



استفاده از روش اجزاء محدود توسعه یافته در تعیین ضرایب شدت تنش و ترم‌های مرتبه بالای ترک

احمد قاسمی قلع‌بهمن^{1*}، سعید صلواتی²

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی 3513119111، ghasemi@semnan.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 مرداد 1393

پذیرش: 29 مهر 1393

ارائه در سایت: 06 دی 1393

کلید واژگان:

روش اجزاء محدود توسعه یافته

روش حداقل مربعات فرامین

ضرایب شدت تنش

بسط سری مجانبی ویلیامز

در مطالعه حاضر، به منظور ارزیابی میدان جابه‌جایی الاستیک و پس از آن پارامترهای شکست در مواد جامد الاستیک همگن ایزوتروپیک با وجود ترک‌های لبه‌ای و یا داخلی، از روش اجزاء محدود توسعه یافته و با تکنیک مجموعه تراز استفاده شد تا از معایب روش استاندارد اجزاء محدود جلوگیری شود. به منظور تعیین ضرایب شدت تنش و همچنین ضرایب ترم‌های مرتبه بالای ترک در حل سری مجانبی ویلیامز برای سازه‌های حاوی ترک در حالت‌های مختلف مود شکست از یک روش کمینه مربعات فرامین و از طریق انطباق حل سری میدان جابه‌جایی در اطراف نوک ترک بر تعداد زیادی از جابه‌جایی‌های گره‌ای به دست آمده از روش اجزاء محدود توسعه یافته، استفاده شد. برای تأیید و احراز صحت نتایج، چندین نمونه ترک‌دار در حالت‌های مختلف بارگذاری مود خالص اول، مود خالص دوم، و مود ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه‌ای که با نتایج موجود در مراجع براساس فرمول بندی‌های دیگر صورت گرفته، میزان کارایی و سادگی این روش را نشان داده و قابلیت آن را در شناسایی دقیق ضرایب شدت تنش و ضرایب ترم‌های مرتبه بالاتر ترک به اثبات می‌رساند.

Utilizing the extended finite element method for determining crack stress intensity factors and higher order terms coefficients

Ahmad Ghasemi Ghalebahman*, Saeed Salavati

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* P.O.B. 3513119111 Semnan, Iran, ghasemi@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 August 2014
Accepted 21 October 2014
Available Online 27 December 2014

Keywords:

Extended Finite Element Method
over deterministic Least Squares Method
Stress Intensity Factors
Williams' Asymptotic Series Expansion

ABSTRACT

In the present study, in order to evaluate the elastic displacement field and subsequently the fracture parameters within the isotropic homogeneous elastic solids with the edge or interior cracks, the extended finite element method with level set technique was used to avoid the disadvantages associated with the standard finite element method. An over deterministic least squares method was utilized to determine the crack stress intensity factors as well as the coefficients of the higher order terms in the Williams' asymptotic series solution for structures containing crack in various modes of failure by fitting the series solution of displacement fields around the crack tip to a large number of nodal displacements obtained from the extended finite element method. For validating the results, several cracked specimens subjected to pure mode I, pure mode II, and mixed modes I/II loading were performed. Comparison with results available from the literature obtained by other formulations reveals the efficiency and simplicity of the proposed method, and demonstrate the capability of it to accurately capture the crack stress intensity factors and the coefficients of higher order terms.

1- مقدمه

جمله قابلیت‌های عمده روش کارآمد اجزاء محدود توسعه یافته¹ محسوب می‌شود. در این روش برخلاف روش اجزاء محدود استاندارد بدون استفاده از المان‌های تکیه² و با استفاده از توابع غنی‌ساز³ که از حل تحلیلی میدان تنش در پیرامون ناپیوستگی و ترک استخراج می‌شوند و از طریق اضافه کردن درجات آزادی (غنی‌سازی) گره‌هایی از مش که با ناپیوستگی‌ها درگیر است، شبیه‌سازی تکنیکی و ناپیوستگی امکان‌پذیر است. برای مدل‌سازی گسترش ترک از روش

مدل‌سازی ترک و رشد آن از جمله موضوعاتی است که در طی سالیان گذشته مورد توجه محققین در حوزه مکانیک شکست قرار گرفته است. مش‌بندی دوباره دامنه مورد مطالعه در مدل‌سازی رشد ترک و نیز صرف هزینه بالای محاسباتی در موقعیت ناپیوستگی‌ها از جمله چالش‌ها و معایب عمده روش اجزاء محدود استاندارد است که استفاده از آن را در برخی از مسائل مکانیک شکست محدود ساخته است. عدم در نظر گرفتن هندسه ناپیوستگی‌ها در مش‌بندی دامنه و نیز عدم نیاز به مش‌بندی دوباره آن به واسطه رشد ترک، از

1- Extended Finite Element Method (XFEM)
2- Singular elements
3- Enrichment functions

Please cite this article using:

A. Ghasemi Ghalebahman, S. Salavati, Utilizing the extended finite element method for determining crack stress intensity factors and higher order terms coefficients, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 135-146, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Ghasemi Ghalebahman, S. Salavati, Utilizing the extended finite element method for determining crack stress intensity factors and higher order terms coefficients, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 135-146, 2015 (In Persian)

مجموعه تراز¹ استفاده می‌شود. براساس این روش موقعیت نوک ترک و نیز بدنه ترک را می‌توان در هر مرحله رشد ترک یافت و در نتیجه المان‌هایی که باید غنی‌سازی شوند انتخاب کرد[1].

یکی از روش‌های عددی کارآمد در مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها، روش بدون شبکه (فاقد المان)² است. در این روش مشکلات مش‌بندی دوباره و نیز قفل‌شدگی و اعوجاج المان در روش اجزاء محدود کلاسیک، صرفاً با اضافه یا حذف کردن گره در ناحیه حل مسأله مرتفع می‌شود. به دلیل ویژگی ذاتی توابع شکل انتخاب‌شده در این روش، احراز بعضی از شرایط مرزی با مشکلاتی همراه می‌باشد و در عین حال هزینه محاسباتی آن بالاست؛ بنابراین محققین با تلفیق روش المان محدود در ناحیه دور از موقعیت ترک و نیز روش بدون شبکه در محدوده ترک توانسته‌اند بر این مشکلات فایز آیند [2,3]. دافلات و انجوبین دنگ [4] و لی و همکاران [5] با افزودن گره‌هایی که توسط توابع وزنی خاص و براساس اصل تکینگی تنش در نوک ترک غنی شده‌اند، ضرایب شدت تنش را با دقت بالاتری تعیین کردند. از این رو در روش المان محدود توسعه‌یافته برای کاهش هزینه شبکه‌بندی دوباره می‌توان با استفاده از یک شبکه‌بندی ثابت و منظم در طول زمان رشد ناپیوستگی و با انتخاب توابع غنی‌ساز مناسب در موقعیت ناپیوستگی، هزینه محاسبات را در مقایسه با روش بدون شبکه کاهش داده و دقت محاسبات را بالا برد.

در روش مدل ناحیه چسبیده³ شکست زمانی اتفاق خواهد افتاد که تنش اصلی بیشینه و یا مقدار کمینه گشودگی دهانه ترک در ناحیه آسیب⁴ براساس یک قانون ساختاری جدایش - کشش (قانون نرم‌شوندگی)⁵ به یک مقدار مادی بحرانی (متناسب با استحکام چسبندگی ماده) رسیده که سبب انفصال و جدایش تنش پیوسته چسبیده موجود مابین دو ناحیه پیوسته مدل خواهد شد [6]. اوبی و یانگ [7] از روش کوپله المان مرزی مدرج⁶ و مدل ناحیه چسبیده، رشد ترک را در نمونه‌هایی شامل ترک‌های متعدد پیش‌بینی نمود. قامز و همکاران [8] ضریب شدت تنش را برای شکاف U شکل تحت شرایط شکست مود ترکیبی و بر اساس مفهوم مدل ناحیه چسبیده محاسبه کردند. پرابهکار و واس [9] اثر مدل‌سازی ناحیه چسبیده را در میدان تنش نوک ترک مطالعه کرده و با محاسبه سفتی ناحیه چسبیده ضریب شدت تنش را در مود اول شکست تعیین کردند.

در روش انتگرالی بسته شدن مجازی ترک⁷ به واسطه بسته‌شدن مجازی ترک به مقدار ناچیز و از طریق حاصل‌ضرب مقادیر نیرو و جابه‌جایی‌های گره‌های دهانه باز شونده ترک که در محیط اجزاء محدود مدل‌شده، تغییر انرژی پتانسیل و در نتیجه نرخ رهایی انرژی کرنشی محاسبه شده و به کمک آن ضرایب شدت تنش محاسبه می‌شود [10]. حسینی تودشکی و همکاران [11] برای کاهش حجم محاسباتی، فرمول‌بندی اصلاح‌شده⁸ این روش را در مسایل الاستیک خطی و با فرض شبکه متعامد در نوک ترک ارائه کردند. اوکادا و همکاران [12] این روش را در محاسبه ضرایب شدت تنش ترک سه‌بعدی و برای فرمولاسیون المان‌های چهار وجهی مرتبه دوم به کار گرفتند. لیان و همکاران [13] به روش برون‌یابی عددی و براساس روش ناحیه بسته ترک مجازی، ضرایب شدت تنش را در ترک‌های سطحی بیضی شکل تعیین کردند. برخلاف روش مدل ناحیه چسبیده و روش انتگرالی بسته‌شدن مجازی

ترک، روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر را می‌توان از جمله روش‌های مستقیم عددی محسوب کرد که در آن به‌طور مستقیم و از طریق میدان جابه‌جایی ضرایب شدت تنش تعیین می‌شود [12]؛ بنابراین روش محاسباتی فرامعین اجزاء محدود توسعه‌یافته در تعیین ضرایب شدت تنش و نیز ضرایب ترم‌های مرتبه بالاتر ترک را می‌توان به‌عنوان اولین تحقیق در این حوزه محسوب کرد. مبنای ریاضی روش اجزاء محدود توسعه‌یافته توسط ملنک و بابوسکا [14] با تعریف جزءبندی واحد روش اجزای محدود⁹ آغاز شد. آقایان بلیچکو و بلک [15] روش اجزای محدودی با کمینه مش‌بندی دوباره برای گسترش ترک ارائه کردند. ایشان توابع غنی‌کننده ناپیوسته‌ای را به توابع تقریب اجزای محدود استاندارد افزودند تا بتوانند محاسبات مربوط به ترک موجود در مسئله را انجام دهند. روش مجموعه تراز نیز رفته‌رفته در نشان دادن موقعیت بدنه و نوک ترک مورد استفاده قرار گرفت. بلیچکو و همکارانش [16] روشی را ارائه کردند تا با آن بتوان هر ناپیوستگی را به‌صورت یک تابع و مشتقاتش در اجزای محدود مدل کرد. گنزلز البیوکسچ و همکارانش [17] ضرایب شدت تنش را در ترک‌های منحنی و غیرمسطح با تصحیح روش انتگرال متقابل¹⁰ و براساس روش اجزاء محدود توسعه‌یافته تعیین کردند. یو و همکارانش [18] پارامترهای شکست و ضرایب شدت تنش را در مواد مگنتو الکتروالاستیک با ارائه یک روش انتگرال متقابل فرا دامنه به‌دست آوردند.

روش اجزاء محدود فرا معین¹¹ یک روش عددی برای محاسبه پارامترهای شکست است. این روش از مقادیر تنش/جابه‌جایی تعداد زیادی از نقاط اطراف نوک ترک که از یک نرم‌افزار المان محدود به‌دست می‌آید استفاده کرده و مقادیر آن‌ها را در معادلات تنش/جابه‌جایی جای‌گذاری می‌کند. با حل مجموعه معادلات به‌دست‌آمده پارامترهای مورد نظر به‌دست می‌آید. در مرجع [19]، همچنین تقفی و همکارانش [20] و آیت‌اللهی و نجاتی [21] به محاسبه و بررسی اثرات ترم‌های مراتب بالاتر بسط سری ویلیامز در حل به روش اجزاء محدود فرامعین پرداخته‌اند.

در پژوهش حاضر با تلفیق روش اجزاء محدود توسعه‌یافته و روش حداقل مربعات فرامعین، ضرایب شدت تنش و ترم‌های مرتبه بالاتر ترک با دقت بالایی به‌دست آمده که تأثیر به‌سزایی در تخمین ناحیه آسیب و شناسایی پارامترهای شکست خواهد داشت.

2- روش اجزاء محدود توسعه‌یافته

روش اجزاء محدود توسعه‌یافته طبیعت تکین بودن مدل‌های گسسته درون شبکه هندسی پیوسته اجزاء محدود را شبیه‌سازی می‌کنند. در مقایسه با روش اجزاء محدود استاندارد، روش اجزاء محدود توسعه‌یافته که بر پایه مفهوم جزءبندی واحد استوار است، برای برطرف کردن نواقص روش اجزاء محدود استاندارد در تحلیل مسأله رشد ترک و همچنین برای نمایش و محاسبات مربوط به ناپیوستگی موجود در دامنه و رفع تکین‌بودن تنش در منطقه نوک ترک از عمل غنی‌سازی استفاده می‌کند. غنی‌سازی در اجزاء محدود توسعه‌یافته برای ترک به دو روش انجام می‌شود. به‌طور کلی گره‌های ناشی از بدنه و سطح ترک به‌وسیله تابع پله واحد¹² غنی‌سازی شده و گره‌هایی که در محل قرار گرفتن نوک ترک هستند به‌وسیله تابع تکینه¹³ غنی می‌شوند. در واقع با اضافه کردن توابع غنی‌ساز درجه آزادی گره‌های موجود در دامنه اجزاء محدود افزایش می‌یابند.

9- Partition of Unity Finite Element Method (PUFEM)

10- Interaction Integral

11- Finite element over deterministic method

12- Heavy side function

13- Singular function

1- Level set method

2- Meshless or element-free method

3- The Cohesive Zone Model (CZM)

4- Fracture Process Zones (FPZ)

5- Cohesive traction-separation law (softening law)

6- Scaled Boundary Finite Element (SBFEM)

7- Virtual Crack Closure-integral Method or Technique (VCCM or VCCT)

8- Modified Crack Closure Technique (MCCT)

در رابطه (7)، r و θ معرف موقعیت گره در مختصات قطبی نسبت به مختصات محلی نوک ترک است. در نهایت نمایش کلی غنی‌سازی گره‌ای در روش اجزاء محدود توسعه‌یافته در شکل 2 ارائه شده است. از این رو در حل مسأله ترک با تفکیک ناحیه حل به نواحی مختلف، حل تقریبی میدان جابه‌جایی را می‌توان به صورت رابطه (8) بیان کرد [24,25].

$$u^h(x) = u^S + u^H + u^T \quad (8)$$

که در آن u^S میدان جابه‌جایی اجزاء محدود استاندارد، u^H میدان جابه‌جایی گره‌های شامل سطح ترک و u^T میدان جابه‌جایی گره‌های اطراف نوک ترک است که به صورت رابطه (9) تعریف خواهند شد.

$$u^h(x) = \sum_{i \in \Omega_S} N_i(x) u_i + \sum_{i \in \Omega_H} N_i(x) H(x) a_i + \sum_{i \in \Omega_T} \left[N_i(x) \sum_{j=1}^4 \psi_j(x) b_{ij} \right] \quad (9)$$

که در آن ناحیه Ω_S متعلق به تمامی گره‌های مدل المان محدود بوده، $N_i(x)$ نیز توابع شکل استاندارد و u_i درجات آزادی استاندارد گره i ام است. زیر ناحیه‌های Ω_H و Ω_T نیز به ترتیب شامل گره‌های غنی‌شده با تابع پله واحد $H(x)$ و توابع تکنیک $\psi_j(x)$ بوده و a_i و b_{ij} نیز به ترتیب درجات آزادی اضافه شده به گره‌های متأثر از سطح ترک و نوک ترک است. در نهایت با استفاده از گسسته‌سازی و فرمول‌بندی ضعیف اجزاء محدود¹ و براساس روش گلرکین در نهایت شکل گسسته دسته روابط تعادل به صورت رابطه (10) بیان خواهد شد.

$$\sum_e K_{ij}^e d_j^e = \sum_e f_i^e \quad (10)$$

در این رابطه K_{ij}^e ، f_i^e و d_j^e به ترتیب معرف ماتریس سختی، بردار مقادیر جابه‌جایی گره‌ای و بردار مقادیر نیروی گره‌ای المان² نمونه e است که از روابط (11-13) به دست می‌آیند [25,26]:

$$K_{ij}^e = \begin{bmatrix} K_{ij}^{uu} & K_{ij}^{ua} & K_{ij}^{ub} \\ K_{ij}^{au} & K_{ij}^{aa} & K_{ij}^{ab} \\ K_{ij}^{bu} & K_{ij}^{ba} & K_{ij}^{bb} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$d_j^e = \{u \quad a \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4\}^T \quad (12)$$

$$f_i^e = \{f_i^u \quad f_i^a \quad f_i^{b_1} \quad f_i^{b_2} \quad f_i^{b_3} \quad f_i^{b_4}\}^T \quad (13)$$

زیرماتریس‌های ماتریس سختی و پارامترهای مختلف آن و نیز مؤلفه‌های بردار نیرو نیز از روابط (14-21) به دست خواهند آمد.

$$K_{ij}^{\alpha\beta} = \int_{\Omega^e} (B_i^\alpha)^T D B_j^\beta d\Omega; \alpha, \beta = u, a, b \quad (14)$$

$$B_i^u = \begin{bmatrix} (N_i)_x & 0 \\ 0 & (N_i)_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B_i^a = \begin{bmatrix} (H N_i)_x & 0 \\ 0 & (H N_i)_y \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B_i^b = [B_i^{b_1} \quad B_i^{b_2} \quad B_i^{b_3} \quad B_i^{b_4}] \quad (17)$$

$$B_i^{b_j} = \begin{bmatrix} (\psi_j N_i)_x & 0 \\ 0 & (\psi_j N_i)_y \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$f_i^u = \int_{\Gamma_t} (N_i)^T \bar{t} d\Gamma + \int_{\Omega^e} (N_i)^T b d\Omega \quad (19)$$

$$f_i^a = \int_{\Gamma_t} (H N_i)^T \bar{t} d\Gamma + \int_{\Omega^e} (H N_i)^T b d\Omega \quad (20)$$

$$f_i^{b_j} = \int_{\Gamma_t} (\psi_j N_i)^T \bar{t} d\Gamma + \int_{\Omega^e} (\psi_j N_i)^T b d\Omega \quad (21)$$

برای توصیف موقعیت سطح ترک و جبهه ترک به ترتیب از دو مجموعه تراز نرمال $\phi(x)$ و مماسی ψ استفاده می‌شود که مقادیر نظیر این توابع تراز به ترتیب برای گره‌های واقع بر سطح ترک و جبهه ترک برابر صفر است [22]. مطابق شکل 1، با تغییر علامت توابع تراز فاصله در ارتباط با گره‌های مختلف یک المان نمونه، امکان و نیز نوع غنی‌سازی گره‌های آن المان مشخص خواهد شد. اگر سطح ترک با Γ معرفی شود، x_T تصویر نرمال نقطه دلخواه x در امتداد Γ و نیز بردار نرمال وارد بر آن باشد، در این صورت تابع تراز $\phi(x)$ به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$\phi(x) = \min(\|x - x_T\|) \text{sign}(\hat{n} \cdot (x - x_T)) \quad (1)$$

تابع تراز $\psi(x)$ عمود بر تابع تراز نرمال بوده و به صورت مشابه و فقط در موقعیت نوک ترک تعریف می‌شود؛ بنابراین موقعیت هر نقطه دلخواه نسبت به نوک ترک در مختصات قطبی به صورت روابط (2,3) تعریف خواهد شد.

$$r = \sqrt{\phi^2 + \psi^2} \quad (2)$$

$$\theta = \tan(\phi/\psi) \quad (3)$$

در روش اجزاء محدود توسعه‌یافته از همان توابع شکل استاندارد استفاده شده و تنها درجات آزادی گره‌های اطراف ترک افزایش یافته که به آن غنی‌سازی گره‌ای گفته می‌شود. این کار با اعمال توابع خاص و از طریق اصل تفکیک پیوستگی امکان‌پذیر است. براساس این اصل مجموع مقادیر توابع شکل، در هر نقطه داخلی یا مرزی و حتی خود گره‌ها برابر واحد، به صورت رابطه (4)، است.

$$\sum_{i \in \Gamma} N_i = 1 \quad (4)$$

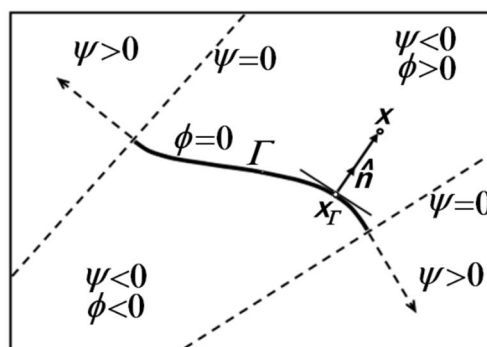
حال با ضرب تابع دلخواه $\chi(x)$ در طرفین این رابطه و براساس اصل تفکیک پیوستگی، رابطه (5)، داریم.

$$\sum_{i \in \Gamma} N_i \chi(x) = \chi(x) \quad (5)$$

بنابراین طبق رابطه (2) در محدوده داخلی هر المان می‌توان تابع ψ را به شکل دلخواه اعمال کرد و این کلید اصلی ورود به المان محدود توسعه‌یافته براساس اصل تفکیک پیوستگی است. غنی‌سازی یا افزایش درجات آزادی گره‌ها به صورت موضعی و در موقعیت ناپیوستگی‌ها انجام می‌شود. غنی‌سازی گره‌های متأثر از سطح ترک توسط توابع ناپیوسته پله واحد صورت می‌گیرد که در این حالت ترک به طور کامل از میانه المان عبور کرده و آن را به دو ناحیه مختلف تقسیم می‌کند. غنی‌سازی گره‌های اطراف نوک ترک نیز توسط توابع تکنیک انجام می‌شود. این توابع غنی‌ساز به صورت روابط (6,7) تعریف می‌شوند [23].

$$H(\text{sign}(\phi(x))) = \begin{cases} +1, & \phi(x) > 0 \\ -1, & \phi(x) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$[\psi_{j=1-4}] = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (7)$$



شکل 1 نمایش توابع تراز نرمال و مماسی نسبت به موقعیت ترک

1- Weak finite element formulation

2- Element stiffness matrix, nodal displacement vector, and nodal force vector

$$= f_0 A_0 + \sum_{n=1}^N A_n f_n^I(r, \theta) + \sum_{n=1}^M B_n f_n^{II}(r, \theta) \quad (23)$$

$$u_y = v = \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{2\mu} r^{n/2} \left\{ \left(\kappa - \frac{n}{2} - (-1)^n \right) \sin \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right\} + \sum_{n=0}^M \frac{B_n}{2\mu} r^{n/2} \left\{ \left(\kappa - \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right\} \\ = g_0 B_0 + \sum_{n=1}^N A_n g_n^I(r, \theta) + \sum_{n=1}^M B_n g_n^{II}(r, \theta) \quad (24)$$

که در این معادلات u و v به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستای محورهای x و y است. همچنین در روابط (25,26) داریم.

$$\mu = E/2(1 + \nu) \quad (25)$$

$$\kappa = \begin{cases} 3 - 4\nu, & \text{کرنش صفحه‌ای} \\ (3 - \nu)/(1 + \nu), & \text{تنش صفحه‌ای} \end{cases} \quad (26)$$

که در آن κ ثابت کولوسو⁸، μ مدول برشی⁹، E مدول یانگ¹⁰، ν ضریب پواسون¹¹ و f و g توابع تعریف‌شده در مختصات قطبی (r, θ) هستند. با در نظر گرفتن $n = 0$ ، مؤلفه‌های جابه‌جایی به شکل روابط (28,27) به دست می‌آیند.

$$u_0 = \frac{\kappa + 1}{2\mu} = f_0 A_0 \quad (27)$$

$$v_0 = \frac{\kappa + 1}{2\mu} = g_0 B_0 \quad (28)$$

که مستقل از موقعیت نقاط اطراف نوک شکاف بوده و به عنوان جابه‌جایی‌های صلب¹² شکاف لحاظ می‌شوند. همچنین بازای $n = 0$ ، مؤلفه‌های جابه‌جایی در مود II به شکل روابط (30,29) به دست می‌آیند.

$$u = -\frac{\kappa + 1}{2\mu} B_2 r \sin \theta = -\frac{\kappa + 1}{2\mu} B_2 y = \varphi y \quad (29)$$

$$v = \frac{\kappa + 1}{2\mu} B_2 r \cos \theta = \frac{\kappa + 1}{2\mu} B_2 x = -\varphi x \quad (30)$$

که در آن x و y مختصات کارتزین هستند. به راحتی می‌توان نشان داد با در نظر گرفتن $\varphi = -(\kappa + 1)B_2/2\mu$ ، ترم B_2 به طور مستقیم به دوران صلب شکاف¹³ وابسته است؛ بنابراین جابه‌جایی‌های صلب شکاف وابسته به ضرایب A_0 و B_0 و دوران صلب آن نیز نسبت به نوک شکاف وابسته به ضریب B_2 است. بزرگی دوران صلب شکاف با φ نشان داده می‌شود که برابر است با زاویه بین نیم‌ساز شکاف پس و پیش از تغییر شکل. دوران صلب شکاف و جابه‌جایی‌های صلب آن در شکل 3 نشان داده شده است [21].

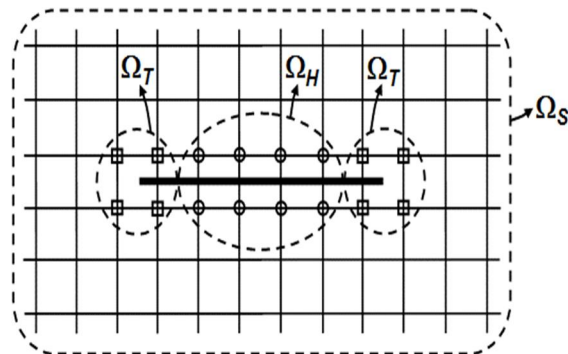
روش فرامعین برای به دست آوردن ضرایب مجهول در میدان جابه‌جایی به کار می‌رود به این صورت که تعداد زیادی گره در اطراف نوک شکاف انتخاب شده و موقعیت و جابه‌جایی گره‌ها در معادله میدان جابه‌جایی جای گذاری می‌شود و یک مجموعه از معادلات با در نظر گرفتن k گره نزدیک نوک شکاف به دست می‌آیند که در شکل ماتریسی می‌توان این معادلات را به صورت روابط (31-33) نوشت [21]:

$$[u]_{2k+1} = [C]_{2k \times (N+M+2)} [x]_{(N+M+2) \times 1} \quad (31)$$

$$[u]^T = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_k \ v_1 \ v_2 \ \dots \ v_k] \quad (32)$$

$$[x]^T = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_N \ B_1 \ B_2 \ \dots \ B_M \ A_0 \ B_0 \ B_2] \quad (33)$$

در این رابطه $[u]$ بردار جابه‌جایی‌های هر گره در راستای محورهای x و y پس از اعمال بار، برداری است معلوم و از تحلیل اجزاء محدود استاندارد و یا توسعه‌یافته به دست می‌آید، $[x]$ بردار ضرایب مجهول و $[C]$ نیز ماتریس ضرایب معلوم است که در رابطه (34) ارائه شده است.



شکل 2 نمایش کلی غنی سازی گره‌ای مدل المان محدود: O غنی سازی به وسیله تابع پله واحد غنی سازی به وسیله تابع تکینه

در این روابط B_i^α ($\alpha = u, a, b$) معرف ماتریس کرنش-جابه‌جایی¹، D نیز ماتریس خواص ماده، \bar{t} نیروی سطحی² وارد بر مرز Γ_t از جسم و b نیز سهم نیروی حجمی³ وارد بر المان است.

3- مفهوم ضریب شدت تنش

در تحلیل مسایل مکانیک شکست مواد ترد و شبه ترد تعیین دقیق ضرایب شدت تنش K (MPa \sqrt{m}) کمک شایانی به شناسایی میدان تنش الاستیک در حوالی نوک ترک خواهد کرد. اروین [27] مفهوم ضریب شدت تنش را به عنوان وسیله‌ای برای سنجش مقدار تکینگی میدان تنش در یک جسم ترک‌دار معرفی کرد. او نشان داد در یک جسم ترک‌دار و با فرض ناچیز بودن اندازه ترک، ضریب شدت تنش از طریق رابطه $K \propto \sigma \sqrt{\pi r}$ ، کمیتی برای کنترل تنش محلی در اطراف نوک ترک است. اروین [27] و ویلیامز [28] نشان دادند برای یک جسم ایزوتروپ دوبعدی در حالت شکست مود ترکیبی براساس رابطه (22) می‌توان وضعیت تنش را در اطراف نوک ترک مشخص کرد.

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{II}(\theta) + T \delta_{1i} \delta_{1j} + O(r^{1/2}) \quad (22)$$

در این رابطه σ_{ij} مؤلفه‌های تنش، K_I و K_{II} به ترتیب ضرایب شدت تنش در ارتباط با مود اول شکست یا مود بازشدگی⁴ و مود دوم شکست یا مود لغزش صفحه‌ای⁵ و فاکتور تنش T نیز معرف ترم مرتبه دوم و غیرتکین میدان تنش است [29].

4- روش فرامعین اجزاء محدود توسعه‌یافته⁶

در روش فرامعین اجزاء محدود توسعه‌یافته با استفاده از تعداد زیادی داده در پاره‌ای از نقاط، مجموعه‌ای کوچک از ضرایب مجهول محاسبه می‌شود. در این روش ضرایب مجهول بسط سری ویلیامز مرتبط با میدان مجانبی نوک یک شکاف V شکل⁷ با استفاده از مؤلفه جابه‌جایی که به طور مستقیم از تحلیل اجزاء محدود توسعه‌یافته به دست می‌آیند، تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن N ترم مجانبی نوک شکاف از مود I و M ترم مجانبی نوک شکاف از مود II ، حل جابه‌جایی در اطراف نوک شکاف به شکل روابط (23,24) بیان می‌شود [30,31]:

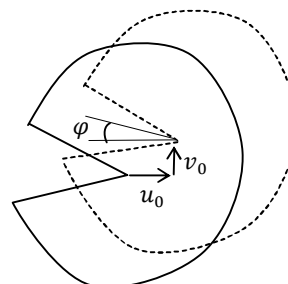
$$u_x = u = \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{2\mu} r^{n/2} \left\{ \left(\kappa + \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right\} + \sum_{n=0}^M \frac{B_n}{2\mu} r^{n/2} \left\{ \left(-\kappa - \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \sin \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right\}$$

- 1- Strain-displacement matrix
- 2- Surface traction vector
- 3- Element body force vector
- 4- Mode I (opening mode)
- 5- Mode II (sliding mode)
- 6- Extended finite element overdeterministic method (XFEOD)
- 7- V-notch tip asymptotic displacement field

8- Kolosov constant
9- Shear modulus
10- Young's modulus
11- Poisson's ratio
12- Crack Rigid body displacements
13- Notch rigid body rotation

$$[C] = \begin{Bmatrix} f_1^I(r_1, \theta_1) f_2^I(r_1, \theta_1) \dots f_N^I(r_1, \theta_1) f_1^{II}(r_1, \theta_1) f_3^{II}(r_1, \theta_1) \dots f_M^{II}(r_1, \theta_1) f_0 f_2^{II}(r_1, \theta_1) \\ f_1^I(r_2, \theta_2) f_2^I(r_2, \theta_2) \dots f_N^I(r_2, \theta_2) f_1^{II}(r_2, \theta_2) f_3^{II}(r_2, \theta_2) \dots f_M^{II}(r_2, \theta_2) f_0 f_2^{II}(r_2, \theta_2) \\ \vdots \\ f_1^I(r_k, \theta_k) f_2^I(r_k, \theta_k) \dots f_N^I(r_k, \theta_k) f_1^{II}(r_k, \theta_k) f_3^{II}(r_k, \theta_k) \dots f_M^{II}(r_k, \theta_k) f_0 f_2^{II}(r_k, \theta_k) \\ g_1^I(r_1, \theta_1) g_2^I(r_1, \theta_1) \dots g_N^I(r_1, \theta_1) g_1^{II}(r_1, \theta_1) g_3^{II}(r_1, \theta_1) \dots g_M^{II}(r_1, \theta_1) 0 g_0 g_2^{II}(r_1, \theta_1) \\ g_1^I(r_2, \theta_2) g_2^I(r_2, \theta_2) \dots g_N^I(r_2, \theta_2) g_1^{II}(r_2, \theta_2) g_3^{II}(r_2, \theta_2) \dots g_M^{II}(r_2, \theta_2) 0 g_0 g_2^{II}(r_2, \theta_2) \\ \vdots \\ g_1^I(r_k, \theta_k) g_2^I(r_k, \theta_k) \dots g_N^I(r_k, \theta_k) g_1^{II}(r_k, \theta_k) g_3^{II}(r_k, \theta_k) \dots g_M^{II}(r_k, \theta_k) 0 g_0 g_2^{II}(r_k, \theta_k) \end{Bmatrix}_{2k \times (M+N+2)} \quad (34)$$

شده نوسان نداشته باشد؛ بنابراین جواب‌ها باید مستقل از تعداد گره‌ها بوده و به عبارتی با افزایش تعداد گره‌ها نباید تغییر محسوسی به‌لحاظ دقت در جواب‌ها حاصل شود. نمونه‌هایی که در ادامه ارائه می‌شود به‌ازای زاویه شکاف برابر صفر و برای نمونه‌های دوبعدی و با وجود ترک میانی یا لبه‌ای است. شایان یاد است در نمونه‌های حل‌شده جهت تبدیل مسأله شکاف به مسأله ترک، زاویه شکاف صفر لحاظ شده است.



شکل 3 نمایش سه مؤلفه جابه‌جایی صلب نوک شکاف [21]

5- نتایج آنالیز فرامعین اجزاء محدود توسعه‌یافته

در این بخش نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های ترک‌دار آورده شده است. در ابتدا برای احراز درستی نتایج حاصل از محاسبات عددی به روش اجزاء محدود توسعه‌یافته، نتایج حاصل از حل تحلیلی نیز ارائه می‌شود. رابطه (37) رابطه تحلیلی نظیر ضریب شدت تنش را در صفحه‌ای با ابعاد $2w \times 2h$ نشان می‌دهد که در آن مقدار $f(a/w)$ برای حالت ترک میانی و لبه‌ای به‌ترتیب در روابط (38، 39) معرفی شده است [32]. پارامترهای هندسی ورق شامل ترک میانی و لبه‌ای به‌ترتیب در شکل‌های 4-الف و 4-ب نشان داده شده است.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/w) \quad (37)$$

$$f(a/w) = 1 - 0.025(a/w)^2 + 0.06(a/w)^4 \sqrt{\sec \pi a/2w} \quad (38)$$

$$f(a/w) = 1.22 - 0.231(a/w) + 10.550(a/w)^2 - 21.710(a/w)^3 + 30.382(a/w)^4 \quad (39)$$

با استفاده از روش فرامعین ضرایب بسط سری ویلیامز محاسبه شده و به کمک این ضرایب و با استفاده از روابط (40-42)، ضرایب شدت تنش برای مود اول و دوم و فاکتور تنش T برای ترک محاسبه خواهند شد.

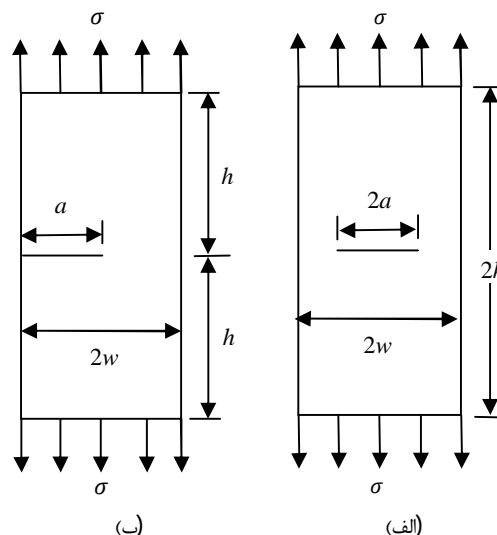
$$K_I = \sqrt{2\pi} A_1 \quad (40)$$

$$K_{II} = -\sqrt{2\pi} B_1 \quad (41)$$

$$T = 4 A_2 \quad (42)$$

مطالعات اخیر نشان می‌دهد ترم‌های مراتب بالاتر غیر صفر در بسط ویلیامز می‌توانند نقش مهمی در فرایند رشد ترک ایفا کنند. به‌ویژه نخستین ترم غیر صفر در بسط ویلیامز ($n=2$) یا همان فاکتور تنش T اثرات زیادی در شکست ترد و شبه ترد دارد. فاکتور تنش T می‌تواند بر سائز و شکل ناحیه آسیب و منطقه پلاستیک نوک ترک [31]، پایداری مسیر رشد ترک [33] و به‌طور مسلم روی چقرمگی شکست [34,35] اثر گذارد. کاریه‌الو [36] نشان داد ترم‌های مراتب بالاتر ترک ($n \geq 3$) نیز می‌توانند به همان اندازه بر شکست ترد مواد شبه ترد نقش داشته باشند. همچنین تحقیقات نشان داد دومین ترم غیر صفر ($n=3$) به‌طور قابل توجهی بر رفتار شکست ورق با ترک کوتاه لبه‌ای و میانه تأثیر گذار است [37].

آیت‌اللهی و همکاران [38] نشان دادند نخستین ترم غیر صفر تنش در مواد دو جنسی با شکاف تیز (یا به اصطلاح فاکتور تنش T) ممکن است نقش زیادی در میدان تنش در اطراف نوک شکاف داشته باشد؛ بنابراین به‌طور قابل توجهی بر رفتار شکست و خستگی اجسام دو جنسی شکاف‌دار اثر می‌گذارد. در نتیجه یافتن راه حل مناسب برای محاسبه ضرایب ترم‌های مراتب بالاتر بسیار مفید است. محاسبه ضرایب مراتب بالاتر به روش تحلیلی فقط برای چند نمونه ساده امکان‌پذیر است؛ بنابراین استفاده از تکنیک‌های عددی برای



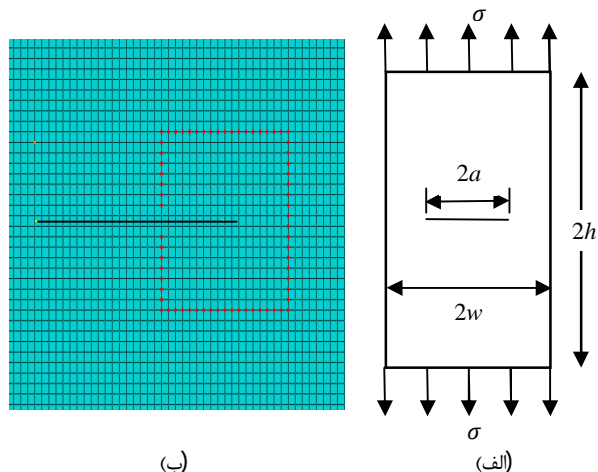
شکل 4 مشخصات هندسی الف- ترک در وسط صفحه ب- ترک در لبه صفحه

علاوه‌بر این برای دستیابی به یک حل دقیق و قابل قبول تعداد گره‌های انتخابی اطراف نوک شکاف باید به اندازه کافی زیاد بوده و در عین حال به‌گونه‌ای باشد که نامساوی $2k > 2N + 2M + 1$ را ارضا کند. برای یافتن ماتریس ضرایب مجهول، دو طرف معادله (31) را در $[C]^T$ ضرب کرده و با استفاده از روش حداقل مربعات، بردار $\{x\}$ به کمک روابط (35,36) محاسبه می‌شود.

$$[C]^T \{u\} = [C]^T [C] \{x\} \quad (35)$$

$$\{x\} = ([C]^T [C])^{-1} [C]^T \{u\} \quad (36)$$

در روش اجزاء محدود در موقعیت نوک شکاف باید المان تکیه تعریف شود تا با فیزیک مسأله سازگار باشد، ولی وجود تکنیکی، خطای عددی را بالا می‌برد. روش ارائه‌شده در این مقاله تلفیقی از روش‌های تحلیلی و عددی حاصل از روش اجزاء محدود توسعه‌یافته است. به عبارتی ابتدا میدان جابه‌جایی از رابطه (10) و براساس روش اجزاء محدود توسعه‌یافته به‌دست آمده و در نهایت از رابطه (36) ضرایب مجهول بسط سری ویلیامز تعیین شده است. در حل نرم‌افزاری به کمک نرم‌افزار آباکوس نیز پس از مدل‌سازی، نتایج به روش فرامعین تعیین شده است. برای کاهش خطای محاسباتی نوک شکاف را در محاسبات لحاظ نکرده و مقداری از نوک شکاف فاصله می‌گیریم؛ این فاصله باید به قدری باشد که جواب‌ها تغییر نکرده و نسبت به تعداد گره‌های انتخاب



شکل 5 نمایش الف - ترک در وسط صفحه تحت نیروی کششی ب - حلقه 9ام اطراف ترک

درصد خطای حاصل از حل نرم‌افزاری متلب و آباکوس در مقایسه با فعالیت سایر محققین در جدول 1 ارائه شده است. لازم به یاد است درصد خطای محاسبه شده از حل نرم‌افزاری متلب و آباکوس به صورت رابطه (43) تعریف شده است [39]:

$$\text{درصد خطا} = \left| \frac{\text{مقدار مرجع} - \text{مقدار محاسبه شده}}{\text{مقدار مرجع}} \right| \times 100 \quad (43)$$

برای نمونه برای حالت $a/w = 0.2, h/w = 1$ ، جواب‌هایی که در جدول 1 ارائه شده است با در نظر گرفتن 17689 المان سازه‌ای و در حلقه 9ام (مطابق شکل 5-ب) به دست آمده است. همان‌طور که جدول 1 نشان می‌دهد، بیشترین درصد خطا در آباکوس برابر 0/9823% نسبت به مرجع [40] و بیشترین درصد خطا در متلب برابر 0/8206% نسبت به مراجع [32,40] است. لازم به یاد است در مرجع [39] نتایج پنج حالت مختلف شبکه‌بندی المان محدود در موقعیت نوک ترک برای محاسبه ضرایب شدت تنش و فاکتور تنش T ارائه شده است که از میان این پنج حالت به عنوان نمونه نتایج دو حالت خاص برای مقایسه انتخاب شده است. در ادامه به ازای مقادیر مختلف a/w و h/w مقادیر محاسبه شده T/σ از حل نرم‌افزاری متلب و آباکوس در جدول 2 ارائه و با نتایج سایر محققین مقایسه شده است. در جدول 3 نیز درصد خطای حاصل از حل نرم‌افزاری متلب و آباکوس نیز مطابق رابطه (43) با نتایج سایر محققین مقایسه شده است. این نتایج بیشترین درصد خطا در آباکوس را برابر 2/4523% نسبت به حالت 2 از مرجع [39] و بیشترین درصد خطا در متلب را برابر 2/3851% نسبت به حالت 2 از مرجع [39] نشان می‌دهد.

5-2- ترک لبه‌ای زاویه‌دار در صفحه تحت نیروی کششی

در این نمونه صفحه‌ای شامل ترک لبه‌ای زاویه‌دار در نظر گرفته می‌شود که در میدان بارگذاری ترکیبی قرار می‌گیرد (شکل 6-الف). مشخصات مادی و هندسی مدل استفاده شده در نرم‌افزارهای متلب و آباکوس چنین است. مدول الاستیسیته $E = 1 \text{ MPa}$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.25$ ، مقدار تنش کششی وارده $\sigma = 1 \text{ MPa}$ ، طول ترک $a = 0.3 \text{ mm}$ ، زاویه ترک نسبت به امتداد اعمال بار $\beta = 45^\circ$ و با فرض تنش صفحه‌ای (ضخامت ناچیز ورق) حل مسئله دنبال شده و نتایج در جداول 4 و 5 ارائه شده است. برای نمونه برای حالت $a/w = 0.3$ و $h/w = 1$ با در نظر گرفتن 12250 المان سازه‌ای و در حلقه 5ام و 6ام و براساس شکل 6-ب جواب‌ها به دست آمده و در جدول 4 ارائه شده است.

مسائل پیچیده شکاف اجتناب‌ناپذیر است.

روش تحلیلی ارائه شده براساس توابع پتانسیل مختلط توسط ایزیدا [40] فقط برای شرایط مرزی و بارگذاری خاص مورد استفاده است. در مرجع [41] انتگرال متقابل T به صورت عددی و از طریق نرم‌افزار آباکوس تعیین و به کمک آن فاکتور تنش T محاسبه شده است. چن و وانگ [42] نیز از روش برون‌یابی جابه‌جایی² و با مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار انسیس³ ضرایب شدت تنش را به صورت عددی محاسبه کردند. فت [43] فاکتور تنش T را به صورت تابع گرین⁴ بیان کرده و ضرایب وزنی آن را با اعمال شرایط فیزیکی و مرزی حاکم بر مسئله تعیین کرد. این روش نیز مقید به شرایط مرزی و بارگذاری خاص است. در مراجع [44,45] نیز از طریق روش همپوشان مرزی المان محدود، پارامترهای شکست تعیین شده است. تی سنگ [46] روش المان فوق تکیه⁵ را برای تعیین فاکتور تنش T معرفی کرد. کیم و چو [47] فاکتور تنش T را به کمک روش عددی انتگرال کانتور کار متقابل⁶ و از طریق میدان‌های جابه‌جایی و تنش تعیین کرده و اثر آن را بر ناحیه آسیب در همسایگی نوک ترک مطالعه کردند. این کار در محیط نرم‌افزاری انسیس و با حضور المان‌های تکیه در نوک ترک انجام شد. ژائو و هان [48] پارامترهای شکست شکاف V شکل را از طریق پارامترهای شکست ترک در حالت مود ترکیبی تعیین کردند. ترافی و همکاران [49] از یک روش اجزاء محدود⁷ و با توابع میان‌یاب کلی پارامترهای شکست نمونه‌های شکاف‌دار را تعیین کردند.

در تحقیق حاضر، به‌ازای تمامی حالت‌های بارگذاری و انواع مختلف شرایط مرزی می‌توان ضرایب شدت تنش و ترم‌های مرتبه بالای شکست را در نمونه‌های ترک‌دار و از طریق روش فرامعین اجزاء محدود توسعه‌یافته و با انتخاب مناسبی از حلقه‌های حل گره‌ای در اطراف نوک ترک، یافت. شایان ذکر است روش فرامعین و روش همپوشان مرزی⁸ ارائه شده در [21] بر مبنای روش اجزاء محدود است ولی تلفیق روش فرامعین و روش کارآمد اجزاء محدود توسعه‌یافته برای نخستین بار در این تحقیق ارائه شده است. نمونه‌هایی که در ادامه برای احراز صحت روش این تحقیق دنبال می‌شود در نرم‌افزارهای آباکوس و متلب به صورت دوبعدی مدل شده و نتایج به دست آمده همراه با نتایج موجود در مقالات و کتاب‌های مرجع در جداول مربوطه مقایسه شده است. در این پژوهش برای یافتن ضرایب مجهول و حل ماتریسی به روش فرامعین از برنامه‌نویسی متلب استفاده شده است.

5-1- ترک در وسط صفحه تحت نیروی کششی

ابتدا برای صفحه‌ای شامل ترک میانی نتایج دنبال شده است (شکل 5-الف). برای نمایش حلقه حل به روش فرامعین، فقط قسمتی از مدل المان محدود آن در شکل 5-ب نشان داده شده است. مشخصات این ورق در نرم‌افزار آباکوس و نیز برنامه متلب بدین ترتیب در نظر گرفته شده است؛ مدول الاستیسیته این ورق برابر $E = 30 \text{ GPa}$ ، ضریب پواسون آن $\nu = 0.3$ ، مقدار تنش کششی اعمال شده $\sigma = 1 \text{ MPa}$ ، نصف طول ترک $a = 0.2 \text{ mm}$ و با فرض تنش صفحه‌ای (ضخامت ناچیز ورق) حل مسئله دنبال شده است. با در نظر گرفتن ابعاد ورق به صورت $2w \times 2h$ ، به ازای مقادیر مختلف a/w و h/w مقادیر محاسبه شده $K_I/\sigma\sqrt{\pi a}$ از حل نرم‌افزاری متلب و آباکوس با نتایج سایر محققین در جدول 1 مقایسه شده است.

- 1- Interaction Integral
- 2- Limited displacement extrapolation technique (LDET)
- 3- Ansys Software
- 4- Green's function representation
- 5- Super singular element method (SSEM)
- 6- The reciprocal work contour integral method (RWCIM)
- 7- The fractal-like finite element method (FFEM)
- 8- Boundary collocation method

جدول 1 مقادیر $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ و درصد خطا

| درصد خطا | | | | درصد خطا | | درصد خطا | | حل نرم‌افزاری | | جوگداند | | ایزیدا | مرجع | a_w | h_w |
|----------------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------------|--------|---------------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|
| نسبت به جوگداند [39] | | | | نسبت به ایزیدا | | نسبت به مرجع | | | | [39] | | [40] | [32] | | |
| حالت 4 | | حالت 2 | | [40] | | [32] | | | | | | | | | |
| متلب | | آباکوس | | آباکوس | | متلب | | آباکوس | | متلب | | حالت 4 | حالت 2 | | |
| 0/6535 | 0/0947 | 0/6441 | 0/0852 | 0/5782 | 0/0189 | - | - | 1/0489 | 1/0548 | 1/0558 | 1/0557 | 1/0550 | - | 0/2 | |
| 0/3041 | 0/2055 | 0/3288 | 0/1808 | 0/3454 | 0/1644 | - | - | 1/2202 | 1/2140 | 1/2165 | 1/2162 | 1/2160 | - | 0/4 | 1/0 |
| 0/5941 | 0/0675 | 0/5807 | 0/0540 | 0/5874 | 0/0607 | - | - | 1/4723 | 1/4801 | 1/4811 | 1/4809 | 1/4810 | - | 0/6 | |
| 0/1951 | 0/0195 | 0/1853 | 0/0292 | 0/1951 | 0/0195 | 0/1464 | 0/0683 | 1/0230 | 1/0252 | 1/0250 | 1/0249 | 1/0250 | 1/0245 | 0/2 | |
| 0/8198 | 0/7388 | 0/7110 | 0/6300 | 0/9017 | 0/8206 | 0/9018 | 0/8206 | 1/1190 | 1/1181 | 1/1099 | 1/1111 | 1/1090 | 1/1090 | 0/4 | 3/0 |
| 0/8971 | 0/6287 | 0/8816 | 0/6133 | 0/9823 | 0/7137 | 0/9288 | 0/7369 | 1/3158 | 1/3123 | 1/3041 | 1/3043 | 1/3030 | 1/3027 | 0/6 | |

جدول 2 مقادیر T/σ برای حالت‌های مختلف نسبت h/w

| حل نرم‌افزاری | | جوگداند [39] | | فت [43] | چن و وانگ [42] | وانگ [41] | a/w | h/w |
|---------------|---------|--------------|---------|---------|----------------|-----------|-------|-------|
| حالت 4 | حالت 2 | حالت 4 | حالت 2 | | | | | |
| -1/0894 | -1/0802 | -1/0642 | -1/0648 | -1/0750 | -1/0770 | - | 0/2 | |
| -1/2393 | -1/2453 | -1/2505 | -1/2539 | -1/2600 | -1/2650 | - | 0/4 | 1/0 |
| -1/5730 | -1/5754 | -1/5405 | -1/5387 | -1/5500 | -1/5590 | - | 0/6 | |
| -1/0190 | -1/0230 | -1/0208 | -1/0226 | - | -1/0280 | -1/0290 | 0/2 | |
| -1/1290 | -1/1352 | -1/1315 | -1/1301 | - | -1/1410 | -1/1390 | 0/4 | 3/0 |
| -1/4664 | -1/4598 | -1/4372 | -1/4313 | - | -1/4550 | -1/4480 | 0/6 | |

جدول 3 درصد خطای T/σ

| درصد خطا | | درصد خطا | | درصد خطا | | درصد خطا نسبت به وانگ | | a/w | h/w |
|----------------------|--------|-----------------|--------|------------------------|--------|-----------------------|--------|--------|---------|
| نسبت به جوگداند [39] | | نسبت به فت [43] | | نسبت به چن و وانگ [42] | | [41] | | | |
| حالت 4 | حالت 2 | حالت 4 | حالت 2 | حالت 4 | حالت 2 | حالت 4 | حالت 2 | | |
| 2/3679 | 1/5034 | 2/3102 | 1/4462 | 1/3395 | 0/4837 | 1/1513 | 0/2971 | - | 0/2 |
| 0/8956 | 0/4158 | 1/1643 | 0/6858 | 1/6428 | 1/1666 | 2/0316 | 1/5573 | - | 0/4 1/0 |
| 2/1097 | 2/2655 | 2/2291 | 2/3851 | 1/4838 | 1/6387 | 0/8980 | 1/0519 | - | 0/6 |
| 0/1763 | 0/2155 | 0/3520 | 0/0391 | - | - | 0/8754 | 0/4863 | 0/9718 | 0/2 |
| 0/2209 | 0/3270 | 0/0973 | 0/4512 | - | - | 1/0517 | 0/5083 | 0/8779 | 0/4 3/0 |
| 2/0317 | 1/5725 | 2/4523 | 1/9912 | - | - | 0/7835 | 0/3298 | 1/2707 | 0/6 |

جدول 4 مقادیر نرمال ضرایب شدت تنش و درصد خطای آن برای حالت $h/w = 1$

| درصد خطا | | درصد خطا | | حل نرم‌افزاری | | جوگداند | | ویلسون | | a/w | |
|----------------------|--------|----------------|--------|---------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-----|
| نسبت به جوگداند [39] | | نسبت به ویلسون | | | | [39] | | [44] | | | |
| حالت 4 | | حالت 2 | | [44] | | | | | | | |
| آیاکوس | متلب | آیاکوس | متلب | آیاکوس | متلب | آیاکوس | متلب | حالت 4 | حالت 2 | | |
| 0/2155 | 0/2268 | 0/4075 | 0/0339 | 0/7110 | 0/2708 | 0/8797 | 0/8836 | 0/8816 | 0/8833 | 0/8860 | 0/3 |
| 0/2952 | 0/1869 | 0/4910 | 0/3830 | 0/2264 | 0/1181 | 1/0132 | 1/0143 | 1/0162 | 1/0182 | 1/0155 | 0/4 |
| 0/7574 | 0/0166 | 0/5565 | 0/1827 | 0/7910 | 0/0499 | 1/2105 | 1/2016 | 1/2014 | 1/2038 | 1/2010 | 0/5 |
| 0/8316 | 1/4160 | 1/1499 | 1/7361 | 0/6203 | 0/0443 | 0/4486 | 0/4512 | 0/4449 | 0/4435 | 0/4514 | 0/3 |
| 0/5560 | 0/3574 | 0/8564 | 0/6572 | 0/2971 | 0/0990 | 0/5064 | 0/5054 | 0/5036 | 0/5021 | 0/5049 | 0/4 |
| 0/5340 | 0/4133 | 0/3967 | 0/2760 | 0/4348 | 0/5565 | 0/5775 | 0/5782 | 0/5806 | 0/5798 | 0/5750 | 0/5 |

نمونه در وضعیت مود ترکیبی قرار می‌گیرد.

مطابق نتایج ارائه‌شده در جدول 4، بیشترین درصد خطا در آباکوس برای $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ برابر 0/7910% نسبت به مرجع [44] و بیشترین درصد خطا در متلب برای $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ برابر 0/3830% نسبت به حالت 2 از مرجع [39] است. همچنین بیشترین درصد خطا در آباکوس برای $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ برابر 1/1499% نسبت به حالت 2 از مرجع [39] و بیشترین درصد خطا در متلب برای $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ برابر 1/7361% نسبت به حالت 2 از مرجع [39] است.

در این نمونه، نخست یک حلقه در نظر گرفته شد که جواب مطلوب حاصل نشد، ولی با در نظر گرفتن دو حلقه و با افزایش تعداد نقاط در اطراف نوک ترک جواب‌ها با دقت مطلوبی به دست آمد.

از میان نمونه‌های حل‌شده، این مثال مدل اجزاء محدود مربوطه و نیز تغییر شکل و کانتور تغییرات تنش در محیط نرم‌افزار آباکوس مطابق شکل‌های 6-ج و 6-د نمایش داده شده است. از آنجایی که تنش اعمال شده در موقعیت ترک دارای دو مؤلفه عمودی و مماسی است؛ بنابراین شکست

مقادیر محاسبه شده T/σ نیز برای حالت $h/w = 1$ از حل نرم‌افزاری متلب و آباکوس در جدول ۵ ارائه شده است. از آنجایی که خطای محاسباتی حالت ۴ از مرجع [۳۹] در محاسبه فاکتور تنش T بالا به دست آمده (خطای بیش از ۵۰ درصد)؛ بنابراین شبکه‌بندی برای محاسبه ترم‌های مرتبه بالای بسط سری ویلیامز پیشنهاد نمی‌شود. از این رو در جدول ۵ نتایج حالت ۳ این مرجع مورد مقایسه قرار گرفته است. ملاحظه می‌شود بیشترین درصد خطا در آباکوس برابر ۲/۲۶۶۲٪ نسبت به حالت ۳ از مرجع [۳۹] و بیشترین درصد خطا در متلب نیز برابر ۲/۱۰۴۴٪ نسبت به حالت ۳ از مرجع [۳۹] است.

۵-۳- ترک زاویه دار در وسط صفحه تحت نیروی کششی

در این نمونه صفحه‌ای شامل ترک میانی زاویه دار تحت بارگذاری مود ترکیبی قرار می‌گیرد (شکل ۷-الف). مدلی به شکل ۷-ب و این مشخصات در نرم‌افزارهای متلب و آباکوس مدل شده است: مدول الاستیسیته $E = 1 \text{ MPa}$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.25$ ، تنش کششی $\sigma = 1 \text{ MPa}$ ، نصف طول ترک $a = 0.2 \text{ mm}$ ، زاویه راستای صفحه ترک $\beta = 30^\circ$ و با فرض برقراری شرایط تنش صفحه‌ای (ضخامت ناچیز ورق) برای حالت‌های مختلف نسبت h/w و a/w ، حل مسئله دنبال شده و جواب‌ها در جداول ۶ تا ۸ ارائه شده است.

برای نمونه در حالت $h/w = 2$ و $a/w = 0.2$ و با در نظر گرفتن 16200 المان سازه‌ای و در حلقه ۱۱ام و براساس شکل ۷-ب پاسخ‌ها در جداول ارائه شده است. لازم به یادآوری است که از پنج حالت شبکه‌بندی مطرح شده در مرجع [۳۹]، فقط نتایج حالت ۲ در این مرجع ارائه شده است؛ بنابراین در مقایسه صورت گرفته فقط نتایج این حالت دنبال می‌شود. ملاحظه می‌شود مطابق نتایج به دست آمده بیشترین درصد خطای $K_I/\sigma\sqrt{\pi a}$ در

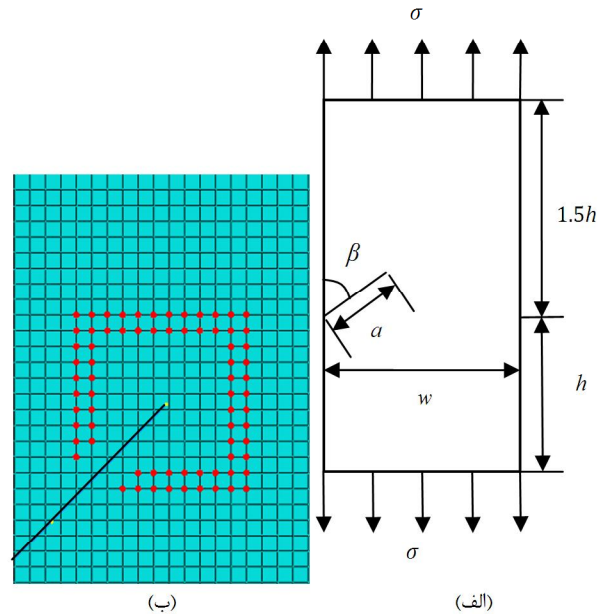
آباکوس برابر ۰/۱۶۵۵٪ نسبت به مرجع [۴۵] و بیشترین درصد خطا در متلب برابر ۰/۱۵۴۹٪ نسبت به حالت ۲ از مرجع [۳۹] است. همچنین بیشترین درصد خطای $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ در آباکوس برابر ۱/۱۰۵۷٪ نسبت به حالت ۲ از مرجع [۳۹] و بیشترین درصد خطا در متلب برابر ۰/۶۱۳۶٪ نسبت به حالت ۲ از مرجع [۳۹] است. مقادیر به دست آمده برای فاکتور تنش T در جدول ۸ ارائه شده است که بیشترین درصد خطا در آباکوس را برابر ۰/۹۰۵۱٪ نسبت به [۴۶] و بیشترین درصد خطا در متلب را برابر ۰/۷۷۸۱٪ نسبت به حالت ۲ از مرجع [۳۹] نشان می‌دهد.

۵-۵- مثال دیگر از ترک زاویه دار در لبه صفحه تحت میدان کششی

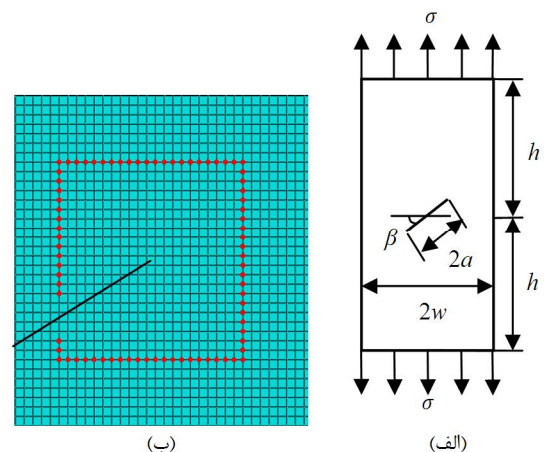
نمونه دیگری که در این بخش دنبال می‌شود در ارتباط با ترک زاویه دار در لبه صفحه است که در میدان تنش کششی قرار گرفته است. از آنجایی که نتایج با مسئله شکاف زاویه دار مورد مطالعه در مرجع [۲۱] مقایسه شده است؛ بنابراین برای مقایسه، در نمونه‌های حل شده زاویه شکاف برابر صفر منظور می‌شود.

در شکل ۸-الف، γ معرف زاویه شکاف و β نیز راستای شکاف را نشان می‌دهد. با تغییر زاویه β سهم مودهای اول و دوم شکست تغییر می‌کند. نتایج آنالیز برای مقادیر مختلف زاویه β ارائه شده است. به ازای $\beta = 0^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$ مدلی به شکل ۸-ب و این مشخصات در نرم‌افزار مدل شده است: مدول الاستیسیته $E = 1 \text{ MPa}$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.25$ ، تنش کششی $\sigma = 1 \text{ MPa}$ ، $a = 0.4 \text{ mm}$ و با فرض مساله تنش صفحه‌ای (ضخامت ناچیز ورق). به حل مسئله پرداخته و جواب‌ها در جدول ۹ ارائه شده است.

برای نمونه در حالت $h/w = 1$ ، $w = 1$ و $\beta = 0^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$ و با در نظر گرفتن 9800 المان سازه‌ای و در حلقه ۹ام و مطابق شکل ۸-ب و نیز با در نظر گرفتن تعداد جملات $M = 0$ و $N = 11$ از بسط سری ویلیامز، جواب‌ها در جدول ۹ ارائه شده است.



شکل ۶ نمایش الف- ترک لبه‌ای در صفحه تحت نیروی کششی، ب- نمایش حلقه‌های ۶ و ۷ اطراف ترک، ج- مدل المان محدود، د- تغییر شکل و کانتور تغییرات تنش



شکل ۷ نمایش الف- ترک زاویه دار در وسط صفحه تحت نیروی کششی ب- حلقه ۱۱ام اطراف ترک

جدول 5 مقادیر فاکتور تنش T و درصد خطای آن برای حالت $h/w = 1$

| a/w | چن و وانگ [42] | جوگداند [39] | حل نرم‌افزاری | | درصد خطا نسبت به چن و وانگ [42] | | درصد خطا نسبت به جوگداند [39] | | T/σ |
|-------|----------------|--------------|---------------|--------|---------------------------------|--------|-------------------------------|--------|------------|
| | | | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | |
| 0/3 | 0/4160 | 0/4149 | 0/4124 | 0/4149 | 0/8654 | 0/2644 | 0/6025 | 0/0000 | 1/9660 |
| 0/4 | 0/5060 | 0/5038 | 0/5046 | 0/5054 | 0/2767 | 0/1186 | 0/1587 | 0/3175 | 2/2662 |
| 0/5 | 0/6480 | 0/6497 | 0/6486 | 0/6477 | 0/0926 | 0/0463 | 0/1693 | 0/3078 | 1/6797 |

جدول 6 مقادیر $K_I/\sigma\sqrt{\pi a}$ برای حالت $h/w = 1$

| a/w | کیتاگوا [45] | جوگداند [39] | حل نرم‌افزاری | | درصد خطا نسبت به کیتاگوا [45] | | درصد خطا نسبت به جوگداند [39] | |
|-------|--------------|--------------|---------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | | | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس |
| 0/3 | 0/7730 | 0/7746 | 0/7734 | 0/7739 | 0/0517 | 0/1164 | 0/1549 | 0/0903 |
| 0/4 | 0/8456 | 0/8464 | 0/8469 | 0/8470 | 0/1537 | 0/1655 | 0/0591 | 0/0708 |
| 0/5 | 0/9840 | 0/9841 | 0/9834 | 0/9830 | 0/0610 | 0/1016 | 0/0711 | 0/1117 |

جدول 7 مقادیر $K_{II}/\sigma\sqrt{\pi a}$ برای حالت $h/w = 1$

| a/w | کیتاگوا [45] | جوگداند [39] | حل نرم‌افزاری | | درصد خطا نسبت به کیتاگوا [45] | | درصد خطا نسبت به جوگداند [39] | |
|-------|--------------|--------------|---------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | | | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس |
| 0/3 | 0/4367 | 0/4400 | 0/4373 | 0/4391 | 0/1374 | 0/5496 | 0/6136 | 0/2045 |
| 0/4 | 0/4497 | 0/4522 | 0/4513 | 0/4472 | 0/3558 | 0/5559 | 0/1990 | 1/1057 |
| 0/5 | 0/4800 | 0/4812 | 0/4809 | 0/4785 | 0/1875 | 0/3125 | 0/0623 | 0/5611 |

جدول 8 مقادیر فاکتور تنش T برای حالت $h/w = 1$

| a/w | تی سنگ [46] | جوگداند [39] | حل نرم‌افزاری | | درصد خطا نسبت به تی سنگ [46] | | درصد خطا نسبت به جوگداند [39] | |
|-------|-------------|--------------|---------------|---------|------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | | | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس |
| 0/3 | -0/5303 | -0/5269 | -0/5310 | -0/5255 | 0/1320 | 0/9051 | 0/7781 | 0/2657 |
| 0/4 | -0/6207 | -0/6174 | -0/6187 | -0/6170 | 0/3222 | 0/5961 | 0/2105 | 0/0647 |
| 0/5 | -0/7757 | -0/7713 | -0/7711 | -0/7740 | 0/5930 | 0/2191 | 0/0259 | 0/3500 |

جدول 9 مقادیر ضرایب بسط سری ویلیامز در حالت $\beta = 0^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$

| ضرایب بسط | المان محدود فرامعین [21] | هم‌پوشان مرزی [21] | انتگرال I [21] | حل نرم‌افزاری | | المان محدود فرامعین [21] | | درصد خطا نسبت به هم‌پوشان مرزی [21] | | درصد خطا نسبت به انتگرال I [21] | |
|-----------|--------------------------|--------------------|------------------|---------------|---------|--------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | | | | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس |
| A_1 | 0/9430 | 0/9430 | 0/9440 | 0/9480 | 0/9460 | 0/5302 | 0/3181 | 0/5302 | 0/3181 | 0/4237 | 0/2119 |
| A_2 | -0/1440 | -0/1430 | -0/1440 | -0/1430 | -0/1430 | 0/6944 | 0/6944 | 0 | 0 | 0/6944 | 0/6944 |
| A_3 | -0/2150 | -0/2150 | - | -0/2150 | -0/2160 | 0 | 0/4651 | 0 | 0/4651 | - | - |
| B_1 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - | - | - | - | - | - |
| B_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | - |

جدول 10 مقادیر بسط سری ویلیامز در حالت $\beta = 15^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$

| ضرایب بسط | المان محدود فرامعین [21] | هم‌پوشان مرزی [21] | انتگرال I [21] | حل نرم‌افزاری | | المان محدود فرامعین [21] | | درصد خطا نسبت به هم‌پوشان مرزی [21] | | درصد خطا نسبت به انتگرال I [21] | |
|-----------|--------------------------|--------------------|------------------|---------------|---------|--------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | | | | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس |
| A_1 | 0/9160 | 0/9160 | 0/9170 | 0/9100 | 0/9130 | 0/6550 | 0/3275 | 0/6550 | 0/3275 | 0/7434 | 0/4362 |
| A_2 | -0/9800 | -0/9800 | -0/9900 | -0/9873 | -0/9834 | 0/7449 | 0/3469 | 0/7449 | 0/3469 | 0/2727 | 0/6667 |
| A_3 | -0/2660 | -0/2660 | - | -0/2641 | -0/2647 | 0/7143 | 0/4887 | 0/7143 | 0/4887 | - | - |
| B_1 | -0/1380 | -0/1370 | -0/1380 | -0/1375 | -0/1371 | 0/3623 | 0/6522 | 0/3650 | 0/0730 | 0/3623 | 0/6522 |
| B_3 | -0/1470 | -0/1460 | - | -0/1460 | -0/1466 | 0/6803 | 0/2721 | 0 | 0/4110 | - | - |

[21] مقدار خطا برابر 0/6944% است. بیشترین درصد خطا در نرم‌افزار متلب نیز در محاسبه مقدار A_2 به‌دست‌آمده و نسبت به روش انتگرال I و روش اجزاء محدود فرامعین ارائه شده در مرجع [21] نیز برابر 0/6944% است. نتایج روش حاضر با روش هم‌پوشان مرزی [21] نیز مقایسه شده است.

به‌ازای مقادیر $\beta = 15^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$ ، مدلی به شکل 8-ج و با همان مشخصات مادی و هندسی در نرم‌افزار مدل شده است. میدان تنش کششی نیز برابر $\sigma = 1 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده و با فرض مساله تنش صفحه‌ای به حل مساله پرداخته و جواب‌ها در جدول 10 ارائه شده است. برای نمونه در حالت $h/w = 1$ ، $\beta = 15^\circ$ ، $\gamma = 0^\circ$ با در نظر گرفتن 15210 المان سازه‌ای و در حلقه 15 مطابق شکل 8-ج و با در نظر گرفتن تعداد جملات $N = 12$ ، $M = 12$ جواب‌ها در این جدول ارائه شده است.

براساس این نتایج بیشترین درصد خطا در آباکوس در محاسبه مقدار ضریب مجهول A_2 بوده و نسبت به روش انتگرال I ارائه‌شده در مرجع [21] برابر 0/6667% است. همچنین بیشترین درصد خطا در نرم‌افزار متلب نیز در محاسبه مقدار A_2 به‌دست‌آمده و نسبت به روش هم‌پوشان مرزی و روش اجزاء محدود فرامعین ارائه‌شده در مرجع [21] نیز برابر 0/7449% است.

به‌ازای مقادیر $\beta = 30^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$ ، مدلی به شکل 8-د و با همان مشخصات مادی و هندسی و بارگذاری در نرم‌افزار مدل‌شده و با فرض تنش صفحه‌ای به حل مساله پرداخته و جواب‌ها در جدول 11 ارائه شده است.

برای نمونه در حالت $h/w = 1$ ، $\beta = 30^\circ$ ، $\gamma = 0^\circ$ با در نظر گرفتن 16810 المان سازه‌ای و در حلقه 12ام و مطابق شکل 8-د و تعداد جملات $N = 14$ ، $M = 14$ جواب‌ها در این جدول ارائه شده است.

براساس این نتایج بیشترین درصد خطا در آباکوس در محاسبه مقدار ضریب مجهول B_1 بوده و نسبت به روش هم‌پوشان مرزی ارائه‌شده در مرجع [21] برابر 0/9020% است. همچنین بیشترین درصد خطا در نرم‌افزار متلب نیز در محاسبه مقدار B_3 به‌دست‌آمده و نسبت به روش هم‌پوشان مرزی ارائه‌شده در مرجع [21] نیز برابر 1/0300% است.

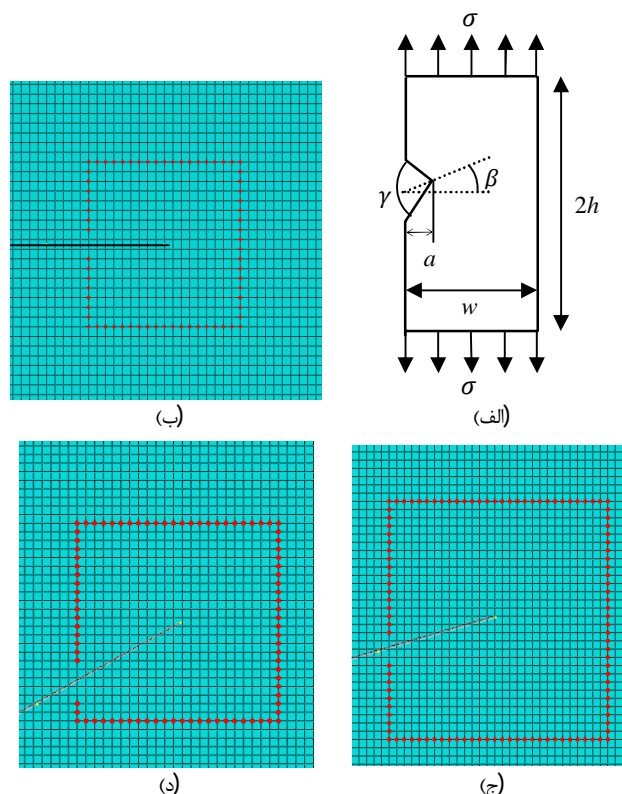
5-6- ترک در لبه صفحه تحت برش خالص

نمونه دیگر در ارتباط با ترک لبه‌ای است که در میدان تنش برشی خالص قرار گرفته، از آنجایی که نتایج با مساله شکاف زاویه‌دار مورد مطالعه در مراجع مختلف مقایسه شده است؛ بنابراین برای مقایسه، در نمونه‌های حل‌شده زاویه شکاف برابر صفر لحاظ می‌شود (شکل 9-الف).

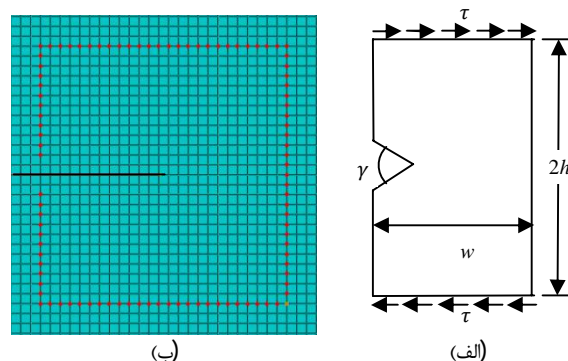
مدلی به شکل 9-ب و این مشخصات در نرم‌افزار مدل شده است: مدول الاستیسیته ورق $E = 1 \text{ MPa}$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.25$ ، تنش برشی $\tau = 1 \text{ MPa}$ و با فرض مساله تنش صفحه‌ای به حل مساله پرداخته و جواب‌ها در جدول 12 ارائه شده است.

جدول 11 مقادیر بسط سری ویلیامز در حالت $\beta = 30^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$

| المان محدود فرامعین [9] | | المان محدود فرامعین [9] | | المان محدود فرامعین [9] | | حل نرم‌افزاری [9] | | انتگرال I [9] | | ضرایب بسط [9] | |
|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به | درصد خطا نسبت به |
| آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب | آباکوس | متلب |
| 0/8224 | 0/5602 | 0/8224 | 0/5602 | 0/8224 | 0/5602 | 0/8321 | 0/8343 | 0/8390 | 0/8390 | 0/8390 | A_1 |
| 0/7692 | 0/3846 | 0/7692 | 0/3846 | 0/7692 | 0/3846 | 0/0258 | 0/0260 | 0/0260 | 0/0260 | 0/0260 | A_2 |
| - | - | 0/1238 | 0/2228 | 0/1241 | 0/0248 | -0/4035 | -0/4031 | - | -0/4040 | -0/4030 | A_3 |
| 0/1167 | 0/1946 | 0/9020 | 0/9804 | 0/1167 | 0/1946 | -0/2573 | -0/2575 | -0/2570 | -0/2550 | -0/2570 | B_1 |
| - | - | 0/9013 | 1/0300 | 0/0426 | 0/1702 | -0/2351 | -0/2354 | - | -0/2330 | -0/2350 | B_3 |



شکل 8 نمایش الف- شکاف زاویه‌دار در لبه صفحه تحت نیروی کششی ب- حلقه 9ام اطراف ترک به‌ازای $\beta = 0^\circ$ ج- حلقه 15ام اطراف ترک به‌ازای $\beta = 15^\circ$ د- حلقه 12ام اطراف ترک به‌ازای $\beta = 30^\circ$



شکل 9 نمایش الف- شکاف در لبه صفحه تحت برش خالص، ب- حلقه 13ام اطراف ترک

بیشترین درصد خطا در آباکوس در محاسبه مقدار ضریب مجهول A_2 بوده و نسبت به روش انتگرال I و روش اجزاء محدود فرامعین ارائه شده در مرجع

جدول 12 مقادیر ضرایب بسط سری ویلیامز در حالت $\gamma = 0^\circ$

| ضرایب بسط | المان محدود فرامعین هم‌پوشان مرزی [21] | کیم [47] | ژائو [48] | تراپیفی [49] | حل نرم‌افزاری | المان محدود فرامعین هم‌پوشان مرزی [21] | کیم [47] | ژائو [48] | تراپیفی [49] | درصد خطا نسبت به |
|-----------|--|----------|-----------|--------------|---------------|--|----------|-----------|--------------|------------------|
| B_1 | -0/5248 | -0/5268 | -0/5215 | -0/5277 | -0/5235 | 0/2477 | 0/6264 | 0/3835 | 0/7959 | ژائو [48] |
| B_3 | -0/6798 | -0/6823 | - | - | -0/6801 | 0/0441 | 0/3224 | - | - | کیم [47] |
| B_4 | 0/3339 | 0/3349 | - | - | 0/3341 | 0/0599 | 0/2389 | - | - | کیم [47] |

- [8] F.J. Gómez, M. Elices, F. Berto, P. Lazzarin, A generalised notch stress intensity factor for U-notched components loaded under mixed mode, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 4819–4833, 2008.
- [9] P. Prabhakar and A.M. Waas, The influence of cohesive zone modeling on the stress field and energy release rates in a cracked elastic body, *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Orlando, Florida, 18th, 12-15 April 2010.
- [10] R. Krueger, The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and Applications, *NASA Langley Research Center*, Hampton, Virginia, NASA/CR-2002-211628, ICASE Report No. 2002-10.
- [11] H. Hosseini-Toudeshky, B. Mohammadi, G. Sadeghi, H.R. Daghyani, Numerical and Experimental Fatigue Crack Growth Analysis in Mode-I for Repaired Aluminum Panels Using Composite Material, *Composites: Part A*, Vol. 38, pp. 1141-8, 2007.
- [12] H. Okada, H. Kawai, K. Araki, A virtual crack closure-integral method (VCCM) to compute the energy release rates and stress intensity factors based on quadratic tetrahedral finite elements, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 4466–4485, 2008.
- [13] J. Lebahn, H. Heyer, M. Sander, Numerical stress intensity factor calculation in flawed round bars validated by crack propagation tests, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 108, pp. 37–49, 2013.
- [14] J.M. Melenk, I. Babuska, The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Application, *Seminar für Angewandte Mathematik Eidgenössische Technische Hochschule*, Research Report No. 96-01, January, CH8092 Zurich, Switzerland. 1996.
- [15] T. Belytschko, T. Black, Elastic crack growth in finite elements with minimal re meshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 45, No. 5, pp. 601–620, 1999.
- [16] T. Belytschko, N. Moes, S. Usui, and C. Parimi, Arbitrary discontinuities in finite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, pp. 993–1013, 2001.
- [17] V.F. González-Albuixech, E. Giner, J.E. Tarancón, F.J. Fuenmayor, A. Gravouil, Domain integral formulation for 3-D curved and non-planar cracks with the extended finite element method, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 264, pp. 129–144, 2013.
- [18] H. Yu, L. Wu, H. Li, A domain-independent interaction integral for magneto-electro-elastic materials, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, pp. 336–351, 2014.
- [19] M. Nejati, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, M.Sc Thesis, 2010. (In Persian)
- [20] H. Saghaei, M.R. Ayatollahi, M. Sistaninia, A modified MTS criterion (MMTS) for mixed-mode fracture toughness assessment of brittle materials, *Materials Science and Engineering*, Vol. 527, No. 21-22, pp. 5624–5630, 2010.
- [21] M.R. Ayatollahi, M. Nejati, Determination of NSIFs and coefficients of higher order terms for sharp notches using finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 53, No. 4, pp. 164–177, 2011.
- [22] A. Ahmed, *Extended finite element method (XFEM)-modeling arbitrary discontinuities and failure analysis*, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, M.Sc Thesis, April 2009.
- [23] H. Bayesteh, S. Mohammadi, XFEM fracture analysis of orthotropic functionally graded materials, *Composites: Part B*, Vol. 44, pp. 8–25, 2013.
- [24] S. Mohammadi, *xfem fracture analysis of composites*, ISBN: 978-1-119-97406-2, John Wiley & Sons, September 2012.
- [25] I.V. Singh, B.K. Mishra, S. Bhattacharya, R.U. Patil, The numerical simulation of fatigue crack growth using extended finite element method, *International Journal of Fatigue*, Vol. 36, pp. 109–119, 2012.
- [26] E. Goli, H. Bayesteh, S. Mohammadi, Mixed mode fracture analysis of adiabatic cracks in homogeneous and non-homogeneous materials in the framework of partition of unity and the path-independent interaction integral, *Engineering Fracture Mechanics*, In Press, Accepted Manuscript, Available online 1 August 2014.
- [27] G.R. Irwin, Analysis of stress and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, No. 3, pp. 361–364, 1957.

نتایج آنالیز با نتایج به‌دست‌آمده در مراجع [21, 47-49] مقایسه شده است. برای نمونه در حالت $\beta = 0^\circ$ و $\gamma = 0^\circ$ و با در نظر گرفتن 15488 المان سازه‌ای و در حلقه 13ام و براساس شکل 9-ب و نیز با در نظر گرفتن تعداد جملات $M = 10$ و $N = 0$ از بسط سری ویلیامز، جواب‌ها در جدول 12 ارائه شده است. ملاحظه می‌شود بیشترین درصد خطا در آباکوس در محاسبه مقدار B_1 بوده و نسبت به روش هم‌پوشان مرزی در مرجع [21] برابر 0/8147% است.

6- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از روش اجزاء محدود توسعه یافته برای محاسبه ضرایب شدت تنش ترک و ضرایب مراتب بالاتر بسط سری ویلیامز استفاده شد. ابتدا میدان جابجایی بر اساس روش اجزاء محدود توسعه یافته تعیین شده و سپس ضرایب بسط سری ویلیامز با یک عملیات ماتریسی ساده و براساس یک الگوی اجزاء محدود فرامعین به‌دست آمد. برای این کار موقعیت و جابه‌جایی نقاط بر حلقه‌ای مناسب در اطراف نوک ترک استخراج شد. سادگی روش ارائه‌شده، توانایی مدل‌سازی ناپیوستگی در هر مکان دلخواه از مش‌بندی، عدم‌نیاز به مش‌بندی دوباره، محاسبه هم‌زمان ضرایب شدت تنش و ضرایب مراتب بالاتر و دقت خوب نتایج از مزیت‌های روش اجزاء محدود توسعه‌یافته ارائه‌شده در این مطالعه است. همچنین چند نمونه ترک‌دار تحت بارگذاری خالص مود اول، خالص مود دوم و نیز مود ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزارهای متلب و آباکوس با نتایج موجود در مقالات مختلف مقایسه شد که نتایج به‌دست‌آمده دقت و کارایی بالای روش ارائه‌شده را در مقایسه با سایر روش‌ها در تخمین ضرایب ترم‌های تکینه و غیر تکینه حل میدان جابه‌جایی سری ویلیامز و در نتیجه شناسایی دقیق‌تر ناحیه آسیب و پارامترهای شکست نشان می‌دهد.

7- مراجع

- [1] S. Mohammadi, *Extended Finite Element Method for fracture Analysis of structures*, Blackwell Publishing, Garsington Road, Oxford, UK. 2008.
- [2] B.N. Rao, S. Rahman, A coupled meshless-finite element method for fracture analysis of cracks, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 647–657, 2001.
- [3] Y. Li, W. Feng, Z. Xu, Fracture analysis of cracked 2D planar and axisymmetric problems of magneto-electro-elastic materials by the MLPG coupled with FEM, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 198, pp. 2347–2359, 2009.
- [4] M. Dufloot, H. Nguyen-Dang, Fatigue crack growth analysis by an enriched meshless method, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 168, pp. 155–164, 2004.
- [5] S.C. Li, S.C. Li, Y.M. Cheng, Enriched meshless manifold method for two-dimensional crack modeling, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 44, pp. 234–248, 2005.
- [6] R. Toni-Liong, C. Proppe, Application of the cohesive zone model to the analysis of a rotor with a transverse crack, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn*, Leuven, Belgium, ISBN 978-90-760-1931-4, 4-6 July 2011.
- [7] E.T. Ooi, Z.J. Yang, Modelling multiple cohesive crack propagation using a finite element-scaled boundary finite element coupled method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 33, pp. 915–929, 2009.

- [40] M. Isida, Effect of width and length on stress intensity factors of internally cracked plates under various boundary conditions, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 301–16, 1971.
- [41] X. Wang, Elastic T-stress for cracks in test specimens subjected to non-uniform stress distributions, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 1339–52, 2002.
- [42] C.H. Chen, C.L. Wang, Stress intensity factors and T-stresses for offset double edge-cracked plates under mixed-mode loadings, *International Journal of Fracture*, Vol. 152, pp. 149–62, 2008.
- [43] T. Fett, T-stresses in rectangular plates and circular disks, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 60, pp. 631–52, 1998.
- [44] W.K. Wilson, On combined mode fracture mechanics, Research report 69-1E7-FMECH-R1, Pittsburgh: Westinghouse Research Laboratories, 1969.
- [45] H. Kitagawa, R. Yuuki, Analysis of arbitrarily shaped crack in a finite plate using conformal mapping, 1st report-construction of analysis procedure and its applicability, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 43, pp. 4354–4362, 1977.
- [46] D.K.L. Tsang, S.O. Oyadiji, Super singular element method for two-dimensional crack analysis, *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 464, pp. 2629–2648, 2008.
- [47] J.K. Kim, S.B. Cho, Effect of second non-singular term of mode I near the tip of a v-notched crack, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 32, pp. 346–56, 2009.
- [48] Z. Zhao, H.G. Hahn, Determining the SIF of a v-notch from the results of a mixed mode crack, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 43, No. 4, pp. 511–518, 1992.
- [49] M. Treifi, S.O. Oyadiji, D.K.L. Tsang, Computations of modes I and II stress intensity factors of sharp notched plates under in-plane shear and bending loading by the fractal-like finite element method, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, pp. 6468–6484, 2008.
- [28] M.L. Williams, On the stress distribution at the base of a stationary crack, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 109–14, 1957.
- [29] A. Sutradhar, G.H. Paulino, Symmetric Galerkin boundary element computation of T-stress and stress intensity factors for mixed-mode cracks by the interaction integral method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 28, No. 11, November 2004.
- [30] B. Atzori, P. Lazzarin, G. Meneghetti, M. Ricotta, Fatigue design of complex welded structures, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 59–69, 2009.
- [31] S.G. Larsson, A.J. Carlsson, Influence of non-singular stress terms and specimen geometry on small-scale yielding at crack-tips in elastic-plastic materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 21, pp. 263–77, 1973.
- [32] H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin, *The stresses analysis of cracks handbook*, ASME Press, 3 Sub edition, January 1, 2000.
- [33] S. Melin, The influence of the T-stress on the directional stability of crack., *International Journal of Fracture*, Vol. 114, pp. 259–65, 2002.
- [34] D.J. Smith, M.R. Ayatollahi, M.J. Pavier, The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 137–150, 2001.
- [35] M.R. Ayatollahi, M.J. Pavier, D.J. Smith, Mode I cracks subjected to large T-stresses, *International Journal of Fracture*, Vol. 117, pp. 159–174, 2002.
- [36] B.L. Karihaloo, Size effect in shallow and deep notched quasi-brittle structures, *International Journal of Fracture*, Vol. 95, pp. 379–390, 1999.
- [37] G.A. Kardomateas, R.L. Carlson, A.H. Soediono, D.P. Schrage, Near-tip stress and strain fields for short elastic cracks, *International Journal of Fracture*, Vol. 62, pp. 219–232, 1993.
- [38] M.R. Ayatollahi, M.M. Mirsayar, M. Nejati, Evaluation of first non-singular stress term in bi-material notches, *Computational Materials Science*, Vol. 50, pp. 752–60, 2010.
- [39] P.V. Jogdand K.S.R.K. Murthy, A finite element based interior collocation method for the computation of stress intensity factors and T-stresses, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 7, pp. 1116–1127, May 2010.