

ივ.ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერება ფაკულტეტის ფიზიკის
მიმართულების ბიოფიზიკის ქვემიმართულება

ვახტანგ აბულძე

სისხლძარღვებში სისხლის მოძრაობის ფიზიკა

საბაკალავრო ნაშრომი შესრულებულია ზუსტ და
საბუნებისმეტყველო მეცნიერება ფაკულტეტის
ბაკალავრის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

ხელმძღვანელები: თამაზ მძინარაშვილი
ფიზ.მათ.დოქტორი, სრული პროფესორი
ნინო შენგელია, ბიოლ.აკად.დოქტორი

თბილისი 2016

ანოტაცია

სისხლძარღვებში სისხლის მოძრაობის ფიზიკა

ვახტანგ აბულაძე

თანამედროვე მედიცინის ერთ-ერთ ძირითად მაკონტროლირებელ პარამეტრს წარმოადგენს ორგანიზმის შინაგანი გარემო, რომელშიც ლიმფასა და ქსოვილურ სითხეს გარდა სისხლი არსულებს მნიშვნელოვან როლს. ამდენად სისხლის, როგორც სითხის მოძრაობის თავისებურების შესწავლა ფასეულ ინფორმაციას იძლევა ცოცხალი სისტემის საერთო მდგომარეობის შესახებ. რეალურ სითხეში ხახუნის ძალების მოქმედება არსებითად ცვლის დინების ხასიათს. ჩვენ განვიხილავთ სითხის თვისებების მახასიათებელ ძირითადი ფიზიკური სიდიდეებს და ჰიდროდინამიკაში დადგენილი ზოგიერთ კანონზომიერებას.

Blood vessels in the Physics

Vakhtang Abuladze

Modern medicine is a key parameter for controlling the internal environment in which liquid other than blood and tissue limpasa execute an important role. Thus the blood, as a valuable information for the study of fluid flow characteristics of the living conditions of the common system. The real fluid flow substantially change the nature of the action of the friction forces. We ganvikhilat fluid properties characteristic of the natural values of the hydrodynamics and established some regularity.

სარჩევი

შესავალი	4 გვ
1. ჰიდროდონამიკა	5 გვ
2. სითხის სიბლანტე	6 გვ
3. პუაზელის ფორმულა. სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება.	9 გვ
4. რეინოლდსის რიცხვი	12 გვ
5. სტოქსის კანონი	13 გვ
6. სისხლისა და სისხლძარღვთა კედლის მექანიკური თვისებები	13 გვ
7. ერითროციტების გავლენა სითხის დინების ხასიათზე	14 გვ
8. სისხლის ფიზიოლოგიური ფუნქციები	15 გვ
9. ვისკოზიმეტრი	16 გვ
დასკვნა	18 გვ
ციტირებული ლიტერატურა	19 გვ

შესავალი

სიცოცხლის ფუნდამენტალური კვლევა სადღეისოდაც აქტუალურია, რადგანაც კვლევის თანამედროვე მეთოდების გამოყენება სულ უფრო მეტ ახალ ინფორმაციას გვაწვდის ამ ურთულესი სისტემის ფუნქციონირების შესახებ. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ ამ რთული ამოცანის ამოხსნაში მეცნიერების სხვადასხვა დარგები არიან ჩართულნი, რომლებიც საკუთარი მეთოდოლოგიებით ახალ სიღმეებს წვდებიან და შესაბამისად, სიცოცხლის ფუნქციონირების სრულყოფილი მექანიზმების ცოდნას უახლოვდებიან.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება არაინვაზიური ტექნოლოგიების დანერგვას. მათ რიცხვს მიეკუთვნება დოპლეროგრაფიული გამოკვლევები, რომლის საშუალებითაც სისხლის მიმოქცევის სისტემის კონტროლის საფუძველზე კონტროლდება ტვინის ფუნქციონირება, უჯრედული სისტემების ჟანგბადით და საკვები ნივთიერებებით მომარაგება და სხვა.

ზოგადად თანამედროვე მედიცინის ერთ-ერთ ძირითად მაკონტროლირებელ პარამეტრს წარმოადგენს ორგანიზმის შინაგანი გარემო, რომელშიც ლიმფასა და ქსოვილურ სითხეს გარდა სისხლი არსულებს მნიშვნელოვან როლს. ამდენად სისხლის, როგორც სითხის მოძრაობის თავისებურების შესწავლა ფასეულ ინფორმაციას იძლევა ცოცხალი სისტემის საერთო მდგომარეობის შესახებ. რეალურ სითხეში ხახუნის ძალების მოქმედება არსებითად ცვლის დინების ხასიათს. ჩვენ განვიხილავთ სითხის თვისებების მახასიათებელ ძირითადი ფიზიკური სიდიდეებს და ჰიდროდინამიკაში დადგენილი ზოგიერთ კანონზომიერებს.

1. ჰიდროდინამიკა

სითხეებს თავისი აგებულებით შუალედური ადგილი უკავიათ აირებსა და მყარ სხეულებს შორის. სითხე უკუმშვადია თუ მისი სიმკვრივე ყველგან ერთნაირია და დროის მიხედვით არ იცვლება. უკუმშვად სითხეს რომელშიც ხახუნის ძალები არ მოქმედებს იდეალური ეწოდება. რეალურ სითხეში ხახუნის ძალების მოქმედება არსებითად ცვლის დინების ხასიათს. განვიხილოთ სითხის თვისებების მახასიათებელი ძირითადი ფიზიკური სიდიდეები და ჰიდროდინამიკაში დადგენლი ზოგიერთი კანონზომიერება.

უძრავი სითხის შიგნით მოქმედებს წნევის ძალა რომელიც მისი წონით არის გამოწვეული. h სიმაღლის სითხის სვეტი ჭურჭლის ფსკერზე მოქმედებს წნევით რომელიც ტოლია $P = \rho gh$.

ჩვეულებრივ პირობებში სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფერული წნევა რომელიც ზღვის დონეზე 760 მმ ვ.წყ.ს წნევას უდრის. ამ შემთხვევაში სითხის წნევა

$P = P_0 + \rho gh$ სადაც P_0 ატმოსფერული წნევაა.

სითხეების ზედაპირი თითქოს თხელი აპსკით არის დაფარული. აფსკის წარმოშობა სითხის მოლეკულების ურთიერთმიზიდვით აიხსნება. ყველა მათგანი ცდილობს სითხის შიგნით „შემრომას“, ამ აფსკმ რომ შევალწიოთ საჭიროა შევასრულოთ გარკვეული მუშაობა

$$A = \sigma \cdot S$$

საიდანაც $\sigma = \frac{A}{S}$. σ -ს ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტს უწოდებენ, იგი შეიძლება განისაზღვროს შემდეგნაირადაც $\sigma = \frac{F}{l}$, სადაც F ზედაპირული დაჭიმულობის ძალაა, l აფსკის სიგრძე. ზედაპირული დაჭიმულობა განაპირობებს კაპილარობის მოვლენას, რაც ნიშნავს იმას რომ, სითხიან ჭურჭელში ჩაშვებულ წვრილ მილში სითხის დონე მაღლა იწევს ჭურჭელში სითხის დონესთან შედარებით, სითხე დამასველებელია, არა დამასველებელის შემთხვევაში სითხის დონე დაბლაა.

წირს რომლის ყოველ წერტილში სითხის სიჩქარის ვექტორს, მხების მიმართულება აქვს, დენის წირი ეწოდება.

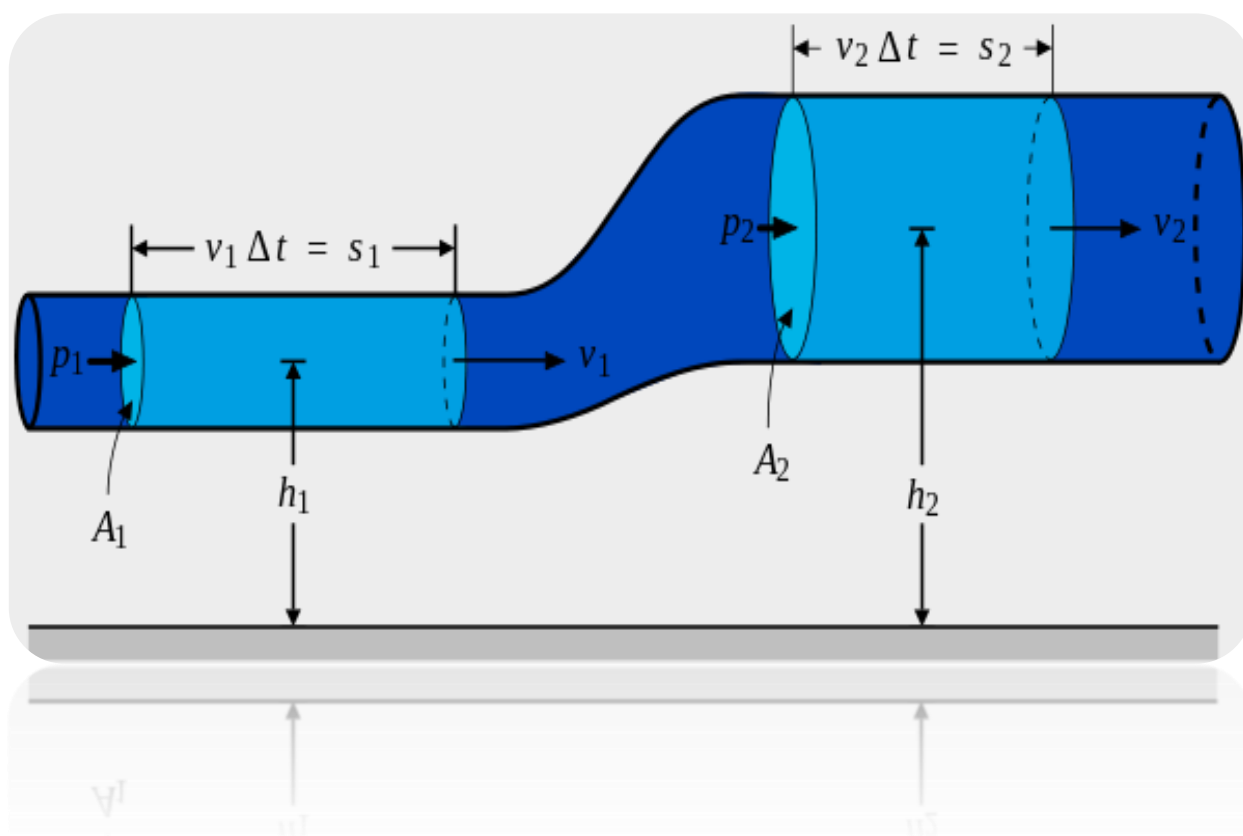
ცვლადი განიკვეთის მილში სითხის დინებისას, განიკვეთის ფართობი გამრავლებული მასში გასულ სითხის მოცულობაზე მუდმივია, ამ პირობას სითხის უწყვეტობის პირობა ეწოდება

სითხის დინებას ეწოდება სტაციონალური, როცა სიჩქარის სიდიდე და მიმართულება სითხის ნებისმიერ წერტილში დროის მიხედვით არ იცვლება.

იდეალური სითხის თვისებები შესწავლილი იყო ბერნულის მიერ, ამ კანონის თანახმად წნევის განაწილება ცვლადი განიკვეთის მილში შემდეგი განტოლებით გამოისახება:

$$\frac{\rho V^2}{2} + \rho gh + P = \text{const} ,$$

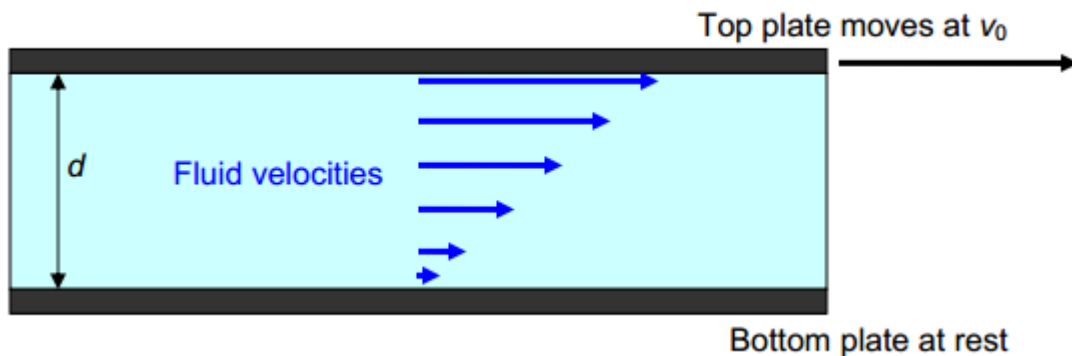
სადაც ρ სითხის სიმკვრივეა, V -მისი სიჩქარე, g -სიმძიმის ძალის აჩქარება, h -მილის სიმაღლე ნულოვანი დონიდან(დედამიწის ზედაპირი), P -წნევა. პირველ წევრს დინამიკური წნევა ეწოდება, მეორეს ჰიდროსტატიკური, ხოლო მესამეს სტატიკური. ბერნულის კანონის მიხედვით, სტაციონალური დინებისას სამივე წნევის ჯამი მილის ნებისმიერ განიკვეთში მუდმივია.



2. სითხის სიბლანტე

რეალური სითხის მოლეკული გარკვეული ძალებით ურთიერთქმედებენ. ეს ურთიერთქმედება განსაკუთრებით კარგად ვლინდება რეალური სითხის დინების დროს. სითხის ცალკეული ფენები ერთმანეთზე მოქმედებს, მათი ზედაპირისადმი გავლელული მხების გასწვრივ მიმართული ძალებით მათ შნაგანი ხახუნის ძალებს უწოდებენ, მოვლენას შინაგან ხახუნს.

განვიხილოთ სითხის მოძრაობა ორ ფირფიტას შორის, ქვედა ფირფიტა უძრავია ხოლო ზედა მოძრაობს V სიჩქარით



სითხე დამასველებელია. წარმოვიდგინოთ სითხე ცალკეული ფენების ერთობლიობად. ქვედა ფირფიტას მიკრული ფენა უძრავია. მისი მეზობელი ფენა მოძრაობს რაღაც V_1 სიჩქარით, მისი მეზობელი - V_1 და ასე შემდეგ; ამასთან $V_1 < V_2 < V_3 \dots$

მაქსიმალური სიჩქარე ექნება ფენას რომელიც ზედა ფირფიტას არის მიკრული. ეს ფენა ცდილობს ააჩქაროს მისი ქვედა ფენა და ასე შემდეგ. ის ფაქტი რომ ფენების სიჩქარე უძრავი ფირფიტისკენ მცირდება, შინაგანი ხახუნით არის გამოწვეული. ეს ძალა მით უფრო დიდია რაც მეტია შემხები ფენების ზედაპირის ფართობი. რაც უფრო დიდია სიჩქარის გრადიენტი მით მეტი იქნება ხახუნის ძალაც. შინაგანი ხახუნის ძალის დამოკიდებულება ფართობზე და სიჩქარის გრადიენტზე შემდეგი ფორმულით გამოისახება.

$F = \eta \frac{dV}{dx} S$ ფორმულაში $\frac{dV}{dx}$ სიჩქარის გრადიენტი, η შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტი, იგივე დინამიკური სიბლანტეა. სიბლანტის ერთეულია 1 პასკალი გამრავლებული 1 წამზე. ფორმულას ნიუტონის ფორმულას უწოდებენ.

უმეტესი სითხის სიბლანტე არ არის დამოკიდებული სიჩქარის გრადიენტზე.

ასეთი სითხეებისათვის $F = \eta \frac{dV}{dx} S$ განტოლება მართებული და მათ ნიუტონის სითხეებს უწოდებენ. ზოგიერთი სითხეებისათვის რომელიც შედგება დიდი მოლეკულებისაგან, მაგალითად სისხლი ეს განტოლება არაა მართებული.

არანიუტონისებური სითხის სიბლანტე ჩვეულებრივთან შედარებით დიდია, ეს იმით არის გამოწვეული, რომ სითხის დინების დროს გარეშე ძალის მუშაობა იხარჯება მაკრომოლეკულათა სივრცული სტრუქტურის შეცვლაზე, მაშნ ნიუტონის ფორმულა ასეთი სახით გადიწერება $\frac{F}{S} = \eta \frac{dV}{dx}$. ფარდობას $\frac{F}{S}$ ძვრის ძაბვას უწოდებენ.

სისხლის სიბლანტე 37°C ზე არის $3-4 \cdot 10^{-3}$ პა.წ (პასკალი · წამი) SI სისტემაში, ანუ 3-4 სანტიპუაზი(სპ). CGS სისტემაში სიბლანტის ერთეულია პუაზი. შედარებისათვის წყლის

სიბლანტეა 0,894 სპ, თაფლის - 2000-10000 სპ, ვერცხლისწყლის 1,52 სპ და ა.შ. სისხლის სიბლანტეზე გავლენა აქვს სისხლში ცილებისა და სისხლის წითელი უჯრედების - ერითროციტების რაოდენობას. სიბლანტის დონის ზრდა მიუთითებს სხვადასვა დაავადების არსებობაზე, როგორებიცაა მაღალი არტერიული წნევა (140/90 მმ.ვწყ ზე მეტი) შაქრიანი დიაბეტი, დეჰიდრატაცია (წყლის დაკარგვა ორგანიზმიდან, რაც რეალურად მეხანძრეების პროფესიული დაავადებაა უხშირესად), თირკმელების ქრონიკული დაავადებები, ქოლესტერინის მაღალი დონე, გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები და სხვ.

არტერიული წნევა შემდეგნაირადაა დაკავშირებული სისხლის სიბლანტესთან: მოცემულ მუდმივ სისტოლური სისხლის წნევის შემთხვევაში თუ გაიზარდა სისხლის სიბლანტე, იზრდება მთლიანი პერიფერიული წინაღობა, რის გამოც მცირდება სისხლის დინება და პირიქით, თუ სიბლანტე შემცირდა, სისხლის დინება გაიზრდება. ვინაიდან სისხლის წნევა დამოკიდებულია გულის მიერ პარკუჭში ერთ წუთში გადასროლილ სისხლის მოცულობასა და წინაღობაზე, ამიტომ სისხლის სიბლანტის გაზრდა და წინაღობის გაზრდა გამოიწვევს წნევის მომატებას რათა შენარჩუნდეს გულის მიერ გადასროლილი სისხლის მოცულობის მუდმივი დონე. ამრიგად სისხლის გაზრდილი სიბლანტე მოითხოვს მაღალ წნევას, რათა იმავე რაოდენობის სისხლის ცირკულირება მოხდეს, როგორც იყო სიბლანტის გაზრდამდე. კვლევებმა აჩვენა, რომ ჰიპერტენზიით (მაღალი არტერიული წნევა) დაავადებულ ადამიანებს საშუალოდ 8-10% ით მეტი აქვთ სისტოლური სისხლის სიბლანტე და 16-25% ით მეტი დიასტოლური სისხლის სიბლანტე ვიდრე ჯანმრთელ ხალხს. აღსანიშნავია რომ წნევა სითხის მოძაობის ერთერთი ზოგადი პარამეტრია, მაშინ როცა სიბლანტე არის სპეციფიკური პარამეტრი იმ სითხისა, რომელიც მოძრაობს ამ სისტემაში.

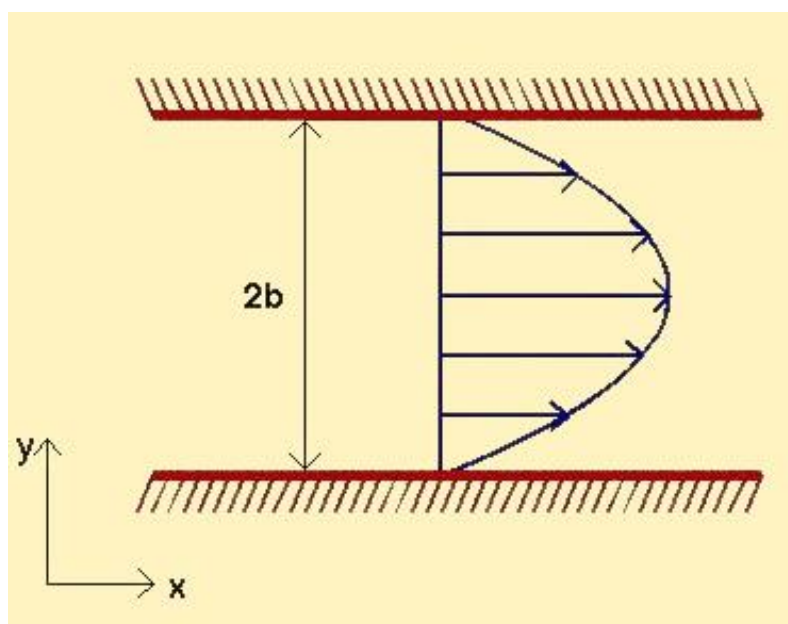
ჰემატოკრიტი (ერითროციტების მოცულობის შეფარდება მთლიანი სისხლის მოცულობასთან) არის ერთერთი განმსაზღვრელი ფაქტორი სისხლის სიბლანტისა. სისხლის წითელი უჯრედების მაღალი პროცენტული რაოდენობა ზრდის სიბლანტეს. სისხლის პლაზმის სიბლანტეს აგრეთვე აქვს პირდაპირი ზეგავლენა სისხლის სიბლანტეზე. პლაზმის სიბლანტე კი დიდადაა დამოკიდებული მასში წყლის არსებობასა და მაღალმოლეკულური ცილების შემცველობაზე როგორებიცაა იმუნოგლობულინები და ფიბრინოგენი.

დეჰიდრატაცია, რომელიც პრაქტიკულად პროფესიული დაავადებაა მეხანძრეებისათვის აგრეთვე ზრდის სისხლის სიბლანტეს. სხვადასხვა კვლევებით დადგინდა, რომ დეჰიდრატაციას შეუძლია გაზარდოს სისტოლური სისხლის სიბლანტე 9% და დიასტოლურის 12% ით.

3.პუაზელის ფორმულა. სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება.

განვიხილოთ ბლანტი სითხის დინების მარტივი შემთხვევა. დავუშვათ სითხე მიედინება ჰორიზონტალურ მილში, რომლის განიკვეთის ფართობის მთელ სიგრძეზე ერთი და იგივეა.

სიმეტრიულობის გამო, მილის ცენტრალური ღერძის გასწვრივ დინების სიჩქარე უდიდესია, ხოლო მილის ზედაპირს მიკრული ფენა უძრავია. მილში სითხის ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარის განაწილება ასეთა



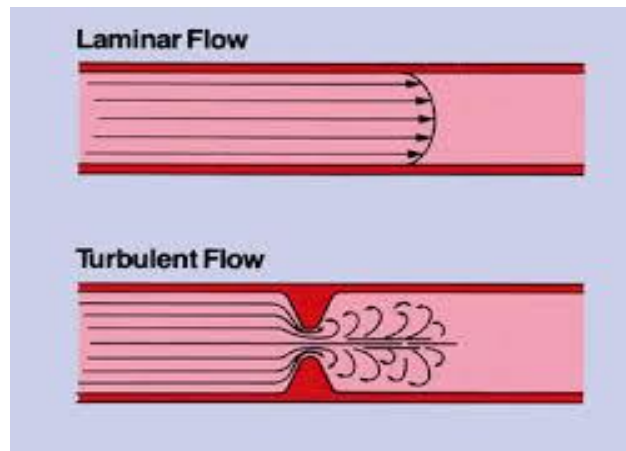
მილის სიგრძე ავლნიშნოტ L -ით, რადიუსი- R ით, სითხის სიბლანტე η , ხოლო წნევა მილის თავსა და ბოლოში, შესაამისად P_1 და P_2 ით. საინტერესოა ვიცოდეთ დროის ერთეულში მილიდან გასული სითხის V მოცულობა როგორ არის დამოკიდებული მილისა და ბლანტი სითხის მახასიათებლებზე.

ფრანგმა ექიმმა და ფიზიკოსმა პუაზელმა დაადგინა რომ, ეს დამოკიდებულება შეიძლება ასე გამოისახოს:

$$V = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta l}$$

თუ მილის სიგრძე, რადიუსი და წნევათა სხვაობა არ იცვლება მაშინ, რაც უფრო ნაკლები იქნება სითხის სიბლანტე, მეტი იქნება დროის ერთეულში მილიდან გასული სითხის მოცულობა.

ნიტონის განტოლება და პუაზელის კანონის გამომსახველი ფორმულა მართებულია, ბლანტი სითხის ლამინარული დინებისათვის. ლამინარული ეწოდება ისეთ დინებას, როდესაც სითხის ფენების ერთმანეთში არევა არ ხდება. ამ შემთხვევაში შნაგანი ხახუნის ძალა დინების სიჩქარის პროპორციულია.



მრგვალ მილში სითხის მოძრაობისას, სითხის სიჩქარე ნულია მილის კედლებთან და მაქსიმალურია მილის ღერძის გასწვრივ. გამოვითვალოთ ამ სიჩქარის ცვლილება ღერძიდან r მანძილით დაშორების შემთხვევაში. მილიდან, რომლის რადიუსია R , ავიღოთ ცილინდრი, რომლის რადიუსი იქნება r და სიგრძე L . ცილინდრის ფუძეებზე გვაქვს წნევათა შორის სხვაობა $P_1 - P_2$. შესაბამისად, სითხის მოძრაობის მიმართულებით მოქმედებს ძალა

$$F = (P_1 - P_2) \pi r^2.$$

გარდა ამისა, ცილინდრის გვერდით ზედაპირზე იმოქმედებს ხახუნის ძალა

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| 2\pi r L$$

$2\pi r L$ არის ცილინდრის გვერდითი ზედაპირის ფართობი. ვინაიდან ეს ფორმულა გამოგვყავს სტაციონარული დინებისათვის, მაშინ ეს ორი ძალა ერთმანეთის ტოლი უნდა იყოს და გვექნება, რომ:

$$(P_1 - P_2) \pi r^2 = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| 2\pi r L$$

სითხის სიჩქარე მცირდება ღერძთან დაშორებისას, ამიტომ სიდიდე $\left| \frac{dv}{dr} \right| = -\frac{dv}{dr}$ ანუ უარყოფითია. შესაბამისად, ამისგათვალისწინებით მივიღებთ, რომ:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{(P_1 - P_2)r}{2\eta L}$$

სადაც, ცვლადთა განცალგების შედეგად მივიღებთ:

$$dv = \frac{(P_1 - P_2)r}{2\eta L} dr$$

გაინტეგრებისას ვიღებთ :

$$v = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta l} r^2 + C$$

მუდმივა C ისე უნდა შევარჩიოთ, რომ სითხის სიჩქარე გახდეს 0 როდესაც $r=R$, სადაც R მილის რადიუსია. აქედან კი გამომდინარეობს, რომ

$$C = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta l} R^2$$

შესაბამისად, თუ ჩავსვავთ მივიღებთ:

$$v(r) = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta l} (R^2 - r^2)$$

სითხის სიჩქარე მილის ღერძზე, როდესაც $r=0$, იქნება

$$v_0 = v(0) = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta l} R^2$$

შესაბამისად

$$v(r) = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

ამრიგად, ლამინარული დინების დროს შეგვიძლია გამოვთვალოთ სითხის ნაკადი Q, ანუ სითხის ის მოცულობა, რომელიც მიედინება მილის კვეთაში დროის ერთეულში. სითხის მასა, რომელიც ყოველ წამში მიედინება მილის კვეთაში, რომლის შიდა რადიუსია r, ხოლო გარეა $r+dr$, არის

$$dQ = 2\pi r dr \cdot \rho v$$

სადაც ρ სითხის სიმკვრივეა. თუ v -ს მნიშვნელობას ჩავსვავთ, მივიღებთ:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{4\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$

ვაინტეგრებთ $r=0$ დან R მდე. საბოლოო ჯამში კი გვექნება, რომ

$$Q = \pi \rho \frac{(P_1 - P_2) R^4}{8\eta l}$$

ამრიგად, სითხის ხარჯი პირდაპირპროპორციულია წნევათა შორის სხვაობისა და რადიუსის მეოთხე ხარისხისა და უკუპროპორციულია სიბლანტისა და მილის სიგრძისა. ფორმულა შეგვიძლია წარმოვადგინოთ, როგორც

$$Q = \pi R^2 \cdot v/2$$

ხოლო $\pi R^2 = S$ მილის განივკვეთის ფართობია. შეგვიძლია შემოვიღოთ ე.წ საშუალო სიჩქარე $\bar{v} = v/2$ ეს კანონზომიერება დაადგინა ჰაგენმა 1839 წელს და პუაზეილმა 1840 წელს. პუაზეილის

ფორმულა სამართლიანია მხოლოდ ლამინარული დინებისათვის და არ გამოდგება ტურბულენტურისათვის.

4. რეინოლდსის რიცხვი

რეინოლდსმა ცდებით დაადგინა რომ სითხის დინების ხასიათი დამოკიდებულია: მის სიმკვრივეზე, სიბლანტეზე, სიჩქარეზე და მილის რადიუსზე. ამ დამოკიდებულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$Re = \frac{\rho v r}{\eta}$$

კინეტიკური ენერგია, რომელიც გააჩნია სითხის ნაკადს მილში, გამოითვლება ფორმულით:

$$K = \int_0^R \frac{\rho v^2}{2} \cdot 2\pi r v dr.$$

თუ აქ ჩავსვამთ v სმნიშვნელობას, მივიღებთ რომ:

$$K = \frac{1}{4} Q v^2$$

ამ სიდიდის ტოლი, თუმცა საპირისპირო ნიშნის მუშაობას ასრულებენ ხახუნის ძალები:

$$A = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \cdot Q$$

ფორმულიდან გამოვითვლით $P_1 - P_2$ ის მნიშვნელობას და ჩავსვამთ, მივიღებთ, რომ

$$A_1 = - \frac{4\eta v l}{\rho R^2} \cdot Q$$

ეს ფორმულები საშუალებას გვაძლევს გავცეთ პასუხი კითხვას თუ როდის შეიძლება უგულებელვყოთ სითხის სიბლანტე ანუ ხახუნის ძალები და გამოვიყენოთ ბერნულის განტოლება. ამისათვის აუცილებელია, რომ სითხის კინეტიკური ენერგიის დანაკარგი ხახუნის ძალების შედეგად, იყოს გაცილებით ნაკლები საკუთრივ სითხის კინეტიკურ ენერგიაზე, ანუ: $|A_1| \ll K$. ეს კი გვაძლევს უტოლობას:

$$\frac{v \rho R^2}{16 \eta l} > 1$$

ხოლო თუ შევარდება

$$\frac{\eta}{\rho} = \nu$$

სადაც ν -ს კინემატიკურ სიბლანტეს უწოდებენ. η სგან განსხვავებით რომელსაც დინამიურ სიბლანტეს უწოდებენ როგორც ვნახეთ,

$$\frac{K}{A} \sim \frac{\rho v}{\eta}$$

ამას რეინოლდსის რიცხვი ეწოდება.

$$Re = \frac{\rho v}{\eta}$$

მამასადამე ეს რიცხვი გვიჩვენებს ინერციისა და სიბლანტის როლს სითხის დინებაში. რეინოლდსის მაღალი რიცხვების შემთხვევაში ძირითად როლს თამაშობს ინერცია, დაბალი რიცხვების შემთხვევაში - სიბლანტე. შესაბამისად, რეინოლდსის დაბალი რიცხვების შემთხვევაში გვაქვს მცირე სიჩქარე და ლამინარული დინება. დაწყებული რაიმე კონკრეტული Re დან, რომელსაც კრიტიკულს უწოდებენ დინება ხდება ტურბულენტური. თუ ავიღებთ სითხის მოძრაობას მილში, მაშინ $l = r$. სადაც r მილის რადიუსია. კრიტიკული Re მისთვის იქნება 1000.

5. სტოქსის კანონი

სხეულის მოძრაობისას ბლანტ სითხესა თუ აირში, მასზე მოქმედებს წინაღობის ანუ ხახუნის ძალა, რომელიც ეწინააღმდეგება სხეულის მოძრაობას. რეინოლდსის მცირე რიცხვებისათვის, ანუ მოძრაობის მცირე სიჩქარეებისათვის, გარემოს წინააღმდეგობა პრაქტიკულად გამოწვეულია მხოლოდ ხახუნის ძალებით. სტოქსმა დაადგინა, რომ წინააღმდეგობა ასეთ შემთხვევაში პირდაპირპროპორციულია დინამიკური სიბლანტისა η , სხეულის სიჩქარისა v სი და სხეულის მახასიათებელი ზომისა L ის: $F \sim \eta L v$. პროპორციულობის კოეფიციენტი სხეულის ფორმაზეა დამოკიდებული. მაგალითად სფეროსათვის, თუ L ის მაგვირად ავიღებთ მის რადიუსს r ს, მაშინ პროპორციულობის კოეფიციენტი იქნება 6π . შესაბამისად, წინააღმდეგობის ძალა ბურთისათვის, რომელიც მცირე სიჩქარით მოძრაობს ბლანტ სითხესა თუ აირში იქნება

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

როდესაც სფეროსებრი სხეული თავისი სიმძიმის ძალის მეშვეობით ვერტიკალურად ქვემოთ მოძრაობს ბლანტ სითხეში მუდმივი სიციქარით, მაშინ, მის ვერტიკალურად ქვემოთ მიმართულ სიმძიმის ძალას აწონასწორებს ვერტიკალურად ზემოთ მიმართული არქიმედესა და სითხის სიბლანტის გამო გამოწვეული ხახუნის (წინააღმდეგობის ძალები). ასეთ შემთხვევაში გვექნება რომ სიჩქარე რომლითაც იგი მოძრაობს

$$v = \frac{2r^2g(\rho_1 - \rho_2)}{9\eta}$$

სადაც r სფეროს რადიუსია, g თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, ρ_1 სფეროს სიმკვრივე, ხოლო ρ_2 სითხის სიმკვრივე, ხოლო $\eta = \frac{\mu}{\rho}$ სითხის დინამიური სიბლანტეა.

მექანიკის თვალსაზრისით სისხლი შეიძლება განვიხილოთ როგორც, ნიუტონისეული სითხე, რომელშიც შეტივტივებულია ფორმიანი ელემენტები. სისხლძარღვებში დინებისას სისხლის თვისებებზე გავლენას ახდენს, როგორც ფორმიანი ელემენტების ასევე სისხლძარღვების კედლების რეოლოგიური თვისებები.

6. სისხლისა და სისხლძარღვთა კედლის მექანიკური თვისებები

სისხლძარღვთა კედელი სამი ტიპის ქსოვილის-ელასტინის, კოლაგენის და გლუვი კუნთის ბოჭკოსგან შედგება. ელასტინი რეზინის მსგავსად ძალიან დიდი ჭიმვადობით ხასიათდება, სუფთა კოლაგენის ჭიმვადობა მცირეა, გლუვი კუნთის ბოჭკოები იცვლიან სიგრძეს ნერვული ან ქიმიური ზემოქმედებით.

სისხლძარღვთა აქტიურ მოქმედებას ახორციელებს გლუვი კუნთი. მისი შეკუმშვის შედეგად იცვლება შესაბამისი სისხლძარღვის დიამეტრი და კედლის მექანიკური თვისებები ასეთი სახით ხდება სისხლის ნაკადის ოპტიმალური განაწილება და რეგულირება.

დაგენილია, რომ სისხლძარღვთა კედლები ბლანტი-დრეკადი თვისებებით ხასიათდება. ის პრაქტიკულად არ მოკლდება. გლუვი კუნთის შეკუმშვა იწვევს სისხლძარღვთა კედლის სიხისტის მატებას. აღსანიშნავია ის ფაქტი რომ, მცირე ზომის არტერიების გლუვი კუნთებს თითაგზნების და საკუთარი ტონუსის მატების უნარი ახასიათებს.

სისხლი პლაზმაში შეტივტივებული ფორმიანი ელემენტების სუსპენზიაა. ძირითადი ფორმიანი ელემენტებია: ერითროციტები, ლეიკოციტები და თრომბოციტები. ყველაე მეტი რაოდენობით სისხლში ერითროციტებია $5 * 10^6$ მმ.კუბი

სისხლის რეოლოგიური თვისებები ძირითადად დამოკიდებულია პლაზმისა და ერითროციტების მექანიკურ თვისებებზე და ერითროციტების ფარდობით მოცულობაზე.

7. ერითროციტების გავლენა სითხის დინების ხასიათზე

პლაზმაში შეტივტივებულ და არადეფორმირებულ ერითროციტს ორმხრივჩაზნეკილი დისკოს ფორმა აქვს. გარედან ის შემოსაზღვრულია ძალიან თხელი მემბრანით. მემბრანის შიგნით ჰემოგლობინით გაჯერებული ხსნარია, რომლის სიბლანტე 5ჯერ აღემატება პლაზმის



სიბლანტეს.

ერიტროციტის შიგთავსი სითხეა და მის ფორმას კონკრეტულ პირობებში, მემბრანის თვისებები განაპირობებს. მემბრანის თვისებების ანალიზისთვის იყენებენ თხელი გარსების თეორიას, ამთეორიის თანახმად, ერიტროციტის მემბრანის წინააღმდეგობა ლუნვის მიმართ გაცილებით მცირეა, გაჭიმვის წინააღმდეგობასთან შედარებით. ამიტომ თუ ერიტროციტის შიგთავსი სითხეა, მას შეუძლია დეფორმაციას გაუწიოს ბლანტი და არა დრეკადი წინააღმდეგობა, ეს გვაძლევს უფლებას ვივარაუდოთ რომ ერიტროციტი ერიტროციტი ძალიან მოქნილი უნდა იყოს, ცდა ამას ადასტურებს. 7-8მკმ ზომის ერიტროციტს შეუძლია 3მკმ დიამეტრისა და 12მკმ სირძის მილაკში გაძვრეს ისე რომ არ დაიშალოს.

ერიტროციტის ძლიერი დეფორმაციის უნარი მემბრანის თვისებებთან ერთად მემბრანის ფორმითაც არის განპირობებული, მას შეუძლია მოცულობისა და ზედაპირის ფართობის შეუცვლელად მიიღოს ნებისმიერად განსხვავებული ფორმა.

ერიტროციტებს კიდევ ერთი თვისება ახასიათებთ-ერთმანეთთან შეწყობის უნარი. ერთმანეთთან შეედებულნი ასეთი ერიტროციტების ერთობლიობა „მონეტების სვეტის“ სახელწოდებითაა ცნობილი

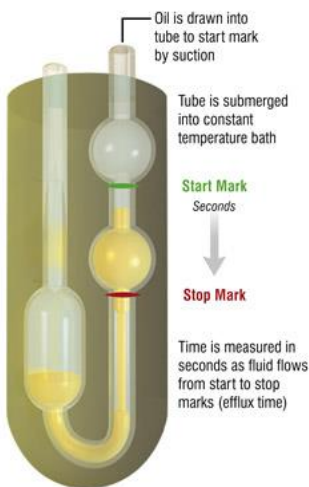
8. სისხლის ფიზიოლოგიური ფუნქციები

- 1) სატრანსპორტო ფუნქცია: სისხლს გადააქვს სხვადასხვა საკვები ნივთიერებები, ნივთიერებათა ცვლის პროდუქტები, ჰორმონები, ელექტროლიტები, ფერმენტები და სხვა.
- 2) სასუნთქი ფუნქცია: სისხლში არსებულ ჰემოგლობინს ერიტროციტების საშუალებით გადააქვს ჟანგბადი ფილტვებიდან ორგანიზმის ყველა ქსოვილში, ხოლო ნახშირორჟანგი (CO_2), კი ქსოვილებიდან ფილტვებისაკენ.
- 3) საკვები ფუნქცია: მას გადააქვს საკვები ნივთიერებები საჭმლის მომნელებელი ორგანოებიდან ორგანიზმის ქსოვილებისაკენ.
- 4) გამომყოფი ფუნქცია: გადააქვს ნივთიერებათა ცვლის პროდუქტები (მაგ: შარდოვანა) და ზედმეტი რაოდენობით წყალი და მარილი ქსოვილებიდან მათი გამოყოფის ადგილებისაკენ - თირკმელების, ფილტვების, ნაწლავისა და საოფლე ჯირკვლებისაკენ.
- 5) ტემპერატურის რეგულაციის ფუნქცია: ეს ფუნქცია იმაში მდგომარეობს, რომ სისხლი სისხლძარღვებში სხვადასხვანაირად ნაწილდება. კერძოდ, სისხლის რაოდენობის გაზრდით კანის კაპილარებში, იზრდება სითბოცვლა გარემოსთან, ხოლო მისი გადასვლით შინაგანი ორგანოების სისხლძარღვებში, კი სითბოცვლა მცირდება.
- 6) დაცვითი ფუნქცია: სისხლი იმუნიტეტის უმთავრესი ფაქტორია. ეს გამოწვეულია სისხლში არსებული ანტისხეულებით, ფერმენტებით, სპეციალური ცილებით, რომლებსაც აქვთ ბაქტერიების ლიკვიდაციის უნარი. ეს ყველაფერი იმუნიტეტის ბუნებრივ ფაქტორებს მიეკუთვნება. ერთერთი უმთავრესია სისხლის შედედების უნარი, რომელიც ჭრილობების შემთხვევაში იცავს ორგანიზმს სისხლის დაკარგვისაგან.

- 7) რეგულირების ფუნქცია: ეს მდგომარეობს იმაში, რომ სისხლში მოხვედრილი შინაგანი სეკრეციის ჯირკვლებისათვის აუცილებელი ნივთიერებები, საჭმლის მომწელებელი ჰორმონები, მარილები, წყალბადის იონები და სხვ; ცენტრალური ნერვიული სისტემის დახმარებითა და სხვადასვა ორგანოების საშუალებით ცვლიან მათ „საქმიანობას“.
- 8) შედეგების ფუნქცია: სისხლის პლაზმაში არსებული ხსნადი ცილა ფიბრინოგენი ღვიძლის მიერ დასინთეზებული სისხლის ფორმიანი ელემენტის თრომბოციტის მოქმედების შედეგად გარდაიქმნება უხსნად ცილა ფიბრინში, რომელიც სისხლძარღვის დაზიანებული სანათურის ამოვსებაში და მაშასადამე სიხლდენის შეჩერებაში იღებს მონაწილეობას.

9. ვისკოზიმეტრი

ვისკოზიმეტრი სითხის სიბლანტის გამოზომი ხელსაწყოა. იზომება როგორც დინამიური ასევე კინემატიკური სიბლანტე. სითხეებისათვის, რომელთა სიბლანტე დინების მდგომარეობის მიხედვით იცვლება, იყენებენ რეომეტრს. სიბლანტის გასაზომად აუცილებელია დინება იყოს ლამინარული და რეონოლდის რიცხვი მცირე. ძირითადად იყენებენ სამი სახის ვისკოზიმეტრებს: კაპილარულს, როტაციულსა და ისეთ ვისკოზიმეტრებს, სადაც სიბლანტე იზომება სფეროსებრი ან სხვა სახის სხეულების ვარდნისას.

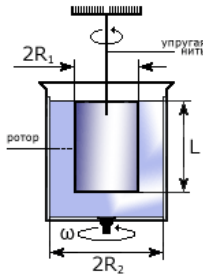


კაპილარული ვისკოზიმეტრის მუშაობის პრინციპი შემდეგში მდგომარეობს: ვიწრო მილში, მიედინება გარკვეული მოცულობის სითხე, მოდებულია გარკვეული წნევათა შორის სხვაობა და ითვლიან რა დრო დასჭირდება ამ სითხის გადინებას. უხშირესად სითხე რეზერვუარიდან გამოედინება საკუთარი სიმძიმის ძალის მოქმედებით. ამ შემთხვევაში სიბლანტე პირდაპირპროპორციულია წნევათა შორის სხვაობის, რომელიც არსებობს სითხესა, რომელიც კაპილარიდან გამოედინება და სითხეს შორის, რომელიც გამოედინება ძალიან სქელი მილიდან. თუ სითხე მხოლოდ თავისი სიმძიმის ძალით მოედინება, მაშინ კაპილარული ვისკოზიმეტრი ითვლის მხოლოდ კინემატიკურ და არა დინამიურ სიბლანტეს. ამ ხელსაწყოს შეუძლია გაზომოს სიბლანტეები $10 \cdot 10^{-6}$ პა.წ და $10 \cdot 10^3$ პა.წ-მდე. სიბლანტი გამოთვლა დაფუძნებულია პუაზიელის

ფორმულაზე. სურათზე ნათლად ჩანს, რომ ითვლიან დროს, როდესაც ზეთი მთლიანად ჩავა განიერი მილიდან კაპილარში.

როტაციულ ვისკოზიმეტრში ბლანტი სითხე (აირი) მოთავსებულია ორ სხეულს შორის, რომლებიც გეომეტრიულად შესაძლოა იყოს ცილინდრი, სფერო, კონუსი და ა.შ. ერთი სხეული, რომელსაც როტორი ეწოდება, ბრუნავს მუდმივი კუთხური სიჩქარით, ხოლო მეორე კი უძრავადაა. ვინაიდან სითხე ბლანტია, ანუ აქვს ხახუნი, იგი ამომძრავებს მეორე, უძრავ

სხეულს, რომლის კუთხური სიჩქარის გაგების შემდეგ ითვლიან სითხის სიბლანტეს. ასეთი ტიპის სტანდარტული ვისკოზიმეტრების სიბლანტის გაზომვის დიაპაზონი შეადგენს: 1 მილიპა.წ დან ასობით ათას კილოპა.წ მდე.



განვიხილოთ მარტივი მოდელი როტაციული ვისკოზიმეტრის. სურათის მიხედვით. როგორც ვხედავთ როტორში ასხია ბლანტი სითხე, რომელშიც ჩაშვებულია დრეკად ძაფზე ჩამოკიდებული ცილინდრი, რომლის რადიუსია R_1 ხოლო სიგრზეა L . როტორი კი ბრუნავს ω კუთხური სიჩქარით, ხოლო მისი რადიუსია R_2 . იმპულსის მომენტი, რომელსაც η სიბლანტის სითხე გადასცემს პირველ ცილინდრს იქნება

$$M_1 = \frac{4\pi\omega\eta R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

დრეკადი ძაფის დიამეტრი და სიგრძე აღვნიშნოთ შესაბამისად d და x . Φ არის კუთხე, რომლითაც მობრუნდება ძაფი, E მისი იუნგის მოდულია. ცილინდრის იმპულსის მომენტს გააწონასწორებს ძაფის იმპულსის მომენტი

$$M_2 = \frac{(\pi d^2 E \Phi)}{32x}$$

ვიცით რომ $M_1 = M_2$ მივიღებთ რომ

$$\eta = \frac{\pi d^2 E \Phi (R_2^2 - R_1^2)}{4\pi\omega L R_1^2 R_2^2 32x}$$

ან

$$\eta = \frac{k\Phi}{\omega}$$

სადაც k როტაციული ვისკოზიმეტრის მუდმივაა.

დასკვნა

ორგანიზმში შინაგანი გარემოს თავისებურებების შესწავლა და მკონტროლირებელი მექანიზმების სრულყოფილ გაცნობიერებას დიდი მნიშვნელობა აქვს ზოგიერთი დაავადების მკურნალობის მიზნით. ამასთან უკვე ყველასთვის ცნობილია, რომ სისხლის დინამიკის ფიზიკური პარამეტრების ცოდნის გარეშე ვერ მოხერხდება ჭეშმარიტი დიაგნოსტიკა. მხოლოდ კომპლექსური ფიზიკო-სამედიცინო კვლევების საფუძვლზე ხდება შესაძლებელი ხელშესახები მონაცემების მიღება. ამის საილუსტრაციოდ სწორედ წარმოდგენილი ნაშრომი კარგი მაგალითია.

ციტირებული ლიტერატურა

1. ა.ციბაძე. სამედიცინო ფიზიკა. 2009 წ.
2. ა.ციბაძე, ი.კვაჭაძე. სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა. 2007 წ.
3. რ.სოლომონია. ბიოქიმია. II ტომი.
4. დათეშიძე ლ, შენგელია ა. შენგელია ვ. "ქართული სამედიცინო ენციკლოპედია". თბილისი, 2005.
5. Биофизика. Учебник для вузов под редакцией В.Ф.Антонова. М. "Владос". 2003.
6. Мельников А.А., Викулов Л.Д. Реологические свойства крови спортсменов.// Фи-зиология человека, Т. 29, №2, С.48. 2003
7. Физиология человека. Под ред. В.М. Покровского и Г.Ф. Коротько. Медицина. 2007
8. [Your blood – a textbook about blood and blood donation](#) (PDF). p. 63, 2008.
9. [adverse reactions to transfusion](#). Pathology Department at University of Michigan. 2004.
10. [Blood tests normal ranges](#). Monthly Prescribing Reference. 2012.