰^5$ تا ۳×۱۰^5 در سطح جریان آزاد دیسک دورانی رخ می‌دهد. بنابراین وقتی دیسک در سرعت بالا می‌چرخد، سه ناحیه آرام، عبوری و درهم وجود دارد، بنابراین علل بیان‌شده در بالا را می‌توان برای توضیح پدیده کاهش نیروی پسا بوسیله پوشش هم‌جهت به کار برد. ضمنا چون ماهیت جریان آرام و درهم و ناحیه عبوری سیال درهمه محیطها یکسان بوده و قوانین مکانیک سیالات نیز بر همه حالات، حاکم می باشد پس نتایج حاصله از دیسک قابل تعمیم به حالات دیگر از جمله کشتی ها و اژدرها می باشد.

۶- با توجه به نتایج برخورد بین نوسانات درهمی و دیواره، سختی ماده مرکب سیلیکونی و مخمل پارامتر بهتری نسبت به عامل میرایی برای کاهش پسا می باشد.تأثیر لایه رویی پوشش بر کاهش پسا به صورت زیر تفسیر می شود:

الف- سختی زیاد لایه نازک بالایی پوشش، حرکت موج های سطحی بزرگ را محدود می کند و از افزایش شدید پسا بواسطه تشکیل موج سطحی جلوگیری می کند.

ب- لایه نازک با سختی بالا در فرکانس بالا تشدید می شود که شرط اصلی برای کاهش پسا بوسیله پوشش هم جهت است.

۷- از نظر تأثیر جداره های جانبی، بالا و پایین ظرف استوانه ای آب، بررسی ها نشان داد که ضرایب پسای دیسک دراین ظرف با دیسک در محیط نامحدود و بدون جدار تفاوت بسیار ناچیزی دارد.

۸- پوشش های مورد آزمایش از مواد تولیدی در صنایع داخلی تهیه شده که ترکیب آنها کاملا جدید می باشد و هزینه تهیه آن برای وسایل نقلیه دریایی بویژه کشتی های بزرگ اقتصادی بنظر می رسد.

۹- با توجه به آزمایشات، مشخص می شود انتخاب ماده سیلیکونی، نوع رقیق کننده، نوع مخمل با تراکم پرز معین، انتخاب یک زیر لایه پرده ای برای خروج حباب های هوا، نوع لایه رویی و نحوه ترکیب این اجزا برای تشکیل پوشش بسیار مهم است چرا که در صورت انتخاب یا ترکیب نامناسب این اجزا نه تنها کاهش پسا نداشته، بلکه افزایش پسا نیز خواهیم داشت که از این رو بحث جدید طراحی و بهینه سازی پوشش هم جهت مورد توجه می باشد.

۱۰- با توجه به جزییات آزمایشات، معلوم می شود که تغییرات اصطکاک پوستی دقیقا تابع تغییرات شدت جریان اندازه گیری شده، می باشد چون در هر حالت، ولتاژ، ثابت می شود و اصطکاک یاتاقانها و هوای محیط قبلا اندازه گرفته شده و از آن کم می شود.

۱۱- در هنگام آزمایش با دیسک دارای پوشش هم جهت،می توان با دو دلیل کاهش پسا را تفسیر کرد:

الف- تاخیر گذر آرام به درهم. که در هنگام آزمایش، با کمک آزمایش رینولدز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد محدوده جریان آرام وسیع تر شده است و بنابراین ضریب پسای کمتری اندازه گیری شد.

ب- با کمک آزمایش رینولدز مشاهده شد میزان نوسانات،اغتشاشات و آشفتگی ها در ناحیه جریان درهم کمتر شده وبنابراین میتوان نتیجه گرفت ضریب پسا در جریان درهم کاهش یافته است.

۱۲- چون قوانین مکانیک سیالات، هم بر اجسام دوار و هم بر اجسام غیردوار، حاکم و صادق است،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

می‌توان نتایج این تحقیق را در اجسام دارای حرکات مرکب از انتقالی و دورانی مثل کشتی و زیردریایی بکار برد.

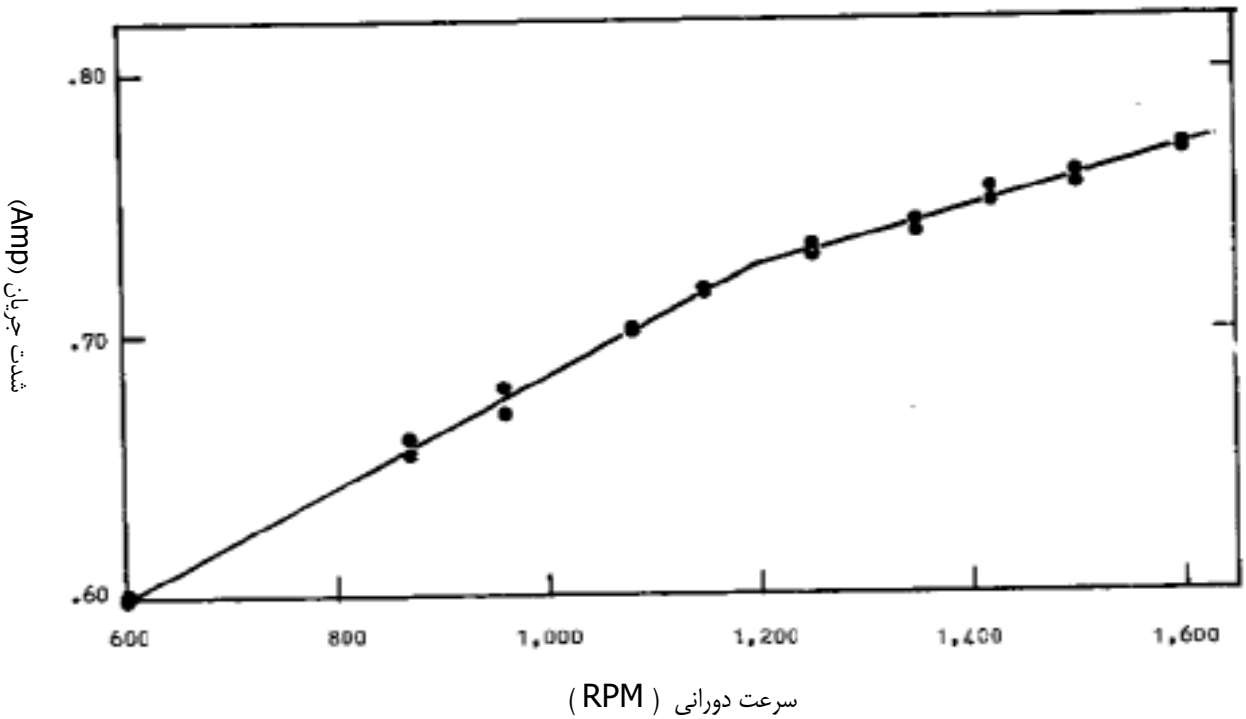
۱۳- با انجام آزمایشات می‌بینیم که پارامترهای: ۱- نوع جریان سیال، ۲- نوع و دمای سیال، ۳- نوع پوشش نصب شده روی جدار(دیسک) و ۴- عدد رینولدز، در میزان پسای حاصله موثر هستند، در حالیکه تغییر پسا تابعی از عدد رینولدز با توجه به نوع پوشش می‌باشد که پوشش نقش آرام کردن آشفتگی‌ها و کاهش پسا را دارد.

پژوهش آینده

در تحقیقات در دست اقدام مولفین، بررسی ها و آزمایشاتی در زمینه وجود همزمان میکروحباب‌ها، کاویتاسیون، پوشش مرکب و نیز طراحی و بهینه سازی پوشش هم جهت انجام می‌شود که تا حد زیادی مبتنی بر پژوهش های قبلی می‌باشد [۱،۲،۳، ۴] .

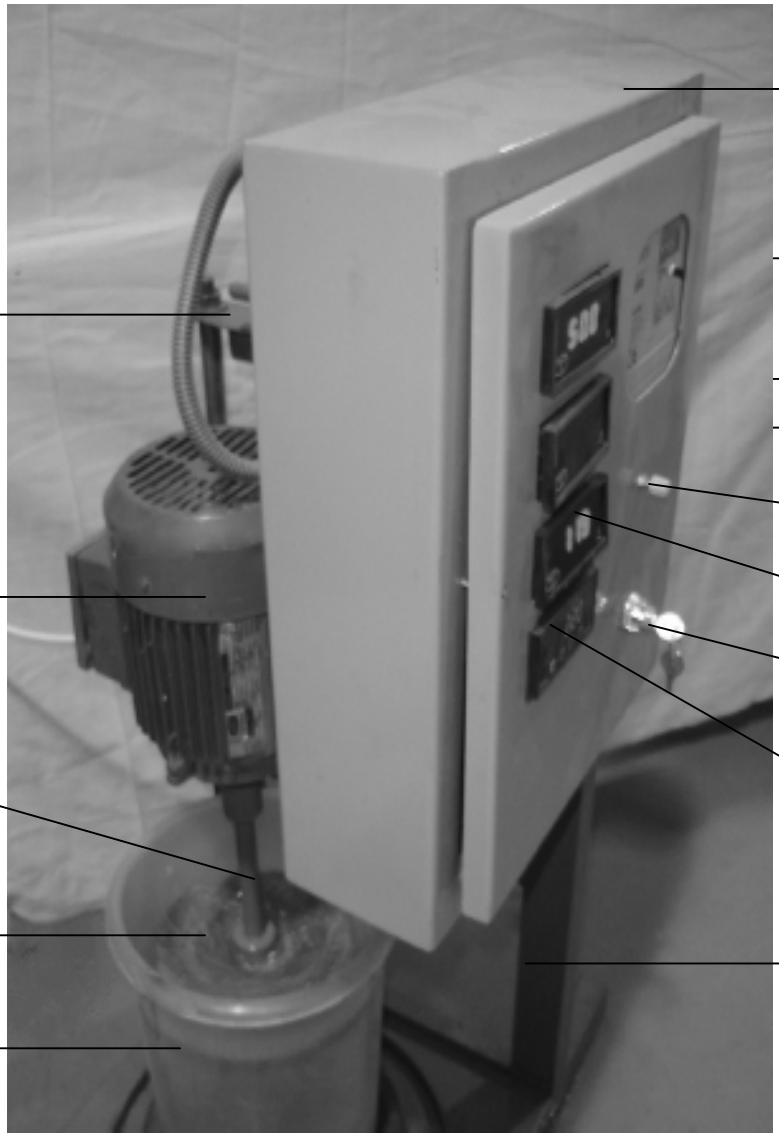
قدردانی

از مسئولین آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشگاه صنعتی شریف به خاطر مساعدت‌های انجام شده در طول این تحقیق قدردانی‌می‌گردد.



شکل ۳ ـ جریان آرمیچر بواسطه اصطکاک بیرینگ ها و داخل موتور در مقابل سرعت دورانی

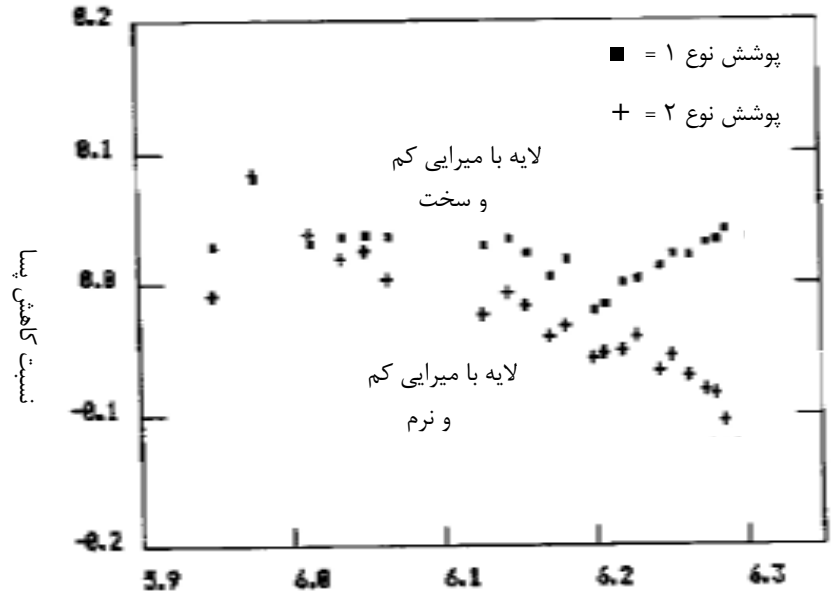
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]



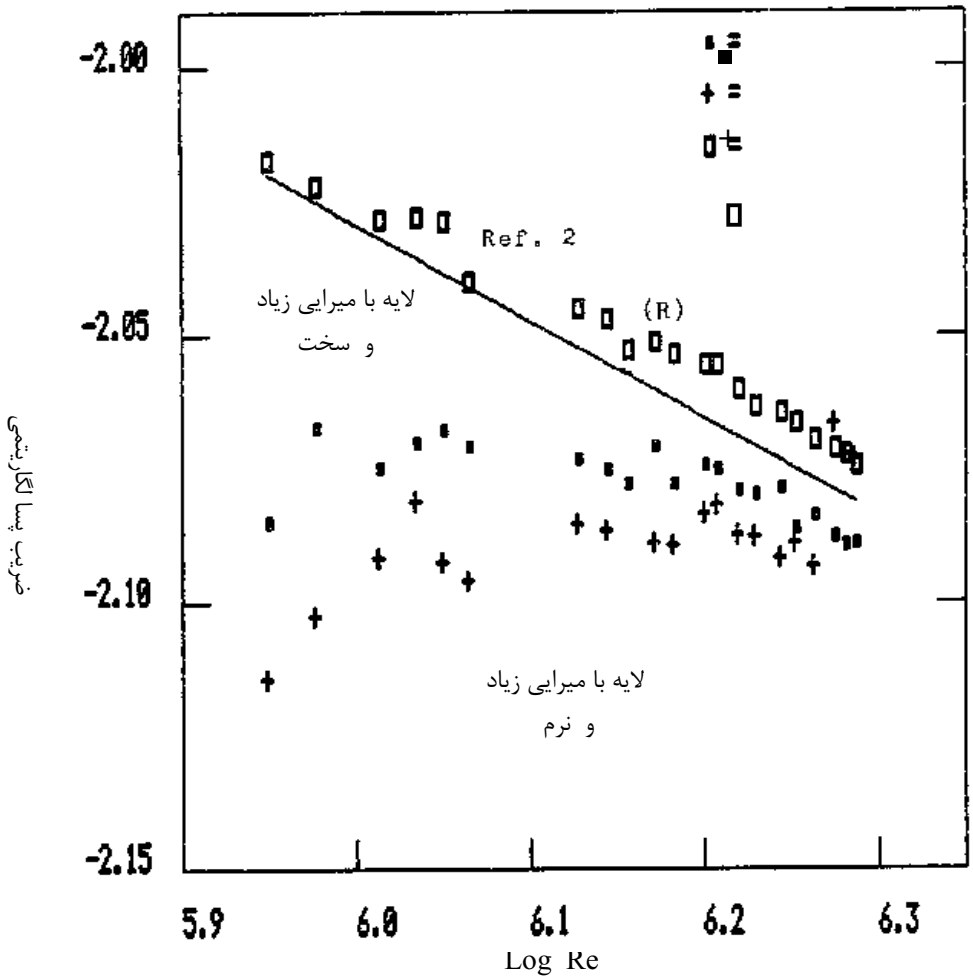
شکل ۴ ـ تصویر دستگاه آزمایشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

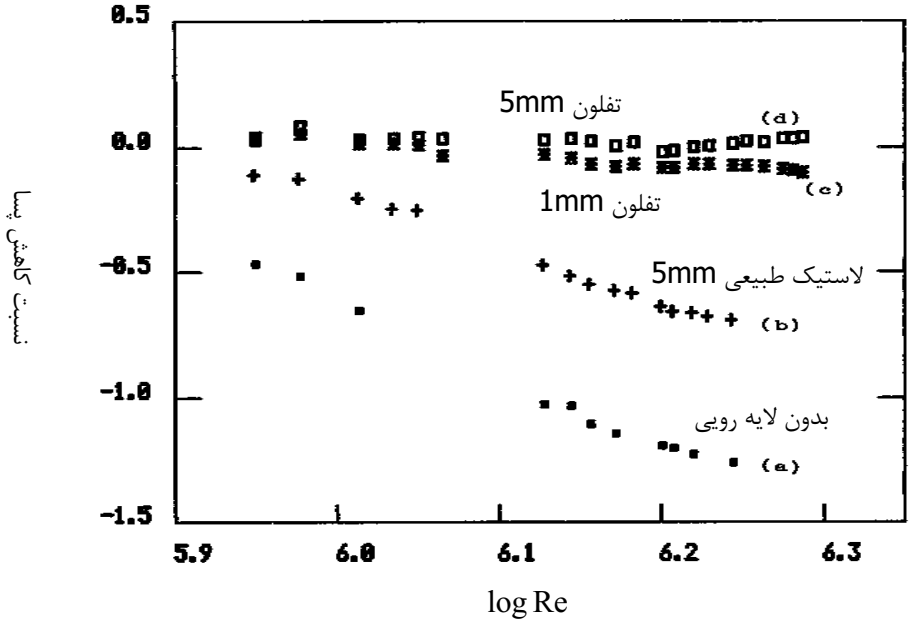


شکل ۵ - نسبت کاهش پسا در برابر عدد رینولدز (تاثیر میرایی کم لایه و تاثیر نرمی و سختی)



شکل ۶ ـ ضریب پسا در برابر عدد رینولدز (تاثیر میرایی زیاد لایه و تاثیر نرمی و سختی)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

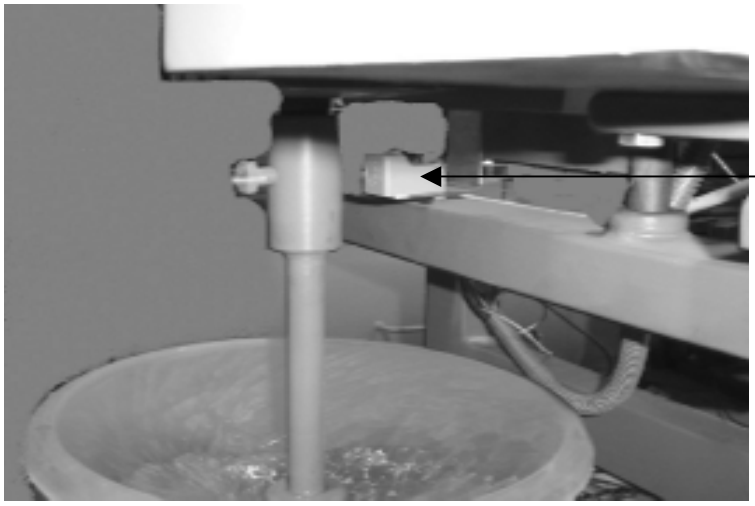


۷ - نسبت کاهش پسا در برابر عدد رینولدز (تاثیر لایه رویی پوشش) شکل

شکل ۸- نمایش مقادیر پارامترهای مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

شکل ۹ ـ دیسک دارای پوشش در حال چرخش



شکل ۱۰ ـ مجموعه دیسک و سنسور دورسنج دستگاه آزمایشی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]

مراجع

1-M.Kramer, "Boundary-layer stabilization by damping"J.Aeronaut Sci, Vol. 24,1957 .

2-R. L. Ash, NASA Report, NASA-CR-2387, 1974.

3-M. C. Fischer, L. M. Weinstein, D. M.Bushnell and R.L.Ash, AIAA Paper 75,1975.

4-J. E. Ffowcs Williams, Bolt-Beranek and Newman Inc., Report No. 1138, 1964.

5-G. Zimmermann, Phys. Fluids, 20, (10) Pt. II , s214, 1977.

6-R. L. Ash, D. M. Bushnell, 4th Symposium on Turbulence, Univ. Missouri, 1975.

7-T. B. Benjamin, J. Fluid Mech., 9, 513, 1960.

8-S. A. Orszag, NASA Report, NASA-CR-2911, 1979.

9-R. Grosskreutz, University Sci, J.189, (5), 41, 1977.

10-M.O. Kramer, J. Aero. Sci. 24, 459, 1957.

11-M.O. Kramer, ASNE J., 25, Feb.1960.

12-M.O. Kramer, Naval Engineers J., 74, 341, 1962.

13-M.O. Kramer,MemorandumRM-3018-PR,RAND Corp.,Santa Monica,CA., 1962.

14-A.P.Teslo and V.Y.Filipchuk, NASA Tech. Translation NASA TT F-16, 555, 1975.

15-L.P.Kozlov,Ukrainian Academy of Sci., Series phys., Math. and Tech. Sci., 45, 1983.

16-G.E.Klinzing, R.J.Kubovcik and J.F. Mario, IEC Proc. Devpt., 8, (1), 112, 1969.

17-W. R. Looney and E.F Blick, J. Aircraft 3, (2) ,163 , 1966.

18-E. F Blick, R. R. Walters, R. Smith and H. Chu, AIAA Paper No.69-165, 1969.

19-S. Schlichting, Boundary Layer Theory, 7th ed. Mcgraw-Hill Inc. New York, 1979.

20-C. W. Macosko and F. C. Weissert, ASTM STP553, 127, 1974.

21-E. J. Roschke, J. Sound and vibration 46, (4), 591, 1976.

22-M. Gad-el-Hak, "Compliant Coating for Drag Reduction", Aeropace Siences,38, 2002.

۲۳- فخار احمد . راد منوچهر. " کاهش نیروی مقاومت وارد بر کشتی ها به وسیله میکروحبابها " ، "پنجمین همایش صنایع دریایی ایران " ،جزیره کیش، آذر ۱۳۸۲.

۲۴- فخار احمد . راد منوچهر. فدایی علیرضا . " کاربرد پوشش هم‌جهت مرکب برای نیروی پسای هیدرودینامیکی"، هشتمین کنفرانس بین المللی مکانیک ، دانشگاه تربیت مدرس ، تهران، ۱۳۸۳.

۲۵- فخار احمد. راد منوچهر." کاربرد ماده سیلیکونی برای کاهش پسا " ، ششمین همایش دریایی بندرعباس، ۱۳۸۳.

۲۶- فخار احمد. راد منوچهر. "کاربرد ماده سیلیکونی در کاهش نیروی پسای کشتی ها"، نهمین کنفرانس بین المللی مکانیک ،دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1384.2.1.5.2]