ISME

مباني تئوري شكل‌دهي الكترومغناطيسي و تحليل عددي- تجربي فرآيند انقباض استوانه

محمدصديقي[۱]
استاديار

محمد علي لياقت[۲]
دانشجوي كارشناسي ارشد

مهرداد خاندائي[۳]
دانشجوي دكتري

در اين مقاله مباني تئوري فرآيند شكل‌دهـــي الكترومغناطيسي شرح داده شده است. سپس فرآيند انقباض آزاد استوانه آلومينيومي به عنوان يك مثال خاص به روش اجزاء محدود با کوپلينگ همزمان ميدان‌هاي الکتريکي، مغناطيسي و تغيير مكان به صورت سه بعـــدي شبيه‌سازي شده است. نتايج حاصل از آن نيز با نتايج تجربي موجود در مراجع ديگر مورد مقايسه قرار گرفته است. مزيت اين روش شبيه‌سازي نسبت به روش‌هاي استفاده شده توسط ديگر محققان در ماهيت سه بعدي مدل و مدل‌سازي سيم‌پيچ به صورت حلقه‌هاي موازي مي‌باشد، كه باعث تطابق نسبي قابل قبول نتايج تحليل عددي در مقايسه با نتايج تجربي گرديده است. همچنين، براي بررسي اثر وابستگي رفتار ماده به نرخ كرنش در تغييرفرم قطعه‌كار، يک شبيه‌سازي با استفاده از منحني تنش- كرنش در نرخ كرنش بالا انجام شده و نتايج آن با نتايج حاصل از شبيه‌سازي با منحني تنش- كرنش شبه‌استاتيكي مقايسه شده است.

واژه‌هاي راهنما: شكل‌دهي الكترومغناطيسي، روش اجزاء محدود، انقباض استوانه

۱- مقدمه

شكل‌دهي ورقهاي فلزي به دليل كاربرد وسيع در صنايع مختلف، يكي از مهمترين فرآيندهاي ساخت محسوب مي‌گردد. اين در حاليـــست كه انجام اين دسته فرآيندها، همواره با مشـــكلاتي از قبيـــل بازگشت فنري زياد، چين‌خوردگي، قابليت شكل‌پذيري پائين ورق كه منجر به پارگي آن مي‌شود و بعضـــاً زمان طولاني فرم‌دهـــي روبروست. نتايج شبيه‌سازيها و آزمايشـــات تجربي نشـــان مي‌دهد كه در فرآيندهاي شكل‌دهي با نرخ كرنش بالا (فرآيند هاي شكل‌دهي سريع)، مشكلات مذكور تا حدود زيادي مرتفع مي‌شوند. دليل اصلي اين مسأله، تأثير قابل ملاحظه نرخ كرنش، در خواص مواد است. هنگاميكه تغييرفرم با نرخ كرنش بسيار بالا صورت مي‌گيرد، قابليت شكل‌پذيري فلز تا حد قابل ملاحظه‌اي افزايش يافته، بازگشت

---

[۱] نويسنده مسئول، استاديار، دانشگاه علم وصنعت ايران، دانشكده مهندسي مكانيك sedighi@iust.ac.ir
[۲] دانشجوي كارشناسي ارشد، دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مهندسي مكانيک
[۳] دانشجوي دكتري، دانشگاه علم و صنعت ايران، دانشكده مهندسي مكانيک

الاستيک آن کمتر شده و احتمال وقوع چين‌خوردگي نيز در آن كاهش مي‌يابد. يكي ازفرآيندهاي شكل‌دهي ورق با نرخ کرنش بالا که براي فلزاتي با قابليت هدايت الكتريكي بالا مانند آلياژهاي آلومينيوم بسيار مناسب است، فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي مي‌باشد. فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي يكي از تكنيك‌هاي شكل‌دهي سريع است، که اخيراً در بازار تجاري فرم‌دهي ورقهاي فلزي تخت و قطعات استوانه‌اي شكل پذيرش بسياري داشته است. شكل‌دهي الكترومغناطيسي به وسيله يك پالس مغناطيسي قوي صورت مي گيرد و در واقع استفاده از نيروي الكترومغناطيسي براي شكل دادن فلزات مي‌باشد. بدين صورت كه در ابتدا با برقراري مدار الكتريكي جريان از مولد جاري شده و بانك خازن با ولتاژ مناسبي شارژ مي‌شود. سپس اين بانک خازن وارد مداري شامل یک سيم‌پيچ که متناسب با شكل بيلت اوليه و تغييرفرم مورد نظر طراحي شده و در مجاورت آن قرار گرفته است مي‌شود. با تخليه خازن جريان بزرگي توليد مي‌شود، كه از درون يك سيم‌پيچ كه در نزديكي قطعه‌كار قرار دارد، عبور مي‌كند. و باعث توليد ميدان مغناطيسي در اطراف كويل و فاصله هوايي بين كويل و قطعه‌كار مي‌شود. اين ميدان مغناطيسي يك جريان گردابي مخالف با جريان اوليه در قطعه‌كار هادي القاء مي‌كند. تأثير متقابل جريانهای گردابي با ميدان مغناطيسي خارجی باعث ايجاد نيروي دافعه بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار (نيروي الكترومغناطيسي لورنتس) مي شود (شكل۱). اين نيرو باعث حركت و تغيير شكل (ابتدا الاستيك و سپس پلاستيك) قطعه‌كار مي‌شود. دراين فرآيند از قالب نيز براي شكل‌دهي قطعات مي‌توان استفاده كرد. برخورد سريع قطعه‌كار به قالب در اثر اعمال نيروي زياد به آن باعث تغيير شكل پلاستيك قطعه‌كار شده و قطعه شكل قالب را به خود مي‌گيرد.

توليد شكلهاي پيچيده به وسيله اين فرآيند يكي از مهمترين مزاياي اين روش شكل‌دهي مي باشد. از ديگر مزاياي آن مي توان به افزايش قابليـــت فرم پذيري قطعات، شكل‌دهي سريع، عدم برخورد مكانيكي ابزار فرم‌دهي و قطعه‌كار، عدم برگشت فنـــري، كيفيت سطح عالي، حذف تجهيزات عظيم پرسهاي هيدروليكي و مكانيكي، قابليت كنترل و تكرار پذيري آن مانند ساير فرآيندهاي شكل‌دهي سريع، امكان اتصال قطعات از مواد غيرمشابه و... اشاره كرد[۱ و۲]. اگر فرآيند بدون قالب صورت گيرد، قطعه‌كار به صـورت آزاد شكــل مي‌گيرد و شكل نهايي آن وابسته به پارامترهاي بسياري در فرآيند مي‌باشد (شكل۲). تجهيزات جانبي ديگر، علاوه بر آنچه كه در شكل ۱ نشان داده شده است، بايد متناسب با مشخصات قطعه و شكل نهايي مورد نظر با در نظر گرفتن تمهيدات لازم تهيه و در مدار جايگذاري شوند.

در سالهاي اخير تلاشهايي براي شبيه‌سازي اين فرآيند صورت گرفته است كه در اينجا به برخي از مهمترين آنها اشاره مي‌شود. گوردين (Gourdin)[۳] در سال۱۹۸۹ انبساط الكترومغناطيسي يك حلقه را توسط روابط الكترودیناميكي مدلسازي نمود. وي از ساده سازيهايي براي حل معادلات به روش عددي استفاده كرد. برادران لي (Lee) [۴] درسال ۱۹۹۴ يك مدل دو بعدي اجزاء محدود كه از اولين مدلهاي اجزاء محدود شكل‌دهي الكترومغناطيسي بود، براي تعيين توزيع فشار الكترومغناطيسي بر روي قطعات استوانه‌اي شكل ارائه دادند. موراكشي (Murakoshi) [۵]در سال ۱۹۹۸ از یک روش استاتيكي براي انقباض موضعي یک استوانه استفاده كرد. در اين شبيه‌سازي فشار مغناطيسي به صورت مقداري ثابت در نظر گرفته

شد. چانفنگ (Chunfeng) [۶] در سال ۲۰۰۲، با روش اجزاء محدود توزیع فشار مغناطیسي را روي قطعه-كار، در یک فرآیند انبساط استوانه به دست آورد. این تحلیل به صورت دو بعدي انجام شد و فرم اولیه ورق نیز در محاسبات ثابت فرض گردید. در سال۲۰۰۴ سانگ (Song) و همکارانش [۷] مطالعه‌اي برروي شكل-دهي الكترومغناطیسي استوانه به وسیلة نیروي حاصل از پالس مغناطیسي انجام دادند. در این تحقیق انبساط قطعات استوانه‌اي شکل در ابعاد متفاوت با دو نوع سیم‌پیچ به صورت تجربي بررسي گردید. ماماليس (Mamalis)[۸] در سال ۲۰۰۵، مسأله انقباض آزاد استوانه را با روش اجزاء محدود شبیه‌سازي كرد. اما در این مدلسازي، نتایج دقیق و قابل قبولي براي تغییرفرم قطعه‌کار به دست نیامد. در اکثر تحقیقات انجام شده شبیه‌سازي‌ها به صورت دو بعدي صورت گرفته اند.

در این مقاله مباني تئوري فرآیند شکل‌دهي الكترومغناطیسي مطرح گردیده و فرآیند انقباض آزاد استوانه آلومینیومي به عنوان مثالي از فرآیند شکل‌دهي الكترومغناطیسي به صورت سه بعدي توسط نرم افزار اجزاء محدود با کوپلینگ همزمان میدانهاي الكتریکي، مغناطیسي و تغییر فرم شبیه‌سازي گردیده و نتایج آن با نتایج تجربي مقایسه شده است.

۲- توصیف تئوري الكترومغناطیسي فرآیند

در تئوري الكترومغناطیس از معادلات ماکسول به عنوان معادلات میدان (field equation) استفاده مي‌شود [۹] و دو دسته مشخصات مواد كه دسته اول مربوط به خواص رفتار مغناطیسي ماده و دسته دوم مربوط به رفتار الكتریکي ماده مي‌باشد، به عنوان روابط ساختاري یا متشكله (constitutive equation) درمحاسبات وارد مي‌شود. معادلات ماکسول عبارتند از:

$$\nabla\times\mathbf{E}=-\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \qquad (۱)$$

$$\nabla\times\mathbf{H}=\mathbf{J}+\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \qquad (۲)$$

$$\nabla.\mathbf{D}=\rho \qquad (۳)$$

$$\nabla.\,\mathbf{B}=0 \qquad (۴)$$

در روابط فوق، $\mathbf{H}$ بردار شدت میدان مغناطیسي، $\mathbf{J}$ بردار کلي چگالي جریان، $\mathbf{D}$ بردار چگالي شار الكتریکي، $\mathbf{E}$ بردار شدت میدان الكتریکي، $\mathbf{B}$ بردار چگالي شار مغناطیسي، ρ چگالي الكتریکي و t زمان است. معادلة (۱) صورت دیفرانسیلي قانون القاي الكترومغناطیسي فاراده است. معادلة (۲) تعمیم قانون آمپر مي-باشد. معادلة (۳) تعمیم قانون گأوس است، كه خود از قانون كولن نتیجه مي‌شود. معادلة (۴) نمایندة این واقعیت است كه هرگز تک قطبي مغناطیسي وجود ندارد. براي آنكه بتوان معادلات ماکسول را به كار برد، باید معادلات ساختاري مناسب را نیز دانست (معادلاتي كه مربوط به خواص و رفتار نوع خاص ماده مي-شوند). این معـادلات بدین صورت‌اند: $\mathbf{H}=\mathbf{H}(\mathbf{B}),\mathbf{D}=\mathbf{D}(\mathbf{E})$ و همچنین $\mathbf{J}=\mathbf{J}(\mathbf{E})$ كه باید به طور تجربي یا نظري معلوم باشند.

خواص مغناطيسي ماده را معمولاً در قالب منحني $\mathbf{B}$ در برابر $\mathbf{H}$ و خواص الكتريكي به صورت ماتريس ضرايب رسانايي الكتريكي (يا مقاومت الكتريكي) تعريف مي‌شود. در حالت انقباض آزاد استوانه، جريانهاي توليد شده به وسيله نيروي محركه القائي ميدان مغناطيسي توليد مي‌كنند، جهت اين ميدانها مخالف بوده و تمايل به دفع يكديگر خواهند داشت. در نظريه الكترومغناطيس مجموع نيروهاي الكتريكي و مغناطيسي وارد بر يك بار الكتريكي اصطلاحاً نيروي لورنتس ناميده مي‌شود كه با رابطه (۵) بيان مي‌گردد.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \qquad (۵)$$

در اينجا $\mathbf{F}$ نيروي الكترومغناطيسي لورنتس، $\mathbf{V}$ بردار سرعت و q بار الكتريكي است. در مسائلي كه به تحليل رفتار رساناهاي الكتريكي در برابر ميدانهاي مغناطيسي خارجي مي‌پردازند و جريانهاي الكتريكي در آنها به وجود مي‌آيند، از شكل تعميم يافته تعريف نيروي لورنتس كه با معادله (۶) بيان مي‌گردد، استفاده مي‌شود.

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \qquad (۶)$$

در فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي نيروهاي لورنتس در نتيجه اثر متقابل جريانهاي القاء شده در قطعه‌كار و ميدان مغناطيسي خارجي بوجود مي‌آيند. همين نيروها عامل اصلي تغييرفرم قطعه‌كار مي‌باشند. با توجه به ماهيت برداري معادله (۶)، به سادگي مي‌توان توسط قانون دست راست، جهت اعمال اين نيروها را تعيين نمود. در فرآيند انقباض الكترومغناطيسي استوانه جهت اين نيرو با توجه به جهت ميدان مغناطيسي و جهت جريان القاء شده در قطعه به كمك قانون دست راست مطابق شكل ۳ فشاري بوده كه باعث انقباض استوانه مي شود.

۳- تحليل مداري

مدل مداري شماتیک فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي در شكل ٤ نشان داده شده است. همانطور كه ملاحظه مي‌گردد، در اين شكل مقاومت اهمي و خاصيت خودالقائي قطعه‌كار و مدار دستگاه به صورت مقاومت و سيم‌پيچ متمركز نشان داده شده است.

با توجه به قانون ولتاژ كريشهف دو معادله (۷) و (۸) از تحليل مداري مدارهاي شماتيك شكل ٤ به دست مي‌آيند.

$$L_1 \frac{dI_C(t)}{dt} + M \frac{dI_W(t)}{dt} + R_1 I_C(t) + \frac{1}{C}\int I_C(t)dt = 0 \qquad (۷)$$

$$L_2 \frac{dI_W(t)}{dt} + M \frac{dI_C(t)}{dt} + R_2 I_W(t) = 0 \qquad (۸)$$

در اين روابط M ضريب القاء متقابل، R مقاومت اهمي، C ظرفيت خازن، L ضريب خودالقائي، I_C جريان سيم‌پيچ و I_W جريان گردابي قطعه‌كار است. M و R_1 تابع شكل هندسي و تغيير فرم قطعه‌كار مي‌باشند. همانطور كه ملاحظه مي‌گردد دو معادله (۷) و (۸) به يكديگر وابسته هستند، زيرا دو تابع مجهول I_C و I_W

در هر دو معادله ظاهر شده‌اند. تحليل عددي اين دستگاه معادلات نشان مي‌دهد كه هر دو جريان I_C و I_W تغييرات نوساني ميرا شونده با زمان دارند.

۴- تغيير فرم قطعه‌كار در فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي

در فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي، تغيير فرم قطعه‌كار با سرعت بسيار بالا انجام مي‌گيرد. همين عامل سبب تحريك اثرات اينرسي در قطعه‌كار شده و موجب انتشار موج تنش پلاستيك در قطعه‌كار مي‌گردد. انتشار موج قدرتمند پلاستيك رفتار مكانيكي فلز را تحت تأثير خود قرار مي‌دهد[۱۰]. يكي از مهمترين اثرات رفتاري كه در اين شرايط در قطعه‌كار ايجاد مي‌شود عبارتست از افزايش كرنش شكست ماده. اين امر خود سبب افزايش قابليت شكل‌پذيري فلز مي‌شود. افزايش قابليت شكل‌پذيري فلز، يكي از مهمترين ويژگيهاي فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي است.

۵- شبيه‌سازي اجزاء محدود فرآيند انقباض آزاد الكترومغناطيسي استوانه

در اينجا شبيه‌سازي سه بعدي انقباض آزاد استوانه به عنوان يك مثال خاص از فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي به كمك نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS انجام مي گردد. اين نرم‌افزار از معادلات ماكسول به عنوان مبناي آناليزهاي ميدان الكترومغناطيسي استفاده مي‌كند. مجهولات اوليه (درجات آزادي) كه از روشهاي حل اجزاء محدود محاسبه مي‌شوند، پتانسيل‌هاي مغناطيسي و الكتريكي هستند. ديگر كميتهاي ميدان مغناطيسي مانند چگالي شار ميدان مغناطيسي، چگالي جريان، انرژي، نيروها، تلفات انرژي و ... از اين درجات آزادي به دست مي‌آيند. با استفاده از اين نرم‌افزار شبيه‌سازي ميدانهاي الكتريكي، مغناطيسي و تغيير مكان به صورت كوپله انجام شده است. در اين شبيه‌سـازي از برخي از فرضيات به كار رفته در مراجع [۸ و۱۱] استفاده مي‌شود. همچنين از نتايج تجربي موجود در مرجع [۱۱] براي ارزيابي نتايج شبيه‌سازي استفاده شده است.

سيم‌پيچ كه در اينجا به صورت حلقه‌هاي موازي با طول واقعي مدل‌سازي شده است، از جنس مس بوده و داراي۱۰ حلقه مي‌باشد. قطعه‌كار از جنس آلومينيوم T6-۶۰۶۳ ساخته شده است. جريان مدار از اندازه گيري تجربي به دست آمده و نمودار آن مطابق شكل ۵ است. بارگذاري جريان الكتريكي روي سطح مقطع حلقه‌هاي سيم‌پيچ مشابه روش استفاده شده در مرجع [۸] مي‌باشد.

با فرض اينكه فركانس جريان كمتر از ۳۰ kHz باشد، تلفات حاصل از گسيل امواج الكترومغناطيس قابل صرفنظر بوده و از تحليل فركانس پائين نرم‌افزار استفاده شده است. به دليل تقارنهاي موجود در مسأله، يک هشتم از مدل واقعي مسأله شبيه‌ســازي شده است. در اطراف سيم‌پيچ و قطــعه‌كار، يک حجم كروي از هوا را در نظر مي‌گيريم. از مقاومت هوا در تغيير فرم قطعه و همچنين نرخ كرنش سختي قطعه صرف نظر مي‌شود.

به طوركلي امواج الكترومغناطيسي پس از ورود به يك محيط رسانا ميرا مي‌شوند، به اين ترتيب كه دامنه موج با ضريب $e^{-\sqrt{\pi f\mu\sigma}\,x}$ كاهش مي‌يابد. در اين رابطه σ رسانندگي الكتريكي ويژه، μ ضريب نفوذپذيري مغناطيسي، x فاصله و f فركانس مي‌باشد. بديهي است كه به ازاء $x=1/\sqrt{\pi f\mu\sigma}$ دامنه موج به ۳۶% مقدار اوليه خود مي‌رسد. طبق قرارداد، اين فاصله را عمق پوستي مي‌نامند. بنابراين عمق پوستي رسانا با رابطه (۹) تعريف مي‌گردد.

$$\delta=\sqrt{\frac{1}{\pi\, f\mu\sigma}} \tag{۹}$$

عمق نفوذ ميدان مغناطيسي در سطح خارجي قطعه‌كار(عمق پوستي) و همچنين اثر پوستي جريان الكتريكي در سطح داخلي سيم‌پيچ، با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شده است.

با توجه به نمودار شكل ۵ بسامد زاويه‌اي جريان برابـر Rad/Sec ۵۰٦۷۰/۸۵ مـي‌باشـد[۱۱]. در جـداول ۱و۲ مشخصات هندسي قطعه‌كار و سيم‌پيچ ارائه شده است.

شكل ۷ نماي كلي مدل اجزاء محدود شبيه‌سازي فرآيند انقباض آزاد استوانه را نشان مي دهد. در اين شبيه‌سازي از المان Solid 97 براي شبكه‌بندي سيم‌پيچ، هواي اطراف آن و فاصله هوايي سيم‌پيچ و قطعه-كار استفاده شده است كه نوعي المان سه بعدي مغناطيسي با ٤ يا ۸ گره بوده و شامل درجات آزادي پتانسيل برداري مغناطيسي، ولتاژ و غيره مي باشد. همچنين از المان Solid 62 كه نوعي المان سه بعدي مغناطيسي- سازه‌اي با ۸ گره بوده و شامل كليه درجات آزادي پتانسيل برداري مغناطيسي، ولتاژ و جابجايي مي‌باشد و مناسب براي مدل‌سازي ميدانهاي الكترومغناطيسي و تغيير مكان است، براي شبكه‌بندي قطعه‌كار استفاده شده است. از المان Inf111 نيز كه نوعي المان سه بعدي ۸ يا ۲۰ گره‌اي است و درجات آزادي مغناطيسي و الكتريكي را داراست، براي شبكه‌بندي هواي بينهايت استفاده شده است. شرايط مرزي متناسب براي اين فرآيند كه شامل پتانسيل برداري مغناطيسي (A)، جابجايي (U) و ولتاژ مي‌باشد، در جهات مناسب با توجه به هندسه مدل و تقارن موجود بر روي سطوح براي كل مدل اعمال گرديده است.

حل مسئله در بازه هاي زماني μs (load step) ۱ و با در نظر گرفتن ۴ تقسيم بندي زماني(sub step) انجام شده است.

به طور كلي جريان الكتريكي عبوري از يك رساناي سه بعدي در مسيري است كه كمترين مقاومت الكتريكي را دارا باشد، لذا در يك سيم‌پيچ استوانه‌اي جريان الكتريكي در نواحي شعاع داخلي متمركز خواهد شد. بنابراين در شبيه‌سازي سه بعدي سيم‌پيچ استوانه‌اي برش خورده، توزيع جريان به طور يكنواخت روي مقطع حلقه‌هاي سيم‌پيچ صحيح نمي‌باشد. يك روش منطقي جهت بارگذاري جريان الكتريكي، اعمال جريان در لايه‌اي با ضخامت محدود در مجاورت شعاع داخلي مي‌باشد. در اين تحليل براي تعيين مقدار صحيح اين ضخامت از روش سعي و خطا، به نحوي عمل شده كه دامنه ميدان مغناطيسي (B) در فاصله هوايي بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار با روابط تحليلي (۱۰) و (۱۱) [۱۱] منطبق گردد.

$$B_1(t)=\mu_0\left[\frac{\lambda N}{(D_{2c}-D_{1c})}\right]\ln\left[\frac{(0.5D_{2c})+\sqrt{(0.5D_{2c})^2+\left(l_c/2\right)^2}}{0.5D_{1c}+\sqrt{(0.5D_{1c})^2+\left(l_c/2\right)^2}}\right] \quad (۱۰)$$

$$B_x(t)=B_1(t)\left[\frac{(0.5D_{1c})^2}{[(0.5D_{1c})^2-(0.5D_{2w})^2]+2\delta_w[(0.5D_{2w}-\delta_w)-(0.5D_{1w}-\delta_w)e^{(D_{1w}-D_{2w})/2\delta_w}]+(0.5D_{1w})^2e^{(D_{1w}-D_{2w})/2\delta_w}}\right] \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۰) λ ضريب پر كنندگي مربوط به هندسه سيم‌پيچ برابر ۰/۴۴ مي‌باشد. D_{1C} قطر داخلي سيم‌پيچ، D_{2C} قطر خارجي سيم‌پيچ، D_{1W} قطر داخلي قطعه‌كار، D_{2W} قطر خارجي قطعه‌كار و l_C طول سيم-پيچ است.

نتايج بررسي‌ها درتحليل الكترومغناطيسي اجزاء محدود فرآيند با صرف نظر از تغيير فرم قطعه‌كار، نشان مي‌دهد كه مقدار اين ضخامت بايد عددي بسيار كوچك از مرتبه دهم ميليمتر انتخاب گردد. از آنجا كه انتخاب چنين ضخامت كوچكي شبكه بندي اجزاء محدود مسئله را با مشكل روبرو مي‌كند، لذا در اينجا مقدار عددي اين ضخامت برابر يك عدد منطقي كه در واقع عدد حاصل از رابطه (۹)، (عمق پوستي(δ)) براي سيم‌پيچ مي‌باشد، در نظر گرفته شده و سپس با وارد نمودن يك ضريب اصلاحي بر جريان الكتريكي اعمالي روي سيم‌پيچ، ميدان مغناطيسي (B) در فاصله هوايي بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار با رابطه تحليلي (۱۱) منطبق شده است. بنابراين معيار تعيين مقدار ضريب اصلاحي مذكور هم‌خواني ميدان مغناطيسي حاصل از تحليل اجزاء محدود در فضاي بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار با رابطه (۱۱) مي‌باشد. مقدار عددي اين ضريب با توجه به مقادير عددي جريان الكتريكي در مرجع [۱۱] از روش مذكور برابر ۰/۲۷۵ به دست آمده است.

شكل ۸ جهت ميدان مغناطيسي سيم‌پيچ حاصل از جريان الكتريكي را نشان مي‌دهد. بر اين اساس نمودار حاصل از رابطه (۱۱) مطابق شكل ۹ (ب) بوده و ميدان مغناطيسي (B) حاصل از تحليل اجزاء محدود درفاصله هوايي بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار مطابق شكل ۹ (الف) مي‌باشد. ماكزيمم مقدار ميدان مغناطيسي (B) از رابطه (۱۱) با توجه به شكل ۹ (ب) برابر ۱۴/۷- بوده كه با توجه به ضريب اصلاحي استفاده شده، اين مقدار مطابق شكل ۹ (الف) برابر ١٤/٩- از تحليل اجزاء محدود حاصل شده است. محاسبات، خطايي درحدود ۱% بين مقدار واقعي و مقدار عددي حاصل از تحليل اجزاء محدود نشان مي‌دهد كه حاكي از دقت و صحت روش مدل‌سازي و مقدار عددي ضريب اعمالي مي‌باشد.

با اعمال ضريب اصلاحي مذكور در بارگذاري جريان الكتريكي روي عمق پوستي سيم‌پيچ در تحليل الكترومغناطيسي- مكانيكي اجزاء محدود فرآيند، تغييرات شعاع خارجي نقاط مختلف قطعه‌كار مطابق شكل ۱۰ به دست آمده است. شكل تغيير فرم يافته قطعه‌كار نسبت به حالت اوليه در تحليل اجزاء محدود فرآيند، در شكل ۱۱ كاملاً مشهود است.

در اين شبيه‌سازي به دليل نامشخص بودن منحني تنش-كرنش آلومينيوم AA6463-T6 در نرخ كرنش بالا، امكان وارد كردن اثر وابستگي رفتار ماده به نرخ كرنش وجود نداشت. لذا براي بررسي اثر نرخ كرنش، شبيه-سازي فوق براي آلومينيوم AA5754 كه منحني تنش-كرنش آن در حالت شبه‌استاتيكي و در نرخ كرنش ۲۵۰۰ s^{-1} در شكل ۱۳ ارائه شده است [12] انجام مي‌شود. شبيه‌سازي يک بار با منحني شبه‌استاتيكي و يـک بار با منحني نرخ كرنش بالا انجام مي‌گيرد. شكلهاي ۱۳ و ۱۴ به ترتيب نمودارهايي مشابه بـا شـكل ۱۰ را به ازاء منحني تنش- كرنش شبه‌استاتيكي و منحني تنش- كرنش با نرخ كرنش بالا نشان مي‌دهند.

۶- نتايج و بحث

همانطور كه در شكل ۸ مشاهده مي‌گردد، ميدان مغناطيسي در فاصله بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار توزيع يكنواختي دارد، اما در انتهاي سيم‌پيچ به دليل بروز اثرات موضعي انتهايي، ميدان از حالت يكنواخت خارج مي‌شود. شكل خاص توزيع ميدان مغناطيسي در انتهاي سيم‌پيچ سبب اعمال نيروهاي بيشتري در انتهاي قطعه‌كار مي‌گردد.

شكل ۱۵ نمايي از تغيير فرم قطعه‌كار حاصل از آزمايشات تجربي را نشان مي دهد. مطابق با مرجع [۱۱] بيشترين تغيير فرم قطعه‌كار در فاز ابتدايي جريان الكتريكي اعمالي صورت گرفته است كه شكل ۱۰ نيز نشان دهنده اين موضوع مي‌باشد. نتايج شبيه‌سازي نشان مي‌دهد كه ماكزيمم و مينيمم قطر خارجي قطعه‌كار به ترتيب در مقطع مياني و انتهايي آن ايجاد مي‌شوند. در نتايج تجربي تغيير فرم قطعه‌كار همراه با اعوجاج بوده لذا سطح مقطع آن از حالت دايره كامل خارج شده و بر اساس اندازه‌گيري انجام شده قطر خارجي بين ۱۴/۵ تا ۱۵/۸ ميليمتر مي‌باشد. جدول ۳ نتايج تغيير فرم كلي قطعه‌كار در تحليل سه بعدي اجزاء محدود فرآيند، در مقايسه با آزمايشات تجربي، را نشان مي‌دهد.

در اين شبيه‌سازي از وابستگي رفتار ماده به نرخ كرنش صرف نظر شده است. شكل ۱۰ نشان مي‌دهد كه بيشترين نرخ كرنش در انتهاي قطعه ايجاد مي‌گردد، لذا انتظار مي‌رود كه بيشترين تفاوت بين نتايج شبيه‌سازي و تجربي در انتهاي قطعه‌كار رخ دهد. جدول ۳ نيز همين نتيجه را نشان مي‌دهد. مقايسه شكلهاي ۱۳ و ۱۴ نيز نشان مي‌دهد كه وارد كردن اثر نرخ كرنش در رفتار ماده، سبب سختي بيشتر قطعه-كار و لذا كاهش ميزان تغييرفرم مي‌شود. بنابراين نتيجه‌گيري مي‌شود كه خطاي موجود در انتهاي قطعه‌كار به صرفنظر كردن از اثر نرخ كرنش در رفتار ماده مربوط مي‌شود. همانطور كه از مقايسه نتايج شبيه‌سازي و آزمايشات تجربي مشخص گرديد، نتايج شبيه‌سازي سه بعدي اجزاء محدود تطابق نسبي قابل قبولي با نتايج آزمايشات تجربي نشان مي دهد.

۷- نتيجه گيري

در اين مقـــاله :

۱- مباني تئوري فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي مطرح گرديد.

۲- شبيه‌سازي اجزاء محدود فرآيند الكترومغناطيسي انقباض آزاد استوانه آلومينيومي به صورت سه بعدي تحليل شده، در اين شبيه‌سازي سيم‌پيچ به صورت حلقه‌هاي موازي مدل‌سازي شده است و بارگذاري جريان بر روي سطح داخلي سيم‌پيچ با اعمال يك ضريب اصلاحي صورت گرفته است.
۳- مقايسه نتايج تحليل الكترومغناطيسي اجزاء محدود فرآيند با رابطه تحليلي ميدان مغناطيسي، خطاي ۱% را نشان مي‌دهد كه بيانگر دقت و صحت شبيه‌سازي مي‌باشد.
٤- به دليل صرف نظر از وابستگي رفتار ماده به نرخ كرنش و ايجاد بيشترين نرخ كرنش در انتهاي قطعه، بيشترين خطاي تغيير قطر خارجي در انتهاي قطعه به وجود مي‌آيد. اندازه‌گيري‌ها ميانگين خطايي در حدود ۱۱/۲۵% در تغيير فرم قطر خارجي را نشان مي‌دهد. همانطور كه قبلاً اشاره شد، اين نتيجه‌گيري با مقايسه دو شكل ۱۳ و ۱۴ نيز تأييد مي‌گردد.
۵- نتايج تحليل الكترومغناطيسي- مكانيكي اجزاء محدود فرآيند با خطاي كلي ۵/۹% نسبت به نتايج آزمايشات تجربي، نشانگر تطابق نسبي تغيير فرم كلي قطعه‌كار در مدل‌سازي اجزاء محدود با آزمايشات تجربي مي‌باشد.
۶- در كارهـــاي آتي مي توان انبســـاط آزاد استوانه يا تغيير فرم ورق تخت را در شكل‌دهي الكترومغناطيسي به كمك شبيه‌سازي اجزاء محدود مورد بررسي قرار داد.

مراجع

[1] Daehn, G. S., Vincent. J., Vohnout, J., and Bois, L. D., "Improved Formability with Electromagnetic Forming: Fundamentals and a Practical Example", TMS Sheet Metal Forming Symposium, San Diego, February, pp. 110–118, (1999).

[2] Daehn, G. S., "High Velocity Sheet Metal Forming: State of Art and Prognosis for Advanced Commercialization", Department of Materials Science and Engineering, The Ohio State University, Columbus, Internal Report, pp. 204–238, 2000, Available on the web: www.mse.eng.ohio-state.edu/~Daehn/hyperplasticity /stateofartrept, visited on 17th April, (2008).

[3] Gourdin, W. H., "Analysis and Assessment of Electromagnetic Ring Expansion as a High Rate Test", J. Appl. Phys., Vol. 65, pp. 411–422, (1989).

[4] Lee, S. H., Lee, D. N., "A Finite Element Analysis of Electromagnetic Forming for Tube Expansion", Trans. ASME, Vol. 116, pp. 250–254, April (1994).

[5] Murakoshi, Y., Takahashi, M., Sano, T., Hanada, K., and Negishi, H., "Inside Bead Forming of Aluminum Tube by Electro-Magnetic Forming", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 80-81, pp. 695-699, (1998).

[6] Chunfeng, L., Zhiheng Z., Jianhui, L., Yongzhi, W., and Yuying, Y., "Numerical Simulation of Magnetic Pressure in Tube Electromagnetic Bulging", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 123, pp. 225-228, (2002).

[7] Song, F. M., Zhang X., Wang, Z. R., and Yu, L. Z., "A Study of Tube Electromagnetic Forming", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 151, pp. 372–375, (2004).

[8] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., kladas, A. G., and Koumoutsos, A. K., "Physical Principles of Electromagnetic Forming Process: A Constitutive Finite Element Model", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 161, pp. 294–299, (2005).

[۹] ج.ر. ريتس، ف.ج. ميلفورد، ر.و. كريستي، ترجمة: ج. صميمي، م. آقامير، ن. عليزاده قمصري، «مباني نظرية الكترومغناطيس»، مركز نشر دانشگاهي، تهران، چاپ اول (۱۳۸۴).

[10] Blazynski, T. Z., "*Explosive Welding, Forming and Compaction*", Applied Science Publishers LTD, London, (1983).

[11] Bednarski, T., " Magnetic Reducing of Thin-Walled Tubes" in: Proceedings of the Third Seminar on Metal Forming, Gyor, Hungary, (1985).

[12] Oliviera, D., "Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet: Experiment and Model", MSc. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, (2002).

فهرست نمادهاي انگليسي

H: بردار شدت ميدان مغناطسي

J: بردار كلي چگالي جريان

D: بردار چگالي شار الكتريكي

E: بردار شدت ميدان الكتريكي

B: بردار چگالي شار مغناطيسي(ميدان مغناطيسي)

t: زمان

F: نيروي الكترومغناطيسي لورنتس

V: بردار سرعت

L_o: ضريب خودالقائي مدار دستگاه

L_1: ضريب خودالقائي سيم‌پيچ

L_2: ضريب خودالقائي معادل قطعه كار

L: ضريب خودالقائي معادل كل

M : ضريب القاء متقابل بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار
L_C : طول سيم‌پيچ
E_w: مدول يانگ
q: بار الكتريكي
R_o : مقاومت اهمي معادل اجزاء دستگاه
R_1 : مقاومت اهمي معادل سيم‌پيچ
R_2 : مقاومت اهمي معادل قطعه كار
R : مقاومت اهمي معادل كل
C : ظرفيت بانک خازن
V_C: ولتاژ شارژ بانک خازن
I_C : جريان گذرنده از سيم‌پيچ
I_W: جريان گردابي در قطعه كار
I_{eq}: جريان معادل يكنواخت سيم‌پيچ
N : تعداد حلقه‌هاي سيم‌پيچ
I(t): جريان الكتريكي اعمالي روي سيم‌پيچ
D_{1c}: قطر داخلي سيم‌پيچ
D_{2c}: قطر خارجي سيم‌پيچ
D_{1w}: قطر داخلي قطعه‌كار
D_{2w}: قطرخارجي قطعه‌كار
L_w: طول قطعه‌كار

فهرست نمادهاي يوناني

ρ: چگالي الكتريكي
ω_d: بسامد زاويه‌اي
μ : ضريب نفوذپذيري مغناطيسي
σ_y: تنش تسليم
σ : رسانندگي الكتريكي ويژه
ρ_e : مقاومت الكتريكي ويژه
δ: عمق پوستي
f : فركانس

جدولها

جدول ۱- مشخصات قطعه‌کار

مشخصات قطعه‌کار	
جنس	جنس
قطر داخلي $(\mathrm{D_{1w}})(m)$	قطر داخلي $(\mathrm{D_{1w}})(m)$
ضخامت (m)	ضخامت (m)
طول $(\mathrm{L_w})(m)$	طول $(\mathrm{L_w})(m)$
$\rho_e\,(\Omega\, m)$	$\rho_e\,(\Omega\, m)$
μ_e	μ_e
$\rho_w\,(kg/m^3)$	$\rho_w\,(kg/m^3)$
تنش تسليم $\sigma_y\,(pa)$	تنش تسليم $\sigma_y\,(pa)$
مدول يانگ $\mathrm{E_w}(\mathrm{pa})$	مدول يانگ $\mathrm{E_w}(\mathrm{pa})$

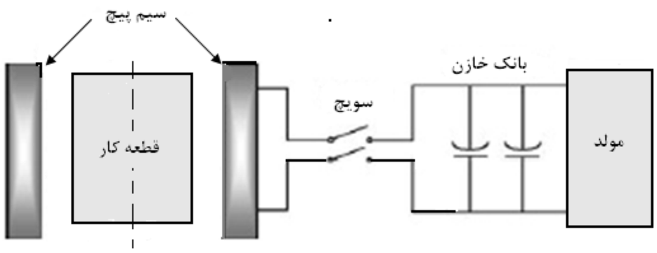
جدول ۲- مشخصات سیم‌پیچ

مشخصات سيم‌پيچ	
جنس	جنس
تعداد حلقه N	تعداد حلقه N
قطر خارجي $(m)(\mathrm{D_{2c}})$	قطر خارجي $(m)(\mathrm{D_{2c}})$
طول $(m)(\mathrm{L_c})$	طول $(m)(\mathrm{L_c})$
ضخامت (m)	ضخامت (m)
μ_e	μ_e
$\rho_e\,(\Omega\, m)$	$\rho_e\,(\Omega\, m)$

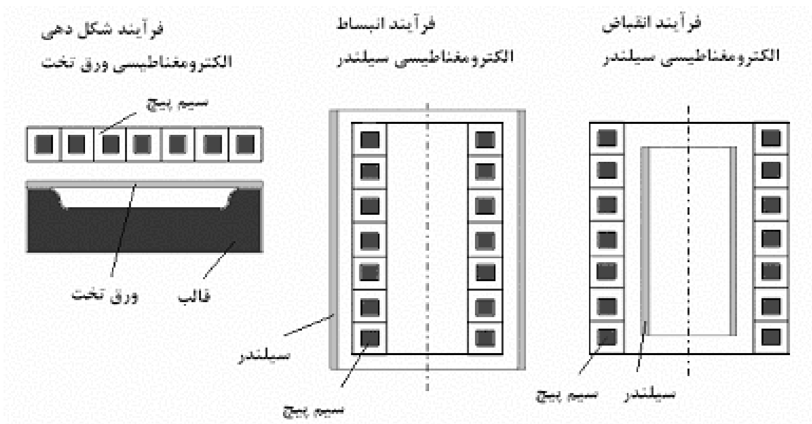
جدول ۳- مقایسه نتایج تغییرفرم قطعه‌کار با نتایج تجربی

نتايج	قطر خارجي ماكزيمم (mm)	قطر خارجي مينيمم (mm)	طول قطعه (mm)	ضخامت انتهاي قطعه (mm)
تجربي	۱۵/۸	۱۴/۵	۴۲/۴	۲/۵
شبيه‌سازي	۱۵/۷۲	۱۱/۲	۴۲/۷	۲/۵۱
درصد خطا	%۰/۵	%۲۲	%۰/۷	%۰/۴
درصد ميانگين خطا در تغييرفرم شعاعي	%۱۱/۲۵			
درصد ميانگين كل خطا	%۵/۹			

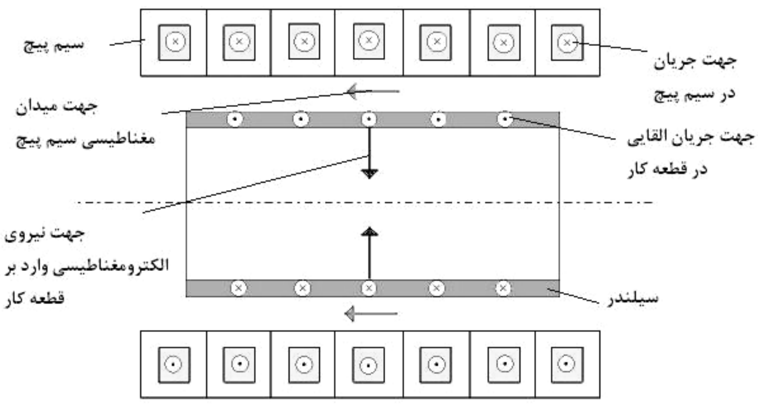
شكلها



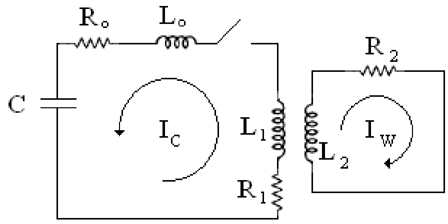
شكل١- نماي شماتيك فرآيند شكل‌دهي الكترومغناطيسي و اجزاء مداري آن



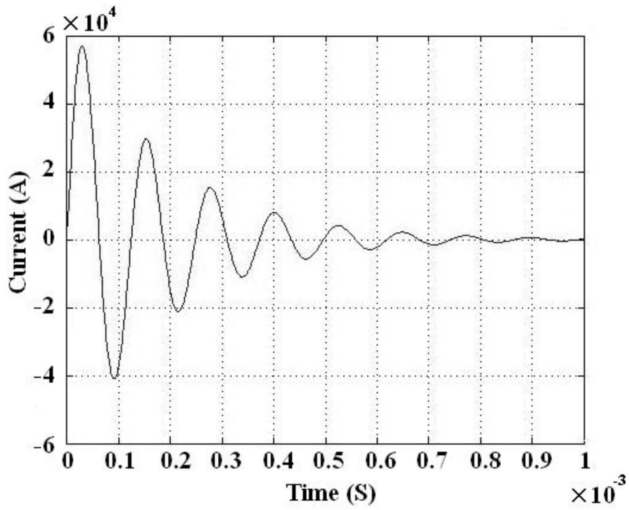
شكل٢- نمايي از انواع فرايندهاي شكل‌دهي الكترومغناطيسي



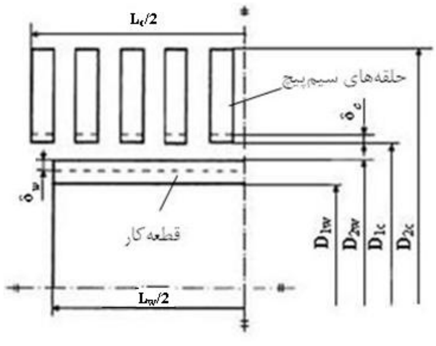
شكل٣- نمايي از سيم‌پيچ و قطعه و جهت نيروي وارد بر قطعه



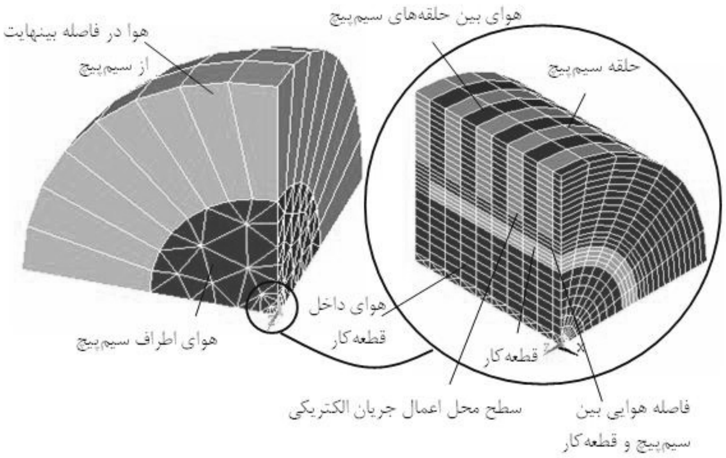
شکل٤- مدل شماتیک مداري فرآیند شکل‌دهي الکترومغناطیسي



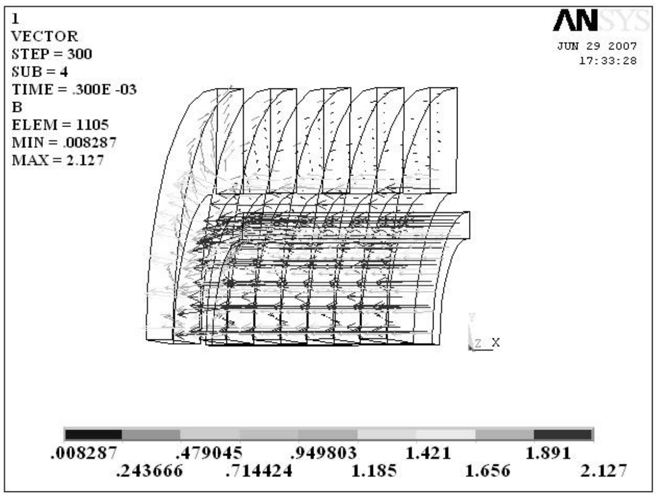
شکل ۵- نمودار جریان



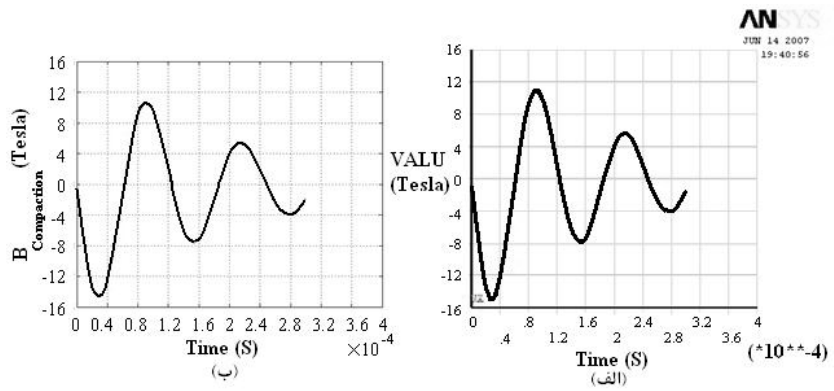
شکل ۶- شکل شماتیك برش خورده از فرآیند انقباض آزاد استوانه



شكل٧- مدل اجزاء محدود شبيه‌سازي فرآيند انقباض استوانه

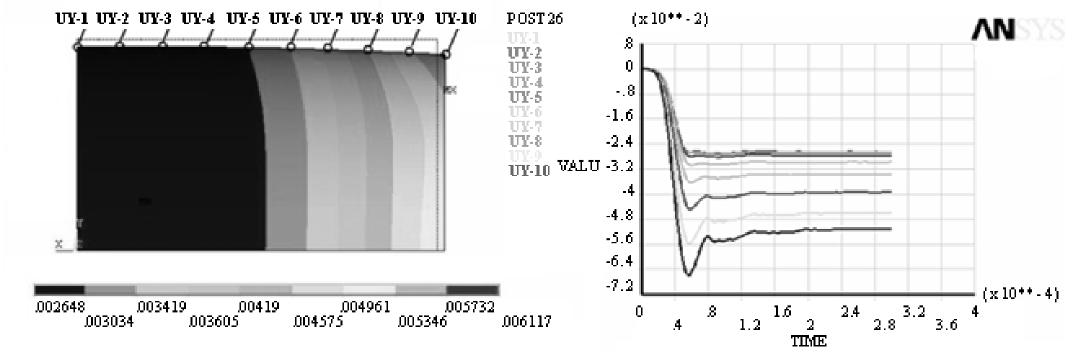


شكل٨- جهت ميدان مغناطيسي سيم‌پيچ به دست آمده از شبيه‌سازي

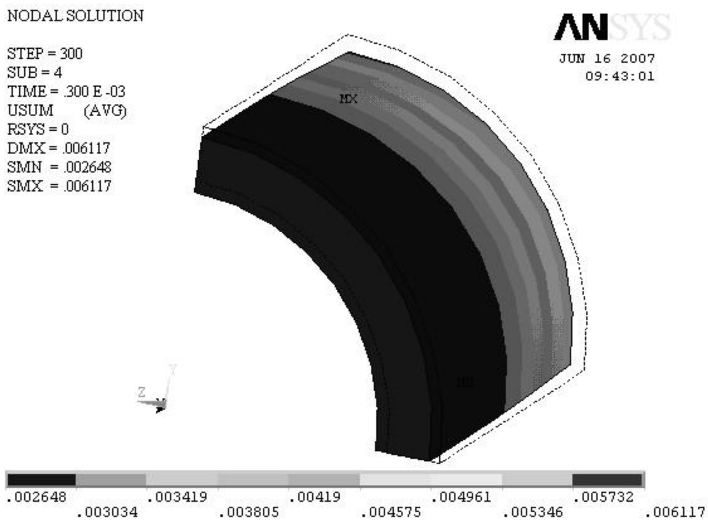


شكل٩- (الف) نمودار ميدان مغناطيسي در فضاي بين سيم‌پيچ و قطعه‌كار حاصل از شبيه‌سازي اجزاء محدود

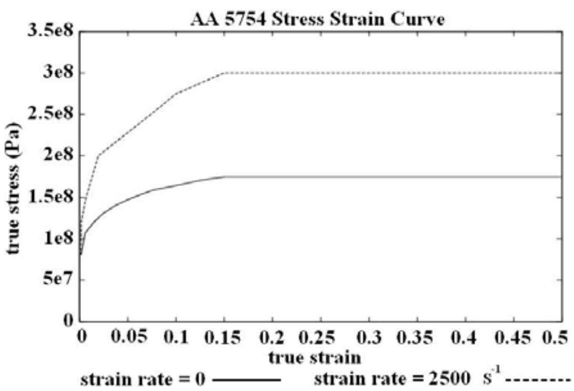
(ب) نمودار حاصل از رابطه تحليلي



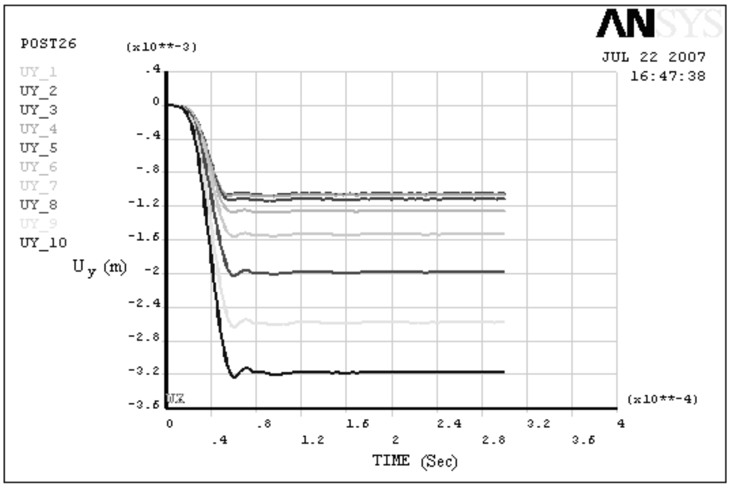
شکل ۱۰- تغييرات شعاع خارجي نقاط مختلف قطعه‌کار حاصل از شبيه‌سازي



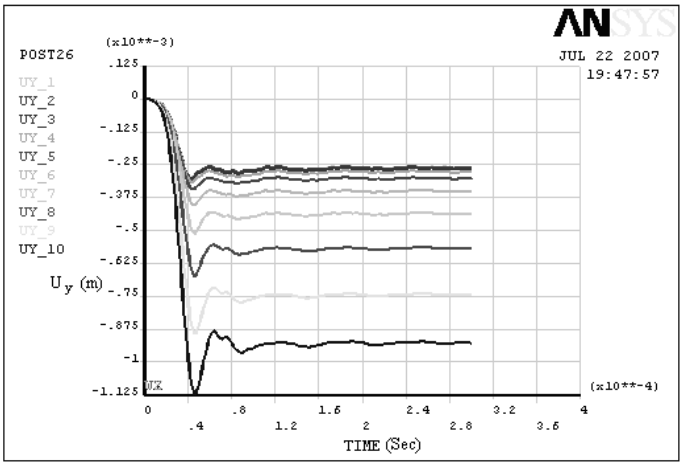
شکل ۱۱- نمايي از تغيير فرم کلي قطعه‌کار حاصل از شبيه‌سازي



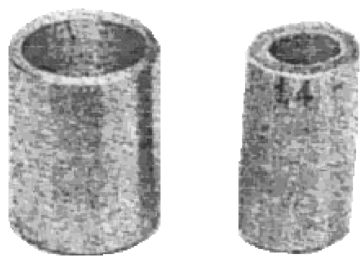
شکل ۱۲- منحني تنش- کرنش آلومينيوم Al5754 [12]



شکل ۱۳- تغييرات شعاع خارجي نقاط مختلف قطعه‌کار حاصل از شبيه‌سازي با منحني تنش- کرنش شبه استاتيک AA5754



شکل ۱۴- تغييرات شعاع خارجي نقاط مختلف قطعه‌کار حاصل از شبيه‌سازي
با منحني تنش- کرنش AA5754 در نرخ کرنش $۲۵۰۰s^{-1}$



شکل ۱۵- نمايي از قطعه تغيير فرم يافته(سمت راست) و قطعه اوليه درآزمايشات تجربي[۱۱]

Abstract

The theoretical principal of electromagnetic forming process is discussed in this paper. In addition, free compaction of an aluminum tube is simulated as an example of finite element approach. The results of this 3D simulation with direct coupling of electromagnetic and mechanical aspects of the process are compared with the experimental results which had been represented in other references. The main advantages of this simulation in comparison with the others would be the 3D based modeling. Also as a new attempt, the coil is modeled as a set of separate parallel rings, resulting in a relatively good agreement in comparison with the experimental results. Then another numerical simulation has been carried out to investigate the strain rate dependency of the process. The results of high strain rate forming have been compared with a process using quasi static stress-strain material behavior.