بررسي جريان چگالي ناپايدار در محيط متخلخل
با استفاده از روش پردازش تصاوير

مهدی شفیعی‌فر
دانشجوي مقطع كارشناسي ارشد مهندسي آب،
دانشگاه صنعتي شريف

بهزاد عطائی آشتیانی
دانشيار دانشكدة عمران،
دانشگاه صنعتي شريف

چكيده. *تشكيل جريان وابسته به چگالي در بسياري از مسائل مكانيك سيالات زيست‌محيطي، عامل مهمي در انتقال جرم يا حرارت در محيط مي‌باشد. تأثير اين جريان بر نحوة انتقال آلاينده‌ها در محيطهاي متخلخل، به علت اثر متقابل پديده‌هاي ديگري چون پراكنش، پخش مولكولي و همچنين شكل ذرات، الگوي اختلاط پيچيده‌اي را تشكيل مي‌دهد. در مسائلی چون پیشروی آب شور دریا در آبخوانهای ساحلی، جریان آلاینده‌های محلول با غلظت زياد در آب زیرزمینی و یا جریان آب زیرزمینی از اطراف لایه‌ها یا گنبدهای نمکی، این گونه جریانها تشکیل می‌شوند. هنگامیکه یک سیال با چگالی بالاتر بر روی سیال با چگالی کمتر قرار گیرد، پیچیدگی این نوع جریانها بعلت تشکیل سیستم ناپایدار، افزایش می‌یابد.*

در اين مقاله، كاربرد روش پردازش تصاوير، جهت مطالعة آزمايشگاهي جريان چگالي در محيط متخلخل مورد بررسي قرار گرفته است. مزيت استفاده از اين تكنيك در مطالعات آزمايشگاهي آنست‌كه بدون ايجاد اغتشاش در محيط، نتايج را در گسترة وسيعتري مي‌توان بدست آورد. نتايج حاصل از اين تحقيق شامل ارائة الگوريتم پردازش تصاوير براي مطالعات آزمايشگاهي، تهية داده‌هاي آزمايشگاهي دقيق براي شرايط مرزي مورد آزمايش، بررسي نحوة نفوذ چند شاخه‌اي سيال چگالي درون محيط متخلخل اشباع و وابستگي شكل گسترش جريان به تغييرات غلظت ورودي مي‌باشد. نتايج بدست آمده از اين تحقيق مبين اين مسأله است كه تشكيل جريانهاي چند شاخه‌اي در اعداد رايلي حدود $4\pi^2$ آغاز شده و افزايش مقدار اين شاخص، موجب كاهش زمان اختلاط و افزايش گسترة تداخل در محيط مي‌شود.

واژه‌هاي كليدي: *جريان چگالي، پردازش تصوير، جريانهاي چندشاخه‌اي، پراكنش، پخش مولكولي، فرارفت.*

فهرست علايم

A_s	سطح مقطع ستون متخلخل$[L^2]$	M_{Tensor}^{real}	جرم مادة رنگي وارد شده به محيط آزمايش $[M]$
B	عرض محيط آزمايش$[L]$	n	تخلخل
C	غلظت محلول در فاز سيال$[M.L^{-3}]$	Q_x	دبي جريان در ستون متخلخل$[L^3.T^{-1}]$
d_{50}	متوسط قطر ذرات$[L]$	R_a	عدد بي‌بعد رايلي
D_m	پخش مولكولي$[L^2.T^{-1}]$	t	مدت زمان شروع آزمايش$[T]$
D_x	پراكنش هيدروديناميكي طولي$[L^2.T^{-1}]$	U	تابع تخلية خلل و فرج
g	شتاب جاذبة زمين$[L.T^{-2}]$	U_c	سرعت جريان همرفتي ناشي از جريان چگالي$[L.T^{-1}]$
H	ضخامت لاية آبدار، ارتفاع محيط آزمايش$[L]$	v_x	سرعت جريان در ستون متخلخل$[L.T^{-1}]$
h_1,h_2	تراز آب در بالادست و پايين‌دست ستون متخلخل$[L]$	α_x	ضريب پراكنش طولي$[L]$
k	نفوذپذيري$[L^2]$	β	ضريب افزايش چگالي سيال ناشي از افزايش غلظت
K	هدايت هيدروليكي$[L.T^{-1}]$	μ	لزجت ديناميكي سيال$[M.L^{-1}.T^{-1}]$
L	طول ستون متخلخل$[L]$	ρ	چگالي تودة سيال$[M.L^{-3}]$
M_{Tensor}	جرم مادة رنگي موجود در محيط حاصل از مدل $[M]$	υ	لزجت سينماتيك$[L^2.T^{-1}]$

۱- مقدمه

تغييرات چگالي بر اثر اختلاف دما و غلظت در محيط متخلخل، موجب تشكيل جريانهاي وابسته به چگالي سيال مي‌شود. اين جريان به علت وجود سه پديدة فرارفت[1]، پراكنش[2] و پخش مولكولي[3] در محيط گسترش مي‌يابد. تأثير جريانهاي وابسته به چگالي در مسائلي مانند پيشروي آب شور در آبخوانهاي ساحلي، نفوذ آلاينده‌هاي سطحي به لايه‌هاي آبدار زيرزميني، جريان آلاينده‌هاي محلول با غلظت زياد در آب زيرزميني و همچنين جريان آب زيرزميني از مجاورت گنبدهاي نمكي، موجب افزايش اهميت شناسايي و تحليل صحيح اين جريان در محيطهاي متخلخل شده است. در صورت قرار گرفتن يك سيال با چگالي نسبي بالا بر روي يك محيط متخلخل اشباع، شرايط جريان ناپايدار شده و جريانهاي همرفتي وابسته به چگالي، الگوي اختلاط پيچيده‌اي را تشكيل مي‌دهند كه موجب تداخل و پيشرفت چند شاخه‌اي[4] سيال مي‌شود. نحوة پيشروي اين جريان در محيط اشباع، تابعي از عواملي چون مشخصات محيط متخلخل و اختلاف چگالي دو سيال است. جريان چگالي در شرايط ناپايدار موجب:۱- افزايش جرم آلايندة انتقال يافته نسبت به جريان در شرايط پايدار(كه پخش مولكولي عامل اصلي تشكيل ناحية تداخل مي‌باشد)، ۲- كاهش قابل توجه زمان اختلاط و ۳- افزايش گسترة تداخل در محيط مي‌شود.

تعيين مقادير كمي پارامترهاي جريان چگالي(مانند غلظت و چگالي سيال) در محيط متخلخل، به علت حساسيت آزمايشها به شرايط مرزي مستلزم استفاده از شيوه‌هاي آزمايشگاهي دقيق و كنترل شده مي‌باشد. طي سالهاي اخير استفاده از روش پردازش تصاوير در تحليل نتايج آزمايشگاهي مورد توجه ويژه‌اي قرار گرفته است. چرا كه به كمك اين روش، بدون اختلال در شرايط آزمايش، امكان برآورد پارامترهاي مطلوب ايجاد مي‌شود.

تحليل تصاوير، پردازشي است كه جهت استخراج داده‌هاي كمي و قابل تحليل بر روي تصاوير ديجيتالي انجام مي‌گيرد. به عبارت ديگر به كمك اين روش، تصاوير تهيه شده از محيط مورد نظر، توسط يك الگوريتم يا نرم افزار كامپيوتري به مقادير عددي تبديل مي‌شود. اين روش در علوم مختلفي چون علم نجوم، الكترونيك، كامپيوتر، مكانيك، علم مواد، مهندسي نفت، محيط زيست و... مورد استفاده قرار مي‌گيرد. اگرچه با توجه به قابليتهاي اين شيوه در افزايش دقت و كاهش هزينة آزمايش، هنوز به جايگاه مناسبي در تكنيكهاي آزمايشگاهي نرسيده‌است.

۲- عوامل مؤثر بر تشكيل جريانهاي ناپايدار چگالي و روابط حاكم بر آنها

معادلة اصلي حاكم بر جريان سيال در فضاي محيط متخلخل، رابطة ناوير استوكس مي‌باشد. اما ناشناخته بودن فضاي حركت سيال و همچنين عدم امكان اعمال اين شرايط پيچيده، حل اين معادله را در محيط متخلخل غير ممكن مي‌سازد. بنابراين جهت حل جريان سيال در محيط متخلخل، استفاده از يك تئوري متوسط‌گيري[5] اجتناب ناپذير است. اين تئوري بيانگر روشهايي است كه به كمك آنها بتوان روابط را در مقياس بزرگتري به كاربرد. معمولترين اين روشها استفاده از رابطة دارسي در محيط متخلخل است. در حل مسألة جريان چگالي در محيط متخلخل، دو معادلة پيوستگي سيال و جرم محلول به طور همزمان حل مي‌شوند.

پراكنش و پخش مولكولي موجب كاهش امكان تشكيل جريانهاي چند شاخه‌اي مي‌شود. به عبارت ديگر در تداخل دو فازي سيال، شرايط ناپايداري سريعتر رخ مي‌دهد. علت اين امر آنستكه پديدة پراكنش و پخش مولكولي موجب ايجاد

1- *Advection*
2- *Dispersion*
3- *Diffusion*
4- *Fingering*
5- Averaging theory

جريانهاي موضعي مي‌شود و جبهة پيشروي تودة سيال را همگام‌تر مي‌سازد. جهت بررسي سيستمهاي ناپايدار در جريان چگالي از پارامترهاي بي‌بعدي استفاده مي‌شود كه امكان شكل‌گيري جريانهاي چند شاخه‌اي را تعيين مي‌كنند. مشهورترين اين پارامترها عدد رايلي مي‌باشد كه توسط «رايلي» در سال ۱۹۱۶ معرفي شده است و در سال ۱۹۵۹ توسط «وودينگ» اصلاح شد. در سيستمهايي كه جابجايي سيال تنها بر اثر جريان همرفتي ناشي از گراديان غلظت باشد و پراكنش مكانيكي مستقل از سرعت همرفتي فرض شود، اين عدد بي‌بعد بيانگر نسبت نيروهاي شناوري وارد بر سيال به نيروهاي مقاوم ناشي از پراكنش و پخش مولكولي است[9] :

$$Ra = \frac{Bouancy\ and\ Gravitation}{Diffusion\ and\ Dispersion} = \frac{U_c H}{D} = \frac{gk\beta(C\max - C\min)H}{n\nu D_x} = \frac{gkH(\rho_2 - \rho_1)}{nD_x\mu} \qquad (۱)$$

براي محيط غير متخلخل نيز اين پارامتر بي‌بعد به گونة ديگري تعريف مي‌شود. همچنين در صورتي كه علاوه بر گراديان غلظت، سرعت جريان همرفتي ديگري نيز در محيط وجود داشته باشد، فرم اصلاح شدة عدد بي‌بعد رايلي مورد استفاده قرار مي‌گيرد[5],[7]. توسط محققين مختلف مقادير متفاوتي براي عدد رايلي بحراني ارائه شده است[10]. مشاهدات آزمايشگاهي، مقدار بحراني عدد رايلي را براي ايجاد ناپايداري در محيط آزمايش مورد استفاده در اين تحقيق، معادل $۴\pi^۲$ بدست مي‌آورد.

۳- روش و ابزار آزمايش

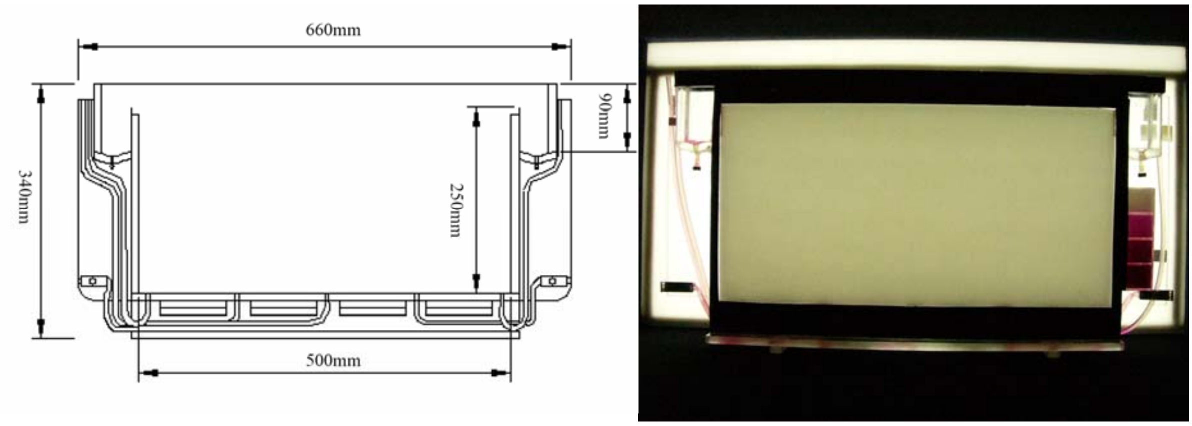
محيط آزمايش جعبة قائم شفافي به ابعاد ۱/۷*۲۵*۵۰ سانتيمتر است. وجه پاييني اين منشور شامل ۵ حفره مي‌باشد كه سه حفره مربوط به لوله‌هاي پيزومتر و دو حفرة ديگر تنها جهت تخلية دستگاه از آب تعبيه شده‌اند. در انتهاي مجاري تخلية دستگاه دو شير قابل كنترل قرار دارد. همچنين اين دستگاه شامل دو سرريز در دو طرف محيط آزمايش مي‌باشد. مشخصات ظاهري و ابعاد محيط آزمايش در شكل(۱) نشان داده شده است.

اين جعبة شفاف از دانه‌هاي شيشه‌اي يكنواخت و هم‌اندازه با قطر تقريبي ۰/۷ ميليمتر به عنوان محيط متخلخل پر مي‌شود. رنگ طبيعي مجموعة اين دانه‌ها سفيد مي‌باشد. تخلخل ذرات شيشه‌اي برابر ۰/۴ بدست آمده است.

جهت تعيين هدايت هيدروليكي محيط از روش هد ثابت در یک ستون متخلخل بلند به طول ۱متر و قطر داخلي ۳ سانتيمتر استفاده شده است. با توجه به رابطة دارسي، هدايت هيدروليكي محيط متخلخل برابر ۳/۷۵ ميليمتر بر ثانيه بدست مي‌آيد.

$$k = \frac{Q_x / A_s}{(H_1 - H_2)/L} \qquad (۲)$$

جهت اندازه‌گيري ضرايب پراكنش طولي و پراكنش جانبي محيط آزمايش از يك ستون متخلخل به طول ۱/۵ متر و با قطر داخلي ۴/۵ سانتيمتر استفاده شده است. براي تشكيل يك محيط متخلخل اشباع همگن و همچنين جلوگيري از ورود حبابهاي هوا به محيط، هنگام ورود ذرات، ستون در ارتفاعهاي ۵ سانتيمتري مملو از آب شده و ذرات شيشه‌اي در آن ريخته شده و بوسيلة ارتعاشهاي جانبي متراكم شده‌است. تهيه يك محيط همگن با تخلخلي مشابه محيط آزمايش در اين مرحله بسيار حائز اهميت مي‌باشد، چرا كه در صورت اختلاف تخلخل، سرعت واقعي جريان در محيط با سرعت برآورد شده از دبي خروجي محيط اختلاف خواهد داشت، به همين علت دبي خروجي از ستون در هر آزمايش اندازه‌گيري مي‌شود تا بتوان به كمك آن سرعت واقعي برآورد شده و مشاهده‌شده را مقايسه كرد.



شکل۱- مشخصات ظاهري و ابعاد محيط آزمايش

به كمك شير انتهايي ستون آزمايش، جريان يكنواخت آب در محيط برقرار مي‌شود و ردياب رنگي رودامين[1] (با غلظت ۰/۲۵گرم بر ليتر) به طور ناگهاني بر روي سطح ذرات وارد مي‌شود. در طول مدت هر آزمايش از نقطه‌اي به فاصله ۱ متر از ورودي ستون، مقدار ۴ ميلي‌ليتر نمونه‌برداري مي‌شود. جهت تعيين غلظت مادة رنگي نمونه‌ها از دستگاه اسپكتروفتومتر[2] استفاده شده است. قبل از تعيين غلظت مادة رنگي هر آزمايش، طول موج تابش دستگاه بر روي ۵۹۰ تنظيم شده و به كمك نمونه‌هايي با غلظت معين، رابطة غلظت-جذب نور در واحد سطح نمونه تعيين مي‌شود. با استفاده از اين رابطه، تغييرات غلظت مادة رنگي در نقطة نمونه‌برداري نسبت به زمان براي سه آزمايش انجام شده در شكل(۲) ارائه شده است.

جهت تعيين ضريب پراكنش در ستون متخلخل، عموماً از پارامتر مرتبة تخلية خلل و فرج[3] استفاده مي‌شود كه به صورت زير تعريف شده است:

$$U = \frac{v_x.n.A_s.t}{A_s.L.n} = \frac{v_x t}{L} \qquad (۳)$$

با رسم تابع حجم تخليه كه به صورت $\frac{(U-1)}{U^{0.5}}$تعريف مي‌شود، در مقابل $\frac{C}{C_0}$ در يك صفحه با محور نرمال، مي‌توان پراكندگي هيدروديناميكي سيال در محيط را به كمك رابطة زير تعيين نمود:

$$D_x = \frac{v_x L}{8}\left[J(0.84) - J(0.16)\right]^2 \qquad (۴)$$

كه در اين رابطه:

J(0.84): مقدار تابع حجم تخليه در زمان مشاهدة ۸۴% غلظت ورودي و

J(0.16): مقدار تابع حجم تخليه در زمان مشاهدة ۱۶% غلظت ورودي مي‌باشد.

با استفاده از فرم پراكنش هيدروديناميكي يك‌بعدي مي‌توان ضريب پراكنش را تعيين نمود:

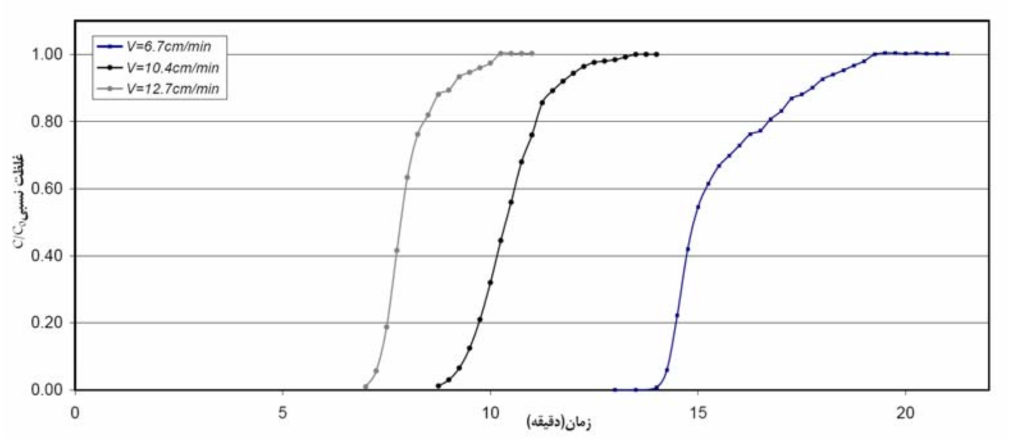
$$\alpha_x = \frac{D_x - D_m}{v_x} \qquad (۵)$$

---

1 Rhodamine

2 Spectrophotometer

3 Number of pore volume



شکل ۲- تغييرات غلظت مادة رنگي در نقطة نمونه‌برداري

با توجه به روابط معرفي شده، ضريب پراکنش طولي محيط برابر ۰/۳۰۴ ميليمتر بدست آمده است. بر اين اساس مشخصات مربوط به محيط متخلخل در جدول(۱) ارائه شده است. همچنين رابطة تغييرات غلظت-چگالي در آزمايشگاه به صورت معادلة (۶) بدست آمده است. در اين رابطه، ρ و C بر حسب گرم بر ليتر مي‌باشد.

$$\rho = 0.6431 \times C + 997.77 \quad (۶)$$

جدول۱- مشخصات محيط متخلخل (ذرات شيشه‌اي)

مشخصه	علامت اختصاري	مقدار مشخصه	واحد
متوسط اندازة ذرات	d_{50}	۰/۷	ميليمتر
تخلخل	n	۰/۴	---
هدايت هيدروليکي در شرايط اشباع	k	۳/۷۵	ميليمتر بر ثانيه
ضريب پراکنش طولي	α_x	۳/۰۴	ميليمتر
چگالي تودة محيط متخلخل	ρ_b	۱/۵۲	گرم بر سانتيمتر مکعب

محيط آزمايش در محفظه‌اي قرار مي‌گيرد که امکان ورود نور به آن تنها از يک وجه امکان‌پذير مي‌باشد. نور به صورت يکنواخت از يک صفحة نيمه شفاف به داخل محفظه وارد شده و پس از عبور از منشور شيشه‌اي متخلخل به دوربين تصويربرداري وارد مي‌شود. جهت جلوگيري از اثرگذاري انعکاس نور در محيط و ورود نور کنترل نشده به محيط آزمايش، سطوح داخلي اين محفظه از صفحات مشکي رنگ پوشانده شده است. در کنار محيط آزمايش يک مقياس رنگي قرار داده شده است که داراي چهار بخش با غلظت رنگي مشخص مي‌باشد. اين مقياس رنگي جهت تبديل تصاوير تهيه شده از محيط آزمايش به مقياس استاندارد مورد استفاده قرار مي‌گيرد. براي تشکيل محيط متخلخل اشباع و جذب حبابهاي هوا از بين ذرات شيشه‌اي، محيط آزمايش در ارتفاعهاي ۲۰ تا ۳۰ ميليمتري از آب پر شده و دانه‌هاي شيشه‌اي در آن ريخته مي‌شود. سپس توسط يک چکش پلاستيکي متراکم مي‌شود.

محيط متخلخل در ابتداي آزمايش از آب شيرين با چگالي ۰/۹۹۶ گرم بر سانتيمتر مکعب اشباع مي‌شود. سيال چگال ورودي شامل محلول آب و نمک طعام مي‌باشد(اختلاط در شرايط تک‌فازي باقي مي‌ماند) که با غلظت معلومي از مادة رنگي

به عنوان ردياب همراه مي‌شود. مادة رنگي كه در اين آزمايشها مورد استفاده قرار گرفته است رودامين مي‌باشد. اين مادة رنگي داراي چند ويژگي است كه موجب شده است در بسياري از تحقيقات آزمايشگاهي مورد استفاده قرار گيرد. اولين ويژگي اين مادة رنگي، خاصيت رنگزايي شديد آن است، چنانكه غلظتي در حدود ۵۰۰ ميلي‌گرم بر ليتر از اين ماده پاسخگوي شدت نوري بيشينة آزمايشها خواهد بود. دومين ويژگي اين مادة رنگي، خاصيت فلورسانس آن است كه موجب مي‌شود غلظتهاي بسيار اندک آن نيز در مقابل نور ماوراء بنفش قابل تشخيص باشد. سومين ويژگي اين ماده عدم جذب آن در محيطهاي آزمايشگاهي است(جذب شيشه و پلكسي‌گلاس نمي‌شود) همچنين به علت غلظت ناچيز آن، در چگالي آب اثرگذار نيست.

سيال ورودي با غلظتهاي مختلف نمك طعام و با غلظت ثابت ۵۰۰ ميلي‌گرم بر ليتر مادة رنگي رودامين تهيه مي‌شود. اين محلول توسط ظرفي وارد محيط مي‌شود كه وجه پاييني آن از چند ورقة صافي پوشيده مي‌شود و بر روي آن شيشه مرواريدهاي با قطر ۳ميليمتر قرار مي‌گيرد. از اين صافي و شيشه‌مرواريدها جهت يكنواخت كردن ورود سيال استفاده مي‌شود. اين ظرف پر از محلول تهيه شده از نمك طعام و رودامين مي‌شود. در دو سمت اين ظرف نيز دو سرريز قرار دارد كه موجب مي‌شود ارتفاع محلول بر روي صافي ثابت باقي بماند. با قرار دادن وجه پاييني اين ظرف بر روي محيط متخلخل آزمايش آغاز مي‌شود. اختلاف چگالي ناشي از اختلاف غلظت و همچنين پخش مولكولي موجب مي‌شود محلول نمک به همراه ردياب رنگي در محيط جريان يابد. محلول تهيه شده به طور مداوم بر روي صافي وارد مي‌شود تا ارتفاع محلول بر روي آن تغيير نكند. در فواصل زماني مشخص از محيط آزمايش تصويربرداري مي‌شود. جهت عكس‌برداري از آزمايشها، از يك دوربين ديجيتالي با امكان تصويربرداري در محيطهاي نيمه تاريك استفاده شده است.

٤- الگوريتم پردازش تصاوير

پردازش تصاوير عبارت از فرايندي است كه به كمك آن مي‌توان اطلاعات مطلوب ثبت شده در تصاوير را استخراج نمود. به كمك محيط نيمه شفافي كه در اين تحقيقات مورد استفاده قرار گرفته‌است، مي‌توان از اين شيوه براي تشريح بسياري از اطلاعات نهفته در تصاوير استفاده كرد. هدف از اعمال اين الگوريتم، تعيين خطوط هم‌غلظت در هر يك از عكسهاي بدست‌آمده از آزمايشها مي‌باشد. اين الگوريتم شامل ۱۰ گام مي‌باشد كه توسط نرم‌افزار *MATLAB* تهيه شده‌است. مدل ارائه شده را مي‌توان در سه بخش مجزا در نظر گرفت، بخش اول پردازشي است كه تصوير پاية آزمايش را به فرم استاندارد تبديل مي‌كند. بخش دوم پردازشي است كه بر تصاوير آزمايش اعمال شده و بخش سوم شامل حذف تصوير پايه از تصوير آزمايش و استخراج نتايج نهايي مي‌شود. الگوريتم عملگر مدل پردازش تصاوير به صورت زير ارائه شده است:

۱» ورود تصاوير به نرم افزار: تصاوير تهيه‌شده از آزمايشها داراي فرمت *RGB* مي‌باشند. در اولين گام پردازش، دو تصوير به عنوان ورودي الگوريتم دريافت مي‌شود، تصوير پاية هر آزمايش و تصويري كه بايد مورد پردازش قرار گيرد.

۲» تبديل تصاوير به فرمت«Gray Scale»: با توجه به اينكه تنها شناسايي غلظت يك مادة رنگي در محيط آزمايش مورد نظر است، براي كاهش حجم محاسبات و در نتيجه كاهش مدت زمان پردازش، تصاوير به فرم «*Gray Scale*» تبديل شده‌اند. رابطة تبديل تصاوير*RGB* به تصاوير «*Gray Scale*» به صورت زير مي‌باشد[5]:

$$Gray = 0.29934 \times \mathrm{Re}\, d + 0.58955 \times Green + 0.11111 \times Blue \qquad (۷)$$

كه *Red*، *Green*و *Blue* بيانگر مقادير شدت هر يك از رنگهاي قرمز، سبز و آبي در هر نقطه است.

۳» انطباق تصاوير[1] : اگرچه در عكس‌برداري از آزمايشها، تغيير مكاني در محل دوربين يا محيط آزمايش ايجاد نمي‌شود، اما جهت حذف تأثير جابجايي‌هاي احتمالي بر اثر لغزش دست هنگام تصويربرداري و همچنين براي تبديل تصاوير به اندازة استاندارد، مختصات نقاط هم ارز در تصاوير مختلف به مختصات استاندارد انتقال مي‌يابد. براي اين كار لازم است نقاطي به عنوان نقاط كنترلي بر روي هر تصوير مشخص شود و بسته به تعداد اين نقاط و همچنين نحوة تغيير شكل، تصاوير به اندازة استاندارد تغيير شكل مي‌يابد. در انطباق تصوير، نقاط كنترلي تعيين شده در تصاوير به مختصات يكسان انتقال مي‌يابند. نقاط كنترلي انتخاب شده در سري عكسهاي مربوط به هر آزمايش، عبارت از چهارگوشة مشخص شده توسط نوار مشكي‌رنگ مي‌باشد.

۴» هماهنگ كردن شدت نور غالب بر تصاوير: با توجه به تغيير شرايط عكسبرداري و همچنين به علت تغيير شدت نور ورودي به محيط، ممكن است مدت زمان بازبودن ديافراگم و يا حساسيت تصويربرداري به نور تغيير كند. براي حذف تأثير نابرابري نور حاكم بر تصاوير، از يك مقياس رنگي در كنار محيط آزمايش استفاده شده است. به كمك اين مقياس مي‌توان شدت نور را در تمامي تصاوير يكسان ساخت. بدين شكل كه با اعمال توابع حسابي بر تصاوير، شدت رنگ در تمامي نقاط به گونه‌اي تغيير داده مي‌شود كه شدت نوري بخشهاي مختلف مقياس رنگي برابر مقدار ثابتي شود. بدين ترتيب بخش اعظمي از خطاهاي ناشي از تغيير نور در محل آزمايش و يا مدت زمان بازبودن ديافراگم دوربين به حداقل مي‌رسد.

۵» جدا نمودن محيط آزمايش از تصوير: مطابق گام سوم اين الگوريتم، محيط آزمايشي كه لازم است مورد پردازش قرار گيرد در يك ماتريس به ابعاد [۲۵۰*۵۰۰] قرار مي‌گيرد. در نتيجه به سادگي اين ماتريس از هر تصوير جدا شده و به عنوان تصوير استاندارد شدة هر عكس ذخير مي‌شود. در نتيجه، تصاوير استاندارد شده داراي ابعاد و همچنين شدت نور غالب برابر مي‌شوند.

۶» حذف تصوير پايه از تصاوير: در عكسهاي تهيه‌شده، تأثير عدم يكنواختي مكاني تابش نور به محيط، همچنين اثرگذاري جداره‌ها و تخلخل محيط، موجب مي‌شود در دو نقطه با غلظت برابر، شدت نوري متفاوتي مشاهده شود. يكي از روشهايي كه موجب كاهش خطاي ناشي از تأثير محيط آزمايش مي‌شود، حذف تصوير پايه از تصاوير مي‌باشد. براي اين كار با اعمال گامهاي اول تا پنجم الگوريتم پردازش بر تصوير پايه و همچنين ديگر تصاوير، عكسهاي استاندارد آزمايشها تهيه شده و سپس، تصوير پايه از تصاوير آزمايش مربوطه حذف مي‌شود. بدين معنا كه شدت تيرگي هر نقطه در تصوير پايه از شدت تيرگي نقطة هم‌ارز آن در ديگر تصاوير كاسته مي‌شود. اين عمليات موجب مي‌شود شدت نوري نقاطي كه تيرگي آنها ناشي از تأثير محيط آزمايش يا ناهمگوني نور در محيط بوده است، اصلاح شود. لازم به ذكر است كه اين عمليات مي‌تواند موجب افزايش برخي خطاهاي محلي در نتايج شود، اما در كل تصوير موجب افزايش دقت شده و با استفاده از فيلتر همسانگر، اثر اغتشاشهاي محلي نيز كاهش مي‌يابد. در اين مرحله، تصاوير به فرمت شدت تيرگي تبديل مي‌شوند. يعني مقدار هر عنصر از ۰(سفيد) تا ۲۵۵(مشكي) تغيير مي‌كند.

۷» استفاده از فيلتر همسانگر: بخش اعظمي از اغتشاشها و تيرگيهاي نقطه‌اي در تصاوير كه اهميتي در فرايند پردازش نداشته و تنها موجب ايجاد خطاهاي محلي مي‌شوند را مي‌توان با اعمال انواع فيلترها حذف نمود. در تحقيقات مختلف بسته به محيط و خطاها، فيلترهاي متفاوتي مورد استفاده قرار گرفته است. در اين تحقيق از دو فيلتر متفاوت استفاده شده است. فيلتر اول موجب حذف اغتشاشهاي نقطه‌اي و فيلتر دوم ميانگين شدت رنگ هر پيكسل با پيكسلهاي همسايه(ميانگين ۹پيكسل) را جايگزين مقدار آن پيكسل كرده و در نتيجه موجب هموارتر شدن تصاوير مي‌شود.

1 Image registration

۸» تبديل شدت تيرگي به غلظتهاي معادل: جهت تبديل شدت تيرگي به غلظت در تصاوير نياز به رابطة شدت تيرگي-غلظت مي‌باشد. براي تعيين اين رابطه، محيط آزمايش از غلظتهاي متفاوتي اشباع شده و از آن عكسبرداري شده است. سپس گامهاي اول تا هفتم الگوريتم پردازش بر آنها اعمال شده و ميانگين شدت تيرگي در محيط آزمايش براي اين تصاوير بدست آمد. رابطة شدت تيرگي-غلظت براي محيط ريزدانه در شكل(۳) به صورت يك تابع نمايي بدست آمده است. بنابراين جهت تعيين غلظت هر نقطه از محيط آزمايش، كافيست با رابطة ارائه شده، شدت نوري آن نقطه را به غلظت تبديل كنيم.

۹» ارائة خطوط هم غلظت در محيط آزمايش: با بدست آمدن غلظت مادة رنگي در هر نقطه از محيط آزمايش، خطوط هم‌غلظت(كه هدف نهايي الگوريتم ارائه شده است) در محدودة مشخص شده توسط نوار مشكي‌رنگ رسم مي‌شود

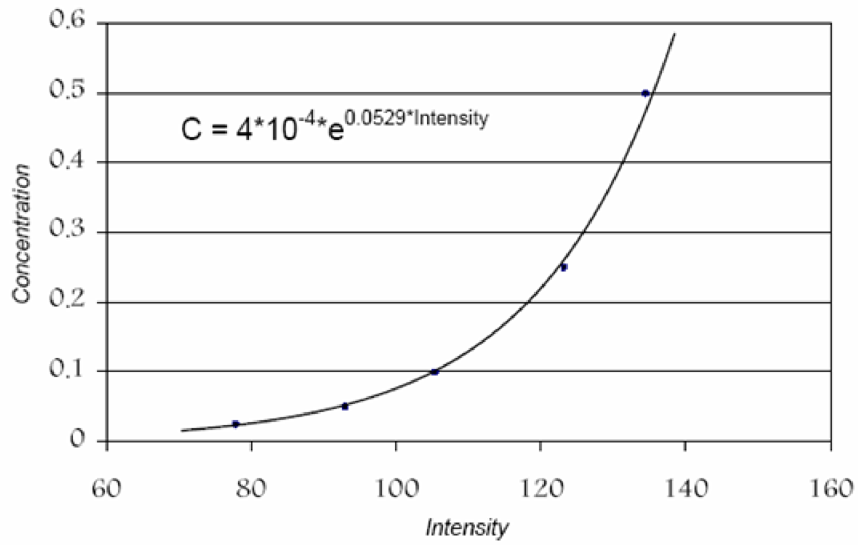
۱۰» محاسبة جرم مادة رنگي وارد شده به محيط: هدف از محاسبة جرم مادة رنگي وارد شده به محيط آزمايش، مقايسة آن با مقدار ورودي واقعي و برآورد خطاي پردازش مي‌باشد. در تحقيق حاضر، براي محاسبة جرم مادة رنگي ورودي، از رابطة زير استفاده شده است:

$$M_{Tensor} = (\sum C_i) \times n \times B \times area \qquad (۸)$$

$area$ مساحتي از محيط آزمايش است كه هر پيكسل به خود تخصيص مي‌دهد(برابر يك ميليمتر مربع). با محاسبة جرم مادة رنگي ورودي به محيط، خطاي نتايج بدست آمده را مي‌توان چنين محاسبه نمود:

$$e_m = \frac{\left| M_{tensor} - M_{tensor}^{real} \right|}{M_{tensor}^{real}} \times 100\% \qquad (۹)$$

به كمك الگوريتم معرفي شده، خطوط هم‌غلظت يا هم‌چگالي در محيط آزمايش و همچنين برآوردي از خطاي نتايج حاصل را براي زمانهاي مختلف مي‌توان بدست آورد. خلاصه‌اي از مراحل اين الگوريتم در شكل(۴) ارائه شده است. در ادامه، دقت و صحت اعمال اين مدل بر تصاوير، به كمك روشهاي مختلف مورد بررسي قرار گرفته‌است.



شكل ۳- تعيين رابطة شدت تيرگي- غلظت در محيط آزمايش

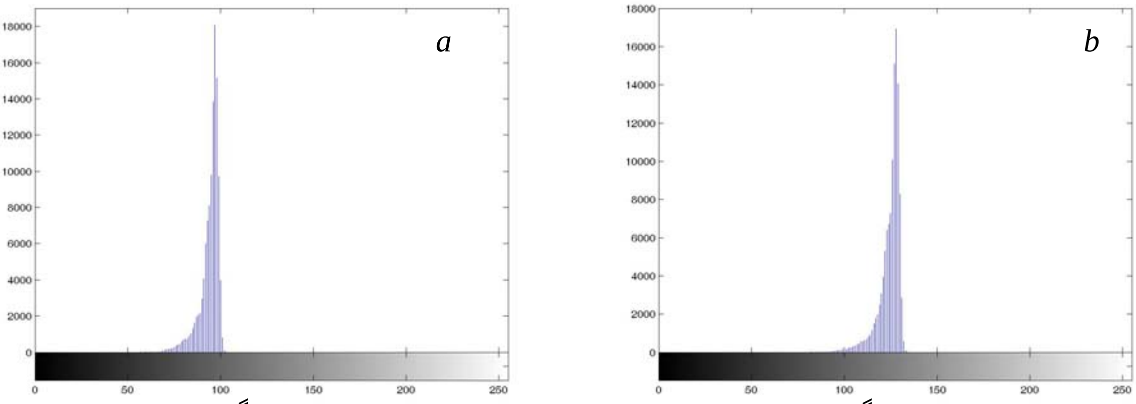
شكل ۴- الگوريتم پردازش تصاوير تهيه‌شده جهت تعيين خطوط هم‌غلظت در محيط آزمايش

۵- كنترل الگوريتم پردازش تصاوير

مدل پردازش تصاوير ارائه شده، مرجع اصلي تحليل نتايج آزمايشگاهي جريان چگالي در اين تحقيق بوده است. بنابراين قبل از تحليل نتايج، لازم است صحت و دقت اين مدل مورد بررسي قرار گيرد. براي تعيين صحت مدل ارائه شده، دو روش مورد توجه قرار گرفته است. مجموعة نتايج حاصل از اين روشها نشان مي‌دهد كه تعيين خطوط هم غلظت جريان چگالي در محيط آزمايشگاهي به روش پردازش تصاوير داراي دقت مطلوبي بوده و به كمك اين روش مي‌توان آزمايشها را با اطلاعات كاملتر و گسترده‌تري مورد تحليل قرار داد.

- تحليل تصاوير با غلظت يكنواخت

در صورتي كه مدل پردازش تصاوير به صورت ايده‌آل عمل نمايد، شدت تيرگي يا غلظتهاي بدست آمده از پردازش تصويري با غلظت يكنواخت در محيط آزمايش، براي تمامي نقاط يكسان خواهد بود. اما به علت اثرگذاري خطاهاي متعدد ناشي از شرايط آزمايشگاهي، شرايط عكس‌برداري و همچنين پردازش تصاوير، دامنة تغيير غلظت در تصوير بيش از يك مقدار ثابت مي‌شود. هرچه اين دامنة تغييرات محدودتر باشد، نشاندهندة افزايش دقت نتايج خواهد بود و گسترش اين دامنة تغييرات موجب افزايش خطا در تعيين خطوط هم‌غلظت مي‌شود. براي برآورد دامنة تغييرات شدت تيرگي يك غلظت ثابت در محيط آزمايش، هيستوگرام تغييرات شدت تيرگي در تصاوير با غلظت يكنواخت رسم شده است. دو نمونة اين هيستوگرامها براي غلظتهاي يكنواخت ۵۰ميلي‌گرم بر ليتر و ۲۵۰ميلي‌گرم برليتر در محيط آزمايش، در شكل(۵) رسم شده است. همانگونه كه مشاهده مي‌شود، هيستوگرامهاي بدست‌آمده براي اين محيط آزمايش داراي دامنة تغيير كوچكي است و دامنة تيرگي بيش از ۷۵% مقادير كمتر از ۷ مي‌باشد



شکل ۵- هیستوگرام دامنة تغییرات شدت تیرگي در تصاویر با غلظت ثابت مادة رنگي در محیط آزمایش

a: ۵۰میلي‌گرم بر لیتر، *b*: ۲۵۰ میلي‌گرم برلیتر

- مقایسة حجم واقعي وارد شده به محیط و حجم برآورد شده از پردازش تصویر

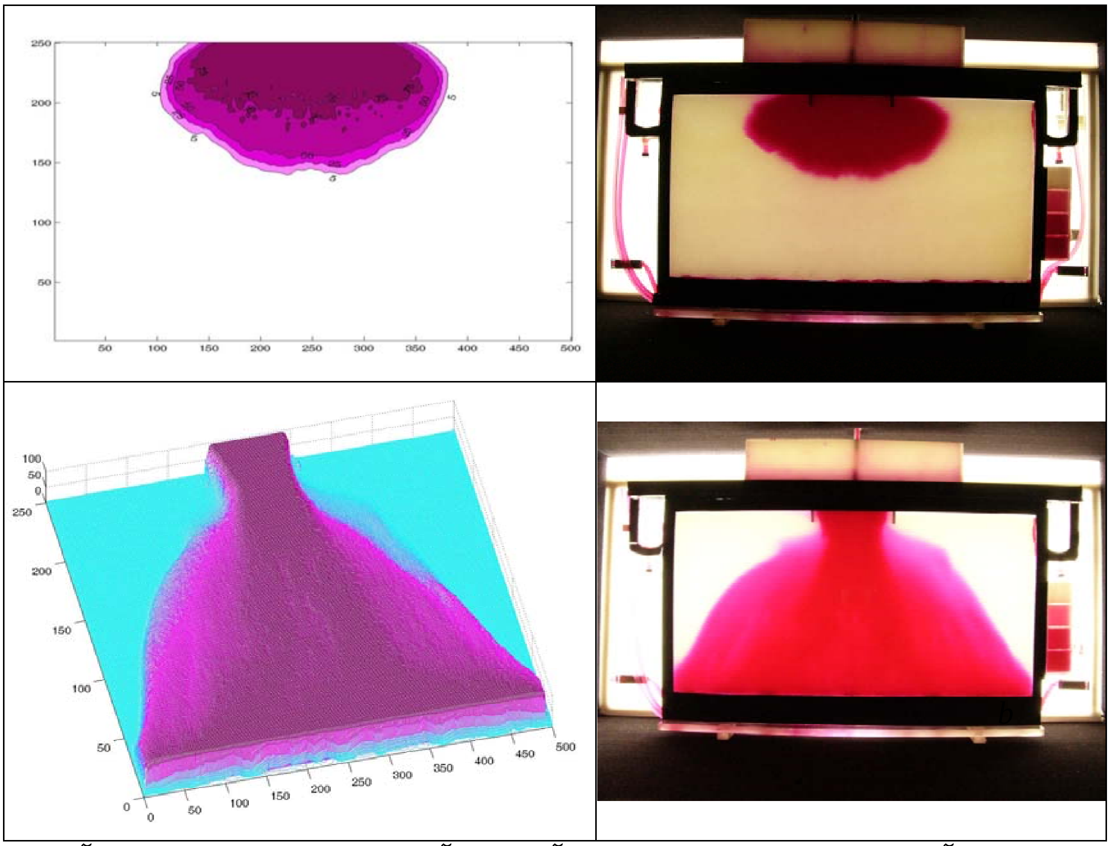
چنانچه در گام دهم الگوریتم پردازش تصاویر نیز اشاره‌شد، براي کنترل نتایج، حجم مادة رنگي وارد شده به محیط آزمایش در مدل محاسبه شده و با مقدار واقعي وارد شده مقایسه مي‌شود. این روش کمك مناسبي در تعیین میزان خطاي مدل ارائه شده و همچنین شناسایي عکسهاي مخدوش مي‌باشد. منظور از عکسهاي مخدوش، تصاویري است که به دلایلي چون عدم یکنواختي نور و یا ورود نور از پشت محیط تصویربرداري، شرایط مناسبي را براي پردازش دارا نیستند، چرا که فرضاً با ورود نور از پشت محل عکس‌برداري، انعکاس اجسام خارجي در تصاویر، شدت تیرگي نقاط را مخدوش مي‌سازد.

بنابراین براي تمام تصاویر مورد پردازش، حجم مادة رنگي موجود در تصویر اندازه‌گیري مي‌شود و به عنوان شاخصي از خطاي مدل ارائه شده، از سري خطاهاي بدست آمده، خطاي کل مدل تخمین زده مي‌شود. خطاي بدست آمده از تحلیل نتایج حداکثر برابر ۱۲± % بوده‌است.

٦- مشاهدات و نتایج

سري آزمایشها براي غلظتهاي ورودي ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ گرم بر لیتر انجام شده است که برخي از نتایج حاصل در شکلهاي(۶)و (۷) مقایسه شده‌اند. به کمك مدل پردازش تصاویر معرفي شده، نتایج تحلیل این تصاویر تهیه‌شده است.. جریانهاي ناشي از استقرار سیال با چگالي بالا بر روي محیط متخلخل اشباع ذاتاً ناپایدار مي‌باشد، اما به علت اثرگذاري عواملي چون پراکندگي و پخش مولکولي و همچنین لزجت سیال، این ناپایداري ممکن است در حرکت تودة پرچگال آشکار نشود، که اصطلاحاً جریان پایدار نامیده مي‌شود(شکل ۶-*a*). در این حالت تودة آلاینده در تمامي جهات تقریباً با یك سرعت گسترش مي‌یابد. با افزایش غلظت ورودي(و درنتیجه افزایش اختلاف چگالي دو سیال) تودة رنگي با سرعت بیشتري به سمت پایین محیط آزمایش حرکت مي‌کند(شکل ۶-*b*). زمان لازم جهت رسیدن محلول به انتهاي محیط براي اختلاف غلظت ۵۰گرم بر لیتر(آزمایش*5A*)برابر۴۳دقیقه بوده است، در حالیکه براي اختلاف غلظت۱۰ گرم بر لیتر(آزمایش*19A*) این زمان تا ۸۵دقیقه افزایش مي‌یابد.

همچنین با افزایش اختلاف غلظت، حجم محلول ورودي به محیط افزایش چشم‌گیري خواهد داشت چنانچه در آزمایش *19A* حجم محلول ورودي در ۹۰ دقیقه برابر۵۴۰ سانتیمتر مکعب بوده است در حالیکه در آزمایش *5A* این مقدار در مدت ۶۰ دقیقه برابر ۵۸۰ سانتیمتر مکعب شده‌بود. در سیستم جریان ناپایدار، اغتشاشهاي اولیة ایجاد شده در جبهة حرکت تودة آلاینده، به علت تشکیل جریانهاي همرفتي در محیط تقویت مي‌شود و الگوي حرکت آلاینده وابسته به این اغتشاشهاي اولیه



شكل ۶- *a*: آزمايش*19A*، پس از ۱۸ دقيقه از شروع آزمايش *b*: آزمايش*5A* پس از۶۰ دقيقه از شروع آزمايش

مي‌باشد. در نتيجه گسترش تودة پر چگال در جريان چگالي پايدار تقريباً مشابه با شكل اولية آن باقي مي‌ماند، در حالي كه در سيستمهاي ناپايدار، توسعة جريانهاي چند شاخه‌اي نسبت به حركت تودة سيال با سرعت بيشري صورت مي‌پذيرد. سيستم ناپايدار در محيطهاي محدود(داراي مرزهاي نفوذناپذير) مي‌تواند جريانهاي همرفتي غالبي را ايجاد كند كه بر شكل گسترش سيال ورودي اثرگذار خواهد بود. وقوع اين جريانهاي همرفتي موجب صعود سيال با چگالي كم محبوس شده ميان جبهة جريان، در داخل تودة پر چگال مي‌شود. هرچند وقوع اين پديده در گراديانهاي غلظت بالا رخ مي‌دهد كه در آلودگي آبهاي زيرزميني كمتر مشاهده شده است.

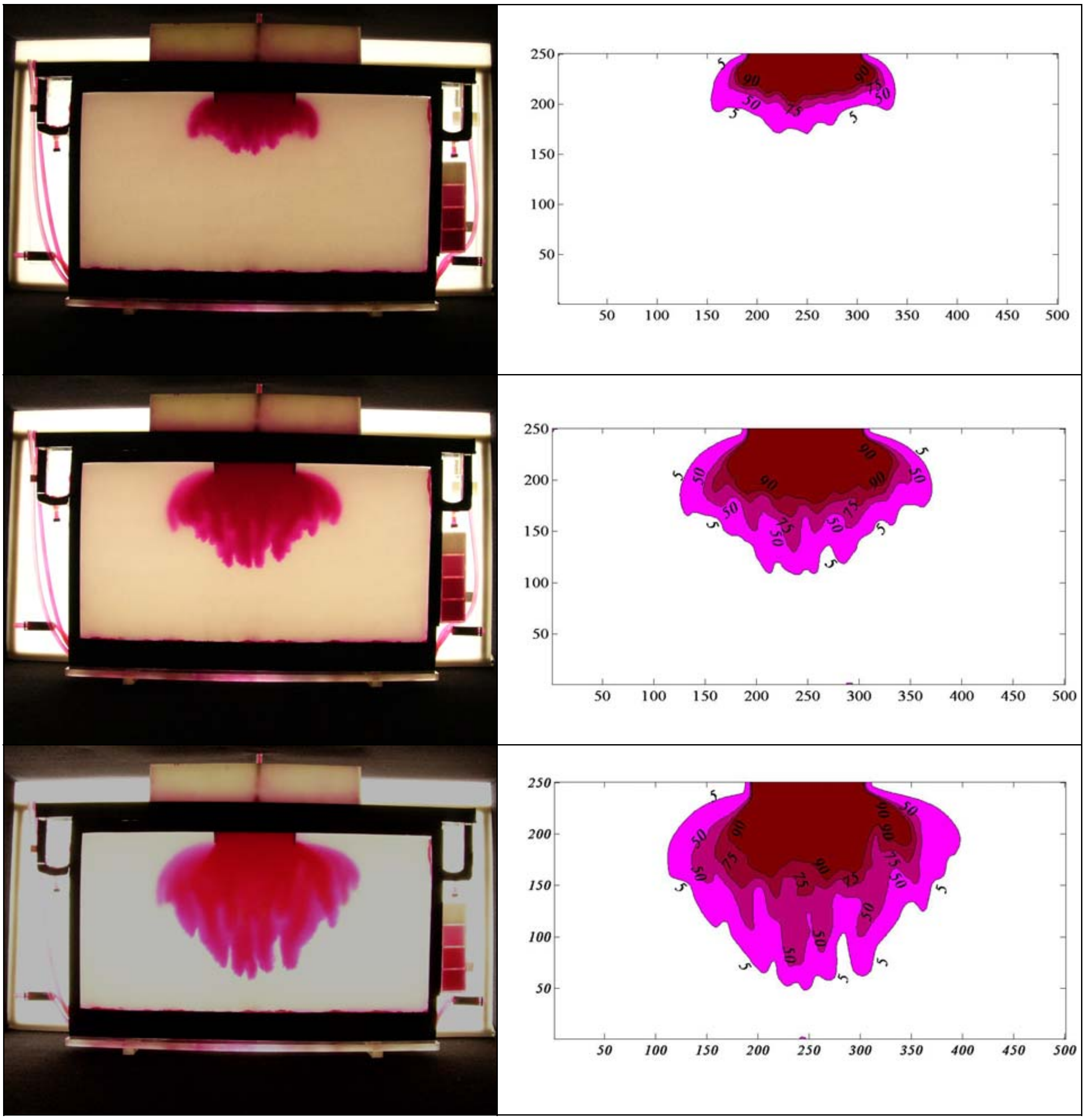
تأثير افزايش غلظت سيال ورودي بر تشكيل جريانهاي چند شاخه‌اي را مي‌توان با مقايسة آزمايشهاي*11A* و*19A* مشاهده نمود. با توجه به نتايج حاصل، سيستم جريان براي آزمايشهاي *19A*و *23A* پايدار به نظر مي‌رسد، هرچند تودة پيش‌رونده براي اين دو آزمايش نيز پس از مدت زمان ۴۰ دقيقه(آزمايش*19A*) و ۳۰ دقيقه(آزمايش*23A*) به فرم چند شاخه‌اي تبديل شده است. اولين ناپايداريها در جبهة پاييني تودة آلاينده ايجاد مي‌شود.

گسترده‌ترين ناحية تداخل و پخش در آزمايش*5A*(قبل از رسيدن به انتهاي محيط آزمايش) مشاهده شده است. دليل اين امر آنستكه با افزايش غلظت ورودي، جريان چگالي موجب گسترش جريانهاي چندشاخه‌اي شده و در نتيجه اثر پراكنش و پخش مولكولي در تودة جريان، موجب گسترش ناحية تداخل مي‌شود. جهت تحليل شرايط ناپايداري اين آزمايشها، عدد رايلي براي هر يك از آزمايشها در جدول(۲) محاسبه شده است. در محاسبة عدد رايلي سرعت جريان برابر سرعت ورودي در نظر گرفته شده است. چنانچه مشاهده مي‌شود ناپايداري در اعداد رايلي بالاتر از ٤٥ ايجاد مي‌شود و در اين آزمايشها مي‌توان عدد رايلي بحراني را در حدود ٤٠-٤٥ در نظر گرفت. هرچند عدم قطعيت پارامترهاي تعيين شده موجب عدم امكان تحليل دقيق اين مقادير شده است.

۷- خلاصه و نتیجه‌گیري

روش پردازش تصاویر روشي مناسب جهت استخراج اطلاعات نهفته در تصاویر مي‌باشد که مي‌تواند در بسیاري از مطالعات آزمایشگاهي مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات انجام شده نشان مي‌دهد حداکثر خطاي برآورد غلظت در محیط آزمایش در بیش از ۹۰٪ محیط آزمایش کمتر از ۱۲٪ خواهد بود که با توجه به محیط آزمایش دقت قابل قبولي است.

آزمایشهاي انجام شده بیانگر پیچیدگي نحوة تداخل در نحوة گسترش جریانهاي چگالي ناپایدار است. این آزمایشها براي غلظتهاي مختلف انجام شده است تا تأثیر غلظت ورودي بر نحوة تشکیل جریانهاي چند شاخه‌اي مورد بررسي قرار گیرد. هرچند تأثیر شدید شرایط آزمایشگاهي بر نحوة گسترش جریان و همچنین عدم قطعیت موجود در پارامترهاي تعیین‌شده موجب عدم امکان ارائة تحلیل قطعي شرایط پایداري مسائل شده است. نتایج حاصل را مي‌توان با نتایج مدلهاي عددي مقایسه نمود.



شکل ۷- تأثیر جریان چگالي بر گسترش جریانهاي چندشاخه‌اي، آزمایش 11A: غلظت ۲۰ بر لیتر در زمانهاي a«۱۰دقیقه، b«۲۰دقیقه و c«۳۰دقیقه پس از شروع آزمایش

جدول(۲): محاسبة عدد رايلي آزمايشهاي انجام شده

آزمايش	C_0 (*gr/lit*)	حجم محلول ورودي(cm^3)	سرعت ورودي (*m/s*)	پراكندگي(*D*) (m^2/s)	پراكندگي هيدروديناميكي (m^2/s)	عدد رايلي
19A	۱۰	٥٤۰	۱/٤۰*۱۰$^{-٤}$	٤/۲٦*۱۰$^{-۷}$	٤/۲۷*۱۰$^{-۷}$	۳٦/۲
23A	۱٥	٦۱۰	۱/٥۸*۱۰$^{-٤}$	٤/۸۱*۱۰$^{-۷}$	٤/۸۲*۱۰$^{-۷}$	٤۸/۱
11A	۲۰	۷٥۰	۱/۹٥*۱۰$^{-٤}$	٥/۹۱*۱۰$^{-۷}$	٥/۹۱*۱۰$^{-۷}$	٥۲/۱
16A	۳۰	۸۲۰	۲/۱۳*۱۰$^{-٤}$	٦/٤۷*۱۰$^{-۷}$	٦/٤۸*۱۰$^{-۷}$	۷۱/٥
5A	٥۰	۸۷۰	۲/۲٦*۱۰$^{-٤}$	٦/۸٦*۱۰$^{-۷}$	٦/۸٦*۱۰$^{-۷}$	۱۱۲/۳

۸- فهرست مراجع:

[1]-Elder, J.W.,1967. Steady free convection in porous medium heated from below. J. Fluid Mech., 27:29-50.

[2]-Elder, J.W.,1967. Transient convection in a porous medium. J. Fluid Mech., 27(3):609-623.

[3]-Kueper,B.H., Abbott,W., Farquhqr,G., 1989. Experimental observation of multiphase flow in heterogeneous porous media. J. Contaminant Hydrology,5:83-95.

[4]- Oswald, S.E., Kinzelbach, W., 2003, Three dimensional physical benchmark experiments to test variable-density flow models, Journal of Hydrology, 290: 22-42.

[5]-Qi Zhang, Volker, R.E., Lockington D.A.,2002. Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater, Adv. In Environmental Research,6:229-237.

[6]-Schincariol,R.A., Schwartz, F.W.,1990. An Experimental Investigation of Variable Density Flow and Mixing in Homogeneous and Heterogeneous Media, Water Resour. Res.,26(10):2317-2329.

[7]-Schincariol,R.A. ,Hederick, E.E., Schwartz F.W,1993. On the application of image analysis to determine concentration distributions in laboratory experiments. J. Contaminant Hydrology,12(3):197-215.

[8]-Schincariol,R.A., Schwartz F.W, Mendoza C.A.,1994. On the generation of instabilities in variable density flow, Water Resour. Res.,30(4):913-927.

[9]-Simmons,C.T., Fenstemaker,T.R., Sharp,J.M.,2001. Variable density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges, J. Contaminant Hydrology,52:245-275.

[10]- Swartz,C.H., Schwartz F.W., 1998. An experimental study of mixing and instability development in variable-density systems, J. Contaminant Hydrology,34:169-189.

[11]-Volker,R.E., Qi Zhang, Lockington,D.A. ,2002. Numerical modeling of contaminant transport in coastal aquifers. Math. Comp. Simulation, 59:35-44.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop