

مدل سازی چند مقیاسی فرو رفتگی در صفحه و مقایسه پاسخ با مدل پیوستار

سید مصطفی خسرو نژاد، علیرضا ستوده و محمد سازگار

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده - در این مقاله ابتدا روش چند مقیاسی شبه پیوستار برای مدل سازی جامدات بررسی شد و با استفاده از این روش فرو رفتگی سنبه در صفحه شبیه سازی گردید. برای اطمینان از صحت پاسخ، همان مسئله با استفاده از روش اجزاء محدود با فرض الاستیک و خطی بودن ماده مدل شد و نشان داده شد که پاسخ این دو روش در محدوده الاستیک تطابق خوبی با یکدیگر دارند. همچنین مشاهده شد که در محدوده پلاستیک وقوع نابجایی باعث ایجاد اثرات پلاستیک در ماده شده، بطوریکه منحنی نیرو بر حسب جابجایی سنبه این اثرات را به خوبی نشان می دهد. در نهایت با استفاده از منحنی نیرو بر حسب جابجایی سنبه، تشکیل و حرکت نابجایی های جزئی در آلومینیوم رصد گردید.

کلید واژه- تست فرو رفتگی، روش شبه پیوستار، شبیه سازی چند مقیاسی، نابجایی

۱- مقدمه

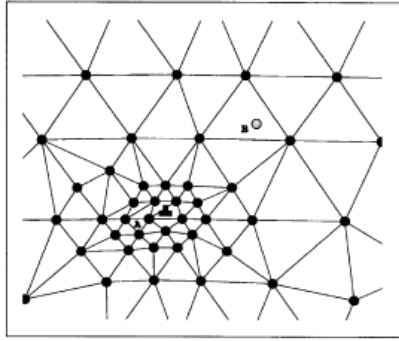
مشکل می نماید. روشهای چند مقیاسی این محدودیتها را از بین می برند.

یکی از معروفترین روشهای چند مقیاسی، روش شبه پیوستار^۱ است که توسط تدمر در سال ۱۹۹۶ برای تحلیل الاستو پلاستیک جامدات ابداع شد. تدمر و میلر در سال ۲۰۰۲ روش شبه پیوستار را مرور کرده و کاربردها، پیشرفتها و چالشهای آن را بررسی نمودند [۴].

در این پژوهش این روش برای تحلیل فرورفتگی در صفحه بکار رفته و پاسخ آن با تحلیل اجزاء محدودی که با فرض خطی و الاستیک بودن ماده انجام شده است مقایسه گردید. این مقایسه با هدف معتبر نمودن پاسخ روش شبه پیوستار صورت می گیرد. پس از آن که پاسخ این روش در محدوده ای خطی مورد تایید قرار گرفت در ناحیه پلاستیک رفتار ماده را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

از دیر باز تستهای فرورفتگی در استخراج خواص فلزات در شاخه های مختلف علوم نقش داشته اند. این تستها سختی سنجی نام دارند و شروع پلاسیسیته را رصد می کنند. انجام این تست در ابعاد نانو نیز روش قدرتمندی برای استخراج خواص مکانیکی مواد در آن مقیاس می باشد [۱]. به کمک این آزمایش می توان خواصی همچون مدول الاستیسیته، نقطه تسلیم و سختی در ابعاد نانومتر را استخراج کرد [۲]. به دلیل لغزیدن اتمها و شکسته شدن بعضی از باندها در حین انجام آزمایش و ایجاد نابجایی ها، شروع حالت پلاستیک به خوبی قابل نمایش است. در این راستا انجام شبیه سازی های کامپیوتری درک ما را از این پدیده کامل تر می نماید. تاکنون در زمینه آزمایش سختی سنجی شبیه سازی های متعددی با استفاده از دینامیک ملکولی انجام گرفته است [۳]. اما روش دینامیک ملکولی دو محدودیت بزرگ دارد، زمان شبیه سازی و ابعاد نمونه دو محدودیتی است که با توجه به آنها شبیه سازی کامل یک تست سختی سنجی با استفاده از دینامیک ملکولی بسیار

¹ Quasi Continuum



شکل ۱-ب: قرارگیری اتمهای نماینده در گره‌های المانهای اجزاء محدود

بطور کلی سعی می‌گردد در نواحی که دارای تغییر شکلهای غیریکواخت و گرادیانهای زیاد (مثلا نوک ترک) می‌باشند چگالی اتمهای نماینده زیاد در نظر گرفته شود (ناحیه A در شکل ۱-الف) و به تدریج با دور شدن از این نواحی چگالی کاهش یابد (ناحیه B در شکل ۱-الف). در شکل (۱-ب) قرارگیری اتمهای نماینده در محل گره‌های المانهای اجزاء محدود نشان داده شده است.

همچنین با استفاده از مفهوم توابع میان‌یاب در روش اجزاء محدود می‌توان جابجایی سایر نقاط را بوسیله جابجایی موجود در این اتمها محاسبه کرد:

$$x_i^{int} = \sum_{\alpha} N_{\alpha}(X_i) x_{\alpha} \quad (2)$$

حال می‌توان بر اساس رابطه (۱) تابع انرژی پتانسیل کلی را بصورت زیر نوشت:

$$\Pi(u) = \sum_{\alpha=1}^R n_{\alpha} E_{\alpha}(u_1, \dots, u_N) - \sum_{\alpha=1}^R n_{\alpha} f_{\alpha} u_{\alpha} \quad (3)$$

که f_{α}^G میانگین نیروی خارجی وارده بر اتم نماینده α است. بطور کلی اتمهای نماینده موجود در روش شبه پیوستار را می‌توان به دو نوع زیر تقسیم کرد:

(۱) اتمهای غیرمحلی که انرژی این اتمها با استفاده از توابع پتانسیل مولکولی و از برهم‌کنش این اتمها با اتمهای موجود در شعاع همسایگی خود، محاسبه می‌گردد ($n_{\alpha} = 1$).

(۲) اتمهای محلی که این اتمها در ناحیه‌ای که سیستم دارای تغییرشکلهای یکنواخت می‌باشد قرار گرفته‌اند و انرژی این اتمها با استفاده از گرادیان تغییر شکل (F) محاسبه می‌گردد.

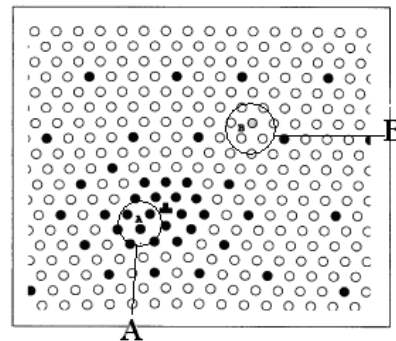
شبه سازی شبه پیوستار بر اساس کد تدوین شده توسط بنیان این روش انجام شده است و تحلیل اجزاء محدود [۵] با استفاده از کد کامپیوتری که توسط نگارندگان این پژوهش برای تحلیل مسائل دو بعدی تدوین شده است صورت می‌گیرد.

۲- روش شبه پیوستار

روش شبه پیوستار روشی چند مقیاسی است که برای تحلیل یک شبکه بلور جامد با دقت اتمی ولی با حجم محاسبات کمتر بکار می‌رود. ایده اصلی این روش در نظر گرفتن تعدادی اتم نماینده به جای همه اتمها در شبیه سازی و محاسبه رفتار اتمهای همسایه آنها با استفاده از توابع پایه اجزاء محدود می‌باشد. این روش با استفاده از مفهوم روش اجزاء محدود و کوپل کردن آن با روشهای اتمی باعث کاهش درجه آزادی سیستم و در نتیجه کاهش حجم محاسباتی مورد نیاز می‌گردد. این امر خود سبب توانایی مدل‌سازی مسائلی با ابعاد بزرگتر می‌شود [۶]. برای کاهش درجه آزادی سیستم در این روش اتمهای نماینده ای از بین اتمهای موجود در جسم انتخاب می‌گردند و انرژی کل به صورت مجموع انرژی اتمهای نماینده نوشته می‌شود.

$$E_{total} = \sum_{\alpha=1}^R n_{\alpha} E_{\alpha} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، E_{α} انرژی اتمهای نماینده و n_{α} تعداد اتمهایی که اتم نماینده α ، در بر گرفته است را نشان می‌دهد. بر این اساس $n_{\alpha} = 1$ نشان دهنده تک اتمی بودن منطقه و در غیر این صورت مبین ناحیه کاهش یافته است. شکل (۱-الف) نحوه انتخاب اتمهای نماینده را نشان می‌دهد.



شکل ۱-الف: نحوه انتخاب اتمهای نماینده. اتم‌های نماینده با دایره توپر نشان داده شده‌اند.

قرارگیری المان نسبت به مرز محاسبه کرد. بطوریکه المانهایی که به مرز متصل نیستند دارای مقدار ۱ و برای المانهایی که به ترتیب دارای یک یا دو گره مشترک با مرز هستند دارای مقدار $\frac{2}{3}, \frac{1}{3}$ می باشد. اما مشکل دیگری که بر اثر در نظر گرفتن اتمهای مجازی ایجاد می شود، تولید نیروهای توازن نشده مجازی بر روی مرز است. همانطور که در شکل ۳ دیده می شود حرکت اتمهای B سبب ایجاد نیرویی بر روی اتمهای A می شود، اما حرکت اتمهای A هیچ تاثیری بر روی اتمهای B ندارد. برای رفع این مشکل در هر مرحله از حل میزان این نیروها محاسبه شده و بصورت معکوس بر روی سیستم قرار می گیرد. بر این اساس تابع انرژی پتانسیل بصورت زیر تصحیح می شود:

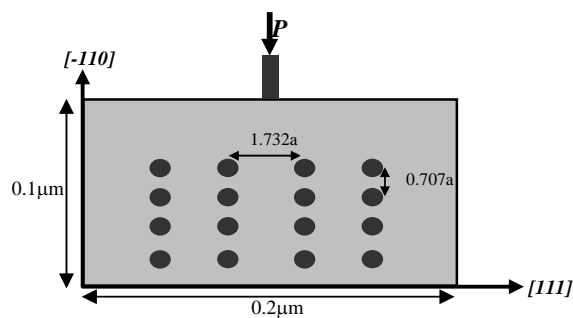
$$\Pi'_h(u) = \Pi_h(u) - \sum_{\alpha} f_{\alpha}^G \cdot u_{\alpha} \quad (6)$$

که f_{α}^G نیروی مجازی وارده بر اتم نماینده α می باشد. حال با کمینه نمودن رابطه (۶) به یک دستگاه معادلات غیر خطی خواهیم رسید که از حل این دستگاه معادلات می توان جابجایی های اتمهای نماینده در هر لحظه را محاسبه کرد.

۳- شبیه سازی فرو رفتگی در صفحه

برای شبیه سازی فرو رفتگی در صفحه، نمونه ای از جنس آلومینیوم انتخاب می گردد. شبیه سازی به صورت دو بعدی صورت می گیرد بنابراین صفحه مورد نظر برای انجام شبیه سازی و همچنین اندازه آن مطابق شکل (۳) انتخاب می گردد.

برای محاسبه پتانسیل بین اتمی و همچنین استخراج خواص الاستیک آلومینیوم از پتانسیل اتم آویخته استفاده می شود.

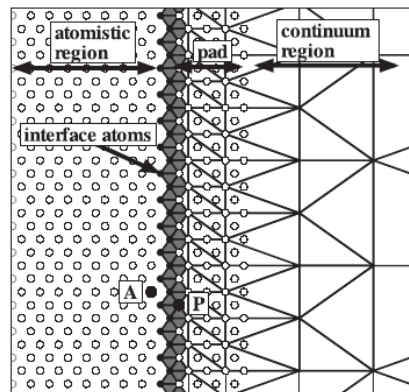


شکل ۳: ساختار، ابعاد و جهات کریستالی نمونه تست فرورفتگی

حال با توجه به این تقسیم بندی رابطه (۳) را می توان بصورت معادله (۴) بازنویسی کرد :

$$\begin{aligned} \Pi_h(u) = & \sum_{\alpha=1}^{R_L} n_{\alpha} E_{\alpha}^{Loc} (F_1, \dots, F_N) \\ & + \sum_{\beta=1}^{R_{NL}} E_{\beta} (u_1, \dots, u_N) - \sum_{\alpha=1}^R n_{\alpha} f_{\alpha} \cdot u_1 \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه فوق E_{α}^{Loc} انرژی اتمهای محلی و E_{β} انرژی اتمهای غیرمحلی را مشخص می کند. به طور کلی تعریف اتمهای محلی و اتمهای غیرمحلی در یک سیستم سبب ایجاد دو ناحیه کاملا متفاوت در مدل می گردند که توسط یک مرز مجازی از هم جدا شده اند. این مرز مجازی انرژی سطحی ناخواسته ای را وارد مدل می کند. همچنین این سطح اجازه عبور امواج ناشی از نوسان اتمها از ناحیه اتمی به ناحیه کاهش یافته را نمی دهد و سبب انعکاس این امواج به درون ناحیه اتمی می شود که خطای زیادی را در محاسبات وارد می کند. برای جلوگیری از این مشکل یک ناحیه شامل اتمهای مجازی را که منطبق بر ناحیه پیوسته می باشد، مطابق شکل (۲) در نظر می گیریم.



شکل ۲: نحوه قرارگیری اتمهای مجازی در مرز اتمی - پیوستار

همانطور که در شکل دیده می شود اتمهای مجازی در شعاع همسایگی اتمهای موجود بر روی مرز قرار می گیرند و شعاع همسایگی آنها را کامل می کنند. البته با این فرض احتیاج به تصحیح انرژی بصورت زیر می باشد:

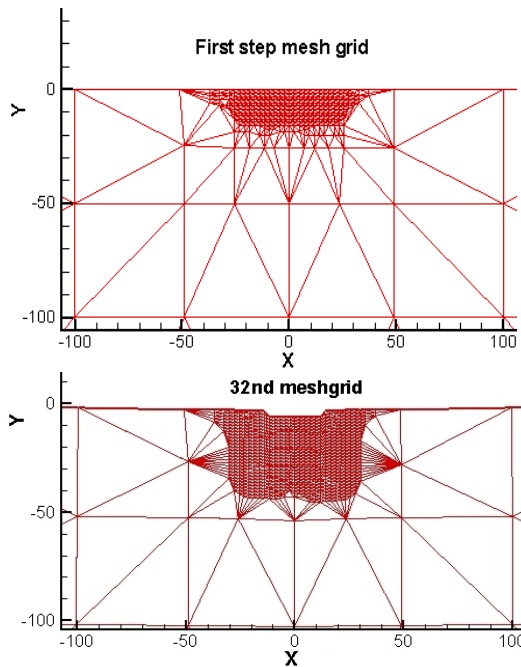
$$E_{QC} = \sum_{i \in A, I} E_i(r_I, r_A, r_p) + \sum_{\mu} w_{\mu} E_{\mu} \quad (5)$$

که عبارت اول مربوط به انرژی اتمهای موجود در مرز و ناحیه اتمی می باشد و عبارت دوم مختص به انرژی المانهایی اجزاء محدود است. مقدار w_{μ} را می توان بر اساس نحوه

تناوبی بودن شرایط مرزی در دو طرف به معنای ادامه داشتن صفحه در راستای X تا بی‌نهایت خواهد بود و در شبیه سازی این شرط با استفاده از صفر در نظر گرفتن جابجایی در راستای X روی مرزها اعمال می‌شود. علاوه بر آن شبیه سازی به صورت کرنش صفحه‌ای انجام شده است.

شبیه سازی اجزاء محدود با فرض خطی بودن ماده انجام می‌گیرد. در شبیه سازی چند مقیاسی به دلیل وجود پتانسیل غیر خطی معادلات غیر خطی می‌باشند. بنابراین در حالت چند مقیاسی گام به گام مسئله را حل خواهیم نمود. به عبارت دیگر برای حل مسئله در هر گام کسر کوچکی از جابجایی نهایی اعمال شده و رابطه (۶) کمینه می‌گردد. به این ترتیب پاسخ غیر خطی مسئله استخراج خواهد گردید.

نحوه انجام مش بندی نیز از نکات مهم در انجام شبیه سازی می‌باشد. در شبیه سازی اجزاء محدود مش بندی ناحیه به صورت ثابت می‌باشد ولی در شبیه سازی چند مقیاسی با افزایش جابجایی سنبه و به تبع آن افزایش گرادینان کرنش مش بندی به صورت تطبیقی تغییر خواهد کرد. این مسئله از یک سمت باعث کاهش حجم محاسبات و از طرف دیگر افزایش دقت خواهد گردید. شکل (۵) روند ریزتر شدن المان‌ها را زیر سنبه در دو مرحله از بارگذاری نشان می‌دهد.



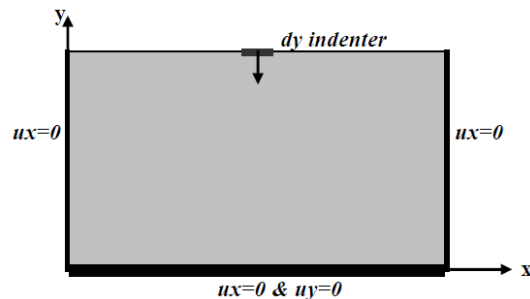
شکل ۵: مش بندی تطبیقی در شبیه سازی چند مقیاسی

پتانسیل اتم آویخته برای انواع فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای این پتانسیل برای هر فلز، نماینده‌ای از خواص آن است. در مورد آلومینیوم ارکلسی [۷] پتانسیلی ارائه داده است که در این مقاله از آن استفاده خواهیم نمود. ارکلسی همچنین در پژوهش خود علاوه بر محاسبه پارامترهای پتانسیل اتم آویخته برای آلومینیوم خواص الاستیک محاسبه شده برای آلومینیوم توسط پتانسیل پیشنهادی خود را نیز ارائه نموده است. در این تحقیق از خواص الاستیک محاسبه شده توسط ارکلسی برای آلومینیوم جهت انجام تحلیل اجزاء محدود خطی و از پتانسیل مربوطه جهت استفاده در تحلیل اتمی - پیوستار استفاده می‌گردد.

جدول ۱: خواص استفاده شده در شبیه سازی اجزاء محدود که از پتانسیل بین اتمی استخراج شده است.

مقادیر بر حسب GPa	C11	C12	C44
مقدار محاسبه شده توسط پتانسیل	117.74	62.06	36.67
مقدار تجربی (دمای صفر درجه کلون)	118	62.4	32.5

نکته دیگر در مورد شبیه سازی نحوه اعمال شرایط مرزی آن است. سنبه به عرض $9A^\circ$ انتخاب شده است و فرو رفتن سنبه در صفحه با استفاده از جابجایی المان‌های زیر سنبه مدل سازی می‌شود. پایین صفحه به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود و دو طرف آن شرط مرزی تناوبی اعمال می‌گردد. این شرایط در هر دو شبیه سازی به صورت شکل (۴) اعمال می‌گردد.



شکل ۴: نحوه اعمال شرایط مرزی در هر دو شبیه سازی

۴- بررسی صحت پاسخ روش شبه پیوستار

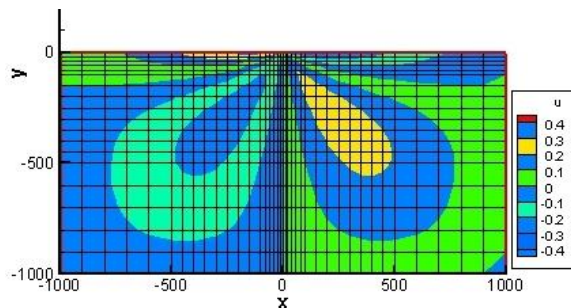
در این تحقیق برای مقایسه و بررسی صحت پاسخ روش شبه پیوستار در ناحیه خطی، از فرض‌های محیط پیوسته استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان پاسخ روش شبه پیوستار را در نقاطی به غیر از منطقه اتمی بررسی نمود. در واقع با استفاده از روش‌های مبتنی بر محیط پیوسته، پاسخ در منطقه محلی روش شبه پیوستار قابل مقایسه خواهد بود. با توجه به اینکه در تحلیل فرورفتگی در صفحه اکثر نقاط به صورت محلی قلمداد می‌شوند این مقایسه معتبر می‌باشد.

شبه سازی اجزاء محدود به صورت کرنش صفحه‌ای انجام خواهد شد. شرایط مرزی مسئله مطابق شکل (۴) اعمال می‌گردد. همچنین ماده الاستیک، اورتوتروپیک و خطی با خواص جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود. مش بندی به صورت مستطیلی انجام می‌گیرد و از المانی با ۴ گره استفاده خواهد شد. علاوه بر این مش بندی به صورت کاملا متقارن ایجاد می‌شود و در نقاط نزدیک به سنبه مش به صورت قابل توجهی ریزتر خواهد شد.

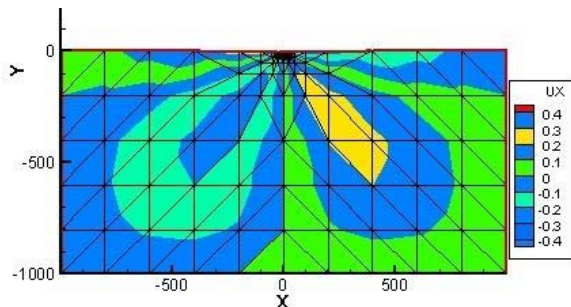
برای مقایسه، کانتورهای مربوط به جابجایی در راستای x و y برای جابجایی یکسان در سنبه در شکل (۶) رسم شده‌اند. جابجایی سنبه در هر دو حالت $5A^\circ$ در نظر گرفته شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود جابجایی کلی در جهات x و y حاصل از کد اجزاء محدود (شکل‌های ۶-الف و ج) کاملا با نتایج روش شبه پیوستار در همان جهات (شکل‌های ۶-ب و د) همخوانی دارد و مقدار آن در نقاط مختلف صفحه یکسان می‌باشد. این مسئله نشان از صحت پاسخ روش شبه پیوستار در مناطق غیر اتمی دارد. از آنجایی که جابجایی در ناحیه اتمی بر سایر نقاط نیز اثر می‌گذارد می‌توان نسبت به صحت پاسخ ناحیه اتمی نیز اطمینان حاصل کرد.

تطابق پاسخ بین این دو نمونه تا جایی امکان پذیر است که رفتار ماده خطی باشد. در صورتی که رفتار ماده غیر خطی شود مدل اجزاء محدود توانایی نشان دادن رفتار غیر خطی را نخواهد داشت و پاسخ با یکدیگر متفاوت خواهد شد.

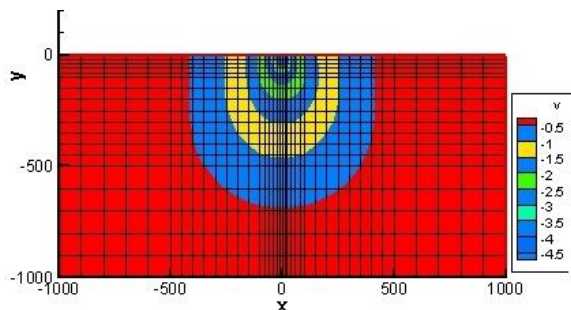
برای بررسی دقیق‌تر پاسخ مقایسه عددی نیز صورت گرفته است. در شکل (۷) با اعمال جابجایی‌های مختلف نیروی وارد بر سنبه در هر مرحله محاسبه شده است. همانطور که در شکل مشخص است مدل‌ها در محدوده خطی تطابق خوبی را نشان می‌دهند.



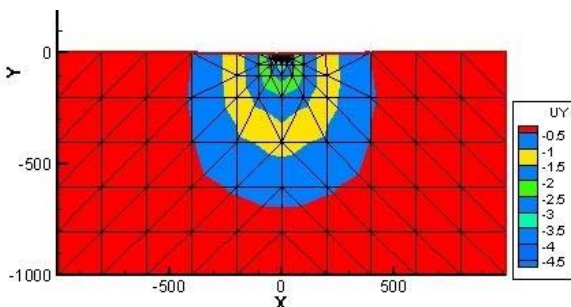
شکل (۶-الف)



شکل (۶-ب)

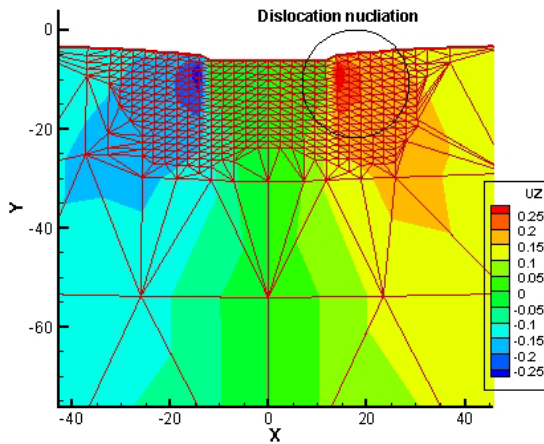


شکل (۶-ج)

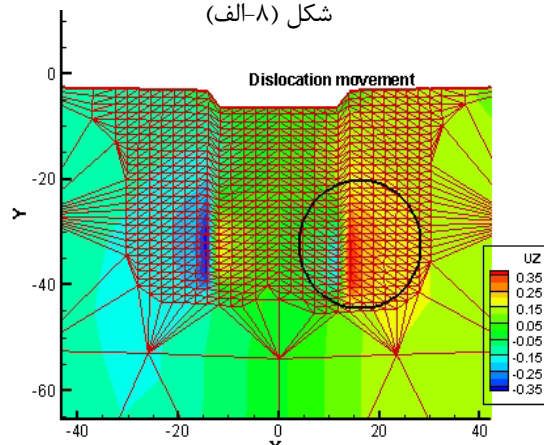


شکل (۶-د)

شکل ۶-الف: جابجایی در راستای x اجزاء محدود. ب: جابجایی در راستای x روش شبه پیوستار. ج: جابجایی در راستای y اجزاء محدود. د: جابجایی در راستای y روش شبه پیوستار.



شکل (۸-الف)

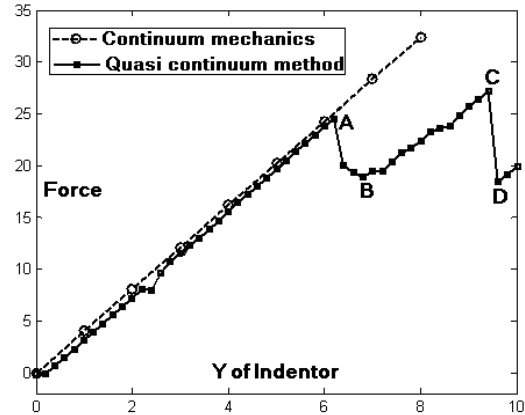


شکل (۸-ب)

شکل ۸: جابجایی در راستای z ، الف: برای نقطه A در شکل (۷). ب: نقطه B در شکل (۷)

حرکت نابجایی را در این دو نقطه نشان می‌دهند. با افزایش نیرو نابجایی روی صفحه $[111]$ حرکت خواهد کرد. این صفحه، صفحه ترجیحی حرکت نابجایی در فلزات FCC از جمله آلومینیوم می‌باشد. شکل (۸-ب) این حرکت را به خوبی نشان می‌دهند.

مطابق منحنی (۷) بایستی در نقطه C نابجایی دیگری روی داده و با افزایش فرو رفتگی سنبه به سمت پایین حرکت نماید. شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) به ترتیب کانتور جابجایی در راستای Z را برای نقاط C و D نشان می‌دهند. در این دو کانتور حرکت نابجایی اول و ایجاد و حرکت نابجایی دوم به طور واضح نمایش داده شده است.



شکل ۷: نیروی سنبه $(\text{eV}/\text{\AA})$ بر حسب جابجایی سنبه (\AA)

۵- شبیه سازی حرکت نابجایی در کریستال بدون عیب آلومینیوم

در هنگام حرکت سنبه به سمت پایین کریستال تا حدی رفتار خطی نشان خواهد داد و نیرو به صورت تقریباً خطی نسبت به جابجایی تغییر خواهد کرد. بعد از آن ناگهان به دلیل ایجاد نابجایی نیرو افت خواهد کرد و اتم‌ها روی یکدیگر خواهند لغزید. این روند در واقع نشانگر اثرات پلاستیک در ماده می‌باشد. در شکل (۷) منحنی جابجایی بر حسب نیرو برای سنبه رسم شده و با پاسخ روش اجزاء محدود مقایسه شده است. روش مبتنی بر محیط پیوسته تا هنگام ایجاد نابجایی به خوبی رفتار ماده را پیش بینی می‌نماید ولی در هنگام ایجاد نابجایی این روش بخاطر ذات خطی و پیوستار توانایی پیش‌بینی این پدیده را ندارد. روش شبه پیوستار با توجه به ذات دو گانه خود به خوبی و با دقت پدیده‌های پلاستیک را پیش بینی می‌نماید.

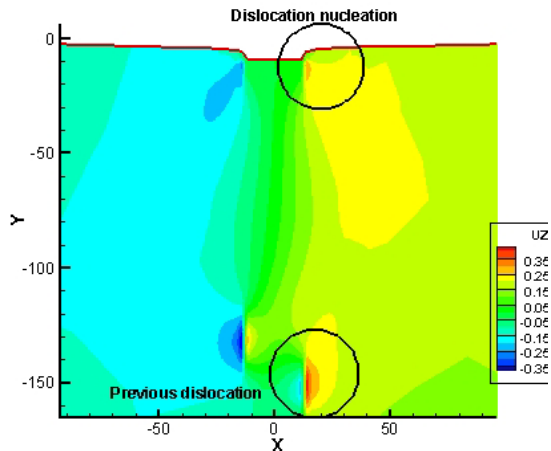
در شکل (۷) نقطه A نشانگر بروز اولین نابجایی در کریستال می‌باشد. به دلیل لغزش اتم‌ها بر روی یکدیگر کمی نیرو افت کرده و به مقدار B می‌رسد. برای نشان دادن بروز نابجایی در ماده از کانتورهای جابجایی در راستای Z نیز می‌توان بهره برد. در هنگام ایجاد نابجایی در ناحیه اطراف آن، به دلیل ایجاد ساختار فشرده تر، جابجایی در راستای Z ایجاد خواهد شد. با استفاده از این جابجایی می‌توان حرکت نابجایی را درون ماده دنبال نمود.

کانتور جابجایی در راستای Z برای نقطه A و B در شکل (۸) نشان داده شده است. این کانتورها به خوبی بروز و

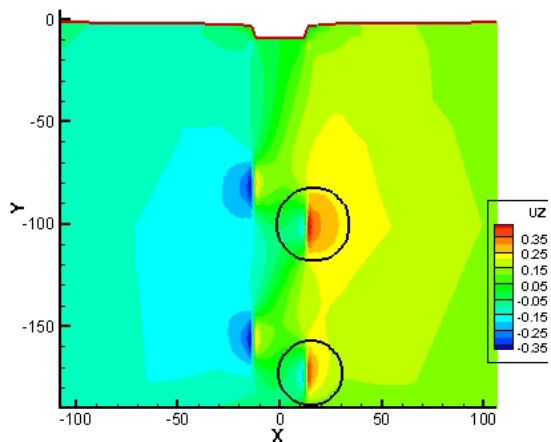
مورد ایجاد نابجایی در شبکه FCC تطابق کامل دارد. همچنین مراحل مختلف ایجاد و حرکت نابجایی‌ها نیز با استفاده از منحنی نیرو بر حسب جابجایی سنبه رصد شده و با استفاده از کانتور جابجایی در راستای عمود بر صفحه نمایش داده شده است.

مراجع

- [1] W.C Oliver and G.M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," **Journal of Materials Research**, 7, pp. 1564-1583, 1992.
- [2] W.D. Nix and H.Gao, "Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity," **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, 46, pp. 411-425, 1998.
- [3] J.A. Zimmerman, C.L. Kelchner, P.A. Klein, J.C. Hamilton and S.M. Foiles, "Surface step effects on nanoindentation," **Physical Review Letters**, 87, pp. 165507-165515, 2001.
- [4] R. E. Miller and E. B. Tadmor, "The Quasicontinuum method; overview, application and current direction," **Journal of computer aided material design**, 9, pp. 203-239, 2002.
- [5] J. N. Reddy, *Introduction to the Finite Element Method*, 2nd edition, McGraw-Hill, 1993.
- [6] V. Shenoy, R. Miller, E. Tadmor, D. Rodney, R. Phillips and M. Ortiz, "An adaptive finite element approach to atomic scale mechanics," **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 36, pp. 611-642, 1998.
- [7] F. Ercolessi and J. B. Adams, "Interatomic potentials from first-principles calculations: the force-matching method," **Europhysics Letters**, 26, pp. 583-591, 1994.



شکل (۹-الف)



شکل (۹-ب)

شکل ۹: جابجایی در راستای z، الف: برای نقطه C در شکل (۷). ب: نقطه D در شکل (۷)

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند فرو رفتن سنبه در صفحه با استفاده از یک روش چند مقیاسه اتمی-پیوستار به نام روش شبه پیوستار مدل‌سازی شده است. نتایج این شبیه‌سازی در محدوده خطی با حل حاصل از کد اجزاء محدود تدوین شده، مقایسه گردید و پاسخ‌ها همخوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. در محدوده پلاستیک با دقت اتمی می‌توان ایجاد نابجایی‌ها را پیش‌بینی نمود. با توجه به ماده و ساختار انتخاب شده در شبیه‌سازی وقوع نابجایی جزئی در این نمونه پیش‌بینی شده است که با تئوری‌های قبلی در

١٧ الى ١٩ مهر ماه ١٣٨٧