

شبیه‌سازی عددی و تحلیل عملکرد سامانه تمیزکننده پالس جت فیلتر گاز

امیر عارفیان، نوید زهتابیان رضائی، رضا حسینی ابرده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۱۴

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

کلمات کلیدی:

پالس جت معکوس

تمیزکاری فیلتر

فیلتر گاز

جریان تراکم‌پذیر

جریان گذرا

خلاصه: در مطالعه حاضر، یک سامانه تمیزکننده فیلتر گاز با پالس جت معکوس به‌طور کامل مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی پارامترهای جریان، مدل سه‌بعدی کامل از سامانه مخزن پرفشار نیتروژن تا ورودی فیلترها در مخزن کم‌فشار گاز تمیزشونده مورد مطالعه قرار گرفته و جریان در داخل فیلترها بررسی شده است. صحت‌سنجی نتایج با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مستقل از نوع شیر، پس از باز شدن آبی، در زمان کمتر از ۰/۵ ثانیه، پالس تمیزکاری ایجاد شده و جریان پس از این زمان به شدت مضمحل می‌گردد. اگرچه به دلیل نسبت فشار زیاد سامانه، جریان تمیزکاری با سرعت قابل ملاحظه‌ای می‌شود؛ اما در هیچ قسمت از مجموعه خفگی و شوک وجود نخواهد داشت. جریان جت خروجی از نازل‌های توزیع‌کننده باعث ایجاد یک ونتوری مجازی در ورود به فیلتر شده و با افت فشار استاتیکی موضعی، مکش القائی ایجاد شده جریان ورودی به فیلتر را تا دو برابر افزایش خواهد داد. توزیع جریان تمیزکاری در راستای طول فیلتر یکنواخت نبوده و با توجه به اختلاف در مقادیر افت فشار در مسیر جریان، در ناحیه ابتدایی قابل توجه است و به مرور کاهش می‌یابد. در نهایت، مطالعه پارامتری کاملی بر روی تاثیر فشار مخزن بر افت فشار دو سوی فیلتر انجام گرفته و نتایج حاکی از آن است نشان می‌دهد که بین فشار تانک و اختلاف فشار بین دو سمت جداره متخلخل فیلتر رابطه تقریباً خطی برقرار است.

۱- مقدمه

با توجه به کاربرد وسیع این تجهیزات در صنایع، شناخت مناسب از فیزیک حاکم و نیز پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد آن دارای اهمیت بوده و ابزاری را برای بهینه‌سازی و توسعه سامانه برای کاربرد در شرایط مختلف فراهم خواهد آورد.

پژوهش‌های مختلف در سال‌های اخیر در حوزه تمیزکننده‌های پالس جت معکوس به روش‌های عددی و تجربی انجام شده است. در مطالعات تجربی که تاکنون در این حوزه انجام یافته است مواردی چون تجمع مجدد ذرات جدا شده از یک فیلتر بر روی فیلترهای جانبی، افت فشار، تغییرات دبی سیال خروجی از نازل یا فیلتر، نفوذ جرم از درون فیلتر تمیزشده، تاثیر فاصله جت، تاثیر سرعت فیلترسازی، تاثیر فشار جت، تاثیر قطر نازل و تاثیر جنس فیلتر بررسی شده‌اند [۳-۱۸]. فو و گر [۱۹] به شبیه‌سازی تخلیه جریان از مخزن به عنوان کاربردی در تمیزکاری فیلتر پالس جت پرداختند. مقایسه دبی جرمی خروجی از مخزن با داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت.

تمیزسازی فیلترهای گاز دارای ذرات جامد یکی از مهمترین فرآیندهای کارخانه‌های پتروشیمی، سیمان و صنایع دیگر است. تمیزکننده پالس جت فیلتر گاز یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای جداسازی ذرات معلق در جریان است چرا که این روش دارای راندمان جداسازی ذرات مناسب بوده و از منظر اقتصادی نیز به‌صرفه است [۱]. در این نوع از تمیزکننده‌ها، جریان پرفشار گاز از یک مخزن برقرار شده و با گذر از درون نازل‌های تعبیه‌شده، به درون فیلترها دمیده می‌شود. با جریان یافتن این سیال پرفشار از درون فیلتر به سمت بیرون آن، لایه انباشته شده بر روی قسمت بیرونی فیلتر شکسته شده و ریزش می‌کند. این فرآیند به‌طور معمول به مدت بسیار کوتاه انجام می‌گیرد تا کمترین میزان اختلال در فرآیند اصلی مجموعه که تمیزسازی گاز دارای ذرات جامد است، اتفاق بیافتد [۲].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hoseinir@aut.ac.ir



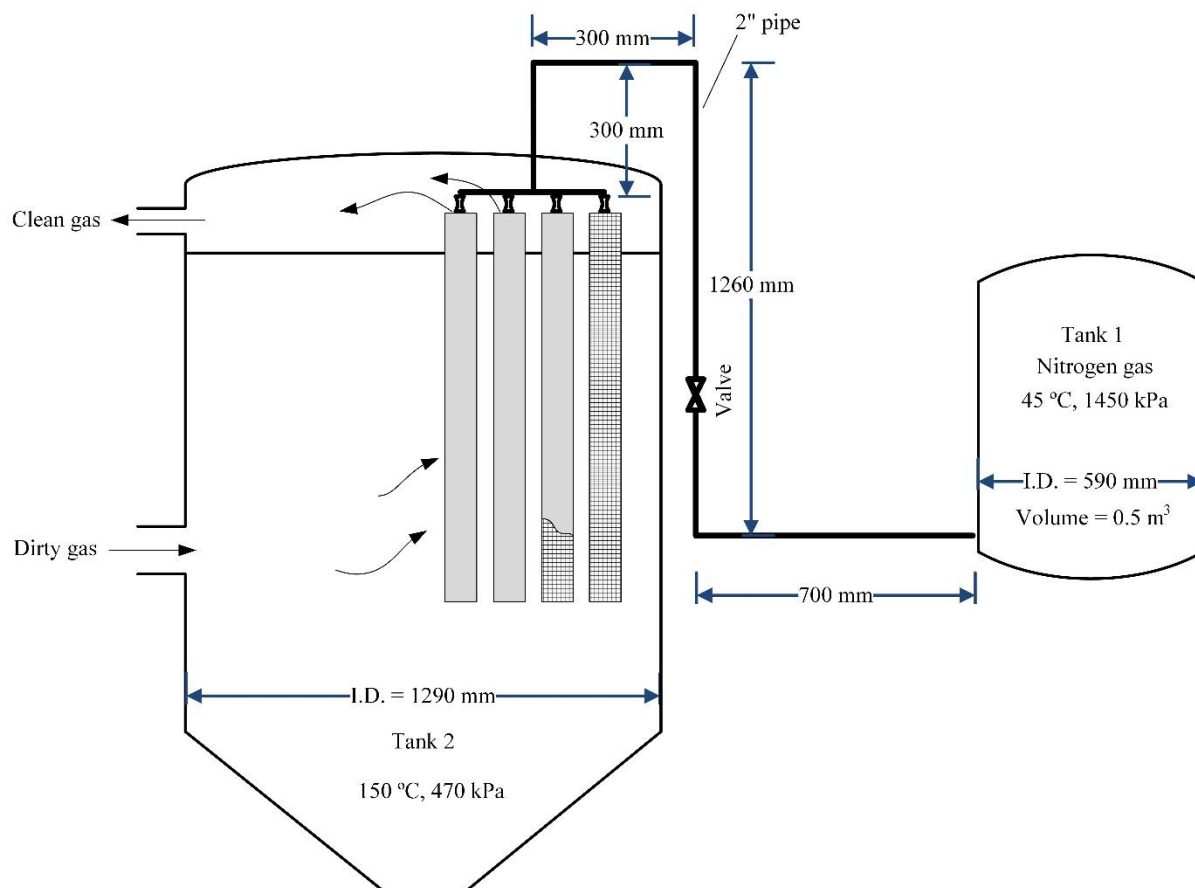
طرح دوزنقه‌ای و مستطیلی بوده و تنها به مدلسازی یک فیلتر اقدام شده است. نتایج حاکی از بروز غیریکنواختی شدید فشار استاتیک در بخش پرفشار فیلتر با پلیسه مثلثی است. همچنین بهترین عملکرد تمیزکنندگی در فیلتر پلیسه‌دار از نوع دوزنقه همگرا مشاهده شده است.

با توجه به پیشینه تحقیق، تا کنون مدلسازی عددی کاملی که به بررسی فرآیند تمیزکاری فیلتر گاز به روش پالس‌جت پرداخته و اثر تمامی اجزای مجموعه اعم از مخزن گاز پرفشار، خط لوله انتقال، شیر قطع و وصل جریان، توزیع‌کننده، نازل و فیلتر را در نظر گرفته باشد، انجام نشده است. در مطالعه حاضر به بررسی جریان تراکم‌پذیر گذرا در مجموعه تمیزکاری فیلتر گاز به روش پالس‌جت با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت با حضور تمامی اجزای مجموعه پرداخته شده است. نوآوری مطالعه حاضر شبیه‌سازی یکپارچه سامانه تمیزکننده پالس‌جت با جزئیات هندسی مربوط به مقیاس کاربردی صنعتی آن است که بستر ارزیابی‌ها و مقایسه‌های وسیعی را در ایجاد می‌کند. همانگونه که در مرور ادبیات ملاحظه می‌شود، تا کنون هیچ کار عددی به بررسی یکپارچه سامانه نپرداخته است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی‌های جزئی که در پژوهش‌های پیشین انجام شده، ارزیابی پدیده‌هایی چون ایجاد خفگی (در سامانه اصلی) و یا جریان‌های ثانویه و بازگشتی وجود ندارد؛ از این رو شبیه‌سازی کامل و یکپارچه با اهمیت خواهد بود؛ به عنوان مثال صرف ایجاد خفگی در سامانه، باعث خواهد شد ضمن کاهش فشار (جرم) مخزن سیال تمیزکاری، جریان تمیزکاری در حد اشباع نهایی خود مانده و عملاً کارایی سامانه کاهش یابد. بدیهی است با توجه به اینکه ایجاد خفگی تابع هندسه و شرایط سیال است، ارزیابی این مسأله در حالت شبیه‌سازی جزئی قابل استناد نخواهد بود. نوآوری دیگر مطالعه بررسی تاثیر فشار مخزن بر اختلاف فشار دو سوی فیلتر است که معیاری بسیار مناسب برای سنجش قدرت تمیزکنندگی سامانه است.

۲- هندسه مسأله و شرایط کاری سامانه

نمای شماتیک سامانه تمیزکننده پالس‌جت فیلتر گاز در شکل ۱ نشان داده شده است. گاز پرفشار نیتروژن با فشار و دمای برابر با ۱۴۵۰ کیلوپاسکال و ۴۵ درجه سانتیگراد در مخزنی به حجم ۵/۰ مترمکعب وجود داشته و با باز شدن شیر ارتباطی در زمانبندی معین،

بررسی آن‌ها نشان داد که در صورت در نظر گرفته نشدن اثر اصطکاک در خروجی، نتایج ۱۰ درصد بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌شود. کوروس و همکاران [۲۰] به بررسی تمیزکاری پالس‌جت فیلترهای سرامیکی قابل بکارگیری در دما و فشار بالا پرداختند. در مطالعه آن‌ها، شبیه‌سازی ریاضی بر روی جریان گذرکننده از درون فیلتر سرامیکی انجام گرفته و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. لی و همکاران [۲۱] به بررسی عددی تمیزکاری فیلتر سرامیکی به روش پالس‌جت پرداختند. نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت [۲۲] برای این شبیه‌سازی بکار گرفته شده است. به منظور مدلسازی تمیزکاری پالسی، شرط مرزی به نازل‌ها اعمال شده و در حقیقت مخزن پرفشار و خط انتقال سیال به دهانه نازل مدلسازی نشده است. از جمله خروجی‌های مطالعه ایشان جریان درون محیط متخلخل فیلتر و خارج سطح آن است. لو و همکاران [۲۳] به بررسی عددی جریان درون فیلتر در یک مجموعه تمیزکننده فیلتر پالس‌جت اقدام نمودند. نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت برای شبیه‌سازی در مطالعه آن‌ها استفاده شده است. به اعتقاد ایشان، دلیل اختلاف بین نتایج مدلسازی با نتایج تجربی، در یکنواخت فرض نمودن گذردهی محیط متخلخل است. دانگ و همکاران [۲۴] به روش عددی به بررسی فشار بیشینه بر روی فیلتر پرداختند. همچنین در مطالعه ایشان توزیع طولی فشار در طول فیلتر ارائه شده است. در این مطالعه نیز، تنها فیلتر مدل شده و به بررسی مخزن پرفشار پرداخته نشده است. اندرسون و همکاران [۲۵] به مطالعه عددی و تجربی عملکرد تمیزکننده فیلتر پالس‌جت فشار پایین (۲۰۰ کیلوپاسکال) پرداخته و به بررسی تأثیر طراحی نازل بر عملکرد مجموعه اقدام کردند. مطالعه عددی با استفاده از کد تجاری صورت گرفته و با استفاده از داده‌های تجربی راستی‌آزمایی شده است. چن و چن [۲۶] به بررسی عددی جریان درون یک تک‌فیلتر با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس سی‌اف‌ایکس پرداختند. شرایط جریان گاز تمیزکننده و شیوه جریان پالسی گاز به درون فیلتر به صورت پیش‌فرض وارد نرم‌افزار شده و توزیع فشار گزارش شده است. لی و همکاران [۲۷] از نرم‌افزار انسیس فلونت برای بررسی پالس‌جت ورودی به تک‌فیلتر مستطیلی استفاده کردند. عمده تمرکز این مطالعه بر بررسی هندسه نازل در عملکرد تمیزکننده استوار بوده است. چن و همکاران [۲۸] به بررسی اثر چهار شکل از پلیسه فیلتر با استفاده از نرم‌افزار تجاری پرداختند. پلیسه‌ها به صورت مثلثی، دو



شکل ۱: شماتیک هندسه سامانه تمیزکننده پالس جت فیلتر گاز همراه با ابعاد اصلی و شرایط کاری

Fig. 1. Schematic view of the pulse-jet cleaning system with the main dimensions and operating conditions

به دلیل سریع بودن فرآیند تخلیه پالس جت و عدم وجود زمان کافی برای انتقال حرارت، دیواره‌های مخزن پرفشار نیتروژن آدیاباتیک فرض شده است. در شبیه‌سازی حاضر به منظور کاهش پیچیدگی مسأله و نیز کاستن از هزینه‌های محاسباتی ناشی از مدل‌سازی شیر قطع و وصل جریان تمیزکاری، این شیر به‌طور مستقیم مدل‌سازی نشده است، بلکه در محل شیر واقع در مسیر لوله‌کشی سامانه، یک فصل مشترک برای ناحیه قبل و بعد از شیر در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه برای فشار در ناحیه قبل از شیر برابر فشار مخزن شماره ۱ و برای ناحیه بعد از شیر برابر فشار مخزن شماره ۲ قرار داده شده است. با شروع حل، جریان از محل شیر آغاز شده و تداومی کننده فیزیک حاکم بر مسأله در حضور شیر خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر بررسی پالس جریان تمیزکاری است، مدل‌سازی شیر با در نظر گرفتن مرز متحرک لازم نبوده و چاره‌اندیشی فوق، علاوه بر کاستن هزینه‌های محاسباتی، به خوبی فیزیک مسأله را تبیین می‌کند.

به مخزن هدف که شامل فیلترهای تمیزکننده است، تخلیه می‌گردد. لوله ارتباطی دارای قطر داخلی ۵/۰۸ سانتیمتر (معادل ۲ اینچ) و طول کلی ۲۶۵۰ میلیمتر است که در مسیر آن یک شیر قطع و وصل و سه زانویی واقع است و در نهایت به توزیع‌کننده درون مخزن کم فشار متصل می‌گردد. مخزن کم فشار دارای فشار و دمای برابر با ۴۷۰ کیلوپاسکال و ۱۵۰ درجه سانتیگراد است و سامانه مورد نظر برای کاربردهای دما بالای تمیزکننده پالس جت در نظر گرفته می‌شود.

با باز شدن شیر و خروج جرم، میزان نیتروژن در مخزن پرفشار (مخزن شماره ۱) کاهش یافته و در نتیجه دما و فشار گاز درون آن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر در مخزن کم‌فشار (مخزن شماره ۲)، با توجه به ورود و خروج پیوسته جرم قابل توجه مربوط به گاز تمیزشونده در فرآیند تخلیه پالس جت، فشار تقریباً ثابت در نظر گرفته می‌شود. با تخلیه جریان از درون توزیع‌کننده به درون فیلتر، جریان در فیلتر در راستای محوری (عمق فیلتر) و شعاعی (محیط فیلتر) توزیع شده و فرآیند تمیزکاری را انجام خواهد داد.

۳- معادلات حاکم بر مسأله

با توجه به اینکه مسأله از یک سو به صورت گذرا و تابع زمان مورد بررسی قرار گرفته و از سوی دیگر با توجه به ایجاد جریان با سرعت زیاد نیاز به بررسی پدیده‌های تراکم‌پذیری خواهد بود، از معادلات کامل گذرا و تراکم‌پذیر ناویر-استوکس استفاده شده است. علاوه بر معادلات اصلی پیوستگی، مومنتوم و انرژی، معادلات مربوط به مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ همراه با ذکر ثوابت استفاده شده در مدل ارائه گردیده است. معادلات اصلی حاکم بر جریان گذرای سیال تراکم‌پذیر شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب عبارت است از [۲۲]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_H u_i + Q_H \quad (3)$$

که در آن‌ها، $H = h + \frac{u^2}{2}$ آنتالپی سکون، S_i نیروی حجمی در واحد جرم سیال، Q_H توان چشمه و یا چاه حرارتی در واحد حجم، τ_{ij} تانسور تنش برشی و q_i شار پخش حرارت در سیال است. برای سیال‌های نیوتنی نظیر نیتروژن، تانسور تنش برشی طبق رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

و با اعمال شرط بوزینسک تانسور تنش رینولدز نیز طبق رابطه (۵) به دست می‌آید [۲۲].

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

δ_{ij} تابع دلتای کرونگر، μ ویسکوزیته دینامیکی، μ_t ویسکوزیته توربولانسی و k انرژی جنبشی توربولانسی است. بدیهی است که برای جریان آرام هر دو مقدار μ_t و k برابر صفر خواهد بود. در الگوی توربولانسی $k-\varepsilon$ ویسکوزیته توربولانسی بر اساس دو مشخصه توربولانسی انرژی جنبشی اغتشاش k و استهلاک توربولانس ε طبق رابطه (۶) تعریف می‌گردد.

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

f_μ شاخص ویسکوزیته توربولانسی طبق رابطه (۷) است [۲۲].

$$f_\mu = \left(1 - \exp(-0.025) R_y\right)^2 \left(1 + \frac{20.5}{R_T}\right) \quad (7)$$

که در آن $R_T = \rho k^2 / \mu \varepsilon$ و $R_y = \rho \sqrt{k} y / \mu$ بوده و y فاصله از دیواره است. با استفاده از این تعریف برای شاخص ویسکوزیته توربولانسی، امکان گذار از حالت آرام به مغشوش وجود خواهد داشت. دو معادله انتقال اضافی برای توصیف انرژی جنبشی توربولانس و استهلاک طبق روابط (۸) و (۹) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon \quad (9)$$

جملات چشمه S_k و S_ε به ترتیب عبارت است از:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \quad (10)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

که P_B نمایانگر تولید اغتشاشات بر اثر نیروهای شناوری بوده و طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (12)$$

ثابت $\sigma_B = 0.9$ و C_B برای مقادیر P_B بزرگتر از صفر، برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود [۲۲]. برای ضرایب f_1 و f_2 به ترتیب:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu} \right)^3 \quad (13)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-R_T^2) \quad (14)$$

ثوابت C_μ ، $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، σ_k ، σ_ε به صورت تجربی تعیین می‌گردد. مقادیر پیش فرض برای این کمیت‌ها در جدول ۱ داده شده است. در مورد پخش حرارت در سیال در صورتی که عدد لوئیس^۲ (نسبت

2 Lewis Number (Le)

1 Kronecker delta function

که ثابت $\sigma_c = 0.9$ ، عدد پراتل و h آنتالپی است. یادآور می‌شود مجموعه معادلات ذکر شده هم برای جریان آرام و هم مغشوش قابل استفاده بوده و شرایط گذرا بین این دو حالت را نیز پوشش می‌دهد.

۴- روش حل عددی

بر اساس اطلاعات موجود از ابعاد و نحوه قرارگیری اجزا در سامانه، مدل سه‌بعدی شامل مخزن پرفشار، لوله‌های اتصال‌دهنده، مخزن کم‌فشار و در نهایت توزیع‌کننده و محل قرارگیری فیلترها در مخزن کم‌فشار، تولید شده و به عنوان دامنه محاسباتی تعیین شده است. علاوه بر استفاده از شبکه باسازمان، با توجه به پیچیدگی نسبی هندسه، از شبکه هیبرید با سلول‌های شش‌وجهی بی‌سازمان برای لایه مرزی و سلول‌های چهاروجهی بی‌سازمان برای خارج لایه مرزی استفاده شده است. در این حالت ضمن حفظ کیفیت شبکه و ایجاد

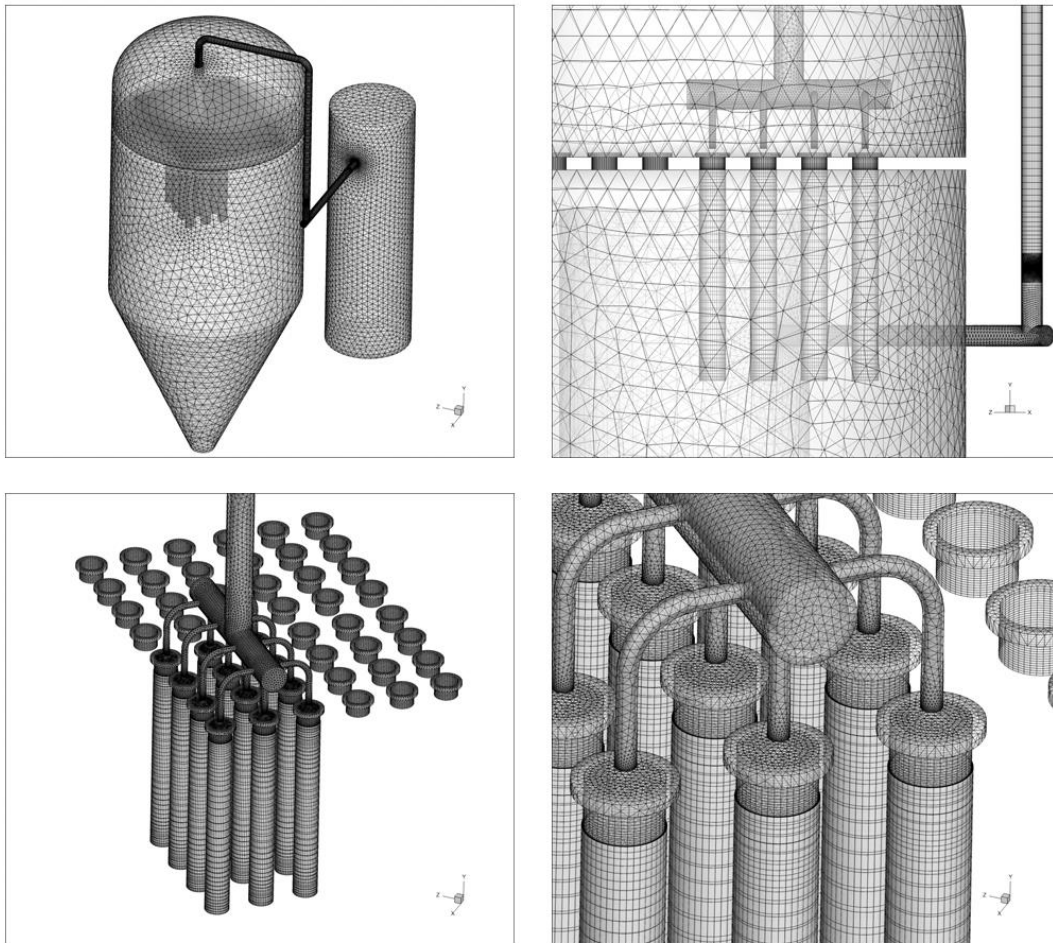
جدول ۱: مقادیر پیش‌فرض برای ثوابت الگوی توربولانسی $k-\varepsilon$ مورد استفاده [۲۲]

Table 1. Predefined values for the coefficients of the $k-\varepsilon$ turbulence model [22]

مقدار پیش‌فرض (مورد استفاده)	ثابت
۰/۰۹	C_μ
۱/۴۴	$C_{\varepsilon 1}$
۱/۹۲	$C_{\varepsilon 2}$
۱	σ_k
۱/۳	σ_ε

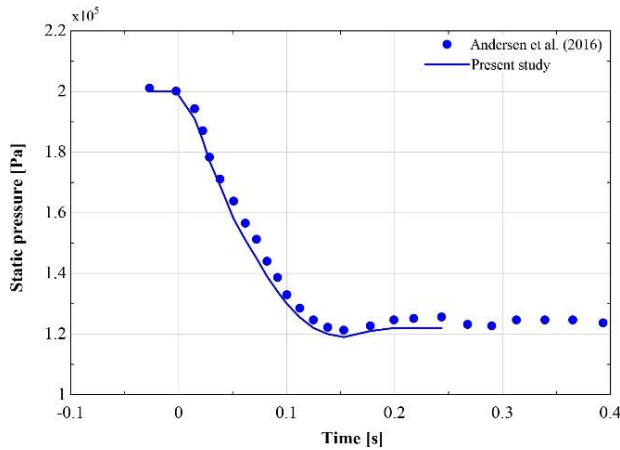
ضریب پخش حرارتی به ضریب نفوذ جرمی) برابر یک در نظر گرفته شود، شار پخش حرارت طبق رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد [۲۲].

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (15)$$

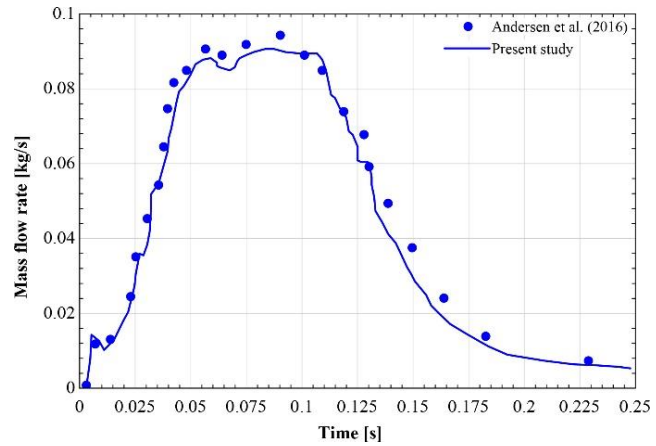


شکل ۲: دامنه محاسباتی و شبکه بدون سازمان منطبق با آن در نواحی مختلف سامانه

Fig. 2. The computational domain and the corresponding unstructured grid in different parts of the system



(ب)



(الف)

(الف)

شکل ۳: صحت‌سنجی مدل حاضر با مقایسه تغییرات زمانی (الف) فشار مخزن و (ب) دبی جرمی گذرکننده از نازل با نتایج مطالعه اندرسن و همکاران [۲۵]

Fig. 3. Validation of the present model by comparing variation of (a) the tank pressure and (b) the mass flow rate of a nozzle versus time with the results of Andersen et al. [25]

برای اجرای شبیه‌سازی از یک گره ۱۶ هسته‌ای پردازنده‌های ای. ام. دی. اوپترون^۳ با سرعت ۲/۳ گیگاهرتز و ۱۶ گیگابایت حافظه اصلی استفاده شده است. معیار همگرایی برای کاهش مقدار باقیمانده‌های نسبی به کمتر از 10^{-6} برای پارامترهای اصلی جریان در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا به صحت‌سنجی کد تجاری با استفاده از مدل تحلیلی پرداخته شده سپس نتایج مربوط به استقلال از شبکه محاسباتی بیان شده و سپس نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۵-۱- صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی و استقلال از شبکه محاسباتی
به منظور صحت‌سنجی مدل تولید شده، از نتایج مطالعه عددی - تجربی اندرسن و همکاران [۲۵] استفاده شده است. بدین منظور، هندسه‌ای کاملاً مشابه با هندسه آن مطالعه تولید شده و خروجی‌های ارائه شده در شکل ۳ استخراج شده است. در شکل ۳ نتایج مربوط به مطالعه حاضر و مطالعه اندرسن و همکاران [۲۵] برای تغییرات زمانی فشار گاز درون مخزن و نیز دبی جرمی گذرکننده از نازل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روند و مقادیر کمی هر دو حل مطابقت داشته است و حاکی از صحت مدل

تعداد مناسب سلول برای به دست آوردن متغیرهای اصلی مسأله (سرعت، دما و فشار) لایه مرزی را نیز با دقت مناسب ضبط خواهد کرد. در شکل ۲ دامنه محاسباتی و شبکه بدون سازمان منطبق با آن در نواحی مختلف سامانه نشان داده شده است. بدترین مقدار چولگی برای شبکه تولید شده ۰/۷۵ است و حدود ۸۵ درصد سلول‌ها چولگی کمتر از ۰/۴ داشته که نشان‌دهنده کیفیت مناسب شبکه تولید شده است.

با توجه به طبیعت مسأله، جریان به صورت گذرا با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه از فشار و دمای اولیه مخزن (به ترتیب ۱۴۵۰ کیلوپاسکال و ۳۱۸ کلوین) تا رسیدن جریان به حالت سکون تحلیل شده است. نوع حل گر، فشارپایه و الگوریتم کوپلینگ سرعت و فشار، سیمپل^۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در غالب جریان‌های داخلی مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ استاندارد جواب‌های قابل قبولی به دست می‌دهد و از طرفی در این مسأله، مدل‌سازی توربولانس و نیروی اصطکاک در مقابل فشار و دما از اهمیت بسیار کمتری برخوردار است، در شبیه‌سازی حاضر نیز از این مدل با تابع دیواره بهبودیافته^۲ استفاده شده است. گسسته‌سازی معادلات فشار، چگالی، مومنتوم، انرژی و توربولانس به صورت مرتبه دوم انجام شده است. گاز نیتروژن (سیال عامل) به صورت ایده‌آل با ظرفیت گرمایی ویژه متغیر تابع دما فرض شده و ضریب اصطکاک گاز نیز با رابطه ساترلند تخمین زده شده است.

- 1 SIMPLE
- 2 Enhanced wall treatment

جدول ۲: بررسی استقلال از شبکه؛ بررسی تغییرات دبی جرمی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه به ازای تعداد سلول محاسباتی

Table 2. Grid independency test; variation of mass flow rate [kg/s] as a function of number of elements

تعداد سلول	دهانه ورودی نازل ۱-۱	دهانه ورودی فیلتر ۱-۱	دهانه ورودی نازل ۲-۲	دهانه ورودی فیلتر ۲-۲
۱۱۴۰۰۰۰	۰/۳۶۱۱۶۴	۰/۴۹۷۸۹۰	۰/۴۰۸۶۸۸	۰/۵۷۱۵۰۷
۲۲۸۰۰۰۰	۰/۳۱۰۸۹۲	۰/۴۲۳۳۷۶	۰/۳۵۵۳۸۱	۰/۵۱۹۵۵۲
۴۵۶۰۰۰۰	۰/۱۸۷۸۹۲	۰/۳۲۱۰۷۶	۰/۲۰۵۳۸۱	۰/۴۱۹۵۵۲
۶۸۴۰۰۰۰	۰/۱۸۸۲۲۹	۰/۳۲۱۸۲۱	۰/۲۰۶۱۳۷	۰/۴۲۱۵۱۵
۹۱۲۰۰۰۰	۰/۱۸۷۵۰۲	۰/۳۲۰۷۲۵	۰/۲۰۴۹۴۶	۰/۴۱۸۲۴۳

تولید شده است.

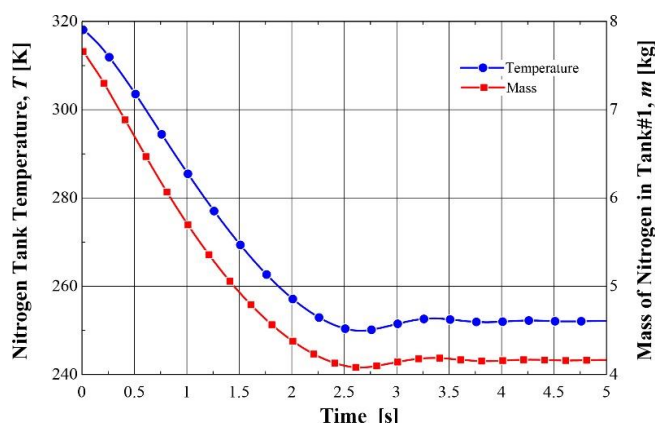
جریان اولیه که منظور از آن صفر شدن سرعت یا انرژی جنبشی است، به مقدار تعادلی خود بازگشته است. در حقیقت در این حالت یک جریان بازگشتی پس از خروج پالس فشاری اولیه ایجاد شده و مخزن نیتروژن را به حالت تعادلی می‌رساند. ذکر مجدد این نکته لازم است که در کاربرد عملی تمیزکننده پالس جت مدت زمان بازبودن شیر محدود بوده و عملاً تا تخلیه کامل مخزن گاز تمیزکننده ادامه نخواهد یافت؛ اگرچه جریان بازگشتی مذکور در این حالت نیز وجود خواهد داشت.

در شکل ۵ رفتار زمانی فشار استاتیک در مخزن پرفشار نیتروژن، میانه لوله ارتباطی دو مخزن و در نهایت در مخزن کم فشار گاز تمیزشونده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تخلیه پالس تا رسیدن به مقادیر تعادلی برای هر سه ناحیه یافته و ایجاد جریان بازگشتی در بازه زمانی ۲/۵ تا ۳/۰ ثانیه مشهود است. مخزن کم فشار گاز تمیزشونده به دلیل مطالعه در حالت بسته با افزایش فشار

در جدول ۲، نتایج بررسی استقلال از شبکه محاسباتی با ارزیابی تغییرات دبی جرمی ورودی به نازل‌ها و فیلترهای ۱-۱ و ۲-۲ به صورت تابعی از تعداد سلول ارائه شده است. در تعداد سلول برابر با ۶۸۴۰۰۰۰ تغییرات نسبی دبی جرمی نسبت به مش درشت‌تر از آن برای نازل ۱-۱، فیلتر ۱-۱، نازل ۲-۲ و فیلتر ۲-۲ به ترتیب برابر ۰/۲۳ درصد، ۰/۱۷ درصد، ۰/۴۶ درصد و ۰/۳۶ درصد بوده است. همچنین با انتخاب تعداد سلول ۹۱۲۰۰۰۰ تغییرات نسبت به شبکه پیشین آن ناچیز می‌باشد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب شبکه‌ای با تعداد سلول ۴۵۶۰۰۰۰ مناسب بوده و نیازی به شبکه ریزتر نمی‌باشد.

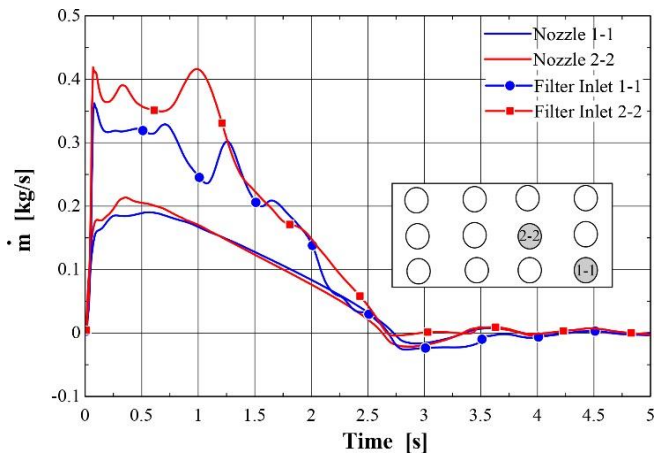
۲-۵- نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان تمیزکاری از مخزن پرفشار تا ورودی فیلترها

در شکل ۴ تغییرات جرم باقیمانده در مخزن پرفشار و دمای گاز درون آن مشاهده می‌شود. پس از باز شدن ناگهانی شیر، زمان تخلیه مخزن پرفشار به مخزن کم فشار حدود ۴ ثانیه به طول انجامیده است و پس از آن پارامترهای سیال ثابت شده است. نکته قابل توجه در این شکل، نوسانی شدن رفتار پارامترها در انتهای تخلیه است؛ چنانکه دما و جرم باقیمانده در مخزن تا مقدار کمینه کاهش یافته و سپس مجدداً افزایش یافته و به مقدار تعادلی رسیده است. در توجیه این رفتار توجه به اینرسی زیاد جریان در تخلیه آدیاباتیک به مخزن کم فشار اهمیت دارد؛ به دلیل فشار دینامیکی جریان خروجی، تخلیه گاز به‌طور غیرتعادلی تا مقادیر بیش از مقدار به دست آمده از تحلیل تعادلی (ترمودینامیکی) ادامه یافته و پس از کاهش و مضمحل شدن



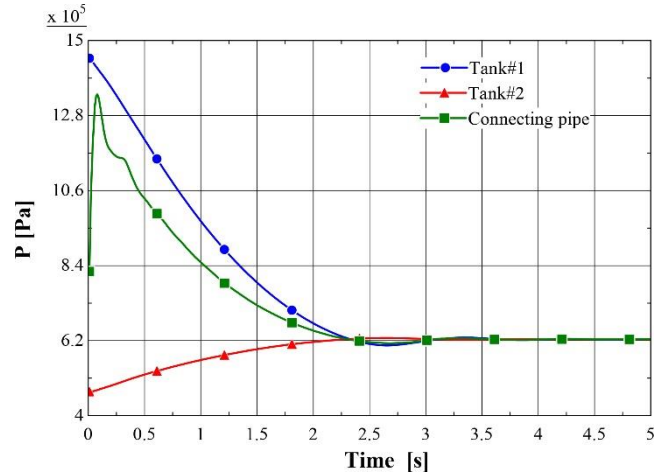
شکل ۴: تغییرات زمانی دمای استاتیک و جرم باقیمانده در مخزن پرفشار نیتروژن در تخلیه به مخزن کم فشار

Fig. 4. Variation of the static temperature and mass of the remaining gas inside the tank versus



شکل ۶: تغییرات زمانی دبی جرمی خروجی از نازل‌ها و ورودی به فیلترهای ۱-۱ و ۲-۲

Fig. 6. Variation of the mass flow rates of nozzles and inlet sections above the filters 1-1 and 2-2



شکل ۵: تغییرات زمانی فشار در نواحی مختلف سامانه در فرآیند تخلیه به مخزن کم‌فشار

Fig. 5. Variation of the pressure of different regions of the system versus time

آن‌ها مکش خواهد کرد. بر این اساس مشاهده می‌شود که دبی ورودی به فیلتر نسبت به میزان خروجی نازل متناظر آن تا حدود دو برابر افزایش یافته است. هندسه نازل، فاصله نازل تا دهانه ورودی به فیلتر و در نهایت زمانبندی جریان پالس‌جت بر این دبی القایی تأثیرگذار خواهد بود. شایان ذکر است پس از اتمام فرآیند، دبی جریان خروجی از نازل و ورودی به فیلتر صفر شده است.

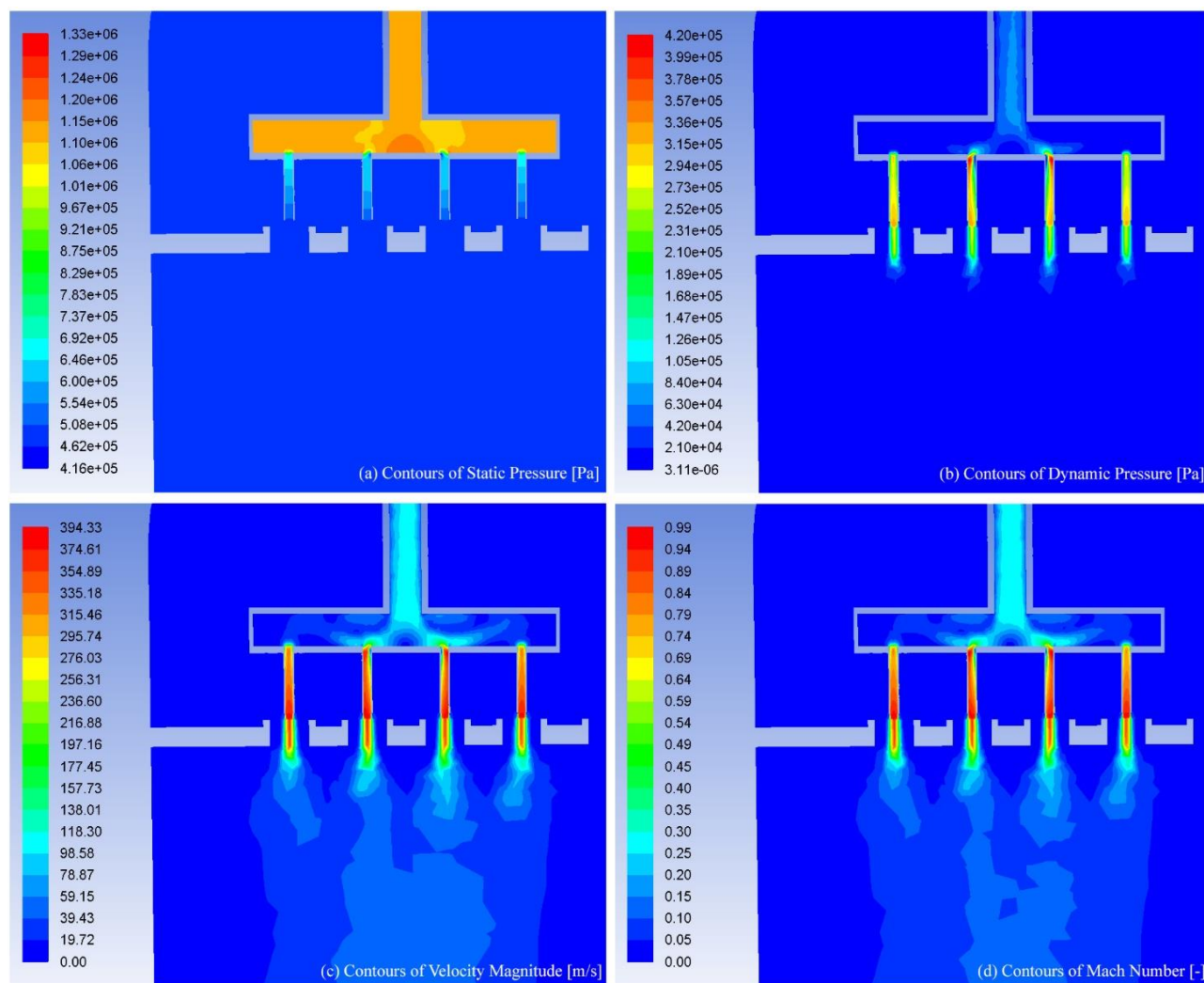
در شکل ۷ کانترهای مربوط به توزیع فشار استاتیک، فشار دینامیک، اندازه سرعت جریان و عدد ماخ در ردیف میانی توزیع‌کننده در مخزن شماره ۲ در زمان بیشینه پالس (۰/۲۶ ثانیه) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در نازل‌های توزیع‌کننده، فشار استاتیک به فشار دینامیک تبدیل شده و جریان وارد دهانه فیلترها شده است. با توجه به توزیع عدد ماخ شرایط زیرصوتی به طور کامل برقرار بوده و پدیده شوک و خفگی در سامانه وجود ندارد. رفتار مکانی متغیرهای جریان برای سایر ردیف‌های توزیع‌کننده نیز مشابه است.

۳-۵- نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان تمیزکاری از ورودی تا خروجی فیلترها در مخزن کم‌فشار

با هدف بررسی جزئی‌تر حرکت پالس فشاری و جریان تمیزکاری در فیلترهای تمیزکننده، هندسه فیلترها به‌طور مستقل مورد مطالعه قرار گرفته است. از این رو برای شبیه‌سازی مورد نظر، دبی جرمی ورودی به فیلترها بر حسب زمان که از شبیه‌سازی قسمت قبل به دست آمده است به عنوان شرط مرزی ورودی به دهانه فیلترها با

مواجهه گشته است. پالس فشاری ایجاد شده در سامانه که در حقیقت عهده‌دار تمیزکاری فیلترها است، با توجه به نمودار فشار لوله ارتباطی در بازه زمانی ۰ تا ۰/۵ ثانیه ایجاد و در ادامه با اضمحلال قابل توجه روبرو شده است. بنابراین در حالت واقعی استفاده از شیر ارتباطی، زمان باز بودن شیر می‌بایست در همین بازه محدود گردد تا علاوه بر تأمین بازده تمیزکاری، مصرف گاز تمیزکننده نیتروژن نیز مدیریت گردد. همچنین بدیهی است که افت فشار کلی سامانه بر حسب زمان برابر اختلاف فشار لحظه‌ای مخزن شماره ۱ و ۲ خواهد بود.

کارایی سامانه تمیزکننده پالس‌جت با میزان تأمین بیشترین دبی جریان تمیزکاری در کمترین زمان ممکن برای تشکیل ضربه و شکستن کیک تشکیل شده بر روی فیلتر ارزیابی خواهد شد. جریان تمیزکاری ایجاد شده در مخزن کم‌فشار به یک توزیع‌کننده رسیده و جریان بر روی ۱۲ فیلتر قرار گرفته در زیر آن تقسیم خواهد شد (شکل ۲). با توجه به یکسان نبودن مسیر جریان تا خروجی نازل‌های تخلیه، دورترین (با شماره ۱-۱) و نزدیک‌ترین (با شماره ۲-۲) نازل به لوله ورودی به توزیع‌کننده و دهانه‌های ورودی فیلترهای متناظر با آن‌ها در شکل ۸ مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۶ رفتار زمانی دبی جرمی خارج شده از دو نازل انتخابی و جریان ورودی به دهانه فیلترهای متناظر آن‌ها نشان داده شده است. با خروج جریان پرسرعت جریان تمیزکاری از نازل‌ها، به دلیل ایجاد یک ونتوری ناشی از خطوط جریان تخلیه، افت فشار استاتیک موضعی در محل ورودی فیلترها ایجاد شده و هوای ساکن اطراف دهانه فیلترها را به درون



شکل ۷: کانتورهای (الف) فشار استاتیک (ب) فشار دینامیک (ج) اندازه سرعت و (د) عدد ماخ در توزیع کننده در زمان ۰/۲۶ ثانیه

Fig. 7. Contours of (a) static pressure (b) dynamic pressure (c) velocity magnitude and (d) Mach number in the distributor at a time of 0.26 s

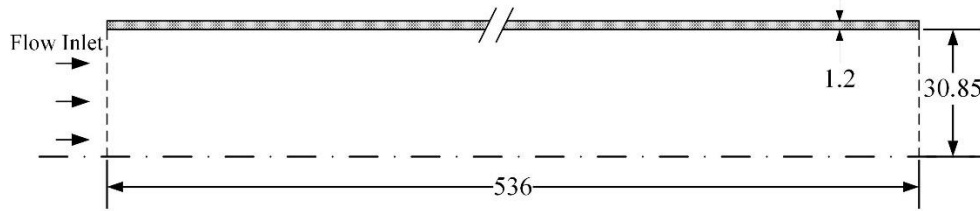
در زمان‌های مختلف نسبت به طول فیلتر رسم شده است. همچنین در شکل ۱۰ تغییرات زمانی سرعت متوسط شعاعی بر روی سطح خارجی فیلترهای ۱-۱ و ۲-۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی زمان‌های مورد مطالعه، سرعت در بخش‌های ابتدایی فیلتر بیشینه بوده که این به دلیل میل طبیعی جریان برای عبور از مسیر کم فشار (نسبت به پیمودن طول فیلتر و خروج از دیواره متخلخل) است؛ بدیهی است که با قرارگیری کیک بر روی فیلتر این عدم یکنواختی در توزیع جریان کاهشی خواهد بود.

روند نزولی و صعودی سرعت متوسط جریان تمیزکاری بر روی سطح خارجی فیلتر در حقیقت به دلیل نوسانات زمانی در دبی تأمین شده در فیلتر است؛ با توجه به شکل ۶ در هر دو نوع فیلتر دبی خروجی از نازل‌ها تا زمان حدودی ۰/۱ ثانیه به صورت تقریباً خطی

استفاده از توابع تعریف شده کاربر^۱ در انسیس فلوئنت تعریف شده است. شرط مرزی خروجی برای این مورد کاوی بر روی سطح بیرونی فیلترها و به صورت فشار خروجی^۲ اعمال گردیده است. مطابق شکل ۲، شبکه‌بندی و شبیه‌سازی فیلترها در حالت سه‌بعدی انجام شده است. شماتیک هندسه فیلتر همراه با ابعاد اصلی در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر دبی ورودی به فیلترهای ۱-۱ و ۲-۲ از پروفیل‌های شکل ۶ به دست آمده است.

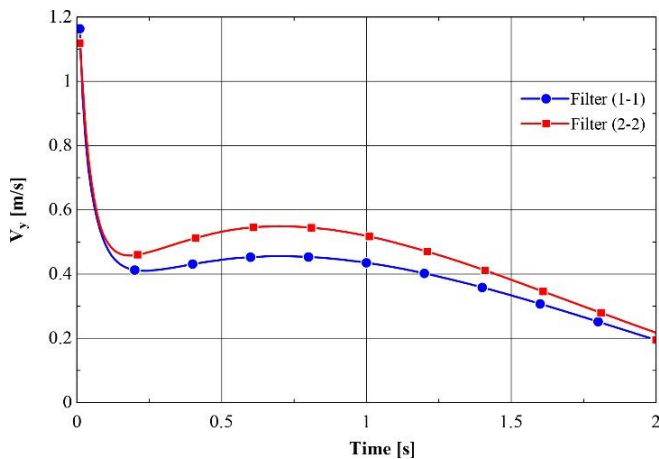
فیلترهای مورد استفاده در سامانه، فلزی بوده و دارای تخلخل و نفوذپذیری^۳ به ترتیب ۷۰٪ و $1/602 \times 10^{-13}$ متر مربع است [۲۳] و [۲۹]. در شکل ۹ توزیع مکانی سرعت شعاعی در میانه جداره متخلخل

- 1 User Defined Functions (UDF)
- 2 Pressure outlet
- 3 Permeability



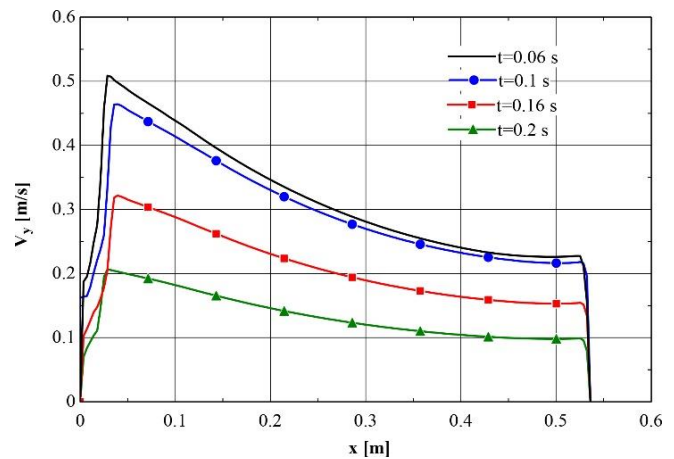
شکل ۸: شماتیک هندسه فیلترهای مخزن کم‌فشار به همراه ابعاد اصلی بر حسب میلی‌متر

Fig. 8. Schematic view of the low pressure tank filters with the main dimensions in mm



شکل ۱۰: رفتار زمانی مقدار متوسط سرعت شعاعی بر روی دیواره خارجی فیلترهای ۱-۱ و ۲-۲

Fig. 10. Average radial velocity on the outer layer filters 1-1 and 2-2 versus time

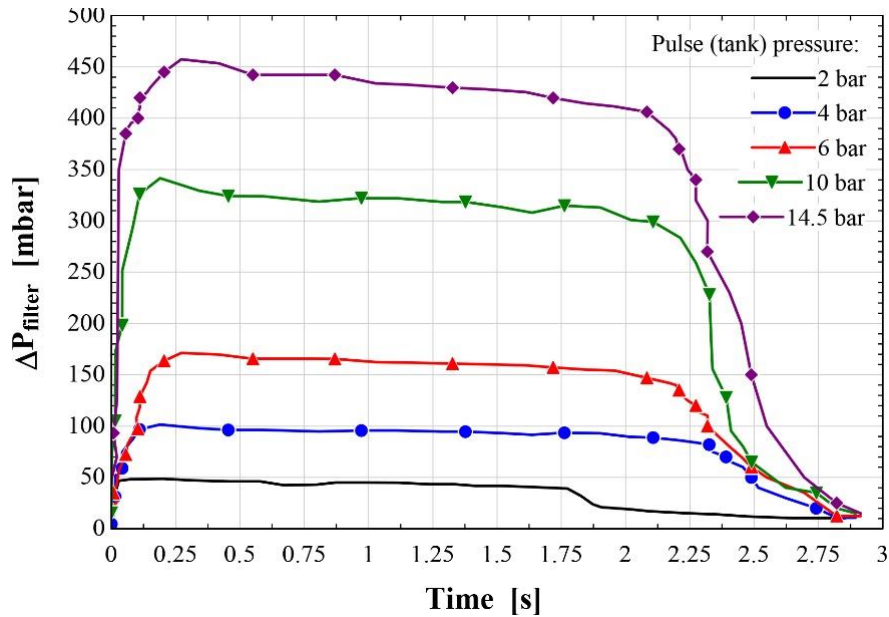


شکل ۹: توزیع سرعت شعاعی در میانه ضخامت جداره متخلخل و راستای فیلتر در زمان‌های مختلف

Fig. 9. Radial velocity distribution along the filter length in the middle layer of filter at different times

تشکیل شده بر روی سطح خارجی آن خواهد شد. در حقیقت عملکرد سامانه پالس جت وابسته به این مومنتوم سیال به فشار درون محفظه فیلتر است [۳۰]. به منظور مطالبه پارامتریک این مسأله، با توجه به پارامترهای قابل تغییر در یک سامانه از پیش طراحی شده، اثر فشار پالس یا فشار مخزن گاز تمیزکننده بر اختلاف فشار ایجاد شده بین دو سمت لایه فیلتر بررسی شده است. این مطالعه به صورت گذرا و برای فشار مخزن در حالت مرجع ۱۴/۵، ۱۰، ۶، ۴ و ۲ بار انجام شده است. بدیهی است که در این حالت بسته به کاربرد و مقاومت کیک تشکیل شده، می‌توان فشار مخزن را برای ایجاد اختلاف فشار مورد نظر در دو سمت فیلتر تعیین نمود. با توجه به نتایج شکل ۱۱، با افزایش فشار مخزن، سرعت رسیدن به بیشینه فشار در تمامی موردکاوی‌ها افزایش یافته و شیب فشار بیشتر است. پس از رسیدن به مقدار بیشینه فشار، در تمامی نمودارها در یک بازه زمانی قابل توجه، اختلاف فشار درون و بیرون فیلتر تقریباً ثابت بوده و با شیب به نسبت کم کاهش می‌یابد. این کاهش فشار مربوط به افت ناشی از خروج جریان از بدنه فیلتر است. بر اساس مشاهدات تجربی و مقایسه با شرایط واقعی کثیف

افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود رسیده است؛ با توجه به زمان بسیار کم این تخلیه، موج فشاری در فیلتر القا شده و جریان خروجی از سطح آن به دلیل خروج گاز موجود در فیلتر به دلیل این موج فشاری است که به سرعت کاهش یافته است. در حقیقت در زمان ۰/۱ ثانیه جریان گاز تمیزکننده از فیلتر عبور نکرده بلکه به دلیل موج فشاری، گاز کثیف موجود در فضای فیلتر به بیرون رانده شده است. پس از این زمان جریان گاز تمیزکاری به درون فیلتر وارد شده و دبی افزایش یافته و سپس به دلیل کاهش اختلاف فشار کل کاهش یافته است. بخش اول مربوط به جریان جت بوده و پس از اضمحلال نسبی آن و با یک تأخیر زمانی ناچیز، تأثیر جریان القائی و مکشی وارد شده به فیلتر نمایان شده است. با گذشت زمان اثر هر دو جریان از بین خواهد رفت. با توجه به شکل ۱۰ اختلاف چندانیتی بین فیلتر ۱-۱ و ۲-۲، به خصوص در مورد اثر پالس فشاری اولیه وجود ندارد. همانطور که پیش‌تر به آن اشاره شد در سامانه پالس جت، سیال گازی با مومنتوم بالا از نازل‌ها خارج شده و با افزایش فشار درون محفظه فیلتر در بازه زمانی بسیار کم، باعث شکسته شدن کیک



شکل ۱۱: مطالعه پارامتریک تاثیر فشار مخزن بر تغییرات فشار در فیلتر
Fig. 11. A parametric analysis of effect of tank pressure on the pressure drop in the filter

نوسانات فشار چه در حالت تخلیه کامل و چه در حالت استفاده از شیر قطع و وصل، به دلیل اینرسی زیاد جریان در حالت غیر تعادلی است. وجود فاصله بین نازل تخلیه و دهانه ورودی فیلترها باعث ایجاد یک ونتوری مجازی شده و با افت فشار استاتیکی موضعی در دهانه ورودی فیلترها، دبی جرمی ورودی به آن‌ها را بر اثر مکش القائی تا ۱۰۰ درصد افزایش داده است. توزیع سرعت جریان تمیزکاری بر روی فیلتر یکنواخت نبوده و در نواحی ابتدایی آن شدیدتر است. بررسی زمانبندی وصل/قطع شیر، موقعیت خروجی نازل و دهانه ورودی فیلترها، اختلاف فشار مخازن پرفشار و کم فشار و هندسه فیلترها بر فرآیند تمیزکاری مؤثر است.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت مادی و معنوی شرکت طراحی و مهندسی تراوش جم تحت قرارداد به شماره TJ-PRG-EN-59 انجام شده است. بدینوسیله از زحمات و همراهی آقایان مهندس مهران سلیمانی و مهندس حمید شاهمحمدی قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] H.C. Lu, C.J. Tsai, A Pilot-Scale Study of the Design and Operation Parameters of a Pulse-Jet Baghouse, *Aerosol Science and Technology*, 29(6) (1998) 510-

شدن سطح فیلتر، تمیزکاری و شکسته شکسته شدن کیک ذرات در این بازه زمانی رخ خواهد که اختلاف فشار در آن تقریباً ثابت است [۳۰]. پس از این بازه، به دلیل افت فشار محسوس تانک گاز تمیز و غلبه افت فشارهای طولی و موضعی سامانه، اختلاف فشار با شیب زیاد افت خواهد کرد. برای مقادیر کم فشار مخزن، اتمام پالس زودتر رخ داده و از مقادیر حدود ۴ بار به بالاتر، بازه زمانی پالس تقریباً ثابت است. شایان ذکر است که سامانه‌های صنعتی پالس جت معمولاً در فشار ۴ بار و بیشتر طراحی و به کار گرفته می‌شود. در سامانه موردنظر برای فشار ۱۴/۵ بار تانک گاز نیتروژن، اختلاف فشار حالت پایا تقریباً برای ۴۳۰ میلی‌بار است و روند نمودارها نشان می‌دهد که بین فشار تانک و اختلاف فشار بین دو سمت جداره متخلخل فیلتر رابطه تقریباً خطی برقرار است.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه عددی و شبیه‌سازی جریان تمیزکاری در سامانه پالس جت فیلتر گاز پرداخته شده است. دامنه مورد نظر در این مطالعه از مخزن پرفشار گاز تمیزکننده نیتروژن تا سطح خروجی فیلترها در مخزن کم‌فشار گاز تمیزشونده گسترده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ایجاد پالس فشاری مناسب جهت تمیزکاری صرفاً تا حدود ۰/۵ ثانیه پس از باز شدن شیر در سامانه ایجاد شده و پس از آن به شدت مضمحل می‌گردد. ایجاد

- cleaning of a baghouse wood dust collector: Influence of operating conditions and filter surface treatment, *Powder Technology*, 261 (2014) 61-70.
- [13] X. Simon, D. Bémer, S. Chazelet, D. Thomas, R. Régnier, Consequences of high transitory airflows generated by segmented pulse-jet cleaning of dust collector filter bags, *Powder Technology*, 201 (2010) 37-48.
- [14] X. Simon, S. Chazelet, D. Thomas, D. Bémer, R. Régnier, Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings, *Powder Technology*, 172(2) (2007) 67-81.
- [15] J.-M. Suh, Y.-I. Lim, P. Massarotto, W.-T. Lim, Effects of Operating Conditions on Pressure Drop in a Pulse-Jet Bagfilter for Coke Dust, *Separation Science and Technology*, 45(9) (2010) 1228-1239.
- [16] C.J. Tsai, M.L. Tsai, H.C. Lu, Effect of Filtration Velocity and Filtration Pressure Drop on the Bag-Cleaning Performance of a Pulse-Jet Baghouse, *Separation Science and Technology*, 35(2) (2000) 211-226.
- [17] C. Yan, H. Chen, M. Zhang, L. Lin, Influences of Pulse Cleaning of Cartridge-Type Filter for Ultrafine Powder Collection on Whole Purifying System Stability, in: 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2010, pp. 1-6.
- [18] C. Yan, G. Liu, H. Chen, Effect of induced airflow on the surface static pressure of pleated fabric filter cartridges during pulse jet cleaning, *Powder Technology*, 249 (2013) 424-430.
- [19] W.-S. Fu, J.-S. Ger, A Two-Reservoir Model to Simulate the Air Discharged from a Pulse-Jet Cleaning System, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49(8) (1999) 894-905.
- [20] R. Kurose, H. Makino, M. Hata, C. Kanaoka, Numerical analysis of a flow passing through a ceramic candle filter on pulse jet cleaning, *Advanced Powder Technology*, 14(6) (2003) 735-748.
- [21] H. Li, Z. Ji, X. Wu, J.-H. Choi, Numerical analysis of 524.
- [2] A. Mukhopadhyay, Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution Part I: Theory, selection and design of pulse-jet filter, *Textile Progress*, 41(4) (2009) 195-315.
- [3] R. Dennis, H.A. Klemm, Modeling Concepts for Pulse Jet Filtration, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30(1) (1980) 38-43.
- [4] Z. Ji, M. Shi, F. Ding, Transient flow analysis of pulse-jet generating system in ceramic filter, *Powder Technology*, 139(3) (2004) 200-207.
- [5] D. Leith, M.J. Ellenbecker, Dust Emission Characteristics of Pulse-Jet-Cleaned Fabric Filters, *Aerosol Science and Technology*, 1(4) (1982) 401-408.
- [6] D. Leith, M.W. First, H. Feldman, Performance of a Pulse-Jet Filter At High Filtration Velocity II. Filter Cake Redeposition, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27(7) (1977) 636-642.
- [7] J. Li, S. Li, F. Zhou, Effect of cone installation in a pleated filter cartridge during pulse-jet cleaning, *Powder Technology*, 284 (2015) 245-252.
- [8] Q. Li, M. Zhang, Y. Qian, F. Geng, J. Song, H. Chen, The relationship between peak pressure and residual dust of a pulse-jet cartridge filter, *Powder Technology*, 283 (2015) 302-307.
- [9] Y. Qian, Y. Bi, Q. Zhang, H. Chen, The optimized relationship between jet distance and nozzle diameter of a pulse-jet cartridge filter, *Powder Technology*, 266 (2014) 191-195.
- [10] M. Saleem, M.S. Tahir, G. Krammer, Measurement and Simulation of Axial Velocity in a Filter Bag, *Chemical Engineering & Technology*, 35(12) (2012) 2161-2169.
- [11] C.P.C. Sherman, D. Leith, M.J. Symons, Outlet Mass Flux from a Pulse-Jet Cleaned Fabric Filter: Testing a Theoretical Model, *Aerosol Science and Technology*, 13(4) (1990) 426-433.
- [12] X. Simon, D. Bémer, S. Chazelet, D. Thomas, Downstream particle puffs emitted during pulse-jet

- Multi-Pulsing Jet Cleaning for Pleated Cartridge Filters, *Aerosol and Air Quality Research*, 16(8) (2016) 1991-2002.
- [27] H. Li, J. Choi, B. Li, I. Kim, J. Heo, Numerical analysis on the gas flow dynamics from a rectangular slot-nozzle for pulse cleaning of filter unit, *Powder Technology*, 297 (2016) 330-339.
- [28] S. Chen, Q. Wang, D.-R. Chen, Effect of pleat shape on reverse pulsed-jet cleaning of filter cartridges, *Powder Technology*, 305 (2017) 1-11.
- [29] A general overview of Mott precision sintered porous metal filter elements, Mott Corporation, Farmington, USA, 2008.
- [30] R. Clift, J. Seville, *Gas cleaning at high temperatures*, Springer Science & Business Media, 2012.
- flow field in the hot gas filter vessel during the pulse cleaning process, *Powder Technology*, 173(2) (2007) 82-92.
- [22] ANSYS Fluent User's Guide, Inc. Release, 16 (2016).
- [23] L.M. Lo, S.C. Hu, D.R. Chen, D.Y.H. Pui, Numerical study of pleated fabric cartridges during pulse-jet cleaning, *Powder Technology*, 198(1) (2010) 75-81.
- [24] X.Q. Dang, P. Min, L. Xin, Z. Jing, L. Qian, Discussion on influencing factors of the pulse-jet performance of fabric filter, in: 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), Lushan, China, 2011, pp. 1167-1170.
- [25] B.O. Andersen, N.F. Nielsen, J.H. Walther, Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters, *Powder Technology*, 291 (2016) 284-298.
- [26] S. Chen, D.R. Chen, Numerical Study of Reverse

