مجله دانشکده پزشکی اصفهان **مقاله پژوهشی**
سال بیست و نهم/شماره ۱۷٤/ ویژه نامه (مهندسی پزشکی) ۱۳۹۰
تاریخ دریافت: ۹۰/۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۳۰

تحلیل و مدل‌سازی تأثیر شدت توربولانس جریان خون بر گسیختگی گویچه‌های قرمز (خونکافت مکانیکی)

دکتر امیر امیدوار[۱]، دکتر حسن خالقی[۲]، الهام امینی[۳]

چکیده

مقدمه: خونکافت مکانیکی یکی از موانع اصلی در توسعه‌ی تجهیزات قلبی و عروقی مانند ابزارهای گردش کمکی خون، دریچه‌های قلب مصنوعی و پمپ‌های خون است. در اکثر تحقیقات انجام شده در این زمینه، بیشتر به نقش عدد رینولدز جریان بر نرخ گسیختگی گویچه‌های قرمز و مقدار هموگلوبین آزاد شده توجه شده و کمتر به تأثیر پارامترهای کیفی میدان توربولانس (شدت و مقیاس طولی) پرداخته شده است.

روش‌ها: در این مقاله بر اساس یک روش به طور کامل تحلیلی، رابطه‌ای برای پیش‌بینی امکان رخداد خونکافت مکانیکی در شرایط توربولانسی ارایه شده است. در این رابطه، نقش عدد رینولدز و شدت نسبی توربولانس بر رخداد خونکافت به وضوح نشان داده شده است. تطابق نتایج با برخی از داده‌های تجربی موجود و در دسترس، حاکی از این است که مدل ریاضی پیشنهاد شده از دقت نسبی خوبی برخوردار است.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که گویچه‌های قرمز بسته به مقدار عدد رینولدز جریان، شدت توربولانس ۲۰-۱۰ درصد را می‌توانند تحمل نمایند. نتایج حاکی از این است که با افزایش عدد رینولدز جریان، حداکثر شدت توربولانس قابل تحمل توسط گویچه‌های قرمز کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: در این مقاله برای اولین بار نشان داده شد که علاوه بر مقدار عدد رینولدز جریان، مقدار شدت نسبی توربولانس نیز بر رخداد خونکافت مؤثر است. بدین منظور، یک معیار تحلیلی برای پیش‌بینی رخداد خونکافت ارایه شد.

واژگان کلیدی: خونکافت، توربولانس، گویچه‌ی قرمز

مقدمه

آسیب دیدگی و یا تخریب مکانیکی خون یکی از موانع اصلی در توسعه‌ی تجهیزات قلبی و عروقی مانند ابزارهای گردش کمکی خون، دریچه‌های قلب مصنوعی و پمپ‌های خون است (۲-۱). خونکافت مکانیکی عبارت از گسیختگی غشای گویچه‌های قرمز در اثر اعمال نیروهای فیزیکی خارجی است. یکی از عوامل مهم در تخریب و یا گسیختگی مکانیکی گویچه‌های قرمز، وجود تنش‌های توربولانسی است (۳). بررسی‌های انجام شده در شرایط طبیعی (In-vivo) و آزمایشگاهی (In-vitro) نشان از وجود اثرات توربولانسی در دریچه‌های قلب مصنوعی دارد (۳).

تا کنون مطالعات محاسباتی و تجربی مختلفی با هدف بررسی تأثیر تنش‌های توربولانسی بر خونکافت مکانیکی انجام شده است. Kameneva و همکاران مطالعات تجربی ارزشمندی بر روی تأثیر تنش‌های توربولانسی بر گسیختگی گویچه‌های قرمز خون گاو انجام دادند (۱).

آن‌ها نشان دادند که در شرایط تنش‌های برشی دیواره‌ای مشابه، نرخ تخریب گویچه‌های قرمز در

[۱] استادیار، گروه حرارت و سیالات، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
[۲] دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۳] کارشناس ارشد میکروبیولوژی، دانشکده‌ی علوم زیستی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
نویسنده‌ی مسؤول: دکتر امیر امیدوار
Email: omidvar@sutech.ac.ir

www.mui.ac.ir

جریان توربولانسی به شدت بالاتر از جریان آرام است. Pinotti رابطه ی بین اندازه ی گردابه‌های توربولانسی و خونکافت مکانیکی مورد بحث و بررسی قرار داد (۴). همچنین Kameneva و همکاران در یک مطالعه‌ی تجربی و محاسباتی ارتباط بین هموگلوبین آزاد موجود در پلاسما و رینولدز جریان خون را نیز مورد بحث و بررسی قرار دادند (۵).

در کلیه‌ی پژوهش‌های پیش‌گفت بیشتر بر تأثیر شرایط کمی میدان جریان توربولانس (عدد رینولدز جریان) تمرکز شده و کمتر به تأثیر پارامترهای کیفی میدان توربولانس پرداخته شده است. در واقع، مقدار عدد رینولدز جریان معیار به نسبت مناسبی برای تمایز جریان توربولانس از جریان آرام است. اما در این میان نباید از پارامترهای کیفی جریان توربولانس غافل شد. به عبارت دیگر، دو میدان جریان توربولانسی با عدد رینولدز برابر می‌توانند بسته به مقیاس طولی و شدت نسبی که دارند رفتارهای متفاوتی را از خود بروز دهند.

Pinotti مطالعات محدودی در مورد تأثیر مقیاس طولی توربولانس بر خونکافت مکانیکی انجام داد (۴). اما بر اساس جستارهای نگارندگان این مقاله، تا کنون گزارشی در مورد تأثیر شدت میدان توربولانسی بر خونکافت مکانیکی یافت نشد.

در این مقاله سعی شده است تا بر اساس یک مدل به طور کامل تحلیلی، اثرات شدت نسبی توربولانس بر خونکافت مکانیکی مورد مطالعه قرار گیرد.

روش‌ها

پدیده‌ی شکست توده‌ی کروی سیال به شدت به بالانس تنش‌های برشی اعمال شده به آن بستگی دارد. وقتی یک قطره در داخل یک میدان جریان قرار می‌گیرد، همواره از سوی میدان جریان بر جداره ی قطره، تنش‌های برشی وارد می‌شود. تنش‌های برشی اعمال شده از سوی سیال محیطی، سعی در تخریب قطره دارند. در حالی که تنش‌های سطحی قطره (ناشی از کشش سطحی) سعی بر مقابله با تنش‌های برشی جداره‌ای و حفظ شکل و ساختار قطره دارند. عدد بی‌بعد وبر که برای اولین بار توسط Henrich Weber بیان‌گر بالانس و موازنه‌ی تنش‌های اعمال شده به قطره است، به صورت نسبت تنش‌های برشی محیطی به تنش سطحی قطره تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، گسیختگی و یا شکست جداره‌ی قطره زمانی رخ می‌دهد که مقدار عدد وبر قطره از یک مقدار مشخص و معین تجاوز کند. در اصطلاح به این مقدار آستانه‌ای، عدد وبر بحرانی گفته می‌شود. عدد وبر بحرانی معیار مناسبی برای پیش‌بینی و تشخیص رخداد پدیده‌ی شکست است. در اکثر مدل‌های ارایه شده برای شکست قطرات، مقدار عدد وبر بحرانی برابر با ۱۲ فرض شده است (۶).

تحلیل‌های ابعادی حاکی از آن است که سه پارامتر بی‌بعد بر عدد وبر بحرانی مؤثر است؛ عدد رینولدز، عدد اونسورگ و نسبت چگالی دو فاز. تأثیر دو پارامتر اول یعنی عدد رینولدز و عدد اونسورگ بر عدد وبر بحرانی توسط محققان زیادی از جمله Pilch و Erdman (۷)، Kolev (۸) و Gelfand (۹) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. میزان تأثیر نسبت چگالی دو فاز بر عدد وبر بحرانی نیز در سال ۲۰۰۳ میلادی توسط Duan و همکاران با استفاده از مدل‌سازی فرایند شکست قطره با روش نیمه ضمنی ذرات متحرک (MPS یا Moving-particle semi-implicit) مورد بررسی قرار گرفت (۱۰). آن‌ها نشان دادند که در جریان‌هایی با نسبت

www.mui.ac.ir

چگالی بسیار کوچک، مقدار عدد وبر بحرانی به شدت به نسبت چگالی دو فاز وابسته است.

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط Kolmogorov (۱۱) و Hinze (۱۲)، تنش برشی توربولانسی اعمال شده به یک قطره‌ی کروی سیال در یک محیط متلاطم همسان‌گرد از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\tau_t = \rho_c \overline{\delta u^2(d)} \qquad (۱)$$

که ρ_c و $\overline{\delta u^2(d)}$ به ترتیب چگالی محیط پیوسته و متوسط مجذور سرعت نوسانی در فاصله‌ای برابر با قطر قطره (d) است. بر طبق تئوری کولموگروف و با فرض تلاطم همسان‌گرد داریم:

$$\overline{\delta u^2(d)} = \beta(\varepsilon d)^{\frac{2}{3}} \qquad (۲)$$

در این رابطه ε نرخ تلفات انرژی توربولانس و β یک ثابت بی‌بعد است. Batchelor برای جریان‌های گاز- مایع مقدار ۸/۲ را برای β پیشنهاد کرده است (۱۳). Eastwood و همکاران نیز هیمن مقدار را برای جریان‌های مایع- مایع پیشنهاد نموده‌اند (۱۴).

با جاگذاری رابطه‌ی ۲ در رابطه‌ی ۱ مقدار تنش‌های برشی توربولانسی اعمال شده به سطح قطره را می‌توان به فرم زیر محاسبه نمود:

$$\tau_t = \rho_c \beta(\varepsilon d)^{\frac{2}{3}} \qquad (۳)$$

از آنجا که عدد وبر قطره به صورت نسبت تنش‌های برشی محیطی به تنش‌های سطحی قطره تعریف می‌شود، برای قطره‌ای که در داخل یک میدان توربولانسی قرار گرفته است داریم:

$$We = \frac{\tau_t}{\tau_{surf}} \qquad (۴)$$

که We بیان‌گر عدد وبر و τ_{surf} تنش سطحی قطره است که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{surf} = \frac{\sigma}{d} \qquad (۵)$$

که σ کشش سطحی قطره و d قطر قطره است.

با جاگذاری روابط ۳ و ۵ در رابطه‌ی ۴ داریم:

$$We = \frac{\beta \varepsilon^{\frac{2}{3}} \rho_c d^{\frac{5}{3}}}{\sigma} \qquad (۶)$$

نرخ تلفات انرژی توربولانس (ε) را می‌توان با تقریب بسیار خوبی از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود (۱۳):

$$\varepsilon = \frac{u'^3}{l} \qquad (۷)$$

که u' انحراف استاندارد نوسانات سرعت میدان توربولانس و l مقیاس طولی میدان است. u' از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$u' = \bar{u}_c I_r \qquad (۸)$$

که $\bar{u}_c$ مقدار متوسط سرعت جریان و I_r شدت نسبی توربولانس محیط پیوسته است.

بر مبنای تحقیقات Andersson و Andersson (۱۵)، تنها گردابه‌هایی در فرایند شکست و گسیختگی توده‌ی کروی سیال شرکت می‌کنند که اندازه‌ی آن‌ها بین ۲ تا حداکثر ۳ برابر قطر قطره است. بنابراین می‌توان مقیاس طولی (l) موجود در رابطه‌ی ۸ را با تقریب خوبی برابر با سه برابر قطر قطره فرض کرد. با اعمال $(l = 3d)$ و جایگزینی روابط ۷ و ۸ در رابطه‌ی ۶ می‌توان رابطه‌ی پیش‌گفت را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$We = \frac{0.48 \beta \rho_c I_r^2 \bar{u}_c^2 d}{\sigma} \qquad (۹)$$

در شرایط آستانه‌ای شکست داریم:

$$We_{crit} = \frac{0.48 \beta \rho_c I_r^2 \bar{u}_c^2 d_{crit}}{\sigma} \qquad (۱۰)$$

با مرتب‌سازی مجدد رابطه‌ی ۱۰، می‌توان قطر بحرانی را به فرم زیر محاسبه نمود:

www.mui.ac.ir

$$d_{crit} = \frac{We_{crit}\sigma}{0.48\beta\rho_c I_r^2 \overline{u}_c^2} \qquad (۱۱)$$

منظور از قطر بحرانی، حداکثر قطری است که می‌تواند بدون رخداد شکست و گسیختگی در داخل میدان توربولانسی پایدار باقی بماند. به عبارت دیگر، می‌توان گفت قطراتی در داخل میدان توربولانسی دچار گسیختگی می‌شوند که قطر آن‌ها از قطر بحرانی بزرگ‌تر باشد:

$$d \geq \frac{We_{crit}\sigma}{0.48\beta\rho_c I_r^2 \overline{u}_c^2} \qquad (۱۲)$$

با توجه به ناپایداری‌های سطحی کلوین- هلمهولتز می‌توان مقدار عدد وبر بحرانی را در جریان‌های مایع- مایع از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود (۱۰):

$$We_{crit} = 4\pi\left(1+\frac{\rho_c}{\rho_d}\right) \qquad (۱۳)$$

با جاگذاری رابطه‌ی ۱۳ در رابطه‌ی ۱۲ می‌توان این رابطه را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$d_{crit} = \frac{4\pi\sigma(\rho_c+\rho_d)}{0.48\beta\rho_c\rho_d I_r^2 \overline{u}_c^2} \qquad (۱۴)$$

از آنجا که گویچه‌های قرمز شکل به مراتب پیچیده‌تری نسبت به حالت کروی دارند، بنابراین محاسبات مربوط به گسیختگی توده‌های کروی سیال را نمی‌توان به طور مستقیم برای گویچه‌های قرمز به کار برد. از این رو در این بخش سعی داریم با تعریف قطر معادل بحرانی برای گویچه‌های قرمز خون، تا حدودی محاسبات را به حالت کروی نزدیک‌تر کنیم.

بررسی‌ها نشان داده است که اعمال تنش‌های برشی بیشتر از ۳۰۰ نیوتن بر متر مربع می‌تواند باعث تخریب مکانیکی گویچه‌های قرمز و رخداد خونکافت گردد (۳). با نگاهی مجدد به تعریف عدد وبر (رابطه‌ی ۵) و با توجه به مفهوم عدد وبر بحرانی برای یک قطره ی کروی که در بخش قبل به تفصیل مورد بحث قرار گرفت، می‌توان شرایط گسیختگی گویچه‌های قرمز را با شرایط شکست توده ی کروی با قطر (d_{eq}) مشابه فرض نمود. به طوری که:

$$We_{crit} = \frac{\tau_{\max}}{\sigma/d_{eq}} \qquad (۱۵)$$

با فرض $\tau_{\max} = ۳۰۰\,(Nm^{-2})$ و با اعمال رابطه ی ۱۴ در رابطه‌ی فوق، قطر معادل بحرانی را برای یک گویچه‌ی قرمز می‌توان به فرم زیر تخمین زد:

$$d_{eq} = \frac{\pi\sigma\left(1+\frac{\rho_c}{\rho_d}\right)}{75} \qquad (۱۶)$$

به عبارت دیگر، یک گویچه‌ی قرمز در آستانه‌ی پارگی درست همانند یک قطره ی کروی با قطر (d_{eq}) رفتار می‌کند.

یکی از مشکلات اساسی در محاسبه و پیش‌بینی امکان رخداد خونکافت، شکل به نسبت پیچیده‌ی گویچه‌های قرمز است؛ که این مشکل با تعریف قطر معادل بحرانی مرتفع گردید. اکنون می‌توان معیاری برای پیش‌بینی امکان رخداد خونکافت در یک میدان جریان متلاطم ارایه نمود.

در ابتدا لازم است قطر بحرانی با استفاده از رابطه ی ۱۵ و با توجه به پارامترهای جریانی و خواص ترموفیزیکی برای میدان جریان متلاطم خون محاسبه گردد. اگر قطر بحرانی محاسبه شده بزرگ‌تر از قطر معادل باشد، گویچه‌ها پایدار می‌مانند و هیچ گونه شکست یا پارگی در آن‌ها رخ نخواهد داد. اما اگر قطر بحرانی از قطر معادل کوچک‌تر شد، خونکافت رخ خواهد داد. به نظر می‌رسد که نسبت قطر معادل به قطر بحرانی، معیار مناسبی برای پیش‌بینی رخداد خونکافت مکانیکی باشد. با توجه به آنچه گفته شد، می‌توان معیار خونکافت توربولانسی (THC) را به

www.mui.ac.ir

شکل زیر تعریف نمود:

$$THC = \frac{d_{eq}}{d_{crit}} \qquad (۱۷)$$

در یک میدان جریان توربولانسی، خونکافت زمانی رخ می‌دهد که $THC \geq 1$ باشد.

با اعمال روابط ۱۴ و ۱۶ در رابطه‌ی ۱۷ داریم:

$$THC = \frac{0.48\beta I_r^2 \rho_c u_c^2}{300} \qquad (۱۸)$$

یا به عبارت ساده‌تر:

$$THC = 0.013 \times I_r^2 \left(\rho_c u_c^2\right) \qquad (۱۹)$$

که با توجه به تعریف عدد رینولدز جریان (Re_D) می‌توان نوشت:

$$THC = 0.013 \times \frac{\mathrm{Re}_D^2 \, \mu_c^2 I_r^2}{\rho_c D^2} \qquad (۲۰)$$

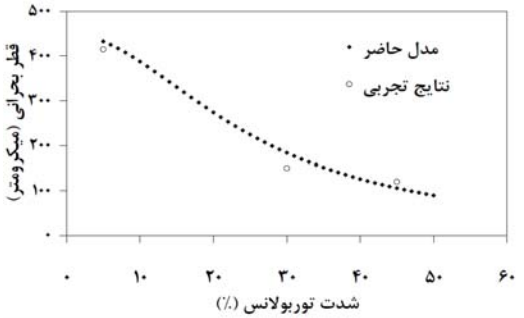
که D قطر مجرای عبور جریان است.

یافته‌ها

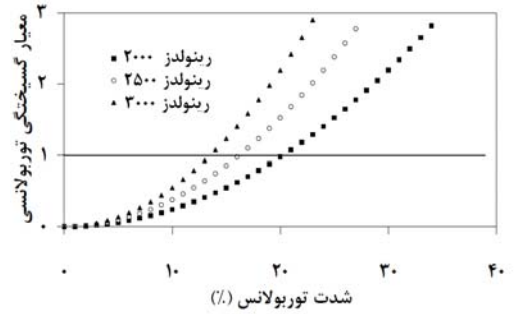
اندازه‌ی قطر بحرانی یک توده‌ی کروی سیال با تحلیل کامل بر مبنای رابطه‌ی ۱۴ بیان شد. در این بخش از مقاله، مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیش‌گفت با برخی از نتایج تجربی ارایه شده در مرجع (۱۶) مقایسه شده است. در شکل ۱، مقادیر قطر بحرانی برای سیال متانول در شرایط توربولانسی مختلف با داده‌های تجربی مقایسه شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی ۱۴ از هماهنگی بسیار خوبی با نتایج تجربی برخوردار است.

در شکل ۲، مقادیر پیش‌بینی شده برای معیار گسیختگی توربولانسی گویچه‌های قرمز در شدت توربولانس‌های مختلف برای سه عدد رینولدز متفاوت و برای مجرایی با قطر ۱ میلی‌متر رسم شده است.



شکل ۱. مقایسه‌ی نتایج قطر بحرانی با مقادیر تجربی گزارش شده در مرجع (۱۶).



شکل ۲. تأثیر شدت نسبی توربولانس بر خونکافت مکانیکی در اعداد رینولدز مختلف

همانطور که گفته شد، خونکافت زمانی رخ می‌دهد که معیار گسیختگی توربولانسی بزرگ‌تر از یک باشد. در شکل ۲ مقدار $THC = 1$ به عنوان شرایط آستانه‌ای رخداد خونکافت مشخص شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، در عدد رینولدز ۲۰۰۰ گویچه‌های قرمز قادرند بیشینه‌ی شدت توربولانس ۲۰ درصد را تحمل نمایند. در حالی که در اعداد رینولدز ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰، بیشینه‌ی شدت توربولانس قابل تحمل به ترتیب به ۱۷ و ۱۴ درصد می‌رسد. به عبارت دیگر، چنین به نظر می‌رسد که علاوه بر مقدار عدد رینولدز جریان، کیفیت میدان توربولانسی (شدت نسبی آن) نیز در رخداد خونکافت مؤثر است. این در حالی است که در اغلب تحقیقات

www.mui.ac.ir

انجام شده در این زمینه، تنها به نقش عدد رینولدز جریان اشاره شده است (۵-۱).

بحث

در این پژوهش، اثرات شدت نسبی توربولانس جریان بر رخداد خونکافت مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله برای اولین بار نشان داده شد که علاوه بر مقدار عدد رینولدز جریان، مقدار شدت نسبی توربولانس نیز بر رخداد خونکافت مؤثر است. بدین منظور، یک معیار به طور کامل تحلیلی برای پیش‌بینی رخداد خونکافت ارایه شد. این معیار تابعی از شدت نسبی توربولانس و فشار دینامیکی جریان خون است. مقایسه‌ی نتایج با برخی از داده‌های تجربی موجود و در دسترس، حاکی از این است که مدل ریاضی پیشنهاد شده از دقت نسبی بالایی برخوردار است. البته تحقیقات تجربی چندانی به طور مستقیم در زمینه‌ی بررسی تأثیر شدت توربولانس بر گسیختگی مکانیکی گویچه‌های قرمز انجام نشده است. این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

References

1. Kameneva MV, Burgreen GW, Kono K, Antaki JF, Repko BM, Umezu M. On the mechanical blood trauma: effect of turbulence. Proceedings of the BMES/EMBS Conference; 1999 Oct; Atlanta, USA. p. 772-79.
2. Vercaemst L. Hemolysis in cardiac surgery patients undergoing cardiopulmonary bypass: a review in search of a treatment algorithm. J Extra Corpor Technol 2008; 40(4): 257-67.
3. Sallam A. An investigation of the effect of Reynolds shear stress on red blood cell hemolysis (PhD Thesis). Houston, TX: University of Huston; 1982.
4. Pinotti M. Is there Correlation between the Turbulent Eddies Size and Mechanical Hemolysis? J Braz Soc Mech Sci 2000; 22(4): 128-36.
5. Kameneva MV, Burgreen GW, Kono K, Repko B, Antaki JF, Umezu M. Effects of turbulent stresses upon mechanical hemolysis: experimental and computational analysis. ASAIO Journal 2004; 50(5): 418-23.
6. Crowe C, Sommerfeld M, Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. Boca Raton, FL: CRC Press; 1998.
7. Pilch M, Erdman CA. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop. International Journal of Multiphase Flow 1987; 13(6): 741-57.
8. Kolev NI. Fragmentation and coalescence dynamics in multiphase flows. Experimental Thermal and Fluid Science 1993; 6(3): 211-51.
9. Gelfand BE. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. Progress in Energy and Combustion Science 1996; 22: 201-12.
10. Duan RQ, Koshizuka S, Oka Y. Numerical and theoretical investigation of effect of density ratio on the critical Weber number of droplet breakup. Journal of Nuclear Science and Technology 2003; 40(7): 501-8.
11. Kolmogorov AN. On the disintegration of drops in a turbulent flow. Doklady Akademii Nauk USSR 1949; 66: 825-8.
12. Hinze JO. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion process. AIChE Journal 1955; 1(3): 289-95.
13. Batchelor GK. The theory of homogeneous turbulence. Cambridge, England: Cambridge University Press; 1953.
14. Eastwood C, Cartellier A, Lasheras JC. The breakup time of a droplet in fully developed turbulent flow. Proceedings of the 8th European Turbulence Conference; 2000; Barcelona, Spain. p. 573-76.
15. Andersson R, Andersson B. Modeling the Breakup of Fluid Particles in Turbulent Flows. AIChE Journal 2006; **52**(6): 2031-8.
16. Prevish TD. Secondary droplet breakup in highly turbulent flow fields [PhD Thesis]. Pennsylvania, USA: The Pennsylvania State University; 1998.

www.mui.ac.ir

Journal of Isfahan Medical School Original Article

Vol 29, No 174, Special Issue (Biomedical Engineering) 2012 Received: 18.11.2011 Accepted: 19.2.2012

Modeling of the Effects of Turbulence Intensity on Mechanical Hemolysis of Red Blood Cells

Amir Omidvar PhD[1], Hassan Khaleghi PhD[2], Elham Amini MSc[3]

Abstract

Background: Mechanical hemolysis plays an important role in development of cardiovascular prostheses, artificial valves, and blood pumps. Considerable research has been conducted to investigate mechanical hemolysis of red blood cells (RBC). Most previous studies have focused on the effects of Reynolds number of blood flow and mean value of turbulent stresses. However, less attention has been paid to the influence of eddy length scale and turbulence intensity.

Methods: In this study, a new analytical correlation was proposed in order to predict the mechanical hemolysis due to turbulence effects. The roles of Reynolds number and relative turbulence intensity were clearly demonstrated in the proposed correlation. The good agreement between predicted results and the experimental data showed that the proposed model had good accuracy.

Findings: RBCs can tolerate up to 20% of turbulence intensity depending on the value of Reynolds number of the blood flow. In addition, the maximum endurable value of turbulence intensity of a human RBC decreases as Reynolds number of the blood flow increases.

Conclusion: For the first time, this paper showed that mechanical hemolysis of RBC can be intensely influenced by the turbulence intensity of blood flow. Therefore, a simple explicit analytical criterion was proposed for prediction of the effects of turbulence intensity on mechanical hemolysis of RBC.

Keywords: Hemolysis, Turbulence, Red blood cells

[1] Assistant Professor, Department of Heat and Fluid, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
[2] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[3] Department of Microbiology, School of Biological Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Corresponding Author: Amir Omidvar PhD, Email: omidvar@sutech.ac.ir