



شبیه‌سازی، محاسبه و امکان کاهش مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن پاششی

محمد مزیدی^۱، امین طاهری گراوند^۲ و *سیدمهدی جعفری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران، آستادیار گروه صنایع غذایی

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۲/۱۳

چکیده

خشک‌کن پاششی یکی از مهم‌ترین خشک‌کن‌هایی است که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل تبخیر آب در زمان کوتاه، از واحدهای پرمصرف انرژی در صنعت به‌شمار می‌آیند. در کشورهای صنعتی مقدار قابل توجهی از انرژی صنعتی در بخش خشک کردن مصرف می‌شود. تحقیقات زیادی پیرامون کاهش مصرف انرژی منجر به ارائه راهکارها و مدل‌هایی شده است که می‌توان به شبیه‌سازی اشاره نمود. یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی در خشک‌کن‌های پاششی، ایجاد چرخه بازگشتی از هوای خروجی خشک‌کن است. برای شبیه‌سازی این امر از نرم‌افزار Excel به‌عنوان یک ابزار محاسباتی جهت بهینه‌سازی مصرف سوخت در این نوع خشک‌کن‌ها استفاده شده است. در این برنامه توضیح ساده‌ای از فرآیند خشک کردن با استفاده از محاسبات ترمودینامیک، موازنه جرم و حرارت آمده است. استفاده از Excel موجب کاهش هزینه‌های اجرایی شده و به دنبال آن ظرفیت خشک کردن را افزایش می‌دهد. حداکثر محدوده تئوری جریان بازگشتی ۶۰ درصد به‌دست آمد. صرفه‌جویی در مصرف سوخت به‌صورت خطی به‌میزان جریان بازگشتی وابسته است و حداکثر صرفه‌جویی تئوری مصرف سوخت به‌طور نسبی در این تحقیق ۷/۷۵ درصد به‌دست آمد. از آنجایی که این روش باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود در نتیجه، یک روش مناسب جهت کاهش گازهای مضر برای محیط زیست به‌شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن پاششی، مصرف انرژی، هوای برگشتی، بهینه‌سازی، Excel

* - مسئول مکاتبه: smjafari@gau.ac.ir

مقدمه

خشک‌کن پاششی دستگاهی است که اساس آن بر اصل افزایش نسبت سطح به حجم محلول‌های مایع و در نتیجه افزایش سطح انتقال جرم و تبادل حرارت بنیان نهاده شده است (مسترز، ۱۹۸۵). در خشک‌کن پاششی، مایع تغذیه از مخزن تغذیه، توسط پمپ به پاشنده پمپاژ می‌شود و از طریق پاشنده به شکل قطرات ریزی در محفظه خشک‌کن پاشیده می‌شود. هوا نیز پس از تماس با یک گرم‌کن، گرم شده و توسط دمنده به توزیع‌کننده هوا می‌رسد. توزیع‌کننده هوا که در اطراف پاشنده قرار دارد، هوا را وارد محفظه خشک‌کن می‌کند (چگینی، ۲۰۰۳). تماس هوای داغ با قطرات کوچک مایع سبب انتقال جرم و حرارت بین قطره و هوا می‌شود که موجب تبخیر سریع آب آن می‌گردد. مخلوط پودرهای تولید شده و هوا از طریق یک مکنده وارد سیکلون شده و در اثر نیروی گریز از مرکز، پودر و هوا از هم جدا می‌شوند. پودر از انتهای سیکلون و هوا از بالای آن خارج می‌شود (میستر و نیکلاس، ۲۰۰۰). از پودرهای تولیدی می‌توان به پودر شیر، قهوه، عصاره میوه‌ها، سبزی‌ها، مواد سرامیکی، رنگ، شوینده و موارد زیاد دیگر اشاره کرد.

مصرف انرژی در خشک‌کن‌های پاششی که ناشی از تبخیر آب در مدت زمان کوتاه می‌باشد، بسیار بالا است. از آنجایی که کشورهای صنعتی، بین ۷ تا ۱۵ درصد انرژی صنعتی خود را در بخش خشک کردن صرف می‌کنند (کی، ۱۹۹۲)، پرداختن به بخش انرژی، جهت بهینه‌سازی مصرف، از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های گذشته تحقیقات زیادی برای بهینه‌سازی خشک‌کن پاششی انجام شده است (بلیک و الیجیک، ۱۹۸۷؛ بلیک و گلاواز، ۱۹۹۲). در یک تحقیق اثر بعضی از پارامترهای موثر عملیاتی روی مصرف انرژی خشک‌کن پاششی بررسی شد که جهت این تحقیق از یک خشک‌کن پاششی نیمه‌صنعتی برای محلول آب نمک استفاده گردید (پهلوانزاده و حیدری، ۲۰۰۵). نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش دما و دبی هوای ورودی و دور پاشنده مصرف انرژی بالا رفته و افزایش غلظت خوراک تا حدی که قابل پاشش باشد مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.

موسسه تحقیقاتی Nizo در ۱۵ سال گذشته تحقیقات زیادی بر روی پیش‌برد مدل کامپیوتری خشک‌کن‌های پاششی انجام داده است که این تحقیقات منجر به ارائه دو مدل جهت افزایش کیفیت پودر تولیدی و کاهش هزینه‌ها شده است (روود و همکاران، ۲۰۰۲). در سال ۲۰۰۲ نیز بر روی طراحی خشک‌کن با استفاده از صفحه گسترده تحقیقی انجام شد که منجر به بهینه‌سازی متغیرهای طراحی برای خشک‌کن مورد نظر شد (مارولیز و ساراواکز، ۲۰۰۲).

بهینه‌سازی خشک کردن پاششی از طریق جریان بازگشتی هوای خروجی، هزینه‌های اجرایی را کاهش می‌دهد. اهمیت این موضوع تا آن حد است که تعداد زیادی از کارخانه‌های موجود جهت استفاده از این قابلیت، دوباره طراحی شده‌اند. در خشک‌کن‌های پاششی معمولاً جهت گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود. کم کردن مصرف انرژی موجب کاهش انتشار گازهای گرمخانه‌ای به محیط زیست در اثر کاهش سوختن سوخت‌های فسیلی می‌شود. با این وجود، مدیران کارخانه‌هایی که از خشک‌کن پاششی استفاده می‌کنند، برای درک و محاسبه موازنه جرم و حرارت بهینه، به‌منظور رسیدن به مصرف انرژی مناسب در اجرای فرآیند دچار مشکل هستند (مسترز، ۱۹۸۵؛ موجودمار، ۱۹۹۵؛ پری و گرین، ۱۹۹۷).

در سال ۱۹۶۱ ایده استفاده از صفحه گسترده الکترونیکی توسط ماتسیچ داده شد (سیلا، ۲۰۰۱). از جدیدترین نرم‌افزارهای صفحه گسترده می‌توان به VisiCalc اشاره کرد و از نمونه‌های قدیمی‌تر می‌توان از Quattro Pro، Microsoft Excel و Lotus 1-2-3 نام برد. متداول‌ترین صفحه گسترده کنونی Microsoft Excel است که برای همه سیستم‌های اجرایی از قبیل Windows، unix/linux و Mac OS در دسترس می‌باشد. برای کسانی که واحدهای مجهز به خشک‌کن پاششی را طراحی یا راه‌اندازی می‌کنند، استفاده از یک ابزار برنامه‌ریزی جهت بهینه‌سازی فرآیند، بسیار مورد نیاز است. در این جا برای بهینه‌سازی فرآیند از Excel به‌عنوان یک ابزار برنامه‌ریزی استفاده می‌شود. با استفاده از Excel برای محاسبه و طراحی فرآیند خشک کردن پاششی تنها نیاز به ورود تعداد کمی اطلاعات اساسی داریم. علاوه بر این، در Excel این قابلیت وجود دارد که هر تغییر در هر نقطه از فرآیند خشک‌کن پاششی را ببینیم.

در این تحقیق برنامه به ۶ قسمت تقسیم می‌شود که محاسبات جداگانه‌ای در آن‌ها اجرا می‌شود. در بخش اول اطلاعات محاسباتی وارد می‌شود. در بخش دوم، سوم و چهارم به ترتیب اطلاعات اساسی موازنه جرم و حرارت، محاسبات مشعل و محاسبات برج خشک‌کن پاششی آورده شده است. در بخش پنجم، محاسبه مصرف گرمای کلی فرآیند و در بخش ششم، بهینه‌سازی مصرف سوخت با استفاده از بازگشت جریان هوای خروجی قرار دارد. در انتها علت انتخاب حداکثر میزان جریان بازگشتی به مقدار ۶۰ درصد، توضیح داده شده است و براساس آن صرفه‌جویی مصرف سوخت را به درصد بیان می‌کنیم.

توضیح برنامه

ورود اطلاعات محاسباتی (هوا و آب): در ابتدا، تنها تعداد کمی از اطلاعات ورودی برای طبقه‌بندی کردن خانه‌های Excel ضروری هستند، بقیه اطلاعات مثل آنتالپی و حجم مخصوص آب و هوا به صورت خودکار محاسبه می‌شوند (جدول ۱). در ستون اول اطلاعات اصلی محدوده دمایی صفر تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همچنین آنتالپی هوای خشک و آنتالپی بخار آب، برای همان محدوده دمایی صفر تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است (رازنجویک، ۱۹۹۵).

تنها یکی از اطلاعات قسمت اول برنامه در قسمت دوم برنامه محاسبه شده و در خانه 'B6' قسمت اول برنامه بازمی‌گردد. آن اطلاعات مقداری از مواد خشک شده است که خشک‌کن پاششی را ترک می‌کند (H2). این کار به منظور داشتن تمام اطلاعات جرم و حرارت در قسمت اول برنامه انجام می‌شود.

جدول ۱- اطلاعات محاسباتی.

نام پارامتر	واحد	نشانه	نام پارامتر	واحد	نشانه
آنتالپی هوای خروجی	[kJ/kg]	h_{2a}	مقدار دوغاب	[kg/h]	m_{wm}
آنتالپی هوای ورودی	[kJ/kg]	h_{1a}	مقدار رطوبت دوغاب	[%]	X_{wm}
آنتالپی آب در T_{wm}	[kJ/kg]	h_{1w}	مقدار ماده خشک دوغاب	[%]	DM_C
آنتالپی آب در T_{out}	[kJ/kg]	h_{2w}	دمای دوغاب	[°C]	T_{wm}
آنتالپی بخار آب در T_{in}	[kJ/kg]	h_{3w}	مقدار محصول خشک شده	[kg/h]	m_{dr}
گرمای ویژه نیتروژن	[kJ/kg°C]	$C_p(N_2)$	مقدار رطوبت ماده خشک	[%]	X_d
گرمای ویژه دی‌اکسیدکربن	[kJ/kg°C]	$C_p(CO_2)$	دمای محصول خشک شده	[°C]	T_{dm}
گرمای ویژه دوغاب	[kJ/kg°C]	$C_p(M_{wet})$	درصد نشت هوا	[%]	L_A
گرمای ویژه ماده خشک	[kJ/kg°C]	C_{pdm}	دمای هوای داغ ورودی	[°C]	T_{in}
گرمای ویژه محصول خشک شده	[kJ/kg°C]	$C_p(M_{dr})$	دمای هوای خروجی	[°C]	T_{out}
گرمای بخار آب	[kJ/kg°C]	$r(H_2O)$	دمای هوای مخلوط شده برگشتی	[°C]	T_a
گرمای ویژه سوخت در ۶۰°C	[kJ/kg°C]	C_{pf}	گرمای تولیدی سوخت	[kJ/kg]	$NCVF$
دمای سوخت	[°C]	T_f	آنتالپی هوای مخلوط شده برگشتی	[kJ/kg]	h_{3a}

۱- خانه‌های موجود در نرم‌افزار Excel، مربوط به شکل ۲

محاسبات اطلاعات اساسی موازنه جرم و حرارت: در این قسمت از برنامه مقدار محصول خشک شده (cell H2)، مقدار بخار آب (cell H3) و مقدار حرارت مورد نیاز برای تبخیر آب (cell H5) محاسبه شده‌اند (جدول ۲). از این اطلاعات در محاسبه مقدار کل حرارت مورد نیاز (Cell H7) و مقدار سوخت استفاده شده است (cell H8). بازده تبخیر (کیلوگرم سوخت مصرفی/کیلوگرم آب تبخیر شده) در خانه H9 آمده است.

محاسبه موازنه جرم و حرارت برای جایی مشعل: محاسبات مربوط به مقدار کل حرارت گرم‌کن (cell H14)، کل حرارت حاصل از هوای مخلوط شده برگشتی (cell H11)، گرمای حاصل از سوخت (cell H12) و گرمای احتراق (cell H13) در این قسمت انجام شده است. گرمای گرم‌کن (cell K4) مجموع حرارت حاصل از هوای داغ (Cell H19)، گرمای محصولات ایجاد شده توسط احتراق یعنی بخار آب (cell H20)، نیتروژن (cell K2) و دی‌اکسیدکربن (cell K3) و همچنین تلفات گرم‌کن (اختلاف بین گرما قبل از گرم‌کن و بعد از آن (cell K5) نیز آمده است (جدول ۳).

جدول ۲- محاسبات اساسی موازنه جرم و حرارت.

نام پارامتر	واحد	نشانه	فرمول
مقدار محصول خشک شده	[kg/h]	m_{dm}	$m_{dm} = m_{wm} \cdot (100 - X_{wm}) / 100 - DM_c$
مقدار آب تبخیر شده	[kg/h]	m_{ev}	$m_{ev} = m_{dr} \cdot (X_{wm} - X_d) / 100 - X_{wm}$
مقدار هوای (ورودی) داغ مورد نیاز	[kg/h]	m_{ha}	$m_{ha} = m_{ev} \cdot rH_2O / (h_{1a} - h_{2a})$
گرمای لازم برای تبخیر آب	[kj/h]	Q_1	$Q_1 = m_{ha} \cdot h_{1a}$
مقدار گرمای هوای خروجی	[kj/h]	Q_2	$Q_2 = m_{ha} \cdot (h_{2a} - h_{1a})$
مقدار کل گرما	[kj/h]	Q_u	$Q_u = Q_1 + Q_2$
مقدار سوخت مورد نیاز	[kj/h]	m_f	$m_f = Q_u / NCVF$
بازده تبخیر	[kg H2O/kg fuel]	C_{ev}	$C_{ev} = m_{ev} / m_f$

جدول ۳- محاسبات موازنه جرم و حرارت در مشعل.

فرمول	نشانه	واحد	نام پارامتر
$Q_{Fin} = Q_a + Q_f + Q_{comb.}$	Q_{Fin}	[kj/h]	مقدار کل حرارت در گرم کن
$Q_a = m_{ha} \cdot h_{3a}$	Q_a	[kj/h]	حرارت ناشی از هوای مخلوط شده
$Q_f = m_f \cdot T_f \cdot c_{pf}$	Q_f	[kj/h]	حرارت حاصل از سوخت
$Q_{comb} = m_f \cdot NCVF$	Q_{comb}	[kj/h]	حرارت حاصل از احتراق
$Q_{ha} = [m_{ha} - m(air_{comb.})] \cdot h_{1a}$	Q_{ha}	[kj/h]	حرارت ناشی از هوای داغ
$m(O_2) = 0.01 \cdot (2.667 \cdot C + 8 \cdot H)$	$m(O_2)$	[kg]	مقدار اکسیژن
$m_{AIR} = 1.3(0.115 \cdot C + 0.345 \cdot H)$	m_{AIR}	[kg]	مقدار هوا
$m(N_2) = 0.786 \cdot m_{AIR}$	$m(N_2)$	[kg]	مقدار نیتروژن
$m(air_{comb.}) = m_f \cdot m_{AIR}$	$m(aircomb.)$	[kg]	مقدار کل هوای لازم برای احتراق
$m_{1a} = m_{ha} \cdot 0.05$	m_{1a}	[kg/h]	هوای ناشی
$Q(H_2O) = m_f \cdot m(H_2O) \cdot h_1(H_2O)$	$Q(H_2O)$	[kj/h]	حرارت حاصل از بخار آب در احتراق
$Q(N_2) = m_f \cdot m(N_2) \cdot c_p(N_2) \cdot T_{in}$	$Q(N_2)$	[kj/h]	حرارت حاصل از نیتروژن
$Q(CO_2) = m_f \cdot m(CO_2) \cdot c_p(CO_2) + T_{in}$	$Q(CO_2)$	[kj/h]	حرارت حاصل از دی اکسید کربن
$2_{Fout} Q_{ha} + Q(H_2O) + Q(N_2) + Q(CO_2)$	Q_{Fout}	[kj/h]	حرارت کل حاصل از گرم کن
$Q_{FL} = Q_{Fin} - Q_{Fout}$	Q_{FL}	[kj/h]	تلفات گرم کن
$Q_{Sl} = m_{wm} \cdot c_{pS} \cdot T_S$	Q_{Sl}	[kj/h]	حرارت از دوغاب ورودی

محاسبات موازنه جرم و حرارت در برج خشک کن: گرمای کلی ورودی به برج (cell K8)، گرمای حاصل از گرم کن (cell K4)، گرمای حاصل از دوغاب (cell K6)، گرمای ناشی از نیتروژن (cell K11)، گرمای ناشی از دی اکسید کربن (cell K12) و گرمای محصول خشک شده (cell K13) در این بخش محاسبه شده اند (جدول ۴).

جدول ۴- محاسبات موازنه جرم و حرارت در برج خشک‌کن.

نام پارامتر	واحد	نشانه	فرمول
مقدار کل حرارت در برج خشک‌کن	[kj/h]	$Q_{t\ in}$	$Q_{t\ in} = Q_{Fout} + Q_{sl} + Q_{la}$
حرارت کل حاصل از گرم‌کن	[kj/h]	$Q_{F\ out}$	$Q_{F\ out} = Q_{ha} + Q(H_2O) + Q(N_2) + Q(CO_2)$
حرارت حاصل ازدوغاب	[kj/h]	Q_{sl}	$Q_{sl} = m_{wm} \cdot c_{ps} \cdot T_s$
حرارت ناشی از نیتروژن	[kj/h]	$Q(N_2)_{out}$	$Q(N_2)_{out} = m_f \cdot m(N_2) \cdot c_p(N_2) \cdot T_{out}$
حرارت ناشی از دی‌اکسیدکربن	[kj/h]	$Q(CO_2)_{out}$	$Q(CO_2)_{out} = m_f \cdot m(CO_2) \cdot c_p(CO_2) \cdot T_{out}$
حرارت حاصل از محصول خشک شده	[kj/h]	Q_{dm}	$Q_{dm} = m_{dm} \cdot c_{pdm} \cdot T_{dm}$
حرارت ناشی از نشی هوا	[kj/h]	Q_{LA}	$Q_{LA} = Q_a \cdot h_{3a}$
حرارت ناشی از هوای خروجی	[kj/h]	$Q_{a\ out}$	$Q_{a\ out} = (m_{ha} + m_{1a}) \cdot h_{2a}$
حرارت حاصل از آب تبخیر شده	[kj/h]	$Q_{ew\ out}$	$Q_{ew\ out} = [m_{ev} + (m(H_2O) \cdot m_f)] \cdot h_{2w}$

محاسبه مصرف گرمای کلی فرآیند: مقدار گرمای مورد نیاز برای تبخیر آب در خانه K15 محاسبه شده است. همچنین گرمای ماده خشک در خانه K13، گرما در هوای خروجی در خانه K14، اتلاف گرم‌کن در خانه K18 و اتلاف برج در خانه K19 قرار دارد (جدول ۵).

بهینه‌سازی مصرف انرژی با استفاده از بازگشت جریان هوای خروجی: بیشترین مقدار هوای بازگشتی از نظر تئوری ۶۰ درصد است. محدوده جریان بازگشتی مطلوب در خانه O2 و مقدار رطوبت هوای مخلوط شده برگشتی در خانه O3 نمایش داده می‌شود. برای میزان جریان بازگشتی مطلوب، مقدار هوای مخلوط شده برگشتی (هوای بازگشتی + هوای تازه مصرفی) در خانه O8 محاسبه شده است. با استفاده از مقدار هوای تازه و هوای بازگشتی و دمای آنها، دمای هوای مخلوط شده در خانه O9 محاسبه شده است.

جدول ۵- محاسبه مصرف گرمای کلی فرآیند.

نام پارامتر	واحد	نشانه	فرمول
حرارت برای تبخیر آب	[kj/h]	Q_{ev}	$Q_{ev} = m_{ev} \cdot [h_2(H_2O) - h_1(H_2O)]$
حرارت از ماده خشک شده	[kj/h]	Q_{dm}	$Q_{dm} = m_{dm} \cdot c_{pdm} \cdot T_{dm}$
مقدار کل حرارت از برج	[kj/h]	Q_{out}	$Q_{out} = Q_{aout} + Q_{ewout} + Q(N_2)_{out} + Q(CO_2)_{out} + Q_{dm}$
تلفات گرم‌کن	[kj/h]	Q_{FL}	$Q_{FL} = Q_{Fin} - Q_{Fout}$
تلفات برج	[kj/h]	Q_{TL}	$Q_{TL} = Q_{plant} - (Q_{ev} + Q_{op} + Q_{out} + Q_{FL})$
مقدار کل حرارت در کارخانه	[kj/h]	Q_{Plant}	$Q_{Plant} = Q_{Fin} + Q_{1a} + Q_s$
گرما در خروجی	[kj/h]	Q_{out}	$Q_{out} = Q_{aout} + Q(N_2)_{out} + Q(CO_2)_{out} + Q_{LA} + (m_f \cdot 1.035 \cdot h_{2w})$

از اطلاعات احتراق و مقدار هوای مخلوط شده، مقدار کل هوای داغ در خانه O10 و مقدار حرارت هوای داغ در خانه O12 محاسبه شده است. از هوای مورد نیاز برای فرآیند، مقدار سوخت مصرفی در خانه O13 محاسبه می‌شود و صرفه‌جویی سوخت به‌عنوان درصدی از سوخت مصرفی با جریان بازگشتی در خانه O14 محاسبه شده است (جدول ۶).

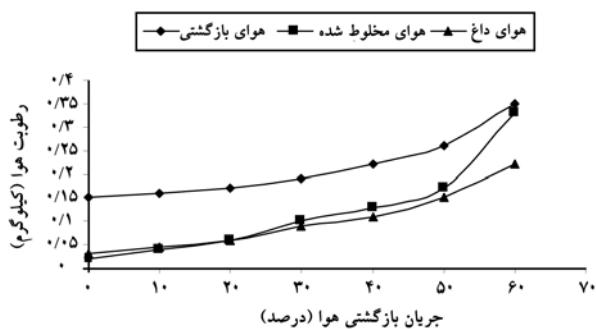
مقدار رطوبت هوای بازگشتی نیز باید محاسبه شود، تا مطمئن شویم که برای هر مرحله از فرآیند خشک کردن به اندازه کافی از نقطه شبنم دور است. مقدار رطوبت جریان بازگشتی، هوای داغ ورودی، هوای مخلوط شده و هوای نشتی از روی نمودار سایکرومتری به‌دست می‌آیند (اطلاعات مربوطه ارائه نشده است).

بررسی و تفسیر نتایج به‌دست آمده: همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم، هرچه درصد جریان هوای بازگشتی بیشتر باشد، میزان رطوبت هوای بازگشتی، هوای مخلوط شده و هوای داغ بیشتر می‌شود. باید توجه داشت که نقطه شبنم هوای مخلوط شده و بازگشتی $0/789$ کیلوگرم/کیلوگرم است. بنابراین جهت بهینه‌سازی، در هر کدام از مراحل فرآیند مقدار رطوبت بین $0/15$ و $0/4$ کیلوگرم آب/کیلوگرم هوا است. در نتیجه میزان جریان بازگشتی هوا، برای آن‌که به‌مقدار کافی از نقطه شبنم دور باشیم، 60 درصد انتخاب شده است. این بدان معنا است که هوای مرطوب در همه فازهای فرآیند ظرفیت کافی را برای پذیرفتن رطوبت از محصول در حال خشک شدن و برای حفظ و خروج بخار آب به‌عنوان فاز تبخیر داشته باشد.

شکل ۲ صفحه فرآیند را نشان می‌دهد. اطلاعات اساسی و نتیجه محاسبات در خانه‌های صفحه فرآیند قرار دارند. با تغییر اطلاعات ورودی، نتایج تغییرات در خانه‌های وابسته به آنها مشاهده خواهد شد. این اطلاعات همچنین در صفحه جریان نیز به‌صورت شماتیک نمایش داده شده‌اند (شکل ۳). در شکل ۳ در کنار قسمت‌های مختلف خشک‌کن پاششی خانه‌هایی قرار دارند که با تغییر پارامترهای ورودی، این خانه‌ها تغییر می‌کنند. بنابراین، پیگیری تغییرات فرآیند در هر مرحله حتی برای تغییرات جزئی در اطلاعات ورودی، آسان می‌شود. شکل ۴ صرفه‌جویی در مصرف سوخت نهایی به‌عنوان تابعی از میزان جریان بازگشتی هوا را نشان می‌دهد.

جدول ۶- بهینه‌سازی مصرف انرژی فرآیند با جریان بازگشتی هوای خروجی.

نام پارامتر	واحد	نشانه	فرمول
درصد جریان هوای بازگشتی	[%]	RR	$m_{rec} = m_{out} \cdot (\% RR/100)$
رطوبت هوا	[kg/kg]	X	$m(air)_{IP} = m_{out} - m_{rec}$
مقدار هوای خروجی از برج	[kg]	m_{out}	$m_{fa} = m_{ha} - m_{rec} - m(air)_{comb.}$
میزان جریان هوای بازگشتی	[kg]	m_{rec}	$m(air)_{bl} = m_{rec} + m_{fa}$
مقدار هوای خروجی از کل خشک‌کن	[kg]	$m(air)_{IP}$	$T(air)_{bl} = \frac{(m_{rec} \cdot T_{out}) + (m_{fa} \cdot T_{fa})}{(m_{rec} + m_{fa})}$
مقدار هوای تازه	[kg]	m_{fa}	$m_{cha} = m_{rec} + m_{fa} + m(air)_{comb.}$
مقدار هوای مخلوط شده	[kg]	$m(air)_{bl}$	$Q(air)_{bl} = [m(air)_{bl} * c_p(air)_{bl} * T(air)_{bl}] - (m_{fa} * h_{3a})$
دمای هوای مخلوط شده	[°C]	$T(air)_{bl}$	$Q_{tot} = (Q_1 + Q_2) - Q(air)_{bl}$
مقدار هوای داغ ورودی	[kg]	m_{cha}	$m_{f_{rec}} = Q_{tot} / NCVF$
گرمای هوای مخلوط شده	[kj/kg]	$Q(air)_{bl}$	$[FS = 1 - (m_{f_{rec}} / m_f)] \cdot 100$
مقدار کل گرمای مورد نیاز	[kj/kg]	Q_{tot}	
مقدار سوخت (با جریان بازگشتی)	[kg]	$m_{f_{rec}}$	
صرفه جویی در مصرف سوخت	[%]	FS	



شکل ۱- مقدار رطوبت هوا در برابر جریان بازگشتی هوا.

OSI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2	m_{wm}	25000	$m_{(CO_2)}$	3.11	m_{dm}	10795	$Q_{(N_2)}$	9538164	RR		60					
3	X_{wm}	62	H	11	m_{ev}	14205	$Q_{(CO_2)}$	5440.15	X		0.015					
4	DM_C	38	h_{2a}	110.99	m_{ha}	99973	$Q_{f,out}$	45313815	m_{out}		61972					
5	T_{wm}	80	h_{1a}	466.2	Q_{1a}	5E+07	$Q_{f,L}$	12567879	m_{rec}		37183					
6	m_{da}	10795	h_{1a}	334.9	Q_{2a}	9E+06	Q_{a1}	4688400	$m_{(air)sp}$		24789					
7	X_d	12	h_{2w}	2691	Q_u	6E+07	Q_{1A}	40430239	m_{ia}		38539					
8	T_{dm}	80	h_{3a}	3383	m_f	1351.8	$Q_{i,in}$	90432454	$m_{(air)h1}$		75722					
9	L_A	5	$C_p(N_2)$	1.112	C_{ev}	10.508	$Q_{a,out}$	11650788	$T_{(air)h1}$		66.74					
10	T_{in}	450	$C_p(CO_2)$	1.187	m_{1a}	4998.6	$Q_{ev,out}$	41989359	m_{aha}		99973					
11	T_{out}	110	$C_p(M_{vee})$	2.3442	Q_a	2E+06	$Q_{(N_2)ot}$	2331551	$Q_{(air)h1}$		4E+06					
12	T_a	25	C_p,dm	1.339	Q_f	178352	$Q_{(CO_2)}$	548916.5	Q_{tot}		5E+07					
13	NCVF	41200	$C_p(M_{da})$	1.633	Q_{comb}	6E+07	Q_{dm}	1156409	m_{frec}		1247					
14	h_{3a}	20.11	$n(H_2O)$	2500	Q_{Fin}	6E+07	Q_{out}	57677024	FS		7.755					
15	C	87	C_{pf}	2.199	$m(O_2)$	3.209	Q_{ev}	33467330								
16	$m(h_2o)$	1.035	T_f	60	m_{AIR}	17.94	Q_{Plant}	1.03E+08								
17					$m(N_2)$	14.101	Q_{out}	58726422								
18					$m_{(airco)}$	24251	Q_{fL}	12567879								
19					Q_{ha}	4E+07	Q_{TL}	-711899.5								
20					$Q_{(H_2O)}$	468552										

شکل ۲- صفحه داده‌های فرآیند.

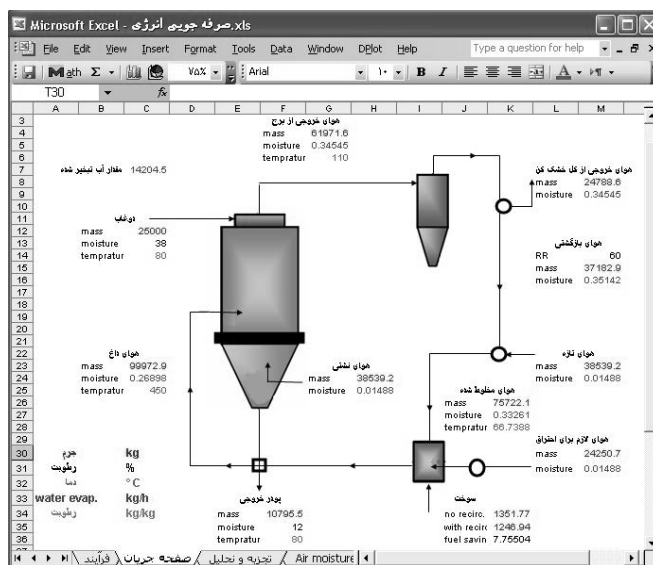
نتیجه‌گیری کلی

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه کاهش مصرف انرژی در خشک‌کن پاششی و نتایج به‌دست آمده می‌توان فهمید که این امر نیاز به در اختیار داشتن اطلاعات اساسی از فرآیند خشک کردن و آگاهی از موازنه‌های جرم و حرارت در نقاط مختلف خشک‌کن می‌باشد. مدلی که در این مقاله ارائه شده است، یک برنامه صفحه گسترده با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel است. نتایج به‌دست آمده در صفحه فرآیند و صفحه جریان در خانه‌های فعال نمایش داده شده‌اند. خاصیت خانه‌های فعال این است که با کوچک‌ترین تغییر در اطلاعات ورودی، می‌توانیم نتایج را در این خانه‌ها مشاهده کنیم. علاوه بر این ۲ صفحه، صفحات دیگر که شامل نمودارهایی هستند که تغییرات بعضی از متغیرها را براساس متغیرهای دیگر نشان می‌دهند.

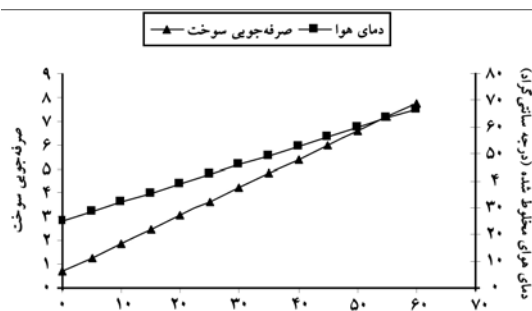
این مدل موثر و ساده، اطلاعات اولیه‌ای را درباره صرفه‌جویی سوخت فراهم می‌کند که منحصراً بر روی اطلاعات فیزیکی و ترمودینامیکی پایه‌گذاری شده است. استفاده از برنامه این امکان را می‌سازد که هزینه‌های اجرایی را کاهش داده و ظرفیت خشک‌کن پاششی را بهبود بخشید.

بدیهی است که صرفه‌جویی در سوخت مصرفی به‌طور خطی به‌میزان جریان بازگشتی هوا وابسته است و حداکثر میزان جریان بازگشتی به‌صورت تئوری با توجه به نقطه شبنم، ۶۰ درصد است. اگر

میزان جریان بازگشتی از ۶۰ درصد بیشتر شود، رطوبت هوای ورودی به خشک‌کن افزایش یافته و قابلیت آن در خارج کردن رطوبت محصول کاهش می‌یابد در نتیجه صرفه‌جویی سوخت تقریباً ۷/۷۵ درصد خواهد شد. بازده تبخیر و مقدار هوای (ورودی) داغ مورد نیاز به دمای هوای ورودی وابسته است که می‌تواند بدین معنا باشد که بازده تبخیر بالاتر، با استفاده از دمای ورودی بالاتر برای هوای داغ به دست می‌آید. دمای هوای ورودی را نمی‌توان خیلی افزایش داد چرا که محصول ورودی و به‌ویژه محصولات غذایی در برابر دماهای بالا حساس بوده و دچار افت کیفیت می‌شوند.



شکل ۳- صفحه جریان فرآیند.



شکل ۴- صرفه‌جویی در مصرف سوخت و رابطه آن با میزان جریان بازگشتی هوا.

فهرست منابع

- Bilic, M., and Glavas, G. 1992. Spray-drying simulation in spreadsheet, *Drying Technology* 10:2. 509-519.
- Bilic, M., and Olujic, Z. 1987. A model for energy saving in spray-drying the detergents. In: *Proceeding 4th Mediterranean congress on Chemical Engineering Barcelona*, Pp: 688-689.
- Chegini, G. 2003. The influence of spray drying operating parameters on the physical properties of orange juice powder, PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran.
- Keey, R.B. 1992. *Drying of looses and particulate materials (Pp:1-2)*.USA: Hemisphere Publishing Corporation.
- Maroulis, ZB., and Saravacos, GD. 2002. Modeling, simulation and design of drying process, Keynote Lecture at the 13th International Drying Symposium, IDS, Beijing, China.
- Masters, K. 1985. *Spray Drying handbook*, fourth ed., Longman Scientific & Technical, London, Pp: 96-110.
- Meister, A., and Niklaus, S. 2000. Spray drying processes. Patent 6010725.
- Mujumdar, A.S. 1995. *Handbook of Industrial Drying*, Vol. 1, second ed., Marcel Dekker, NewYork, Basel, Hong Kong, 1995, Pp: 605-621.
- Pahlevanzadeh, H., and Heidari, Z. 2005. Reduction of energy usage in spray dryers. 5th Iranian national conference on energy, Tehran.
- Perry, R.H., and Green, D.W. 1997. *Perry's Chemical engineer's Handbook*, seventh ed., McGraw-Hill, NewYork.
- Raznjevic, K. 1995. *Handbook of Thermodynamic Tables*, second revision ed., Begell House, NewYork.
- Ruud, E.M., Straatsma, H., and Verschueren, M. 2002. *Modelling spray drying processes for dairy products*-© INRA, EDP Sciences.
- Seila, A.F. 2001. Spreadsheet simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Terry College of Business the University of Georgia. Athens, GA, U.S.A.



Simulation, Calculation and Possibility of Energy Saving in the Spray Drying Process

M. Mazidi¹, A. Taheri Gravand² and *S.M. Jafari³

¹B.Sc. student Dept. of Mechanics of Agricultural Machinery, Iran, ²M.Sc. student Dept. of Mechanics of Agricultural Machinery, Tehran University, Iran, ³Assistant Prof., Dept. of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Abstract

Spray drying is one of the most important Processes applied in the industry. The equipment used in this process evaporates water in a very short time and so, need a lot of energy. In this work, we used Microsoft Excel as an analysis tool for the optimization of fuel usage in this dryer. We have described the process in terms of thermodynamic calculations and mass and heat balance equations. Our results revealed that it is possible to reduce the operating costs and increase the process efficiency by the recovery of outlet air from cyclone. The maximum of recirculation rate is 60% and reduction of fuel usage is linearly proportional to the recirculation rate. Our calculations showed that we can reduce the fuel usage by 7.75%. The other advantage of this method is that it reduces the production of gases which are not environmentally friendly.

Keywords: Spray dryer; Energy saving; Recalculated air; Optimization, Excel

*- Corresponding Author; Email: smjafari@gau.ac.ir

