

بررسی علل ایجاد لخته خون درون بطن چپ قلب در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ براساس معادلات سیستم های دینامیکی در ریاضیات: استراتژی و راهبردها

مرسده کروند^{۱،۳*} و سعید رنجبر^{۱،۲}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

^۲ هلند، دانشگاه علوم پزشکی ماستریخت

^۳ ایران، تهران، بیمارستان شهید طالقانی، فلوشیپ اکوکاردیوگرافی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

چکیده

مشاهدات بالینی ما ایجاد امواج آشفته (Turbulence) و غیر نرمال خون را درون بطن چپ قلب بیماران کرونا کووید-۱۹ (Corona Virus Covid-19) نشان دادند. این امواج غیر نرمال خون درون حفره بطن چپ باعث ایجاد لخته خون می شوند. لازم به ذکر است، ایجاد این لخته ها ناشی از انسداد عروق کرونری نیستند و اینکه ایجاد لخته ها در بیماران مبتلا به ویروس کرونای کووید-۱۹، بدون هیچ گونه بیماری قلبی مشاهده شده اند. مطالعات آزمایشگاهی و سلولی نشان دادند که یکی از اندیس های مهم خون به نام گرانروی (یا ویسکوسیته) (Viscosity)، در این بیماران افزایش می یابند و از آنجا که گرانروی سیال خون در معادله ناویر-استوکس (Navier-Stokes Equations) به عنوان یک فاکتور اصلی، بصورت ضربی از لاپلاسیان (Laplacian) بردار سرعت خون وارد می شود، این مقاله به بررسی تغییرات مسیر جریان خون داخل بطن چپ بعنوان علت ممکنه در ایجاد لخته خونی داخل بطن می پردازد.

واژگان کلیدی: ویروس کووید-۱۹، سیال خون، گرانروی (ویسکوسیته)، معادله ناویر-استوکس، کرل، دیورژانس، ژاکوبین، هسین، بطن چپ قلب، تصاویر دوبعدی اکوکاردیوگرافی

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mr.karvandi@sbm.ac.ir

مقدمه

موازی، تقسیم بر فاصله آنها شاخص نرخ کنش-واکنش (Share Rate) را معرفی و محاسبه می کند و نتیجتاً گرانروی (ویسکوسیته) خون بطور ریاضی بصورت کسر حاصل از تقسیم نیروی وارده به ناحیه ای از سیال خون بر میزان نرخ کنش-واکنش معرفی و تعریف می گردد. و از آنجایی که گرانروی سیال خون بصورت ضربی از لاپلاسیان بردار سرعت خون در معادله ناویر-استوکس وارد می شود، تغییرات در گرانروی خون می تواند تغییرات در مسیر جریان خون را توصیف کند. هدف اصلی این مطالعه بررسی تغییرات مسیر حرکات خون درون حفره بطن چپ در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ با میوکارد و شریان کرونری نرمال، همراه بودند. از آنجایی که سیال خون بطور میکروسکوپی بصورت لایه های موازی و لغزنده کنار یکدیگر قرار دارند تفاوت سرعت حرکت این لایه های

بیماری همه گیر ناشی از ویروس کرونا بحرانی جهانی بود که به سرعت در سراسر جهان گسترش یافت. این بیماری ناشی از سندروم حاد تنفسی کرونا ویروس بود که علاوه بر علائم، با عوارض متعددی همراه بود (۱). یکی از شایع ترین عوارض، ایجاد رگ بست لخته زاد (ترومبوآمبولی) (Thromboembolism) در شریان های مختلف بدن بود که باعث شد به نظریه های مختلفی در مورد منشا این لخته ها ارائه شود (۲). بخش قابل توجهی از بیمارانی با عفونت کووید-۱۹ با لخته درون بطن چپ مراجعه کردند. تست های اکوکاردیوگرافیک این بیماران مبتلا به کووید-۱۹ با حرکت طبیعی میوکارد بطن چپ و شریان های کرونری نرمال، همراه بودند. از آنجایی که سیال خون بطور میکروسکوپی بصورت لایه های موازی و لغزنده کنار یکدیگر قرار دارند تفاوت سرعت حرکت این لایه های

تعریف ها و استراتژی مورد استفاده

نخست چند تعریف را ارایه می کنیم که در بخش های بعد مورد استفاده قرار می گیرند.

تعریف ۱-۲: گران روی (یا ویسکوسیته) خون میزان مقاومت سیال خون در برابر حرکت خون می باشد و در رابطه مستقیم با نیروی اصطکاکی ناشی از گران روی^۱ است. این نیروی اصطکاکی بر خلاف نیروی ایجاد کننده گردش طبیعی سیال خون است و به صورت زیر فرموله می شود:

$$F = 6\pi\mu r v$$

نیروی فوق نیروی اولیه انتقالی^۲ نام دارد که در آن μ گران روی، v سرعت سیال خون و r میزان جابه جایی سیال خون در یک سیکل قلبی هستند.

تعریف ۲-۲: به صورت کلی و طبیعی، رفتار جریان خون در بطن چپ قلب هم بصورت نیوتونی می باشد و هم بصورت غیر نیوتونی. منظور از حرکت نیوتونی سیال خون این است که طبق قانون دوم نیوتون، تنها حرکت بردارهای سرعت سیاله و شتاب کلی این بردارها را در بررسی جریان حرکت خون، مد نظر قرار می دهد. به عبارتی معادله زیر را می بایستی بررسی می کنیم:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla P = \mu \nabla^2 v + f_{body} \text{ \& } Curl(v) = 0$$

در معادله فوق ρ چگالی خون، v بردار سرعت سیال خون، $\frac{\partial v}{\partial t}$ شتاب کلی خون، ∇P گرادیان فشار خون، μ ویسکاسیته خون، $\nabla^2 v$ لاپلاسین بردار سرعت خون و f_{body} نیروی انتقالی از دیواره بطن چپ به سیال خون می باشند.

تعریف ۲-۳: منظور از رفتار غیر نیوتونی سیال خون داخل حفره بطن چپ این است که شتاب موضعی بردارهای سرعت خون نیز در معادله بالا وارد می شوند! به عبارتی دیگر آشفتگی لحظه ایی و موضعی جریان خون مورد بررسی قرار می گیرند:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) + \nabla P = \mu \nabla^2 v + f_{body} \text{ \& } Curl(v) = 0$$

$(v \cdot \nabla)v$ در معادله فوق، شتاب موضعی بردار سرعت خون می باشد. معادله بالا معادله نایر-استوکس نام دارد.

برای بررسی مسیر حرکت خون درون بطن چپ قلب به هر نقطه داخل حفره بطن چپ، بردار سرعت v را متناظر می کنیم. همانطور که بیان کردیم، شتاب کلی این بردار توسط $\frac{\partial v}{\partial t}$ توصیف می گردد و شتاب موضعی بردار سرعت توسط $Div(v)$ بیان می گردد. بررسی و محاسبه اپراتورهای ژاکوبین^۳ $J(v)$ دیورژانس^۴ $Div(v)$ کرل^۵ $\nabla(v)$ و گرادیان $\nabla(v)$ ، توصیف دقیقی از حرکات انتقالی، کشیدگی و چرخشی بردارهای سرعت را ارائه می دهند. برای بررسی خمیدگی بردارهای سرعت می بایستی مشتق تابع گائوس^۶ را بررسی و محاسبه کنیم.

تابع گائوس به هر بردار سرعت v ، بردار واحد و عمود $\frac{\nabla v}{\|\nabla v\|}$ را به آن متناظر می کند. محاسبه مقادیر ویژه مشتق تابع گائوس توصیف دقیقی از میزان خمیدگی بردارهای سرعت نشان می دهند. به عبارتی اگر مقادیر ویژه $J\left(\frac{\nabla v}{\|\nabla v\|}\right)$ را با σ_i ها نشان دهیم و اپراتور هسین^۷ را بروی مقادیر ویژه بدست آمده، بررسی کنیم و مقدار ماکزیمم مقادیر ویژه اپراتورهای $Hessian(\sigma_i)$ را محاسبه کنیم و با σ_i^* ها نشان دهیم، بردارهای ویژه متناظر آنها، مسیر حرکت خون درون بطن چپ را در یک سیکل قلبی نشان می دهد. برای محاسبه میزان داده های فوق در معادله نایر-استوکس و بررسی کرل بردارهای سرعت سیال خون داخل بطن چپ در نواحی مختلف، داده های اکوکاردیوگرافی ۲-بعدی بعنوان ورودی الگوریتم های کد شده ما وارد نرم افزار ریاضی متلب می شوند.^۸

تصاویر و بعدی اکوکاردیوگرافی و نحوه بیان آنها بصورت دستورهای ریاضی

هر تصویر یا فریم از تعداد زیادی پیکسل تشکیل شده است. به هر نقطه اناتومیکی بطن چپ تنها و فقط تنها یک پیکسل در صفحه مختصات دکارتی متناظر می شود. به عبارتی موقعیت نسبی دو سگمان متفاوت قلبی معادل با

³ Carl Gustav Jacobi

⁴ Divergence

⁵ Curl

⁶ Gauss Map

⁷ Hessian

⁸ MathWorks, Natick, MA; R2015a [8.5.0.197613], 64-bit

[win64] February 2015, license No. 161052

¹ Viscous Force

² Transitional Initial Force

کرل در فاز انقباض دهلیزی^۴ ناصفر بودند که این چرخشی بودن سیال خون را در این فاز نشان می‌دهد (شکل‌های 2C و 4C). و در فاز‌های انقباض حجم-پایا^۵ و جهش^۶ مقدار بردارهای کرل ناصفر و نتیجتاً سیال خون در این فازها بطور چرخشی حرکت داشتند اما در خلاف جهت فازهای متقابل با یک قلب نرمال در چرخش بودند (شکل‌های 2D و 4D). تغییرات مشاهده شده برای هر بیمار در مقایسه با قلب نرمال در فازهای متناظر کاملاً متفاوت بودند. برای مثال در فاز شارش آنی همانطور که مشاهده کردیم بردارهای سرعت خون بطور چرخشی در حال حرکت بودند ولی در قلب نرمال در این فاز حرکت خون غیر چرخشی و در راستای مستقیم است. و در فاز شروع قطع شارش خون بردارهای سرعت خون بطور غیر چرخشی در حرکت بودند در حالی در یک قلب نرمال در این فاز خون حالت چرخشی دارد. و در فاز انقباض دهلیزی بردارهای خون بطور چرخشی حرکت می‌کردند ولی در همان فاز در یک قلب نرمال خون غیر چرخشی است. و در فازهای انقباض حجم-پایا و خروجی بردارهای سرعت چرخشی بودند ولی در مقایسه با حالت نرمال جهت‌های چرخش در این فازها متفاوت بودند. این مشاهدات در تمام بیماران مورد مطالعه رویت شدند. و اینکه در تمامی موارد جهت حرکت خون به سمت دیواره آزاد بطن چپ در نواحی میانی و آپیکال (نواحی که لخته‌های خونی مشاهده شده بودند) مشاهده شدند (شکل‌های 2C, 2D و 4C, 4D). ضمناً بعد از ناپدید شدن لخته‌ها با درمان ضد انعقاد^۷ مسیر حرکت جریان خون دقیقاً مانند زمانی بود که لخته داخل بطن چپ مشاهده شده بود با این تفاوت که میزان تاخیر در حرکت بردارهای سرعت خون کاهش یافته بود (شکل ۳). و اینکه در تمامی موارد محاسبات ما نشان دادند که اندازه گردابی بودن جریان خون داخل حفره بطن چپ کاملاً غیرطبیعی بودند.

بحث

ریاضیات می‌تواند برای فهم بهتر مکانیسم حرکت قلب و

پیکسل‌های متناظرشان در صفحه دو بعدی مختصات دکارتی است. بنابراین با حرکت از یک فریم به فریم دیگر حرکت و دیفورماسیون نقاط اناتومیکی قلب بروی صفحه دکارتی بصورت ریاضی مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بنابراین خروجی الگوریتم ما مسیر حرکت قطعه‌ها^۱ اکوکاردیوگرافیک را فریم به فریم در یک سیکل قلبی ردیابی و دنبال می‌کند. در نتیجه با انتخاب نقاط دلخواه داخل حفره بطن چپ با متد بیان شده می‌توان مسیر حرکت جریان خون را بصورت فایل ویدیویی جدید مشاهده کرد. داده‌های اکوکاردیوگرافی دوبعدی بیماران وارد نرم افزار متلب شدند تا با استفاده از الگوریتم کدنویسی شده ما مورد تحلیل و بررسی قرار گیرند. ویدیو ۱ بردارهای جابه‌جایی بروی دیواره میوکارد بطن چپ با رنگ سبز، نرمال بودن حرکت میوکارد را نشان می‌دهد. و بردارهای سرعت انتخاب شده داخل حفره بطن چپ مسیر حرکت جریان خون را نشان می‌دهند و نتایج و تحلیل و بررسی‌ها نشان از تغییر مسیر حرکت جریان خون داخل بطن چپ هستند.

نتایج بدست آمده از تحلیل خروجی‌های الگوریتم طراحی شده بروی تصاویر ۲-بعدی اکوکاردیوگرافی بیماران مبتلا به کووید-۱۹

با توجه به افزایش مقدار ویسکاسیته خون در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ (۷)، بنا بر تعریف ۱-۲ مقدار نیروی اصطکاکی سیال خون افزایش یافته و سرعت حرکت خون کاهش می‌یابد و لذا باعث تاخیری در گردش خون در هر فاز قلبی در مقایسه با فازهای متناظر با قلب نرمال، می‌شود. ثانیاً تغییرات کرل بردارهای سرعت در هر واحد مساحت در زمان در یک سیکل قلبی مشاهده شدند (شکل‌های ۲ و ۴). مشاهدات ما نشان دادند که میزان کرل بردارهای سرعت در فاز شارش آنی^۲ ناصفر بودند که این بدین معنا است که حرکت خون چرخشی است (شکل‌های 2A و 4A). و در فاز شروع قطع شارش خون^۳ ناصفر بودند که این نشان دهنده غیر چرخشی بودن سیال خون در این فاز است (شکل‌های 2B و 4B). و میزان بردارهای

⁴ Atrial Contraction
⁵ Iso-Volumetric Contraction (IVC)
⁶ Ejection
⁷ Anticoagulation Therapy
⁸ Vorticity of Blood Flow

¹ Segments
² Rapid Filling
³ Slow Filling (Diastole)

بردارهای سرعت خون داخل حفره بطن چپ مورد تحلیل و بررسی قرار گیرند. در حالت های نرمال، بطور کلی جهت حرکت جریان خون پس از عبور از دریچه میترال به سمت دیواره آزاد قلب است و در ناحیه آپکس بصورت چرخشی در جهت عقربه های ساعت به سمت دریچه آئورت در حرکت بوده و از بطن چپ خارج می شود (شکل های ۱A-1D) (۱۲-۱۴) و با تحلیل الگوریتم کدنویسی شده در برنامه متلب برای کیس های نرمال بردارهای سرعت سیال خون در ابتدای فاز دیاستول یعنی زمان آرامش حجم-پایه^۵ لت قدامی دریچه میترال در ناحیه مجرای خروجی بطن چپ^۶ در جهت خلاف عقربه های ساعت حرکت می کنند و لت خلفی دریچه میترال در جهت عقربه های سرعت در حرکتند. و در فاز شارش آنی بصورت غیر چرخشی و در راستای مستقیم حرکت می کنند. و همین بردارهای سرعت خون در فاز دیاستاسیس بصورت چرخشی در جهت عقربه های ساعت حرکت دارند و در فاز انقباض دهلیزی دوباره بصورت غیر چرخش و مستقیم به سمت قاعده قلب^۷ در حرکتند و در فاز انقباض حجم-پایا بصورت چرخشی در خلاف عقربه های ساعت حرکت کرده و به سمت خروجی بطن چپ یعنی دریچه آئورت در انتهای فاز سیستول می روند (شکل های ۱A-1D و video 5) (۱۵). براساس مطالعات گذشته مسیر حرکت خون داخل حفره بطن چپ در کیس های نرمال و سالم کاملاً از یک الگو حرکتی پیروی می کنند.

به هر حال در تمامی بیماران این پروژه مشاهده کردیم که وقتی خون وارد حفره بطن چپ می شود اثبات کردیم که بصورت چرخشی در فاز شارش آنی و سپس در مسیر مستقیم و غیر چرخشی در فاز دیاستاسیس حرکت می کنند. این حرکت کاملاً برعکس و متفاوت جریان گردش خون داخل حفره بطن چپ نسبت به موارد نرمال و سالم قلب، و همانطور که مشاهده شد خون بصورت چرخشی در فاز انقباض دهلیزی در جهت خلاف عقربه های ساعت به سمت دیواره آزاد بطن چپ در حال حرکت است و در فاز انقباض حجم-پایا بردارهای سرعت خون بصورت

مسیر حرکت سیال خون داخل بطن چپ به کار گرفته شود (۸-۱۱). در پیرو این بیان براساس داده ها و تصاویر اکوکاردیوگرافی و حرکت و دیفورماسیون نقاط آناتومیکال قلب، نرم افزار ریاضی متلب بسیار کمک کننده برای محاسبات اندیس های قلبی و نشان دادن بردار های سرعت متناظر با سگمان های قلبی می باشد. در این پروژه همانطور که ذکر شد بیماران مبتلا به کووید-۱۹ بدون هیچ عوارض قلبی و عروقی مورد تست اکوکاردیوگرافی ۲- بعدی قرار گرفتند. عفونت کووید-۱۹ باعث تعامل پیچیده ای در عوامل مرتبط با التهاب مانند فاکتور فون ویلبراند و آزادسازی فاکتور انعقادی هشتم، فعال سازی مکمل و افزایش فیبرینوژن و همچنین تغییرات ناگهانی سیتوکین می شود. همراه با کاهش ضد ترومبوژنی اندوتلیال^۱ که به دلیل آسیب عروقی هست. این فاکتور ها باعث کاهش جریان خون در شریان ها، سیاهرگ ها و مویرگ ها می شوند و منجر به ترومبوز می شوند. از سوی دیگر، این واقعیت وجود دارد که شرایطی مانند سندرم هیپر ائوزینوفیلیک (لوفر)^۲ یا کاهش شدید کسر جهشی^۳ یا ناهنجاری در حرکت دیواره قلب که ناشی از انفارکتوس میوکارد یا اختلالات در خون اولیه هستند، ریشه های مختلف در تشکیل لخته در قلب می باشند. که این شرایط را بیماران ما نداشتند. بنابراین ما به بررسی دلایل دیگر این پدیده ایجاد لخته در این پروژه پرداختیم. بدین منظور در این پروژه بیماران مبتلا به کووید-۱۹ ایی را مورد مطالعه قرار دادیم که حرکت میوکارد بطن چپ و شریان های کرونری آنها نرمال بودن ولیکن توده در نواحی مختلف حفره بطن چپ داشتند. برای مثال در نواحی آپکس و ابتدای دیواره بین بطنی^۴. با درمان ضد انعقاد طی چند روز این توده ها ناپدید شدند (براساس مشاهده تست اکوکاردیوگرافی مجدد) ، این حائز این نکته است که توده های مشاهده شده در بیماران ما، لخته های خونی هستند. بدین ترتیب تصاویر و ویدیو های اکوکاردیوگرافی دریافت شده از این بیماران به نرم افزار متلب منتقل شدند تا براساس الگوریتمی که در این پروژه طراحی شده مسیرهای حرکت

¹ Endothelial Antithrombogenic

² Hyper eosinophilic (Löffler)

³ Ejection Fraction

⁴ Basal Septum

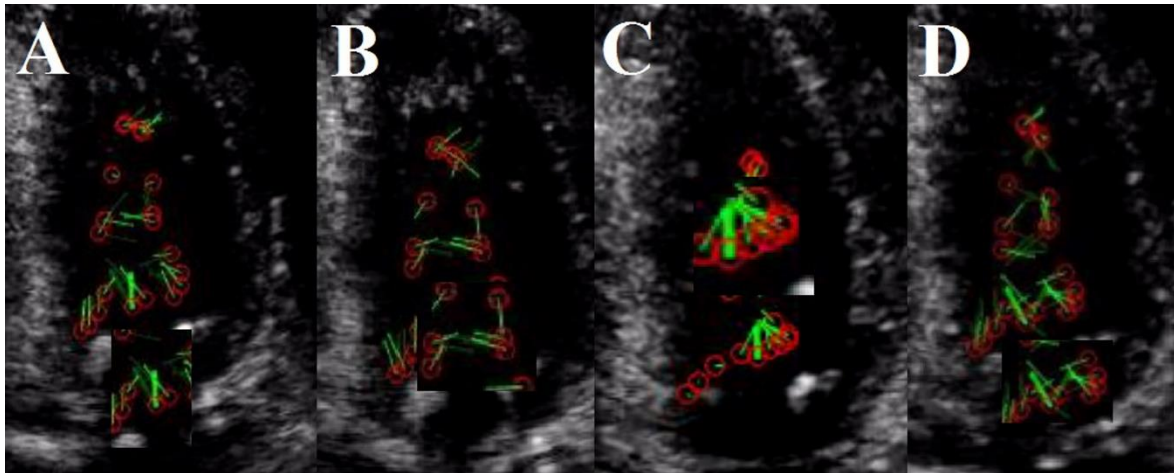
⁵ Iso-Volumetric Relaxation Time (IVRT)

⁶ Left Ventricular Out Flow Track (LVOT)

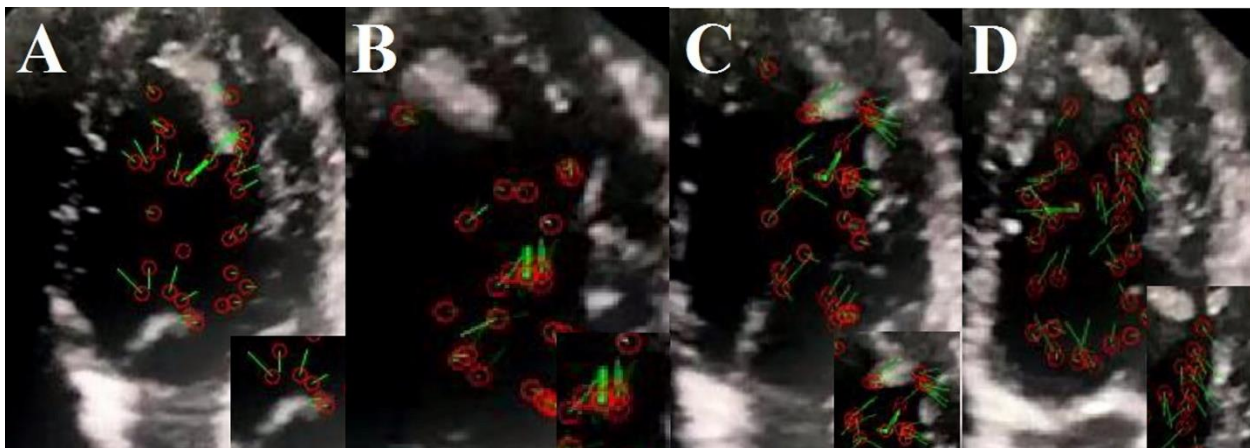
⁷ Apex of the Heart

دیگری بر درستی فرضیه ما در ایجاد لخته خونی در این بیماران باشد. مسیرهای نادرست جریان خون داخل حفره بطن چپ در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ این نکته را بازگو می‌کند که عضله میوکارد قلب به اندازه کافی توانایی ندارد که خون را در مسیرهای نرمال به گردش درآورند.

چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت به سمت دیواره آزاد بطن چپ در حرکتند که در تمام این بیماران خون با تاخیر در مسیرهای ذکر شده در حرکت است به عبارتی دیگر بردارهای سرعت خون با سرعت کمتری نسبت به موارد نرمال و سالم قلب در حرکتند که این خود می‌تواند عامل



شکل ۱- گردش خون داخل حفره بطن چپ در یک قلب نرمال. (A) بردارهای سرعت سبز رنگ متناظر با خون که بصورت غیر چرخشی در فاز شارش آنی حرکت میکنند را نشان می‌دهند. (B) همین بردارها بصورت چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت در فاز دیاستولیس در حرکتند. (C) در فاز انقباض دهلیزی بردارهای سرعت بصورت غیر چرخشی حرکت می‌کنند. (D) این بردارها در فاز انقباض حجم-پایا بصورت چرخشی و در جهت خلاف عقربه‌های ساعت برای خروج به سمت مجرای خروجی بطن چپ در حرکتند و نهایتاً در فاز خروجی بطور مستقیم در راستای دریچه آئورت از بطن چپ خارج می‌شوند.

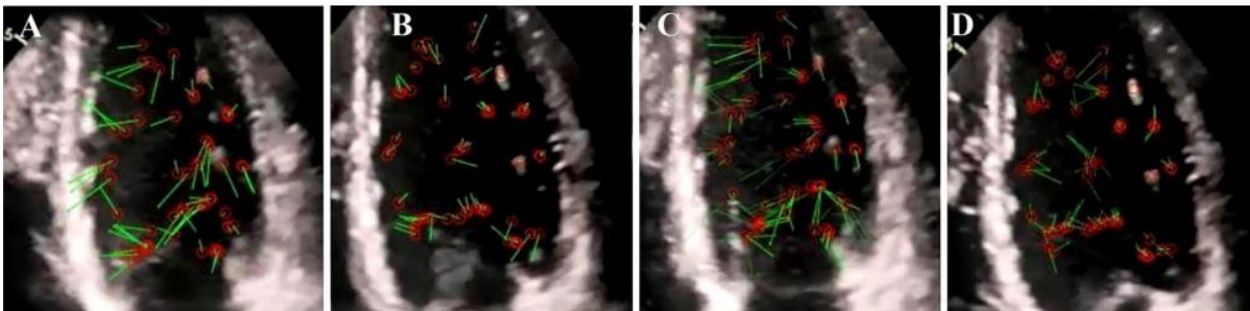


شکل ۲- گردش خون داخل بطن چپ در یکی از بیماران مبتلا به کووید-۱۹ و دارای لخته در ناحیه آپیکال. (A) بردارهای سرعت متناظر با خون را در فاز شارش آنی نشان می‌دهند که بصورت چرخشی در حرکتند. (B) در ادامه همین بردارها در فاز دیاستولیس بصورت غیر چرخشی در راستای مستقیم به حرکت خود ادامه می‌دهند. (C) در فاز انقباض دهلیزی خون بصورت چرخشی به سمت دیواره آزاد بطن چپ حرکت می‌کنند. (D) در فاز انقباض حجم-پایا بردارهای سرعت خون بصورت چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت به سمت دیواره آزاد بطن چپ در حرکتند.

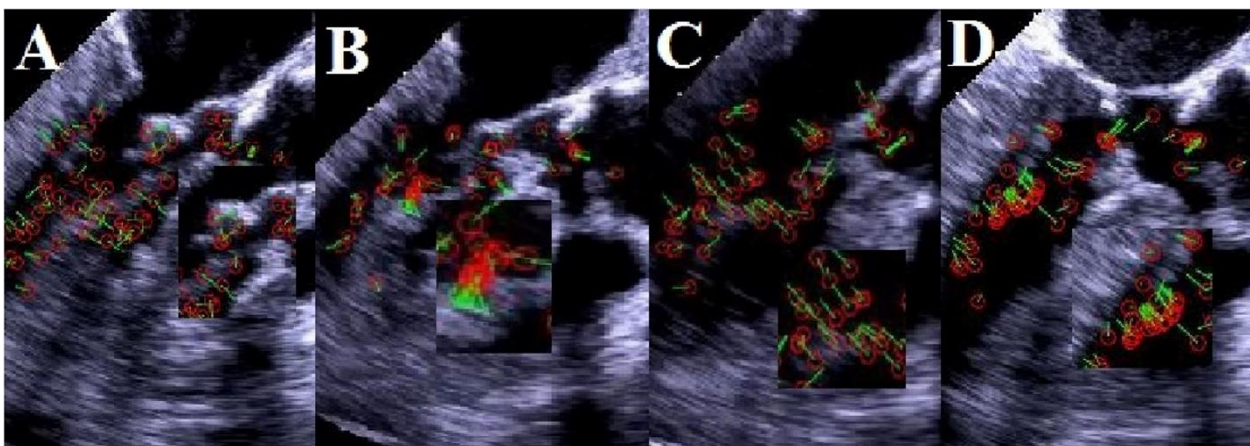
این خود دلیلی بر ایجاد تاخیر در حرکت سیال خون و حرکت در مسیرهای نادرست هست (شکل های 2,3,4 و video 3, vido4) (۱۶-۱۸) تمام این موارد مهر تاییدی بر درستی فرضیه ما بر ایجاد لخته در بیماران مبتلا به کووید-۱۹ با حرکت نرمال میوکارد قلب و نرمان بودن شریان‌های کرونری است.

با گذشت زمان زیاد با توجه به اینکه سیال خون در تقابل مستقیم با عضله میوکارد بطن چپ است طبق قوانین نیوتن و لاگرانژ در مکانیک سیالات، هر گونه تداخلی در حرکت جریان خون باعث ناهنجاری‌هایی در حرکت میوکارد قلب و یا ضخیم شدن آن می‌شود. که این خود موضوع دیگری برای پژوهش است.

کووید-۱۹ یک بیماری عفونی حاد است پروفوسور اسلپ و همکارانش (۷) نشان دادند که هر دو عامل التهاب حاد و مزمن پتانسیل افزایش ویسکاسیته خون را نشان می‌دهند. از آنجایی که ویسکاسیته خون با تغییرمیزان نرخ کنش و واکنش خون تغییر می‌کند رفتار این سیال بیشتر بصورت یک سیال غیر نیوتونی می‌شود. لذا کاهش در مقدار نرخ کنش و واکنش (خون موجب افزایش گرانروی (یا ویسکوسیته) خون می‌شود و سیال خون بصورت یک سیال نیوتونی رفتار می‌کند و به عبارتی دیگر گلبول‌های قرمز خون در هم نفوذ کرده و باعث سنگین شدن آنها در واحد حجم و سطح می‌شوند و نهایتاً باعث کاهش انرژی جنبشی خون و افزایش انرژی پتاسیلی خون می‌شوند. که



شکل ۳- گردش خون در همان بیمار که لخته در ناحیه اپیکال داشت و پس از آنتی‌کوآگولان تراپی ناپدید شد: A-D گردش خون در این مورد مانند همان زمانی است که لخته داخل بطن چپ بود با این تفاوت که تاخیر در روند حرکت بردارهای سرعت کاهش یافت.



شکل ۴- گردش خون داخل حفره بطن چپ بیماری مبتلا به کووید-۱۹ که لخته خونی در ناحیه ابتدای دیواره بین بطنی دارد.

(A) فاز شارش آنی را نشان می‌دهد که خون بصورت چرخشی زیر لته های درپچه میترال در حرکتند. (B) دسته ای از بردارهای سبز رنگ سرعت خون را در فاز دیاستاسیس نشان می‌دهد که بصورت غیر چرخشی در حرکتند. (C) بیانگر ادامه حرکت همان بردارها در فاز انقباض دهلیزی بصورت چرخشی و به سمت دیواره آزاد بطن چپ هست. (D) و در فاز انقباض حجم-پایا بردارهای سبز رنگ سرعت خون بصورت چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت در راستای دیواره آزاد بطن چپ در حرکتند.

نتیجه‌گیری و گفتگوی پایانی

بطن چپ در نواحی مختلف هستند. که علت اصلی بوجود آمدن تاخیر در حرکت خون و تغییر در مسیرهای حرکت خون داخل بطن چپ افزایش میزان ویسکوزیته خون است. که این افزایش ویسکوزیته خون است که تعادل و تقابل طبیعی بین میوکارد بطن چپ و حرکت سیال خون داخل آن را به هم می‌زند و باعث ایجاد لخته خون داخل بطن چپ می‌شود. این لخته‌های خونی می‌توانند منجر به آمبولی‌های قلبی و یا صدمات مغزی و عروقی شوند. از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان نداشتن لابراتوری پیشرفته برای محاسبه ویسکاسیته خون دانست.

در این مطالعه داده‌های ۲-بعدی اکوکاردیوگرافی بیماران مبتلا به کووید-۱۹ با حرکت نرمال میوکارد و شریان کرونری نرمال که دارای لخته خونی در نواحی مختلف بطن چپ هستند دریافت می‌شوند و پس از انتقال به نرم افزار متلب، الگوریتم‌های کدنویسی شده ما به بررسی تغییرات حرکت خون داخل بطن چپ می‌پردازند. که در تمامی موارد با وجود نرمال بودن قلب تاخیر در حرکت جریان خون و تغییر در مسیرهای حرکتی خون مشاهده می‌شوند. که این دو عامل دللی بر ایجاد لخته خونی داخل

منابع

- [1] Wenzhong L, Hualan L. COVID-19: attacks the 1-beta chain of hemoglobin and captures the porphyrin to inhibit human heme metabolism. ChemRxiv. 2020.
- [2] Yue H, Bai X, Wang J, Yu Q, Liu W, Pu J, et al. Gansu Provincial Medical Treatment Expert Group of COVID-19. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in Gansu province, China. *Ann Palliat Med.* 2020;9(4):1404–12.
- [3] Zhou F, Yu T, Du R, Fan G, Liu Y, Liu Z, et al. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID19 in Wuhan, China: a retrospective cohort study. *Lancet.* 2020;395(10229):1054–62.
- [4] Giustino G, Croft LB, Stefanini GG, Bragato R, Silbiger JJ, Vicenzi M, et al. Characterization of Myocardial Injury in Patients with COVID-19. *J Am Coll Cardiol.* 2020;76(18):2043–55.
- [5] Bavishi C, Bonow RO, Trivedi V, Abbott JD, Messerli FH, Bhatt DL. Special article—acute myocardial injury in patients hospitalized with COVID-19 infection: a review. *Prog Cardiovasc Dis.* 2020;63(5):682–9.
- [6] Stefanini GG, Montorfano M, Trabattoni D, Andreini D, Ferrante G, Ancona M, et al. ST-elevation myocardial infarction in patients with COVID-19: clinical and angiographic outcomes. *Circulation.* 2020;141(25):2113–6.
- [7] Sloop GD, De Mast Q, Pop G, et al. The role of blood viscosity in infectious diseases. *Cureus.* 2020;12(2):e7090.
- [8] Arnol'd VI. *Mathematical methods of classical mechanics.* New York: Springer; 2019.
- [9] Truesdell CA. A critical summary of developments in nonlinear elasticity. *J Ration Mech.* 1952;1:125–300.
- [10] Ranjbar S, Karvandi M, Hassantash SA, Foroughi M. How to construct a 3D mathematical/computer model of the left ventricle? *Arch Cardiovasc Imaging.* 2014;2: e20628.
- [11] Ranjbar S, Karvandi M, Ajzachi M. System and method modeling left ventricle of heart. US Patent 2013; published online April 9; patent number US 8,414,490 B2.
- [12] Ranjbar S, Karvandi M, Ajzachi M. Solution Navier-stocks equations of the blood as a non-Newtonian fluid in the left ventricle. US Patent 2014; published online Aug 12; patent number US 8,805,663 B2.
- [13] Hendabadi S, Bermejo J, Benito Y, Yotti R, Fernández-Avilés F, del Álamo JC, et al. Topology of blood transport in the human left ventricle by novel processing of Doppler echocardiography. *Ann Biomed Eng.* 2013;41(12):2603–16.
- [14] Ranjbar S, Karvandi M, Hassantash SA. Dynamic features creating (which cause) the blood direction inside the left ventricle. *IJMI.* 2012;2:14–8
- [15] Hong GR, Pedrizzetti G, Tonti G, Li P, Wei Z, Kim JK, et al. Characterization and quantification of vortex flow in the human left ventricle by contrast echocardiography using vector particle image velocimetry. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2008;1(6):705–17.
- [16] Ranjbar S, Sardari Nia P, Karvandi M, Maessen J. Computational fluid dynamics in aortic arch pathophysiology. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2017;51(2):398.
- [17] Belohlavek M. Vortex formation time: an emerging echocardiographic index of left ventricular filling efficiency? *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2012;13(5):367–9.
- [18] Faludi R, Szulik M, D'hooge J, Herijgers P, Rademakers F, Pedrizzetti G, et al. Left ventricular flow patterns in healthy subjects and patients with prosthetic mitral valves: an in vivo study using echocardiographic particle image velocimetry. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2010;139(6):1501–10.