

طراحی و ساخت فاصله‌سنج نیوماتیک برای سیستم خودکانون لیزر

میلاذ بهزادی* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

رضا اسدی (استادیار)

مجمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۴
دوره‌ی ۳ - ۳۱، شماره‌ی ۱، ص. ۶۳-۵۵

در این نوشتار طراحی و آزمایش دستگاه تشخیص فاصله به‌منظور استفاده در سیستم خودکانون لیتوگرافی شرح داده می‌شود. این ریزسنج نیوماتیک، با توجه به فشار گاز درون نازل سرتخت که در مقابل صفحه قرار می‌گیرد، فاصله را اندازه‌گیری می‌کند. بدین منظور از مدار تفاضلی شامل یک مسیر مینا و مسیر اصلی گاز استفاده شده و روابط حاکم بر اجزای آن شناسایی می‌شود. دستگاه معادلات متشکل از این روابط به روش محاسباتی حل می‌شود تا وضعیت عملکردی مدار جریان به دست آید. با بررسی تأثیر نازل‌ها، وضعیت شیر و فشار کاری بر دقت اندازه‌گیری فاصله، مقادیر بهینه‌ی ابعاد آنها مشخص می‌شود. آزمایش‌ها با کنترل دبی ثابت و نیز با شیر فشارشکن انجام شد. بزرگ‌نمایی $20\times$ میلی‌متر بر میکرومتر در فاصله‌ی 50° تا 100° میکرومتر امکان‌پذیر شد. وضعیت دستگاه پایدار و نتایج تکرارپذیرند. امکان به‌کارگیری این روش برای تنظیم فاصله به اثبات رسید و ابزار ریاضی لازم برای طراحی فراهم آمد.

behzadi_milad@yahoo.com
rasadi56@gmail.com

واژگان کلیدی: حس‌گر نیوماتیک، لیتوگرافی، نازل سرتخت، بیکربندی تفاضلی.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های تولید ادوات الکترونیک و فوتونیک در ابعاد بسیار کوچک «لیتوگرافی لیزری» است. در این روش طرح‌های مورد نظر به‌وسیله‌ی پرتوهای لیزر بر صفحه‌ی حساس به نور حک می‌شود. ظریف بودن این طرح‌ها ایجاب می‌کند که نه تنها باریکه‌ی لیزر روی صفحه به دقت حرکت داده شود و در موقعیت صحیح قرار بگیرد، بلکه لازم است نور درست روی صفحه متمرکز شود. پرتوی لیزر بعد از عبور از ادوات نوری متعدد در نهایت به یک عدسی می‌رسد که باید فاصله‌ی کانونی این عدسی شیئی در هر لحظه رعایت شود.

ریزسنج‌گازی (نیوماتیک) با جریان هوا کار می‌کند، به خواص تابشی و الکترونیکی سطح حساس نیست و از سرعت پاسخ‌گویی خوبی برخوردار است. این ریزسنج اگرچه به منبع هوای خشک و تمیز نیاز دارد، استفاده از آن بهترین روش اندازه‌گیری فاصله در لیتوگرافی روی صفحات مسطح به نظر می‌رسد.^[۱] بخش اصلی سیستم نازلی است که در فاصله‌ی کمی از صفحه‌ی مورد نظر قرار می‌گیرد. هوایی که از روزنه‌ی نازل خارج می‌شود در فاصله‌ی بین سر نازل و صفحه به‌صورت شعاعی و واگرا جریان می‌یابد تا به محیط بیرون برسد. طی عبور از این مسیر باریک، فشار سیال افت می‌کند و هرچه فاصله کم‌تر باشد افت فشار بیشتر می‌شود. از نگاهی دیگر، اگر فشار بالادست حفظ شود فاصله‌ی کم‌تر عبور دبی کم‌تر را ممکن می‌سازد.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۸/۱۴، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۱۱.

این همان اصلی است که اندازه‌گیری بر آن مبتنی است. تنظیم فاصله به‌وسیله‌ی گاز در یکپارچه‌سازی کلان مقیاس (VLSI)^۱ نیز کاربرد دارد و از آنجا که ضریب شکست نور هنگام ورود به عدسی یا خروج از آن، و به‌تبع آن فاصله‌ی کانونی تابع دمای هواست، ابزارآلات را درون محفظه‌ی می‌گذارند که دمای آن با دقت 0.1°C کنترل می‌شود.^[۲]

سنجش نیوماتیک برای اندازه‌گیری دقیق ابعاد قطعات مکعبی استفاده^[۳] و نشان داده شد که اختلاف ابعاد با دقت $\pm 1\mu\text{m}$ قابل تشخیص است. همچنین در این روش اندازه‌گیری قطر داخلی، غیریکنواختی ضخامت صفحات فلزی و میزان صافی سطوح -- در حالی که نیرویی معادل چند گرم بر قطعه وارد می‌کند -- امکان‌پذیر است. این اندازه‌گیری براساس میزان افت فشار اوریفیس که در مسیر جریان قرار داشت صورت گرفت. محققین با اندازه‌گیری دبی گاز فاصله را سنجیده^[۴] و با اضافه کردن یک نازل و صفحه‌ی مرجع که فاصله‌ی آن تغییر نمی‌کند، اثر نوسان‌های محیطی و منبع را تا حد زیادی حذف کردند. نتایج حاصله حاکی از آن است که با کم کردن قطر و طول لوله‌های رابط بسامد طبیعی حس‌گر افزایش و سرعت پاسخ‌دهی آن ارتقا می‌یابد. البته باید توجه داشت باریک شدن بیش از حد لوله‌ها موجب افت فشار اضافی است. بعدها با در نظر گرفتن وابستگی پس فشار نازل به فاصله، دستگاهی ارائه شد که قادر بود فاصله‌اش را تا صفحه‌ی مقابل به‌صورت خودکار حفظ کند.^[۵] این وسیله شامل یک پیستون است که بر اثر اختلاف فشار گاز دو سمت آن می‌تواند حرکت کند. فاصله‌ی مطلوب هم با تنظیم شیر تخلیه قابل انتخاب

است. اگرچه محدوده‌ی عملکردی آن به 10^6 mm می‌رسد، دقت آن به دلیل وجود قطعات متحرک راضی‌کننده نیست.

طراحی دقیق نیازمند روابطی است که عملکرد اجزای دستگاه را مشخص کند؛ روابطی که تابعیت افت فشار از هندسه و دبی را بدهد. این روابط برای روزه‌های گرد، استوانه‌یی و تیغه‌یی و نیز نازل با سر تخت و گرد در دو حالت فشار بالا و فشار پایین قابل دست‌یابی است.^[۹-۶] نوع فشار بالا (۳ اتمسفر) را که در آن گاز تراکم‌پذیر می‌شود، به علت تنش برشی و نیرویی که بر صفحه وارد می‌آید، نمی‌توان در لیتوگرافی استفاده کرد. در نوع فشار پایین که به فشارهای تا 5 kPa محدود می‌شود می‌توان گاز را تراکم‌ناپذیر فرض کرد. ناکایما نشان داد افت فشار نازل علاوه بر افت اصطکاکی و افت ناشی از تخلیه به محیط، شامل بخش سومی است که آن را «افت اضافی» نامید. وی با در نظر گرفتن این افت توانست روابطی ارائه کند که پاسخ‌گوی فواصل زیاد نیز باشد. وی با کنار هم قرار دادن روابط روزه و نازل، برای ساده‌ترین نوع فاصله‌سنج نیز نمودارهای طراحی تهیه کرده است.^[۱۰] محاسبات وی نشان می‌دهد که نازل سرتخت در مقایسه با انواع دیگر نازل امتیازاتی دارد. تلاش‌هایی برای مدل‌سازی رفتار روزه و نازل به‌کمک تقریب ضریب تخلیه با چندجمله‌یی‌ها و با هدف تطابق آن با آزمایش صورت گرفته^[۱۲،۱۱] که با نتایج ناکایما اختلاف دارد. اما از آنجا که انطباق روابط ناکایما بر نتایج تجربی به اثبات رسیده بود، در مورد آزمایش‌های^[۱۲،۱۱] تردید وجود دارد. اگر چه این مسایل به نوع فشار بالا و جریان تراکم‌پذیر مربوط می‌شود، لازم است از صحت روابط ناکایما قبل از به‌کارگیری در فرایند طراحی اطمینان حاصل شود.

پژوهش‌گران وضعیت ریزسنج‌های هوایی را در سیستم‌های اندازه‌گیری امروزی بررسی کرده‌اند.^[۱۳] روند توسعه‌ی این ابزار نشان می‌دهد فشارسنج‌های مکانیکی که در گذشته به‌عنوان جزئی از ریزسنج‌های هوایی کاربرد داشت جای خود را به فشارسنج‌های پیزوالکتریک داده، چون به این طریق مشخصات دینامیک حس‌گر بهبود می‌یابد. اگر این فشارسنج در نزدیک‌ترین فاصله‌ی ممکن نصب شود و از اتصالات حجیم و بلند پرهیز شود، سرعت عمل دستگاه باز هم ارتقا خواهد یافت. در مصارف صنعتی هم ریزسنج‌های روش شناخته‌شده‌یی است. مطابق تجارب «وسترن گیج ۲»، یکی از تولیدکنندگان ابزار اندازه‌گیری،^[۱۴] قطر روزه‌ی نازل باید کم‌تر از 2.5 mm باشد تا دقت کافی حاصل شود. شرکت ادموندز^۲، که دیگر تولیدکننده‌ی ابزار اندازه‌گیری است، همین شیوه را به‌منظور سنجش قطر داخلی، قطر خارجی، صافی سطح، تعامد، شیب و... در تولیداتش به کار می‌برد و از انواع مختلف مدار جریان استفاده می‌کند.^[۱۵]

دستگاه لیتوگرافی لیزری وسیله‌ی مورد نیاز دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقات الکترونیک است و سیستم خودکانون بخشی لازم برای این دستگاه است. بر این اساس، اقدامات لازم برای شناسایی، مدل‌سازی، طراحی، ساخت و در نهایت آزمایش فاصله‌سنج به عمل آمد. در این مسیر یک نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد تا امکان استفاده از این فناوری سنجیده شود. در بخش اول طراحی حس‌گر ارائه می‌شود که طی آن پیکربندی مدار جریان نشان داده شده و شبیه‌سازی اجزا و سپس حل مدار انجام می‌شود. بعد از آن طراحی کمی و بررسی‌های تکمیلی صورت می‌گیرد. در نهایت آزمایش عملکرد در بخش سوم ارائه می‌شود.

۲. طراحی

ابتدا طراحی مفهومی حس‌گر در این بخش ارائه می‌شود. سپس رفتار جریان در

هر یک از اجزا به‌صورت یک مدل ریاضی پیدا شده و با کنار هم قرار دادن آن‌ها دستگاه معادلاتی که مشخص‌کننده‌ی عملکرد مدار است به دست می‌آید. به‌کمک این ابزار و با هدف دست‌یابی به بیش‌ترین دقت، طراحی کمی با رعایت الزامات انجام می‌شود.

۱.۲. الزامات و محدودیت‌ها

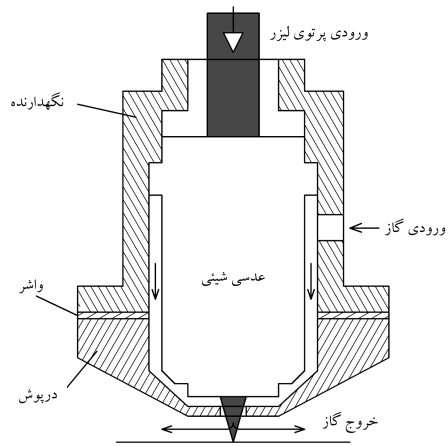
صفحاتی که در مقابل این حس‌گر فاصله قرار می‌دهند شیشه‌های نازکی است که استحکام چندانی ندارند پس نباید به آن‌ها فشار بالایی وارد کرد. براساس توزیع فشار به دست آمده از تحلیل‌ها که جزئیات آن در ادامه بیان می‌شود، بیشینه فشار وارده بر صفحه همان فشار داخل و قبل از ورود به نازل است. بنابراین باید نازل کم‌فشار باشد و این شرطی است که هنگام مقایسه‌ی حالت‌های مختلف رعایت می‌شود.

به‌منظور کانونی شدن مناسب لیزر دقت اندازه‌گیری فاصله باید در حدود 10^6 تا 30^6 نانومتر باشد. تجارب گذشته نشان می‌دهد نباید انتظار داشت فاصله‌های زیاد را با دقت بتوان سنجید.^[۱۵] در حالی که به‌لحاظ دقت فاصله را باید کاهش داد، محدودیت‌های دیگر اجازه نمی‌دهد نازل زیاد به صفحه نزدیک باشد. اول این که سر قطعه‌ی نازل و همین‌طور سطح صفحه کاملاً صاف نیستند پس نباید فاصله‌ی این دو آن قدر کم باشد که ناهمواری سطوح با فاصله قابل مقایسه شود وگرنه ناهمواری تأثیر قابل توجهی بر جریان می‌گذارد و چون ناهمواری‌های همه‌جا یکسان نیستند، دقت اندازه‌گیری افت می‌کند. دومین محدودیت ناشی از ذرات گرد و غبار است؛ حتی با فیلتر کردن هوای ورودی نیز ذرات کوچک همچنان وجود دارند که اندازه‌ی آن‌ها در برابر فاصله‌ی نازل از صفحه قابل‌ملاحظه است و می‌تواند مخل جریان باشد. بر این اساس، و با در نظر داشتن فاصله در سیستم‌های مشابه،^[۱۶] این فاصله در نقطه‌ی طراحی 10^6 میکرومتر منظور خواهد شد. البته در ادامه فاصله‌ی بهینه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

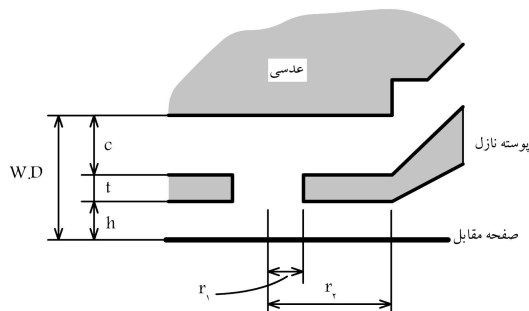
غیر از هوا نور هم باید بدون مزاحمت از روزه‌ی نازل عبور کند. فاصله‌ی کاری عدسی‌های شیئی مناسب $w = 1 \text{ mm}$ و همگرایی نور خروجی از آن $NA = 0.75$ است که عدد دوم سینوس نیم‌زاویه‌ی مخروط نور را بیان می‌کند. با این ارقام قطر باریکه‌ی نور هنگام خروج از عدسی برابر 2.3 mm خواهد بود. قطر باریکه‌ی نور با نزدیک شدن به صفحه کاهش می‌یابد و چون ورق سرنازل به عدسی نمی‌چسبد و با آن فاصله دارد، قطر باریکه هنگام عبور از نازل از این مقدار هم کم‌تر است. با این حال چون ممکن است ساخت و مونتاژ به‌اندازه‌ی کافی دقیق نباشد قطر روزه‌ی 2.5 میلی‌متر برای عبور نور بدون ایجاد مزاحمت کافی است و همین میزان به‌عنوان حد مجاز پایین در نظر گرفته می‌شود.

۲.۲. پیکربندی

پیکربندی مدار جریان گاز به‌صورت افت فشاری و تفاضلی است. این طرح شباهت زیادی به پل معروف و تستون در مدارهای برق دارد. مطابق شکل ۱ جریان در ورود به مدار دو شاخه می‌شود؛ اولی پس از گذشتن از یک شیر به نازل می‌رسد و دومی با عبور از دو شیر به بیرون تخلیه می‌شود. شیر دوم مدار مرجع نیز می‌تواند نازل و صفحه‌ی دیگری باشد. اختلاف فشار جریان‌ها بعد از شیرهای اول در دو شاخه اندازه‌گیری و فاصله براساس آن تشخیص داده می‌شود. این طرح به‌دلیل دارابودن خط مرجع کم‌ترین حساسیت به نوسان‌های فشار منبع و محیط را دارد چون این نوسان‌ها هم وارد خط اصلی و هم خط مرجع می‌شود. به‌علاوه



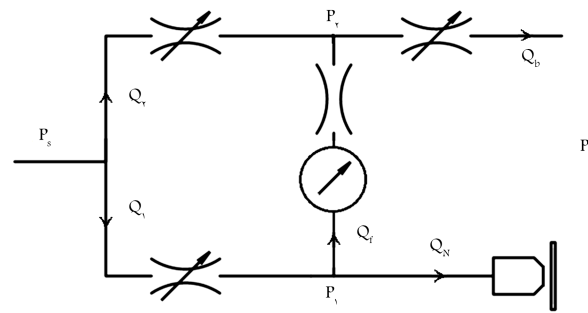
شکل ۲. جریان در نازل دو صفحه‌یی.



شکل ۳. هندسه‌ی پیشانی نازل و موقعیت عدسی شیئی نسبت به آن.

رابطه‌یی که ناکایاما ارائه می‌کند در شرایطی حاصل شده که هیچ جسمی درون محفظه‌ی نازل قرار نداشته، در حالی که قرار است عدسی شیئی درون نازل قرار گیرد. مطابق شکل ۳ فاصله‌ی کاری عدسی WD باید به سه قسمت تقسیم شود: فاصله‌ی عدسی تا نازل c ، ضخامت ورق نازل t و فاصله‌ی نازل تا صفحه‌ی افت فشار رابطه‌ی ناکایاما مربوط است به عبور جریان از فاصله‌ی نازل تا صفحه‌ی افت فاصله‌ی کاری عدسی کوتاه باشد، طوری که فاصله‌ی عدسی تا نازل به‌ناچار کم شود، به افت فشار قابل ملاحظه‌یی در این ناحیه می‌انجامد و در آن صورت دیگر نمی‌توان از رابطه‌ی ناکایاما استفاده کرد. بر همین اساس نازل با وجود عدسی شیئی درون آن به‌وسیله‌ی نرم‌افزار فلوننت شبیه‌سازی شد تا مشخص شود رابطه‌ی یادشده تا کجا کاربرد دارد. فاصله‌ی کاری عدسی شیئی برابر 1 mm است و باید ضخامت سازی نازل تا حد امکان (تا جایی که خود سازه آسیب‌پذیر و بیش از حد منعطف نشود) کاهش یابد. در شبیه‌سازی‌ها ضخامت دایره‌ی سر نازل 0.3 mm در نظر گرفته شد. در ادامه نشان داده می‌شود که این ضخامت از استحکام کافی برخوردار است.

در تحلیل با نرم‌افزار به دلیل وجود ابعادی با اندازه‌های بسیار متفاوت از امکان دقت مضاعف بهره گرفته شد. همچنین از عدم حساسیت به اندازه‌ی شبکه اطمینان حاصل شد. گسسته‌سازی مرتبه‌ی یک به کار رفت چون جواب‌هایی که با مرتبه‌ی دو به دست آمد تفاوت ناچیزی با حل مرتبه‌ی یک داشت. سه نقطه‌ی کاری به عنوان نمونه انتخاب شد که در آنها فاصله‌ی h برابر $50\ \mu\text{m}$ ، $100\ \mu\text{m}$ و $200\ \mu\text{m}$ است. به‌ازای هر یک از این سه نقطه دو حالت دیگر، یکی با فاصله‌ی بیش‌تر نازل از صفحه، و یکی با فاصله‌ی کم‌تر شبیه‌سازی شد. قطر داخلی ۳ و قطر خارجی ۱۳ میلی‌متر قرار داده شد. ورودی و خروجی هر دو از نوع تنظیم فشار است که به



شکل ۱. مدار جریان و نام‌گذاری کمیت‌ها.

اندازه‌گیری به‌وسیله‌ی تنها یک فشارسنج انجام می‌شود که نسبت به دبی‌سنجی آسان‌تر است و بر جریان مدار تأثیری ندارد. البته به‌جای فشارسنج می‌توان از دبی‌سنج نیز استفاده کرد که در این صورت بین دو خط جریانی برقرار خواهد شد. شبیه‌سازی‌ها به‌گونه‌یی پی‌ریزی می‌شود که جواب‌گوی نوع دبی‌سنجی هم باشد.

در این طرح می‌توان دستگاه را به‌وسیله‌ی سه شیر تنظیم کرد. مدرج کردن بهتر است به‌گونه‌یی باشد که در نقطه‌ی طراحی فشارسنج عدد صفر را نشان دهد. اهمیت این مسئله بدان سبب است که دقت یک وسیله‌ی اندازه‌گیری متناسب با مقداری است که اندازه می‌گیرد یا متناسب با محدوده‌ی کاری آن. فشارسنجی که باید عدد صفر را در نقطه‌ی طراحی نشان دهد محدوده‌ی کاری کوچک و به‌تبع آن دقت بالایی دارد.

۳.۲. شبیه‌سازی اجزاء

این دستگاه متشکل است از: نازل، شیر فشارشکن و لوله‌های رابط که در ارتباط با یکدیگرند و مدار جریان گاز را تشکیل می‌دهند. نازل و شیر فشارشکن مهم‌ترین اعضا هستند در حالی که لوله‌های رابط به‌گونه‌یی انتخاب می‌شود که کم‌ترین افت فشار و تأثیر بر جریان را ایجاد کند.

۱.۳.۲. نازل

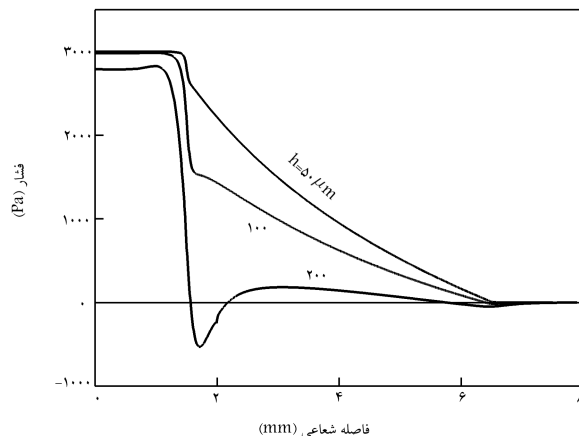
نازل عضو اصلی دستگاه است و بدون شناخت الگوی جریان در این عضو طراحی و ساخت قابل اطمینان ممکن نخواهد بود. این قطعه یک نازل دو صفحه‌یی محسوب می‌شود؛ یک صفحه پیشانی نازل است که یک روزنه در مرکز دارد، و صفحه‌ی دوم سطحی است که در مقابل نازل قرار می‌گیرد. گازی که از روزنه‌ی نازل بیرون می‌آید به‌صورت شعاعی و واگرا به سمت خارج مرکز حرکت می‌کند (شکل ۲). برای به راه افتادن جریان، اعمال فشار به بالادست لازم است؛ عبور جریان از این شکاف باریک و اصطکاک دیواره باعث افت فشار جریان می‌شود. طرح‌های مختلفی برای سر نازل مطالعه شده که مزیت‌هایی نسبت به نوع مسطح دارند.^[۱۶] اما مرابای آن چنان محدود و وابسته به شرایط دیگر است که به‌کارگیری این هندسه‌های پیچیده‌تر را توجیه نمی‌کند.

در دست داشتن رابطه‌یی که روند تغییر دبی گذرنده از نازل Q را برحسب فاصله (h) و اختلاف فشار ورودی و خروجی (Δp) مشخص کند برای تحلیل دستگاه الزامی است. ناکایاما رابطه‌یی تجربی^[۸] برای محدوده‌ی فشار تا 5 kPa ، فواصل تا $h/d_1 \leq 0.1$ و محدوده‌ی $4 < (h/d_1)\text{Re} < 50$ استخراج کرده که در آن d قطر داخلی نازل است و عدد رینولدز از $\text{Re} = 2\rho Q/\pi d_1\mu$ به دست می‌آید.

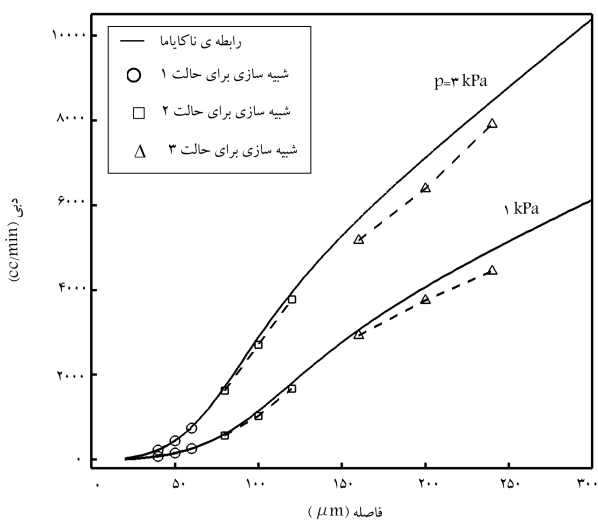
ورودی فشار کل ۱ kPa و ۳ kPa و به خروجی فشار استاتیک اتمسفری اعمال می‌شود.

فشار برحسب فاصله‌ی شعاعی برای فواصل مختلف در شکل ۴ ترسیم شده است. تقریباً تمام افت فشار در فاصله‌ی r_1 تا r_2 (شکل ۳) رخ می‌دهد. بنابراین تنها این قسمت از جریان حائز اهمیت است و ابعاد و شکل این ناحیه باید مورد توجه قرار گیرد. با زیاد شدن فاصله‌ی نقطه‌ی طراحی، فشار ورودی به حد فاصل نازل تا صفحه اندکی افت می‌کند. علت آن است که وقتی فاصله‌ی نازل از صفحه در نقطه‌ی طراحی افزایش داده شود، برای ثابت ماندن فاصله‌ی کاری عدسی، فاصله‌ی عدسی تا نازل را باید کاهش داد. در این صورت فشار جریان در گذر از این فاصله مقداری افت خواهد داشت. در فاصله‌ی $200 \mu\text{m}$ سیال بعد از خروج از روزنه‌ی نازل فضای بزرگی دارد که باعث می‌شود لبه را دور بزند و افزایش سرعت زیادی داشته باشد که به افت فشار شدید می‌انجامد. نکته‌ی آخر این که فشار بعد از شعاع r_2 با فشار محیط برابر است و قسمت شیب‌دار تأثیری بر جریان ندارد.

دبی گذرنده از نازل که با تحلیل به دست آمده در شکل ۵ ارائه شده است. مقادیر به رابطه‌ی ناکایاما نزدیک است اما وقتی فاصله زیاد یا دبی بالا باشد کمی از آن چه رابطه پیش‌بینی می‌کند کم‌تر هستند. این اختلاف دو منشأ دارد: یکی وجود عدسی



شکل ۴. توزیع فشار در جهت شعاعی روی صفحه.



شکل ۵. دبی گذرنده از نازل.

است که با تنگ کردن مجرا باعث افت فشار و مقاومت در برابر جریان می‌شود. منشأ دوم نازک بودن سازه، درست در محل تغییر مسیر گاز است که سیال را مجبور می‌کند روی این لبه‌ی تیز دور بزند. در مجموع هر چه دبی و نسبت فاصله‌ی h/c کم‌تر باشد، دقت رابطه‌ی ناکایاما برای شرایط مورد نظر این تحقیق بیش‌تر خواهد بود. بیشینه خطا در $h = 200 \mu\text{m}$ به میزان ۱۱ درصد رخ می‌دهد و برای فاصله‌های کم‌تر که بیش‌تر مورد توجه است خطا بسیار کوچک‌تر می‌شود. این مقدار خطا برای کاربرد طراحی قابل چشم‌پوشی است.

۲.۳.۲. فشارشکن

سه فشارشکن این مدار می‌تواند اوریفیس، شیر کنترل جریان، لوله‌ی مویین یا هر وسیله‌ی باشد که در برابر عبور گاز مقاومت کند. هر وسیله‌ی رفتار مخصوص به خود را دارد و این رفتار بر عملکرد و دقت نهایی دستگاه تأثیر می‌گذارد. بنابراین لازم است مشخصات یک وسیله معلوم باشد تا بتوان درمورد انتخاب آن تصمیم گرفت. نحوه‌ی تغییر دبی یا تغییر اختلاف فشار، آن چیزی است که باید تعیین شود.

وسيله‌ی مرسوم برای ایجاد افت فشار اوریفیس است. ناکایاما [۶] سه نمونه اوریفیس را بررسی و روابط مربوط به آن‌ها را ارائه کرده است. از بین این سه نوع، اوریفیس تخت عملکرد خوبی دارد و به راحتی می‌توان آن را ساخت. رابطه‌ی یاد شده برای عدد رینولدز 550 تا 10000 و $17 < l/d < 1/5$ معتبر است که $Re = d\sqrt{2\Delta p/\rho}/v$ و l و d به ترتیب ضخامت و قطر روزنه هستند. چون معادلات اوریفیس معلوم است و از آن مهم‌تر با توجه به پایداری جریان در آن، در شبیه‌سازی‌ها این فشارشکن در نظر گرفته شد.

افت فشار لوله‌های رابط قابل چشم‌پوشی است. به عنوان نمونه افت فشار لوله‌ی به قطر داخلی ۵ و طول ۲۰ میلی‌متر با دبی ۵ cc/s با فرض جریان توسعه یافته معادل ۱۲ Pa می‌شود. این مقدار کم‌تر از ۱ درصد افت فشاری است که برای همین جریان در گذر از اوریفیس یا نازل رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان از لوله‌ها هنگام حل مدار صرف نظر کرد.

۴.۲. حل مدار

مدار شامل پنج عضو است: دو شیر فشارشکن اول، یک نازل و یک فشارشکن یا نازل مینا به اضافه‌ی عضو پنجم که روی خط واصل بین دو خط اصلی و مینا منظور شد برای حالتی که دبی‌سنج به کار رود (شکل ۱). اگر قرار باشد فشار اندازه‌گرفته شود دیگر هیچ جریانی بین دو خط رد و بدل نمی‌شود.

برای نازل از روابط تجربی ناکایاما استفاده می‌شود. با این که ممکن است در آزمایش‌ها از شیر قابل تنظیم استفاده شود هر سه شیر فشارشکن اوریفیس در نظر گرفته شد تا با در دست داشتن معادلات آن‌ها مدار قابل حل باشد. شیرهای قابل تنظیم با عبور دادن جریان از روزنه‌های کوچک دبی را تنظیم می‌کنند و عملکردشان بی‌شبهت به اوریفیس نیست. وقتی فشار تا حدی که بیان شد پایین است و تغییر دما هم مطرح نیست، چگالی و لزجت سیال ثابت است. فشار ورودی (p_s) و فشار محیط (p_a)، هندسه‌ی شیرها و نازل و نیز فاصله‌ی h معلوم است. فشارهای p_1 ، p_2 دبی ورودی به خط اصلی (Q_1)، خط مینا (Q_2)، خط واصل (Q_f)، دبی خروجی از نازل (Q_N) و خروجی از نازل (یا شیر) مینا Q_b مجهولات مسئله‌اند. چون نوع دبی‌سنج احتمالی هنوز مشخص نیست، ضریب تخلیه‌ی آن ثابت (C_F) فرض می‌شود. پس به‌طور خلاصه دستگاه معادلات $F(x)$ و بردار مجهولات x عبارت

$$Q_1 = c_1 (\text{Re}, l, d) A_1 \sqrt{\sqrt{2} (P_s - P_1) / \rho} \quad (1)$$

$$Q_2 = c_2 (\text{Re}, l, d) A_2 \sqrt{\sqrt{2} (P_s - P_2) / \rho} \quad (2)$$

$$Q_b = c_b (\text{Re}, l, d) A_b \sqrt{\sqrt{2} (P_2 - P_a) / \rho} \quad (3)$$

$$Q_F = c_F A_F \text{sgn}(P_1 - P_2) \sqrt{\sqrt{2} |P_1 - P_2| / \rho} \quad (4)$$

$$Q_N = Q(d_1, d_2, p_1 - p_a, h) \quad (5)$$

$$Q_1 - Q_F - Q_N = 0 \quad (6)$$

$$Q_2 + Q_F - Q_b = 0 \quad (7)$$

$$x = \{p_1, p_2, Q_1, Q_2, Q_F, Q_N, Q_b\} \quad (8)$$

یک حالت مرجع برای دستگاه در نظر گرفته شده و با تغییر هر پارامتر حول این حالت و بررسی پیامد آن، مقدار بهینه پیدا می‌شود. حالت مرجع چنان انتخاب شد که در گستره‌ی وسیعی از فاصله‌ی نازل از صفحه بتوان پارامترها را تغییر داد، در حالی که روابط معتبر بماند و محدودیت‌ها رعایت شود. فشار ورودی $p_s = 8 \text{ kPa}$ و قطر روزنه‌ی اوریفیس‌ها برابر $d = 1 \text{ mm}$ و ضخامت آن‌ها برابر $l = 3 \text{ mm}$ قرار داده شد. دقت اندازه‌گیری به‌ازای هر حالت، به‌شیوه‌ی پیش‌تر بیان شده، محاسبه شد. در این محاسبات فرض بر آن بود که دقت اندازه‌گیری فشار 10 Pa باشد. اگر دقت فشارسنج واقعی با این مقدار تفاوت داشته باشد، دقت‌های محاسبه‌شده برای اندازه‌گیری فاصله را برای تمام حالت‌ها به یک نسبت باید اصلاح کرد و تأثیری در مقایسه و انتخاب ندارد. همچنین در مقایسه باید شرایط برابر برای حالت‌های مختلف برقرار باشد. یعنی فشار نازل و دبی مصرفی تقریباً یکسان باشد.

۱.۵.۲. قطر داخلی نازل

دقت اندازه‌گیری و دیگر پارامترها برای چند قطر مختلف محاسبه و بهترین قطر انتخاب می‌شود. روزنه‌های ۲، ۲/۵، ۳ و ۵ میلی‌متری برای نازل بررسی شد. هر بار با تنظیم شیر تخلیه‌ی خط مبنا فاصله‌ی نقطه‌ی طراحی روی $100 \mu\text{m}$ تنظیم می‌شود. این کار فعلاً در برنامه با تغییر قطر اوریفیس صورت می‌گیرد. در عمل و در آزمایش‌ها یک شیر قابل تنظیم این وظیفه را به عهده دارد. دقت‌های محاسبه‌شده به‌علاوه‌ی دبی گذرنده از نازل و فشار آن در جدول ۱ آمده است.

خطای اندازه‌گیری فاصله با نازلی به قطر داخلی ۳ میلی‌متر کمینه -- یعنی 179 nm -- است و نسبت به بقیه‌ی موارد مطلوب‌تر است. با این حال محاسبات نشان داد کافی است فشار ورودی به 4 kPa افزایش یابد تا وضعیت عوض شود و دقت قطر ۲/۵ و ۳ به‌ترتیب به ۱۱۵ و ۱۱۶ برسد. در قسمت مربوط به افت فشار شیر این واقعیت آشکار می‌شود که فشار بالادست شیر باید بالاتر باشد. پس قطر ۲/۵ انتخاب می‌شود که حد مجاز (بخش ۱.۲) را نیز رعایت می‌کند.

۲.۵.۲. قطر خارجی نازل

به‌طور کلی از آنجا که سرعت سیال با دور شدن از مرکز نازل کاهش می‌یابد، تغییر قطر خارجی تأثیر چندانی بر افت فشار نازل، و تبعاً بر عملکرد ندارد. این مسئله در محاسبات هم مشهود است. چهار قطر ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ میلی‌متر برای نازل امتحان شد و نتایج حاصل از دقت و شرایط کاری به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. محاسبات این بخش نشان می‌دهد افزایش قطر باعث ارتقای بسیار کم دقت می‌شود.

این ابزار اندازه‌گیری در حاشیه‌های صفحه قادر به تشخیص درست فاصله نیست، زیرا همواره لازم است زوج نازل و صفحه وجود داشته باشد تا عبور هوا از بین این دو افت فشار ایجاد کند. اگر نازل از لبه‌ی صفحه رد شود، هوا با مقاومت کم‌تری روبرو می‌شود و افت فشار کاهش می‌یابد. این کاهش توسط سیستم اشتباهاً به‌عنوان زیاد شدن فاصله برداشت می‌شود. حاشیه‌ی بی‌استفاده‌ی صفحه به‌اندازه‌ی شعاع

جدول ۱. تأثیر قطر داخلی نازل.

قطر داخلی نازل (mm)	دقت (nm)	فشار (Pa)	دبی (cc/s)
۲	۲۰۲	۲۷۰۴	۴۴
۲/۵	۱۸۱	۳۹۹۱	۴۹
۳	۱۷۹	۳۲۶۲	۵۰
۵	۱۹۸	۲۲۶۰	۶۰

این دستگاه هفت معادله و هفت مجهولی را باید با روش‌های محاسباتی حل کرد که بدین منظور از روش نیوتن استفاده می‌شود. در این روش باید مشتق توابع نیز در مقادیر حدس محاسبه شود اما مشتق‌گیری جزئی از این معادلات پیچیده به‌صورت تحلیلی ممکن نیست. مشتق‌گیری‌ها نیز باید به‌صورت عددی انجام شود که به این منظور گسسته‌سازی مرتبه‌ی دو کاربرد خواهد داشت:

$$\frac{\partial F_i}{\partial x_j} = \frac{F_i(x_j + \delta x_j) - F_i(x_j - \delta x_j)}{2\delta x_j} \quad (9)$$

برای δx مقادیر بسیار کوچک انتخاب شد. برای جلوگیری از واگرایی فرایند حل لازم بود هر بار خود مقدار اصلاحی به حدس اضافه نشود و ضریب زیر تخفیف 0.5 به کار رود. معیار همگرایی افت ۴ مرتبه‌ی خطا است.

۵.۲. طراحی کمی

مقصود از طراحی کمی به‌اختصار، انتخاب پارامترهای طراحی است به‌گونه‌ی که پارامتر هدف در بهترین وضعیت قرار گیرد. درخصوص این وسیله پارامتر هدف دقت اندازه‌گیری فاصله است و پارامترهای طراحی، فشار کاری و ابعاد اجزا هستند. میزان افت فشار در فشارشکن‌ها، قطر داخلی و خارجی نازل و فاصله‌ی نازل تا صفحه، مشخصات و ابعاد قابل انتخاب است. در ادامه تأثیر هر یک بر دقت اندازه‌گیری بررسی، و مقدار بهینه پیدا خواهد شد.

فاصله به‌کمک تأثیری که بر تفاضل فشار می‌گذارد تشخیص داده می‌شود. تغییر فاصله به‌اندازه‌ی δh تفاضل فشار را به‌اندازه‌ی $\delta(\Delta P)$ تغییر می‌دهد. با پیدا کردن $\partial(\Delta P)/\partial h$ در هر وضعیت می‌توان دقت اندازه‌گیری فاصله را یافت:

$$\delta h \simeq \frac{\delta(\Delta p)}{\partial(\Delta p)/\partial h} \quad (10)$$

چون دقت اندازه‌گیری تفاضل فشار به‌وسیله‌ی فشارسنج، مقداری مشخص و محدود است هرچه مشتق تفاضل فشار بزرگ‌تر باشد، δh کوچک‌تر و اندازه‌گیری فاصله دقیق‌تر خواهد شد. به‌عبارت دیگر باید حساسیت یا بزرگ‌نمایی را ارتقا داد. محاسبه‌ی دقت دستگاه به‌کمک برنامه‌ی حل مدار که توضیح داده شد امکان‌پذیر است. به این ترتیب که در وضعیت مورد نظر، مدار برای فواصل $h + \varepsilon$ و $h - \varepsilon$ حل می‌شود و دو تفاضل فشار به دست می‌آید و همه چیز برای یک مشتق‌گیری عددی آماده می‌شود. این مشتق‌گیری نیز از مرتبه‌ی دو به حساب می‌آید.

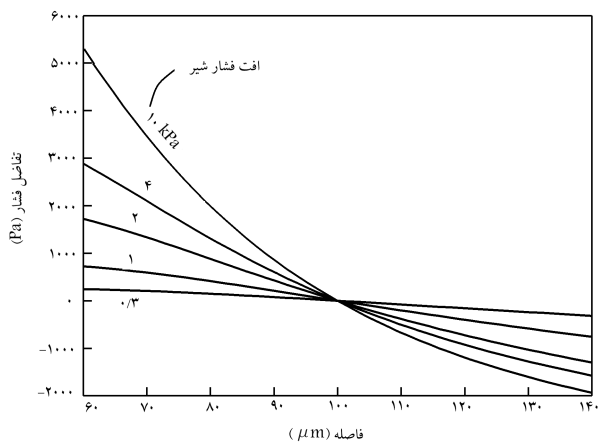
$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial h} \simeq \frac{\Delta p(h + \varepsilon) - \Delta p(h - \varepsilon)}{2\varepsilon} \quad (11)$$

جدول ۲. تأثیر قطر خارجی نازل.

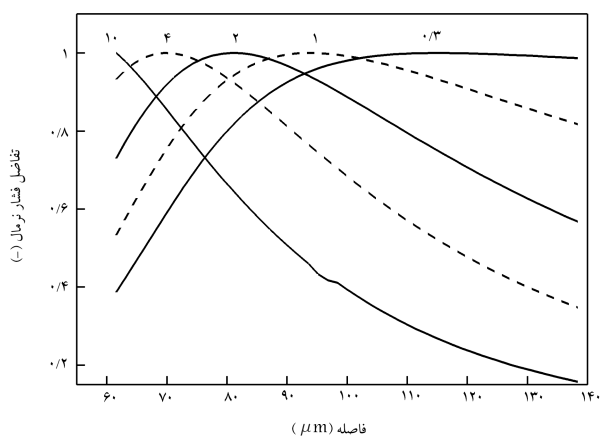
قطر داخلی نازل (mm)	دقت (nm)	فشار (Pa)	دبی (cc/s)
۱۱	۱۸۹	۳۸۶۳	۵۰
۱۳	۱۸۱	۳۹۹۱	۴۹
۱۵	۱۷۶	۴۱۰۶	۴۸٫۵
۱۷	۱۷۱	۴۲۰۶	۴۷٫۸

جدول ۳. تأثیر افت فشار اوریفیس.

قطر روزنه (mm)	دقت (nm)	فشار نازل (Pa)	فشار تغذیه (Pa)	دبی (cc/s)
۰٫۸	۱۳۱	۴۰۵۹	۱۴۰۰۰	۴۹
۱	۱۸۱	۳۹۹۱	۸۰۰۰۰	۴۹
۱٫۲	۲۶۳	۴۰۳۰	۶۰۰۰۰	۵۰
۱٫۵	۴۸۰	۴۱۵۳	۵۰۰۰۰	۵۱
۲	۱۳۲۰	۴۰۳۸	۲۳۰۰۰	۵۰



شکل ۶. تأثیر میزان افت فشار فشارشکن.



شکل ۷. تأثیر فاصله بر دقت برای افت فشارهای ۰٫۳ تا ۱۰ کیلوپاسکال در فشارشکن.

افت فشار در فشارشکن وابسته است. شکل ۷ نمودار مشتق تفاضل فشار نسبت به فاصله را برای مقادیر مختلف افت فشارشکن نشان می‌دهد که هر کدام از این نمودارها با بیشینه‌ی خود بی‌بعد شده‌اند. هر چه افت فشار شیر بیش‌تر باشد، فاصله‌ی بهینه کم‌تر می‌شود. در حالی که بهترین فاصله برای افت ۰٫۳ kPa برابر $111 \mu\text{m}$ است، وقتی افت فشار ۱۰ kPa باشد بهترین دقت در فاصله‌ی کم‌تر از $62 \mu\text{m}$ به دست می‌آید (محاسبات برای فواصل کم‌تر به علت فراهم نبودن شرایط استفاده از معادلات ممکن نبود). با توجه به این که در بخش پیشین معلوم شد افزایش افت فشار شیر به ارتقای دقت کمک شایانی می‌کند و باید افت فشار تا حد امکان زیاد باشد، می‌توان دریافت که با رعایت محدودیت‌های دیگر باید به سراغ فاصله‌های کم رفت.

۶.۲. بررسی‌های تکمیلی

۶.۲.۱. مخزن تأمین گاز

برای تأمین گاز، مخزنی با حجم V که حاوی گاز با فشار p_0 و جرم M است در نظر گرفته می‌شود طوری که گاز با دبی تقریباً ثابت m از مخزن مصرف شود. اگر مصرف گاز و افت فشار به آرامی صورت پذیرد می‌توان فرض کرد دمای مخزن تغییری نمی‌کند و برابر دمای محیط T_0 است. با فرض این که داخل مخزن قانون گاز کامل

دایره‌ی نازل خواهد بود. اندازه‌ی عدسی شیئی اجازه نمی‌دهد قطر خارجی کم‌تر از ۱۳ mm باشد و دقت مربوط به قطر ۱۷ mm تنها ۵/۵٪ بهتر از حداقل قطر است. این مزیت در برابر مزیت کوچک شدن حاشیه‌های بی‌استفاده قابل چشم‌پوشی است. بنابراین اندازه‌ی ۱۳ mm برای قطر خارجی قرار داده می‌شود.

۳.۵.۲. فشار ورودی و افت فشار شیر

انتخاب افت فشار در اوریفیس (یعنی قطر روزنه‌ی آن) و فشار ورودی به مدار، به هم مرتبط است. عامل محدودکننده‌ی فشار ورودی به نازل، تحمل صفحه‌ی حساس به نور است (که به صورت کمی فعلاً معلوم نیست). بنابراین برای مقایسه‌ی حالت‌های مختلف یک عدد ثابت به عنوان حد مجاز فشار در نظر گرفته می‌شود. بازتر شدن روزنه‌ی اوریفیس (یا شیر کنترل جایگزین آن) موجب کاهش افت فشار این عضو خواهد شد. پس اگر قرار باشد فشار بالادست نازل در محدوده‌ی مجاز فرضی باشد، باید همزمان با افزایش قطر روزنه‌ی اوریفیس، فشار ورودی مدار را کاهش داد.

پنج قطر ۰٫۸، ۱، ۱٫۲، ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر آزمایش شد و فشار ورودی طوری تنظیم شد که فشار p_1 در حدود ۴ kPa باقی بماند. برای هر قطر اگر فشار از این کم‌تر باشد دقت نزول خواهد کرد و اگر بیش‌تر باشد شرایط مساوی برای مقایسه محقق نمی‌شود. نتیجه‌ی محاسبات که در جدول ۳ و شکل ۶ نمایش داده شده، حاکی از آن است که دقت به شدت به افت فشار در اوریفیس وابسته است. با افزایش فشار ورودی و کاهش قطر روزنه می‌توان به راحتی دقت را ارتقا داد در حالی که این اصلاحات هیچ تأثیری بر شرایط کاری نازل و صفحه ندارد. بنابراین در این بخش عدد مشخصی برای فشار ورودی و وضعیت اوریفیس تعیین نمی‌شود، بلکه اوریفیس یا هر وسیله‌ی کنترل جریان باید تا جایی که امکانات ساخت اجازه می‌دهد با مقاومت بیش‌تر در برابر جریان ساخته شود و دستگاه با فشار بالاتری تغذیه شود.

۴.۵.۲. فاصله‌ی نازل از صفحه

شاید به نظر برسد هر چه فاصله کاهش یابد، دقت افزایش خواهد یافت. اما بررسی‌ها نشان داد همیشه این‌طور نیست و همواره یک فاصله‌ی بهینه وجود دارد که به میزان

برقرار باشد رابطه‌ی ساده‌ی ۱۲ حاصل می‌شود:

$$p_r = p_{or} - \frac{RT_o}{V} \dot{m} \Delta t \quad (12)$$

که در آن p_{or} فشار اولیه‌ی مخزن است. به‌عنوان مثال هنگامی که از یک مخزن ۱۰۰ لیتری در دمای ۳۰۰ K دبی، گاز با دبی مقدار ۸ cc/s (مطابق طراحی) مصرف شود، ظرف هر ساعت ۲/۵ bar از فشارش کاسته خواهد شد. این معادله همچنین نشان می‌دهد بزرگ‌تر بودن مخزن به چه شکل زمان کاری آن را افزایش می‌دهد. با مراجعه به جداول عامل تراکم‌پذیری^[۱۷] مشخص می‌شود برای دمای محیط ۲۵°C گازهای نیتروژن و اکسیژن را تا حدود فشار ۲۴۰ bar می‌توان با دقت ۵٪ کامل فرض کرد.

۲.۶.۲. تغییر فشار ورودی

در تمام مراحل حل و بررسی، فشار ورودی به مدار ثابت فرض شد. اگر از یک مخزن مستقیماً برای تأمین هوای فشرده استفاده می‌شود با گذشت زمان و مصرف گاز از فشار مخزن کاسته می‌شود و به تبع آن فشار ورودی مدار نیز کاهش می‌یابد. وقتی دو مسیر گاز کاملاً مشابه نیستند (که در عمل چنین است) با تغییر فشار ورودی، در حالی که فاصله‌ی نازل از صفحه و فاصله‌ی کانونی صحیح است، تفاضل فشار از صفر فاصله می‌گیرد. با محاسبه‌ی مشتق تفاضل فشار نسبت به فشار ورودی می‌توان تأثیر افت فشار بر مقدار اندازه‌گیری شده را پیدا کرد. در نقطه‌ی طراحی با فشار ورودی ۸ kPa این مشتق برابر است با $\partial(\Delta P)/\partial p_s = 0.1$ و لازم است فشار ورودی با کمینه دقت ۰/۱ دقت فشارسنج کنترل شود.

۳.۶.۲. کرنش ناشی از فشار

صفحه‌ی نازل ناچاراً بسیار نازک است و باید اطمینان حاصل کرد تحت فشار هوای داخل نازل بیش از حد کرنش نمی‌کند و به صفحه‌ی مقابل خود نزدیک نمی‌شود. برای محاسبه‌ی کرنش ابتدا از نظریه‌ی ورق^[۱۸] استفاده شد. در محاسبات فشار درون محفظه ۶ kPa قرار داده شد که کمی بیش‌تر از فشار طراحی است چون هنگامی که فاصله‌ی نازل از صفحه کم شود فشار افزایش می‌یابد. فشار بیرون محفظه، فشار محیط منظور شد که در مقایسه با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد وضعیت وخیم‌تری است. ورق مذکور دایره‌ی به قطر ۱۲ mm و ضخامت ۰/۳ mm است که سوراخی به قطر ۲/۵ mm در وسط آن تعبیه شده است. اگر نازل از جنس فولاد باشد، جابجایی $W_{max} = 0.245 \mu m$ به دست می‌آید.

به نظر نمی‌رسد وجود روزنه در وسط این صفحه‌ی دایره‌ی تأثیر چندانی بر بیشینه کرنش داشته باشد. چرا که این روزنه از طرفی مقاومت صفحه را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر مقداری از ماده درست در ناحیه‌ی حذف می‌شود که بیش‌ترین جابه‌جایی را دارد. به علاوه در قسمت قبل فرض شد محیط دایره‌ی ورق کاملاً گیردار و بی حرکت باشد. این فرض هنگامی درست است که بقیه‌ی قسمت‌های قطعه از صلبیت کافی برخوردار باشند. اما در مورد قطعه‌ی نازل شاید بتوان به‌طور قطع چنین نظر داد. بهتر است بخش پایینی قطعه به‌طور کامل در محاسبات لحاظ شود تا جابه‌جایی به دست آمده واقعی‌تر باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر با وجود روزنه و قید صحیح اطراف ورق، نیمی از نازل به‌صورت متقارن محوری در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی و عنصر Solid ۲۷۲ که امکان حل متقارن محوری نیز دارد استفاده شد. نتیجه این که افزایش جابه‌جایی ناچیزی مشاهده شد طوری که بیشینه‌ی جابه‌جایی به $0.257 \mu m$ رسید. بنابراین کرنش بسیار کم‌تر از فاصله‌ی نازل از صفحه (۱۰۰ μm) است و در عملکرد دستگاه تأثیری ندارد. این محاسبات نشان داد برای پیدا کردن بیشینه جابه‌جایی می‌توان با تقریب بسیار خوبی از رابطه‌ی ورق استفاده کرد.

۳. آزمایش

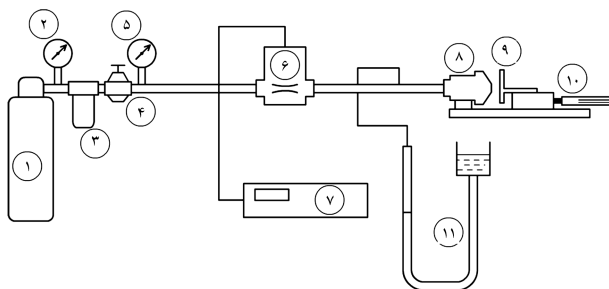
بر اساس الزامات و ابعادی که در بخش طراحی به دست آمد قطعات لازم برای نازل ساخته شد. نازل از نگه‌دارنده، واشر و درپوش ساخته می‌شود. عدسی داخل نگه‌دارنده پیچیده شده و واشر و بعد از آن درپوش در جای خود قرار می‌گیرند. سر نگه‌دارنده برای عبور نور باز گذاشته شده و در سطح جانبی آن نیز جایی برای اتصال شیلنگ تعبیه شده است.

آزمایش با هدف بررسی کارایی نمونه‌ی اولیه صورت گرفت. هدف از این آزمایش صحت‌سنجی معادلات نبوده زیرا معادلاتی که حل مدار بر مبنای آن انجام شد خود به‌صورت تجربی به دست آمده‌اند. معادله‌ی رفتار نازل هم به‌طور ویژه با حل عددی بررسی شد. در واقع آزمایش به این منظور انجام می‌شود که امکان سنجش فاصله با ریزسنج گازی بررسی شود. چون ابعاد، فواصل و تغییرات فشار بسیار کوچک‌اند باید از طریق آزمایش به اثبات برسد که با وجود خطاهای اجتناب‌ناپذیر ساخت و اندازه‌گیری، فشار از حساسیت کافی نسبت به تغییر فاصله برخوردار است. شبیه‌سازی مدار گاز به شناسایی رفتار آن و انتخاب بهینه‌ی مشخصات وسیله کمک کرد. یک دستگاه کنترل دبی با شیر الکترونیکی مربوطه در دسترس بود که علی‌رغم این که طراحی‌ها برای مدار دبی ثابت صورت نگرفته بود، این شیوه‌ی سنجش فاصله نیز آزموده شد.

۱.۳. آزمایش با کنترل دبی

با استفاده از دستگاه کنترل دبی نوع دیگری از سنجش فاصله امکان‌پذیر می‌شود. دستگاه کنترل دبی، دبی جرمی ثابتی را برای نازل تأمین می‌کند. فاصله‌ی کم‌تر با افزایش مقاومت در برابر جریان گاز، فشار بالادست نازل را افزایش می‌دهد و به‌عکس، فاصله‌ی کم‌تر باعث می‌شود گاز آزادانه‌تر حرکت کند و از فشار بالادست کاسته شود. مزیت اصلی این روش این است که دستگاه کنترل دبی اجازه نمی‌دهد تغییر فشار مخزن تأثیری بر عملکرد بگذارد. البته باید توجه داشت وقتی مدار گاز تنها یک خط دارد، نوسان‌های محیطی سریع که به‌صورت موج وارد خط شوند روی فشار اثر می‌گذارد، که برای رفع این مشکل می‌توان مسیر مبنایی تعبیه کرد.

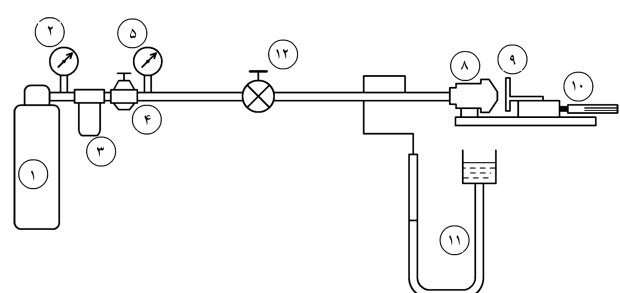
چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود: گاز نیتروژن از مخزن (۱)، که فشار آن توسط فشارسنج (۲) معادل ۵۰ bar نشان داده شده وارد فیلتر (۳) می‌شود و رگلاتور (۴) فشار خروجی آن را تنظیم می‌کند؛ در حالی که فشار ورودی به مدار توسط فشارسنج (۵) نشان داده می‌شود. دستگاه کنترل دبی (۷) که از نوع Aera ROD-۴ است از طریق شیر و دبی‌سنج (۶) دبی ورودی را روی sccm ۸۰۰ تنظیم می‌کند. برای نصب نازل و صفحه، ابتدا قطعه‌ی نازل (۸) روی پایه ثابت



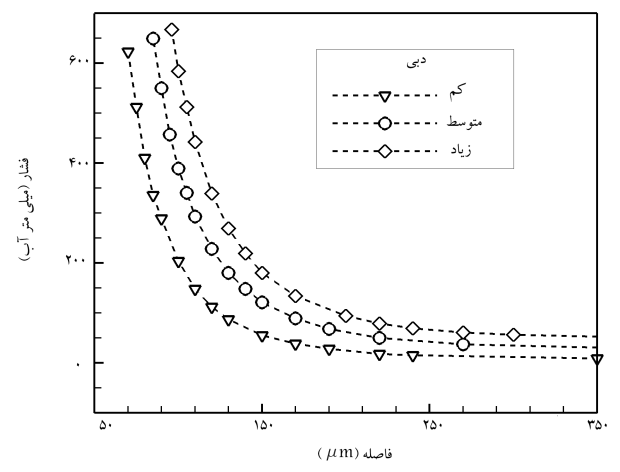
شکل ۸. چینش لوازم آزمایش با دبی ثابت.

آزموده شود و به جای اورفیس از شیر کنترل دبی نیوماتیک استفاده شد. به این طریق مرتبه‌های مختلف افت فشار در این عضو قابل آزمایش است. چیدمان این آزمایش مانند آزمایش قبل است با این تفاوت که مطابق شکل ۱۰، به جای کنترل‌کننده دبی، شیر کنترل دبی (۱۲) قرار گرفته که یک فشارشکن محسوب می‌شود. براساس نتایج تحلیل مدار معلوم شد برای دست یافتن به دقت‌های بالاتر باید فشار بالادست شیر را افزایش داد. به همین دلیل رگلاتور مخزن نیتروژن (۴) روی فشار ۱٫۸ bar تنظیم شد. گاز از مخزن به شیر و سپس به نازل می‌رسد. مانند آزمایش قبل فشار ورودی به نازل با مانومتر آبی اندازه‌گیری شد. با تنظیم شیر سه حالت کاری امتحان شد که از لحاظ فشار و در نتیجه از نظر دبی مصرفی تفاوت دارند. شکل ۱۱ فشارهای ثبت‌شده را برحسب فاصله نشان می‌دهد. فشار نازل برای حالت ۱ بیش‌ترین و برای حالت ۳ کم‌ترین است. شکل ۱۲ تصویر تجهیزات

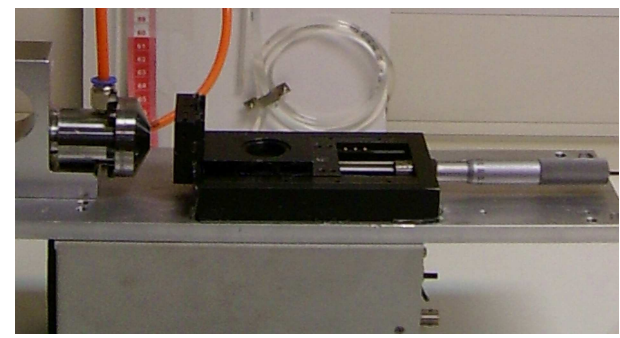
شد و پیچ میکرومتری (۱۰) که $10\ \mu\text{m}$ دقت دارد در مقابل آن قرار گرفت. سپس صفحه‌ی مسطح (۹) در حال تماس با سر نازل به پیچ متصل شد. در این حالت عددی که روی میکرومتر خوانده می‌شود نقطه‌ی مبدأ فاصله است. فشار گاز ورودی به نازل به وسیله‌ی یک مانومتر آبی (۱۱) با دقت $1\ \text{mm}$ اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش دو بار و با فاصله‌ی چند ساعت انجام شد و به‌ازای هر مقدار فاصله یک مقدار فشار حاصل شد و به ثبت رسید. شکل ۹ نتیجه را در کنار نمودار حاصل از روابط نشان می‌دهد. وقتی فاصله بسیار زیاد می‌شود، فشار تقریباً با فشار محیط برابر می‌شود و اختلاف فشار جزئی در این حالت ناشی از افت فشار گاز در عبور از داخل نازل است. نتایج حاصله بیان می‌دارد که تا وقتی فاصله خیلی کم نباشد با روابط مطابقت می‌کند و هنگامی که فاصله بسیار کوچک شود اختلافی بین این دو بروز می‌کند. شیب نمودار با کاهش فاصله‌ی نازل از صفحه به طرز قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد و این بدان معناست که اگر فاصله‌ی نقطه‌ی طراحی کوچک انتخاب شود، حساسیت و در نتیجه دقت ارتقا می‌یابد. تغییر فاصله از 90 به 110 میکرومتر، فشار را از 96 به 49 میلی‌متر آب می‌رساند و هنگامی که فاصله از 40 تا 60 میکرومتر تغییر کند، فشار از 603 تا 277 میلی‌متر آب کاهش می‌یابد. بنابراین در $h = 100\ \mu\text{m}$ و در $h = 50\ \mu\text{m}$ حساسیت اندازه‌گیری فاصله به‌ازای $1\ \text{mmH}_2\text{O}$ به ترتیب $426\ \text{nm}$ و $61\ \text{nm}$ است. مطابق انتظار، اگر بتوان موانع احتمالی کاهش فاصله‌ی کاری را برطرف کرد، با همان میزان مصرف گاز دقت بسیار بهتری حاصل خواهد شد. در ضمن کاهش فاصله باعث افزایش فشار می‌شود. چون خط مبنا نیز به کار خواهد رفت، شیر تخلیه‌ی خط مبنا به‌گونه‌ی تنظیم می‌شود که تفاضل فشار نقطه‌ی طراحی صفر باشد.



شکل ۱۰. چیدمان لوازم آزمایش با فشارشکن.



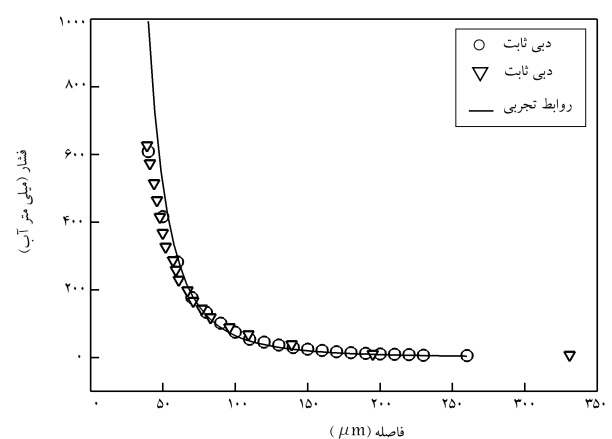
شکل ۱۱. آزمایش با فشارشکن.



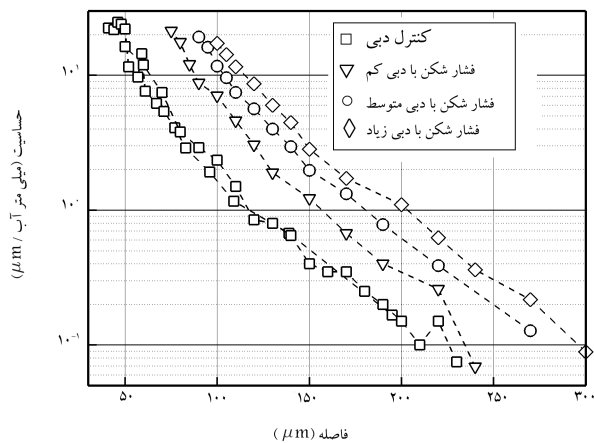
شکل ۱۲. نازل و صفحه‌ی مقابل آن.

۲.۳. آزمایش مدار تفاضلی

مدار تفاضلی از دو شاخه تشکیل شده است: اصلی و مرجع. خط مرجع هنگامی که دستگاه در حال کار است به علت ثابت بودن وضعیت شیر (با نازل و صفحه‌ی) انتهای آن هیچ تغییری ندارد و تنها اثر وجود آن پدیده آوردن مرجعی است برای فشار تا مقادیر کوچک تر باشد (بخش ۲.۲). این دو شاخه هیچ تأثیری بر عملکرد یکدیگر ندارند و برای بررسی رفتار، آزمایش شاخه‌ی اصلی کفایت می‌کند. به‌خصوص قرانت فشارها توسط مانومتر، که دقت آن ارتباطی به مقدار فشار ندارد و زیاد بودن مقادیر باعث افت دقت فشارسنجی نمی‌شود. با توجه به این مسائل، و چون هدف از این آزمایش مشاهده‌ی حساسیت فشار به فاصله است، بهتر است تنها خط اصلی



شکل ۹. آزمایش با دبی ثابت در مقایسه با روابط تجربی.



شکل ۱۳. حساسیت سنجش فاصله در آزمایش.

مصرفی کم‌تر و مدت زمانی که می‌توان از مخزن استفاده کرد طولانی‌تر می‌شود. همین نمودار برای آزمایش با دبی ثابت نیز رسم شده است که باز همان روال افزایش حساسیت با کم شدن فاصله را تا $h = 50 \mu\text{m}$ نشان می‌دهد اما برای فاصله‌های کم‌تر این روال متوقف می‌شود.

قبلاً مشخص شد افت فشار بیشتر در فشار شکن دقت را ارتقا می‌دهد (بخش ۳.۵.۲). اما این گزاره با شرایط مساوی برای افت‌های مختلف (یعنی هنگامی که فشار بعد از شیر و قبل از نازل برای تمام حالت‌ها یکسان باشد، یا دبی مصرفی مشابه باشد) به دست آمد. شرایط برای حالت‌های ۱، ۲ و ۳ آزمایش با شیر یکسان نیست و این سه حالت به سه سطح از مصرف مربوط می‌شود. به همین دلیل حالتی که افت فشار کم‌تری دارد با دبی بیشتر به دقت بالاتری دست یافته است. به منظور ایجاد شرایط مساوی باید همراه با بازتر کردن شیر فشار شکن، رگلاتور مخزن را روی فشار کم‌تری تنظیم کرد تا در مجموع فشار تحویلی به نازل تغییر نکند.

تغییرات فشار از ابتدای مدار تا انتها زیاد است، طوری که گاز کاملاً تراکم پذیر و با تغییر چگالی مواجه است. بنابراین امکان مقایسه با حل عددی دستگاه وجود نداشت تا مشخص شود به صورت کمی شیر کنترل دبی نسبت به اوریفیس چگونه عمل می‌کند. البته تراکم‌پذیری فقط به شیر مربوط می‌شود و نازل همچنان کم فشار به حساب می‌آید. برای این که مقایسه عملی باشد باید روابط مربوط به اوریفیس با در نظر گرفتن تراکم‌پذیری^[۷] استفاده شود. اما آنچه که در نگاه اول مشاهده شده این است که این شیرها عملکرد قابل قبولی داشته و می‌توانند به عنوان جایگزین اوریفیس مطرح باشند.

۵. نتیجه‌گیری

مراحل شناسایی اجزا، طراحی، ساخت و آزمایش دستگاه اندازه‌گیری فاصله با کاربرد در لیتوگرافی لیزری طی شد. مشخص شد بخش مهم نازل، همان حد فاصل بین دو صفحه است و حتی با وجود عدسی شیئی (به شرط این که مسیر جریان را بیش از حد محدود نکند) می‌توان از رابطه‌ی ناکایاما بهره برد. پیکربندی تقاضای شامل مسیر خط مرجع به دیگر مدارها ترجیح داده شد که در آن با توجه به محدودیت‌ها، نازل در فشار کم و با مصرف گاز کم کار می‌کند. با حل دستگاه معادلات حاکم بر مدار، وضعیت کاری آن در شرایط مختلف به دست آمد و به این طریق ابزار

شامل نازل و صفحه‌ی نصب‌شده بر پیچ میکرومتری و شیر فشار شکن را نشان می‌دهد.

فشار نازل در نقطه‌ی $h = 100 \mu\text{m}$ تقریباً در حالت ۱ برابر $200 \text{ mmHg}_2\text{O}$ ، در حالت ۲ معادل $400 \text{ mmHg}_2\text{O}$ و در حالت ۳ مساوی $600 \text{ mmHg}_2\text{O}$ بود. دبی مصرفی مستقیماً اندازه‌گیری نشد اما فشار بیشتر به ازای فاصله‌ی ثابت، حاکی از مصرف گاز بیشتر است. این بار برخلاف آزمایش قبلی، دبی ثابت نیست و هنگامی که فاصله افزایش یابد دبی هم بیشتر می‌شود.

۴. بحث و بررسی

در آزمایش با دبی ثابت هنگامی که فاصله کم شد، مقادیر فشاری که از آزمایش به دست آمد کم‌تر از آن چیزی بود که با رابطه‌ی ناکایاما برای نازل پیش‌بینی می‌شد. در حالی که در فواصل بیشتر این دو به هم نزدیک بودند. یک دلیل عمده برای بروز این اختلاف، نشت گاز از نازل است. بررسی قطعه‌ی نازل نشان داد در درجه‌ی اول از سر نگه‌دارنده، یعنی محل بسته شدن عدسی به آن، و در درجه‌ی دوم و به میزان کم تراز محل اتصال درپوش، واشر و نگه‌دارنده گاز به بیرون نشت می‌کرد. این منافذ ناخواسته باعث می‌شوند با کاهش فاصله و افزایش فشار داخل محفظه و فرار مقداری گاز، فشار محفظه نتواند به مقدار از پیش تعیین‌شده برسد. انتظار می‌رود با تعبیه‌ی واشرهای لاستیکی این مشکل برطرف شود. رفع این نقص از این جهت اهمیت دارد که شیب نمودار آزمایشی نسبت به روابط کم‌تر است و باعث کاهش حساسیت می‌شود.

نقاطی که از دو بار آزمایش با دبی ثابت به دست آمده‌اند مقداری اختلاف دارند که این اختلاف دو منشأ دارد. مسئله‌ی اول خطای ناشی از سنجش فاصله با پیچ میکرومتری است. این پیچ‌ها مقداری لغی دارند که به خصوص هنگام تغییر جهت حرکت از جلو به عقب یا برعکس بیشتر بروز می‌کند. مسئله‌ی دوم این است که اتصال نازل به پایه از استحکام کافی برخوردار نبوده و همین انعطاف‌پذیری موجب می‌شد اعمال کم‌ترین نیرو به قطعه‌ی نازل آن را حرکت دهد و باعث تغییر فشار شود. برای بررسی دقیق‌ترین اختلاف می‌توان به نقطه‌ی $h = 50 \mu\text{m}$ که در آن فاصله‌ی نقاط زیاد است توجه کرد. هنگام به کارگیری این دستگاه در سیستم خودکانون فاصله براساس فشار خوانده شده تشخیص داده خواهد شد. علامتی که روی $50 \mu\text{m}$ قرار دارد به فشار 416 Pa مربوط است. علامت مثلث کناری آن که به همان فشار مربوط است در فاصله‌ی $48 \mu\text{m}$ به ثبت رسیده است. پس بین این دو فاصله که در فشار یکسان برداشت می‌شوند $2 \mu\text{m}$ اختلاف وجود دارد که کوچک‌تر از خطای اندازه‌گیری پیچ میکرومتری است و با توجه به عوامل خطایی که مطرح شد کاملاً طبیعی است.

نمودار حساسیت فشار به تغییر فاصله با تحلیل داده‌های آزمایش در شکل ۱۳ ترسیم شده است. حساسیت (و به تبع آن دقت) با کاهش فاصله به طرز فزاینده‌ی افزایش می‌یابد و این واقعیت در مورد هر سه حالت آزمایش با شیر صحیح است. مشخص شد هر چه افت فشار بیشتر باشد فاصله‌ی بهینه برای دقت کوچک می‌شود که با توجه به افت فشار بالای فشار شکن (یعنی $1/8 \text{ bar}$)، آزمایش‌ها نیز این موضوع را تأیید می‌کند. بدون شک برای تصمیم‌گیری و انتخاب یک نقطه‌ی مناسب تنها توجه به دقت کافی نیست. در پی کاهش فاصله، فشار بیشتر بر صفحه وارد آمده، و باید مطمئن بود در حد مجاز باقی می‌ماند. اما از طرفی دبی

۴. فاصله‌ی نازل از صفحه‌ی بهینه به مقدار همین افت بستگی دارد و با افزایش آن کم‌تر می‌شود.

آزمایش به دو صورت دبی‌ثابت و افت فشاری انجام شد. در هر دو آزمایش با کاهش فاصله، بزرگنمایی ارتقا می‌یابد. در آزمایش با فشارشکن، بازتر کردن شیر و ثابت نگه داشتن فشار ورودی نیز با مصرف دبی بیش‌تر بزرگنمایی و به تبع آن دقت را بالا می‌برد. بعد از دقایق کوتاهی از شروع به کار، فشار دستگاه از پایداری برخوردار و نتایج تکرارپذیر بودند. مشخصات به دست آمده برای کاربرد در لیتوگرافی رازی‌کننده است.

طراحی ریزسنج‌گازی فراهم شد. تأثیر هر یک از پارامترها بررسی و چنین مشخص شد:

۱. مقدار بهینه‌ی قطر داخلی نازل به فشار ورودی مدار وابسته است و هر چه این فشار بیش‌تر باشد، باید قطر داخلی کوچک‌تر انتخاب شود.
۲. افزایش قطر خارجی به میزان ناچیزی دقت را بهبود می‌بخشد.
۳. بالا بردن افت فشار در شیر تأثیر چشم‌گیری بر ارتقا دقت دارد.

پانوشتها

1. very large scale integration
2. Western Gage
3. Edmunds

منابع (References)

1. Heidelberg Instruments, Available from: <<http://www.himt.de/en/technology/autofocus-system.php>>.
2. Glendinning, W.B. and Helbert, J.N., *Handbook of VLSI Microlithography*, Noyes, New Jersey, United States, pp. 316-317 (1991).
3. Evans, J.C. and Morgan, I.G. "The application of pneumatic gauging to high precision linear measurement", *J. Sci. Instrum.*, **33**, pp. 388-390 (1956).
4. Thomas, T., Hamaker, C., Martyniuk, J. and Mirro, G. "Nanometer-level autofocus air gauge", *Precis. Eng.*, **22**, pp. 233-242 (1998).
5. Zhang, Y., Kawashiwa, K., Fujita, T. and Kagawa, T. "Development of an air servo displacement sensor", *Precis. Eng.*, **28**, pp. 435-442 (2004).
6. Nakayama, Y. "Action of the fluid in the air-micrometer", 1st Report, Characteristics of Small-Diameter Nozzle and Orifice, No. 1, in the Case of Compressibility Being Ignored, *B. JSME*, **4**(15), pp. 507-515 (1961).
7. Nakayama, Y. "Action of the fluid in the air-micrometer", 2nd Report, Characteristics of Small-diameter Nozzle and Orifice, No. 2, in the Case of Compressibility Being Considered, *B. JSME*, **4**(15), pp. 516-524 (1961).
8. Nakayama, Y. "Action of the fluid in the air-micrometer", 3rd report, Characteristics of Double-disc Nozzle, No. 1, in the Case of Compressibility Being Ignored, *B. JSME*, **7**(28), pp. 698-707 (1964).
9. Nakayama, Y. "Action of the fluid in the air-micrometer", 4th Report, Characteristics of Double-Disc Nozzle, No. 2, in the Case of Compressibility Being Considered, *B. JSME*, **7**(28), pp. 708-712 (1964).
10. Nakayama, Y. "Action of the fluid in the air-micrometer", 5th Report, Combined Characteristics of Nozzle or Orifice and Double-disc Nozzle, and Method of Design of Air-micrometer, *B. JSME*, **7**(28), pp. 713-720 (1964).
11. Bokov, V.B. "Pneumatic gauge steady-state modeling by theoretical and empirical methods", *Measurement*, **44**, pp. 303-311 (2011).
12. Bokov, V.B. "Pneumatic gauge empirical-mechanistic modeling", *Measurement*, **44**, pp. 1166-1176 (2011).
13. Rucki, M., Barisic, B. and Varga, G. "Air gauges as a part of the dimensional inspection systems", *Measurement*, **43**, pp. 83-91 (2010).
14. Western Gage Corporation, Dimensional Gage Buyers Guide 38, Available from: <<http://www.westerngage.com>>
15. Edmunds, Air Gauging, Available from: <<http://www.edmundsgages.com/products/airgaging.htm>>.
16. Jermak, C.J., Barisic, B. and Rucki, M., "Correction of the metrological properties of the pneumatic length measuring gauges through changes of the measuring nozzle head surface shape", *Measurement*, **43**, pp. 1217-1227 (2010).
17. Sonntag, R.E., Borgnakke, C. and Wylen, G.J.V., *Fundamentals of Thermodynamics*, 6th Edn., John Wiley & Sons, Danvers, United States, pp. 725-730 (2003).
18. Ventsel, E. and Krauthammer, T. "Thin plates and shells, theory, analysis, and applications", Marcel Dekker, New York, United States, pp. 98-106 (2001).