

# علم و فناوری سلولز

ژان-لوک ورتز، الیویر بدو و ژان پیر مرسییر

ترجمه:

دکتر علی عبدالخانی

دانشیار دانشگاه تهران

مهندس فرشته فدوی کارتیجی



شماره مسلسل ۹۱۲۵

شماره انتشار ۳۸۴۲

### انتشارات دانشگاه تهران

سرشناسه	: ورتز، ژان- لوک Wertz, Jean- Luc
عنوان و نام پدیدآور	: علم و فناوری سلولز / ژان لوک ورتز، الیویر بدو، ژان پیرمرسیر؛ ترجمه علی عبدالخانی، فرشته فدوی کارتیجی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۴۱۰ ص: مصور، جدول، نمودار.
فروست	: انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۳۸۴۲.
شابک	: 978-964-03-7062-9
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: Cellulose Science and Technology, 2014.
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: سلولز
موضوع	: سلولز-- شیمی
شناسه افزوده	: بدو، اولیویر Bédoué, Olivier
شناسه افزوده	: مرسیر، ژان- پی. Mercier, Jean P.
شناسه افزوده	: عبدالخانی، علی، ۱۳۵۸- مترجم
شناسه افزوده	: فدوی کارتیجی، فرشته، ۱۳۶۵- مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۶ س/۸۴/۶۵/۲۴۸/TP
رده بندی دیویی	: ۶۶۱/۸۰۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۷۰۳۶۹۶

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ ها، سایت ها، مجله ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.

ISBN:978-964-03-7062-9



9 789640 370629

عنوان: علم و فناوری سلولز

تألیف: ژان- لوک ورتز- الیویر بدو- ژان پیر مرسیر

ترجمه: دکتر علی عبدالخانی- مهندس فرشته فدوی کارتیجی

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: ۱۳۹۶

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مترجمان است»

بها: ۲۸۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرش فرشی مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

پست الکترونیک: [press@ut.ac.ir](mailto:press@ut.ac.ir) - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>

پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

## فهرست

فهرست .....	ت
پیشگفتار اول .....	ذ
پیشگفتار دوم .....	ر
پیشگفتار مترجمان .....	ز
مقدمه .....	ش
تقدیر و تشکر .....	ص

### فصل اول: مولکول سلولز .....

۱-۱ مقدمه .....	۱
۱-۱-۱ ساختار مولکولی .....	۱
۲-۱-۱ شیمی گلوکز .....	۳
۳-۱-۱ پلیساکاریدها و دیساکاریدهای مرتبط .....	۵
۲-۱ ساختار این کتاب .....	۱۰
۳-۱ منابع .....	۱۲

### فصل دوم: بیوسنتز سلولز .....

۱-۲ مقدمه .....	۱۵
۲-۲ برخی اصول گیاه‌شناسی .....	۱۶
۱-۲-۲ طبقه‌بندی گیاهان سبز .....	۱۶
۲-۲-۲ سلول‌های گیاه .....	۱۹
۳-۲ بیولوژی مرتبط با سلولز .....	۲۲
۱-۳-۲ از ژن‌ها تا پروتئین‌ها .....	۲۲
۲-۳-۲ کلونسازی DNA و PCR .....	۲۴
۴-۲ کمپلکس‌های پایانه‌ای .....	۲۵
۵-۲ پلیمریزاسیون گلوکز به وسیله آنزیم‌های سلولز سنتاز .....	۳۰
۱-۵-۲ سوبسترای سلولز سنتاز .....	۳۰
۲-۵-۲ آنزیم‌های سلولز سنتاز .....	۳۲
۳-۵-۲ الگوهای پلیمریزاسیون .....	۳۶

۳۹	۴-۵-۲ پلیمریزاسیون سلولز در <i>Acetobacter xylinum</i>
۴۴	۵-۵-۲ پلیمریزاسیون سلولز در گیاهان
۵۷	۶-۲ اجتماع زنجیرها و تشکیل میکروفیبریل ها
۵۸	۱-۶-۲ اجتماع زنجیرها در <i>Acetobacter xylinum</i>
۵۹	۲-۶-۲ اجتماع زنجیرهای سلولزی در گیاهان
۶۵	۷-۲ چگونگی سنتز سلولز به صورت non-in-vivo
۶۵	۱-۷-۲ سنتز in vitro
۶۹	۲-۷-۲ سنتز شیمیایی
۷۱	۸-۲ منابع

**فصل سوم: ساختار و ویژگی های سلولز**

۷۷	۱-۳ مقدمه
۷۷	۲-۳ ساختار سوپرمولکولی
۷۷	۱-۲-۳ بلورینگی مواد سلولزی
۷۹	۲-۲-۳ پلی مورفهای کریستال
۷۹	۳-۲-۳ سیستم مختصات
۸۱	۴-۲-۳ سلولز I
۹۴	۵-۲-۳ سلولز II
۹۹	۶-۲-۳ سلولز III و IV
۱۰۱	۷-۲-۳ قلیا سلولزها
۱۰۲	۸-۲-۳ خلاصه ای از ساختارهای کریستال
۱۰۳	۳-۳ ساختار مورفولوژیکی
۱۰۳	۱-۳-۳ مقدمه
۱۰۵	۲-۳-۳ میکروفیبریل ها
۱۱۴	۳-۳-۳ دیواره های سلولی گیاه
۱۲۵	۴-۳-۳ سلولز باکتریایی
۱۲۶	۴-۳ ویژگی ها
۱۲۷	۱-۴-۳ ویژگی های مکانیکی
۱۲۹	۲-۴-۳ ویژگی های فیزیکی و کریستال های مایع

فهرست □ ج

۱۳۵	۳-۴-۳ ویژگی‌های زیست محیطی
۱۳۵	۳-۴-۴ نانوکامپوزیت‌ها
۱۳۸	۳-۵ منابع

**فصل چهارم: واكشیدگی و انحلال سلولز ۱۴۵**

۱۴۵	۴-۱ مقدمه
۱۴۶	۴-۲ واكشیدگی بین کریستالین
۱۴۶	۴-۲-۱ آب
۱۵۵	۴-۲-۲ مایعات آلی
۱۵۸	۴-۳ واكشیدگی درون کریستالی
۱۵۸	۴-۳-۱ هیدروکسیدهای فلز قلیایی
۱۶۹	۴-۳-۲ اسیدهای غیرآلی و نمک‌ها
۱۷۱	۴-۳-۳ آمین‌ها
۱۷۶	۴-۳-۴ آمونیاک
۱۷۷	۴-۳-۵ هیدرازین
۱۷۸	۴-۴ انحلال
۱۷۹	۴-۴-۱ حلال‌های غیرمشتق‌کننده
۲۰۱	۴-۴-۲ حلال‌های مشتق‌کننده
۲۱۰	۴-۵ منابع

**فصل پنجم: هیدرولیز آنزیمی سلولز ۲۱۷**

۲۱۷	۵-۱ مقدمه
۲۱۸	۵-۲ سلولازها
۲۱۸	۵-۲-۱ ارگانیزم منشأ
۲۱۸	۵-۲-۲ فعالیت اندو و اگزو
۲۱۹	۵-۲-۳ ساختار مدولی
۲۲۶	۵-۲-۴ سازوکار
۲۲۶	۵-۲-۵ نامگذاری
۲۲۷	۵-۳ سیستم‌های سلولاز غیر کمپلکس

۲۲۸	..... ۱-۳-۵ انحلال سلولز طبیعی
۲۲۹	..... (Hypocrea jecorina) <i>Trichoderma reesei</i> ۲-۳-۵
۲۳۹	..... <i>Humicola isolens</i> ۳-۳-۵
۲۴۱	..... ۵-۳-۴ سینتیک و فعالیت
۲۴۵	..... ۵-۳-۵ همافزایی
۲۴۶	..... ۴-۴-۵ کمپلکس‌های چندآنزیمی
۲۴۶	..... ۱-۴-۵ مفهوم سلولوزوم
۲۴۶	..... ۲-۴-۵ انواع سلولوزوم
۲۴۷	..... ۳-۴-۵ مدول‌های متصل‌شونده به کربوهیدرات در اسکافولدین
۲۴۸	..... ۴-۴-۵ برهمکنش دمین‌داکترین - دمین‌چسبنده
۲۵۲	..... ۵-۴-۵ مثال‌هایی از سلولوزوم
۲۶۲	..... ۶-۴-۵ سلولوزوم‌های طراح
۲۶۳	..... ۵-۵ منابع

**۲۷۱ فصل ششم: تخریب غیربیولوژیک سلولز**

۲۷۱	..... ۱-۶ مقدمه
۲۷۲	..... ۲-۶ هیدرولیز اسیدی
۲۷۲	..... ۱-۲-۶ سازوکار و سینتیک‌ها
۲۷۴	..... ۳-۶ تخریب قلیایی
۲۷۴	..... ۱-۳-۶ تأثیر قلیا بر مونوساکاریدها
۲۷۵	..... ۲-۳-۶ تأثیر قلیا بر سلولز
۲۷۸	..... ۴-۶ تخریب اکسیداتیو
۲۷۹	..... ۱-۴-۶ اکسیداسیون توسط هیپوکلریت سدیم
۲۸۰	..... ۲-۴-۶ اکسیداسیون به‌وسیلهٔ اکسیژن اتمسفر و هیدروژن پروکسید
۲۸۲	..... ۵-۶ تخریب حرارتی
۲۸۴	..... ۶-۶ تخریب مکانیکی و تابشی
۲۸۴	..... ۱-۶-۶ تخریب مکانیکی
۲۸۶	..... ۲-۶-۶ تخریب تابشی
۲۸۸	..... ۷-۶ منابع

**فصل هفتم: مشتقات سلولزی ..... ۲۹۱**

۲۹۱	۱-۷ مقدمه .....
۲۹۳	۲-۷ استرهای سلولز .....
۲۹۳	۱-۲-۷ استرهای غیرآلی سلولز .....
۲۹۹	۲-۲-۷ استرهای سلولزی آلی .....
۳۰۴	۳-۲-۷ خلاصه مطالب .....
۳۰۵	۳-۷ اثرهای سلولز .....
۳۰۵	۱-۳-۷ آلکیل اثرهای سلولز .....
۳۰۶	۲-۳-۷ کربوکسی متیل سلولز .....
۳۰۸	۳-۳-۷ هیدروکسی آلکیل اثرهای سلولز .....
۳۱۱	۴-۳-۷ سیانو اتیل سلولز .....
۳۱۱	۵-۳-۷ سایر اثرهای سلولز .....
۳۱۲	۶-۳-۷ خلاصه .....
۳۱۳	۴-۷ ایجاد اتصال های عرضی در سلولز .....
۳۱۳	۱-۴-۷ پرداخت شیمیایی منسوجات و کاغذ .....
۳۱۴	۲-۴-۷ عوامل ایجاد اتصال های عرضی .....
۳۱۷	۵-۷ پیوندزنی سلولز .....
۳۱۸	۶-۷ منابع .....

**فصل هشتم: سوخت ها و مواد شیمیایی حاصل از زیست توده ..... ۳۲۱**

۳۲۱	۱-۸ استفاده از بایومس سلولزی در تولید انرژی و مواد تجدیدپذیر .....
۳۲۱	۱-۱-۸ زیست توده .....
۳۲۲	۲-۱-۸ بایوریفاینری و گرم شدن جهانی .....
۳۲۴	۳-۱-۸ بایواتانول و بایودیزل .....
۳۲۵	۴-۱-۸ مسیرهای تبدیل .....
۳۲۵	۲-۸ تبدیل بیوشیمیایی زیست توده سلولزی .....
۳۲۷	۱-۲-۸ هیدرولیز آنزیمی .....
۳۳۱	۲-۲-۸ هیدرولیز اسیدی .....
۳۳۵	۳-۸ تبدیل شیمیایی حرارتی زیست توده سلولزی .....

۳۳۵	۱-۳-۸ روش‌های اولیه تبدیل شیمیایی حرارتی
۳۳۶	۲-۳-۸ گازسازی
۳۴۲	۳-۳-۸ پیرولیز سریع
۳۴۳	۴-۳-۸ ارتقاء هیدروترمال
۳۴۴	۴-۸ مجموعه‌های زیست پالایشگاهی
۳۴۶	۵-۸ منابع

**فصل نهم: چشم‌اندازها ۳۴۹**

۳۴۹	۱-۹ زیست‌توده سلولزی: نفت خام آینده؟
۳۴۹	۱-۱-۹ کاهش برنامه‌ریزی شده در میزان آلاینده‌های گازهای گلخانه‌ای (GHG)
۳۵۱	۲-۱-۹ تولید جهانی سوخت‌های زیستی
۳۵۲	۳-۱-۹ هزینه‌ها و بازده‌های اتانول زیستی
۳۵۵	۴-۱-۹ فناوری‌های تبدیل زیست‌توده سلولزی
۳۵۵	۲-۹ بیوسنتز سلولز
۳۵۶	۳-۹ نانوفیبرهای سلولزی
۳۵۸	۴-۹ مایعات یونی به‌عنوان حلال‌های جدید سلولز
۳۵۹	۵-۹ پروژه‌های R&D جهانی
۳۵۹	۶-۹ منابع

**واژگان تخصصی ۳۶۱**

**واژه‌نامه ۳۸۳**



## پیشگفتار اول

سلولز فراوان‌ترین پلیمر موجود در طبیعت است. به دلیل اهمیت این پلیمر برای انسان؛ تلاش‌های تحقیقاتی زیادی به همراه تعداد بی‌شماری گزارش و اختراع، ظرف ۱۵۰ سال اخیر به این پلیمر زیستی اختصاص یافته است؛ بنابراین ظهور هر از چندگاه و دوره‌ای کتاب‌هایی در زمینه، چشم‌اندازهای اصلی توسعه علم سلولز لازم است تا افرادی که خواهان دستیابی به اطلاعات جامعی در این زمینه‌اند، بتوانند به آن دست یابند؛ بدون آنکه ناگزیر باشند درگیر تحقیقات و منابع اولیه موجود در این موضوع شوند.

در همین زمینه، کتاب علم و فناوری سلولز نگاشته شده که خلاصه‌ای از پیشرفت‌های اساسی علم سلولز طی بیست سال اخیر است. طی این مدت اخیر پیشرفت‌های شایان ملاحظه‌ای در رابطه با تعیین نقش بیولوژیکی سلولز در طبیعت، کشف سازوکار بیوسنتز و چگونگی تخریب بیولوژیکی آن صورت گرفته که در این کتاب به آنها پرداخته شده است. در تعیین ویژگی‌های ساختاری سلولز در سطح مولکولی و سوپرمولکولی نیز پیشرفت‌های بزرگی حاصل شد. ویژگی‌های ساختاری سلولز که در اینجا به تفصیل بحث شده‌اند، در همه جنبه‌های مربوط به علم سلولز مفاهیم بنیادی دارند. در خلال فصل‌های این کتاب که به ترتیب شامل بیولوژی، شیمی، فیزیک و فناوری سلولز هستند، در نظر گرفتن مورفولوژی خاص سلولز و اثرات آن بر فرایندهای مختلف، یکی از جنبه‌های مثبت کتاب به‌شمار می‌آید.

شکی نیست که این کتاب به‌عنوان مرجعی برای افرادی که در زمینه مواد سلولزی فعال هستند و نیز برای افرادی که به استفاده از زیست‌توده یا تولید مواد دوستدار محیط زیست از منابع پایدار غیر از منابع غذایی علاقه‌مند هستند، مفید خواهد بود.

هنری چانزی

پژوهشگر مرکز ملی پژوهش‌های علمی فرانسه

فوریه ۲۰۰۹

## پیشگفتار دوم

طی سده‌ها زیست‌توده به لحاظ تأمین غذا (برای انسان‌ها و حیوانات) و منابع غیرغذایی (ساختمان، کشتی، منسوجات، کاغذ، انرژی و...) نقشی اساسی در توسعه و تکامل بشر داشته است. زیست‌توده حتی در منابع نفت، گاز و ذغال سنگ هم یافت می‌شود، در حال حاضر بسیاری از سهامداران به قطع وابستگی خود به این سوخت‌های فسیلی تمایل دارند و در حال جایگزین کردن بخشی از آن به‌وسیله منابع انرژی تجدیدپذیر هستند.

زیست‌توده یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است، اما معضلات خاص خود را دارد. اگرچه عصر سوزاندن زیست‌توده برای تأمین انرژی مربوط به ابتدای پیدایش بشریت است، همچنان یک دهم از منابع اولیه انرژی به همین شیوه فراهم می‌شود که البته اغلب به قیمت قطع ناپایدار جنگل‌ها تمام خواهد شد. اگرچه سوخت‌های بیولوژیکی را می‌توان از قندها، نشاسته، روغن‌های گیاهی تهیه کرد، با این شیوه، در صورتی که تهیه این سوخت‌ها بدون رعایت موازین لازم انجام گیرد، تولید در رقابت مستقیم با بازار مواد غذایی خواهد بود.

به‌همین دلیل است که تولیدکنندگان انرژی، توجه زیادی را به منابع لیگنوسلولزی و امکان استفاده از آن در تولید انرژی‌های مدرن به‌ویژه سوخت موتور و مواد شیمیایی معطوف کرده‌اند. اما همه این متخصصان می‌دانند که رسیدن به چنین هدفی آسان نیست. از آنجایی که سلولز فراوان‌ترین پلیمر زیستی موجود در طبیعت محسوب می‌شود، به‌وسیله طبیعت به‌نحو مطلوبی تثبیت شده و از این رو تخریب ساختار آن کار دشواری است.

به همین دلیل من با همکاری ژان لوک ورتز، الیویر بدو و ژان پی مرسیر به نگارش کتاب علم و فناوری سلولز اقدام کرده‌ایم. تجربه این همکاران طی دوره فعالیتشان به معرفی این پلیمر زیستی فوق‌العاده و استثنایی، یعنی سلولز، کمک شایانی کرده است.

**ژان میشل جیرس**

**مدیر اجرایی موسسه تحقیقاتی توسعه پایدار و محیط زیست**

## پیشگفتار مترجمان

نیاز به توسعه و تولید سوخت‌های جایگزین از منابع تجدیدشونده برای حمل و نقل از دو عامل اساسی ناشی می‌شود:

- ۱- پدیده گرم شدن جهانی و
- ۲- کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی.

سناریو به شدت منفی که به طور مداوم به وسیله جوامع علمی و رسانه‌ای در مورد آینده قابل پیش‌بینی انرژی‌های فسیلی پررنگ می‌شود، سبب افزایش روزافزون نگرش مثبت به زیست‌توده شده است. زیست‌توده لیگنوسلولزی به عنوان یک منبع تجدیدشونده دارای ظرفیت فوق‌العاده برای تبدیل به انرژی، مواد زیستی و مواد شیمیایی است. سلولز فراوان‌ترین پلیمر طبیعی موجود بر روی زمین محسوب می‌شود. این پلیمر هم به لحاظ فراوانی و هم به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی اهمیت تجاری بسیاری دارد. نقش سلولز در تهیه فراورده‌های مختلف در صنایع غذایی، بهداشتی، دارویی، نظامی، پوشاک و... جایگزین ناپذیر است؛ اما تبدیل سلولز به فراورده‌ای با ارزش افزوده بالا به دلیل ساختار پایدار و ماهیت درشت‌مولکولی آن، فرایند پیچیده‌ای محسوب می‌شود. تهیه محصولات سلولزی نیازمند گستره وسیعی از دانش بیولوژی، شیمی، فیزیک سلولز به همراه آموختن روش‌های فرآوری آن است. پاسخ به نیازهای مختلف صنایع سلولزی ارتباط تنگاتنگی با توانایی محیط‌های آموزشی به جذب دانشجویان علاقه‌مند و همچنین فراهم کردن امکانات آموزشی مدرن و با کیفیت دارد. با وجود اهمیت تجاری این بیوپلیمر، در حال حاضر هیچ کتابی به زبان فارسی برای آگاهی دانشجویان، علاقه‌مندان و صنعتگران سلولز وجود ندارد. در این ارتباط تاکنون چندین کتاب در ارتباط با ویژگی‌های سلولز به زبان انگلیسی نوشته شده است. در میان کتاب‌های منتشرشده، کتاب حاضر جدیدترین مورد است که برخلاف کتاب‌های قبلی، در آن ساختار و ویژگی‌های سلولز به طور جامع بحث شده است. بیوسنتز، ساختار و تخریب آنزیمی سلولز به همراه مشتقات سلولزی و روش تبدیل آن به سوخت زیستی در این کتاب بررسی خواهد شد. در نگاشتن این کتاب طیف وسیعی از خوانندگان در نظر گرفته شده‌اند. این کتاب راهنمای جامعی برای دانش‌پژوهان و مهندسان چوب، پلیمر و علاقه‌مندان به شیمی قندها و بیولوژی آنها خواهد بود.

دکتر علی عبدالخانی

مهندس فرشته فدوی



## مقدمه

کتاب حاضر، علم و فناوری سلولز، در پاسخ به افزایش گرایش به سمت توسعه سوخت‌های زیستی و محصولات دارای منشأ زیستی، در نتیجه تغییرات آب و هوایی و کاهش منابع نفت خام، نگاشته شده است. در حقیقت زمان مناسبی برای نگارش کتاب جامعی فرا رسیده است که مهم‌ترین جنبه‌های علمی و فناورانه این پلیمر زیستی را پوشش دهد. این کتاب به‌ویژه به‌عنوان مرجعی برای دانشمندان و مهندسان پلیمر (که با مواد بیولوژیکی و سنتزی سر و کار دارند) مفید خواهد بود.

در دیواره سلولی همه گیاهان، کریستال‌های سلولزی در میکروفیبریل‌هایی در مقیاس نانو و غوطه‌ور در یک ماتریس پیچیده سازماندهی شده‌اند. بنابراین علاوه بر دارا بودن ظرفیت استفاده به‌عنوان ماده خام تولید سوخت‌های زیستی، این نانوفیبرهای سلولزی با مدول الاستیسیته‌ای نزدیک به مدول الاستیسیته الیاف کربن، دارای ظرفیت بسیاری برای تولید مواد کامپوزیت جدید هستند.

در خلال فصل‌های این کتاب جدیدترین دانش در زمینه سلولز به همراه گزارش دقیق آخرین پیشرفت‌های تحقیقاتی تشریح شده است. به‌ویژه تحت شرایط خاص و مناسب، مولکول سلولز را در زمینه گسترده‌تری از سایر پلی‌ساکاریدها نشان داده‌ایم و به سه موضوع مهم بیوسنتز سلولز، ساختار و هیدرولیز آنزیمی در مهم‌ترین بخش این کتاب توجه کرده‌ایم. برای آنکه مطالب کتاب تا حد امکان در دسترس باشند، برخی از مراجع اینترنتی نیز در بین منابع هر فصل ذکر شده‌اند.