

ارزیابی نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم با استفاده از نرم افزار آباکوس

بابک گلچین*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

دانیال رحیمی، دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b-golchin@iau-ahar.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۹/۰۸ - پذیرش: ۹۷/۰۱/۱۸

صفحه ۲۷-۳۸

چکیده

آزمایش کشش غیرمستقیم می‌تواند معیار خوبی در شناسایی رفتار و مشخصات مخلوط‌های آسفالتی باشد. این رفتار می‌تواند در اشل آزمایشگاهی و یا با نرم افزار های المان محدود بررسی شود. در تحقیق حاضر آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه های مخلوط های آسفالتی با فرض رفتار ویسکوالاستیک در نرم افزار آباکوس به صورت سه بعدی مدل سازی شده و نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. برای مدل سازی آزمایش، ۷ نمونه مخلوط آسفالتی به صورت توپیر و از نوع تغییر شکل پذیر مدل شدند. نوارهای بارگذاری با در نظر گرفتن اینکه دارای سختی بالاتری نسبت به نمونه های مخلوط آسفالتی بودند از نوع فولادی و به صورت صلب انتخاب گردیدند. بار اعمال شده به صورت اندرکنش بین سطح نوارهای بارگذاری و نمونه، به نمونه‌های مخلوط آسفالتی اعمال گردید. مدول برجهنگی لازم برای مدل سازی، توسط آزمایش مدول برجهنگی در دستگاه آزمایش کشش غیرمستقیم بدست آمد. ضرایب سری پرونی لازم برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک نمونه های مخلوط آسفالتی با استفاده از نرم افزار DESIGN EXPERT و با روش سطح پاسخ انتخاب شدند. آنگاه، نتایج تغییرشکل عمودی حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. مقایسه نشان داد که ارتباط خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل سازی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش کشش غیر مستقیم، مخلوط آسفالتی نیمه گرم، آباکوس، مدول برجهنگی، ضرایب سری پرونی

۱- مقدمه

بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی است. این آزمایش همچنین به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده، در مقابل آسیب‌های ناشی از رطوبت بکار می‌رود. در استاندارد آشتو T-283 روش تهیه نمونه و نحوه اندازه‌گیری مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها ناشی از اثرات اشباع و شرایط ذوب و یخبندان، بر روی نمونه‌های

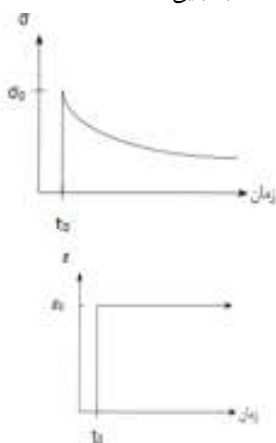
آزمایش کشش غیرمستقیم، آزمایشی است که در تعیین مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی می‌تواند استفاده شود. این آزمایش، معیار خوبی از مشخصات شکست ناشی از کشش نمونه‌های مخلوط آسفالتی را در اختیار ما قرار می‌دهد (عربانی و فردوسی، ۱۳۸۵). آزمایش کشش غیرمستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش

مخلوط آسفالتی در شرایط آزمایشگاه شرح داده شده است (منصوریان و عامری، ۱۳۸۵).

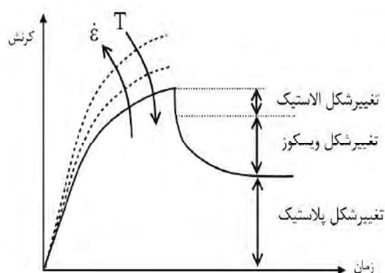
همیشه این ایده وجود داشته است که می‌توان رفتار آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی و از جمله رفتار کشش غیر مستقیم این مصالح را با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری شبیه‌سازی کرد. تاکنون، تحقیقات مختلفی در زمینه شبیه‌سازی رفتار مخلوط‌های آسفالتی انجام گرفته است. با این حال هنوز آن دسته از تحلیل‌های عددی که بتوانند پاسخ‌های قابل اعتمادی به دست دهند، به طوری که بتوان از نتایج آنها با اطمینان کامل استفاده نمود، در دسترس نیستند. بنابراین هنوز نیاز به انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. از طرفی در بیشتر تحقیقات گذشته، آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی به صورت الاستیک مدل سازی شده است. با توجه به اینکه آزمایش کشش غیر مستقیم در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد صورت می‌گیرد، شاید مدل سازی به صورت الاستیک ما را از واقعیت دور کند. همان طور که می‌دانیم آسفالت گرم، مخلوطی از مصالح سنگی و قیر خالص است و یکی از اجزاء اصلی و تعیین کننده خاصیت آسفالت، قیر موجود در آن است. با توجه به رفتار و ویژگی‌های این ماده و با در نظر گرفتن دمای آزمایش می‌توان گفت که آسفالت رفتاری ویسکوالاستیک در این دما دارد (خانی و گلی، ۱۳۹۵). بدین منظور در این تحقیق، آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی با فرض رفتار ویسکوالاستیک و با استفاده از ضرایب سری پرونی که پارامترهای لازم برای مدل سازی از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است، مدل سازی خواهد شد.

ویسکوالاستیسیتیه خاصیت دسته‌ای از مواد است که رفتاری میان دو خاصیت کلی ویسکوز بودن و کشسان بودن را از خود نشان می‌دهد. این خاصیت به هنگام تحمیل نیروی خارجی و اعمال تغییر شکل پدیدار می‌شود. شکل ۱ روند تغییر تنش و کرنش برای یک ماده ویسکوالاستیک با گذشت زمان را نشان می‌دهد (مبیرس و چاوالا، ۲۰۰۹). مخلوط‌های آسفالتی، مصالحی هستند که می‌توانند دارای رفتار ویسکوالاستیک باشند. مخلوط‌های آسفالتی به دلیل ترکیبات داخلی شامل سیمان قیری (ماستیک)، دانه‌بندی سنگدانه‌ها و حفرات هوا دارای رفتار پیچیده‌ای هستند. هر کدام از این سه

ترکیب دارای خواص اساسی الاستیسیتیه، ویسکوزیته و پلاستیسیتیه هستند که این خواص خود نیز به شرایط محیطی مانند رطوبت و دما وابسته هستند. پاسخ نمادین مخلوط‌های آسفالتی وابسته به بار تنش ثابت σ و پاسخ در مقابل باربرداری شامل اجزای برگشت پذیر و برگشت‌ناپذیر کرنش است. شکل ۲ پاسخ کلی مخلوط‌های آسفالتی را با گذشت زمان نشان می‌دهد (طباطبایی، ۱۳۹۳).



شکل ۱. روند تغییر تنش و کرنش برای یک ماده ویسکوالاستیک با گذشت زمان



شکل ۲. پاسخ کلی مخلوط‌های آسفالتی با گذشت زمان

۲- مواد و روشها

۲-۱- مصالح و مواد آزمایشگاهی

در این تحقیق، دو نوع قیر ۸۵/۱۰۰ و ۶۰/۷۰ در تهیه مخلوط‌های آزمایشگاهی استفاده شدند. قیر اول، یک قیر معمولی با درجه نفوذ ۸۵ بوده، لیکن قیر دوم، قیر پلیمری اصلاح شده با استفاده از استایرن بوتادین استایرن بوده است. مشخصات فنی این قیرها در جدول ۱ ارائه شده است.

نمونه های مخلوط آسفالتی تهیه شده در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات قیرهای استفاده شده در مخلوط های آسفالتی

شرایط پیرشدگی	ویژگی ها	قیر	
		۸۵/۱۰۰	۶۰/۷۰
قیر اصلی	ویسکوزیته در دمای 135°C (Pa.s)	۰/۳۸	۱/۶۶
	نقطه نرمی (°C)	۴۵	۶۹
	درجه نفوذ	۸۵	۶۰
	شکل پذیر (cm)	>۱۰۰	>۱۰۰
	نقطه اشتعال (°C)	۳۳۱	۳۴۴
	G*/sin δ at 64°C (Pa)	۱۶۵۳	-
قیر پیر شده کوتاه مدت (RTFO)	G*/sin δ at 64°C (Pa)	۲۴۴۲	-
	G*/sin δ at 76°C (Pa)	-	۳۹۶۸
قیر پیر شده بلند مدت (RTFO+PAV)	G*(sin δ) at 25°C (MPa)	۲/۵۸	۵/۴۱

جدول ۳. ویژگی های فنی مصالح سنگی گرانیته

ویژگی	نتایج آزمایش	روش آزمایش
وزن مخصوص مصالح درشت دانه	۲/۶۲	AASHTO T85
جذب (درصد)	۰/۴۰	AASHTO T85
وزن مخصوص مصالح ریز دانه	۲/۵۷	AASHTO T84
هم ارز ماسه ای (درصد)	۲۳/۳	BS 812-105
سایش لس آنجلس (درصد)	۲۳/۸۶	AASHTO T96
مقدار خردشدگی سنگدانه ها (درصد)	۱۹/۲۵	BS 812-110

مصالح سنگی گرانیته خردشده به عنوان مصالح سنگی در تهیه مخلوط های آسفالتی استفاده گردید. حدود دانه بندی مصالح سنگی در جدول ۲ نشان داده شده است. ویژگی های فنی این مصالح نیز در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲. دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده در مخلوط ها

اندازه الک (mm)	درصد عبوری	درصد عبوری (در نمونه های آزمایشگاهی)
۲۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۴	۹۰-۱۰۰	۹۵
۱۰	۷۶-۸۶	۸۱
۵	۵۰-۶۲	۵۶
۳/۳۵	۴۰-۵۴	۴۷
۱/۱۸	۱۸-۳۴	۲۶
۰/۴۲۵	۱۲-۲۴	۱۸
۰/۱۵۰	۶-۱۴	۱۰
۰/۰۷۵	۴-۸	۶

از ردیست به عنوان افزودنی مخلوط آسفالتی نیمه گرم در تهیه نمونه های آزمایشگاهی استفاده شد. ردیست یک افزودنی شیمیایی در تهیه مخلوط های نیمه گرم است که توسط شرکت اکرونوبل تولید می شود (جدول ۴). در این تحقیق، افزودنی ردیست به میزان ۲ درصد برای تهیه مخلوط های آسفالتی نیمه گرم به قیر افزوده شد. این ماده درجه حرارت پخت و پخش مخلوط آسفالتی نیمه گرم را ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد کاهش می دهد (حمزه و همکاران، ۲۰۱۵).

۲-۲- تهیه نمونه های آزمایشگاهی

در این تحقیق ۷ نمونه مخلوط آسفالتی نیمه گرم تهیه شد. شش نمونه مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی ۲ درصد افزودنی ردیست با دمای تراکم پایین تر نسبت به نمونه های مخلوط آسفالتی گرم و یک نمونه مخلوط آسفالتی گرم بدون افزودنی ردیست است. برای تهیه نمونه های مخلوط آسفالتی گرم و نیمه گرم از قیر های ۸۵/۱۰۰ و ۶۰/۷۰ استفاده شد. مشخصات

جدول ۴. میزان مصرف توصیه شده افزودنی

شرایط انتخاب شده	ردیست (درصد)
کمک به تراکم	۰/۵-۱
مخلوط آسفالتی نیمه گرم برای قیر معمولی (۳۰ درجه سانتیگراد کاهش)	۱-۱/۵
مخلوط آسفالتی نیمه گرم برای قیر پلیمری اصلاح شده و آسفالت ماستیک سنگدانه ای (۳۰ درجه سانتیگراد کاهش)	۱/۵-۲
بهبود کارایی	۲-۳

۲-۳-۲- آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق برای محاسبه مدول برجهندگی نمونه های آزمایشگاهی از آزمایش مدول برجهندگی استفاده شده است. از مدول برجهندگی در تعریف بخش الاستیک مخلوط های آسفالتی در نرم افزار آباکوس استفاده شد. در این تحقیق، آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شده است. به منظور تعیین مدول برجهندگی نمونه های آسفالتی به روش کشش غیر مستقیم، ابتدا نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه کنترل دما قرار می گیرند تا به طور همگن به مورد نظر آزمایش برسند. سپس در محل بارگذاری قرار می گیرند. آزمایش مدول برجهندگی با اعمال نیرویی خطی در راستای محور قطره های نمونه صورت می گیرد. هر سیکل از آزمایش به مدت یک ثانیه به طول می انجامد. مطابق شکل ۴، مدت زمان بارگذاری و باربرداری ۰/۱ ثانیه است و پس از آن به مدت ۰/۹ ثانیه به نمونه اجازه استراحت داده می شود (غنی زاده و فخری، ۱۳۹۲). مدول برجهندگی در آزمایش کشش غیر مستقیم مطابق استاندارد ASTM-4123 D با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود:

$$E_{RI} = P(v_{RI} + 0.27) / t \Delta H_I \quad (1)$$

$$E_{RT} = P(v_{RT} + 0.27) / t \Delta H_T \quad (2)$$

در این معادلات E_{RI} و E_{RT} به ترتیب مدول ارتجاعی آبی (لحظه ای) و کلی بر حسب مگا پاسکال، P بار تکراری بر حسب نیوتن، t ضخامت نمونه بر حسب میلی متر، ΔH_I و ΔH_T به ترتیب تغییر شکل افقی آبی و کلی بر حسب میلی متر است. مدول برجهندگی به دست آمده از نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای ۷ نمونه مخلوط آسفالتی مطابق جدول ۷ است.

۲-۳-۲- آزمایش ها

۲-۳-۱- آزمایش کشش غیر مستقیم

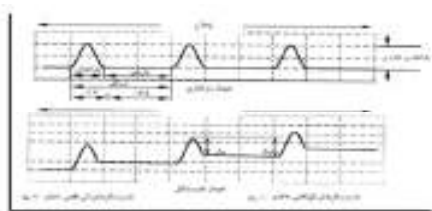
در این تحقیق از آزمایش کشش غیرمستقیم برای اندازه گیری میزان مقاومت کششی نمونه های مخلوط آسفالتی تحت بار فشاری استفاده شده است. دمای آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد است. این آزمایش توسط بارگذاری نمونه های استوانه ای آسفالتی با بارهای فشاری که به موازات و در امتداد صفحه قطری عمودی با سرعت ثابت ۵۰/۸ میلی متر (۲ اینچ در دقیقه) اعمال می شود، انجام می شود. برای توزیع بار و حفظ سطح بارگذاری ثابت، بار فشاری از طریق دو نوار بارگذاری (بالا و پایین نمونه) فولادی اعمال می شود (یوسف دوست و همکاران ۱۳۹۰). شکل ۳ تصویر شماتیک دستگاه آزمایش کشش غیر مستقیم و نحوه بارگذاری این دستگاه را نشان می دهد. در جدول ۵ و ۶ مشخصات و نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نمونه های آزمایشگاهی ارائه شده است.

جدول ۵. مشخصات نمونه های آزمایشگاهی

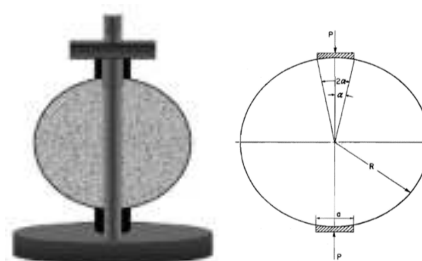
نمونه	ضخامت نمونه (میلیمتر)	قطر نمونه (میلیمتر)	نوع مخلوط	نوع قیر	درصد افزودنی	دمای تراکم (سانتیگراد)
A	۶۲/۲	۹۹/۸۴	WMA	۶۰/۷۰	۲	۱۶۵
B	۶۲/۱۵	۹۹/۸۵	WMA	۶۰/۷۰	۲	۱۵۰
C	۶۲/۱۵	۹۹/۹۶	WMA	۶۰/۷۰	۲	۱۳۵
D	۶۲/۰۹	۹۹/۸۶	WMA	۸۵/۱۰۰	۲	۱۴۰
E	۶۲/۱۹	۹۹/۹۲	WMA	۸۵/۱۰۰	۲	۱۲۵
F	۶۲/۱۹	۹۹/۸۹	WMA	۸۵/۱۰۰	۲	۱۱۰
G	۶۲/۱۷	۹۹/۸۷	HMA	۸۵/۱۰۰	۰	۱۵۰

جدول ۶. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نمونه های آزمایشگاهی

نمونه	عرض نوار بارگذاری (میلیمتر)	طول نوار بارگذاری (میلیمتر)	ضخامت نوار بارگذاری (میلیمتر)	دمای آزمایش (سانتیگراد)	حداکثر بار وارده (کیلونیوتن)	زمان آزمایش (ثانیه)	مقدار تغییر شکل عمودی تحت حداکثر بار وارده (میلیمتر)	مقدار تغییر شکل عمودی نهایی (میلیمتر)
A	۱۲/۴۸	۶۲/۲	۶/۲۴	۲۵	۱۲/۲۴۶	۸/۳۴	۲/۲۰۰۳	۷/۰۰۰
B	۱۲/۴۸	۶۲/۱۵	۶/۲۴	۲۵	۱۰/۴۱۳	۶/۷۶	۱/۹۶۳۲	۵/۶۵۴
C	۱۲/۴۹	۶۲/۱۵	۶/۲۴۵	۲۵	۱۰/۱۰۹	۷/۰۴	۲/۱۱۵۶	۵/۸۹۱
D	۱۲/۴۸	۶۲/۰۹	۶/۲۴	۲۵	۱۰/۳۴۶	۷/۷۶	۲/۰۰۵۵	۶/۵۰۱
E	۱۲/۴۹	۶۲/۱۹	۶/۲۴۵	۲۵	۹/۵۲۸	۹/۰۲	۱/۹۸۰۱	۷/۵۶۷
F	۱۲/۴۸	۶۲/۱۹	۶/۲۴	۲۵	۸/۹۶۰	۷/۹۶	۲/۴۶۲۷	۶/۶۷۰
G	۱۲/۴۸	۶۲/۱۷	۶/۲۴	۲۵	۱۰/۷۷۳	۷/۳۳	۱/۸۷۰۱	۶/۱۳۷



شکل ۴. نمودارهای بارگذاری و تغییر شکل در آزمایش مدول برجهنگی (غنی زاده و فخری، ۱۳۹۲)



شکل ۳. نحوه بارگذاری در دستگاه آزمایش کشش غیر مستقیم

جدول ۷. نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه های

آزمایشگاهی

نمونه	دمای آزمایش (سانتیگراد)	مدول برجهندگی (مگاپاسکال)
A	۲۵	۶۶۰۵
B	۲۵	۵۶۰۰
C	۲۵	۴۵۸۰
D	۲۵	۵۶۰۲
E	۲۵	۴۸۴۴
F	۲۵	۴۵۹۴
G	۲۵	۶۱۹۲

جدول ۸. ضرایب سری پرونی تعریف شده در این تحقیق

نمونه	مدول برشی (g) بر حسب N/mm ²	مدول حجمی (k) بر حسب N/mm ²	تنش برشی (t) بر حسب N/mm ²
A	۰/۸	۰	۰/۰۰۰۱
B	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۳	۴۲۱/۰۱
C	۰/۰۳	۰/۳۱	۸۹۰/۰۸
D	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۱
E	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۱
F	۰/۰۰۱	۰/۹	۰/۱
G	۰/۱	۰/۰۰۰۱	۱۰۰۰

۲-۴- مدل سازی آزمایش کشش غیر مستقیم در نرم افزار آباکوس

در این تحقیق برای ارزیابی نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم از نرم افزار آباکوس ورژن ۶/۱۴ استفاده شده است. نرم افزار آباکوس از جمله نرم افزار های قدرتمند مهندسی به کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزاء محدود (FEM) هست.

نرم افزار آباکوس رفتار مواد ویسکوالاستیک را در دو حوزه عمده بررسی می کند: حوزه زمان و حوزه فرکانس. در حوزه زمان تغییر شکل های زیاد مواد و در حوزه فرکانس رفتار موادی که وابسته به فرکانس هستند بررسی می شود. چهار روش برای تعریف خواص مواد ویسکوالاستیک در حوزه زمان وجود دارد که عبارتند از تعیین ضرایب سری پرونی، نتایج آزمایش خزش، نتایج آزمایش رها سازی و تعیین ضرایب وابسته به فرکانس. پنج روش نیز برای تعریف خواص مواد ویسکوالاستیک در حوزه فرکانس وجود دارد که عبارتند از: روش فرمولی (Formula)، روش جدولی (Tabular)، تعیین ضرایب سری پرونی، نتایج آزمایش خزش و نتایج آزمایش رها سازی (رهروی و صفدری، ۱۳۹۰). در این تحقیق از ضرایب پرونی برای تعریف خواص ویسکوالاستیک استفاده شده است. جدول شماره ۸، ضرایب سری پرونی برای نمونه های مختلف آزمایشگاهی را نشان می دهد. نحوه تعیین این ضرایب در بخش ۲-۵ توضیح داده می شود.

برای راحتی کار با نرم افزار آباکوس این نرم افزار به یازده قسمت تقسیم شده است که به هر یک از قسمت ها ماژول گفته می شود. هر ماژول حین مدل سازی وظایفی را بر عهده دارد. برای مدل سازی آزمایش، ۷ نمونه مخلوط آسفالتی به صورت استوانه ای توپر از نوع تغییر شکل پذیرمدل شدند. نوارهای بارگذاری با در نظر گرفتن اینکه دارای سختی بسیار بالاتری نسبت به نمونه های مورد آزمایش هستند، به صورت فولادی و صلب مدل شدند. مشخصات هندسی نمونه ها و نوارهای بارگذاری در جدول ۹ آورده شده است.

پارامترهای لازم جهت تعریف خصوصیات مصالح در ماژول Property شامل چگالی، مدول برجهندگی، ضریب پواسون و ضرایب سری پرونی نمونه های مخلوط آسفالتی و نیز چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نوارهای بارگذاری است. چگالی نمونه های مخلوط آسفالتی و نوارهای بارگذاری به ترتیب ۲۲۵۰ و ۷۸۵۰ kg/m³ انتخاب شدند. همچنین ضریب پواسون نمونه ها و نوارها به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۳ در نظر گرفته شدند. مدول الاستیسیته نوارها نیز ۲۰۰۰۰۰ N/mm² در نظر گرفته شد. مدول برجهندگی و ضرایب سری پرونی نمونه های مخلوط آسفالتی در جداول ۷ و ۸ آورده شده است. ضریب پواسون نمونه ها با توجه به دمای آزمایش مدول برجهندگی از رابطه ۳ محاسبه شده است.

$$V=0.15 + \frac{0.35}{1+e^{(3.1849-0.04233 t)}} \quad (3)$$

در این رابطه t دمای آزمایش بوده و بر حسب درجه فارنهایت است. در ماژول Assembly، چینش قطعات از نوع Dependent انتخاب شد و در ماژول Step، نوع تحلیل

۲-۵ تعیین ضرایب پرونی نمونه های آسفالتی

در این تحقیق به منظور به دست آوردن ضرایب سری پرونی از نرم افزار Design-Expert ورژن ۷ و روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است. نرم افزار Design-Expert طراحی شده است تا به کاربر در طراحی و تفسیر یک آزمایش چند فاکتوری کمک کند (حقیقی و همکاران، ۱۳۹۲). از طرفی، روش سطح پاسخ یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل های تجربی بر اساس آزمایشهای چند فاکتوری است. بدین منظور چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) و وابسته (متغیرهای خروجی) تعریف می شود. سپس با تعریف یک دامنه مشخص برای هر یک از متغیرهای مستقل، یک طرح آزمایش استخراج می‌گردد.

در این طرح آزمایش، با روش های آماری تعداد نمونه های آزمایشگاهی کاهش می یابد. یک طرح آزمایش یک سری از آزمونهاست که باید اجرا شود. در هر آزمون با تغییر مقدار متغیرهای ورودی، متغیر خروجی استخراج می‌شود (جبروتی و غفرانی، ۱۳۹۴). سپس رابطه ریاضی بین متغیر های ورودی و خروجی بدست می‌آید. به منظور بدست آوردن ضرایب سری پرونی متناظر برای هفت نمونه آسفالتی مندرج در جدول ۵، این ضرایب به عنوان متغیرهای مستقل و مقادیر تغییر شکل عمودی نمونه های آسفالتی حاصل از شبیه سازی کامپیوتری با نرم افزار آباکوس به عنوان متغیرهای وابسته تعریف شدند.

ضرایب پرونی شامل سه پارامتر تنش برشی (τ) بر حسب N/mm^2 ، مدول حجمی (k) بر حسب N/mm^2 و مدول برشی (g) بر حسب N/mm^2 هستند. مطالعات تحقیقی نشان داد که دامنه این پارامتر ها برای مخلوط های آسفالتی به ترتیب می تواند بین $0/001$ تا $1/000$ ، $0/001$ تا $0/9$ و $0/001$ تا $0/9$ باشد. جدول ۱۱، طرح آزمایش لازم برای هریک از هفت نمونه آزمایشگاهی را نشان می دهد.

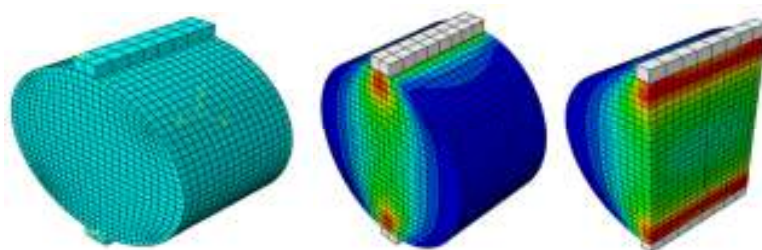
Dynamic implicit و از نوع Quasi-static در نظر گرفته شد. دوره زمانی تحلیل در همه نمونه ها برابر با زمان انجام آزمایش در نظر گرفته شد. برای ایجاد تماس سطح به سطح در ماژول Interaction، باید سطحی به عنوان سطح پایه و سطح دیگری به عنوان سطح پیرو مشخص شوند. نوارهای بارگذاری به خاطر اینکه مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به نمونه های مخلوط آسفالتی دارند، به عنوان سطح پیرو در نظر گرفته شدند. خاصیت اندرکنش بین نمونه و نوارهای بارگذاری از نوع رفتار تماسی (Tangential Behavior) و رفتار نرمال در نظر گرفته شد.

با توجه به اینکه بارگذاری به صورت تدریجی انجام می‌گیرد، بنابراین نیاز به تعریف تاریخچه بارگذاری در ماژول Load است. بنابراین در قسمت Amplitude، تاریخچه بارگذاری را از نوع Smooth Step انتخاب کرده و نتایج بارگذاری آزمایش را از لحظه شروع آزمایش تا پایان آزمایش اعمال می کنیم. چگالی مش نمونه های آسفالتی ۴ و چگالی نوار های بارگذاری ۸ انتخاب شد. شکل المان از نوع Hex و تکنیک مش بندی از نوع منظم (Structured) در نظر گرفته شد. تعداد کل المان های بکار رفته در مدل ۸۹۹۲ و از نوع استاندارد و 3D Sress و ۸ گرهی کاهش یافته (C3D8R) و مرتبه المان یک در نظر گرفته شد. تعداد کل گره های به کار رفته در مدل ۱۰۳۲۵ گره است. شکل ۵ یک نمونه از مش بندی نمونه مخلوط آسفالتی و نوارهای بارگذاری در ماژول مش و نمای گرافیکی مدل بعد از تحلیل در ماژول Visualization را نشان می دهد.

با توجه به اینکه اطلاعات ورودی در این نرم افزار با واحد از پیش تعیین شده نرم افزاری گرفته نمی شود، لذا بایستی تمامی داده ها بر اساس یک سیستم اندازه گیری متناسب با هم وارد گردند که در این مدل سازی از سیستم اندازه گیری SI میلیمتری استفاده شده است و واحدها طبق جدول ۱۰ مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۹. مشخصات هندسی نمونه ها و نوارهای بارگذاری (واحدها بر حسب میلیمتر)

نمونه	شعاع نمونه	ارتفاع نمونه	عرض نوار بارگذاری	طول نوار بارگذاری	ضخامت نوار بارگذاری
A	۴۹/۹۲	۶۲/۲	۱۲/۴۸	۶۲/۲	۶/۲۴
B	۴۹/۹۲۵	۶۲/۱۵	۱۲/۴۸	۶۲/۱۵	۶/۲۴
C	۴۹/۹۸	۶۲/۱۵	۱۲/۴۹	۶۲/۱۵	۶/۲۴۵
D	۴۹/۹۳	۶۲/۰۹	۱۲/۴۸	۶۲/۰۹	۶/۲۴
E	۴۹/۹۶	۶۲/۱۹	۱۲/۴۹	۶۲/۱۹	۶/۲۴۵
F	۴۹/۹۴۵	۶۲/۱۹	۱۲/۴۸	۶۲/۱۹	۶/۲۴
G	۴۹/۹۳۵	۶۲/۱۷	۱۲/۴۸	۶۲/۱۷	۶/۲۴



شکل ۵. مش بندی نمونه و نوارهای بارگذاریدر ماژول Mesh و نمای گرافیکی مدل بعد از تحلیل در ماژول Visualization

جدول ۱۰. واحد های در نظر گرفته شده برای مدل سازی

ابعاد نمونه و نوار بارگذاری	چگالی	مدول برجهنگی	نیرو	زمان	جابجایی (تغییرشکل)
mm	Kg/mm ²	N/mm ²	N	S	mm

جدول ۱۱. طرح آزمایش لازم برای اجرا با نرم افزار آباکوس برای هریک از هفت نمونه آزمایشگاهی

	Std	Run	Block	Factor 1 A-G	Factor 2 B-K	Factor 3 C-I
	5	1	Block 1	0.00	0.00	1000.00
	6	2	Block 1	0.90	0.00	1000.00
	14	3	Block 1	0.45	0.45	1000.00
	2	4	Block 1	0.90	0.00	0.00
	9	5	Block 1	0.00	0.45	500.00
	4	6	Block 1	0.90	0.90	0.00
	11	7	Block 1	0.45	0.00	500.00
	13	8	Block 1	0.45	0.45	0.00
	15	9	Block 1	0.45	0.45	500.00
	1	10	Block 1	0.00	0.00	0.00
	16	11	Block 1	0.45	0.45	500.00
	8	12	Block 1	0.90	0.90	1000.00
	3	13	Block 1	0.00	0.90	0.00
	7	14	Block 1	0.00	0.90	1000.00
	12	15	Block 1	0.45	0.90	500.00
	10	16	Block 1	0.90	0.45	500.00

۳-۲- نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب زمان (جابجایی در راستای Y)

شکل ۷ نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب زمان حاصل از مدل سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می کند. با توجه به اینکه در آباکوس همواره مقادیر تغییر شکل عمودی، تنش و کرنش برای بحرانی ترین المان ها و گره ها خوانده می شود و برای همین المان ها و گره ها نمودارها را ترسیم می کنیم. به منظور بررسی نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب زمان از ناحیه های بحرانی، گره هایی را انتخاب می کنیم و برای مقادیر تغییر شکل عمودی این گره ها میانگین می گیریم، سپس برای این گره ها نمودارهای تغییر شکل عمودی بر حسب زمان را ترسیم می کنیم. منظور از ناحیه بحرانی در نمونه، ناحیه ای است که میزان تغییر شکل آن بیشتر است.

۳-۳- نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب نیرو

شکل ۸ نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب نیرو حاصل از مدل سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می کند. به منظور مقایسه نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب نیرو، ابتدا از نتایج بارگذاری بر حسب زمان از گره مربوط به Rigid Point در آباکوس خروجی گرفته و به عنوان مولفه Y نمودار در نظر می گیریم. سپس از نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب زمان، خروجی گرفته و به عنوان مولفه X نمودار در نظر می گیریم.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی ۷ نمونه مخلوط آسفالتی مدل سازی شد. مدول برجهنگی لازم برای مدل سازی توسط آزمایش مدول برجهنگی بدست آمد. ضرایب سری پرونی لازم برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک نمونه های مخلوط آسفالتی با استفاده از نرم افزار DESIGN EXPERT و با روش سطح پاسخ (RSM) انتخاب شد. نتایج تغییر شکل عمودی حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

پس از اجرای نرم افزار آباکوس به ازای تغییر مقادیر ضرایب پرونی، تغییر شکل عمودی متناظر زیر نوار بارگذاری مشخص می گردد. بعد از تحلیل متغیرهای مستقل و وابسته، متغیرهای وابسته ای که به عنوان نتایج تغییر شکل عمودی برای تطابق با نتایج آزمایشگاهی است به نرم افزار Design Expert وارد می شود. نرم افزار با توجه به محدوده متغیرهای مستقل و متغیر وابسته ای که از نرم افزار خواسته شده است، ضرایب سری پرونی بهینه را برای رسیدن به نتایج منطبق با نتایج آزمایشگاهی در نرم افزار آباکوس ارائه می دهد.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش

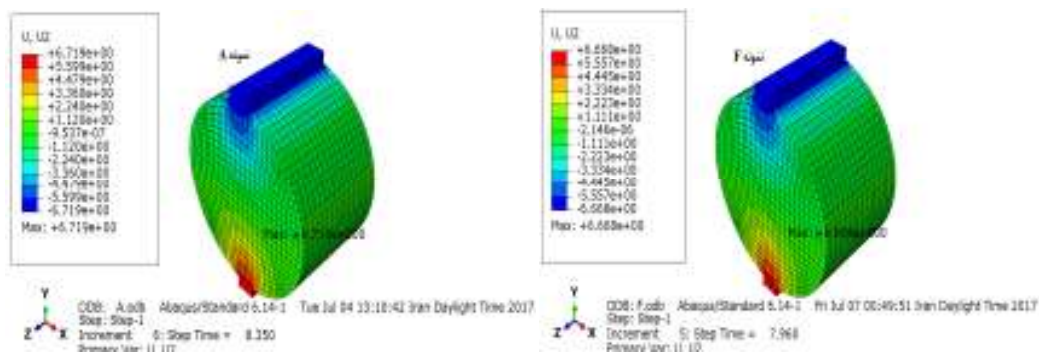
جدول ۱۲ نتایج تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش آزمایشگاهی و مدل سازی را نشان می دهد. منظور از تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش، مقدار تغییر شکل عمودی نمونه در لحظه آخر آزمایش است. شکل ۶ نتایج تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش مدل سازی برای نمونه A و F در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد. منظور از تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش، مقدار تغییر شکل عمودی نمونه در لحظه آخر آزمایش است.

همان طور که در تصاویر مربوط به نتایج تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش مشخص است.

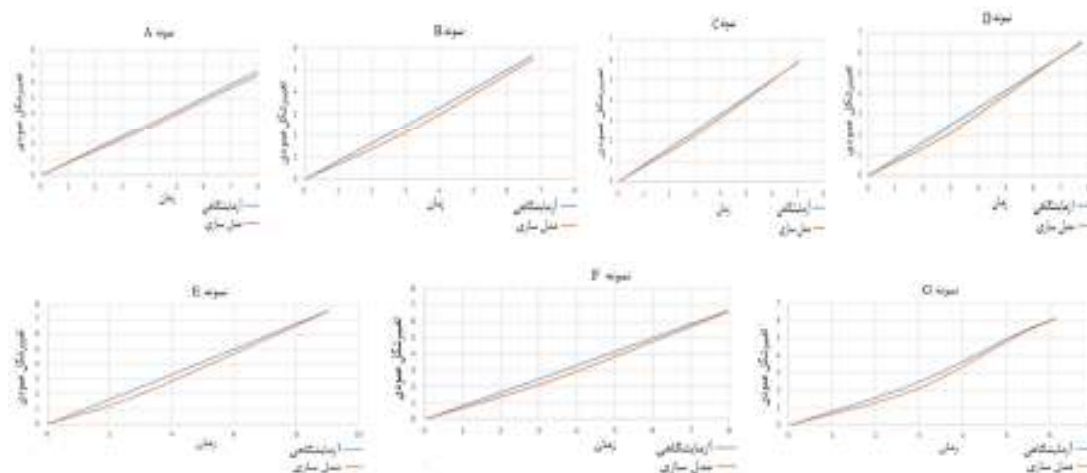
قسمت های مربوط به زیر نوارهای بارگذاری بالا و پایین دارای بیشترین تغییر شکل عمودی است. علت متفاوت بودن رنگ (آبی و قرمز) قسمت های زیر نوارهای بارگذاری، به علت علامتهای مختلف آنها است. با توجه به اینکه جهت بارگذاری نوار بالا در دستگاه مختصات دکارتی به طرف پایین است، بنابراین تغییر شکل این قسمت به سمت پایین بوده و منفی است برای ناحیه زیر نوار بارگذاری پایین هم عکس این قضیه رخ می دهد یعنی جهت بارگذاری به سمت بالا بوده و تغییر شکل مثبت است.

جدول ۱۲. نتایج تغییر شکل عمودی انتهایی آزمایش حاصل از مدل سازی و آزمایشگاهی

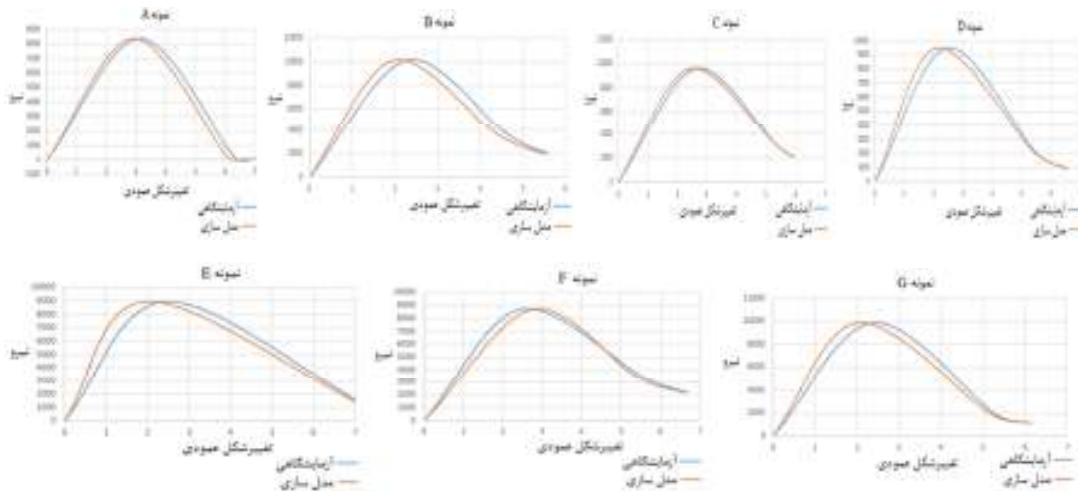
نمونه	A	B	C	D	E	F	G
زمان انجام آزمایش (ثانیه)	۸/۳۵	۶/۷۶	۷/۰۴	۷/۷۶	۹/۰۲	۷/۹۶	۷/۳۳
تغییر شکل عمودی نهایی آزمایشگاهی (میلیمتر)	۷	۵/۶۵۴	۵/۸۹۱	۶/۵۰۱	۷/۵۶۷	۶/۶۷۰	۶/۱۳۷
تغییر شکل عمودی نهایی مدل سازی (میلیمتر)	۶/۷۱۹	۵/۴۸۱	۵/۹۳۴	۶/۵۷۲	۷/۶۸۷	۶/۶۶۸	۶/۱۰۶
درصد اختلاف	۴/۲	۳/۱۵	۰/۷	۱	۱/۶	۰/۰۳	۰/۵



شکل ۶. تغییر شکل عمودی انتهایی آزمایش برای نمونه A و F



شکل ۷. مقایسه نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب زمان مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های A و F



شکل ۸. مقایسه نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب نیرو در مدل سازی آباکوس با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه های A تا F

می یابد در حالیکه تغییر شکل سیر افزایشی خود را ادامه می دهد. همانطور که در نمودارها مشخص است مقدار تغییر شکل عمودی نهایی مدل سازی تقریباً منطبق بر مقدار تغییر شکل عمودی نهایی آزمایشگاهی است.

۵- مراجع

-جبروتی، ع و غفرانی، ع. (۱۳۹۴). "معرفی روش شناسی سطح پاسخ (Response Surface Methodology)", چهارمین همایش ملی فن آوری های نوین شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، خراسان رضوی، آذر ۱۳۹۴، ص. ۱-۱۱.

-حقیقی، ف، کریمی، ش، سجادی، ز و طالب پور، ز. (۱۳۹۲)، "آشنایی با نرم افزارهای کاربردی در علم شیمی"، هشتمین سمینار آموزش شیمی ایران، دانشکده شیمی دانشگاه سمنان، شهریور ۱۳۹۲، ص. ۱-۱۹.

-خانی، ع، و گلی، ا، (۱۳۹۵)، "مدلسازی رفتار آسفالت در شرایط الاستیک و ویسکوالاستیک تحت تحلیل دینامیکی"، دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در

بررسی نتایج تغییر شکل عمودی مدل سازی نشان داد که ارتباط خوبی بین نتایج تغییر شکل عمودی انتهای آزمایش حاصل از مدل سازی با نتایج تغییر شکل عمودی آزمایشگاهی برقرار است. اختلاف نتایج مدل سازی با آزمایشگاهی زیر ۵ درصد است که برای نمونه های C و F و G کمتر از یک درصد است. بیشترین و کمترین اختلاف نتایج مربوط به نمونه A و F به ترتیب با درصد اختلاف ۴/۲ و ۰/۰۳ است و میانگین اختلاف نتایج مدل سازی با آزمایشگاهی برای ۷ نمونه برابر ۱/۶ درصد می باشد.

با بررسی نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب زمان حاصل از مدل سازی مشخص شد که مقادیر تغییر شکل عمودی حاصل از مدل سازی همانند نتایج آزمایشگاهی در ابتدای آزمایش صفر بوده و به مرور زمان با افزایش مقدار نیرو به صورت تدریجی افزایش می یابد. همانطور که در نمودارها مشخص است ارتباط خوبی بین نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی برقرار است و نتایج مدل سازی تقریباً منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است. بررسی نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب نیرو حاصل از مدل سازی با نتایج تغییر شکل عمودی بر حسب نیرو حاصل از نتایج آزمایشگاهی نشان داد که همانند نتایج آزمایشگاهی با افزایش نیرو مقدار تغییر شکل افزایش می یابد و بعد از شکست نمونه مقدار نیرو کاهش

عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران، دانشگاه جامع علمی کاربردی، اردیبهشت ۱۳۹۵، ص. ۱-۵.

رهروی، ع.، و صفدری، الف.، (۱۳۹۰)، "شبیه سازی مواد ویسکوالاستیک در نرم افزار ABAQUS، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران"، دانشگاه بیرجند، بیرجند، اردیبهشت ۱۳۹۰، ص. ۱-۴.

طباطبائی، ع.، اعرابی، س.، و خالدی، س.، (۱۳۹۳). "تحلیل ویسکوالاستیک اثر سرعت وسایل نقلیه بر پاسخ مخلوط آسفالتی گرم تحت بارگذاری تکراری به روش المان محدود"، دومین کنگره بین المللی سازه، معماری و توسعه شهری، دبیرخانه دائمی کنگره بین المللی سازه، معماری و توسعه شهری، تبریز، آذر، ص. ۱-۴.

عربانی، م.، و فردوسی، ب.، (۱۳۸۵)، "ارزیابی آزمایش خمش نیم دایره به عنوان روشی جدید برای تعیین مقاومت کششی بتن آسفالتی"، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران، ۱۸-۲۰ اردیبهشت ۱۳۸۵، ص. ۱-۸.

غنی زاده، ع.، و فخری، م.، (۱۳۹۲)، "تاثیر پارامتر های پالس بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط های آسفالتی با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک"، مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره اول، پاییز، ص. ۱-۱۲.

منصوریان، الف. و عامری، م.، (۱۳۸۵)، "بررسی اثر روش تراکم بر مقاومت کششی، مدول برجهندگی و عمر خستگی نمونه های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم"، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران، اردیبهشت ۱۳۸۵، ص. ۱-۳.

یوسف دوست، س.، فرزانه، الف.، اسماعیلی، ع. و احمدی، الف. (۱۳۹۰)، "بررسی آزمایشگاهی مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و فشار تک محوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده با استفاده از کف فیر"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۷، اسفند ماه، ص. ۴-۶.

-Hamzah, M.O., Golchin, B., Jamshidi, A. and Chailleux, E. (2015) "Evaluation of Rediset for use in warm-mix asphalt: a review of the literatures", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, pp. 809-831.

-Meyers, A.M. and Chawla, K.L. (2009) "Mechanical Behavior of Materials", 2th Edition, Cambridge University Press.