نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران
شماره ۱۰، صفحات ۵۶-۴۳ (۱۳۶۹)
چاپ ایران

بعضی مسائل مکانیک سیالات با اثر شناوری*

علی‌اکبر بیدختی
گروه مواد هسته‌ای
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

اثرات شناوری (buoyancy effects) تاثیر بسزائی درحرکت سیالات محیطی و همچنین در صنعت دارد. در این مقاله بعضی از این جریانها همراه با نتایج حاصل از مطالعه‌آنها به طور مختصر ارائه می‌شود. در چنین مطالعاتی مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی یک امر متداول است که در اینجا مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بعضی از مسائل مورد بحث مخلوط شدگی در جریانهای طبقه‌بندی شده نیز ارائه می‌گردد. این گونه مسائل بسیار نو هستند و اختلاف نظرهائی در توصیف آنها وجود دارد که به آنها نیز اشاره می‌شود.

مقدمه

حرکت سیالاتی که در آنها نیروی شناوری اهمیت دارد در موارد طبیعی و صنعتی مشاهده می‌شود. برای مثال حرکت و پخش‌شدگی (diffusion) گازهای سبک و یا سنگین نسبت به محیط را می‌توان ذکر کرد. در اکثر موارد، این گازها سمی و یا پرتوزا (رادیواکتیو) بوده که به طور اتفاقی در فضای زیست آزاد شده و گاهی اثرات مرگباری را به جای می‌گذارند (حادثه بوپال هندوستان ۱۳۶۵). هنگامی که سیال طبقه‌بندی شده (stratified) باشد یعنی چگالی آن با ارتفاع کم شود، طبقه‌بندی پایدار (stable stratification) بوجود می‌آید. مثلا" هنگامی که سطح زمین سرد است (هنگام غروب و یا صبح) این حالت درنزدیکی سطح زمین بوجود می‌آید و به لایه بوجود آمده لایه معکوس (inversion layer) گویند. در این صورت آلودگی هوا توسط گازهای آزاد شده (مثلا" آلودگی حاصل از دود اتومبیل‌ها) که در سطح زمین ایجاد می‌شود به کندی به طبقات بالاتر پخش می‌شود. این آلودگی بطور محسوس در شهرهای بزرگ مثل تهران در نزدیکی‌های صبح به چشم می‌خورد. بدین ترتیب، معمولا" دودکشهای کارخانجات را در سطحی قرار می‌دهند که دود ایجاد شده‌در بالای این لایه (لایه معکوس) قرار بگیرد. در این صورت لایه مزبور باعث می‌شود که آلودگی به طرف سطح زمین سرایت نکند. یک لایه معکوس در قسمت بالای اتمسفر

---

* قسمتی از این پژوهش در بخش مهندسی دانشگاه کمبریج انگلستان انجام شده است (۱۹۸۷).

وجود دارد که لایه غیرقابل نفوذ است و پخش با ارتفاع را کم می‌کند و در نتیجه پراکندگی بطور افقی در زیر آن بوقوع می‌پیوندد . نمونه بارز آن هنگام بروز آتشفشانی و یا انفجار بمب اتمی مشاهده می‌شود . دلایل فیزیکی این مکانیسم در این مقاله توضیح داده می‌شود .

پخش ماده یا حرارت به صورت مولکولی یا با جریان آشفته (molecular and turbulent diffusion) در محیطهای سیالی می‌تواند به عوامل مختلف بستگی داشته باشد . به عبارت دیگر ضریب پخش برای هر کدام از این دو می‌تواند تابع عوامل مختلفی مثل حرارت ، چسبندگی (viscosity) و یا ناهمگنی در محیط باشد . در محیطهائی که تغییرات چگالی با ارتفاع نیز وجود دارد (اثر شناوری) ، پخش از طریق آشفتگی مواد یا حرارت می‌تواند تابعی از گرادیان چگالی باشد . در این مقاله سعی می‌شود این مسئله مورد بررسی قرار گیرد . لازم به یادآوری است که در این مورد مسائل جدید زیادی که هنوز بطورقطعی حل نشده‌اند وجود دارد که تا اندازه‌ای به آنها اشاره خواهد شد .

بررسیهای نظری

نیروی شناوری در سیالات عبارتست از نیروی جاذبه زمین که بر اختلاف نسبی چگالی سیال و بر واحد جرم سیال وارد می‌شود یعنی :

$$g' = g.\ (\Delta\rho/\rho)$$

این اختلاف چگالی به دلیل اختلاف درجه حرارت در داخل سیال ، یا به علت اختلاف درجه تمرکز (concentration) یک ماده دیگر با وزن مولکولی متفاوت در سیال و یا هر دو عامل بوجود می‌آید . معمولا" یک سیال ساکن دارای تغییرات چگالی در جهت عمودی است که غالبا" در صفحات افقی این تغییرات یکسان باقی می‌ماند . به این گونه سیستم سیالی ، سیال طبقه‌بندی شده (stratified fluid) گفته می‌شود . اگر پروفایل چگالی سیال ($d\rho/dz$) درجهت عمودی پایدار باشد (که اغلب در سیستمهای مورد نظر صادق است) و جزئی از سیال با z جابجا شده ، یک نیروی بازگرداننده به آن وارد خواهد شد که آن را به موقعیت اولیه خود بازمی‌گرداند . درنتیجه سیال درحالی که چسبندگی و تغییرات فشار آن را درنظر نگیریم به صورت نوسانی حرکت خواهد کرد که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود .

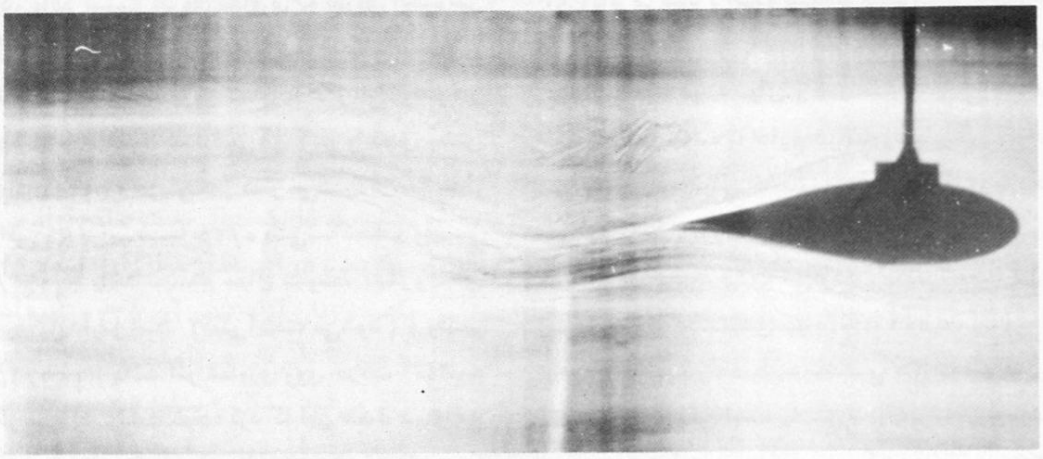
$$d^2z/dt^2 = g/\rho\ \frac{d\rho}{dz}\ Z \qquad (1)$$

که در آن z مقدار جابجائی ، t زمان و $d\rho/dz$ گرادیان چگالی سیال است . بسامد چنین نوسانی برابر خواهد شد با :

$$N = \left(g/\rho\ \frac{d\rho}{dz}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

که آنرا بسامد شناوری (Brunt-Vaisala frequencey) گویند. بنابراین یک سیال طبقه‌بندی شده قادراست امواج داخلی (internal waves) را تحمل کند . امواج داخلی انرژی خود را از حرکت آشفته سیال در چنین محیطی یا از انرژی جسمی که درداخل آن حرکت می‌کند دریافت می‌نمایند . تولید امواج داخلی توسط کشتیهائی که با سرعت بحرانی (که در زیر تعریف خواهد شد) روی دریای طبقه‌بندی شده (مثلا" دو لایه‌ای) حرکت می‌کنند ، باعث ایجاد مقاومت (drag) اضافی برای کشتیها می‌گردد (۱) . برای روشن شدن موارد تحت بررسی نمونه‌هائی بشرح زیر گزارش می‌گردد :

۱ــ در شکل ۱ نمونه امواج داخلی توسط یک جسم ایروفیلی(aerofoil body) که با سرعت بحرانی در



شکل ۱ــ تولید امواج داخلی توسط حرکت یک جسم کـه در داخل سیالی طبقه‌بندی شده حرکت مـی‌کند ، Fr~1 (۲) .

داخل یک سیال طبقه‌بندی شده در آزمایشگاه حرکت می‌کند نشان داده شده است (۲) . در اینجـا لازم است که عدد فرود (Froude number) تعریـف شود :

$$Fr = \frac{U}{N\,D} \qquad (۳)$$

که در آن U سرعت جسمی است که در داخل سیـال طبقه شده با بسامد شناوری N حرکت مـی‌کنـد و D ضخامت آن جسم است . در حالتی که Fr نزدیک به واحد باشد (U=ND) جسم بـا سـرعت بحـرانـی (critical speed) حرکت مـی‌کنـد . در آن صورت مقدار زیادی از انرژی حرکتی جسم به امواج داخلی تبدیل می‌شود . در غیـر این صورت جسـم باعث آشفتگی از نوع و یک (wake) می‌شود . تولید امواج داخلی توسط زیردریائی‌هائی که در ترموکلاین (thermocline) اقیانوس حرکت می‌کنند قـابل ملاحظه می‌باشد . امواج نامنظم داخلی در دریاهـا روی مخابرات مافوق صورتی نیز در این محیطها اثر می‌گذارد (۳) .

درجریانهای تنشی آشفته (turbulent shear flows) مثل لایه مرزی نـزدیک یـک سطـح ، تنش $\partial U/\partial z$ (shear) ، همواره بـاعث مخلوط شـدن سیال و یا زیاد شدن آشفتگی سیال می‌گردد . هنگامی که N در چنین سیستم سیالی صفر نباشد ، اثـر آن مخالف با اثر گرادیـان سـرعت (shear) ، سیـال است .

در اینجا با این دو عامل یک عـدد بـدون بعـد تعریف می‌شود که به عدد گرادیان ریچاردسون معروف اسـت . (Richardson gradient number)

$$R_i = \frac{N^2}{(\partial U/\partial z)^2} \qquad (۴)$$

با وجود اینکه Ri میزان پایدار بودن حرکت سیال به طرف آشفتگی را مشخص می‌کند ، چنانچه حرکت سیال بدون تنش باشد آن را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$R_i = \frac{g.(\Delta\rho/\rho).Z}{U^2} \qquad (۵)$$

R_i در واقع نسبت نیروی شناوری به نیروی اینرسی سیال است . هر چه این عدد بزرگتر باشد میزان آشفتگی سیال توسط نیروی شناوری کمتر می‌شود و در نتیجه میزان مخلوط کنندگی آن کم و عمل پخش (diffusion) جریان نیز کمتر می‌گردد . مقدار بحرانی R_i برابر با ۰/۲۵ می‌باشد . وقتی $R_i >> 0/25$ باشد سیستم سیال توسط نیروهای شناوری پایدارتر است (کمتر آشفته می‌شود) و وقتی که $R_i < 0/25$ باشد اثر شناوری روی حرکت آشفته بی‌اثر می‌ماند . باید توجه کرد که این عدد در واقع عکس مربع عدد داخلی فرود (Froude internal number) است . در این تعریف ها فرض شده است که در حرکت سیال حالت هیدرواستاتیکی تقریبی و فرضیه تقریبی بوسینسک (Boussinesq approximation) صادق است . یعنی تنها قسمتی که درمعادله حرکت ، تغییر چگالی سیال اهمیت دارد قسمتی است که شامل g (شتاب ثقل) می‌باشد و در سایر قسمتها تغییرات ρ در نظر گرفته نمی‌شود .

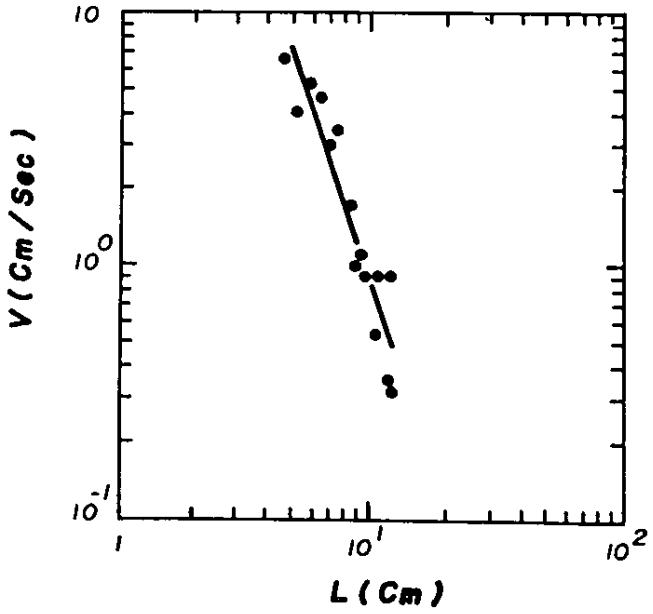
مطالب بالا بیشتر راجع به اثرات شناوری در مکانیک سیالات می‌باشد و به طورکلی نشان می‌دهد که این عوامل چگونه روی آشفتگی سیال یا حرکت کلی سیال اثر دارند . در ادامه مطلب لازم است اثر شناوری که خود عامل اصلی حرکت سیال می‌باشد توضیح داده شود . نیروی شناوری که به علت اختلاف چگالی سیال آزاد شده با چگالی سیال محیطی که در آن آزاد می‌شود بوجود می‌آید ، عاملی اصلی حرکت است . نمونه این حالات حرکت توده‌ای سیال (plume) است که یک همرفت (convection) موضعی است و هنگامی که یک سیال سبک از یک نقطه در محیطی که نسبت به خود سنگین است به طوریکنواخت آزاد شود بوجود می‌آید . در ابتدا سیال سبک دارای اندازه حرکت (momentum) کمی است ولی به علت نیروی شناوری (buoyancy force) اندازه حرکت آن زیاد می‌شود ، البته توسط مکانیسم مخلوط‌شوندگی داخلی (entrainment) که به علت آشفتگی خود توده سیال و همینطور تنشی که بین سیال داخل توده با خارج در مرزهای آن بوجود می‌آید ، توده سیال خاصیت شناوری خود را با محیط در اندازه‌های بزرگتری پخش می‌کند . اندازه حرکت آن نیز در محیط جذب می‌گردد . باید توجه داشت که اگر محیط طبقه‌بندی شده (stratified) باشد پدیده جذب در محیط به سختی صورت می‌گیرد . توده سیال ممکن است بصورت افقی تا مسافتهای زیاد حرکت کند و در حین حرکت حالات مختلفی (مارپیچ یا انشعابی) بخود بگیرد . در حالاتی که لایه معکوس وجود دارد ، محتوی توده سیال که‌دریک ارتفاعی از سطح زمین (مثلا " از دودکش یک کارخانه که ممکن است در صورت غلیظ بودن سمی باشد) آزاد می‌شود ، ممکن است در فاصله‌ای افقی از منشاء خود به سطح زمین برسد و در این صورت ممکن است اثرات سوئی را در برداشته باشد . بنابراین در کار گذاشتن اینگونه دودکشهای صنعتی و یا مربوط به نیروگاههای تولید برق ، باید محل استقرار اینگونه دودکشها را به طور دقیق با چگونگی شرایط محیط و آب و هوا انتخاب نمود (۴) . حرکت توده‌ای سیال در آزمایشگاه نیز می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرند (۵) . در این مطالعات اغلب راههای خود شباهتی (self-similarity) که حرکت سیال شکل خود را از نظر دینامیکی و هندسی محفوظ نگاه دارد و نیز تحلیل ابعادی (dimensional analysis) بکار برده می‌شود . استفاده از این روشها دراین نوع مطالعات و تحلیل چنین مسائلی حائز اهمیت است . اگر حرکت توده‌ای سیال به صورت تناوبی و یا منقطع باشد یا به عبارت دیگر به صورت یک حجم شناخته شده در زمانی کوتاه آزاد گردد ، به‌آن توده گرمائی (thermal) گویند . نمونه بارز آن حرکت ابر گرمی

است که در اثر انفجاریک بمب در سطح زمین بوجـود می‌آید . اینگونه حرکت سیالی اگـــر دارای انـــدازه حرکت اولیه زیاد باشد بـــه صورت فـــواره شنـــاوری (buoyant jet) درخواهد آمد . در ابتدای حرکت سیال اندازه حرکت در پراکندگی سیال آزاده شده و در مراحل بعدی نیروی شناوری اهمیت پیدا می‌کند ، هنگامیکه $M = F_o . t$ باشد این تبدیل انجام می‌گیرد ، که در اینجا F_o برابر نیروی شنـــاوری کـــه بـــرابـــر $Q_o . g . \Delta\rho/\rho$ بوده و Q_o حجم آزاد شده سیال و M اندازه حرکت اولیه یا $(U_o . Q_o)$ و t زمان این تبدیل است . درحرکت توده‌های ابری سیـــال بـــا وضعیت گرمائی که دارای اندازه حرکت اولیه هستند یک نـوع Fr تعریف می‌شود که عبارت است از :

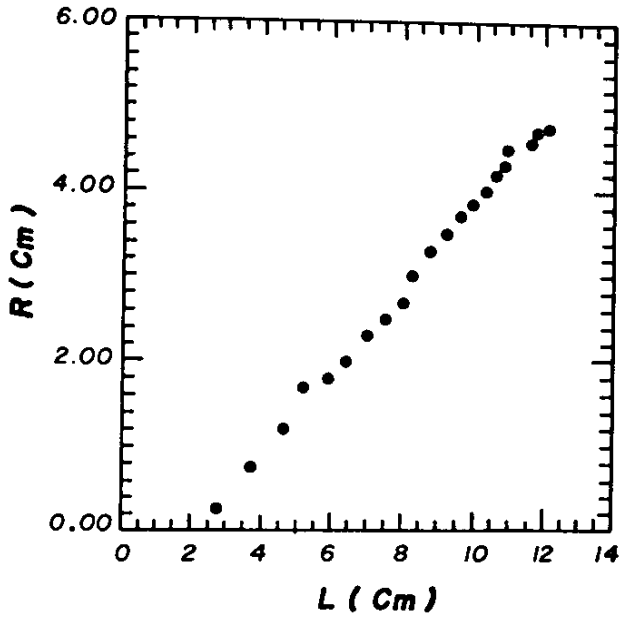
$$F_r = \frac{Q_o . U_o}{(Q_o . g . \Delta\rho/\rho)^{1/2} . Q_o^{2/3}} \qquad (۶)$$

که در آن Q_o حجم سیـــال (سبک یـــا سنگین) آزاد شده در واحد زمان و U_o سرعت اولیه آن است . F_r اهمیت زیادی در مدل‌سازی فیزیکی این نوع جریانها دارد .

۲ــ در این قسمت موردی از یک جت ناگهانی سیـــال سنگین که در یک سیال سبکتر ساکن آزاد می‌شود ارائه می‌گردد . در آن مقدار سیال آزاد شده ۴۵ سانتیمتر مکعب و زمان آزاد شدن آن ۰/۳۵ ثانیه است . جت به صورت دایره‌ای در فاصله‌ای از سطح اساس(base) آزاد می‌شود . شکل ۲ نشاندهنده سرعت مـــرکـــز ابر تولید شده این سیستم است و شکل ابر تولید شده بعد از آزاد شدن به صورت یک طوق(torus) می‌بـــاشد ، که برحسب مسافت از چشمه ترسیم شـــده است (۶). رابطه $V \propto L^{-3}$ که توسط راههای خود شباهتی ریاضی بـــدست آمده است در این شکل دیده می‌شود . سرعت



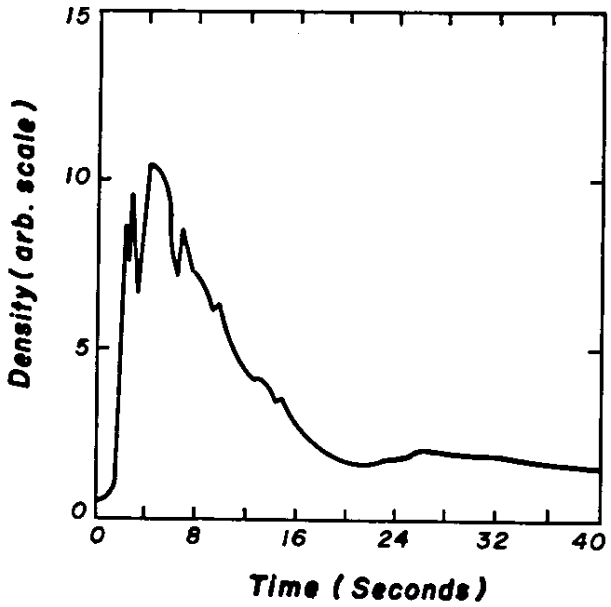
شکل ۲ــ سرعت افقی V یک جت طوقی(torus) که در آزمـــایشگاه تولید شده است برحسب مسافتی که از منشاء خود طی کرده است (۶).



شکل ۳ــ شعاع مقطع جت برحسب مسافت طی شده (۶) .

جت با توان ۳ کاهش می‌یابد ، یـــا میـــزان انـــرژی جنبشی آن در محیط پخش می‌شود . شکـل ۳ نشان ــ دهنده شعاع ابر بر حسب مسافت از منشاء است کـــه تقریبا " خطی است یعنی $R=\alpha L$. اثر شکل هندســی چشمه در این شکل منعکس شـــده است . در مـــرحله ابتدای تکامل جریان سیال اندازه حرکت مربوط بـــه سرعت اولیه جت اهمیت دارد . در مـــراحل بعـــدی اهمیت بیشتری به نیروی شناوری داده می‌شود و ابـر از سطح آزاد شده (که در یک ارتفاعی از سطح اساس سیستم وجود دارد) بطرف پائین حـــرکت مـــی‌کند و وضعیت حرکت توده‌ای سیال که به طـــور منقطع آزاد شده باشد را بخـــود می‌گیرد . در این قسمت قوانین مربوط به حرکت گرمایی درآن صدق می‌کند . وقتی‌که به سطح زمین می‌رسد یک جریان جاذبه‌ای (gravity current) تشکیـــل مـــی‌دهـــد . شکـــل ۴ غلظت (concentration) ابر را در هنگامی که بـــا سطح زمین تماس پیدا می‌کنـــد نشـــان مـــی‌دهـــد . غلظت بالاترین نقطه این شکل ۲/۳% غلظت سیال آزاد شده اولیه است . در این آزمایش $\Delta\rho/\rho = 0/001$ که $\Delta\rho$ تفاوت چگالی سیالی آزاده شده با سیال محیط و ρ چگالی سیال محیط می‌باشد و مقدار F_3 برابـــر ۴/۵ بوده است .

نوعی دیگر از این جریانها حالتی است کـــه یـــک سیال سنگین به طور ناگهانی یـــا یکنـــواخت در یک محیطی که از نظر چگالی سبکتـــر است آزاد گـــردد . این اختلاف چگالی عامل نیروی اصلی حرکت سیـــال آزاده شده می‌باشد . سیال آزاد شده روی سطح زمین در زیر سیال محیط پراکنده می‌شود در حالـــی کـــه توسط پدیده مخلوط شدن در سطح تماس بـــا محیـــط خود مخلوط و رقیق می‌گردد . این گـــونـــه حرکت را حرکت جاذبه‌ای می‌گوینـــد (gravity driven flows) که مثال بارز آن آزاد شدن یک گاز سنگین



شکل ۴ـ تمرکز برحسب درصد محتوی جت نسبت به چگالـی سیال اولیه آزاد شده هنگامی که ابر تولید شده از جت بـه سطح پایه می‌رسد . (تمرکز در قله منحنی ۲/۳٪ است) (۶) .

پرتوزا (رادیواکتیو) و یا سمی در محیط است .

۳ـ حرکت نوع‌گرانی (gravity driven flow) را درآزمایشگاه بطور فیزیکی و بطور ریاضی با استفاده از کامپیوتر می‌توان مـدل‌سازی کـرد . در شکـل ۵ نتایج مقدماتی یک مدل ساده ریاضی حـرکـت یـک سیال سنگین که بطور دائمی و یکنواخت از یک چشمه به ارتفاع ۳ متر و پهنای ۲/۵ متـر و بـا چگـالـی $2/6\ Kg/m^3$ در سطـح زمیـن بـا حـرکت هـوا ($\rho a = 1/25\ Kg/m^3$) به سرعت متوسط $5\ m/s$ آزاد می‌گردد را نشان می‌دهد . در این نتیجه ابتـدائی پهنا W(m) ، ارتفاع H(m) و غلظت (C%) ابـری که در اثر آزاد شدن گاز سنگینی بوجود مـی‌آید بـر حسب مسافتی که حرکت کرده است ترسیم شده‌است . میزان گاز آزاد شده برابر با $30\ m^3/s$ است کـه در واقع یک پدیده یا اندازه واقعی را نشـان می‌دهـد .

رابطه $W \propto x^{2/3}$ که توسط یک روش تحلیلی بـدست آمده است در شکل ۵ دیده می‌شود . ارتفاع ابـر در ابتدای آزاد شـدن کـم مـی‌شـود و سپس افـزایش می‌یابد . در ابتدا هنگامی که تفاوت چگالی دوسیال زیـاد اسـت ، میـزان مخلـوط شـدن داخلـی (entrainment) در سطح تماس بالائی ابـر جزئی است وآن به‌این علت است که $Ri >> 0/25$ می‌باشد. درهنگامی که به‌حالتی با $Ri << 0/25$ می‌رسد باید معادله حالتی را به کاربرد که محیط ابـر را بـه‌طور بی‌اثر (passive) از نظر دینامیکی پـراکنـده کند . همینطور چشمه سیال آزاد شده ازنظر شکل هندسی و نحوه آزاد شده باید به‌طور جداگانه مدل‌سازی شود . این نتایج از نظر کیفی رفتار چنین سیستم سیالـی را نشان می‌دهد ولی از نظر کمی اهمیت آن کمتر است . با حل مسائل مذکور کمی بـودن نتایـج نیـز معتبـر

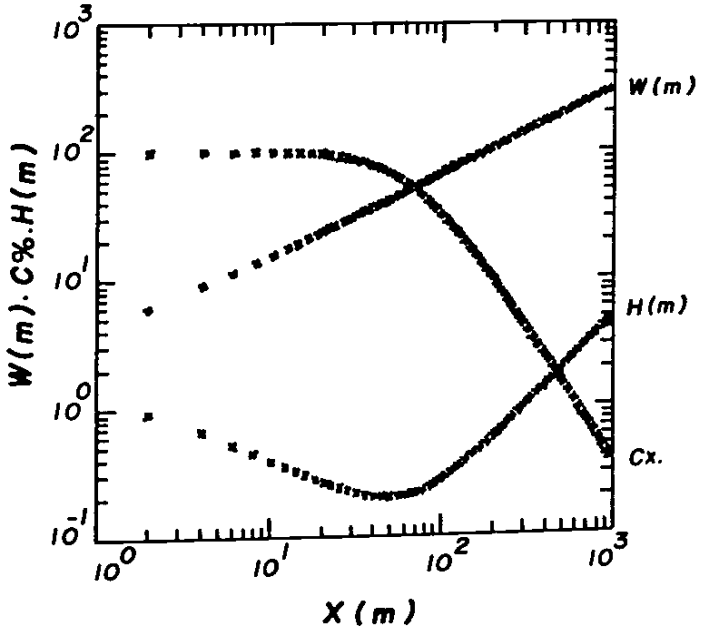
خواهد شد (۸) .

نحوه اندازه‌گیری و مطالعه سیالات آشفته

همانطور که ذکر گردید معادلاتی که حرکت سیال آشفته را بیان می‌کنند اغلب از نظر ریاضی پیچیده‌اند . سیستمهای سیالی عموما " دارای دینامیک غیرخطی و نامنظم (chaotic motion) هستند و استفاده از کامپیوتر برای حل معادلات و تعیین خواص اینگونه سیستمهای سیالی متداول است .

در این مطالعات هنوز ضرایب تجربی را که در آزمایشگاه از مدل‌سازی فیزیکی آنها به دست می‌آید استفاده می‌کنند (۹) .

در مدل‌سازی فیزیکی حرکت سیالات باید شبیه اعدادبی‌بعد (non-dimensional number) یک سیستم سیالی مورد مطالعه را با استفاده از شرائط آزمایشگاهی به‌وجود آورد . تشابه هندسی و برابر بودن اعداد بی‌بعد در دو حالت ضروری است . البته باید توجه داشت که در این مدل‌سازیها بعضی اوقات برابر قرار دادن اعداد بی‌بعد امری مشکل است و در این حالت سعی می‌گردد اعدادی که مهمتر هستند نزدیک به‌هم باشند . این اعداد بدون بعد که در مقدمه تعدادی از آنها ذکر شد در این گونه سیالات ، شامل Ri ، Fr و R= UL/ν می‌باشند . R را عدد رینولدز (Reynolds number) می‌نامند که برابر نسبت نیروی اینرسی به نیروی چسبندگی سیال می‌باشد که در آن L اندازه سیستمی است که حرکت سیال در آن صورت می‌گیرد و ν را چسبندگی سینماتیکی سیال می‌نامند . Pr=ν/k و Pe= UL/k به ترتیب اعداد بی‌بعد پرانتل (Prantel number) و پکلت (Peclet number) می‌باشند که در آنها



شکل ۵– پهنا ، ارتفاع و تمرکز یک ابر آزاد شده که در ابتدا دارای چگالی دو برابر چگالی هوا و در محیط بطور یکنواخت است ، بر حسب مسافتی که ابر حرکت کرده است .

ضریب پخش مولکولی می‌باشند . مطالعـه سیالات ممکن است از چهار طریق صورت گیرد :

۱ـ مدل سازی فیزیکی با در نظر داشتن اعداد بی‌بعدی که معرف حرکت سیال است (۲ و ۶) .

۲ـ مطالعه حرکت سیال در هنگـام وقـوع در محیط (full-scale) یا مطالعه تجربی حرکت سیال که از نظر اندازه خیلی نزدیک به نوع سیستـم سیـالی مورد نظر باشد و در محیط بزرگ صورت گیرد . ایـن نوع مطالعات معمولا" پرخرج می‌باشد (۱۰) .

۳ـ مدل کردن کامپیوتری ، کـه عبـارتست از حـل معادلاتی که حرکت سیستم سیالی را بیان مـی‌کننـد (اندازه حرکت ، پیوستگی ، انرژی ، چگالی و غیـره) یا حداقل با فرضیات زیاد که حدودا" حرکت سیـال را تعریف می‌کنند . این نـوع مـدل کـــردن اغلب کاربردهای زیادی دارد و معمولا" بـــه صورت کلـی حرکت سیال را می‌توان به این وسیله مطالعـه کـود بدون اینکه توجهی به جزئیات آن داشت (۸) .

۴ـ حل و شبیه‌سازی کـامل (full simulation) معادلاتی که حرکت سیال را بیان مـی‌کنند معمـولا" نیاز به کامپیوترهای بزرگ با قدرت حـــافظه زیـاد دارد . اینگونه مطالعات هم‌اکنـون بـا بـهتـر شدن کامپیوترها از نظر قدرت حافظه و سرعت محاسبـه‌ای متداول شده است . البته باید در نظـر داشت کـه هنوز هم در این زمینه فرضیاتی بکار می‌رود (۱۱) .

در روشهای آزمایشگاهی (۱۲) برای مدل سـازی حرکت سیالات قسمتهای مختلفی در معادله‌هائی که خاصیت سیستم سیالی را بیان می‌کند وجود دارد که باید حتی‌الامکان بطور دقیق اندازه‌گیـری شـونـد . مثلا" در معادله انرژی یک جریان آشفته تنشی با اثر شناوری ، در حالیکه سیال دارای خاصیت غیـرقابل فشردگی (incompressible) باشد که از معادله نویر استوک (Navier-Stokes equation) حاصل شده عبارت

$$\overline{\partial q^2}/\partial t + \overline{\partial q^2 w}/\partial z = \quad (۷)$$

$$-\overline{uw}\,\frac{\partial u}{\partial z}\,(1/\rho)\,\partial\overline{wp}/\partial z$$

$$-(g/\rho)\,\overline{\rho w} + \nu\nabla^2\,ui$$

که در آن :

$$\overline{q^2} = (1/2)\,(\overline{u^2}+\overline{v^2}+\overline{w^2}) \qquad (۸)$$

مجموعه انرژی از سه مولفه سرعت سیال می‌باشد . این معادله مثلا" انرژی جریان آشفته که دارای $\partial\rho/\partial z$ می‌باشد و روی یـک سطح (boundary layer) حرکت می‌کند را بیان می‌کند . بعضـی از قسمتهـای این معادله که از میانگین معادله حرکت سیـال به‌ـ دست آمده را می‌توان در آزمایشگاه انـدازه گرفت . مثلا" $\overline{q^2}$ ، $\overline{-uw}$ و $\overline{\rho w}$ که به‌تـرتیب عبـارتنـد از انرژی جنبشی حرکت آشفته در واحد حجـم سیـال ، شار اندازه حرکت (momentum flux) و شارچگالی (mass flux) (یاماده ، یا حرارت) را می‌توان در آزمایشگاه اندازه گرفت . جملاتـی شبیـه $\overline{wp}$ کـه عبـارتست از همبستگی (correlation) تغییـرات فشار با تغییرات مولفه عمودی سرعت آنی سیال ، در آزمایشگاه به‌ندرت قابل اندازه‌گیـری است و معمـولا" خیلی کوچک است . جملاتی شبیه $\overline{q^2 w}$ نیز به سادگی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند . جمله‌هایی کـه قـابـل ملاحظه و مهم باشند اندازه‌گیری شده و با استفاده از کمیتهای اندازه‌گیری شده می‌توان سیستم سیـالـی را به‌طور کمی فرمول‌بندی کرد . البته باید ذکر کرد کـه قبل از اندازه‌گیری کمی سیال ، مطالعات فیزیکی ساده که یک راه بسیار متداول آن مشاهدات عینی حـرکت سیال است ضروری است . مشاهدات عینی با استفاده از عکس‌برداری و یا فیلمبرداری برای اندازه‌گیری کمی حرکت سیال نیز استفاده می‌شود . البته هدف اصلی

آن یک شناخت فیزیکی از سیستم سیال است که قبل از فرمولبندی آن ضروری است . دستگاههای اندازه‌گیری کمی حرکت سیالات متنوع هستند و نوع بسیار متداول آن استفاده از یک کاوشگر (Probe) کوچک است که براساس انتقال حرارت توسط جریان الکتریکی در آن کار می‌کند . هر قدر سرعت سیال از روی کاوشگر زیادتر باشد میزان انتقال حرارت زیادتر و میزان توان مصرفی آن زیادتر می‌شود که با استفاده از توان مصرف شده می‌توان به سرعت سیال پی‌برد .

این دستگاه که در آن کاوشگر یک بازوی پل وینستون را تشکیل می‌دهد به hot-film (wire) anemometer معروف است . کاوشگرهای سرعت می‌توانند به‌طور عمودی یا با زاویه‌ای که معمولا " 45° نسبت به جریان سیال است قرار گیرند . در حالت دوم ممکن است از دو یا سه کاوشگر استفاده کرده و به مولفه‌های سرعت حرکت سیال پی‌برد . در این حالت می‌توان جمله‌هایی شبیه $-\overline{uw}$ یا Reynolds stress یعنی تطابق دو مولفه را اندازه گرفت (۱۳) . کوچکترین مقیاس آشفتگی (در حرکت آشفته سیال) که با کاوشگرهای سرعت می‌توان اندازه گرفت معمولا " بسیار کوچک است . مثلا " برای کاوشگر فیلم داغ (hot-film) بسامد پاسخ (frequencey response) آن می‌تواند ۵۰ kHz و تفکیک فضایی (spacial resolution) آن حدود 1mm باشد .

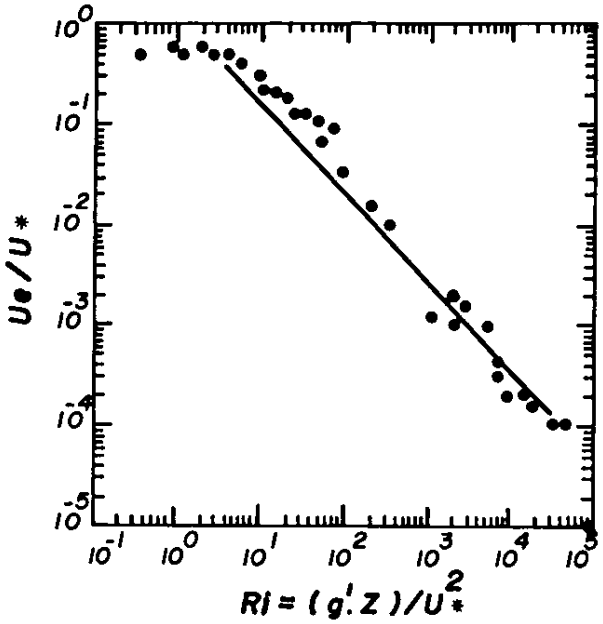
با استفاده از یک یا دو کاوشگر سرعت همراه با یک کاوشگر با خاصیت متفاوت (مثلا " حرارت یا میزان هدایت سیال) می‌توان شار را اندازه گرفت ($\overline{pw}$ یا $\overline{Tw}$) . شارها اهمیت زیادی در فرمول‌بندی کمی انتقال حرارت یا ماده در محیط سیال دارند .

از کاوشگرهای دیگر جریانهای آشفته می‌توان نوع حرارتی و هدایتی را نام برد . نوع حرارتی می‌تواند یک کاوشگر سرعت (hot-wire) باشد که حالت انفعالی (passive) دارد . نوع هدایتی آن که هدایت الکتریکی سیال آشفته را در یک نقطه اندازه‌گیری می‌کند ، مثلا " میزان هادی بودن آن بستگی به غلظت املاح موجود در آب و نهایتا " چگالی آن دارد (۲) . نتیجتا " می‌توان چگالی آب را اندازه گرفت . در گازها نیز کاوشگرهای سرعت و ماده استفاده می‌شوند . کاوشگرهای سرعت در گازها مثل نوعی که در مایعات بکار می‌رود هستند ، با این تفاوت که کاوشگر دارای فیلم عایق نمی‌باشد (در مایعات هادی روی کاوشگر سرعت سیال فیلم نازک شیشه‌ای کوارتز جهت عایق کردن الکتریکی آن به کار می‌رود) .

برای اندازه‌گیری مواد آلی (مثل گازهای آلی در گازها می‌توان از پدیده‌ای استفاده کرد که به آشکارساز یونش شعله‌ای (flame ionization detector) معروف است (۱۴) . این نوع اندازه‌گیری دارای پاسخ سریع می‌باشد و از پدیده‌ای که در آن گاز نمونه‌برداری شده سوخته و یونیزه می‌شود و با الکترودهائی که میزان گازهای یونیزه شده را اندازه‌گیری می‌کند ، استفاده می‌کند . روش دیگری که در اندازه‌گیری سرعت در حرکت سیالات متداول است نوع سرعت سنج دوپلری لیزری (Laser Doppler anemometer, LDA) می‌باشد . این روش در سیالاتی که چگالی آنها یکنواخت است استفاده می‌شود . دستگاه سرعت سنج دوپلری لیزری براساس جابجائی (shift) دوپلر کار می‌کند . در حرکت سیالات آشفته که دارای اثرات شناوری (به علت اختلاف چگالی) هستند ، LDA کاربرد محدودی دارد ، چون تغییرات چگالی در نقطه اندازه‌گیری پرتو لیزر را پراکنده می‌کند . برای جزئیات در روش‌های مختلف می‌توان به کتابهائی که در مآخذ آمده‌اند ، مراجعه کرد (۱۳ و ۱۵) .

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله بعضی از سیستمهای سیالی آشفته که



شکل ۶ـ تابعیت سرعت مخلوط شدگی یک سیال آشفته طبقه‌بندی شده برحسب عدد کلی ریچاردسون (۱۸) .

در آنها اثر شناوری اهمیت دارد ، بـررسی شـدند . همچنین به نمونه‌هائی از مطالعه این‌گونه دستگاههای سیالی به‌طور فیزیکی و یا ریاضی اشاره شد .

در محیطهائی که از نظـر چگـالـی طبقـه‌بنـدی شده‌اند ، عمل پخش توسط دو عامل صورت می‌گیـرد که این دو عبارتند از : نوع مولکولی و نوع آشفتگـی که با یکدیگر از نظر مکانیسم تفاوت دارنـد و بـایـد به‌طور مستقل مورد مطالعـه قـرار گیـرنـد . در این دستگاههای سیالی پخش از طریق آشفتگی که منجر به مخلوط شدگی داخلی (entrainment) مـی‌شـود تابعی از قدرت طبقه‌بندی سیال یعنی عدد ریچارد ـ سون Rj می‌باشد . در این تابعیت پخش مولکـولـی یعنی عدد پکلت(Peclet number) نیـز اهمیت دارد که باید در هر گونه مدل‌سازی فیزیکی این نـوع سیالات در نظر گرفته شـود (۵) . بستگـی سـرعت مخلوط شدگی داخلی ، Ue/U (که توسط سرعت اصلی سیال بدون بعد شده است) به Rj در شکل ۶ دیـده می‌شود .

نوع محور Ri به نوع آزمایشی کـه در آن عـامل مخلوط شدگی (mixing) ممکن است داخلی (مانند ناپایداری در داخل سیال) یا خارجی (توسط عوامل خارجی در سطح و یـا در داخـل صـورت مـی‌گیـرد) باشد ، بستگی دارد (۵) . بستگی این نوع مخلوط ـ شدگی(entrainment) که عامل بسیـار مهمـی در پخش ماده یا جرم دریک محیط سیال طبقه‌بندی شده است به Ri هنوز بطور مشخص مفهـوم نشـده اسـت ، ولی نتایجی شبیه آنچه که در شکل ۶ دیده می‌شـود هم‌اکنون از نظر عملی مورد استفاده قرار مـی‌گیـرد . عمل پخش توسط مخلوط شدن در محیطی که از نظـر چگالی طبقه‌بندی شده باشد ، تـوسط آزمـایشهـای کلاسیکی(grid-turbulence experiments) مطالعه می‌شود و نشان می‌دهد که شار جرم یا ازدیاد

انرژی پتانسیل سیستم بطور محسوسی تابعی از Ri است (۱۷ ، ۱۶ ، ۱۱) وآن به این معنی است که شار می‌تواند مثبت یا منفی باشد . منفی بودن شار بدان معنی است که انرژی پتانسیل سیستم کم می‌شود . یعنی عمل عکس مخلوط شدگی صورت می‌گیرد (counter-gradient flux). این پدیده هم‌اکنون در آزمایشگاه مشاهده شده است و برای اخذ اطلاعات بیشتر مورد بررسی است (۱۷).

البته بعضی از پژوهشگران معتقدند که مکانیسمی بدین‌گونه امکان‌پذیر نیست و علت اصلی این مشاهده تولید امواج داخلی است که در چنین سیالی توسط آشفتگی به‌وجود می‌آید (۱۷).

References

1- J. Lighthill, Waves in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge (1978).

2- A. Bidokhti and R. Britter, Feasiblity Study on A Stratified Shear Flow Cambridge University, Eng. Dept, Report to Top-Express (1985).

3. R.C. Spindel, Sound Transmission in the Ocean, Ann Review Fluid Mech, 17, 217 (1985).

4. S.R. Hanna, Handbook on Atmospheric Diffusion, U.S. Dept. of Energy (1982).

5. J.S. Turner, Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press (1979).

6. A. Bidokhti and R. Britter, Impulsive Annular Releases of Negatively Buoyant Fluid, Cambridge University, Eng. Dept. Report No. 2029/212 (1987).

7. R. Britter, The Ground Level Extent of a Negatively Buoyant plume in turbulent Boundary Layer, Atmospheric Environment. Vol. 14, 779 (1980).

8. A. Bidokhti, A Numerical Model of Heavy Gas Dispersion, Submitted to AEOI Scientific Bulletin (1989).
9. P. Bradshow, Turbulence (Chapter 5), IN Topics in Applied Physics, Springer-Verlag (1976).
10. J. Maquid and B. Roebuck, Large Scale Field Trial on Dense Vapour Dispersion, Health and Safety Exective, Safety Eng. Lab., Sheffield, U.K. (1985).
11. J.J. Riely, R.W. Matcalfe and M.A. Weissman, Simulation of Homogeneous Turbulence in Stratified Flows, In Non-Linear Properties of Internal Waves, AIP Conf. Proc. No. 76 pp. 79 (1981).
12. D.C. Stillinger, K.N. Helland and C.W. Van Atta, Experiments on the Transition of Homogeneous Turbulence to Internal Waves, J. Fluid Mech. 131, 91 (1983).
13. J.O. Hinze, Turbulence, McGraw-Hill New York (1975).
14. A. Bidokhti, R. Britter and N. Collings, Flow in an MOCVD Reactor Inlet, CUED Report to Optical Devices Division (STC), Devan (1988).
15. P. Bradshow, An Introduction to Turbulence and its Measurement, Pergamon Press, (1975).
16. A. Bidokhti and R. Britter, Development of a Multilayer Density Stratified Shear Flow Facility, In Proc. of 3rd. Inter. Con. Wind and Water Tunnel Modelling of Atmospheric Flows and Dispersion, Lausanne, Switzerland, (1986).
17. D.D. Stretch, Dispersion of Slightly Dense Contaminant in Turbulent Boundary Layer, Ph.D. Thesis, Cambridge University (1986).
18. J. Havers and T.O. Spicer, Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier-than-air Mixtures, Final Report to U.S. Coast Guard, Report No. CG-D-23-85, (1985).

SOME TURBULENT FLOWS WITH BUOYANCY EFFECTS

A.A. Bidokhti
Material Research Group
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

Buoyancy effects have importnat influence on the motion of fluids in the environment and in industry. In this article, some of these flows are mentioned and examples of case studies of such flows are briefly given.

In study of these flows, physical and mathematical modellings are common. The problem of modelling has been considered with particular attention to the former method. Some of the views, concerning the entrainment processes in stratified flows, have also been mentioned. These problems are new and some controversial views still exist over them which are pointed out here.