

رها شدن ناگهانی ترمال طوقه‌ای با شناوری منفی

عباسعلی علی‌اکبری بیدختی* و فاطمه مالکی‌فرد**

*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۴۴-۱۴۱۵۵

**سازمان هواشناسی کشور، صندوق پستی ۴۶۱-۱۳۱۸۵

(دریافت مقاله: ۸۳/۲/۱۳، پذیرش مقاله: ۸۳/۴/۱۶)

چکیده

رها شدن شعاعی و ناگهانی شاره‌های غیرچگال و چگال در شرایط محیطی همگن و بدون حرکت مدل‌سازی می‌شود. به‌ویژه، وضعیت ساده‌ای در نظر گرفته شده است که در آن شاره محیط آرام و بدون چینه بندی چگالی است و چگالی شاره رها شده برابر یا بیشتر از چگالی محیط است. ابعاد شاره رها شده با فاصله از چشمه به صورت خطی افزایش می‌یابد و ابری چینه‌های تشکیل می‌دهد که حرکت آن بر اثر درون‌آمیختگی کند می‌شود. هنگامی که شاره رها می‌شود چگال‌تر از محیط است، مرحله برتری تکانه بعد از مدتی به برتری شناوری تبدیل می‌شود و ابر، تحت تاثیر شناوری منفی خود، در فاصله‌ای از چشمه به طور قائم به پایین حرکت می‌کند. هنگام رسیدن به سطح مینا (زمین)، جریان گرانی با تقارن شعاعی تشکیل می‌دهد و عمدتاً به طرف دور از چشمه و تا اندازه‌ای به طرف چشمه حرکت می‌کند.

داده‌های کمی که از نتایج مشاهدات به دست می‌آید، با مدلی ریاضی که بر پایه نظریه همانندی بنا شده است، مقایسه می‌شود. پیش‌بینی‌های مدل با مشاهدات آزمایشگاهی، شامل سرعت و اندازه ابر چینه‌های به‌طور کلی همخوانی دارد. اندازه‌گیری‌های غلظت در سطح زمین نیز با مقادیرهای پیش‌بینی شده موافقت خوبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: شناوری منفی، عدد فرود، تقریب بوسینسک، درون‌آمیختگی و جریان گرانی

۱ مقدمه

امروزه ترابری و ذخیره‌سازی گازهای سنگین‌تر از هوا رواج دارد. رها شدن این گونه گازها در محیط می‌تواند به صورت‌های مختلف انجام گیرد (بریتزر، ۱۹۸۹ b). مطالعه آنها پس از رها شدن، از نظر شکل و گسترش به صورت ترمال یا پلوم (plume) شناور یا شناوری منفی، همچنین از دیدگاه اثرهای احتمالی روی محیط مانند سمی یا آتش‌زا بودن، اهمیت دارد. به‌ویژه مسئله پیش‌بینی غلظت گاز رها شده، ابعاد محدوده‌ای که آلوده می‌شود و احتمال انفجار (اگر گاز رها شده آتش‌زا باشد) از اهمیت بسزایی برخوردار است.

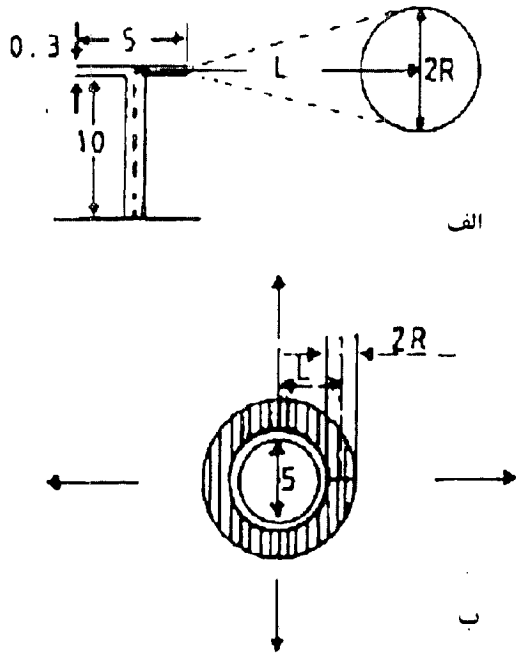
بررسی کردن حرکت پلوم‌ها با شناوری منفی به شیوه آزمایشگاهی و به روش عددی به عمل آمده، ولی درباره ترمال‌های شناور با رها شدن ناگهانی مطالعه کمتری شده است و اغلب به این منظور، چشمه نقطه‌ای یا خطی در نظر گرفته شده است (ریچارد، ۱۹۶۵ و ۱۹۶۸ و بریتزر، ۱۹۷۹). پلومفیلد و کر (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) فواره‌های تلاطمی با اثر شناوری در محیط‌های یکنواخت و پایدار را در مجموعه

آزمایش‌هایی همراه با مدل‌هایی بر اساس معادلات درون‌آمیختگی مطالعه کرده‌اند که در آنها ارتفاع فواره و سطحی که در آن انتشار می‌یابد بررسی شده است. این گونه بررسی‌ها در مطالعه تغییرات اتاق‌های ماگمایی و همین‌طور در نحوه گرم و یا سرد کردن اتاق‌ها با پلوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مسئله بستار (closure) تلاطمی، مدل‌های عددی و تحلیلی را با نارسایی روبه‌رو می‌سازد. زیرا، در آن اغلب از ضریب‌های پخش تلاطمی استفاده می‌شود که به پایداری وابسته است. مدل‌های فیزیکی نیز، اغلب به سبب مشخص نبودن دقیق اثر برخی پارامترهای مهم مانند عدد پکلت (Peclet number) و عدد رینولدز (Reynolds number) ممکن است با خطای چشمگیری همراه باشند (بریتزر، ۱۹۸۹ a).

در این‌جا حالت خاصی از حرکت یک ترمال یا ابر شناور مورد مطالعه قرار می‌گیرد که در محیطی آرام و از چشمه‌ای دایره‌ای، ناگهان رها می‌شود. این حالت شباهت

ویدیویی تصویربرداری می‌شود و اندازه‌گیری‌های غلظت شوری و سرعت حرکت ابر را به کمک سیگنال‌هایی که از یک شوری سنج و یک سرعت سنج دریافت می‌شود، با رایانه ثبت و تحلیل می‌کنند.



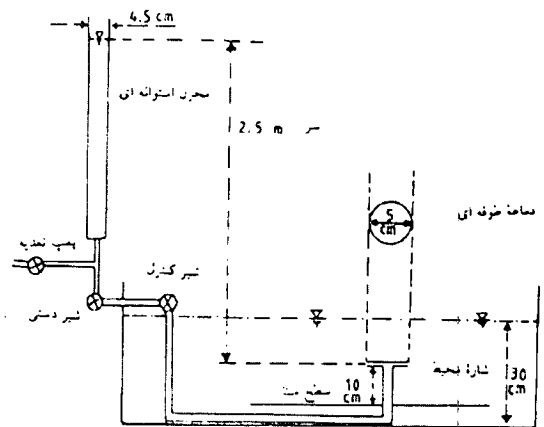
شکل ۲. الف- نمای جانبی و ب- نمای بر بالایری دماغه و بر چنبه‌ری (اندازه‌ها بر حسب cm است).

حرکت ابر چنبه‌ای در حالتی که اختلاف چگالی شاره‌ها شده و شاره محیط صفر است، در شکل ۳ نشان داده شده است. نمای دنبلی گونه (dumb-bell shape) در شکل ۳-الف ناشی از فزونی غلظت شاره‌ها شده و ضخامت آن در امتداد دید، در دو طرف، نسبت به وسط تصویر است. ناهمگنی ابر چنبه‌ای در شکل ۳-ب نیز نشانگر ساختار تلاطمی آن است. ابر چنبه‌ای در حالتی که دارای شناوری منفی است، پس از مدتی در فاصله معینی از محور قائم دماغه به سطح مینا (زمین) می‌رسد. آنگاه به صورت یک جریان گرانی، در دو سو، هم رو به بیرون و هم تا حدودی به سوی محور چشمه، حرکت می‌کند.

زیادی به انفجار کپسول گاز در ارتفاعی از سطح زمین یا شکستن ناگهانی منبع گرد محتوی گاز سنگین، در ارتفاعی از سطح زمین و در لایه مرزی جو دارد.

۲ ابزار و شیوه آزمایش

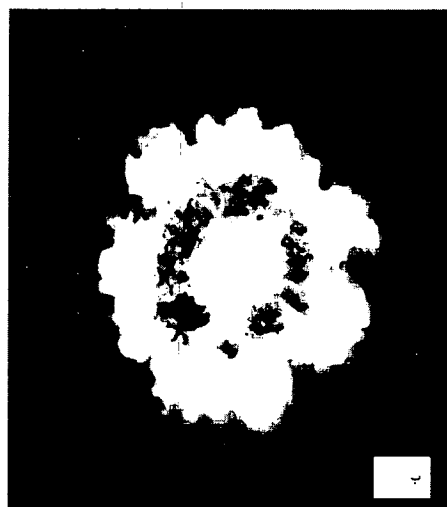
ساختار ساده‌ای از ابزار کار در شکل ۱ نشان داده شده است. تشبک (tank) با آب شیرین (شاره محیط) پر شده است.



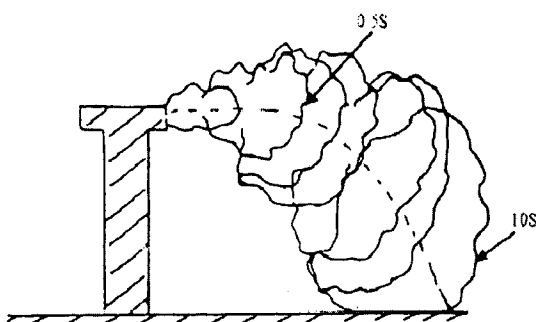
شکل ۱. ساختار ابزار کار آزمایش

در حالی که دریچه‌های دستی و کنترل بسته است، مخزن به کمک پمپ با آب شور (شاره شناور) پر می‌شود. آب شور از راه دماغه طوقه‌ای (annular nozzle)، که در آب شیرین غوطه‌ور است، می‌تواند در این محیط آرام رها شود. در هر آزمایش مقدار معینی (۴۵ سانتی‌متر مکعب) آب شور با شوری معین (چگالی معین) به صورت تقریباً لحظه‌ای رها می‌شود. در عمل زمان رها شدن حدود ۰/۳ ثانیه است که زمان پاسخ سیستم رها سازی است. شاره‌ها شده یک ابر چنبه‌ای (toroidal) یا به اصطلاح تاوه حلقه‌ای شناور (buoyant vortex ring) تشکیل می‌دهد که در محیط حرکت می‌کند. در شکل ۲-الف نمای جانبی دماغه و ابر چنبه‌ای و در شکل ۲-ب، نمای از بالای دماغه و ابر چنبه‌ای، لحظه‌ای پس از رها شدن شاره شناور دیده می‌شود. از حرکت ابر چنبه‌ای به روش

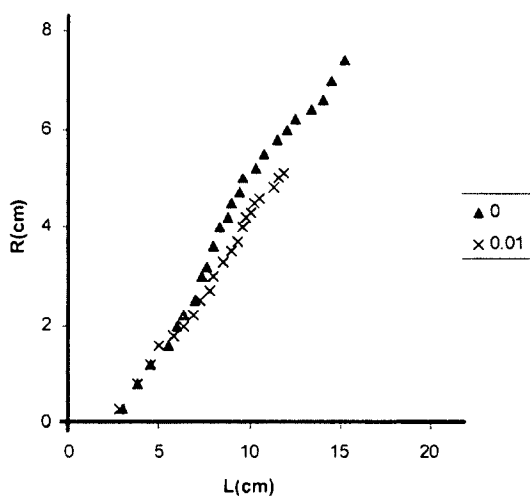
محیط (ρ_a) برابر یک درصد است ($\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0.01$). نمودار شعاع مقطع و سرعت افقی ابر چنبره‌ای (در دو حالت، $\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0$ و $\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0.01$) به صورت تابعی از فاصله مرکز چنبره از محور چشمه به ترتیب در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. از این نمودارها پیدا است که شعاع ابر با فاصله از چشمه به طور خطی با ضریب درون آمیختگی 0.14 ($\alpha = 0.4$) افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ سرعت افقی ابتدا افزایش پیدا می‌کند و پس از مدتی کوتاه رو به کاهش می‌گذارد. کاهش سرعت افقی به صورت $V \propto L^{-3}$ در این نمودارها مشخص است که با نتایج مدل تحلیلی بخش ۴ همخوانی دارد.



شکل ۳. الف- نمای جانبی و ب- نمای از بالای ابر رها شده (* شکل رنگی در صفحه ۵۲)



شکل ۴. مسیر حرکت ابر چنبره‌ای ($\Delta\rho / \rho_a = 0.01$) در زمان‌های متفاوت



شکل ۵. تغییر شعاع مقطع ابر با فاصله از محور چشمه در دو حالت

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0.01, \frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0 \right)$$

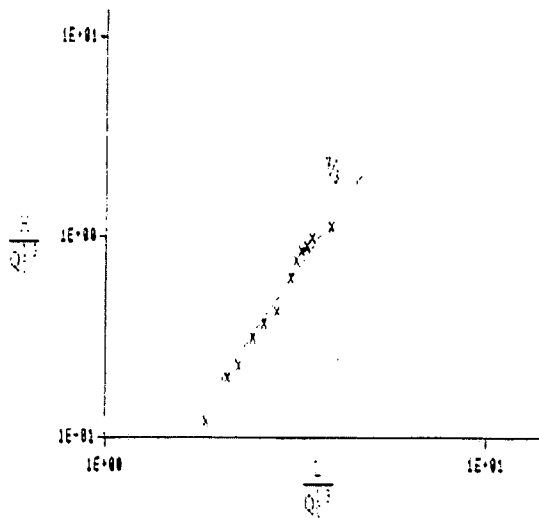
آزمایش چندبار تکرار می‌شود و در هر آزمایش علاوه بر غلظت و سرعت حرکت که پیش از این اشاره شد، فاصله مرکز مقطع چنبره ابر از محور چشمه (L)، شعاع مقطع چنبره (R) و ارتفاع یا فاصله قائم مرکز از تراز چشمه (H) در فاصله‌های زمانی کوتاه، از روی عکس‌های ویدیویی اندازه‌گیری می‌شود. فاصله مرکز ابر از تراز چشمه به طرف پایین مثبت در نظر گرفته می‌شود.

۳ نتایج آزمایش

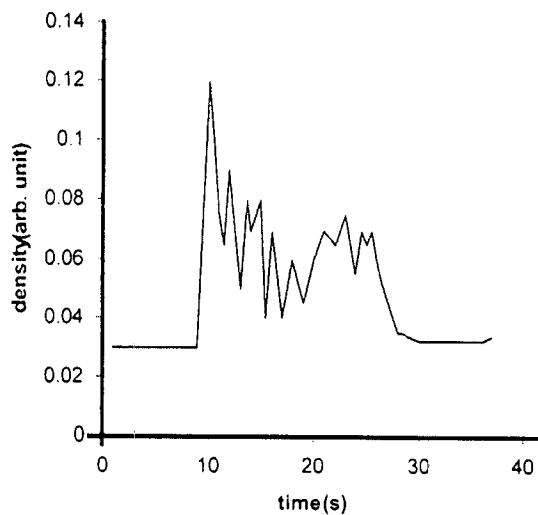
شکل ۴ که از عکس‌های ویدیویی حاصل شده است، نشان می‌دهد که ابر چنبره‌ای حدود ۱۰ ثانیه پس از رها شدن در فاصله نسبی یا بدون بعد $\frac{L}{Q_0^{1/3}} = 3.5$ از محور چشمه به زمین می‌رسد.

که در آن Q_0 حجم شاره رها شده است. در این جا اختلاف نسبی چگالی دو شاره ($\Delta\rho$) نسبت به شاره

۹ نشان داده شده است. مقدار بیشینه غلظت ابر که میانگین ۸ آزمایش با شرایط یکسان است، برابر ۰/۵ درصد غلظت اولیه است.



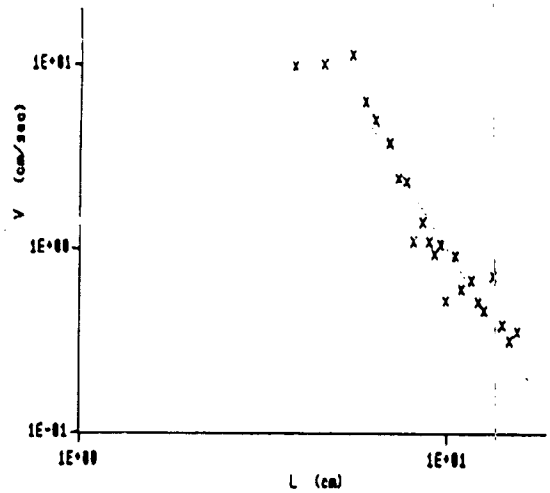
شکل ۸: افت ابر با فاصله از محور چشمه با $\Delta\rho/\rho_a = 0.01$ و $F_r = 4.5$



شکل ۹: تغییرات زمانی غلظت ابر در هنگام تماس با سطح مینا $\Delta\rho/\rho_a = 0.01$ با $(L = 3.5Q_0^{1/3} \text{ cm})$

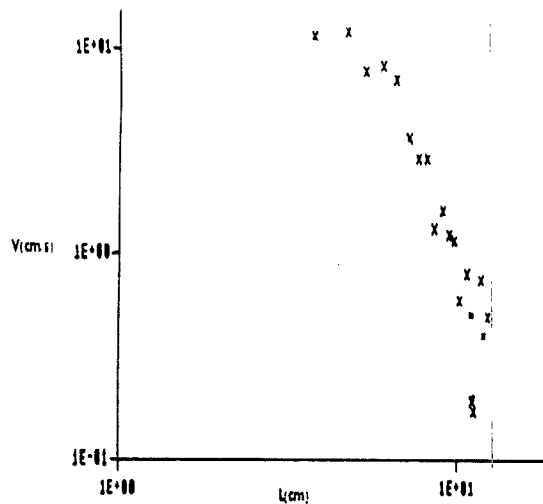
۴ تحلیل نظری

پارامترهای بی‌بعد حرکت ابر چنبره‌ای که با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، از تحلیل ابعادی به دست می‌آیند عبارت‌اند از عدد فرود چشمه $(F_r = M_0 / (F_0^{1/2} Q_0^{2/3}))$ ، نسبت دو چگالی (ρ_s/ρ_a) ، زمان بی‌بعد



شکل ۶: تغییر سرعت افقی ابر با فاصله از محور چشمه در حالت

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0$$



شکل ۷: تغییر سرعت افقی ابر با فاصله از محور چشمه در حالت

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0.01$$

شکل ۸ افت ابر با فاصله از محور چشمه را نشان می‌دهد و همانند فاصله از چشمه به صورت بی‌بعد $(\frac{H}{Q_0^{1/3}})$ است که تغییرات نمایی آن حدود ۷/۳ است و با پیش‌بینی مدل تحلیلی که در بخش ۴ ارائه می‌شود همخوانی دارد. نمودار غلظت ابر چنبره‌ای از هنگام تماس با سطح مینا (زمین) یعنی در فاصله بدون بعد ۳/۵ در شکل

از حل همانندی (self similarity solution) با تحلیل ابعادی می‌توان نوشت $V = Bt^{-3/4}$ ، $R = At^{1/4}$ و $L = Dt^{1/4}$ (ضمیمه ۱) که با جانشینی در رابطه‌های بالا برای ضریب‌های A ، B ، D داریم:

$$A = (\delta\alpha/3)^{1/2} (M_0/8\pi^2)^{1/4} \quad (3)$$

$$B = (3.8\alpha)^{1/2} (M_0/8\pi^2)^{1/4} \quad (4)$$

$$D = (6/\alpha)^{1/2} (M_0/8\pi^2)^{1/4} \quad (5)$$

آنگاه با حذف t می‌توان نشان داد که:

$$R = 2\alpha L/3 \quad (6)$$

$$V = 9M_0L^{-3} / (8\pi^2\alpha^2) \quad (7)$$

روند این تغییر ($V \propto L^{-3}$) در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود.

حجم ابر چنبره‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Q = 2\pi L \times \pi R^2 = 8\pi^2\alpha^2 L^3 / 9 \quad (8)$$

نسبت غلظت ابر (C) به غلظت اولیه آن (C_0) برابر است با:

$$C/C_0 = 9(L/Q_0)^{1/3} / (8\pi^2\alpha^2) \quad (9)$$

در فاز دوم حرکت، که در آن شناوری مهم است، بر پایه تحلیل بگین و همکاران (۱۹۸۱) برای یک ترمال خطی، سرعت قائم ابر با رابطه زیر داده می‌شود:

$$W = \frac{dH}{dt} = aF_0^{1/2} L^{-1/2} H^{-1/2} \quad (10)$$

که در آن H ارتفاع یا فاصله مرکز ابر از تراز چشمه است و a مقداری ثابت و برابر ۱/۵، با انتگرال‌گیری از رابطه (۱۰) و جانشینی برای l بر حسب L ، فاصله قائم از تراز چشمه به صورت بی‌بعد $\frac{H}{Q_0^{1/3}}$ به دست می‌آید. (بیدختی و بریتر، ۱۹۸۷).

که $M_0 = Q_0 V_0$ تکانه اولیه ابر بر چگالی واحد و V_0 سرعت افقی اولیه ابر است. $F_0 = g_0' Q_0$ نیروی شناوری منفی است که روی ابر چنبره‌ای اثر می‌کند و به آن شتاب شناوری اولیه $g_0' = g(\rho_s - \rho_a) / \rho_a$ را می‌دهد که در آن g شتاب گرانی، ρ_s و ρ_a به ترتیب چگالی محیط و شاره رها شده است. اگر ρ_s / ρ_a حدود واحد باشد (معمولا در فاصله کمی از چشمه چنین است) می‌توان تقریب بوسینسک (Boussinesq approximation) را به کار برد.

متغیرهای ابر چنبره‌ای، بدان‌گونه که پیش از این معرفی شدند عبارت‌اند از V, R, L و غیره که به صورت بی‌بعد می‌توان نوشت $R/Q_0^{1/3}$ ، $L/Q_0^{1/3}$ ، $V/(M_0/Q_0)$ و ...، که هر کدام تابعی از سه پارامتر عدد فرود، نسبت دو چگالی و زمان بدون بعدند.

ابر تلاطمی چنبره‌ای پس از تشکیل، از راه درون آمیختگی با شاره محیط به سرعت ارشد می‌کند. پس از گذر از این مرحله (فاز اول) که با برتری تکانه همراه است، وارد فاز دوم که شناوری بر تکانه برتری دارد می‌شود. در این فاز ابر چنبره‌ای به سوی زمین رانده می‌شود. در فاز اول می‌توان نشان داد که چون تکانه، M_0 برتری دارد، عدد فرود به سمت بینهایت میل می‌کند و از این رو متغیرهای ابر چنبره‌ای تنها به زمان بدون بعد بستگی پیدا می‌کنند. در این مرحله می‌توان حرکت ابر را به صورت مدلی ابعادی ارائه کرد و بر حسب پارامترهایی که در شکل ۲ نشان داده شده، معادله‌های تکانه و پیوستگی را به شیوه لاگرانژی به ترتیب به صورت زیر نوشت (بیدختی و بریتر، ۱۹۸۷):

$$2\pi L \times \pi R^2 \rho_s V = \rho_s Q_0 V_0 = \rho_s M_0 \quad (1)$$

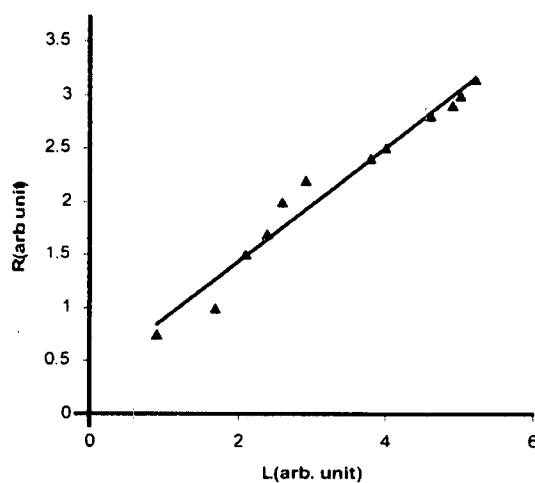
$$\frac{d}{dt} (2\pi L \times \pi R^2) = V_e (2\pi R \times 2\pi L) \quad (2)$$

که در آنها $V_e = \alpha V$ که $V = dL/dt$ سرعت درون آمیختگی و α ضریب درون آمیختگی است (مثلا ترنر، ۱۹۷۳). با شرایط اولیه $R=0$ در $t=0$ ، با استفاده

بریتز، ۱۹۸۷). شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمونه‌هایی از این آزمایش در مقیاس بزرگ‌اند که به ترتیب شعاع ابر چنبره‌ای و سرعت افقی آن را بر حسب فاصله از چشمه نشان می‌دهند.

شاره رها شده، بر اثر شناوری منفی، شتابی رو به پایین پیدا می‌کند. لیکن با درون‌آمیختگی شاره به تدریج از شتاب آن کاسته می‌شود و به سرعت پیشینه‌ای می‌رسد. از آن پس سرعت قائم کاهش می‌یابد. متغیر مهم بدون بعد که حرکت را کنترل می‌کند عدد فرود (F_r) است.

در ابتدا هنگامی که حرکت با برتری تکانه همراه است، مدل تحلیلی به‌خوبی مدل فیزیکی را توصیف می‌کند. مقدار ضریب درون‌آمیختگی (α) در این فاز حدود ۰/۳۷ است. برای مقایسه در جدول ۱ ضریب درون‌آمیختگی فازهای مختلف این مطالعه، همراه با مقدارهایی که دیگران از آزمایش‌هایی با شرایط گوناگون به دست آورده‌اند، داده شده است. کاهش α برای حالتی که شناوری وجود دارد (بر اساس اندازه‌گیری، شکل ۵) در اثر کاهش درون‌آمیختگی در قسمت فوقانی ابر شناور است که دارای پایداری است، با توجه به این‌که ابر دارای چگالی بیشتری از شاره محیط بالای آن است،



شکل ۱۰. نمونه‌ای از تغییرات شعاع سطح مقطع ابر با فاصله از چشمه در آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس.

$$H/Q_0^{1/3} = 1.72\alpha^{4.3} F_r^{-2/3} (L/Q_0^{1/3})^{7/3} \quad (11)$$

روند این تغییر ($H/Q_0^{1/3} \propto (L/Q_0^{1/3})^{7/3}$) در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

باید توجه داشت که در این تحلیل دو فاز حرکت، مستقل از هم بررسی شده است. لذا در فاز دوم، به‌کارگیری رابطه‌ای که در فاز اول برای L به دست آمده است با خطا همراه است. زیرا شرایط اولیه در فاز دوم با شرایط اولیه در فاز اول متفاوت است (ترنر، ۱۹۷۳). برای مطالعه دقیق‌تر رفتار این ابر می‌توان مدل کاملی ساخت که هر دو فاز را با هم در بر داشته باشد.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

از آنچه تاکنون ارائه شد پیداست که مدل فیزیکی رها شدن ناگهانی شاره سنگین از چشمه دایره‌ای، در محیط آرام، با مدل تحلیلی بر پایه خودهمانندی مطابقت دارد. شاره رها شده که به شکل یک چنبره است، در حالی که رو به بیرون حرکت می‌کند، سطح مقطع آن با درون‌آمیختگی (entrainment) افزایش پیدا می‌کند. پس از مدتی از آغاز حرکت یعنی در فاز اول که تکانه برتری دارد، اثر شناوری قابل چشم‌پوشی است و تغییر شعاع ابر با فاصله از محور چشمه در دو حالت ($\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0$) و ($\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = 0.01$) یکسان است (شکل ۵). ولی در فاز دوم حرکت که اثر شناوری اهمیت دارد، تغییر شعاع ابر با فاصله از محور چشمه، برای حالتی که اختلاف چگالی وجود دارد کمتر است و این به دلیل درون‌آمیختگی کمتر (به‌خصوص در سطوح فوقانی) است (شکل ۵). اختلاف چگالی در سرعت افقی تاثیر چندانی ندارد اما به خاطر اثرات غیر بوسینسکی در حالت با اختلاف چگالی، لختی بیشتر است و سرعت افقی کمی بیشتر خواهد بود (شکل‌های ۶ و ۷). در آزمایشی که در مقیاس بزرگ (در محیط) انجام گرفت، نتایج مشابهی از دیدگاه رشد و سرعت حرکت ابر حاصل به دست آمده است (بیدختی و

بسیار متفاوت باشد. مثلاً اگر این فرایند همراه با رهاسازی گرمای نهان باشد، α به شدت کاهش می‌یابد (بات و نارسیم، ۱۹۹۶).

جدول ۱. مقدارهای متفاوت ضریب درون‌آمیختگی α برای ۱ تا ۴ از ترمال. ۱۹۷۳ گرفته شده است.

ردیف	مورد	α
۱	جت. با تقارن محوری	۰/۰۸
۲	پلوم، با چشمه نقطه‌ای	۰/۱۰-۰/۱۲
۳	پلوم آغازین	۰/۱۸
۴	ترمال	۰/۲۵
۵	پف شناور با چشمه دایره‌ای (کار حاضر)	
	(الف) بر پایه رشد شعاعی (فاز اول)	۰/۴۰
	(ب) بر پایه معادله تکانه (فاز اول)	۰/۳۷
	(ج) بر پایه معادله افت ابر (فاز دوم)	۰/۱۶

نتایج حاصل را می‌توان در برآورد مشخصات ابرهای حاصل از تصادفات و حوادث صنعتی در محیط به کار برد. به‌علاوه پیش از برپایی پایگاه‌های صنعتی که احتمال وقوع چنین حوادثی در آنها وجود دارد، به‌ویژه در مراکز پر جمعیت و صنایع حساس، می‌توان در جابجایی از این‌گونه نتایج بهره جست. این‌گونه بررسی‌ها در مطالعه نحوه گرم و یا سرد کردن اتاق‌ها (سامانه‌های تهویه) با پلوم و تغییرات چنبره‌های ماگمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

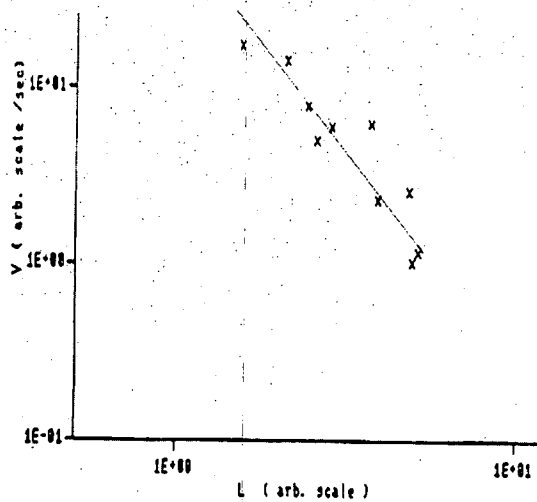
ضمیمه ۱. حل همانندی

شماره رها شده دارای تکانه اولیه M_0 است که به‌طور ناگهانی رها می‌شود. اگر فرض کنیم که در $t=0$ ، $L=0$ و $R=0$ است و نیز $L = Dt^c$ ، $V = BL^b$ ، $R = At^a$ است، با قرار دادن این روابط در معادلات (۱)، (۲) و $V = \frac{dL}{dt}$ و تحلیل ابعادی داریم (بیدختی و بریتر، ۱۹۸۷):

از معادله (۱) $2a + c + b = 0$

از معادله (۲) $2a + c - 1 = b + a + c$

و از $V = \frac{dL}{dt}$ $c - 1 = b$



شکل ۱۱. نمونه‌ای از تغییرات سرعت افقی ابر با فاصله از چشمه در آزمایش‌های بزرگ مقیاس.

هنگامی که تکانه ابر در محیط پخش شده، یعنی ابر به اندازه‌ای رشد کرده باشد که سرعت محلی آن کم شود، یا به تعبیری عدد فرود محلی آن کوچک شود، شماره رها شده از دیدگاه حرکت، حالت یک ترمال چنبره‌ای را به خود می‌گیرد که با چشمه‌هایی با ساختارهای هندسی متفاوت مورد مطالعه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است (ریچارد ۱۹۶۵ و ۱۹۶۸، اسکورر، ۱۹۷۸).

در شبیه‌سازی حاضر F_r چشمه حدود ۴/۵ است و حالتی است که اثر لختی و شناوری هر دو اهمیت دارند. از این رو حرکت ابر چنبره‌ای، هر دو رژیم را در بر دارد. گذر از فاز اول به دوم، پس از مدت t از هنگام رهاسازی رخ می‌دهد، به‌طوری‌که در این لحظه، اثر شناوری و لختی هم اندازه هستند. ضریب درون‌آمیختگی مرحله دوم (۰/۱۶) بسیار کمتر از مقدار آن برای مرحله اول (۰/۴) است و نشان می‌دهد که به احتمال در فاز دوم تلاطم، ابر چنبره‌ای شناور کاهش یافته است و از این رو درون‌آمیختگی آن کمتر شده است.

البته مقدار به‌دست آمده با مقادیر حاصل برای جریان‌های مشابه همخوانی دارد. همین‌طور باید توجه داشت که اگر حرکت ابر شناور توأم با تغییر فاز باشد (مثلاً همراه با رها شدن گرمای نهان)، مقدار α ممکن است

- Bidokhti, A. A., and Britter, R.E., 1987, Impulsive, annular releases of negatively buoyant fluid. A Cambridge University, Eng. Dept. Report, No, 2029, 121.
- Britter, R. E., 1979, The spread of a negatively buoyant plume in a calm environment, Atmospheric Environment, 13, pp 1241-1247.
- Britter, R. E., 1989a, A review of some experiments relevant to dense gas dispersion, in stably stratified flow and dense gas dispersion. Ed. By J. S. Puttock. Oxford Clarendon.
- Britter, R. E., 1989b, Atmospheric dispersion of dense gases: Ann. Rev. Fluid Mech, 21, pp 317-344.
- Bloomfield, L., and Kerr, C., 1998, Turbulent fountains in a stratified fluid: J. Fluid Mech, 358, pp. 335-356.
- Bloomfield, L., and Kerr, C., 1999, Turbulent fountains in a confined stratified environment: J. Fluid Mech, 389, pp. 27-54.
- Richards, J. M., 1965, Puff motion in unstratified surroundings: J. Fluid Mech, 21, p.97.
- Richards, J. M., 1968, Inclined buoyant puff fluid: J. Fluid Mech, 32, part 4, pp. 681-692.
- Scorer, R. S., 1978, Environmental Aerodynamics, Chap, 10, Ellis Horwood Publ.
- Turner, J.S., 1973, Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press.

که با حل آنها داریم:

$$a = \frac{1}{4}, b = \frac{-3}{4}, c = \frac{1}{4}$$

بنابراین:

$$R = At^{1/4}, V = Bt^{-3/4}, L = Dt^{1/4}$$

با قرار دادن این روابط در معادلات یاد شده مقادیرهای

A, B, D به صورتی که در روابط (۳)، (۴) و (۵)

آمده است حاصل می شود.

قدردانی

بدین وسیله از همکاری پروفیسور بریتر در انجام برخی

آزمایش ها قدردانی می شود.

منابع

- Beghin, P., Hapfinger, E., and Britter, R., 1981, Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries: J. Fluid Mech, 107, pp. 407-422.
- Bhat, G., and Narasimha, R., 1996, Development of a plume with off-source volumetric heating: J. Fluid Mech, 325, pp. 303-330.