

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مواد پرانرژی سبز

مترجمان:

دکتر فاطمه ابریشمی، دکتر نرگس زهری

عنوان و نام پدیدآور:	مواد پر انرژی سبز / [ویراستار توره برینک]؛ مترجمان فاطمه ابریشمی، نرگس زهری.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری:	ص. ۵۱۲
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۷۷۳۶-۱۶-۶
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیبا.
یادداشت:	عنوان اصلی: Green Energetic Materials, 2013
موضوع:	سوخت.
موضوع:	مواد منفجره.
موضوع:	شیمی سبز.
شناسه افزوده:	برینک، توره، ویراستار.
شناسه افزوده:	Brinck, Tore
شناسه افزوده:	ابریشمی، فاطمه، ۱۳۴۸ - مترجم
شناسه افزوده:	زهری، نرگس، ۱۳۴۸ - مترجم
شناسه افزوده:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
رده‌بندی کنگره:	TP ۳۱۸/ک۸ ۱۳۹۴
رده‌بندی دیویی:	۶۶۲/۶
کتابشناسی ملی:	۴۰۸۲۴۱۰



دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مجموعه دانشکده‌های مهندسی

عنوان کتاب: مواد پر انرژی سبز
مترجمان: فاطمه ابریشمی، نرگس زهری
ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
طرح روی جلد: فریناز عسگری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
صفحه‌آرایی رایانه‌ای: مهدی ملایی
ویراستار ادبی: زهرا جاویدی
شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ: اول، زمستان ۹۴
قیمت: ۱۸۰.۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7736-16-6

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.

آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز فناوری اطلاعات و مدیریت دانش،

مدیریت انتشارات. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

فهرست مطالب

پیشگفتار مترجمان.....	أ
فصل اول: مقدمه‌ای بر مواد پرانرژی.....	۳
۱-۱- مقدمه.....	۳
۲-۱- شیمی و مواد پرانرژی سبز.....	۴
۳-۱- پیشرانده‌های سبز در سفرهای فضایی غیرنظامی.....	۱۰
۱-۳-۱- اکسیدکننده‌های سبز برای جایگزینی با آمونیوم پرکلرات.....	۱۱
۲-۳-۱- پیشرانده‌های مایع سبز جایگزین هیدرازین.....	۱۵
۳-۳-۱- پیشرانش الکتریکی.....	۱۸
۴-۱- نتایج.....	۲۰
۵-۱- مراجع.....	۲۲
فصل دوم: طراحی نظری مواد پرانرژی سبز: پیش‌بینی پایداری، شناسایی، سنتز و عملکرد.....	۲۷
۱-۲- مقدمه.....	۲۷
۲-۲- روش‌های محاسباتی.....	۳۱
۳-۲- اجزای سازنده‌ی پیشرانده‌های سبز.....	۳۶
۱-۳-۲- تری‌نیتراآمیدها.....	۳۷
۱-۱-۳-۲- سنتز و شناسایی.....	۳۹
۲-۱-۳-۲- خواص و عملکرد.....	۴۰
۲-۳-۲- آنیون‌های پرانرژی غنی از اکسیژن و نیتروژن.....	۴۳
۱-۲-۳-۲- آنیون تری‌نیتروژن دی‌اکسید.....	۴۴
۲-۲-۳-۲- آنیون ۱-نیترو-۲-اکسو-۳-آمینو تری‌آزن.....	۴۷
۳-۳-۲- آنیون پنتازولات و مشتق‌های اکسی آن.....	۴۹
۱-۳-۳-۲- پایداری سینتیکی.....	۵۰
۲-۳-۳-۲- تشخیص طیف‌سنجی.....	۵۲
۳-۳-۳-۲- سنتز.....	۵۳

۵۸	..... عملکرد ۴-۳-۳-۲
۶۰	..... N_4 چهار وجهی ۴-۳-۲
۶۱	..... سطح انرزی پتانسیل ۱-۴-۳-۲
۶۳	..... شناسایی طیف‌سنجی ۲-۴-۳-۲
۶۴	..... سنتز ۳-۴-۳-۲
۶۷	..... پایداری سینتیکی و عملکرد ۴-۴-۳-۲
۷۰	..... نتیجه‌گیری ۴-۲
۷۱	..... مراجع ۵-۲
۸۱	..... فصل سوم: برخی دیدگاه‌ها در حساسیت به آغازش انفجار
۸۱	..... ۱-۳- مواد پرنرزی و شیمی سبز
۸۲	..... ۲-۳- مقدمه‌ای بر حساسیت
۸۵	..... ۳-۳- روابط حساسیت
۸۷	..... ۴-۳- حساسیت: برخی عوامل مرتبط با آن
۸۷	..... ۱-۴-۳- استخلاف‌های آمینو
۸۹	..... ۲-۴-۳- شبکه‌ی بلور لایه‌ای (گرافیت مانند)
۹۰	..... ۳-۴-۳- فضای آزاد در شبکه بلوری
۹۱	..... ۴-۴-۳- پیوندهای ضعیف آغازکننده
۹۳	..... ۵-۴-۳- پتانسیل‌های الکترواستاتیک مولکولی
۱۰۱	..... ۵-۳- خلاصه
۱۰۲	..... ۶-۳- مراجع
۱۱۵	..... فصل چهارم: پیشرفت‌هایی در جهت توسعه پیروتکنیک‌های سبز
۱۱۵	..... ۱-۴- مقدمه
۱۱۸	..... ۲-۴- پایه و اساس پیشرانده‌های «سبز»
۱۲۳	..... ۳-۴- توسعه‌ی پیروتکنیک‌های فاقد پرکلرات
۱۲۳	..... ۱-۳-۴- پیروتکنیک‌های منور فاقد پرکلرات
۱۳۲	..... ۲-۳-۴- شبیه‌سازهای فاقد پرکلرات
۱۳۸	..... ۴-۴- حذف فلزات سنگین از فرمول‌بندی‌های پیروتکنیک

۱۳۹	۱-۴-۴- منورهای نشر نور سبز فاقد باریم.....
۱۴۴	۲-۴-۴- ترکیب‌های آتشنزای فاقد باریم.....
۱۴۷	۳-۴-۴- ترکیب درصدهای پیروتکنیک‌های فاقد سرب.....
۱۵۰	۴-۴-۴- مخلوط‌های پیروتکنیک فاقد کروم.....
۱۵۳	۵-۴- حذف ترکیب‌های آلی کلردار از فرمول‌بندی‌های پیروتکنیکی.....
۱۵۳	۱-۵-۴- ترکیب‌های منور فاقد کلر.....
۱۵۵	۶-۴- ترکیب دود دوستدار محیط‌زیست.....
۱۵۵	۱-۶-۴- ترکیب‌های دود رنگی دوستدار محیط‌زیست.....
۱۶۱	۲-۶-۴- ترکیب‌های دود سفید دوستدار محیط‌زیست.....
۱۷۲	۷-۴- نتیجه‌گیری.....
۱۷۳	۸-۴- اختصارات.....
۱۷۸	۹-۴- مراجع.....
۱۸۷	فصل پنجم: مواد منفجره‌ی نوع اول.....
۱۸۷	۱-۵- مقدمه.....
۱۸۸	۱-۱-۵- مواد منفجره‌ی اولیه چیست؟.....
۱۹۰	۱-۱-۱-۵- دستگاه‌های آغازش متداول: دتوناتورها/چاشنی‌ها/کپسول‌های انفجاری.....
۱۹۴	۲-۱-۵- پوشش برای مواد منفجره‌ی اولیه‌ی سبز.....
۱۹۷	۳-۱-۵- مواد منفجره‌ی اولیه‌ی قدیمی.....
۱۹۷	۱-۳-۱-۵- سرب آزید.....
۲۰۰	۲-۳-۱-۵- سرب استیفات (LS).....
۲۰۱	۲-۵- نماینده‌های مواد منفجره‌ی اولیه‌ی سبز.....
۲۰۳	۱-۲-۵- ترکیب‌های معدنی.....
۲۰۳	۱-۱-۲-۵- نقره آزید (SA).....
۲۰۵	۲-۱-۲-۵- آزیدهای معدنی دیگر.....
۲۰۶	۳-۱-۲-۵- نیکل هیدرازین نیترات (NHN).....
۲۰۷	۴-۱-۲-۵- کامپوزیت‌های بین مولکولی نیمه پایدار (MIC).....
۲۱۰	۵-۱-۲-۵- فسفر قرمز.....
۲۱۱	۲-۲-۵- ترکیب‌هایی بر پایه‌ی آلی.....

۲۱۱	.....تترازول‌ها. ۱-۲-۲-۵
۲۱۳	.....سدیم ۵- نیتروترتازولات (NaNT) ۲-۲-۲-۵
۲۱۵	.....ترکیب‌های کوئوردینه شده‌ی مس 5 (II)-نیتروترتازولات ۳-۲-۲-۵
۲۱۶	.....مس 5 (I)-نیتروترتازولات (DBX-1) ۴-۲-۲-۵
۲۱۹	.....بیس (۵- نیتروترتازولات)تترامین کبالت (III)پرکلرات (BNCP) ۵-۲-۲-۵
۲۱۹	.....سایر تترازول‌ها. ۶-۲-۲-۵
۲۲۰	.....دی‌نیتروفنل (DDNP) ۶-۴، ۲-۷-۲-۲-۵
۲۲۲	.....پتاسیم ۴، ۶- دی‌نیتروبنزوفوراکسان (KDNBF) ۸-۲-۲-۵
۲۲۳	.....پتاسیم ۴، ۶- دی‌نیترو-۷- هیدروکسی - بنزوفوراکسان (KDNP) ۹-۲-۲-۵
۲۲۴	.....سیانوریک اسید تری‌آزید (CTA)، آکاتری‌آزین تری‌آزید (TTA) ۱۰-۲-۲-۵
۲۲۵	.....پراکسیدهای انفجاری: تری‌استون تری‌پراکسید (TATP) و ... ۱۱-۲-۲-۵
۲۲۷	.....نتایج ۳-۵
۲۲۸	.....مراجع ۴-۵
۲۳۹	.....فصل ششم: تترازول -N- اکسیدهای پرانرژی ۲۳۹
۲۳۹	.....۱-۶-مقدمه ۲۳۹
۲۳۹	.....۲-۶-توضیحی برای بررسی تترازول -N-اکسیدها ۲۳۹
۲۴۴	.....۳-۶-راه کارهای سنتزی برای تشکیل تترازول -N- اکسیدها ۲۴۴
۲۴۴	.....HOF.CH3CN- ۱-۳-۶ ۲۴۴
۲۴۶	.....اکسون ® ۲-۳-۶ ۲۴۶
۲۴۷	.....CF ₃ COOH/H ₂ O ₂ - ۳-۳-۶ ۲۴۷
۲۴۸	.....۴-۳-۶-حلقوی شدن آزیدو - اکسیم‌ها ۲۴۸
۲۴۹	.....۴-۶-مثال‌های جدید از تترازول -N- اکسیدهای پرانرژی ۲۴۹
۲۵۰	.....۱-۴-۶-تترازول -N- اکسیدها ۲۵۰
۲۶۸	.....۲-۴-۶-بیس (تترازول -N- اکسیدها) ۲۶۸
۲۸۷	.....۵-۳-۴-۶-آزوکسی تترازول ۲۸۷
۲۹۷	.....۴-۴-۶-بیس (تترازول) دی‌هیدروتترازین و بیس (تترازول) -N- اکسیدها ۲۹۷
۳۰۱	.....۵-۶-نتیجه‌گیری ۳۰۱
۳۰۲	.....۶-۶-مراجع ۳۰۲

۳۰۹	فصل هفتم: پیشرانده‌های سبز بر پایه نمک‌های دی‌نیتراامید
۳۰۹	۱-۷- نویدها و مشکلات نمک‌های دی‌نیتراامید
۳۱۳	۲-۷- توضیح تجزیه‌ی دی‌نیتراامیدها
۳۱۶	۱-۲-۷- آنیون دی‌نیتراامید
۳۱۷	۲-۲-۷- دی‌نیترامینیک اسید
۳۱۹	۳-۲-۷- نمک‌های دی‌نیتراامید
۳۲۱	۱-۳-۲-۷- پتاسیم دی‌نیتراامید (KDN)
۳۲۳	۲-۳-۲-۷- آمونیوم دی‌نیتراامید (ADN)
۳۲۵	۳-۷- طیف‌سنجی ارتعاشی مجموع فرکانس ADN و KDN
۳۳۰	۴-۷- تجزیه‌ی غیرعادی حالت- جامد
۳۳۴	۵-۷- شیمی دی‌نیتراامید
۳۳۴	۱-۵-۷- سازگاری و واکنش‌پذیری ADN
۳۳۶	۲-۵-۷- دی‌نیتراامیدها در سنتز
۳۴۰	۶-۷- پایدارکنندگی دی‌نیتراامید
۳۴۴	۷-۷- نتایج
۳۴۴	۸-۷- مراجع
۳۵۳	فصل هشتم: مواد نگهدارنده برای پیشرانده‌های سبز
۳۵۹	۱-۸- خواص نگهدارنده
۳۶۳	۲-۸- پلیمرهای بی‌اثر (خنثی) به‌عنوان نگهدارنده
۳۶۳	۱-۲-۸- پلی بوتادی‌ان
۳۶۶	۲-۲-۸- پلی‌اترها
۳۶۸	۳-۲-۸- پلی‌استرها و پلی‌کربنات‌ها
۳۷۱	۳-۸- پلیمرهای پرانرژی
۳۷۱	۱-۳-۸- نیتروسولولز
۳۷۴	۲-۳-۸- پلی (گلیسیدیل آزید)
۳۸۲	۳-۳-۸- پلی (۳- نیترا‌تومتیل - ۳- متیل اکستان)
۳۸۳	۴-۳-۸- پلی (گلیسیدیل نیترات)
۳۸۵	۵-۳-۸- پلی [۳، ۳- بیس (آزیدومتیل) اکستان]

۳۸۷	۴-۸- نرم‌کننده‌های پرانرژی.....
۳۸۸	۵-۸- چشم‌اندازی به طراحی سامانه‌های نگهدارنده‌ی سبز جدید.....
۳۸۹	۱-۵-۸- معماری پلیمر نگهدارنده.....
۳۹۰	۲-۵-۸- ترکیب شیمیایی و شیمی اتصال عرضی.....
۳۹۳	۶-۸- مراجع.....
۴۰۷	فصل نهم: توسعه فناوری‌های تولید پایدار زیست‌محیطی برای مواد پرانرژی.....
۴۰۷	۱-۹- مقدمه.....
۴۰۹	۲-۹- مواد منفجره.....
۴۰۹	۱-۲-۹- تولید مواد منفجره‌ی سازگار.....
۴۱۶	۲-۲-۹- مواد دوستدار محیط‌زیست برای آغازش.....
۴۲۲	۳-۲-۹- سنتز پیش‌ماده‌های انفجاری.....
۴۲۳	۱-۳-۲-۹- استفاده از اکسون.....
۴۲۶	۳-۹- پیروتکنیک‌ها.....
۴۲۶	۱-۳-۹- ساخت پیروتکنیک‌های تجاری.....
۴۳۱	۲-۳-۹- پیروتکنیک‌های نظامی.....
۴۳۱	۴-۹- پیشرانه.....
۴۳۱	۱-۴-۹- برنامه «موشک سبز».....
۴۳۴	۲-۴-۹- سایر تلاش‌های پیشرانه‌های راکت.....
۴۳۶	۳-۴-۹- پیشرانه‌های تفنگی.....
۴۴۰	۵-۹- فرمول‌بندی.....
۴۴۱	۶-۹- نتایج.....
۴۴۲	۷-۹- اختصارات.....
۴۴۵	۸-۹- مراجع.....
۴۵۱	فصل دهم: روش‌های الکتروشیمیایی برای سنتز مواد پرانرژی و تصفیه‌ی پساب.....
۴۵۱	۱-۱۰- مقدمه.....
۴۵۲	۲-۱۰- جنبه‌های عملی.....
۴۵۵	۳-۱۰- الکتروسنتر.....

◆ فهرست مطالب

۴۵۶	۱۰-۳-۱- الکتروسنتز مواد پیرانرژی (EM) و پیش ماده‌های مواد پیرانرژی
۴۶۱	۱۰-۳-۲- الکتروسنتز واکنشگرهای مفید
۴۶۳	۱۰-۴-۴- تصفیه‌ی الکتروشیمیایی
۴۶۵	۱۰-۴-۱- الکترولیز مستقیم
۴۶۵	۱۰-۴-۱-۱- کاهش کاتدی
۴۶۷	۱۰-۴-۱-۲- کاهش و اکسایش ترکیبی
۴۶۸	۱۰-۴-۱-۳- اکسایش آندی
۴۶۹	۱۰-۴-۲- روش‌های الکترولیتی غیرمستقیم
۴۷۳	۱۰-۴-۳- تصفیه‌ی الکتروسینتیک خاک‌ها
۴۷۶	۱۰-۴-۴- الکترودیالیز
۴۷۶	۱۰-۵- پیشرفت‌های جاری و جهت‌گیری آینده
۴۷۹	۱۰-۶- مراجع
۴۸۹	واژه‌نامه

پیشگفتار مترجمان

شکر و سپاس فراوان خدای بی‌همتایی را که توفیق عنایت فرمود تا ترجمه کتاب «مواد پرانرژی سبز» را در اختیار استادان، دانشجویان و سایر علاقه‌مندان این دانش قرار دهیم. امروزه به‌واسطه‌ی تهدیدهای فراوانی که از سوی مواد و فرایندهای شیمیایی متوجه انسان و محیط‌زیست است، شیمی سبز بسیار مورد اقبال محققان و دانشمندان قرار گرفته است. سنتز، تولید و بهینه‌سازی مواد پرانرژی براساس اصول شیمی سبز از اهمیت ویژه‌ای در بحث ایمنی و محیط‌زیست برخوردار است. براین اساس، علم روز مواد پرانرژی به دنبال طراحی و تولید مواد پرانرژی است که ضمن داشتن مشخصات عملکردی مطلوب، دارای متغیرهای ایمنی مناسب و در عین حال حداکثر سازگاری با محیط‌زیست باشند. مواد اولیه مورد استفاده، به‌خصوص حلال‌ها و روش‌های تولید باید ضمن ایمن بودن، با محیط‌زیست سازگار باشند. محصول‌های حاصل از انفجار یا احتراق مواد پرانرژی یا پساب‌های کارخانجات تولیدی این مواد باید دارای کمترین آلودگی‌های زیست‌محیطی باشند.

در این کتاب به دسته‌های مختلف مواد پرانرژی از جمله مواد منفجره، پیشرانها و ترکیب‌های پیروتکنیک با توجه به اصول دوازده‌گانه‌ی شیمی سبز پرداخته شده است. همچنین موادی که به‌نوعی با سنتز یا تهیه‌ی فرمول‌بندی مواد پرانرژی سر و کار دارند، مانند: اکسیدکننده‌ها، نگهدارنده‌ها، پلیمرهای پرانرژی و پیش‌ماده‌های سنتزی از دیدگاه شیمی سبز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در ترجمه این کتاب سعی بر آن بوده تا نوشته‌ها و نظریات مؤلف به‌طور دقیق به

فارسی برگردانده شود. بدیهی است که ترجمه این کتاب خالی از اشکال نمی‌باشد، بنابراین ارائه نظرات و پیشنهادهای خوانندگان محترم و نکته‌سنج برای رفع نقایص و اشکال‌های احتمالی موجب تشکر و امتنان خواهد بود.

مترجمان

زمستان ۱۳۹۳

فصل اول

مقدمه‌ای بر مواد پرانرژی

مواد پرانرژی سبز

فصل اول: مقدمه‌ای بر مواد پرنرژی^۱

۱-۱- مقدمه

اولین مواد پرنرژی در چین باستان توسعه یافت. حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد، کیمیاگران چینی آزمایش‌هایی را با حرارت دادن مخلوط شوره و گوگرد انجام می‌دادند. در قرن هفدهم، شوره و گوگرد با زغال چوب مخلوط شدند تا ماده‌ی منفجره‌ای ساخته شود شبیه آنچه که امروزه باروت نامیده می‌شود. این ترکیب در ابتدا برای آتش‌بازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما طولی نکشید برای گستره‌ای از کاربردهای نظامی اهمیت یافت. استفاده از باروت در استخراج معادن و مهندسی عمران از قرن هفدهم شروع شد. تا قبل از جداسازی فولمینات جیوه (II) در سال ۱۷۹۹ توسط ادوارد چارلز هوارد^۲، باروت، پایه‌ی همه‌ی مواد پرنرژی در کاربردهای عملی بود. با وجود این، اولین انقلاب و تحول در توسعه‌ی مواد پرنرژی ناشی از کشف باروت، با اختراع نیتروسولوز (NC) در سال ۱۸۴۶ و نیتروگلیسرین (NG) در سال ۱۸۴۷ شروع شد. NC به‌عنوان یک پیشرانه مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که NG در اصل یک ماده‌ی منفجره بود. هر دو ترکیب در مقایسه با باروت کارایی را به‌شدت افزایش می‌دادند. در سال ۱۸۶۶، آلفرد نوبل^۳ دینامیت اصلی که مخلوطی از ۷۵ درصد از NG و ۲۵ درصد از گزیکور^۴ با مقدار

1- Tore Brinck Applied Physical Chemistry, School of Chemical Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Sweden

2- Edward Charles Howard

3- Alfred Nobel

4- Kieselguhr

کمی سدیم کربنات است را معرفی نمود. دینامیت در مقایسه با NG خالص حساسیت بسیار کمتری داشته و برخلاف آن، نگهداری و حمل و نقل ایمنی دارد. نوبل بعدها دینامیت ژلاتینی را با ترکیب کردن NG با NC در ماده‌ی ژلاتینی توسعه داد. کار این ماده به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از دینامیت بوده و علاوه بر آن ایمنی بهتری نیز داشت. این مثال‌ها، دو موضوع اصلی بهبود کارایی و ایمنی را نشان می‌دهند، که تحقیقات روی مواد پرانرژی به‌طور مرسوم به سمت آن‌ها پیش رفته است. لازم به یادآوری است در تعریف گسترده‌تر مواد پرانرژی که شامل پیشرانده‌ها، مواد منفجره و گستره‌ی وسیعی از پیروتکنیک‌هاست، تعریف کارایی تا حد زیادی به هدف دستگاه در نظر گرفته شده، بستگی دارد. برای مثال، در پیروتکنیک‌ها، کارایی می‌تواند به‌شدت نور، تولید گاز یا دود مربوط باشد. از اواخر قرن بیستم، مشخص شد که استفاده یا تولید مواد پرانرژی موجب آزاد شدن موادی می‌شوند که برای سلامت انسان یا محیط‌زیست مضرند. در برخی مواقع به‌عنوان نتیجه‌ای از اقدامات قانونی، استفاده از بعضی ترکیب‌ها محدود یا حتی ممنوع شده است. در نتیجه‌ی این اقدامات، اهداف جدیدی در توسعه‌ی مواد پرانرژی اجرا شده است. امروزه تقریباً همه‌ی تحقیقات در این زمینه بر طراحی مواد جدیدی متمرکز می‌شود که می‌تواند «سبز» در نظر گرفته شود. این کتاب در نظر دارد، پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی مواد پرانرژی سبز را خلاصه و برخی ابزارهایی که در این‌گونه تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرند را به خوانندگان معرفی کند. با وجود این، پیش از اینکه وارد مباحث کتاب شویم، به نظر می‌رسد ارائه‌ی تعریفی برای سبز ارزشمند باشد، این که چگونه می‌توان ضمن تأمین این نیاز مهم، کارایی و ایمنی کار با مواد پرانرژی را به حداکثر رساند.

۱-۲- شیمی و مواد پرانرژی سبز

مفهوم «شیمی سبز» اولین بار در دهه‌ی ۱۹۹۰ به وسیله‌ی آژانس محیط‌زیست ایالات متحده‌ی آمریکا^۱ (EPA) معرفی و تعریف آن به‌صورت زیر روی سایت شبکه‌شان ارائه

1- US Environmental Agency

شده است [۱]:

ترویج فناوری‌های شیمیایی ابتکاری است که استفاده یا تولید مواد خطرناک را در طراحی، ساخت و استفاده از محصول‌های شیمیایی کاهش داده یا حذف می‌کند. از پیدایش اولیه آن، شیمی سبز کم‌کم به دلیل تلاش‌های سازمان یافته در اروپا و آمریکا تکامل یافته و به‌طور گسترده‌ای در صنایع شیمیایی، به‌عنوان روشی برای ترویج پایداری در طراحی و ساخت مواد شیمیایی جدید پذیرفته شده است. ایده‌های اصلی در پشت شیمی سبز در سال ۱۹۸۸ توسط آناستاز^۱ و وارنر^۲ به‌وسیله‌ی تعریف اصول دوازده‌گانه‌ی شیمی سبز عینیت یافت [۲].

اصول دوازده‌گانه شیمی سبز

۱- پیشگیری

بهبتر است از تولید مواد زائد پیشگیری کنیم تا این که درصدد تمیز کردن پسماندهای تولیدی در درمان انسان‌ها و محیط آسیب‌دیده باشیم.

۲- اقتصاد اتم

روش‌های سنتزی بایستی طوری طراحی شوند که بیشترین بهره‌وری در تبدیل همه‌ی مواد اولیه‌ی شرکت‌کننده در فرایند به محصول نهایی به‌دست آید.

۳- سنتز مواد شیمیایی با مخاطرات کمتر

تا جایی که امکان دارد، طراحی روش‌های سنتزی باید به گونه‌ای باشد که مواد مصرفی یا تولیدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست سمیت کمتری داشته یا سمی نباشند.

۴- طراحی مواد شیمیایی ایمن‌تر

محصول‌های شیمیایی می‌بایست طوری طراحی شوند که ضمن داشتن عملکرد مورد نظر، کمترین سمیت را داشته باشند.

1- Anastas

2- Warner

۵- حلال‌ها و مواد جانبی ایمن‌تر

استفاده از مواد جانبی مانند: حلال‌ها، مواد جداکننده و غیره می‌بایست تا حد امکان استفاده نشوند و در صورت نیاز به استفاده از آن‌ها، باید از مواد بی‌ضرر استفاده نمود.

۶- طراحی برای بهره‌وری انرژی

انرژی مورد نیاز فرایندهای شیمیایی و اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی آن باید تشخیص داده شده و به حداقل رسانده شود. در صورت امکان، روش‌های سنتزی باید در دما و فشار محیط انجام شود.

۷- استفاده از مواد اولیه‌ی تجدیدپذیر

در صورتی که از نظر فنی و اقتصادی عملی باشد، از مواد اولیه‌ی تجدیدپذیر به جای مواد اولیه‌ی تجدیدنپذیر یا پایان‌پذیر استفاده شود.

۸- کاهش مشتق‌ها

مشتق‌سازی غیرضروری (استفاده از گروه‌های سدکننده^۱، محافظت کردن/ محافظت زدایی، اصلاح موقت فرایندهای فیزیکی/ شیمیایی) باید حداقل یا در صورت امکان حذف گردد، زیرا چنین مراحل مستلزم واکنشگرهای اضافی بوده و می‌تواند مواد زائد تولید کند.

۹- استفاده از کاتالیزور

واکنشگرهای کاتالیزوری (با اثر انتخابی هرچه بیشتر) بر واکنشگرهای استوکیومتری ارجحیت دارد.

۱۰- طراحی برای تخریب (تجزیه)

محصول‌های شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که در انتهای عملکردشان به محصول‌های تجزیه‌ای بی‌اثری تبدیل شده و در محیط باقی نمانند.

۱۱- تجزیه و تحلیل به موقع برای پیشگیری از آلودگی

روش‌های تجزیه‌ای نیاز به توسعه‌ی بیشتری دارند، تا امکان رصد به موقع و هم‌زمان

فرایند تولید فراهم شده و از تشکیل مواد خطرناک جلوگیری شود (قبل از تشکیل مواد خطرناک فرایند کنترل شود).

۱۲- شیمی ایمن تر ذاتی برای پیشگیری از حوادث

نوع مواد و شکل ماده‌ی مورد استفاده در فرایند شیمیایی باید به گونه‌ای انتخاب شود که خطر حوادث شیمیایی مانند: رهاسازی در محیط، انفجار، آتش‌سوزی به حداقل رسانده شود.

از آنجایی که در مورد بسیاری از مواد شیمیایی، تولید آن‌ها بیشترین اثرات را بر سلامت انسان و محیط‌زیست دارد، اصول شیمی سبز تا حد زیادی به سمت هدایت طراحی فرایند تولید پیش می‌رود. مواد پرانرژی از این نظر که بازیافت و دفع مناسب مواد زائد ناشی از استفاده‌ی آن‌ها دارای محدودیت‌هایی می‌باشد، بسیار متفاوت هستند. آن‌ها تجزیه می‌شوند و محصول‌های تجزیه یا احتراق به‌طور مستقیم وارد محیط‌زیست می‌شوند. بنابراین بررسی اثرات سلامتی و زیست‌محیطی محصول نهایی و استفاده از آن مهم است. از این منظر، اصول شیمی سبز را می‌توان برای طراحی مواد پرانرژی و تولید آن‌ها به کار گرفت. رعایت برخی از این اصول مانند: ۲، ۵، ۸ و ۹ ممکن است بسیار دشوار به نظر برسد. در آخر، بیشتر مواد پرانرژی ساختارهای پیچیده و محتوای انرژی بالایی دارند. انرژی و پیچیدگی اغلب با به کارگیری معرف‌های واکنش‌پذیر، حلال‌های ویژه، شرایط حدی واکنش و از طریق استفاده از گروه‌های محافظت‌کننده یا ساخت مشتق‌ها حاصل می‌شود. با این حال، بیشتر داروها پیچیدگی یکسان یا بیشتری دارند؛ بنابراین امیدوارکننده است که شیمی سبز در صنایع داروسازی به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است [۳، ۴]. از خواندن فصل ۹ آشکار است که پیشرفت‌های زیادی با پذیرش اصول شیمی سبز در طراحی فرایندهای تولید مواد پرانرژی در حال حاضر انجام شده است. در برخی موارد، دستاوردهایی در خط مقدم تولید پایدار مانند استفاده از کاتالیزورهای زیستی یا انجام فرایندهای پیوسته آشکار است. انجام روش‌های الکتروشیمیایی به احتمال زیاد اهمیت بیشتری یافته است. فرایندهای الکتروشیمیایی اغلب

روش‌های کارآمدی در استفاده از سنتز و بازسازی مواد زائد شیمیایی هستند. استفاده از آب به‌عنوان حلال متداول در بسیاری از این فرایندها مزیت اضافه محسوب می‌شود.

اصول شیمی سبز پایداری فرایند شیمیایی یا تولید را تعیین نمی‌کند. برای اصلاح این کمبود، عامل E ارائه شده است که روشی برای کمی کردن سبز بودن فرایندها و محصول‌ها می‌باشد [۵-۷]. E به‌صورت خارج قسمت جرم مازاد بر جرم محصول تعریف می‌شود که محصول m /ضایعات m است. ضایعاتی که اغلب در نظر گرفته می‌شود، شامل همهی ترکیب‌های تشکیل شده در طول فرایند از جمله گازها و آب است. به‌طور معمول، معیار بهتری برای مقایسه‌ی فرایندهای مختلف، جهت ساخت یک نوع محصول است تا ساخت محصول‌های مشابه، زیرا به‌طور صریح تشکیل ضایعات یا سمی بودن آن در نظر گرفته نمی‌شود. حتی در صورتی که فاکتور E یک ابزار به نسبت غیرنافذ باشد، یک روش سریع و اغلب بسیار آشکار برای ارزیابی گزینه‌های مختلف فرایند از چشم‌انداز زیست‌محیطی ارائه می‌کند. ارزیابی چرخه‌ی حیات^۱ (LSA) رویکرد بسیار مورد توجهی است، چرا که برای رسیدن به ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی یک محصول تلاش می‌کند. کل فرایند از استخراج و دستیابی به مواد خام، از طریق ساخت و استفاده از محصول به‌منظور مدیریت پایان‌زندگی بررسی می‌شود [۵، ۸]. روش‌هایی نیز وجود دارند که برای ترکیب LSA با تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر تلاش می‌کند تا به ارزیابی کلی هزینه‌های یک محصول برسد. این روش، اخیراً برای تجزیه و تحلیل هزینه‌ی زندگی یک تک‌پیشراشه سمی (هیدرازین) در مقابل یک پیشراشه سبز مورد استفاده قرار گرفت [۹]. تجزیه و تحلیل نشان داد که جایگزینی پیشراشه سمی حتی اگر هزینه‌ی تولید واقعی برای جایگزینی پیشراشه‌ی سبز بالاتر باشد، کاهش هزینه‌های زیادی به همراه دارد. از دیدگاه هزینه‌های مستقیم، جایگزین کردن محصول‌های قدیمی با محصول‌های سبزتر شایع است. این جایگزینی برای تولید محصول‌های شیمیایی نیز اتفاق می‌افتد. تبدیل به فرایندهایی که به اصول شیمی سبز پایبندند، اغلب مقرون به صرفه است.

کاهش هزینه در واقع یکی از دلایل اصلی است که پیاده‌سازی محصول‌های سبز و فناوری‌های تولید را پیش می‌برد. عامل دیگر، فشار اجتماعی به‌دلیل آگاهی عمومی و قوانین دولتی است. در اروپا مواد شیمیایی و استفاده از آن‌ها به‌وسیله‌ی قوانین و مقررات جامعه‌ی اروپا REACH¹ (ثبت، بررسی، مجوز و محدودیت مواد شیمیایی) تنظیم می‌شود [۱۰]. REACH در سال ۲۰۰۷ معرفی شد و به‌تدریج در بیش از ۱۱ سال مرحله‌ای خواهد شد. «هدف REACH بهبود حفاظت از سلامت انسان و محیط‌زیست از طریق شناسایی بهتر و زودتر خواص ذاتی مواد شیمیایی است» [۱۰]. REACH به‌طور قابل توجهی مسئولیت تولیدکنندگان و واردکنندگان مواد شیمیایی را افزایش می‌دهد. آن‌ها نیاز به جمع‌آوری اطلاعات در مورد خواص مواد شیمیایی و ارائه‌ی اطلاعات ایمنی این مواد دارند تا نگهداری و کار با آن‌ها را تضمین نماید. در صورتی که مواد مناسبی شناسایی شده باشند، مقررات بیشتری برای جایگزینی مواد شیمیایی خطرناک‌تر لازم است. این مقررات برای صنعت مواد پرانرژی نیز اعمال می‌شود. این تبدیل شدن برای شناسایی زود هنگام مواد پرانرژی که در معرض خطر از رده خارج شدن هستند و برای شروع گسترش جایگزین‌های سبز به‌طور فزاینده‌ای مهم است.

تاکنون ما به این موضوع نپرداخته‌ایم که در هنگام طراحی مواد انرژی‌زای سبز، آیا توجه به اصول شیمی سبز می‌بایست بر کارایی و ایمنی کار با این مواد اولویت داده شود. ایمنی کار کردن با مواد پرانرژی تا حدی در اصل ۱۲ در نظر گرفته شده است. با وجود این، نتیجه‌ی بالقوه‌ی یک حادثه در مورد یک ماده‌ی پرانرژی اغلب از چنان اهمیتی برخوردار است که ایمنی کار با این مواد، بر سایر موارد، اولویت دارد. اهمیت اولویت عملکرد این مواد، موضوع پیچیده‌تری است و تا حدی به کاربرد آن‌ها بستگی دارد. بدیهی است که عملکرد یک محصول بر اقتصاد اثر خواهد گذاشت. برای مثال، اگر ماده‌ی جدید نیمی از عملکرد ماده‌ی قدیمی را داشته باشد، ما به استفاده از دو برابر

ماده‌ی جدید برای انجام همان کار، نیاز خواهیم داشت. با وجود این، در بعضی کاربردها، اثر کاهش عملکرد می‌تواند مضر باشد. در مورد راکت‌ها برای اکتشاف فضایی، جرم پيشرانه می‌تواند به راحتی تا ۹۰ درصد وزن کل باشد، در حالی که ظرفیت حمل^۱ به طور شاخص چند درصد را تشکیل می‌دهد، کاهش حتی چند درصد عملکرد (ضربه ویژه^۲) به طور قابل توجهی اندازه‌ی ظرفیت حمل را کاهش خواهد داد. بنابراین، عملکرد بالا برای مصرف مؤثر انرژی ضروری و اغلب برای تکمیل مأموریت مورد نیاز است. کاربردهای بسیار دیگری از مواد پرنرژی وجود دارد که در آنها، عملکرد بالا از اهمیت زیادی برخوردار است.

باتوجه به مباحث مطرح شده، می‌توانیم مفهوم ماده انرژی‌زای سبز را تعریف کنیم. یک ماده‌ی پرنرژی سبز، یک ماده‌ی طراحی و تولید شده براساس اصول شیمی سبز است با حفظ حداقل سطح عملکرد و ایمنی کار با ماده پرنرژی که نیاز به جایگزینی دارد. مهم است به خاطر داشته باشیم که همیشه طراحی یک ماده که به طور کامل با این تعریف انطباق داشته باشد ممکن نیست و در صورتی که جایگزینی یک ترکیب قدیمی ضرورت داشته باشد، ممکن است مجبور به جایگزینی ماده‌ای باشیم که به طور کامل سبز نیست، بلکه فقط سبزتر است. در بسیاری از موارد، این روش می‌تواند موجب بهبود قابل توجهی در وضعیت موجود شود.

۱-۳- پیشرانه‌های سبز در سفرهای فضایی غیرنظامی

ما با چالش‌های زیست‌محیطی مواجه می‌شویم که به استفاده از مواد پرنرژی در بسیاری از نواحی جامعه مربوط است. در بخش زیر، بخش فضایی غیرنظامی را به عنوان مثال مطرح نموده و بعضی از تلاش‌های گذشته و حال را برای توسعه و پیاده‌سازی فناوری پیشرانش سبز بحث خواهیم کرد. منظور این نیست که یک بررسی

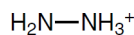
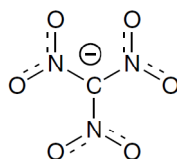
1- Pay load

2- Specific impulse

جامع صورت پذیرد، بلکه برخی از تلاش‌های مرتبط با مصرف ماده‌ی سبز از چگونگی توسعه‌ی اولیه تا کاربرد نهایی آن را نشان می‌دهد.

۱-۳-۱- اکسیدکننده‌های سبز برای جایگزینی با آمونیوم پرکلرات

آمونیوم پرکلرات (AP, NH_4ClO_4 شمای ۱-۱) متداول‌ترین اکسیدکننده در پیشرانده‌های جامد است. کاربرد آن از پیروتکنیک‌های غیرنظامی، تا گستره‌ی وسیعی از کاربردهای نظامی تا موتورهای بوستر بزرگ در سفینه‌های فضایی و پرتاب‌کننده‌های با قدرت بالا^۱ گسترش می‌یابد. یکی از نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد AP، محتوای کار بالای آن است که در اثر احتراق به هیدروکلریک اسید (HCl) تبدیل می‌شود. برای مثال، محاسبه‌ی این که هر پرتاب توسط پرتاب‌کننده قدرتمند اروپایی آریان^۲ ۵، ۲۷۰ تن هیدروکلریک اسید غلیظ ضمن تبدیل کامل تولید می‌کند، آسان می‌باشد [۱۱، ۱۲].



شمای ۱-۱

انتشار مقدار زیادی از HCl در جو زمین در نتیجه‌ی استفاده‌ی گسترده از AP ممکن است به بارش باران‌های اسیدی و تخریب لایه‌ی اوزون منجر شود. انتشار مستقیم پرکلرات‌ها در محیط، به دلیل احتراق ناقص یا نشت از مواد مصرف نشده مشکل بزرگ‌تری به نظر می‌رسد. تخمین زده می‌شود که آب آشامیدنی در حداقل ۳۵ درصد ایالت‌های آمریکا آلوده به پرکلرات‌ها است [۱۳]. این موضوع نگران‌کننده است،

1- Heavy-lift launcher

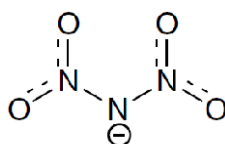
2- Ariane

از این رو مطرح شده که مصرف بالای پرکلرات‌ها ممکن است موجب افزایش اختلالات تیروئیدی شود [۱۴]. EPA در سال ۲۰۰۹ یک توصیه‌ی بهداشتی را منتشر کرد که حداکثر حد مجاز پرکلرات‌ها، ۱۵ppb در آب آشامیدنی است و سال ۲۰۱۱ این توصیه به صورت مقررات در آمد [۱۵، ۱۶].

هیدرازینوم نیتروفرمات (HNF) اکسیدکننده‌ی بالقوه سبزی در پیشرانده‌های بوستر جامد در نظر گرفته می‌شود. HNF پیش از این در سال ۱۹۵۱ کشف شده بود [۱۷]. با وجود این، توجه به HNF باعث شد تا به‌عنوان جایگزینی برای AP از اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ مطرح شود. زمانی که آژانس فضایی اروپا (ESA) شروع به دریافتن مشکلات زیست‌محیطی بالقوه‌ی مرتبط با انتشار اسید از احتراق AP شد، ESA یک برنامه‌ی تحقیقاتی بزرگی را با هدف گسترش پیشرانده‌ی جامد سبز برای استفاده در کاربردهای فضایی آغاز کرد. این برنامه شامل ایجاد یک طرح تولیدی برای ساخت HNF در مقیاس ۳۰۰ کیلوگرم در سال بود [۱۷]. HNF به‌طور کامل سبز در نظر گرفته نمی‌شود، چون یکی از واکنش‌دهنده‌های مورد استفاده برای ساخت HNF هیدرازین است که ترکیبی بسیار سمی و سرطان‌زا است. با این حال، HNF فاقد کلر است و سوزش آن پاک و بدون انتشار اسید است. طولی نکشید متوجه شدند که HNF سازگاری بالایی با سامانه‌های نگهدارنده^۱ متداول دارد. کمی بعد، نشان داده شد که با نگهدارنده پراثرژی پلیمر گلیسیدیل آزید (GAP) سازگار است و پیشرانده‌های بر پایه‌ی HNF، آلومینیوم (Al) و GAP توسعه داده شد [۱۸]. کارایی آن، بر حسب ضربه‌ی ویژه ۷-۲ درصد بالاتر از کارایی فرمول‌بندی استاندارد AP-Al با نگهدارنده پلی‌بوتادیان با گروه‌های انتهایی هیدروکسیل (HTPB) گزارش شده است. این افزایش، براساس برخی تخمین‌ها، به کاهش هزینه بر حسب کیلوگرم ظرفیت حمل یک سامانه پرتابی بین ۵۰-۵ درصد منجر می‌شود [۱۹]. برخلاف این نتایج بسیار دلگرم‌کننده و سرمایه‌گذاری‌های بزرگ انجام

1- Binder

شده، به نظر می‌رسد ESA تا حد زیادی علاقه به توسعه‌ی پیشرانه بر پایه‌ی HNF را از دست داده است و تحقیق و پژوهش تقریباً متوقف شده و نشانه‌هایی از صنعتی شدن در آینده‌ی نزدیک نیست. ما می‌توانیم فقط در مورد دلایل آن حدس و گمان بزنیم. باوجوداین، ممکن است کاهش علاقه، به مشکلات پایداری حرارتی و حساسیت HNF مربوط شود [۱۷]. هزینه‌های تولید HNF و GAP بالا هستند و انتظار می‌رود که پیشرانه‌ی HNF برای استفاده در مقیاس بالا بسیار گران باشد. هزینه‌های بالای تولید این اکسیدکننده‌ها باید به هزینه‌های زیاد در ارتباط با گسترش سامانه موتور جدید و زیرساخت‌های مربوط اضافه شود.



NH₄⁺

ADN

شمای ۱-۲

آمونیم دی‌نیترامد (ADN شمای ۱-۲) اکسیدکننده‌ی دیگری است که به‌عنوان جایگزین سبز بالقوه‌ای برای AP بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ADN اولین بار در سال ۱۹۷۱ در مسکو تهیه شد و تصور می‌شود که برای پیشران‌های موشک‌های بین‌قاره‌ای اتحاد جماهیر شوروی در دوران جنگ سرد استفاده شده است [۱۱]. بنا بر گزارش‌ها، مزیت اصلی پیشرانه، علائم بدون دود (در نتیجه سوزش پاک ADN) بود که مانع ردیابی موشک‌ها به‌وسیله‌ی رادار می‌شد. ADN در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ بار دیگر به‌وسیله‌ی دانشمندان آمریکایی کشف شد. از آن زمان تلاش‌های تحقیقاتی زیادی در سراسر جهان بر روی ADN متمرکز شده است. مانند HNF فاقد کلر است و احتراق ADN خالص بدون سوخت موجب تشکیل N₂، H₂O و O₂ به‌عنوان محصول‌های ترمودینامیکی

می‌شود. در حال حاضر ADN در مقیاس بالا در فرایند به نسبت سبزی در کارخانه‌ی یورنکو^۱ SNPE کارلس کوگای^۲ سوئد تولید می‌شود.

ADN به‌طور ذاتی بسیار جاذب رطوبت است. اگرچه، در حالت خالص به نسبت پایدار است، مانند HNF با تعدادی از نگهدارنده‌ها و سامانه‌های پخت، به‌ویژه بیشتر با سامانه پخت ایزوسیانات، ناسازگار است [۱۷، ۲۰]. برای جزئیات بیشتر به فصل ۸ مراجعه شود. درک واکنش‌پذیری ADN بسیار مشکل است و رفتار آن هنگام تجزیه در حالت جامد غیرعادی گزارش شده است [۱۷، ۲۰]. همان‌طوری که در فصل ۷ اشاره خواهد شد، بسیاری از موضوعات مربوط به ADN در حال حاضر شروع به حل و فصل شده‌اند. سامانه‌های نگهدارنده سازگار جدیدی، اخیراً گزارش شده‌اند (به فصل ۸ مراجعه شود). اگرچه آن‌ها به بهینه‌سازی قابل توجهی نیز نیاز دارند. پیش از کار با پیشرانه‌ی ADN جامد، می‌توان متوجه شد که نتایج اولیه، امیدوارکننده هستند. محاسبات نظری نشان می‌دهد که یک پیشرانه ADN بهینه شده کارایی بالایی خواهد داشت و ضربه‌ی ویژه‌ی آن نسبت به پیشرانه‌ی استاندارد AP-A1، ۵-۷ درصد افزایش می‌یابد (به فصل ۲ مراجعه شود).

حتی اگر پیشرانش جامد بر پایه‌ی AP در آستانه‌ی تبدیل شدن به فناوری پیشرانش کامل باشد، شواهدی دال بر استفاده از آن در سامانه پیشرانش بزرگ‌تر در آینده‌ی نزدیک، مشاهده نمی‌شود. در سال ۲۰۰۸، NASA توافقنامه‌ای با آژانس تحقیقات دفاعی سوئد^۳ (FOI) با عنوان ارزیابی اولیه‌ی ADN به‌عنوان اکسیدکننده در پیشرانه‌های جامد برای بوسترهای پرتاب‌کننده‌ی فضایی بزرگ امضا کرد [۲۲] و شایع شد که ADN برای نسل جدید بوستر ARES در نظر گرفته شده است. با وجود این NASA در یک اظهار غیررسمی این شایعه را محکوم کرد و توضیح داد که ADN به ارزیابی و توسعه‌ی بیشتری قبل از پیاده‌سازی نهایی نیاز دارد [۲۳]. دلیلی برای کم‌توجهی به سامانه پرتابی بر

1- Eurenco

2- Karlskoga

3- Swedish Defence Research Agency

پایه‌ی ADN از سوی سرمایه‌گذاران خصوصی و آژانس‌های فضایی مشخص نیست. با این حال، پاسخ احتمالاً به میزان سرمایه‌گذاری و خطر بزرگ مرتبط با چنین پروژه‌ای مربوط می‌شود. این خطر شامل توسعه‌ی پیشرانه، سامانه موتور و زیرساخت‌های همراه است و سال‌های زیادی از آغاز تا اولین پرتاب احتمالی طول خواهد کشید. علاوه بر این، با توجه به مقادیر زیاد پیشرانه‌ی مورد استفاده در هر پرتاب، تولید پیشرانه‌ها با هزینه‌های به نسبت پایین باید ممکن باشد.

۱-۳-۲- پیشرانه‌های مایع سبز جایگزین هیدرازین

به دلایل روشن، در جایی که هزینه‌ها و خطرات پایین‌تر باشد، جذب بودجه به‌منظور گسترش پیشرانه‌ها برای سامانه‌های موتور کوچک، آسان‌تر است. چنین زمینه‌ای، جایگزین برای تک پیشرانه هیدرازین بوده است که به‌طور عمده برای موتورهای ایستگاه نگهدارنده^۱ سفینه استفاده می‌شود. هیدرازین بسیار سمی و سرطان‌زاست و نمی‌تواند بدون بدون اقدامات ایمنی دقیق نگهداری شود. محققان در FOI در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ به دلیل حلالیت بالای ADN در حلال‌های قطبی متوجه پتانسیل آن، برای استفاده در فرمول‌بندی‌های تک پیشرانه شده بودند [۱۱]. این باعث شد انجمن فضایی ملی سوئد اولین تلاش‌ها برای توسعه‌ی تک پیشرانه‌ی مایع ADN را سرمایه‌گذاری کند که به پروژه‌ای با همکاری بین FOI و شرکت فضایی سوئد^۲ (SSC) انجامید. این بررسی، باعث شناخت ترکیب‌هایی از ADN، متانول و آب (AMW) شد که برای جایگزین کردن با هیدرازین امیدوارکننده بود [۱۱]. ECAPS، یک شرکت تابعه‌ی (SSC)، پس از آن توسعه‌ی پیشرانه‌ی AMW و موتور راکتی مرتبط را ادامه داد. در طراحی نهایی، نشان داده شد که سامانه رانشگر^۳ ۱N ضربه‌ی ویژه‌ای فراهم می‌کند که نسبت به سامانه رانشگر هیدرازین، ۵ درصد بالاتر است [۲۴]. بهبود در چگالی ضربه حتی بالاتر بود، چون ۲۴

1- Station-keeping
2- Swedish Space Corporation
3- Thruster

درصد چگالی بالاتری از پیشراندهی توسعه یافته‌ی LMP-103S داشت. این پیشرانده برای اولین بار در پرواز نمایشی در سال ۲۰۱۰ وارد شد، زمانی که سامانه برای مانورهای شکل پروازی^۱ ماهواره در مأموریت نمایش فناوری PRISMA مورد آزمایش قرار گرفت [۲۵]. امروزه ادعا می‌شود که ECAPS پیشروی بازار فناوری پیشرانده سبز باشد و LMP-103S در سراسر جهان به بازار عرضه شده است. فناوری بر پایه‌ی ADN آن‌ها، یکی از اولین مثال‌های پیشراندهی سبز است که سند کاملی از مرحله‌ی توسعه‌ی اولیه تا رسیدن به بازار جهانی را ساخته است. در این زمینه جالب است توجه کنیم که مدت زمان نزدیک ۱۵ سال از پروژه‌ی تحقیقاتی اولیه در سال ۱۹۹۷ تا زمان عرضه به بازار در سال ۲۰۱۲ وقت صرف شده است. این شبیه زمان توسعه در طراحی دارو است، که در آن به‌طور معمول ۱۵ سال از فاز کشف اولیه تا عرضه به بازار زمان لازم است. صنعت داروسازی به‌عنوان نمونه از میان همه صنایع فناوری، که رکورد زمانی طولانی توسعه را داشته، در نظر گرفته شده است. تخمین اهمیت زمان توسعه برای LMP-103S با توجه به اینکه فقط همین مثال را داریم، مشکل است. با وجود این، فقط می‌توان امیدوار بود که ECAPS یخ را شکسته و پیشرانده‌های جدید و بهبود یافته به‌زودی آماده‌ی تجاری‌سازی خواهند بود. چندین کاندید وجود دارند که قبلاً امیدواری بزرگی نشان داده‌اند. FOI پیشراندهی مایع بر پایه ADN خود را دارد که نشان داده شده، چگالی ضربه‌ی بالاتری از پیشراندهی ECAPS دارد [۱۱]. پیشراندهی سبز با عملکردهای حتی بهتری به‌وسیله‌ی بخش نیروی هوایی ایالت متحده توسعه داده شده است [۲۶]. این پیشرانده فرمول‌بندی مایع یونی از آمونیوم نیترات (HAN، شمای ۱-۳) است که قرار است روی ماهواره‌ایی در مأموریت GPIM ۲۰۱۵ آزمایش شود [۲۷].

در این مرحله، ممکن است این سؤال مطرح باشد که چقدر سبز بودن یک پیشرانده بر پایه‌ی ADN مانند LMP-103S واقعی است. در ابتدا باید توجه شود ADN به‌طور قابل توجهی سمیت پایین‌تری از هیدرازین دارد، به‌طوری که مقادیر LD50 در آزمایش