

توسعه روش عکس برداری پرسرعت و پردازش تصویر در تعیین ویژگی‌های جریان حباب در ستون حبابی

حمید اسدی، فرامرز هرمزی*⁺

سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

چکیده: در این پژوهش از یک ستون حبابی مکعبی در اندازه‌های آزمایشگاهی استفاده شد و با استفاده از روش عکس برداری پرسرعت و ارایه روش‌های جدید پردازش تصویر، مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان حباب‌ها مانند قطر، سرعت، خطوط جریان فاز گاز و بسامد نوسان توده حباب‌ها اندازه‌گیری شد. ستون ساخته شده دارای سطح مقطع 5×20 cm و ارتفاع 120 cm است. سرعت ظاهری گاز بین $0.1-0.7$ cm/s در تغییر است. از سه دوربین گوناگون با سرعت‌های ۲۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ تصویر در ثانیه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های حباب‌ها استفاده شد و برای پردازش تصویرها، تحلیل داده‌ها و محاسبه ویژگی‌های حباب از نرم افزار Matlab استفاده شد. بسامد نوسان توده حباب با روشی نو و با دقت ۹۵٪ به دست آمد. اندازه قطر ساتر حباب‌ها، در شرایط همپوشانی حباب‌ها از $6/5$ تا $8/5$ میلی‌متر و با دقت $99/8$ ٪ محاسبه شد. سرعت حباب‌ها با استفاده از روش "کمترین فاصله با یک حد بالا" برای اولین بار در ستونی با این ابعاد به دست آمد و با استفاده از برآیند مومنتم، روشی برای به دست آوردن خطوط جریان فاز گاز ارایه شد.

واژه‌های کلیدی: ستون حباب، ویژگی‌های حباب، عکس برداری پرسرعت، پردازش تصویر.

KEY WORDS: Bubble column, Bubble characteristics, High speed photography, Image processing.

مقدمه

عامل‌های مؤثر بر الگوی جریان، میزان ضریب‌های انتقال جرم و انتقال گرما در ستون‌های حبابی هستند [۸، ۷]. تاکنون از روش‌های گوناگونی برای شناسایی ویژگی‌های حباب استفاده شده است. زنگ و همکاران [۹] با گرفتن تک عکس‌ها^(۱)، میدان جریان ستون‌های حبابی را بررسی و گزارش کردند که مسیر حرکت حباب‌ها نوسانی است. بسامد این حرکت به عنوان یکی از ویژگی‌های مهم جریان حبابی است [۱۱، ۱۰]. فلگر و همکاران [۱۲] بسامد این حرکت نوسانی را با روش لیزر - داپلر^(۲) تعیین کردند.

ایجاد تماس بین فازهای گاز و مایع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ستون‌های حبابی^(۱)، یکی از دستگاه‌های مناسب برای این عملیات است. در این ستون‌ها، فاز گاز، عمل اختلاط دو فاز را انجام داده و قسمت‌های متحرک، درون آنها وجود ندارد. به همین دلیل، هزینه ساخت و نگهداری ستون‌های حبابی کم است و توجه ویژه‌ای به این ستون‌ها در صنایع شیمیایی، پتروشیمی، زیست شیمی و داروسازی، برای انجام فرایندهای متفاوتی شده است [۶-۱]. ویژگی‌های حباب شامل ابعاد، تعداد، مسیر جریان و سرعت،

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: fhormozi@semnan.ac.ir

(۱) Bubble column

(۲) Laser-Doppler

(۲) Snapshot

این روش دخالتی^(۲) و محلی^(۳) است. به عبارت دیگر ورود کاوشگرها به داخل ستون، بر روی میدان جریان درون ستون اثر می‌گذارد (روش دخالتی) و در هر بار آزمایش با کاوشگرها، ویژگی‌های حباب فقط در یک نقطه از ستون اندازه‌گیری می‌شود (روش محلی). مشکل استفاده از روش عکس‌برداری پرسرعت به عنوان یک روش غیر دخالتی و غیر محلی، شناسایی یک حباب در دو تصویر متوالی به دلیل تغییر در شکل حباب در حین بالا رفتن بود. زاروبا و همکاران [۱۶] با روش عکس‌برداری و استفاده از الگوریتم "لکه سفید"^(۴) اقدام به شناسایی یک حباب در دو تصویر متوالی کرده و سرعت حباب‌ها را در ستون حبابی اندازه‌گیری کردند. اما روش آنها تنها در اندازه حباب‌های کوچک (تا ۵ mm) و در سامانه‌های نورپردازی یکنواخت پاسخگو بود. آکونا و فینچ [۱۷] نیز برای شناسایی یک حباب در دو تصویر متوالی، تابع وقوع^(۵) را معرفی کردند که مبنای آن سطح و قطر بزرگ و کوچک حباب بود و در کار خود اعلام کردند که استفاده از این روش برای حباب‌هایی تا اندازه ۴ میلی‌متر (به‌علت تغییر شکل حباب‌های بزرگتر در زمان بالا رفتن) قابل استفاده خواهد بود.

هدف این پژوهش، توسعه روش عکس‌برداری پرسرعت و پردازش تصویر در تعیین ویژگی‌های جریان حباب در ستون‌های حبابی است. ابعاد دستگاه و شرایط عملیاتی به‌کار گرفته شده، همانند دستگاه فلگر و همکاران [۱۲] و بووا و راناد [۷] است. به این ترتیب نتیجه‌های به دست آمده با این روش با نتیجه‌های گزارش شده توسط آنها قابل مقایسه است.

بخش تجربی

دستگاه آزمایش

در کار حاضر از یک ستون از جنس پلکسی گلاس استفاده شد. سطح مقطع ستون، ۵ mm در ۲۰ mm بوده و ارتفاع ستون ۱۲۰ cm است. شکل ۱ نمایی از دستگاه را نشان می‌دهد. از یک کمپرسور برای تأمین هوا به عنوان فاز گاز استفاده شد. روتامتر هوای استفاده شده مربوط به شرکت آزمون متمم، مدل RGD1 است که در فشار ۱ بار و دبی ۰/۶ تا ۱۰ لیتر در دقیقه، کار می‌کند. سرعت گاز ۰/۷-۰/۱۳ cm/s بوده و ارتفاع مایع (آب مقطر) در ستون برابر ۴۵ cm است. برای توزیع کننده حباب نیز از

آن‌ها با فرض این‌که در مرکز ستون حبابی سرعت گاز و مایع به تقریب یکسان است، سرعت افقی فاز مایع را در مرکز ستون حبابی اندازه‌گیری کرده و بسامد آن را تعیین کردند. تجهیزهای روش لیزر - داپلری بسیار گران قیمت است. به همین دلیل پژوهشگران سعی کردند تا از عامل‌های دیگری در تعیین بسامد استفاده کنند [۱۳]. بووا و راناد [۷] با ثبت نوسانات فشار در دیواره ستون بسامد نوسان را محاسبه کردند.

هر دو روش لیزر - داپلر و نوسان‌های فشار از یک عامل غیر مستقیم برای تعیین بسامد توده حباب استفاده می‌کنند و روش لیزر - داپلر فقط در مرکز ستون قابل استفاده است. بنابراین آرایه روش‌هایی که هم ارزان باشند و هم به طور مستقیم نوسان حرکت توده حباب‌ها را بررسی کند مورد توجه قرار گرفت. رنسن و رویگ [۱۴] اولین گروهی بودند که با آرایه یک دستورالعمل، بسامد نوسان توده حباب را با روش عکس‌برداری گزارش کردند. آنها مرکز توده حباب را، از میانگین حسابی مرزهای توده به دست آورده و نوسان آن را ثبت کردند و از این روش تا سرعت گاز ۲ mm/s برای اندازه‌گیری بسامد نوسان توده حباب استفاده کردند. این نوع محاسبه مرکز توده حباب داری خطا است. زیرا در سرعت‌های پایین و در تمام انواع توزیع کننده‌های حباب، حباب‌های تولید شده بین مرزهای مشخصی حرکت نمی‌کنند و ممکن است برخی از حباب‌ها در خارج از توده اصلی حباب حرکت کنند. بنابراین با یک میانگین حسابی ساده، برای به دست آوردن مرکز توده حباب، اثر وزن حضور حباب‌ها در نقاط گوناگون دیده نمی‌شود. همچنین در سرعت‌های بالای گاز، با افزایش جریان برگشتی، در کنار دیواره ستون حباب‌ها به سمت پایین حرکت می‌کنند. بنابراین در سرعت‌های بالا نیز این روش دارای خطا خواهد بود.

در بیشتر کارهایی که برای اندازه‌گیری قطر حباب انجام شده، از توزیع کننده‌هایی استفاده شده است که حباب‌های کوچک و یکنواخت تولید کرده و همپوشانی حباب‌ها در آنها کمتر دیده می‌شود. بووا و راناد [۷] قطر حباب‌ها را در ستون حبابی همانند ستون حبابی مورد استفاده توسط فلگر و همکاران [۱۲]، اندازه گرفتند در بالای توزیع کننده به علت تجمع (همپوشانی) حباب‌ها کاری مشکل است و نیاز به آرایه روش‌های بهتر پردازش تصویر دارد. تعیین سرعت، مسیر و جهت حرکت حباب‌ها به طور معمول به وسیله کاوشگرهای^(۱) الکتریکی و نوری انجام می‌شود [۱۵].

(۱) Probe

(۲) Invasive

(۳) Local

(۴) Wight spot

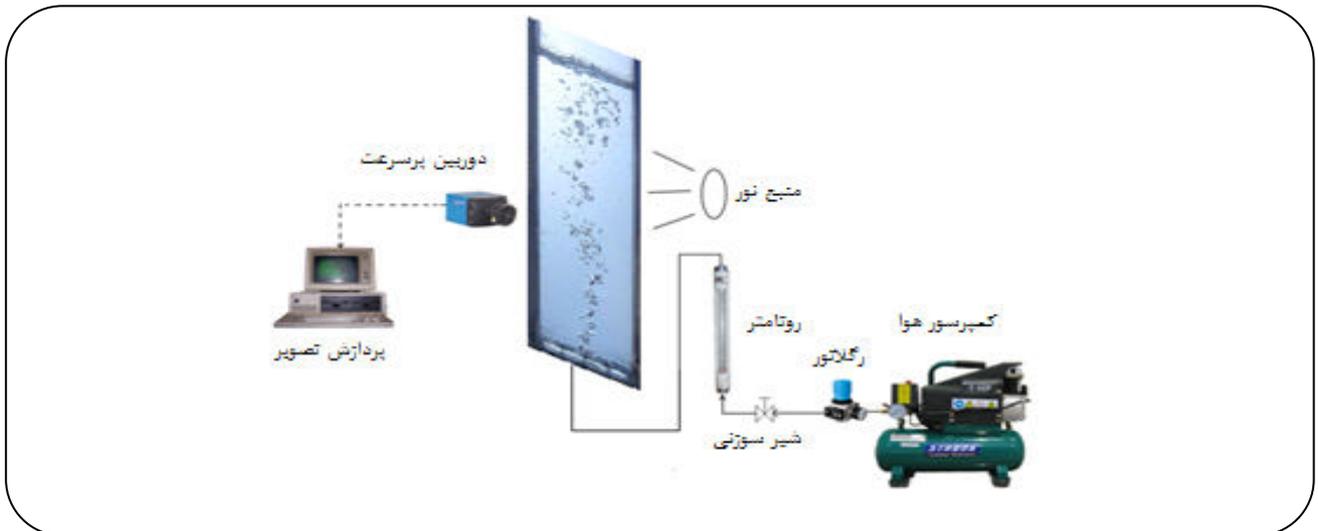
(۵) Incidence function

جدول ۱- انواع دوربین های استفاده شده.

MiniVis	Casio EX-F1	Canon PowerShot A470	
تا ۲۵۰۰۰۰	تا ۴۰۰۰۰	۲۰۰۰	سرعت شاتر (۱/s)
۵۰۰	۶۰۰	۲۰	سرعت ضبط تصاویر (fps)
۱۲۸۰×۱۰۲۴	۴۳۲×۱۹۲	۶۴۰×۴۸۰	دقت تصویربرداری (پیکسل)

جدول ۲- شرایط عملیاتی در ستون حباب.

سرعت ظاهری گاز (cm/s)	شدت جریان گاز (L/min)
۰/۱۳	۰/۸
۰/۲۶	۱/۶
۰/۵	۳
۰/۷	۴/۲



شکل ۱- نمای کلی از دستگاه و چگونگی عکس برداری.

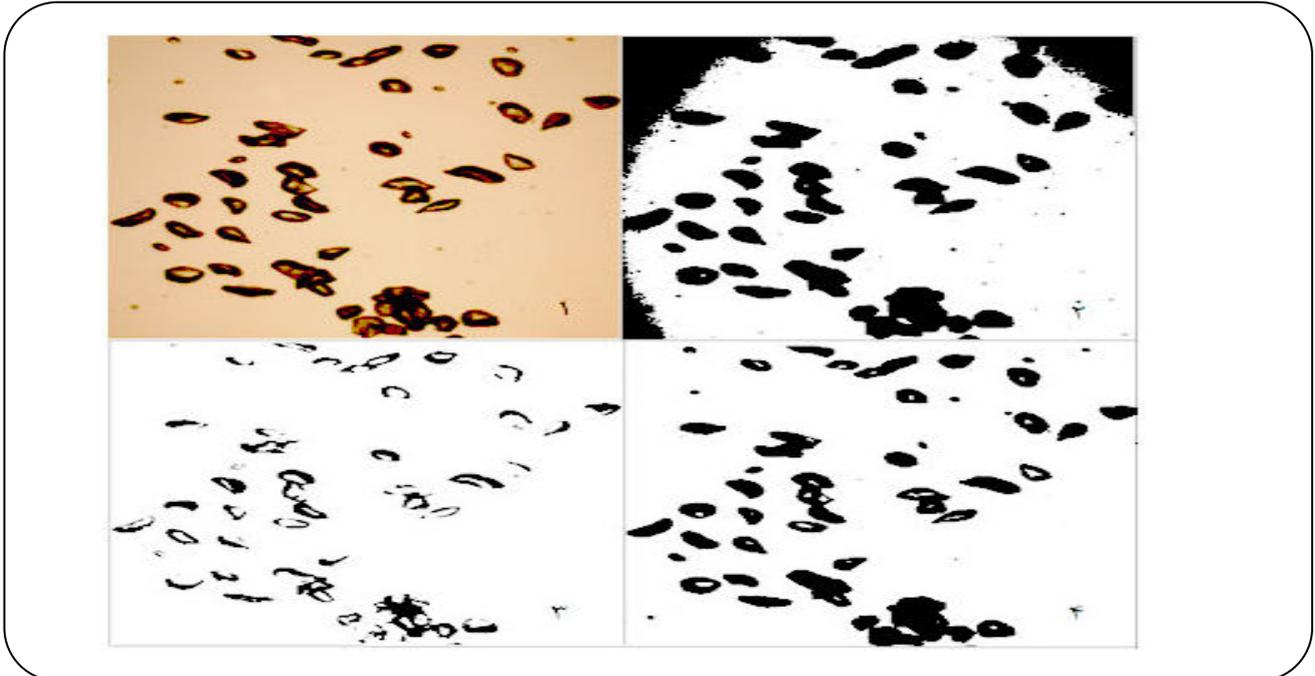
تمام تصویرها با استفاده از یک "آستانه درخشندگی" (θ) مناسب به حالت سیاه و سفید تبدیل شدند. پیکسل های موجود در هر تصویر که درخشندگی آنها از آستانه درخشندگی بیشتر بود به رنگ سفید درآمد و آنهایی که درخشندگی کمتر از آستانه درخشندگی داشتند، به رنگ سیاه درآمدند. شکل ۲ چگونگی انتخاب آستانه درخشندگی را نشان می دهد. سپس پیکسل های سیاه که نماینده حضور حباب ها هستند با مقدار ۱ و پیکسل های سفید با مقدار صفر در ماتریس هر تصویر مشخص شدند.

یک صفحه پلکسی گلاس با ۸ سوراخ در مرکز به قطر ۰/۸ mm و ۶ mm گام استفاده شد. اندازه ها و شرایط عملیاتی ستون که همانند کار بووا و راناد [۷] و فلگر و همکاران [۱۲] بود.

از سه دوربین گوناگون برای شناسایی ویژگی های حباب استفاده شد. ویژگی های دوربین های استفاده شده و شرایط عملیاتی به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آمده است.

روش عکس برداری

مرحله اول روش عکس برداری آماده سازی تصویرها است.



شکل ۲ - انتخاب یک آستانه درخشندگی مناسب. ۱- تصویر اصلی ۲- $\theta=0.51$ سیاه شدن تصویر ۳- $\theta=0.1$ کامل نبودن جابها ۴- آستانه درخشندگی مناسب $\theta=0.41$

دلخواه را به دست آورد و بسامد را از روش تابع چگالی توان طیفی^(۱) به دست آورد [۱۳].

اندازه قطر جاب

در محیط هایی که سطح مؤثر مهم باشد از قطر ساتر^(۲) (قطر هم ارز با نسبت حجم به سطح) استفاده می شود که از معادله (۲) محاسبه می شود [۳].

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (2)$$

که n_i تعداد جاب هایی است که دارای قطر d_i هستند. برای حل این مشکل تمامی به هم پیوستگی ها و همپوشانی جابها از تصاویر حذف شدند. شکل ۴ این مرحله را نشان می دهد. در به دست آوردن قطر هر جاب، شکل جابها بیضوی فرض شد و قطر سوم جاب که در عمق تصویرها است، با قطر بزرگتر برابر است [۱۶، ۷]. برای به دست آوردن قطر هر جاب، ابتدا جابها در هر تصویر با یک برچسب (شماره) مشخص شدند. سپس سطح هر جاب (A) و ضریب گریز از مرکز^(۳) (e) آن توسط نرم افزار محاسبه شد.

بسامد حرکت نوسانی توده جاب

برای محاسبه بسامد نوسان توده جاب از یک پنجره تحلیل (AW)^(۱) استفاده شد (شکل ۳) و طول آن (w)، طوری انتخاب می شد که کل محدوده حرکت نوسانی جابها را پوشش دهد و ارتفاع آن (h) از ۲۰ تا ۵۰ پیکسل (بر حسب دقت دوربین) باشد. فاصله پنجره تحلیل از توزیع کننده جاب (v) با توجه به سرعت گاز انتخاب می شد و با افزایش سرعت گاز، این فاصله برای کاهش اثر جاب های پایین رونده در کنار دیواره ستون، کاهش می یافت.

طول مرکز توده جاب در پنجره تحلیل از معادله زیر به دست می آید:

$$X_c = \frac{\sum_{i=x}^{x+w} (i \times \sum_{j=y}^{y+h} (M(i,j)))}{\sum_{i=x}^{x+w} \sum_{j=y}^{y+h} (M(i,j))} \quad (1)$$

در این روش اثر وزنی حضور جابها در توده جاب نیز مورد توجه قرار می گیرد و مرکز توده به دست آمده، نسبت به روش رنسن و رویگ [۱۴] اختلاف کمتری با مرکز واقعی توده جاب خواهد داشت. با رسم X_c بر حسب زمان می توان تابع نوسانی

(۱) Analysis Window

(۲) Power Spectral Density Function (PSDF)

(۳) Sauter diameter

(۴) Eccentricity

$$d = \sqrt[3]{a^2 b} \quad (5)$$

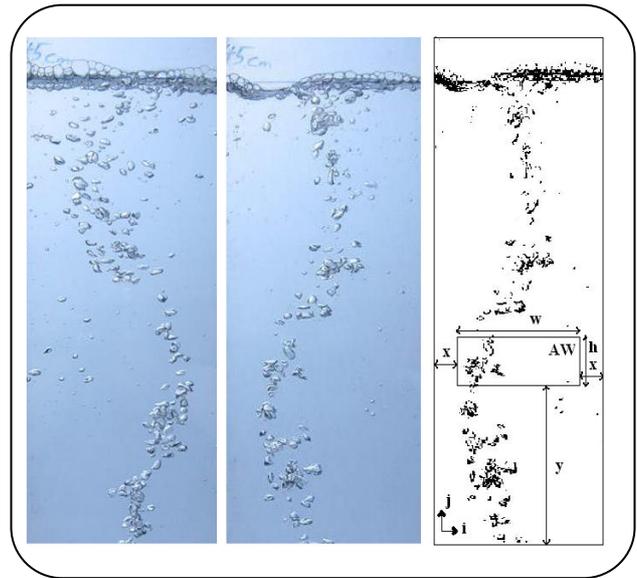
مسیر، جهت و سرعت حباب

برای به دست آوردن مسیر حرکت حباب ها، مرکز حباب ها در تصاویر متوالی رسم شدند [۱۶]. طول و عرض مرکز هر حباب از میانگین طول و عرض پیکسل های موجود در یک حباب از معادله های (۶) و (۷) به دست آمد.

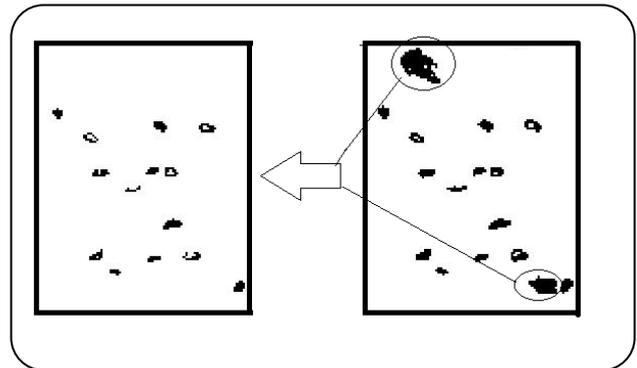
$$X_{bc} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (6)$$

$$Y_{bc} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (7)$$

لکن به دست آوردن جهت و سرعت حرکت حباب نیازمند شناسایی حباب ها در تصویرهای متوالی است. قبلا بیان شد که روش های لکه سفید [۱۶] و تابع وقوع [۱۷] دارای چه اشکال هایی هستند. برای رفع این مشکلات از روش جدیدی به نام " کمترین فاصله با یک حد بالا " استفاده شد. سرعت حرکت حباب ها در ستون، دارای یک حد بالا است. با داشتن این حد بالا و با توجه به سرعت دوربین (۶۰۰-۵۰۰ تصویر در ثانیه) می توان یک حد بالا برای میزان جابجایی مرکز یک حباب در فاصله زمانی بین دو تصویر متوالی تعریف نمود. از سویی فاصله مرکز یک حباب در دو تصویر متوالی نسبت به مرکز حباب های دیگر، کمینه خواهد بود. بنابراین جابجایی که مرکز آن در تصویر n+1 دارای کمترین فاصله با مرکز حباب مورد نظر ما در تصویر n باشد، حباب متناظر با حباب مورد نظر است، در صورتی که این فاصله کمتر از حد بالای جابجایی باشد. با بررسی در شرایط گوناگون آزمایش انجام شده، حد بالای سرعت برابر ۹۰ cm/s به دست آمد. بنابراین حد بالای جابجایی مرکز حباب برای دوربینی با سرعت ۶۰۰ fps برابر mm ۱/۵ است. با شناسایی مرکز یک حباب در پنج تصویر متوالی، چهار سرعت برای یک حباب به دست آمد که سرعت برآیند برابر با میانگین این سرعت ها است. با داشتن مرکز حباب در تصویر اول و پنجم، برای حرکت حباب نیز مشخص شد. این سرعت ها و جهت ها به صورت لحظه ای هستند و برای به دست آوردن سرعت میانگین، در یک بازه زمانی، بردارهای برآیند آنها محاسبه شد. برای این منظور ستون به سلول های (۱) ۵×۰/۵ تقسیم شد. با به دست آوردن تمام بردارهای لحظه ای سرعت در هر کدام



شکل ۳- نوسان در ستون حبابی و تعریف یک پنجره تحلیل.



شکل ۴- آماده سازی تصاویر برای به دست آوردن اندازه حباب و حذف به هم پیوستگی ها و همپوشانی ها.

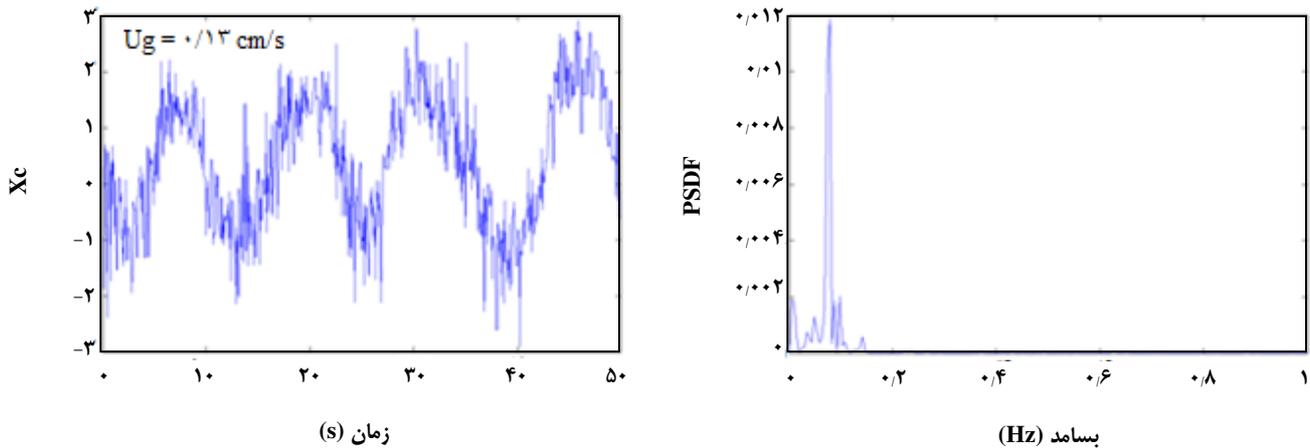
معادله های (۳) و (۴) چگونگی ارتباط سطح و ضریب گریز از مرکز یک حباب با قطرهای آن را نشان می دهند.

$$A = \frac{\pi ab}{4} \quad (3)$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (4)$$

که a و b به ترتیب قطرهای بزرگ و کوچک هستند. با حل معادله های (۳) و (۴) برای هر حباب، قطرهای بزرگ و کوچک آن به دست آمدند و قطر معادل هر حباب از معادله (۵) محاسبه شد.

(۱) Cell



شکل ۵ - نوسان‌های ثبت شده و تابع چگالی توان طیفی در سرعت ۰/۱۳ cm/s گاز.

بین کار حاضر و کار فلگر و همکاران [۱۲] و بووا و راناد [۷] انجام شد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است نتیجه‌های روش عکس‌برداری دارای تطابق خوبی با دیگر روش‌ها است. اختلاف این روش نسبت به روش لیزر - داپلر برابر ۴/۶٪ و نسبت به روش نوسان‌های فشار در حدود ۴٪ است.

اندازه حباب

اندازه‌گیری قطر حباب‌ها در دو نیمه بالایی و پایینی ستون انجام شد. شکل ۷ تأثیر افزایش تعداد حباب‌های بررسی شده بر توزیع اندازه حباب‌ها در نیمه بالایی ستون را نشان می‌دهد. بررسی تعداد حباب اندازه‌گیری شده بر اندازه قطر ساتر میانگین نشان می‌دهد که با افزایش تعداد حباب‌ها از ۴۵۰ به ۴۵۰۰ عدد، تنها حدود ۳٪ تغییر در اندازه قطر ساتر میانگین وجود خواهد داشت. بنابراین استفاده از ۴۰۰-۹۰۰ حباب برای اندازه‌گیری قطر ساتر مناسب است و حتی حذف همپوشانی حباب‌ها در تصاویر نیز تأثیر چندانی در اندازه قطر ساتر نخواهد داشت و در شرایطی که همپوشانی در ستون حبابی وجود داشته باشد با حذف آنها و استفاده از سایر حباب‌ها، قطر ساتر قابل محاسبه است.

برای بررسی درستی اندازه‌گیری قطر با روش عکس‌برداری، از تعدادی گوی با قطر معلوم استفاده شد و قطر ساتر، با خطای ۰/۲٪ با روش عکس‌برداری به‌دست آمد. قطر ساتر در بالای ستون برابر ۷/۲ mm بود و در نیمه پایینی که توزیع اندازه آن در شکل ۸ نشان داده شده برابر ۶/۷ mm محاسبه شد. دلیل این افزایش قطر، افزایش پدیده به هم پیوستگی با افزایش ارتفاع در ستون است.

از این سلول‌ها، برآیند سرعت‌ها در هر سلول به وسیله برآیند مومنتم به دست آمد.

$$V_x = \frac{\sum(m_{bi} V_{xbi})}{\sum(m_{bi})} \quad (8)$$

$$V_y = \frac{\sum(m_{bi} V_{ybi})}{\sum(m_{bi})} \quad (9)$$

که در این معادله‌ها m_{bi} جرم حباب شماره i داخل سلول و V_{ybi} و V_{xbi} به ترتیب مولفه‌های افقی و عمودی سرعت آن حباب هستند. جرم هر حباب (m_{bi})، طبق معادله (۱۰) از روی قطر معادل (d_i) آن حباب و چگالی فاز گاز (هوا) به دست آمد.

$$m_{bi} = \rho_{Air} \times \frac{\pi d_i^3}{6} \quad (10)$$

با داشتن بردار عمودی و افقی سرعت در هر سلول و رسم آن، الگوی حرکت در ستون به‌دست آمد. برای رسم بردارهای سرعت به‌دست آمده و خطوط جریان فاز گاز از نرم افزار Tecplot 360 استفاده شد.

نتیجه‌ها و بحث

بسامد نوسان توده حباب

در شکل ۵، نمونه‌ای از نوسان‌های مرکز توده حباب (X_c) در سرعت گاز ۰/۱۳ cm/s ثبت و تابع چگالی توان طیفی متناظر آن رسم شده است.

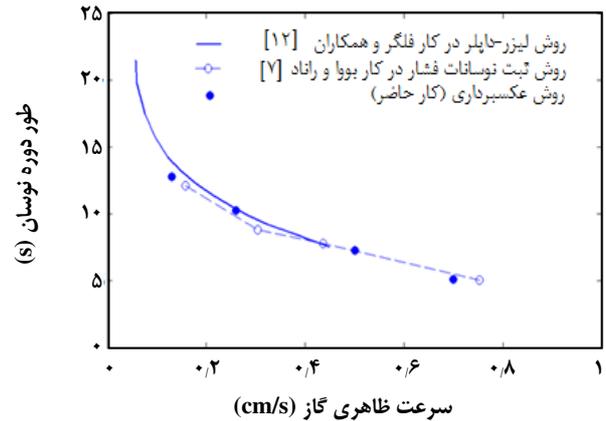
با ثبت نوسان‌های مرکز توده حباب در سرعت‌های گوناگون و رسم طول دوره نوسان در سرعت‌های گوناگون (شکل ۶) مقایسه‌ای

مسیر، جهت و سرعت حباب

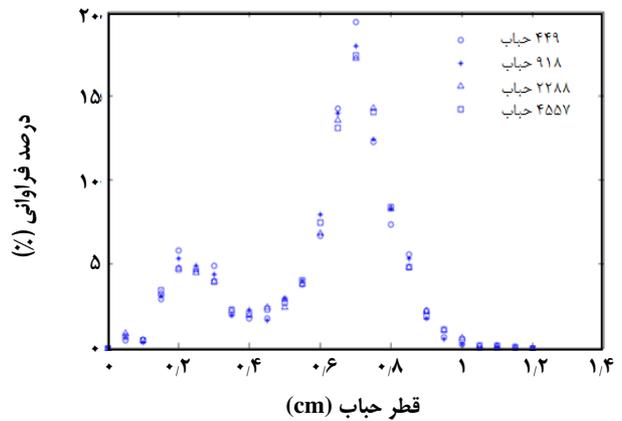
کارهای انجام شده تا کنون، مسیر حرکت حباب ها را از روی رسم مرکز حباب ها در تصاویر متوالی به دست آوردند [۱۶]. شکل ۹ روش پیدا کردن مسیر حباب ها در ۲۰ تصویر متوالی را نشان می دهد. شکل ۱۰ جهت حرکت حباب ها در نیمه پایینی ستون به همراه خطوط جریان آن ها که از روی بردارهای سرعت به دست آمده، نشان می دهد. کلیه این مراحل توسط برنامه هایی که در نرم افزار Matlab نوشته شده، انجام شد که باعث تسریع در به دست آوردن نتیجه های نهایی شد.

با رسم اطلاعات کمی، که در شکل ۱۰ به صورت کیفی نشان داده شده اند می توان به نتیجه های خوبی رسید. شکل ۱۱ سرعت عمودی حباب ها را در دو ارتفاع ۱۵ cm و ۳۵ cm در عرض ستون حباب نشان می دهد. با افزایش ارتفاع، سرعت حباب ها در کنار دیواره کمتر شده و حباب هایی که دارای سرعت منفی هستند افزایش می یابند. از سویی با افزایش ارتفاع در ستون حباب، عرض توده حباب افزایش می یابد. در نتیجه با ثابت بودن شدت جریان هوا، سرعت آن در مرکز ستون، با افزایش ارتفاع، کاهش خواهد یافت.

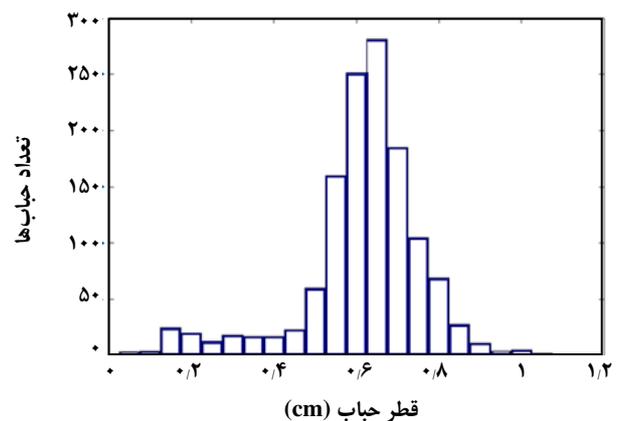
شکل ۱۲ نیز نمودار فراوانی سرعت عمودی و افقی حباب ها را در دو نیمه ستون نشان می دهد. همان گونه که مشخص است در نیمه پایینی ستون، درصد حباب های با سرعت کمتر بیشتر است؛ حال آن که حباب های با سرعت منفی در بالای ستون بیشتر دیده می شوند. باید به این نکته توجه داشت که در نیمه پایینی ستون، سرعت های کم و منفی حباب ها مربوط به کنار دیواره های ستون است. در این قسمت حباب ها به صورت منفرد بوده و هر کدام به صورت مجزا شناسایی شده و سرعت آنها ثبت می شود. اما حباب های با سرعت بالا در مرکز ستون قرار دارند. در این محل همپوشانی حباب ها بسیار زیاد است و امکان شناسایی حباب ها به صورت منفرد از بین می رود. به همین دلیل به جای چند حباب با سرعت بالا، سرعت یک دسته حباب ثبت می شود. در حالی که در نیمه بالایی ستون حباب ها از هم جدا شده و امکان ثبت سرعت حباب های منفرد بیشتر خواهد بود و به همین خاطر است که درصد حباب های با سرعت کم، در نیمه پایینی، بیشتر به دست آمده است. برآیند نوسانات افقی برابر صفر است. در واقع حرکت حباب ها با وجود نوسان های لحظه ای، به طور میانگین بدون نوسان بوده و حباب ها به سمت بالا می روند.



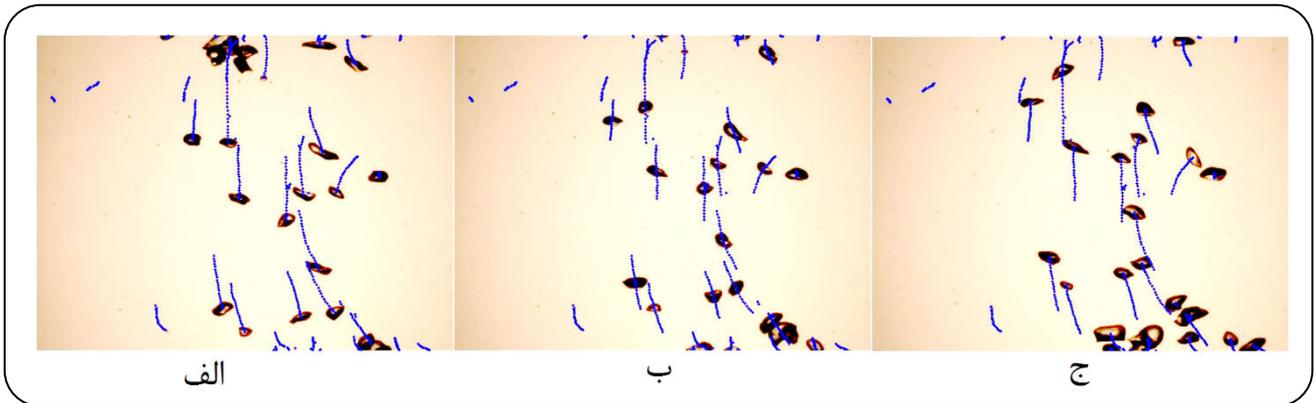
شکل ۶ - مقایسه روش عکس برداری ارائه شده با روش لیزر - دایالر [۱۲] و نوسان های فشار [۷].



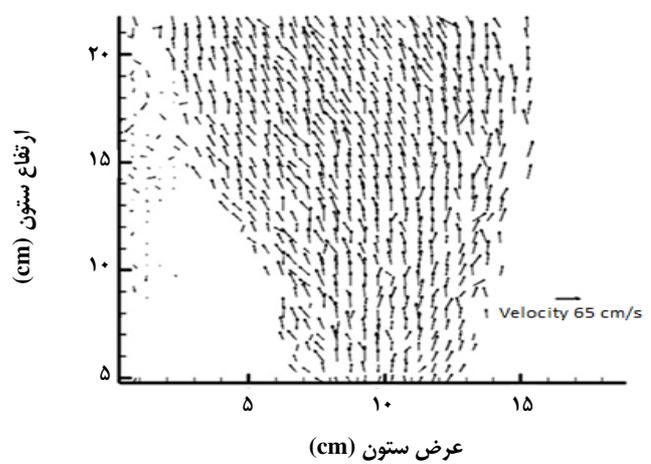
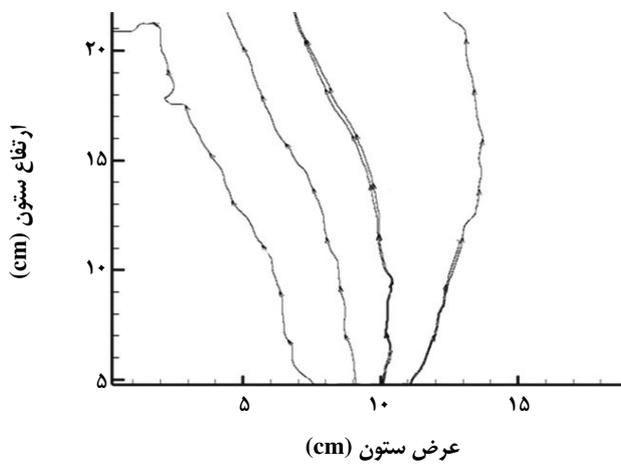
شکل ۷- تأثیر افزایش تعداد حباب های بررسی شده بر توزیع اندازه حباب در نیمه بالایی ستون حبابی با توزیع کننده شماره یک و سرعت گاز ۰/۱۳ cm/s



شکل ۸ - نمودارهای توزیع اندازه در نیمه پایینی ستون حبابی و با توزیع کننده شماره یک در سرعت گاز ۰/۱۳ cm/s.



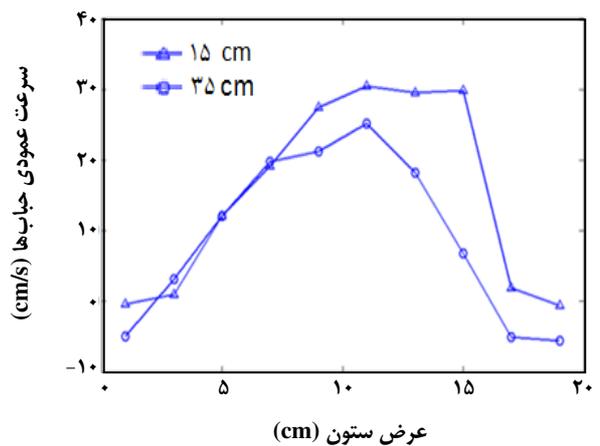
شکل ۹- مسیر حرکت حباب ها در ۲۰ تصویر متوالی الف: تصویر شماره n-10 ب: تصویر شماره n ج: تصویر شماره n+10.



شکل ۱۰- به دست آوردن بردارهای برآیند سرعت و خطوط جریان فاز گاز در نیمه پایینی ستون حبابی..

نتیجه گیری

ویژگی‌های حباب از جمله بسامد نوسان، اندازه، مسیر، سرعت و جهت حرکت با توسعه روش عکس‌برداری و پردازش تصویر و در شرایط عملیاتی جدید به دست آمد. بسامد نوسان توده حباب‌ها با روشی نو (تأثیر وزن حضور حباب‌ها در به دست آوردن مرکز توده حباب) و به کمک عکس‌برداری به دست آمد و روش ارائه شده تا سرعت گاز 0.7 cm/s آزمایش شد. با بررسی و مقایسه این روش با کار فلگر و همکاران [۱۲] و کار بووا و راناد [۷] درستی این روش تأیید شد. اختلاف روش عکس‌برداری در محاسبه بسامد نوسان توده حباب نسبت به روش لیزر - داپلر $4/6\%$ و نسبت به روش نوسان‌های فشار 4% بود. قطر حباب‌ها و توزیع اندازه آن با روش عکس‌برداری و با دقت $99/8\%$ به دست آمد



شکل ۱۲- درصد فراوانی سرعت افقی و عمودی حباب‌ها در نیمه بالایی و پایینی ستون حباب با شدت جریان هوا 0.8 L/min .

فهرست نمادها

A	سطح حباب، cm^2	و مشکل همپوشانی حباب ها در به دست آوردن اندازه قطر رفع شد. همچنین معلوم که در سرعت های کم، به علت غالب بودن
a	قطر بزرگ حباب، cm	پدیده به هم پیوستگی حباب ها، با بالا رفتن حباب ها، اندازه قطر
b	قطر کوچک حباب، cm	ساتر افزایش خواهد یافت. مسیر و جهت حرکت حباب ها
d	قطر معادل حباب، cm	در ستون حبابی با روشی نو از روش برآیند مومنتم محاسبه شد و
d ₃₂	قطر ساتر، cm	نشان داده شد که با بررسی جهت حرکت در تصویرهای متوالی،
e	ضریب گریز از مرکز حباب	می توان الگویی از خطوط جریان در ستون را به دست آورد.
h	ارتفاع پنجره تحلیل	سرعت حباب ها با استفاده از روش "کمترین فاصله با یک حد بالا"،
M	مقدار عددی پیکسل تصاویر	برای اولین بار با روش عکس برداری پرسرعت در ستونی با این
m	جرم حباب	اندازه های به دست آمد. مشخص شد که حباب ها در کنار دیواره
t	زمان، s	دارای سرعت منفی بوده و بر روی دیواره می لغزند و اثری از
w	طول پنجره تحلیل	چسبیدن حباب ها بر دیواره ستون دیده نشد. بررسی اثر ارتفاع
X	طول در ستون حباب، cm	بر روی سرعت حباب ها نشان داد که با افزایش ارتفاع، از سرعت
X _c	مرکز توده حباب، cm	حباب ها، به دلیل افزایش عرض توده حباب ها کاسته خواهد شد.
x	فاصله پنجره تحلیل از دیواره ستون	محاسبه بسامد نوسان توده حباب، اندازه گیری دقیق اندازه قطر
Y	عرض در ستون حباب، cm	حباب ها، به دست آوردن الگوی حرکت و سرعت حباب ها با یک
y	فاصله پنجره تحلیل از توزیع کننده حباب	دوربین مناسب قابل انجام خواهد بود که اطلاعات گسترده ای از
z	ارتفاع در ستون حباب، cm	میدان جریان را در هر نقطه دلخواه از ستون و بدون دخالت
θ	آستانه درخشندگی	در محیط جریان در اختیار پژوهشگران قرار خواهد داد.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۰۹

مراجع

- [۱] مریم اصغر پور، محمد رضا مهرنیا و نوید مستوفی، هیدرودینامیک و انتقال اکسیژن در راکتورهای ستونی حبابی با تاثیر آلاینده های نفتی و ماده فعال سطحی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۰، ص. ۴۵ (۱۳۹۰).
- [2] Deckwer W., "Bubble Column Reactors", John Wiley & Sons (1991).
- [3] Shahbazi B., Rezai B., Koleini S. M. j., Noparast M., The Effect of Bubble Surface Area Flux on Flotation Efficiency of Pyrite Particles, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **32**(2), p.109 (2013).
- [4] Ashfaq S., Al-Dahhan M.H., A Review on Flow Regime Transition in Bubble Columns, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, **5**, p. 1 (2007).
- [5] Baawain M.S., Gamal El-Din M., Clarke K., Smith D.W., Impinging-Jet Ozone Bubble Column Modeling: Hydrodynamics, Gas Hold-up, Bubble Characteristics and Ozone Mass Transfer, *Ozone: Science and Engineering*, **29**, p. 245 (2007).
- [6] Rodrigues R.T., Rubio J., New Basis for Measuring the Size Distribution of Bubbles, *Minerals Engineering*, **16**, p. 757 (2003).

- [7] Ranade V.V., "Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering", Elsevier Inc., Process System Engineering, vol. 5 (2002).
- [8] Xue J., Al-Dahhan M., Dudukovic M.P., Bubble Velocity, Size, and Interfacial Area Measurements in a Bubble Column by Four-Point Optical Probe, *AIChE Journal, Fluid Mechanics and Transport Phenomena*, **54**, p. 350 (2008).
- [9] Tzeng J.W., Chen R.C., Fan L.S., Visualization of Flow Characteristics in a 2-D Bubble Column and Three-Phase Fluidized Bed, *AIChE Journal*, **39**, p. 5733 (1993).
- [10] Diaz M.B., Iranzo A., Cuadra D., Barbero R., Montes F.J., Galan M.A., Numerical Simulation of the Gas-Liquid Flow in a Laboratory Scale Bubble Column Influence of Bubble Size Distribution and Non-Drag Forces, *Chemical Engineering Journal*, **139**, p. 363 (2008).
- [11] Diaz M.B., Montes F.J., Galan M.A., Influence of the Lift Force Closures on the Numerical Simulation of Bubble Plumes in a Rectangular Bubble Column, *Chemical Engineering Science*, **64**, p. 930 (2009).
- [12] Pflieger D., Gomes S., Gilbert N., Wagner H.G., Hydrodynamic Simulations of Laboratory Scale Bubble Columns Fundamental Studies of the Eulerian-Eulerian Modeling Approach, *Chemical Engineering Science*, **54**, p. 5091 (1999).
- [13] Diaz M.B., Montes F.J., Galan M.A., Influence of Aspect Ratio and Superficial Gas Velocity on the Evolution of Unsteady Flow Structures and Flow Transitions in a Rectangular Two-Dimensional Bubble Column, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, p. 7301 (2006).
- [14] Rensen J., Roig V., Experimental Study of the Unsteady Structure of a Confined bubble Plume, *International Journal of Multiphase Flow*, **27**, p. 1431 (2001).
- [15] Buwa V.V., Ranade V.V., Eulerian-Lagrangian Simulations of Unsteady Gas-Liquid Flows in Bubble Columns, *International Journal of Multiphase Flow*, **32**, p. 864 (2006).
- [16] Zaruba A., Lucas D., Prasser H.M., Hohne T., Bubble-Wall Interactions in a Vertical Gas-Liquid Flow: Bouncing, Sliding and Bubble Deformations, *Chemical Engineering Science*, **62**, p. 1591 (2007).
- [17] Acuna C.A., Finch J.A., Tracking Velocity of Multiple Bubbles in a Swarm, *International Journal of Mineral Processing*, **94**, p. 147 (2010).