



بررسی تجربی و عددی تورق در پنل ساندویچی با هسته فومی آلومینیومی و صفحات جانبی آلومینیومی تحت خمش نامقید

امیر قیاسوند^{۱*}، حسین احمدی رشید^۲، سوران حسنی فرد^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

* Amir.Ghiasvand@Tabrizu.ac.ir

ارسال: شهریور ماه ۹۷ پذیرش: آذر ماه ۹۷

چکیده

مواد کامپوزیتی که به طور معمول از ترکیب دو فاز ماده متفاوت تشکیل میگردند دارای خواصی ترکیبی با قابلیتی فوقالعاده در برابر بارگذاریهای مختلف میباشند. سازههای ساندویچی به طور معمول از صفحاتی جانبی با استحکام بالا و هستهای با استحکام و چگالی جرمی پایینتر تشکیل میگردند که ترکیب این دو ماده با خواص متفاوت سبب ایجاد خواصی فوقالعاده در این سازهها میشود. اتصال میان هسته و صفحات جانبی عمدتاً به صورت اتصال چسبی میباشند. از جمله نقاط ضعف این سازهها جدایش و تورق ایجاد شده در هنگام بارگذاری در پنلهای ساندویچی است که در ناحیه اتصال چسبی شکل میگیرد و به میزان قابل توجهی سختی و قابلیت بارگذاری پنل را دچار افت مینماید. در پژوهش حاضر به بررسی تجربی و عددی پدیده تورق در خمش نامقید پنل ساندویچی با صفحات جانبی آلومینیومی و هستهای با جنس فوم آلپوراس تحت بارگذاری و بررسی جدایش هسته فومی پنل ساندویچی از صفحات جانبی پرداخته شده است. از دو مدل ناحیه چسبیده (خواص چسبیده و المان چسبیده) به منظور شبیه سازی عددی نمونه مورد آزمایش استفاده شده است و قابلیت و صحت استفاده از روش شبیهسازی منطبق با شرایط تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. هر دو رویکرد مورد استفاده در پژوهش حاضر تا حد قابل قبولی توانایی مدلسازی تورق و پیشبینی منطبق بر شرایط تجربی را دارا بودند. استفاده از رویکرد خواص چسبیده نسبت به رویکرد المان چسبیده نتایجی مناسبتری را حاصل نمود.

کلید واژه: پنل ساندویچی، فوم آلومینیوم، اجزا محدود، تورق، خمش نامقید.

۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی که به طور معمول از ترکیب دو فاز ماده متفاوت تشکیل میگردند دارای خواصی ترکیبی با قابلیتی فوقالعاده در برابر بارگذاریهای مختلف میباشند [۱]. استفاده از این دست مواد در سال های اخیر رواج فراوانی یافته است. از جمله این مواد میتوان به سازه های ساندویچی که از کنار هم گذاری لایه هایی از مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی مختلف تشکیل شده اند

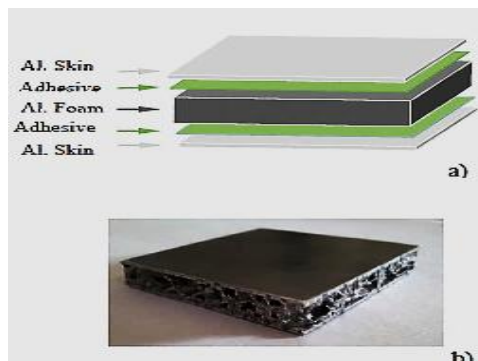
اشاره داشت. پنل های ساندویچی به طور معمول از دو صفحه جانبی با استحکام و چگالی جرمی بالاتر و یک هسته با استحکام پایینتر تشکیل شده‌اند [۲]، ترکیب این مواد با استحکام های متفاوت سبب می‌گردد که پنل ساندویچی خواصی دو گانه و فوقالعاده را کسب نماید. این سازه های مهندسی در برابر بارگذاری های استاتیکی و بارگذاری های دینامیکی مانند برخورد رفتار مناسبی از خود نشان می‌دهند، پارامترهای زیادی در پاسخ نهایی اینگونه سازه‌ها در برابر بارگذاری متفاوت دخیل است که میتوان از این موارد به جنس صفحات و هسته پنل، ضخامت، هندسه و جهتگیری هسته این پنل ها نسبت به بارگذاری اشاره نمود. در سال های اخیر استفاده از هسته فومی به دلیل قابلیت بالاتر در جذب انرژی های بزرگتر رواج بیشتری پیدا کرده و این مواد به طور روز افزون مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۵].

هسته فومی پنل ها به دلیل قابلیت تغییر شکل پلاستیک و جذب انرژی بالا در کنار صفحات جانبی فلزی با استحکام بالا در برابر بارگذاری های استاتیکی سبب می‌گردد ترکیبی از خواص مناسب در سازه ایجاد گردد. فوم های فلزی به دلیل قابلیت جذب بالای انرژی ناشی از برخورد و ضربه میتوانند راهکار مناسبی برای جذب انرژی در سوانح به وجود آمده در سیستم های حمل و نقل محسوب گردند و موجب شوند که خطرات مالی و جانی ناشی از این سوانح به حداقل رسد. همچنین روش ساخت و تهیه ساده این فوم ها و مصرف کم انرژی جهت ساخت این سازه ها میتواند طبیعت دوستی این پنل ها را به فاکتور و عاملی مهم در استفاده روزافزون از این پنل ها تبدیل گرداند [۶]. از جمله مخاطرات و ضعف های موجود در استفاده از پنل های ساندویچی اتصال میان صفحات جانبی و هسته آنها میباشد. این اتصال که غالباً به واسطه چسب و لایه چسبنده ایجاد میگردد در شرایط بارگذاری امکان جداسدن و از بین رفتن را داراست هرچند این موضوع در زمینه جذب انرژی در برابر بارگذاری های دینامیکی نظیر ضربه و برخورد از اهمیت خاصی برخوردار نیست اما موجب افت شدید سختی این پنل ها در برابر بارگذاری های استاتیکی و شبه استاتیکی خواهد شد که این موضوع شدیداً کارایی و قابلیت استفاده از این سازه ها را به مخاطره می‌اندازد [۷].

بررسی های بسیار کمی در زمینه جدایش لایه های پنل های ساندویچی با هسته فومی صورت گرفته است. در پژوهش حاضر به بررسی تجربی و مدل سازی عددی جدایش بین هسته فومی پنل از صفحات جانبی با استفاده از تکنیک ناحیه چسبنده به واسطه دو رویکرد متفاوت تحت بارگذاری شبه استاتیکی در تست خمش نامقید پرداخته شده است و نتایج حاصل از دو رویکرد و روش مورد استفاده در پژوهش عددی با نتایج تجربی به منظور صحت گذاری مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- بررسی تجربی

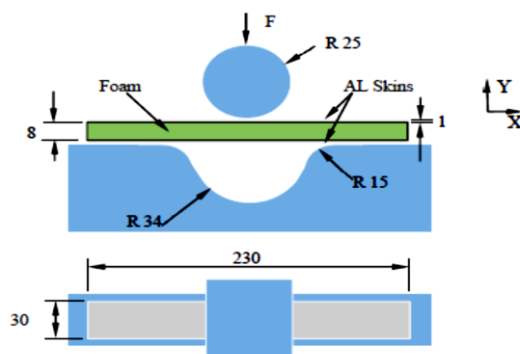
پنل ساندویچی مورد استفاده در این پژوهش از صفحات جانبی آلومینیومی و هسته ای از جنس فوم آلومینیوم آلپوراس ساخته شده است و به منظور اتصال این بخش ها به یکدیگر از لایه چسب پلیمری پلی اورتان^{۱۱} با ضخامتی برابر با ۰.۰۵ میلیمتر استفاده شده است. پس از اتصال هسته فومی و صفحات آلومینیومی، پنل تحت فشار ناشی از دستگاه پرس قرار گرفته تا اتصال به شکلی مناسب ایجاد گردد. در شکل ۱ پنل ساندویچی با هسته فومی مورد استفاده در این پژوهش نمایش داده شده است.



شکل ۱- پنل ساندویچی با هسته فومی آلومینیومی

¹ Polyurethane

پس از ساخت پنل اصلی نمونه های لازم جهت بررسی در تست خمش نامقید برش داده و آماده شد. این نمونه ها دارای ابعاد $230 \times 30 \times 10$ میلیمتر بودند و به وسیله اره دندانانه درشت برش داده شدند. ضخامت هسته فومی برابر با ۸ و صفحات جانبی هر کدام دارای ضخامت ۱ میلیمتر می باشند. شماتیک ابعادی نمونه مورد استفاده در تست خمش نامقید در شکل ۲ نمایش داده شده است. گیرد" بیان می کند.



شکل ۲- شماتیک ابعادی تست خمش نامقید و ابعاد نمونه ها

در پژوهش تجربی از سه نمونه جهت تست خمش استفاده گردید و در پایان نمودار نیرو جابجایی بر اساس میانگین نتایج سه نمونه استخراج گردید و به صورت معیاری جهت صحنه سنجی مدل های عددی به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که به دلیل تقارن در شرایط بارگذاری مسأله خمشی، از یک چهارم ابعادی مدل تجربی در شرایط شبیه سازی عددی استفاده گردید.

۳- شبیه سازی عددی

نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS ابزاری قدرتمند جهت شبیه سازی مسائل سازه ای و غیر سازه ای می باشد. رویکرد مورد استفاده در این نرم افزار بر اساس حل معادلات دیفرانسیل جزئی با استفاده از روش های عددی می باشد، با توجه به امکانات گسترده این نرم افزار در مدلسازی فرایندهای مختلف در حوزه های مختلف علمی استفاده از آن به شکل گسترده ای رو به افزایش است، از جمله مسائلی که با استفاده از این نرم افزار می توان برری و تحلیل نمود پدیده شکست و تورق در کامپوزیت ها می باشد، در پژوهش حاضر شبیه سازی عددی تورق در نمونه کامپوزیتی تحت تست خمش نامقید به واسطه نرم افزار ABAQUS 2017 صورت پذیرفته است. دو رویکرد جهت ایجاد لایه چسبنده در نرم افزار فراهم آمده است، رویکرد نخست مبتنی بر استفاده از المان های چسبنده^۱ در مدل می باشد بدین صورت که در مرحله طراحی هندسی نمونه لایه ای با ضخامت اندک به صورت دو بعدی یا سه بعدی مطابق با هندسه مدل تولید می گردد و سپس در ماژول اسمبلی در میان دو لایه مد نظر جهت اتصال قرار خواهد گرفت. این المان های چسبنده دارای خواص الاستیک و شروع و تکامل آسیب خواهند بود و به همین دلیل با برآورده شدن شرایط آسیب (شروع و تکامل) با استفاده از تکنیک حذف المان^۲ از مدل حذف شده و تورق^۳ و جدایش لایه ها را شبیه سازی خواهند نمود. روش دوم استفاده از روش خواص برهمکنش چسبنده^۴ در مدل است، در این روش هیچ گونه المان مازاد بر مدل اصلی ایجاد نخواهد گردید و صرفاً با تعریف گره های المان های سطح پیرو در ابتدای اتصال و تعریف خواص تماسی مناسب همراه با پارامترهای آسیب مورد استفاده در مدل جدایش بین لایه ای مدل خواهد گردید. مطابق با کار تجربی از آلیاژ آلومینیوم AA5754 به منظور ماده مورد استفاده صفحات جانبی و از فوم آلومینیومی آلپوراس^۵ به منظور ماده هسته در شبیه سازی عددی استفاده گردید. خواص عمومی و الاستیک دو ماده بر اساس داده های حاصل از تست-های تجربی و اطلاعات موجود در پیشینه پژوهش مطابق جدول ۱ و جدول ۲ در نرم افزار تعریف گردید.

¹ Cohesive Element

² Element Deletion

³ Delamination

⁴ Cohesive Interaction

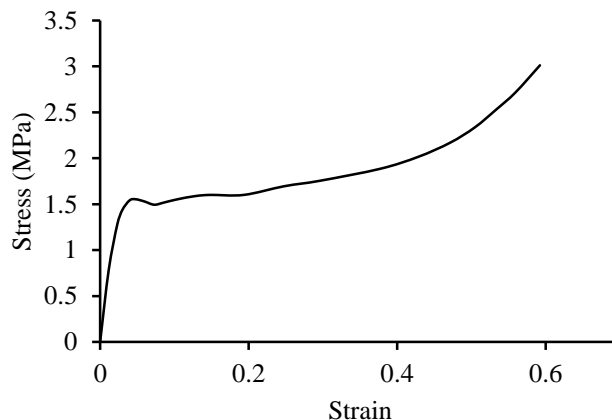
جدول ۱- خواص الاستیک صفحات جانبی آلومینیومی

5754 Al alloy	
E (Mpa)	70
Poisson Ratio	0.3

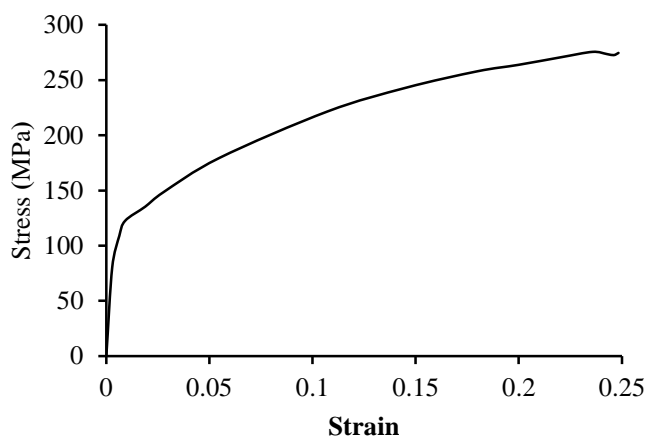
جدول ۲- خواص الاستیک و پلاستیک فوم آلپوراس

	E(Mpa)	Poisson ratio	Compression yield Stress Ratio	Plastic Poisson Ratio
Elastic	0.354	0.33		
Plastic			1.71	0.013

جهت تعریف خواص پلاستیک و سخت شوندگی مدل که شامل صفحات جانبی و هسته است از منحنی تنش کرنش واقعی نمونه های مورد آزمایش در پژوهش تجربی استفاده گردید و این داده های آزمایشگاهی از نقطه تسلیم به بعد همراه با اصلاحات لازم به نرم افزار به عنوان ورودی معرفی شد. نمودار تنش کرنش فوم آلپوراس و آلیاژ ۵۷۵۴ در شکل های ۳ و ۴ نمایش داده شده است که به واسطه تست های انجام شده از هر دو ماده حاصل شده اند.



شکل ۳- نمودار تنش کرنش فوم آلپوراس



شکل ۴- نمودار تنش کرنش آلیاژ 5754 آلومینیوم

⁵ALPORAS

به منظور مدل سازی شرایط آسیب از اطلاعات مرتبط با چسب پلی اورتان استفاده گردید و این داده های آزمایشگاهی به صورت مناسب در هر دو مدل المان چسبیده و خواص چسبیده در نرم افزار تعریف شد، در جدول ۳ خواص الاستیک و آسیب چسب پلی اورتان مشخص شده است.

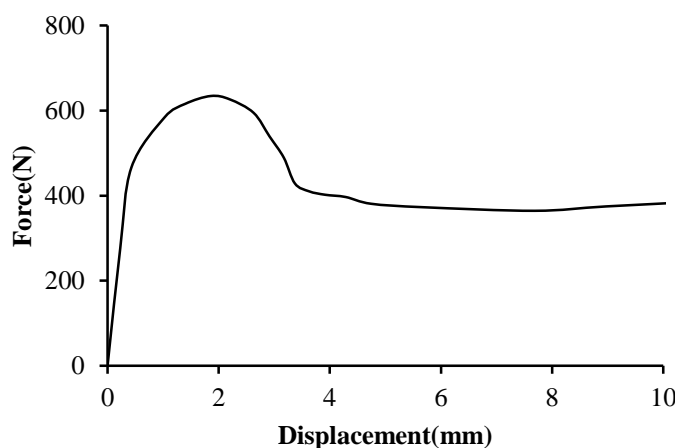
جدول ۳- خواص آسیب چسب پلی اورتان

Nominal stress normal mode	Nominal stress first direction	Nominal stress Second direction
5	1.087	1.087
E/Enn	G1/Ess	G2/Ett
85	85	85
Displacement at failure(mm)		
0.37		

۴- نتایج و بحث

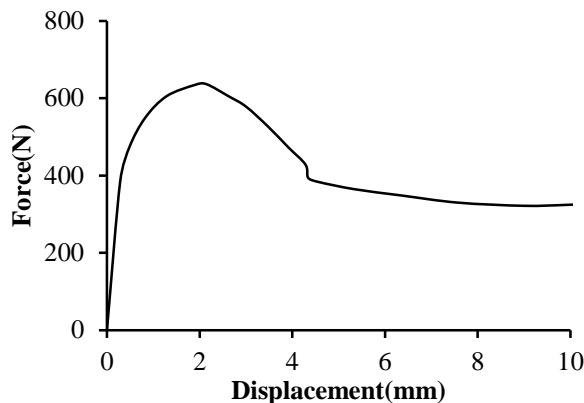
در شبیه سازی عددی از دو تکنیک مورد استفاده در شرایط چسبندگی استفاده شد و نتایج حاصل از هر دو مدل با نتایج نمودار نیرو-جابجایی حاصل از کار آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت.

در حالت بکارگیری روش المان های چسبیده، یک لایه با ضخامت ۰.۰۵ میلیمتر در مدل به عنوان لایه المان های چسبیده استفاده شد و در ماژول اسمبلی این لایه چسبیده میان صفحات جانبی و هسته فومی جانمایی گردید. پیش تر در شکل ۱ شماتیک نحوه چیدمان لایه های چسبیده نمایش داده شد. پس از بررسی و تحلیل عددی نمونه، نمودار نیرو جابجایی بدست آمد، در شکل ۵ نمودار نیرو جابجایی حاصل از پژوهش عددی با استفاده از روش المان چسبیده نمایش داده شده است.



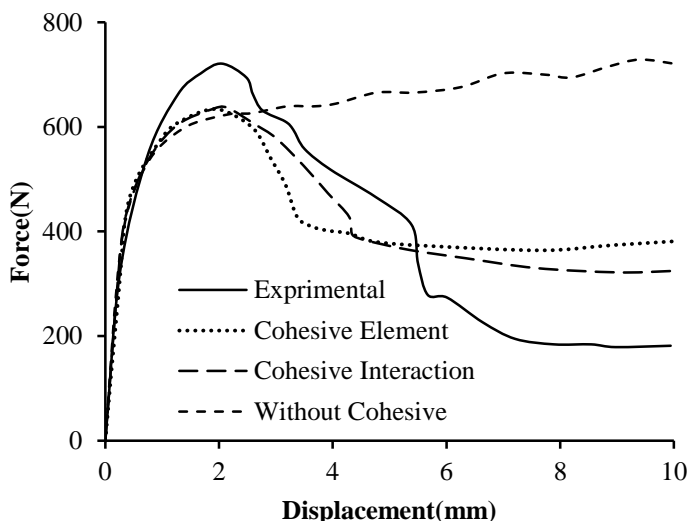
شکل ۵- نمودار نیرو جابجایی نمونه همراه با المان چسبیده

در حالت استفاده از مدل خواص چسبیده شرایط تماسی مناسب در ماژول اینتراکشن تعریف گردید و همزمان با تعریف خواص تماسی، خواص آسیب نیز مطابق با جدول ۳ به نرم افزار معرفی گردید. نمودار نیرو جابجایی حاصل از شبیه سازی عددی بر پایه استفاده از مدل خواص چسبیده در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمودار نیرو جابجایی نمونه همراه با خواص چسبنده

نمودار نیرو جابجایی حاصل از دو تکنیک عددی با داده‌های حاصل از بررسی تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۷ نمودار نیرو جابجایی حاصل از دو رویکرد عددی و نمونه تجربی را نمایش می‌دهد. مطابق با شرایط و نمودار شکل ۷ هر دو حالت شبیه‌سازی بر اساس دو تکنیک المان چسبنده و خواص چسبنده تا حدود مناسبی قادر به پیش‌بینی و مدل‌سازی شرایط تورق در پنل ساندویچی را دارا می‌باشند. مطابق شکل ۷ چنانچه از رویکرد مناسب جهت محاسبه آسیب حاصل در پنل و تورق نمونه‌ها استفاده نگردد و پنل به صورت یکپارچه مدل شود، نتایج حاصل به طور کامل در اختلاف با نتایج تجربی خواهند بود و نتایج شبیه‌سازی از صحت لازم برخوردار نخواهند گردید.



شکل ۷- نمودار نیرو جابجایی همه حالات مورد بررسی

در زمان مدل‌سازی با استفاده از تکنیک المان‌های چسبنده هنگامی که المان‌ها در معرض حذف قرار می‌گیرند باعث می‌گردد مقداری نفوذ صفحات در هسته ایجاد شود که این پدیده سبب تغییری اندک در نتایج خواهد شد به همین دلیل و مطابق شکل ۷ نتایج حاصل از این تکنیک مقداری اندک با نتایج تجربی فاصله دارند، اما هنگام استفاده از تکنیک برهمکنش چسبنده مشکل ذکر شده به وجود نخواهد آمد و نتایجی دقیق‌تر حاصل خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

شبیه‌سازی عددی خمش نامقید پنل ساندویچی با هسته فومی و صفحات جانبی آلومینیومی با استفاده از دو تکنیک المان چسبنده و برهمکنش چسبنده و استفاده از روشی مبتنی بر عدم استفاده از شرایط چسبندگی صورت پذیرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت، نتایج زیر از پژوهش حاصل گشت:

- در صورت عدم استفاده از تکنیک مناسب (خواص چسبنده یا المان چسبنده) در شبیه سازی عددی تورق لایه های پنل از هسته، نتایجی غیر واقعی حاصل خواهد شد و نتایج به طور کامل با نتایج تجربی متفاوت خواهند بود.
- هر دو تکنیک ناحیه چسبنده به خوبی توانایی تقریب و پیش بینی آسیب حاصل از تورق در پنل را دارا می باشند و نتایج حاصل در قرابتی مناسب با شرایط تجربی می باشند.
- از دو تکنیک مورد استفاده، تکنیک برهمکنش چسبنده نتایجی دقیق تر و در قرابت بالاتر با شرایط تجربی را حاصل می نماید.

۶- منابع

1. Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG (2000) Metal foams: a design guide. Butterworth-Heinemann, Woburn.
2. Wicklein M, Thoma K (2005) Numerical investigations of the elastic and plastic behaviour of an open-cell aluminium foam. Mater Sci Eng A397:391-399.
3. Benouali A-H, Froyen L, Dillard T, Forest S, N'Guyen F (2005) Investigation on the influence of cell shape anisotropy on the mechanical performance of closed cell aluminium foams using micro-computed tomography. J Mater Sci 40:5801-5811.
4. Hanssen AG, Hopperstad OS, Langseth M, Ilstad H (2002) Validation of constitutive models applicable to aluminium foams. Int J Mech Sci 44:359-406.
5. Montanini R (2005) Measurement of strain rate sensitivity of aluminium foams for energy dissipation. Int J Mech Sci 47:26-42.
6. Nemes, J. A. and Simmonds, K. E., 1992, "Low-Velocity Impact Response of Foam-Core Sandwich Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp. 500-518 .
7. Harte AM, Fleck NA, Ashby MF (2000) Sandwich panel design using aluminum alloy foam. Adv Eng Mater 2(4):219-22.
8. Meguid SA, Cheon SS, El-Abbasi N (2002) FE modelling of deformation localization in metallic foams. Finite Elem Anal Des 38:631-643.
9. G D'Urso, G Pellegrini, G Maccarini (2008) Experimental and FE analysis for metal foam bending, 9th Int. Conf Tech Plasticity.
10. Proceedings, A., ed., 1991. Volume Title, Vol. 1 of Proceedings Series, Organization Name, Publisher Name. See also URL <http://www.abc.edu>.
11. Techreport, A., 2003. Techreport title. Progress report 1, University of Higher Education, Cambridge, MA, May. See also URL <http://www.abc.edu>.