مروری بر کاربرد فناوری دیجیتایزینگ اپتیکی در فرایندهای شکل‌دهی ورق

حامد شیخ بهایی[1]، مجید شمسی‌پور[2]

۱ دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، hamed.sheikh2012@gmail.com

۲ عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

چکیده

امروزه به‌منظور ارتقای مزیت رقابتی و افزایش رقابت‌پذیری در بازار، تولید با کمترین میزان ضایعات و بالاترین کیفیت اهمیتی دوچندان یافته است. از جمله مهمترین عوامل مؤثر در ارتقای سطح کیفی محصولات، اندازه‌گیری دقیق در طی فرایند ساخت است؛ در این میان اندازه‌گیری در فضای سه‌بعدی پرکاربردترین و جامع‌ترین روش اندازه‌گیری دقیق است. از جمله روش‌های مؤثر اندازه‌گیری سه‌بعدی، دیجیتایزینگ اپتیکی یا همان استفاده از اسکنرهای سه‌بعدی است. با پیشرفت‌های جدید در حوزهٔ دانش اندازه‌گیری نوری، کاربردهایی نوین از این فناوری در زمینه‌های گوناگون آشکار شده است. در این مقاله کاربردهای متنوع سیستم‌های اندازه‌گیری غیرتماسی اپتیکی در فرایندهای شکل‌دهی ورق مطرح شده است. برای این منظور کاربردهای عملی این فناوری در سه بخش اندازه‌گیری و اسکن سه‌بعدی سطوح به‌منظور اندازه‌گیری شکل و کنترل ابعاد ابزار و قطعات، اندازه‌گیری کرنش سه‌بعدی جهت تحلیل تغییر شکل و خواص مکانیکی ورق و در نهایت اندازه‌گیری سه‌بعدی دینامیکی به‌منظور تحلیل دینامیکی ماشین‌ها و ابزارهای شکل‌دهی ورق پرداخت بررسی شده است.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی ورق، دیجیتایزینگ اپتیکی، کنترل کیفیت، آنالیز شکل‌دهی، خواص مواد

۱. مقدمه

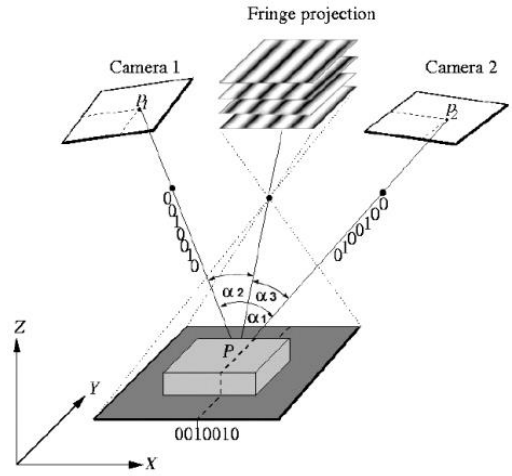
شکل‌دهی ورق از جمله مهمترین فرایندهای ساخت در زمینهٔ بدنهٔ انواع خودرو و تولید اجزای هواپیما، همچنین تولید لوازم خانگی همچون انواع یخچال، ماشین لباسشویی، ظرف‌شویی و جز این‌ها محسوب می‌شود. در عین‌حال، اندازه‌گیری و بازرسی قطعات شکل‌گرفته در حالت آزاد و مونتاژ، بهینه‌سازی قالب‌های شکل‌دهی، همچنین بررسی فرایند تغییر شکل ورق و شبیه‌سازی آن، در این زمینه از اهمیت خاصی برخوردار است و به سیستم‌های اندازه‌گیری و داده‌برداری دقیق و سریع نیاز دارد.

بیش از چند دهه است که سیستم‌های دیجیتایزینگ به‌منظور اندازه‌گیری ابعاد قطعات، بازرسی و همچنین سه‌بعدی‌سازی استفاده می‌شوند. در دههٔ گذشته، سیستم‌های اسکن اپتیکی غیرتماسی به‌عنوان یک فناوری نو و پیشرو جهت ارتاقی سطح دقت، تفکیک‌پذیری و قابلیت تطبیق‌پذیری به دنیای صنعت معرفی شدند. سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی غیرتماسی نسبت به دیگر سیستم‌های اندازه‌گیری برتری‌هایی دارند؛ مثلاً در حالی‌که ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات لمسی[1] بسیار

دقیق‌اند، اما به‌دلیل وجود اجزای مکانیکی، محدودیت سرعت دارند که دیگر سیستم‌های دیجیتایزینگ سه‌بعدی تماسی نیز با آن مواجهند. در مقابل، اسکنرهای اپتیکی سه‌بعدی قادر به جمع‌آوری میلیون‌ها نقطه از سطوح هندسی قطعات در کسری از ثانیه‌اند و برتری‌های دیگری چون قابلیت حمل‌ونقل و نداشتن محدودیت در ابعاد و وزن قطعات مورد اندازه‌گیری دارند. با این‌حال، این سیستم‌ها معایبی نیز دارند؛ مثلاً در اندازه‌گیری نقاط در سایه (نقاط یا سطوحی که در پشت یک سطح یا دیواره قرار دارند) محدودیت دارند که این مشکلات به‌سبب پیشرفت‌های نوین روبه بهبودند. در ادامه با توجه به اینکه ماشین‌های اندازه‌گیری سنتی، به‌ویژه دیجیتایزرهای تماسی و سی. ام. ام. ها جهت داده‌برداری از نیروی تماسی بین پروب تماسی و سطح قطعه استفاده می‌کنند. این نیرو می‌تواند سبب تغییر شکل سطح مورد نظر گردد؛ از اینرو اسکنرهای سه‌بعدی اپتیکی به‌عنوان ابزارهایی ضروری جهت اندازه‌گیری دقیق قطعات با ضخامت کم (ورق‌های فلزی) مطرح می‌باشند. در این مقاله به بررسی کاربردهای متنوع سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی در زمینه‌هایی چون اندازه‌گیری سطوح هندسی سه‌بعدی، تحلیل و آنالیز فرایند شکل‌دهی ورق، همچنین کاربردهایی در زمینهٔ تحلیل دینامیکی پرداخته شده است.

۲. اندازه‌گیری و اسکن سه‌بعدی سطوح

روش اندازه‌گیری در سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی براساس روش اندازه‌گیری فاصله به روش مثلث‌بندی پایه‌گذاری شده است. در این روش واحد پرتوافکنی، که شامل دو دوربین با وضوح تصویر بالا و یک پروژکتور می‌باشد، با استفاده از تداخل امواج نور پلاریزه را روی نمونهٔ مورد اندازه‌گیری می‌تاباند، سپس این الگوهای سیاه‌وسفید روی سطوح، توسط دو دوربین که در فاصله‌ای مشخص و کالیبره‌شده نسبت به‌هم قرار گرفته‌اند، ضبط می‌شود. براساس معادلات تعیین فاصلهٔ نوری (مثلث‌بندی)، رایانه به‌صورت خودکار مختصات سه‌بعدی فضایی هر یک از پیکسل‌های تصویر را با دقت تعیین و آنها را به ابر نقاط چگال مبدل می‌کند. این روش در برابر اندازه‌گیری نقاط منفرد در سیستم‌های اندازه‌گیری لمسی قرار می‌گیرد. برحسب تفکیک‌پذیری دوربین، یک ابر نقطه تا چهار میلیون نقطهٔ اندازه‌گیری‌شده در هر اندازه‌گیری قابل دستیابی است. در شکل ۱ الگوی راه‌راه تابیده‌شده بر جسم و روش مثلث‌بندی نمایش داده شده است [۱].



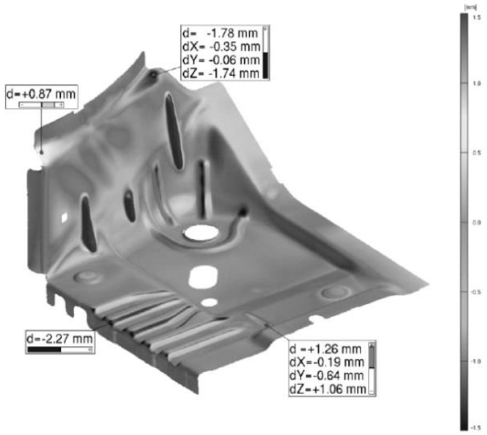
شکل ۱. نور پلاریزه و روش مثلث‌بندی در سیستم دیجتایزینگ اپتیکی

برای اندازه‌گیری کامل قطعه، چند اندازه‌گیری مستقل از راستاهای مختلف مورد نیاز است. تبدیل مختصات نقاط به یک سیستم مختصات جامع به‌صورت خودکار، توسط نقاط مرجع (برچسب‌ها) صورت می‌گیرد. کاربر می‌تواند پیشرفت فرایند دیجیتایزینگ را به‌صورت پیوسته روی صفحهٔ نمایش رایانهٔ خود مشاهده کند. هر اندازه‌گیری مستقل، بخشی از مدل سه‌بعدی که باید اسکن شود را کامل می‌کند. نهایتاً در پایان فرایند دیجیتایزینگ، یک مش چندضلعی با وضوح تصویر بالا از سطوح به‌دست می‌آید که شکل سه‌بعدی جسم را نشان می‌دهد. عموماً این مش به یک سطح نازک به شکل منحنی تبدیل می‌شود. در شکل ۲ نمایی از سیستم نوری سیستم دیجیتایزینگ اپتیکی نمایش داده شده است [۲]. در ادامه برای داده‌برداری قطعات بزرگ، همچون بدنهٔ انواع خودرو، هواپیما، کشتی، توربین و قالب‌های بزرگ فرم‌دهی ورق که نمی‌توان با یکبار اسکن تمام هندسهٔ آنها را پوشش داد، نقاط مرجع به‌شکل برچسب به‌طور مستقیم روی جسم قرار داده می‌شود و قبل از فرایند اندازه‌گیری اصلی، این نقاط به‌وسیلهٔ یک سیستم داده‌برداری نوری مانند یک دوربین عکاسی دیجیتال موقعیت‌یابی می‌شوند. سپس توسط سیستم‌های دیجیتایزینگ، سطوح به‌صورت منفرد اسکن شده و توسط نقاط به‌دست آمده در مرحلهٔ قبل، یکپارچه‌سازی می‌شوند. با استفاده از این روش داده‌برداری، اسکن قطعاتی به اندازهٔ هواپیما یا کشتی نیز میسر می‌شود [۳].

۳. کنترل ابعادی قطعات

امروزه بررسی و بازرسی ورق‌های فلزی شکل داده شده با استفاده از سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی، پتانسیل قابل ملاحظه‌ای جهت بهبود محصولات و روش‌های تولید به‌خصوص در خودروسازی و صنایع وابسته ایجاد کرده است. در این روش، ابتدا ورق فلزی همان‌گونه که در بخش قبل تشریح شد، اسکن می‌شود. سپس داده‌های اندازه‌گیری‌شده با اطلاعات مدل کـد[۲] اصلی هم‌راستا می‌گردند. این همراستایی براساس نقاط مرجع مشخصی چون سوراخ‌های دایره‌ای شکل و لوبیایی شکل یا نقاط لبه و دیگر نقاط مرجع صورت می‌گیرد. پس از همراستایی، انحراف هر یک از نقاط اندازه‌گیری‌شده از فایل کـد اصلی اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به چگالی بالای نقاط اندازه‌گیری شده، قابلیت نمایش انحرافات به شکل سطوحی با طیف رنگی پیوسته موجود است. در عین‌حال انحراف و تلرانس‌های مربوط به نقاط خاص مانند مرکز سوراخ‌ها، شیارها و خطوط مرزی به‌صورت منفرد قابل شناسایی و نمایش به‌صورت برچسب و جدول می‌باشد؛ همچنین با استفاده از قابلیت‌های بستهٔ نرم‌افزاری که همراه سیستم دیجیتایزینگ ارائه می‌شود، می‌توان انحراف نقاط اندازه‌گیری شده با اطلاعات کـد اصلی را در هر سطح مقطع مورد نیاز مشاهده و بررسی نمود. در شکل ۳ نمونه‌ای از مقایسهٔ اطلاعات فایل کـد اصلی با اطلاعات حاصل از دیجیتایزینگ اپتیکی نمایش داده شده است [۳].

شکل ۲. نمایی از سیستم نوری مربوط به سامانهٔ دیجیتایزینگ اپتیکی



شکل ۳. مقایسهٔ اطلاعات فایل کـد اصلی یک قطعهٔ خاص با اطلاعات حاصل از دیجتایزینگ اپتیکی

٤. بررسی ابعادی قطعات در حالت هم‌بندی (مونتاژ)

چون فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی در حالت آزاد (نه در حالت هم‌بندی) طراحی و تولید می‌شوند، بررسی تغییر شکل قطعه در موقعیت هم‌بندی، که به‌سبب نیروی‌های اعمالی، جاذبه، تنش پسماند و انحراف در جنس ماده ممکن است دچار تغییر شکل گردد، از اهمیت خاصی برخوردار است. برای بررسی قطعه در شرایط هم‌بندی، باید قطعه در حالت بسته‌شده و ثابت به فیکسچر بررسی شود. بررسی ابعادی قطعه و انحراف در این شرایط با استفاده از سیستم‌های سنتی مثل سی. ام. ام. ها وقت‌گیر است؛ این در حالی است که با استفاده از سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی زمان این فرایند به‌طور چشمگیری کاهش یافته و حتی در آینده بازرسی قطعات در خط تولید در حین هم‌بندی نیز ممکن است میسر شود. به‌کمک از این روش قطعه یک‌بار به‌صورت آزاد و بار دیگر به‌صورت بسته‌شده روی فیکسچر داده‌برداری می‌شود؛ سپس انحراف و میزان تنش‌های وارده بر آن در هنگام هم‌بندی به‌وسیلهٔ تحلیل‌های المان محدود بازسازی و بررسی می‌گردد. در شکل ۴ نمونه‌ای از بررسی اعوجاج قطعه و انحراف حاصله در سه حالت آزاد، هم‌بندی و در هم‌بندی مجازی (شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار المان محدود) نمایش داده شده است [۴].

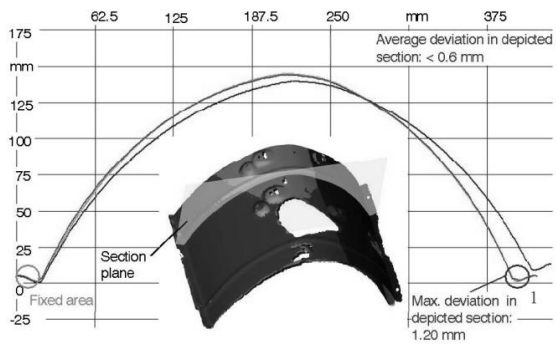
۵. داده‌برداری از قالب‌های شکل‌دهی

قالب‌های بزرگ شکل‌دهی ورق عموماً از قطعات بزرگ ریخته‌گری‌شده تهیه می‌شوند. این قطعات با توجه به فرایندهای

بعدی ماشینکاری مثل فرزکاری، سنگ‌زنی و پرداخت‌کاری، که باید روی آنها انجام شود، جهت رسیدن به سطوح و تلرانس‌های مورد نظر معمولاً بزرگتر از اندازهٔ اصلی تهیه می‌شوند. با استفاده از سیستم دیجیتایزینگ اپتیکی می‌توان شکل واقعی قطعهٔ ریخته‌گری شده را به‌دست آورد و روش بهینهٔ ماشینکاری را براساس شکل قطعه محاسبه و برنامه‌ریزی نمود. با استفاده از برنامه‌های فرزکاری جدید و پیشرفته می‌توان قطعه را با اطمینان از نبود برخورد یا تصادم و شکست ابزار به‌طرز مؤثری بدون نیاز به نظارت کاربر ماشینکاری نمود و به این‌صورت کاهشی ۵۰ درصدی در زمان خشن‌کاری قالب با استفاده از سیستم داده‌برداری اپتیکی قابل دستیابی می‌باشد [۵].

٦. اصلاح ابزار پس از تست اولیه و سایش قالب

در طول فرایند ساخت ابزارهای شکل‌دهی ورق، قالب باید جهت به‌دست آوردن هندسهٔ سه‌بعدی صحیح در طی فرایند تست اولیه اصلاح شود. این تست جهت تصحیح تعامل بین قطعه، ابزار و ماشین پرس استفاده می‌شود. به‌دلیل این اصلاحات پس از تست اولیه، هندسهٔ نهایی، متفاوت با شکل ابزار شبیه‌سازی شده و مدل کد طراحی شده می‌باشد.



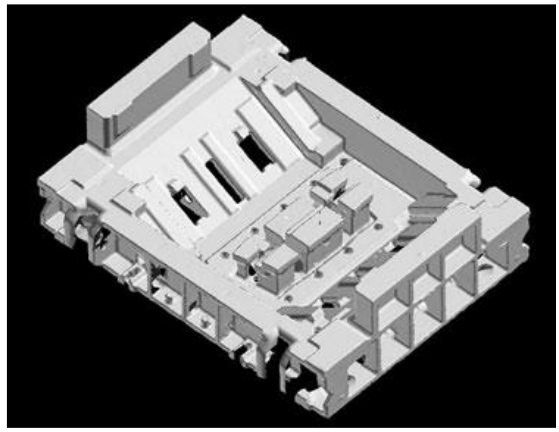
شکل ٤. اعوجاج قطعه در حالت آزاد، هم‌بندی و هم‌بندی مجازی

با استفاده از دیجیتایزینگ اپتیکی سطوحی که باید اصلاح شود با مقایسهٔ فایل کد اصلی با نقاط تغییر شکل یافتهٔ غیرمجاز مشخص می‌گردد. همچنین وجود عواملی چون فشار، اصطکاک، تلرانس‌های بسته و ارتعاش که در طول فرایند پرسکاری رخ می‌دهد، سبب ایجاد تغییرات در هندسهٔ ابزار می‌گردد؛ این تغییرات هندسی ناخواسته منجر به تولید قطعات نامناسب می‌گردند که در فرایند بعدی زنجیرهٔ تولید، قابلیت استفاده ندارند. جهت بهبود روش‌های تعمیر و نگهداری، که شامل جلوگیری از تولید قطعات برگشتی می‌باشد، سایش قالب می‌تواند با مقایسهٔ سطح سه‌بعدی دیجیتایزشده با فایل کد اصلی یا هندسهٔ اندازه‌گیری شده، مقایسه و تحلیل شود. همچنین با استفاده از این روش، قابلیت نمونه‌برداری و بازسازی نواحی شکستهٔ قالب یا ساخت قالب یدکی در صورت شکست قالب در مدت کوتاهی میسر می‌گردد. در شکل ۵ نمونهٔ داده‌برداری شده از یک قالب شکل‌دهی ورق با یک حجم داده‌برداری بالا نمایش داده شده است [۵].

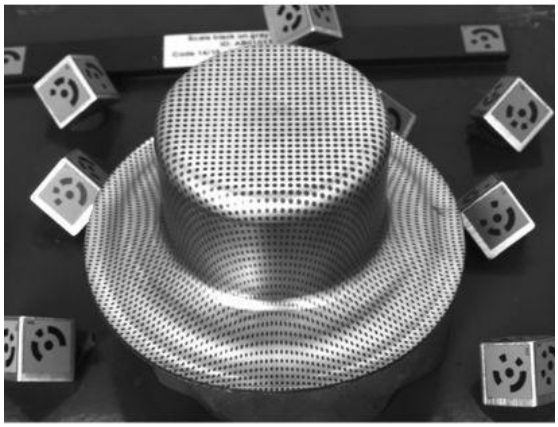
۷. اندازه‌گیری کرنش سه‌بعدی

ورق‌های فلزی باید درون قالب‌های پیچیده با نیروهای بزرگ جهت تولید قطعات نهایی شکل داده شوند. در طول فرایند، ممکن است قطعه در برخی از نواحی خاص نزدیک حد محدودهٔ شکل‌دهی ماده یا فراتر از آن تغییر شکل دهد؛ این در حالی است که قطعه شکل مورد نظر خود را پیدا کرده است. با مقایسهٔ کامل و تمام هندسهٔ ورق فلزی تغییر شکل یافته با فایل کد اصلی می‌توان انحراف هندسهٔ نهایی را از فایل کد اصلی به‌دست آورد. سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی با اندازه‌گیری توزیع کرنش، اطلاعات زیادی دربارهٔ اینکه ماده چگونه تغییر شکل می‌دهد به کاربر می‌دهند. این سیستم‌ها مختصات سه‌بعدی، نتایج جابه‌جایی و کرنش دقیق و جامعی را ایجاد می‌کنند. از این اطلاعات جهت تحلیل شکل‌دهی ورق‌های فلزی و ارزیابی شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان بهره برد. در این روش ابتدا به آماده‌سازی ورق مسطح اولیه با تعدادی نشانگر نیاز است که همراه با ورق فلزی در طول فرایند پرسکاری، این نشانگرها نیز تغییر شکل می‌دهند. روی سطح قطعه یک الگوی منظم نقطه‌ای عموماً به‌وسیلهٔ حک لیزری، حک‌کردن با اسید یا توسط پرینت‌گرفتن ایجاد می‌شود. پس از تغییر شکل، الگوی نقطه‌ای به‌کار رفته روی قطعه، به‌وسیلهٔ یک کاربر از جهات مختلف همراه با مجموعه‌ای از میله‌های مقیاس و برچسب‌های اندازه‌گیری کدگذاری شده، عکسبرداری می‌شود. با اندازه‌گیری تغییر شکل و جابه‌جایی نقاط حک‌شده و مقایسهٔ آن با حالت تغییر شکل نیافته می‌توان میزان کرنش را در جهات گوناگون به‌دست آورد. در طول تحلیل شکل‌دهی، کرنش فرعی و اصلی محاسبه شده و با توجه به اصل ثابت‌بودن حجم، کاهش

ضخامت در مقاطع گوناگون به‌دست می‌آید. با محاسبهٔ کرنش اصلی و فرعی، نمودار حد شکل‌دهی محاسبه شده و بدین‌وسیله نواحی که بیش از اندازه کشیده و تغییر فرم یافته و مستعد پارگی‌اند، مشخص می‌شود. در شکل ۶ نمونهٔ الگوی نقطه‌ای تغییر شکل یافته روی قطعه‌کار حین کشش عمیق نمایش داده شده است [۵].



شکل ۵. نمونهٔ اندازه‌گیری شده یک قالب ریختگی فرم‌دهی ورق با استفاده از سیستم دیجیتایزینگ اپتیکی با حجم داده‌بردای بالا



شکل ٦. ورق تغییر شکل یافته در اثر فرایند کشش عمیق به‌همراه نشانگرهای مربوطه

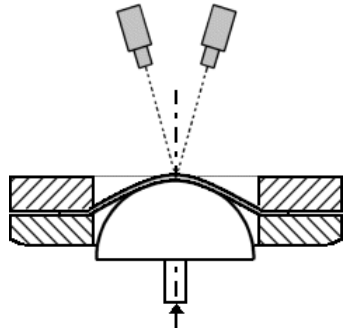
۸. تست فشار و کشش

در فرایندهای شکل‌دهی ورق داشتن خواص ماده، که از طریق تست‌های فشار و کشش به‌دست می‌آید، از اهمیت خاصی برخوردار است. تغییرات ناگهانی (ناپایداری) در خواص مواد در هنگام این‌گونه تست‌ها همچون تست بالج در تعیین منحنی حد شکل‌دهی و باریک‌شدگی در مطالعهٔ رفتار مواد حین کشش عمیق سبب می‌شود که استفاده از روش‌های سنتی در اندازه‌گیری خصوصیات مواد ممکن به‌نظر نرسد؛ این در حالی است که این موضوع در مورد مواد غیرهمسانگرد مانند مواد مرکب و بیومواد بیشتر نمایان است. حتی در مورد ورق‌های آلومینیومی ساده‌ای که در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ناهمسانگردی و ضعف مقطع عرضی مشاهده گشته و از اهمیت برخوردار است. با استفاده از سیستم داده‌برداری اپتیکی می‌توان تغییر شکل و جابه‌جایی نقاط روی نمونهٔ مورد آزمایش، که به‌صورت طبیعی یا به‌وسیلهٔ حک‌کردن ایجاد شده است، را دنبال نمود. در این روش دنبال‌کردن مختصات سه‌بعدی ۱۰۰۰۰ نقطه با سرعتی معادل ۳۰ تا ۳۰۰ عکس در ثانیه قابل دستیابی است و با اندازه‌گیری جابه‌جایی سه‌بعدی نقاط، تغییر شکل و کرنش سه‌بعدی محاسبه شده، تانسور تنش برای هر نقطه قابل محاسبه و نمایش است [۶].

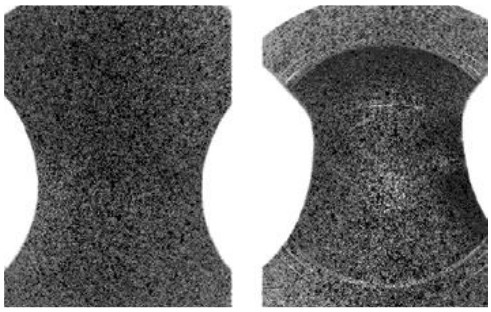
۹. تعیین نمودار حد شکل‌دهی

هنگام بررسی فرایندهای شکل‌دهی ورق، منحنی حد شکل‌دهی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این نمودار، تغییر شکل ناشی از فرایند شکل‌دهی با خواص ماده مقایسه می‌شود. از اینرو به آن نمودار حد شکل‌دهی می‌گویند و نشان می‌دهد تحت چه تغییر شکلی، ورق در محدودهٔ ایمن قرار گرفته یا در چه محدودهٔ کرنشی دچار پارگی می‌شود. هر ماده‌ای نمودار حد شکل‌دهی مخصوص به خود را دارد و دقت این نمودار به اندازهٔ اندازه‌گیری تغییر شکل مهم می‌باشد. به‌طور کلی، نمودار حد شکل دهی توسط آزمایش ناکازیما به‌وسیلهٔ کشش عمیق نمونه‌های مورد آزمایش تعیین می‌گردد. با استفاده از سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی، شامل دو دوربین با وضوح تصویر بالا و نمونهٔ مورد آزمایش با ساختار نقاط حک‌شده روی آن و همچنین یک ماشین کشش عمیق مخصوص این آزمایش، منحنی حد شکل‌دهی قابل دستیابی است. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که سیستم دیجیتایزینگ با عملکرد ماشین کشش عمیق تداخلی نداشته باشد. در طول تست و در حین داده‌برداری اپتیکی، نقاط در حال تغییر شکل پارامترهایی چون نیرو و جابه‌جایی دستگاه کشش عمیق به‌طور همزمان تا پدیدارشدن نخستین ترک ثبت می‌گردند. سپس با استفاده از چندین نمونه و با داشتن تغییر

شکل نقاط و نیرو اعمال شده و جابه‌جایی نقاط، کرنش فرعی، کرنش اصلی و کاهش ضخامت محاسبه و حداکثر تغییر شکل مجاز تعیین، و بدین‌وسیله منحنی حد شکل دهی ترسیم می‌شود. از مزایای استفاده از این سیستم در مقایسه با دیگر روش‌ها، وضوح تصویر موضعی بالا و اندازه‌گیری تغییر شکل‌های جزیی در تعیین کرنش است. از اینرو ناحیهٔ گلویی‌شدن می‌تواند با دقت زیاد تعیین شود. در شکل‌های ۷ و ۸ آرایش آزمایش ناکازیما و نمونه‌های مورد آزمایش نمایش داده شده است [۶].



شکل ۷. سیستم اندازه‌گیری اپتیکی و آزمایش ناکازیما



شکل ۸ نمونهٔ مورد استفاده در آزمایش کشش عمیق ناکازیما

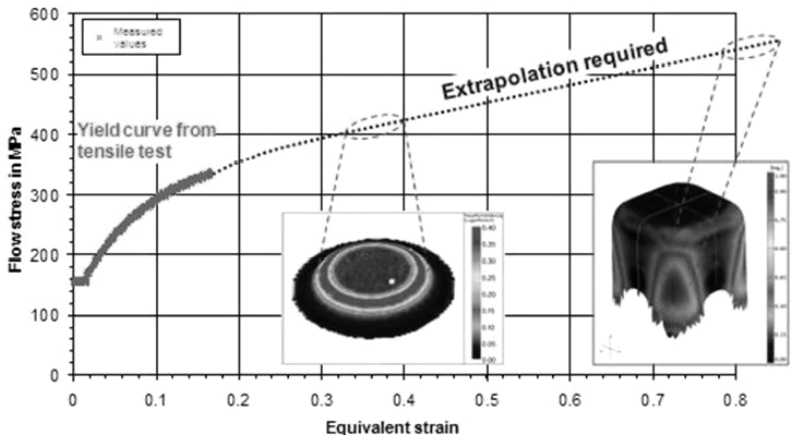
۱۰. تعیین خواص مکانیکی ورق شکل‌دهی عمیق

علاوه بر تعیین منحنی حد شکل‌دهی، سیستم‌های داده‌برداری سه‌بعدی قادر به استفاده در اندازه‌گیری‌های مورد نیاز کشش عمیق جهت تعیین محدودهٔ گسترش‌یافتهٔ منحنی جریان و ناهمسانگردی نرمال می‌باشند. برتری ویژهٔ این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها وضوح تصویر موضعی بالا و قابلیت اندازه‌گیری کرنش‌های کوچک است، از اینرو محدودهٔ گلویی‌شدن با تفکیک‌پذیری قابل ملاحظه‌ای قابل بررسی است. منحنی تنش - کرنش رفتار کارسختی ماده را در حین تغییر شکل شرح می‌دهد و در اختیار داشتن آن جهت شبیه‌سازی‌های المان محدود ضروری می‌باشد. روش معمول تعیین منحنی تنش - کرنش استفاده از تست کشش است؛ این در حالی است که با استفاده از این روش تنها رفتار ماده در تغییر شکل‌های کوچک قبل از شکست قابل دستیابی است. در عین‌حال به‌دلیل وجود تنش‌های چندمحوره در فرایندهای شکل‌دهی ورق، تغییر شکل‌های بزرگتر از تغییر شکل‌های حاصل از آزمایش کشش قابل دستیابی است. در اینجا با استفاده از روش‌های کششی - انبساطی هیدرولیکی مانند تست بالج به‌همراه سیستم‌های اندازه‌گیری سه‌بعدی کرنش همچون سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی می‌توان به تغییر شکل‌های بزرگ تا ۶ برابر تغییر شکل به‌دست آمده از تست کشش دست پیدا کرد که این خود باعث بی‌نیازی به عمل برون‌یابی در تخمین منحنی تنش تسلیم در تغییر شکل‌های بزرگ می‌گردد. در شکل ۹ محدودهٔ نمودار تنش - کرنش قابل اندازه‌گیری توسط آزمایش کشش و همچنین توسط روش‌های جدید اندازه‌گیری اپتیکی جهت مقایسه نمایش داده شده است [۶].

۱۱. بررسی و بهینه‌سازی شبیه‌سازی‌های عددی

از دیگر موارد کاربرد سیستم‌های دیجیتایزینگ اپتیکی استفاده از نتایج حاصل از کرنش، کاهش ضخامت و جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط دیجیتایزینگ اپتیکی، جهت بهینه‌سازی و اصلاح داده‌ها و متغیرهای مورد استفاده در شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی ورق می‌باشد. در این مورد، ابتدا قالب و ورق مورد نظر توسط سیستم دیجیتایزینگ اپتیکی اسکن می‌شود و شکل سه‌بعدی ابزار و ورق به‌دست می‌آید و عمل شکل‌دهی ورق انجام می‌گیرد. پس از آن ورق شکل گرفته دوباره اسکن می‌شود و با استفاده از روش‌های مذکور در بخش‌های قبل همچون اندازه‌گیری تغییر شکل نقاط حک‌شده در حین شکل‌دهی ورق، کرنش اصلی و فرعی، کاهش ضخامت و شکل نهایی قطعه به‌دست می‌آید. در عین‌حال با واردنمودن شکل سه‌بعدی دیجیتایزشدهٔ قالب و قطعه در نرم‌افزار های شبیه‌سازی شکل‌دهی همچون آباکوس[۳] و ال. اس. داینا[۴] و جز این‌ها فرایند شکل‌دهی با فرضیات از پیش تعیین شده شبیه‌سازی می‌گردد. با استفاده از نرم‌افزارهای مخصوص سیستم‌های دیجیتایزینگ

اپتیکی می‌توان با واردنمودن نتایج شبیه‌سازی، همراستایی و مقایسهٔ آن با نتایج داده‌برداری اپتیکی، اختلاف‌ها را به‌طور عینی مشاهده کرد. با بررسی اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج حاصل از دیجیتایزینگ می‌توان به اصلاح پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی همچون تعیین بهتر ضریب اصطکاک، اصلاح منحنی جریان (تسلیم) در تغییر شکل‌های بزرگ و کنترل بازگشت فنری با بهینه‌سازی مدول یانگ پرداخت. بدین‌وسیله می‌توان با اصلاح پارامترهای مورد نیاز در شبیه‌سازی، به نتایج دقیق‌تری در زمینهٔ شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی ورق دست یافت.



شکل ۹. مقایسهٔ محدودهٔ تنش سیلان اندازه‌گیری شده توسط آزمایش کشش (چپ) و اندازه‌گیری شده توسط روش‌های جدید اندازه‌گیری اپتیکی (راست)

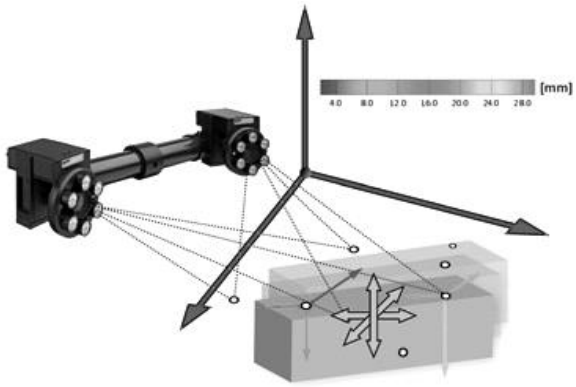
۱۲. اندازه‌گیری سه‌بعدی دینامیکی

یکی دیگر از کاربردهای سیستم‌های دیجتایزینگ دنبال‌کردن نقاط منفرد در یک مختصات سه‌بعدی در طی زمان است. این سیستم‌ها با اندازه‌گیری مختصات فضایی قادر به محاسبهٔ جابه‌جایی‌های نقاط مشخص منفرد در فضا می‌باشند. نتایج حاصل از داده‌برداری‌های این سیستم شامل مختصات سه‌بعدی نقاط، جابه‌جایی سه‌بعدی، تغییر شکل‌ها، سرعت و شتاب می‌باشد. دوربین‌ها در این سیستم‌ها قادر به عکاسی با سرعت ۵۰۰ هرتز می‌باشند و بسته به مساحت اندازه‌گیری، دقت تا یک‌هزارم میلی‌متر قابل دستیابی است. جهت استفاده از این سامانه، برچسب‌های نشانگر بازتاباننده بایستی به سطح جسم مورد نظر به‌صورت دستی در ناحیهٔ مورد نظر چسبانده شود؛ سپس این سیستم با بازتاباندن نور روی این نشانگرها موقعیت آنها را در طی آزمایش دنبال می‌کند. این سیستم‌ها قادرند هر تعداد نشانگر (برچسب) را به‌صورت همزمان با دقت و سرعت بالا دنبال کنند. یکی نمونه از کاربردهای این سیستم‌ها در زمینهٔ شکل‌دهی ورق، تحلیل دینامیکی ماشین‌های شکل‌دهی می‌باشد. شکل‌دهی فلزات به‌دلیل مراحل فرم‌دهی گوناگون و قالب‌های مرحله‌ای، یکی از فرایندهای پیچیدهٔ تولید می‌باشد. با توجه به نیروهای عظیم شکل‌دهی در این‌گونه ماشین‌ها ممکن است قطعات دستگاه در حین کار دچار جابه‌جایی، انحراف، ارتعاش و در نتیجه سایش‌های ناخواسته شوند که این موضوع بر کیفیت قطعات نهایی و هزینهٔ ساخت هر قطعه اثرگذار است. جهت بررسی این‌گونه مسائل و بهبود فرایند تولید توسط دستگاه پرس می‌توان با استفاده از این سیستم و قراردادن برچسب و ثبت حرکت برچسب‌ها در حین عملکرد پرس، صلبیت دستگاه و همچنین جابه‌جایی‌ها در بستر ماشین، تیرهای عرضی، میل‌های راهنما، همچنین چارچوب دستگاه در حین شکل‌دهی ورق را مورد اندازه‌گیری و تحلیل قرار داد. هدف نهایی از این آنالیزها را می‌توان بررسی خمش و بازگشت ضربه کوبه، سنبه، ماتریس و همچنین سرعت و ارتعاشات ورق‌گیر، سنبه و ماتریس، در حین کار بیان نمود. در شکل ۱۰ نمایی از سیستم اپتیکی داده‌برداری دینامیکی و نحوهٔ عملکرد آن نمایش داده شده است [۸].

۱۳. جمع‌بندی

امروزه سیستم‌های اندازه‌گیری اپتیکی جهت دیجیتایزینگ (سه‌بعدی‌سازی)، تحلیل تغییر شکل، حرکت و همچنین تعیین خواص مواد به‌عنوان قسمتی از زنجیرهٔ فرایند تولید پیشرفته در

توسعهٔ محصولات و فرایندهای شکل‌دهی ورق و ابزار شناخته می‌شوند. امروزه کاهش زمان و هزینه‌های تولید و افزایش رقابت‌پذیری، شرکت‌ها و سازمان‌های تولیدی را ناگزیر از افزایش کارایی تولید، سیستم‌های بازرسی و بهبود فرایندها کرده است. از سه دهه پیش تاکنون، سیستم‌های دیجیتایزینگ سه‌بعدی و سیستم‌های اندازه‌گیری تغییر شکل، جهت برآوردن تقاضاهای صنعتی توسعه داده شده‌اند و در حال حاضر، بیش از ۳۰۰۰ مورد از این سیستم‌ها در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیش‌بینی می‌شود در آینده، فناوری‌های اندازه‌گیری اپتیکی جهت مواردی چون بازرسی‌های خودکار طی فرایند تولید در کنار سامانه‌های پردازش اطلاعات قدرتمند به‌طور فزآینده‌ای استفاده شوند.



شکل ۱۰. نمایی از سیستم اپتیکی داده‌برداری دینامیکی و نحوهٔ عملکرد آن

۱۴. مآخذ

[1] Drvar, N., M. Gomercic, M. Horvat. “Application of the Optical 3D Measurement Methods in Sheet Metal Processing.” *8th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies*, Ljubljana, Slovenia, October 2-5, 2011.

[2] Diehr, F. “Mobile Scanning without Limits – New Perspectives with Optical 3D Metrology.” *VDWF im Dialog* (The Magazine of the German Association of Tool and Mold Makers) 2, 2011, pp. 19–21.

[3] Galanulis, K., C. Reich, J. Thesing, D. Winter. “Optical Digitizing by ATOS for Press Parts and Tools.” Internal Publication, GOM, Braunschweig, 2005.

[4] Weckenmann, A., J. Weickmann. “Optical inspection of formed sheet metal parts applying fingers projection systems and virtual fixation.” *Metrology and Measurement Systems* 4, 2006, pp. 321-334.

[5] Galanulis, K. “Optical Measuring Technologies in Sheet Metal Processing.” *Advanced Material Research*, 6-8, 2005, pp. 19–34.

[6] Tyson, J. “Advanced Material Properties Measurements with Optical Metrology.” (No. 2011-01-0997). *SAE Technical Paper*, 2011.

[7] Schneider, M., H. Friebe, K. Galanulis. “Validation and optimization of numerical simulations by optical measurements of tools and parts.” *IDDRG 2008 International Conference*, Olofström, Sweden, June 16-18, 2008.

[8] Adolf, S., J. Thesing, H. Friebe. “Optical 3D Measuring Techniques in Cold Massive Forming Processes”, O. Erne, GOM, Braunschweig, 2011.

پی‌نوشت

1. CMM
2. CAD
3. Abaqus
4. LS-Dyna