

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران  
دوره ۶۷، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۰۸

ص ۳۳۵-۳۴۶

## تعیین میزان ارتباط متغیرهای برج ذخیره CMP بر ویژگی‌های

### کاغذ روزنامه

- ❖ **محمدهادی مرادیان\***: استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
- ❖ **قنبر ابراهیمی**: استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **حسین رسالتی**: استاد، گروه چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- ❖ **رضا عزیزی‌نژاد**: استادیار، گروه اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

#### چکیده

این تحقیق با هدف بررسی روابط میان ۱۶ متغیر فرایندی برج ذخیره خمیر شیمیایی - مکانیکی (CMP) و ۱۷ ویژگی کیفی کاغذ روزنامه ساخته شده در کارخانه چوب و کاغذ مازندران و تهیه مدل‌های پیش‌بینی انجام گرفت. پس از تهیه سری داده مناسب با در نظر گرفتن زمان لازم برای تبدیل این خمیر به کاغذ روزنامه، روابط این متغیرهای مستقل با متغیرهای ویژگی‌های کاغذ روزنامه با روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) تعیین شد که در نتیجه آن ۴ بردار مخفی محاسبه شده توانستند متغیرهای مرتبط را مشخص و گروه‌بندی کنند. بردار اول به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور حدود ۵۰ درصد از تغییرات ۷ ویژگی کاغذ روزنامه شامل ضخامت، حجیمی، طول پارگی MD، افزایش طول MD، مقاومت به ترکیدن، ماتی، و مقاومت به عبور هوا را توضیح داد. درصد الیاف باقی‌مانده بر روی الک با مش ۴۸ که شامل بخش الیاف بلند می‌شود به‌عنوان مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر این ۷ ویژگی در این بخش بود. برای پیش‌بینی ویژگی‌های کاغذ روزنامه پس از کاهش ابعاد مدل، از PLS به روش رگرسیون رتبه‌کاهش‌یافته استفاده شد که در نتیجه آن تغییرات ضخامت، حجیمی، طول پارگی MD، مقاومت به ترکیدن، و ماتی کاغذ روزنامه به‌ترتیب به اندازه ۴۸/۷، ۴۹/۲، ۴۵/۳، ۵۱/۵، و ۵۲/۴ درصد توسط ۱۲ متغیر فرایندی برج ذخیره CMP تبیین شد.

واژگان کلیدی: رگرسیون PLS، کاغذ روزنامه، متغیرهای برج ذخیره CMP، مدل آماری، ویژگی‌های کاغذ.

## مقدمه

خروجی‌ها مواجه می‌شویم. هنگامی که تعداد متغیرها کم باشد احتمال وجود هم‌خطی بین آن‌ها ضعیف‌تر است و ارتباط قابل فهمی با پاسخ‌ها خواهند داشت [۸]. در این حالت، رگرسیون چندگانه روشی مناسب برای تبدیل داده‌های خام به اطلاعات مفید و قابل درک خواهد بود. با وجود این، اگر تعداد متغیرها زیاد باشد و هم‌خطی بین آن‌ها وجود داشته باشد، رگرسیون چندگانه مناسب و مؤثر نیست. در این حالت، روش حداقل مربعات جزئی برای برازش مدل‌های پیش‌بینی بسیار مناسب است [۸]. این روش ابتدا در علوم اقتصادی استفاده شده (۱۹۶۶) و سپس کاربرد آن در ارزیابی حسگرها (۱۹۸۹) و در مهندسی شیمی (۲۰۰۱) توسعه یافته است. پس از آن، رگرسیون PLS به‌عنوان ابزاری برای فن‌های چندمتغیره داده‌های آزمایشگاهی و غیرآزمایشگاهی (۲۰۰۴) در علوم مختلف استفاده شد [۹]. این روش ابتدا به‌صورت شبه الگوریتم ارائه شد که برای محاسبه بردار ویژه استفاده می‌شد، اما به‌سرعت در چهارچوب آماری تفسیر گردید. هدف نهایی PLS استفاده از فاکتورها برای پیش‌بینی پاسخ‌هاست [۹]. این فرایند بسته به هدف محقق با روش‌های رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR)<sup>۷</sup>، رگرسیون رتبه‌کاهش یافته (RRR)<sup>۸</sup>، یا رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)<sup>۹</sup> انجام می‌شود [۱۰].

روش‌های تحلیلی چندمتغیره در تحقیقات صنایع خمیر و کاغذ با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی [۱۱]، [۱۲] و داده‌های واقعی خط تولید کارخانه [۱۳-۱۵] برای ارزیابی کیفیت محصول نهایی به‌کار رفته است. برای ارتباط دادن محدوده وسیعی از متغیرهای فرایندی با ویژگی‌های کاغذ می‌توان آن را به

ویژگی‌های غیریکنواخت چوب بر کلیه مراحل فرایند ساخت کاغذ و کیفیت محصول نهایی تأثیر دارد و این تنوع، کنترل فرایند کاغذسازی را چالش‌برانگیز می‌کند. در این زمینه، پیش‌بینی و کنترل ویژگی‌های محصول نهایی با به‌کارگیری انواع مدل‌های ریاضی، آماری، شبکه عصبی، و سری‌های زمانی روش‌های جدید و مؤثری است که امروزه محققان بسیاری از آن‌ها استفاده می‌کنند [۱]. برای تهیه مدل‌های آماری به دانش کاملی از روش‌های آماری و طراحی آزمایش‌های متعدد نیاز است. این آزمایش‌ها ممکن است بسیار گران و وقت‌گیر باشند یا محدوده وسیعی از فرایند را در بر گیرند. به‌کارگیری داده‌های قدیمی برای دستیابی به درک مناسب از دینامیک فرایند، قبل از انجام آزمایش‌ها روشی مقبول‌تر است و ممکن است آزمایش‌ها اغلب غیرضروری باشند [۲، ۳].

مفهوم کم‌کردن آماری داده‌ها<sup>۱</sup> یک اصطلاح کلی شامل کلیه روش‌ها و فن‌های آماری به‌ویژه روش‌های آماری چندمتغیره برای آنالیز داده‌هاست که برای کنترل داده‌های زیاد با متغیرهای متعدد و اغلب همبسته توسعه داده می‌شوند [۲]. از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)<sup>۲</sup>، تحلیل عاملی (FA)<sup>۳</sup>، رگرسیون خطی چندگانه<sup>۴</sup>، و رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)<sup>۵</sup> می‌توان به‌عنوان برخی از روش‌های کم‌کردن داده‌های چندمتغیره نام برد که بسیاری از محققان در صنایع خمیر و کاغذ از این روش‌ها استفاده کرده‌اند [۴-۷].

حداقل مربعات جزئی روشی رایج برای مدل‌سازی نرم‌افزاری در کاربردهای صنعتی است. در تحقیقات علوم مهندسی اغلب با متغیرهای کنترل‌گر

6. Responses  
7. Principal component regression  
8. Reduced rank regression  
9. Partial least square regression

1. Statistical data mining  
2. Principal component analysis  
3. Factor analysis  
4. Multiple linear regression  
5. Partial least squares regression

از خروج از برج به اضافه متغیرهای متعدد ماشین کاغذ همگی بر خواص نهایی کاغذ روزنامه اثر می‌گذارند. در این تحقیق فقط تأثیر ویژگی‌های خمیرکاغذ موجود در برج ذخیره بر ویژگی‌های کاغذ روزنامه نهایی به طور مستقل بررسی شده است. تعیین روابط میان این متغیرهای مستقل و ویژگی‌های کاغذ نهایی و تهیه مدل‌های آماری برای کنترل سریع و دقیق تر خط تولید از میان انبوهی از داده‌ها بسیار اهمیت خواهد داشت.

اهداف این تحقیق شامل شناسایی مؤثرترین متغیرهای فرایندی برج ذخیره CMP بر هر یک از خواص مقاومتی، فیزیکی، و نوری کاغذ روزنامه در کارخانه چوب و کاغذ مازندران و همچنین تعیین میزان و نوع اثر آن‌ها بر خواص کاغذ نهایی است. تهیه مدل‌های آماری معنی‌دار برای پیش‌بینی خواص مقاومتی، فیزیکی، و نوری کاغذ روزنامه از روی متغیرهای برج ذخیره CMP نیز مد نظر بوده است.

## مواد و روش‌ها

### تهیه مجموعه داده‌ها

در این تحقیق ویژگی‌های خمیرکاغذ در برج ذخیره CMP و کاغذهای دست‌ساز ساخته شده از این خمیر که به صورت منظم اندازه‌گیری و ثبت می‌شود به عنوان ۱۶ متغیر مستقل و نماینده کلیه عملیات قبل از آن در نظر گرفته شده‌اند. برای تعیین و اولویت‌بندی این متغیرهای تأثیرگذار بر ۱۷ ویژگی فیزیکی و مقاومتی کاغذ روزنامه و سپس مدل‌سازی و پیش‌بینی آن‌ها ابتدا دو مجموعه از داده‌های مناسب تهیه شد. پس از تهیه حدود ۱۰۰۰ و ۷۰۰۰ مشاهده به ترتیب مربوط به متغیرهای برج ذخیره CMP (و ویژگی‌های کاغذهای دست‌ساز حاصل از این خمیر) و ویژگی‌های کاغذ روزنامه پایان خط تولید، کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار EXCEL و SPSS مرتب،

بخش‌های مختلفی تقسیم کرد. اورتیز کوردوا و همکاران (۲۰۰۶) برای تعیین متغیرهای فرایندی تأثیرگذار بر مقاومت کششی کاغذ روزنامه در جهت ماشین در کارخانه Bowater با استفاده از روش PLS، ۸۰ متغیر فرایندی مربوط به ابتدا تا انتهای کارخانه را در ۴ بخش و مجموعه داده بررسی کردند [۱۴].

استفاده از آنالیز داده‌های چندمتغیره برای عیب‌یابی فرایند ساخت کاغذ نیز استفاده شده است. وینچل (۲۰۰۶) با استفاده از روش‌های PCA و PLS به عیب‌یابی فرایند ساخت کاغذ پرداخت. این آنالیز برای فهم شیمی پایانه تر و سیستم آب سفید کارخانه Crafton کانادا بسیار مفید واقع شد. هدف از این آنالیز تعیین متغیرهایی بود که بر روی مصرف بیشتر کمک نگه‌دارنده و عدم ثبات پایانه تر<sup>۱</sup> تأثیرگذار بودند. در این تحقیق با استفاده از ۸۸ متغیر فرایندی و ۳۰۰۰ مشاهده، مدل‌های آماری مناسبی برازش داده شد [۱۵].

کارخانه چوب و کاغذ مازندران، از بزرگ‌ترین واحدهای صنعتی تولید خمیر و کاغذ بر پایه مواد چوبی در خاورمیانه، مشکلات زیادی در زمینه کنترل فرایند تولید و رسیدن به کیفیت مطلوب کاغذ روزنامه به علت نوسانات متغیرها در خط تولید دارد. در این کارخانه از زمانی که خرده‌چوب‌ها وارد مرحله خمیرسازی می‌شوند تا زمانی که به صورت خمیر در برج ذخیره CMP وارد می‌شوند حدود ۳۰ ساعت زمان لازم است [۱۶]. زمان لازم برای تبدیل این خمیر به کاغذ نیز بسته به سطح آن از ۱۵ دقیقه تا حدود ۱۸ ساعت متغیر است [۱۶]. ویژگی‌های خمیرکاغذ موجود در این برج به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر خواص کاغذ روزنامه تأثیر خواهد گذاشت. همچنین، سایر عملیات فرآوری خمیر بعد

1. Wet end instability

آماري اختلافي معنی‌دار با تعداد فاکتورهای کمتر نداشته باشد [۱۷]. بنابراین، وندروئت (۱۹۹۴) آزمون آماری  $t$  را برای مقایسه باقی‌مانده‌های پیش‌بینی‌شده برای مدل‌های مختلف پیشنهاد کرده است که در این تحقیق از آن استفاده شده است. با استفاده از این روش تعداد فاکتورهای انتخابی آنی است که هم کمترین فاکتورها را دارد و هم مقدار باقی‌مانده‌های آن از نظر آماری اختلافی معنی‌دار با تعداد فاکتورهای کمتر را دارد [۱۸].

تشخیص نقاط پرت با محاسبه فاصله اقلیدسی  $X$ ها و  $Y$ ها از مدل صورت گرفت و سپس مشاهداتی که فاصله اقلیدسی آن‌ها نسبت به میانگین فاصله‌ها  $1/5$  برابر بیشتر بود از محاسبات بعدی کنار گذاشته شد. فاصله اقلیدسی  $X$ ها برابر است با جذر مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها برای  $X$ های استانداردشده و فاصله اقلیدسی  $Y$ ها برابر است با جذر مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها برای  $Y$ های استانداردشده.

### نتایج و بحث

با استفاده از مجموعه داده‌های تهیه‌شده از ۱۷ ویژگی کاغذ روزنامه، آماره‌های توصیفی آن محاسبه شد که در جدول ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به جدول بیشترین ضریب تغییرات به ترتیب مربوط به مقاومت به عبور هوا و مقاومت به ترکیدن است؛ در صورتی که کمترین ضریب تغییرات برای وزن پایه، ماتی، و روشنی محاسبه شده است. فهرست متغیرهای برج ذخیره  $CMP$  و آماره‌های توصیفی آن نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

دسته‌بندی، و فیلتر شد. سپس، برای تهیه سری داده‌های متناظر از متغیرهای مستقل و وابسته، زمان لازم برای تبدیل خمیرکاغذ موجود در برج ذخیره به کاغذ نهایی (از ۱۵ دقیقه تا ۱۸ ساعت) در نظر گرفته شد. سوسپانسیون خمیر در برج  $CMP$  سطحی را تشکیل می‌دهد، به طوری که خمیری که زودتر وارد برج می‌شود زودتر هم خارج می‌شود. بنابراین، هرچه سطح خمیر بالاتر باشد، زمان بیشتری برای خروج آن لازم است. به طور کلی، برای خروج ۱ درصد از ارتفاع خمیر در برج، ۱۵ دقیقه زمان لازم است. این خمیر بسته به درصد توأم گونه‌های تشکیل‌دهنده و عملیات انجام‌شده روی آن، ویژگی‌های متفاوتی دارد. از این رو، کاغذ دست‌ساز تهیه‌شده از این خمیرها نیز دارای ویژگی‌های مقاومتی و نوری متفاوتی خواهند بود. به این ترتیب، از میان این اطلاعات با استفاده از نرم‌افزار Matlab و برنامه تدوین‌شده مناسب آن، مجموعه داده شامل ۳۰۳ مشاهده مطابق با زمان‌سنجی تولید برای تبدیل خمیر در هر مرحله به کاغذ روزنامه، تهیه شد.

### رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)

برای تعیین میزان و نوع ارتباط متغیرهای فرایندی برج  $CMP$  با ویژگی‌های کاغذ روزنامه از رگرسیون حداقل مربعات جزئی و برای پیش‌بینی ویژگی‌های کاغذ روزنامه از روش رگرسیون رتبه‌کاهش‌یافته و نرم‌افزار SPSS استفاده شد. پس از برآزش مدل‌ها معتبرسازی عرضی به روش جداسازی<sup>۱</sup> انجام گرفت تا بهترین تعداد مؤلفه‌ها تعیین شود. با استفاده از این روش تعداد فاکتورهای انتخاب‌شده معمولاً آنی است که کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده‌های پیش‌بینی‌شده<sup>۲</sup> (PRESS) را دارد. با وجود این، تعداد فاکتور انتخابی به این روش ممکن است از نظر

1. Split-sample cross validation
2. Predicted residual sum of squares

جدول ۱. آماره‌های توصیفی ویژگی‌های کاغذ روزنامه

ضریب تغییرات	انحراف معیار	حداکثر	میانگین	حداقل	واحد	اصطلاح تخصصی	ویژگی‌های کاغذ روزنامه
۰/۸۴	۰/۴۱	۵۴	۴۹/۳	۴۶/۵	g/m <sup>2</sup>	Basis Wt.	وزن پایه
۳/۸	۰/۳۳	۱۰	۸/۶	۷/۵	%	Moisture	رطوبت
۴	۳	۸۵	۷۵	۶۶	μm	Caliper	ضخامت
۴	۰/۰۶	۱/۷۲	۱/۵۱	۱/۳۳	Cm <sup>3</sup> /g	Bulk	حجمی
۱۰/۷	۰/۷۳	۹	۶/۸	۴/۷	Km	Break. L. MD	طول پارگی در جهت ماشین
۷/۷	۰/۱۵	۲/۸	۲	۱/۶	Km	Break. L. CD	طول پارگی در جهت عمود بر ماشین
۹/۵	۰/۱۳	۱/۹	۱/۴	۱	%	Elong. MD	افزایش طول در جهت ماشین
۱۰/۵	۰/۳۲	۴/۶	۳	۲/۱	%	Elong. CD	افزایش طول در جهت عمود بر ماشین
۱۳/۹	۱۴/۳	۱۹۰	۱۰۲	۶۷	kPa	Burst	مقاومت به ترکیدن
۱۰/۳	۲۲/۵	۳۵۰	۲۱۸	۱۷۰	mN	Tear MD	مقاومت به پارگی در جهت ماشین
۹	۲۷/۴	۴۷۵	۳۰۴	۲۵۱	mN	Tear CD	مقاومت به پارگی در جهت عمود بر ماشین
۳۵	۶/۵	۶۱	۱۸	۷	S	Gurely	مقاومت به عبور هوا
۲/۳	۰/۱	۴/۹	۴/۴	۴	%	Rough. Top	درصد زبری سطح رویی کاغذ
۲/۹	۰/۱۴	۵/۵	۴/۹	۴	%	Rough. Bot.	درصد زبری سطح زیری کاغذ
۲	۱	۶۱	۵۰/۸	۴۷	%	Brightness	روشنی
۱۰/۴	۰/۸۲	۱۴	۷/۸	۲/۱	%	Yellowness	زردی
۱/۱	۱	۹۳/۶	۹۱/۳	۸۶	%	Opacity	ماتی

جدول ۲. آماره‌های توصیفی متغیرهای برج ذخیره CM

ضریب تغییرات	انحراف معیار	حداکثر	میانگین	حداقل	واحد	اصطلاح تخصصی	متغیرهای برج ذخیره CMP
۶	۰/۲۹	۶/۸	۴/۶	۳/۷	-	pH	pH خمیرکاغذ در برج
۱۱	۱/۱۳	۱۵	۱۰/۷	۶/۲	%	Conse.	درصد خشکی خمیرکاغذ در برج
۶	۲۳/۹	۵۰۴	۴۰۸	۳۱۰	ml	C.S.F.	درجه روانی خمیرکاغذ در برج
۲۲	۰/۰۸	۰/۸۵	۰/۳۶	۰/۱۵	gr/l	Total Na <sup>+</sup>	مواد سدیم‌دار خمیرکاغذ در برج
۱۱۳	۰/۰۹	۰/۹	۰/۰۸	۰/۰۱	%	Shive	درصد شایو خمیرکاغذ در برج
۱	۱/۱	۸۸/۹	۸۴/۷	۸۰/۶	%	Yield	بازده خمیرکاغذ در برج
۳۵	۳/۳۵	۲۲/۱	۹/۵	۲/۱	%	Mesh 28	درصد مش ۲۸ خمیرکاغذ در برج
۱۱	۴/۴۸	۵۰/۶	۴۰	۲۱/۵	%	Mesh 48	درصد مش ۴۸ خمیرکاغذ در برج
۲۱	۳/۹۲	۴۸/۹	۱۸/۸	۵/۳	%	Mesh 100	درصد مش ۱۰۰ خمیرکاغذ در برج
۱۳	۴/۲۶	۴۷/۳	۳۱/۸	۱۲/۵	%	Fine	درصد نرمه خمیرکاغذ در برج
۱۴	۰/۳۴	۴/۵	۲/۴	۱/۴	km	Break. L. h.	طول پارگی کاغذ دست‌ساز
۱۴	۳۰/۳	۳۲۰	۲۱۲	۱۳۱	mN	Tear h.	مقاومت به پارگی کاغذ دست‌ساز
۲۰	۱۲/۱	۲۰۰	۶۱	۳۵	kPa	Burst h.	مقاومت به ترکیدن کاغذ دست‌ساز
۳	۱/۳۵	۶۰/۲	۵۳/۱	۴۲/۵	%	Brightness h.	روشنی کاغذ دست‌ساز
۴	۱/۲۳	۳۷/۳	۲۸/۲	۲۳/۵	%	Yellowness h.	زردی کاغذ دست‌ساز
۱	۱/۱۶	۹۴/۲	۹۰/۱	۸۲	%	Opacity h.	ماتی کاغذ دست‌ساز

وزن پایه، طول پارگی CD، مقاومت به پارگی MD، مقاومت به پارگی CD، و زردی کاغذ روزنامه کم بوده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که متغیرهای برج ذخیره CMP تأثیر کمی بر ویژگی‌های ذکرشده کاغذ روزنامه دارند. در نقطه مقابل، حدود نیمی از تغییرات متغیرهای ضخامت، حجیمی، طول پارگی MD، مقاومت به ترکیدن، مقاومت به عبور هوا، و ماتی کاغذ روزنامه توسط مدل PLS و متغیرهای برج ذخیره CMP کنترل می‌شوند. (ضریب تبیین آن‌ها حدود ۵۰ درصد به دست آمده است.) برای تشخیص هریک از متغیرهای تأثیرگذار برج بر ویژگی‌های کاغذ روزنامه و تعیین نوع اثر آن‌ها مبنی بر مستقیم یا معکوس بودن، باید به وزن‌های کلیه متغیرها برای هر فاکتور توجه کرد که توسط مدل محاسبه و گزارش می‌شود. نتایج وزن‌های محاسبه‌شده برای متغیرهای برج ذخیره CMP و ویژگی‌های کاغذ روزنامه برای هر ۴ بردار در شکل ۱ مشاهده می‌شود. زیاده‌بودن قدر مطلق وزن‌ها نشان‌دهنده تأثیر بیشتر هر متغیر بر فاکتور مورد نظر است. شکل ۲ ارتباط متغیرهای تأثیرگذار برج بر روی ویژگی‌های مختلف کاغذ روزنامه را به خوبی نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۱ و ۲، بردار مخفی اول (PLS ۱) شامل مهم‌ترین متغیرهای برج ذخیره CMP تأثیرگذار بر ۷ ویژگی کاغذ روزنامه است. درصد الیاف باقی‌مانده روی الک با مش ۴۸ به‌عنوان مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر این ۷ ویژگی در این بخش معرفی می‌شود. الیاف قرارگرفته در این محدوده اندازه، موجب افزایش مقاومت‌ها، کاهش ضخامت، حجیمی، و ماتی کاغذ روزنامه می‌شود. تأثیر این متغیر بیشتر بر بهبود اتصالات الیاف در کاغذ و در نتیجه افزایش مقاومت‌هاست. برودریک و همکاران (۱۹۹۶) در تحقیقی مشابه اولین بردار مخفی را در ارتباط نزدیک با کیفیت اتصالات شبکه

## رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)

### شناسایی و حذف نقاط پرت و معتبرسازی مدل

برازش مدل PLS بین ۱۶ متغیر برج ذخیره CMP به‌عنوان متغیرهای مستقل و ۱۷ متغیر ویژگی کاغذ روزنامه به‌عنوان متغیرهای وابسته انجام شد. برای شناسایی نقاط پرت، فاصله اقلیدسی<sup>۱</sup> هر نقطه (مشاهده) از متغیرهای مستقل و وابسته استاندارد شده تا مدل PLS محاسبه شد و مشاهداتی که فاصله اقلیدسی آن‌ها نسبت به میانگین فاصله‌ها ۱/۵ برابر بیشتر بود به‌عنوان داده‌های پرت از محاسبات حذف شدند.

نتایج معتبرسازی عرضی<sup>۲</sup> به روش جداسازی<sup>۳</sup> برای ۱۰ فاکتور اول محاسبه شد و جذر میانگین مجموع مربعات باقی‌مانده‌های پیش‌بینی‌شده (PRESS) برای فاکتور پنجم کمترین مقدار به‌دست آمد. بنابراین، انتخاب ۵ بردار مخفی برای برازش مدل PLS کمترین میزان خطا را به همراه خواهد داشت و انتخاب فاکتورهای بعد از آن موجب برازش بیش از اندازه می‌شود. با وجود این، نتایج حاصل از آزمون t بین فاکتورهای ۱ تا ۴ با فاکتور ۵ نشان داد که اختلاف فاکتورهای ۱، ۲، و ۳ با فاکتور ۵ در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است، اما فاکتور ۴ با فاکتور ۵ از نظر آماری هیچ اختلافی ندارد. بنابراین، برازش مدل PLS با محاسبه ۴ بردار مخفی انجام شد.

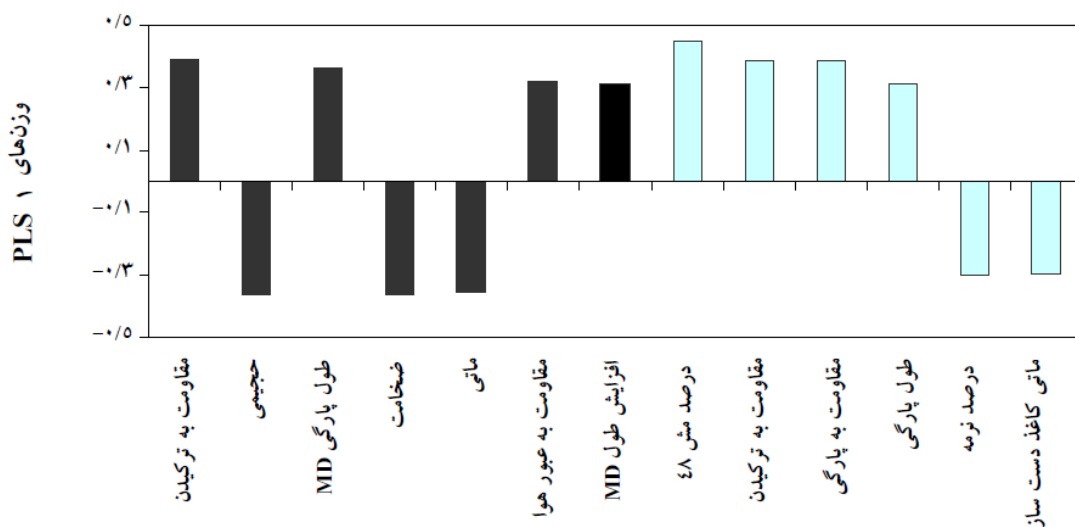
### برازش مدل نهایی PLS

پس از حذف نقاط پرت و معتبرسازی مدل، با استفاده از ۴ بردار مخفی به‌عنوان بهترین تعداد فاکتورها، مدل نهایی PLS برازش داده شد. درصد تغییرات تبیین‌شده توسط این مدل برای متغیرهای

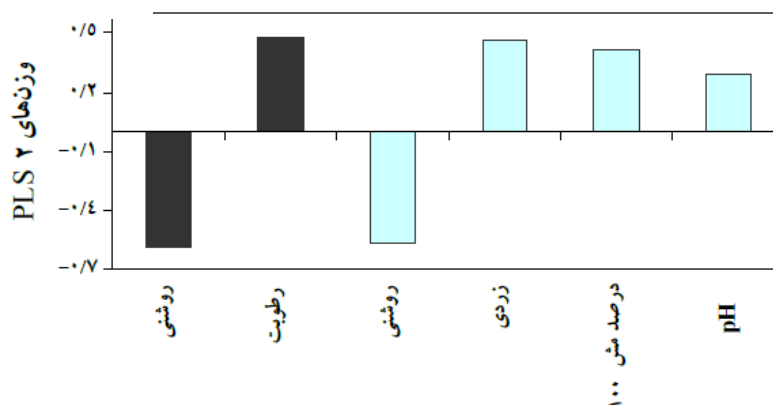
1. Euclidean Distance
2. Cross validation
3. Split-sample validation

کمتر می‌شود و بنابراین، مقاومت به ترکیدن، طول پارگی MD، و درصد افزایش طول MD کاغذ روزنامه یا کاغذ دست‌ساز تهیه‌شده از خمیر CMP کاهش می‌یابد. در عوض، با پرشدن فضاهای خالی کاغذ، سهم نور قابل عبور از کاغذ کم و بنابراین ماتی زیاد می‌شود. همچنین، زیادشدن درصد نرمة موجب خروج بیشتر این بخش الیاف در قسمت پایانه تر می‌شود و بنابراین تخلخل کاغذ نهایی افزایش و مقاومت به عبور هوا کاهش می‌یابد.

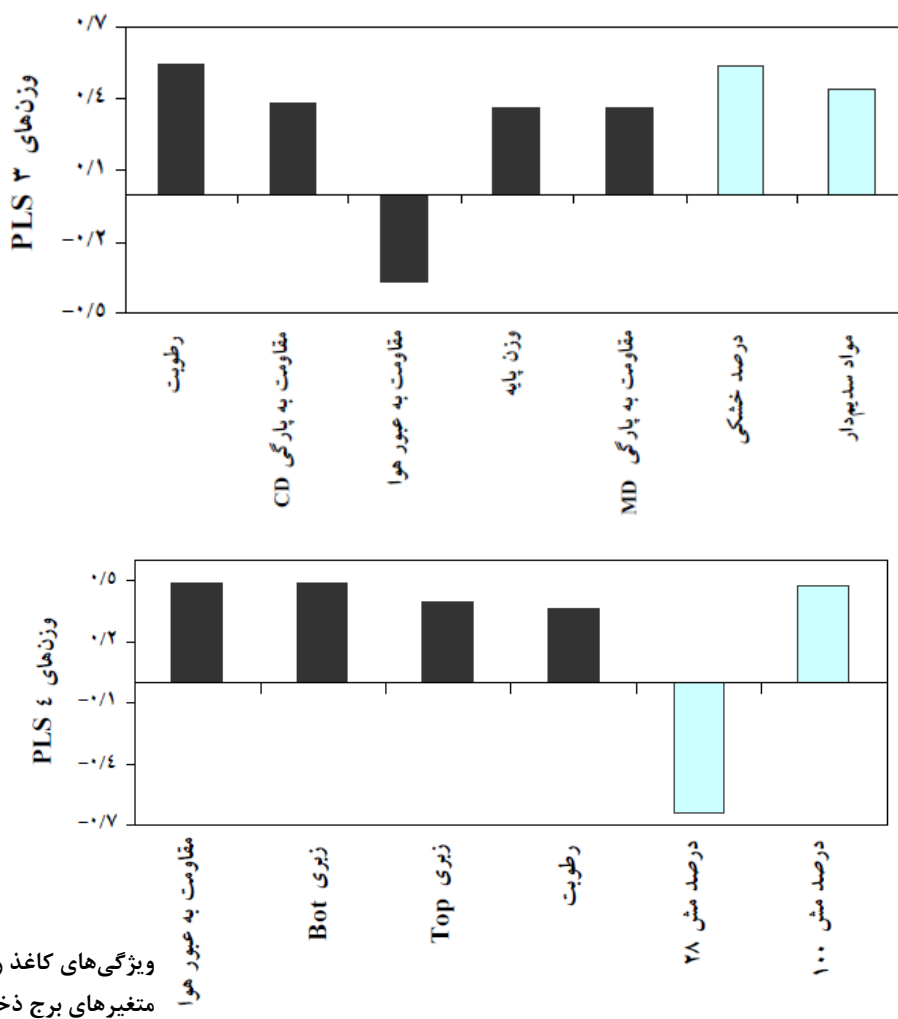
کاغذ معرفی می‌کنند [۱۲]. سایر متغیرهای برج ذخیره CMP که در این بردار مهم‌اند نیز خود تحت تأثیر متغیر درصد مش ۴۸ هستند. کنترل این متغیر برای دستیابی به مقدار مناسب از ۷ ویژگی کاغذ روزنامه بسیار حائز اهمیت است که این امر باید از روی متغیرهای قبل از برج صورت بگیرد. همچنین، تأثیر مستقیم و معکوس بین سایر متغیرهای ذکرشده در بردار مخفی اول با اطلاعات تئوری همخوانی دارد. مثلاً با زیادشدن درصد نرمة، سهم الیاف سالم و بلند



■ ویژگی‌های کاغذ روزنامه  
 ■ متغیرهای برج ذخیره CMP



شکل ۱. وزن‌های متغیرهای مهم ۴ فاکتور PL



ادامه شکل ۱. وزن‌های متغیرهای مهم ۴ فاکتور PL

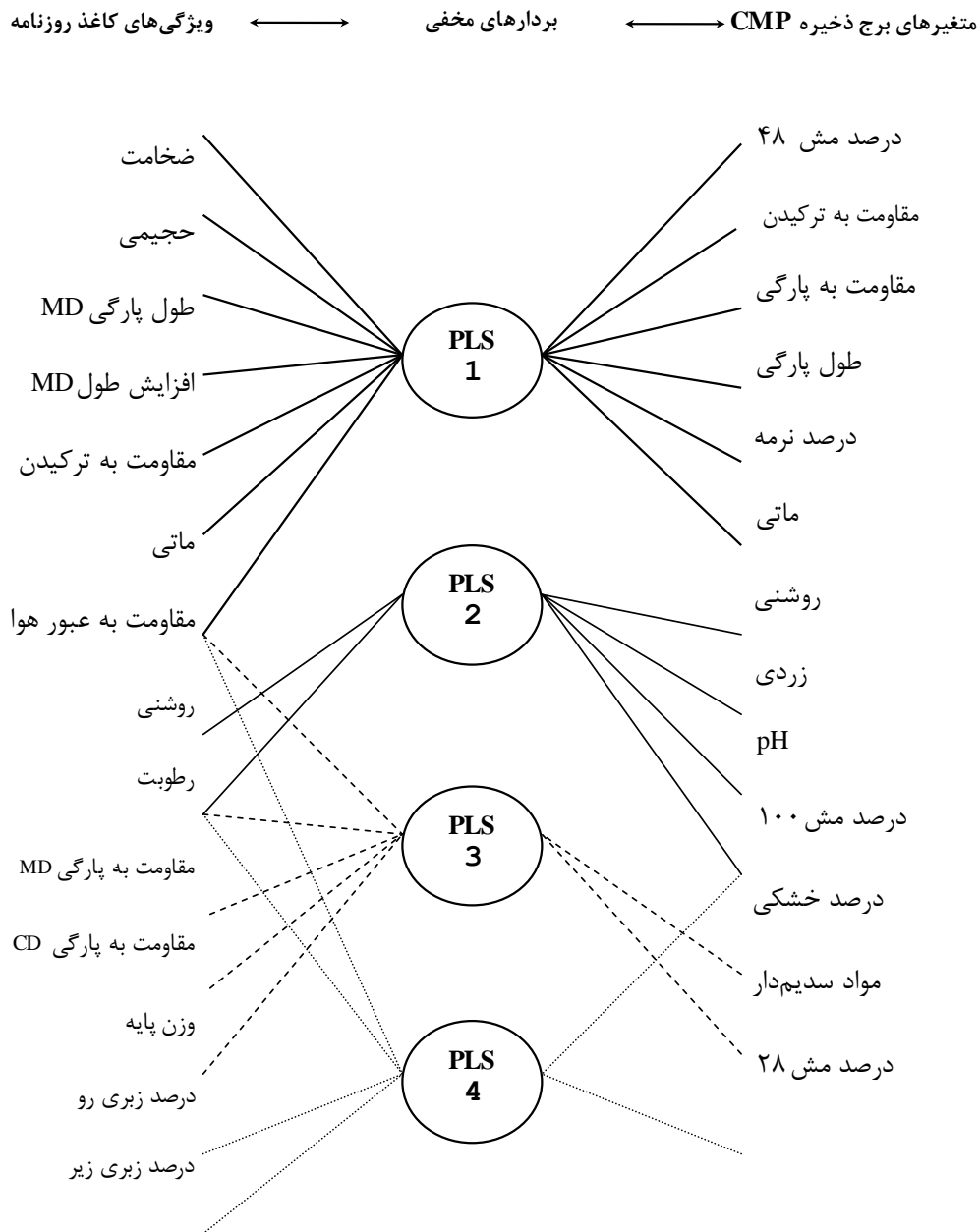
در تحقیقی مشابه از سوی اورتیز کوردوا (۲۰۰۶) نیز گزارش شده است [۱۴]. در بردار مخفی سوم (۳) PLS درصد خشکی خمیر موجود در برج CMP و میزان مواد سدیم‌دار بیشترین تأثیر مستقیم را بر رطوبت، مقاومت به پارگی MD و CD، و وزن پایه کاغذ روزنامه گذاشته‌اند. این دو متغیر تأثیر معکوس بر مقاومت به عبور هوای کاغذ روزنامه نشان دادند، اما مقاومت به عبور هوا بیشتر تحت تأثیر متغیرهای بردار مخفی اول قرار دارد. بردار مخفی چهارم (۴) PLS نشانگر تأثیر معکوس درصد مش ۲۸ بر مقاومت به عبور هوا، زبری رو و زیر، و رطوبت کاغذ روزنامه است؛ در حالی که درصد مش ۱۰۰ بر

پس از بردار مخفی اول، اهمیت بردارهای مخفی بعدی در تبیین ویژگی‌های کاغذ روزنامه به ترتیب کم می‌شود. از طرفی، تحلیل نوع تأثیر متغیرهای مهم در این بردارها بر یکدیگر به دلیل تأثیر کمتر آن‌ها و همچنین وجود روابط پیچیده و متقابل بین متغیرهای فرایندی متعدد مشکل‌تر است. در بردار مخفی دوم (۲) PLS از میان متغیرهای برج ذخیره CMP، متغیر روشنی کاغذ دست‌ساز مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر روشنی کاغذ روزنامه است و پس از آن زردی کاغذ دست‌ساز، درصد مش ۱۰۰، و pH خمیر کاغذ CMP با تأثیر معکوس بیشترین اثر را بر روشنی کاغذ روزنامه گذاشته‌اند. تأثیر pH بر روشنی کاغذ روزنامه



درصد مش ۱۰۰ و کاهش مش ۲۸ انرژی بیشتری برای خشک کردن کاغذ مورد نیاز است و با ثابت ماندن سایر شرایط رطوبت کاغذ نهایی افزایش می‌یابد.

این ویژگی‌ها تأثیر مستقیم دارد. الیاف قرارگرفته روی مش ۲۸ زبرتر و درشت‌تر از مش ۱۰۰ بوده و بنابراین زبری و تخلخل کاغذ افزایش و مقاومت به عبور هوا کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به بیشتر بودن ظرفیت نگهداری آب در واحد وزن برای الیاف ریزتر می‌توان نتیجه گرفت که با زیادشدن



شکل ۲. شبکه مدل PLS برای ارتباط متغیرهای تأثیرگذار برج ذخیره CMP بر ویژگی‌های کاغذ روزنامه

جدول ۳. ضرایب مدل رگرسیون PLUS به روش RRR برای پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های کاغذ روزنامه از روی متغیرهای انتخابی برج ذخیره CMP

متغیرهای برج ذخیره CMP (مقدار ثابت)	ویژگی‌های کاغذ روزنامه								ضریب تبیین تصحیح شده
	وزن	کشور	MD	MD	تیرگی	بوی	رنگ	رنگ	
Ph	۳۳/۹۷	۰/۶۶۶۵	۲/۲۶۱۱	۸۸۸/۸	۶۶/۸۸۸	۸/۰۷۸۱	۶۵/۰۳	۸۱/۸۶	-
درصد خشکی	۸۰۱۰/۱	۹/۰۲۰/۰	۸۸۶۸/۰	۷۸۳۰/۰	۳۳۶۵/۳-	۷۰۲۶/۱-	۷۶۵۸/۰-	۶۹۱۳/۰	۷/۸۱
بازده	۱۳۶۸/۰-	۱۵۰/۰-	۵۷۳۰/۰	۸۰۰/۰	۶۸۲۶/۰	۵۶۵۵/۰	۶۳۳۰/۰-	۳۳۳۰/۰-	۳/۷۱
درصد منس ۲۸	۳۶۰۳/۰	۵۶۰۰/۰	۷۸۶۰/۰-	۱۰۱۰/۰-	۸۸۳۸/۱-	۵۷۸۶/۰-	۷۸۰۰/۰	۳۸۸۰/۰	۶/۰۱
درصد منس ۴۸	۸۰۰۱/۰	۲۳۰۰/۰	۶۸۰۰/۰-	۳۱۰۰/۰-	۷۸۳۸/۰-	۵۹۱۳/۰-	۵۶۶۰/۰	۳۰۲۰/۰-	۸/۶
درصد منس ۱۰۰	۹۱۹۱/۰-	۳۹۰۰/۰-	۸۳۵۰/۰	۷۰۰۰/۰	۰۰۲۶/۰	۳۸۳۳/۰	۶۶۸۰/۰	۶۸۶۰/۰-	۵/۷۶
درصد نرمه	۷۵۰۱/۰	۳۲۰۰/۰	۱۸۰۰/۰-	۸۱۰۰/۰-	۶۰۳۸/۰-	۵۳۳۳/۰-	۷۶۰۱/۰	۶۶۳۰/۰-	۱/۰۳
طول پارگی کاغذ دست‌ساز	۷۱۹۰/۰	۲۰۰۲/۰	۶۰۱۰/۰-	۸۱۰۰/۰-	۵۰۶۸/۰-	۷۸۶۸/۰-	۵۵۶۰/۰	۳۳۱۰/۰-	۸/۸۸
مقاومت به پارگی کاغذ دست‌ساز	۵۰۱۰/۰-	۲۰۰۰/۰-	۳۲۰۰/۰	۳۰۰۰/۰	۵۳۳۰/۰	۱۸۱۰/۰	۵۰۰۰/۰	۱۳۰۰/۰-	۶/۶۳
مقاومت به ترکیدن کاغذ دست‌ساز	۱۰۰۵/۰-	۱۰۰۰/۰-	۵۳۱۰/۰	۲۰۰۰/۰	۷۱۳۸/۰	۰۲۶۰/۰	۷۵۱۰/۰	۸۸۰/۰-	۱/۸۳
روشنی کاغذ دست‌ساز	۱۶۶۰/۰	۱۰۰۰/۰	۶۱۳۰/۰	۶۵۰۰/۰	۳۸۳۳/۰	۲۰۶۳/۰-	۲۷۱۳/۰	۳۱۷۱/۰-	۰/۸۸
ماتی کاغذ دست‌ساز	۸۵۲۰/۰	۶۳۰۰/۰	۳۰۶۰/۰-	۶۷۰۰/۰-	۵۶۳۰/۱-	۶۷۱۳/۰-	۸۸۰/۰-	۱۶۶۰/۰	۶/۸۳
ضریب تبیین تصحیح شده	۸۷/۳	۸/۶۳	۳/۵۳	۷/۵۸	۵/۱۵	۰/۱۳	۳/۸۸	۳/۱۵	-

تبيين بردارهای مخفی داشتند و برای کم کردن ابعاد مدل حذف شدند. در پایان، مدل نهایی PLS به روش RRR برای پیش‌بینی ۸ متغیر ویژگی کاغذ روزنامه از روی ۱۲ متغیر برج ذخیره CMP برازش داده شد که نتایج ضرایب رگرسیون آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. تأثیر مستقیم و معکوس متغیرهای فرایندی بر ویژگی‌های کاغذ روزنامه از روی علامت ضرایب رگرسیون در جدول مشخص است. این تأثیرات مطابق با وزن‌های محاسبه و ارائه شده در شکل ۱ در مدل PLS قبلی است، اما این مدل با ضریب تبیین بیشتر پیش‌بینی بهتری را برای ۸ ویژگی کاغذ روزنامه انجام می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

صنایع چوب و کاغذ مازندران از بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین واحدهای تولیدی مهم در کشور ایران است که با مشکلات زیادی در زمینه نوسانات تولیدی مواجه است. از طرفی، حجم زیادی از اطلاعات فرایندی به‌طور شبانه‌روزی در واحدهای مختلف این مجتمع اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. از این رو، این تحقیق در راستای کنترل دقیق و پیشرفته بر اساس مدل PLS با استفاده از داده‌های واقعی در بخشی از کارخانه صورت گرفته است. مدل برازش داده شده ارتباط متغیرهای برج ذخیره CMP را با ویژگی‌های نهایی کاغذ روزنامه با بردارهای مخفی محاسبه شده یافت و پیش‌بینی کرد. تبیین بخشی از تغییرات هریک از ویژگی‌های کاغذ روزنامه، از روی متغیرهای مشخص شده برج ذخیره از میان انبوهی از متغیرها بسیار سودمند بود و امکان کنترل بهتر و دقیق‌تر را فراهم می‌آورد. مسلماً بقیه تغییرات توسط متغیرهای دیگری کنترل می‌شوند که شناسایی آن‌ها با تحقیقات تکمیلی ممکن است.

## برازش مدل PLS برای پیش‌بینی ویژگی‌های کاغذ روزنامه

مدل PLS طراحی شده برای تعیین متغیرهای فرایندی مؤثر بر ویژگی‌های کاغذ روزنامه، تعیین نوع اثر آن‌ها، و پیش‌بینی ویژگی‌های کاغذ استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی ویژگی‌های کاغذ روزنامه می‌توان از رتبه‌های عاملی PLS<sup>۱</sup> و برنامه نوشته شده در Matlab یا SAS استفاده کرد. اما برای سهولت در امر پیش‌بینی، بهتر است ابعاد مدل را کاهش داد و همچنین چون هدف پیش‌بینی متغیرهای وابسته یا ویژگی‌های کاغذ روزنامه است، از PLS به روش رگرسیون رتبه‌کاهش یافته (RRR)<sup>۲</sup> استفاده کرد. با استفاده از این روش بردارهای مخفی حاصله، تبیین‌کننده بیشترین واریانس متغیرهای وابسته خواهند بود. بدین سبب، ابتدا مدل PLS به روش RRR برازش داده شد. پس از حذف نقاط پرت و معتبرسازی، ضرایب تبیین متغیرهای وابسته مدل با ۶ بردار مخفی استخراج شد و متغیرهای وابسته‌ای که ضریب تبیین کمتر از ۳۰ داشتند شامل وزن پایه، طول پارگی CD، درصد افزایش طول CD، مقاومت به پارگی MD، مقاومت به پارگی CD، درصد زبری زیر، درصد زبری رو، و زردی کاغذ روزنامه، در محاسبات بعدی کنار گذاشته شدند. در مرحله بعد مدل PLS به روش RRR با ۱۶ متغیر مستقل و ۸ متغیر وابسته باقی مانده برازش داده شد که پس از حذف نقاط پرت و معتبرسازی، ضرایب تبیین متغیرهای مستقل مدل با ۳ بردار مخفی استخراج شد. با توجه به نتایج حاصله، متغیرهای مستقل درجه روانی، مواد سدیم‌دار، درصد شایو خمیر کاغذ، و زردی کاغذ دست‌ساز سهم کمتر از ۱۵ درصد در

1. Factor scores
2. Reduced rank regression

## References

- [1]. Mercangoz M., and Doyle, F.J. (2006). Model-based control in the pulp and paper industry. *Control Systems, IEEE*, 26(4): 30-39.
- [2]. Grage, H. (2004). A statistical analysis of data from the production line at the Munksund paper mill. Technical report, Lund Institute of Technology, Sweden.
- [3]. Schweiger, C.A., and Rudd, J.B. (1994). Prediction and control of paper machine using adaptive technologies in process modeling. *Tappi Journal*, 77, (11): 201-208.
- [4]. Kallioinen, M., Huuhilo, T., Reinikainen, S.P., Nuortila-Jokinen, J., and Mänttari, M. (2006). Examination of membrane performance with multivariate methods: A case study within a pulp and paper mill filtration application. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 84(1): 98-105.
- [5]. Bhardwaj N.K., Hoang, V., and Nguyen, K.L. (2007). Effect of refining on pulp surface charge accessible to polydadmac and FTIR characteristic bands of high yield kraft fibres. *Bioresource technology*, 98(4): 962-966.
- [6]. Lahtinen K., and Kuuipalo, J. (2008). Statistical prediction model for water vapour barrier of extrusion-coated paper. *Tappi Journal*, (9): 8-15.
- [7]. Suwannarangsee S., Bunternngsook, B., Arnthong, J., Paemanee, A., Thamchaipenet, A., Eurwilaichitr, L., and Champreda, V. (2012). Optimisation of synergistic biomass-degrading enzyme systems for efficient rice straw hydrolysis using an experimental mixture design. *Bioresource Technology*, (119): 252-261.
- [8]. Abdi, H. (2007). Partial Least Square Regression (PLS-Regression). *Encyclopedia of Measurement and Statistics*, Thousand Oaks, USA.
- [9]. Fridén, H., and Tano, K. (2005). Using PLS models with both controlled and uncontrolled X variables for "What if."prediction. Anonymous. 9th Scandinavian Symposium och Chemometrics, 2005 August 21-23, Reykjavik, Iceland (in press), 1-6.
- [10]. Bjorkstrom, A. (2007). Regression methods and their interconnections. Technical report, Stockholm University, Sweden.
- [11]. Broderick, G., Paris, J., Valade, J.L., and Wood, J. (1995). Applying latent vector analysis to pulp characterization. *Paperi ja Puu*, 77(6/7): 410-418.
- [12]. Broderick, G., Paris, J., Valade, J.L., and Wood, J., (1996). Linking the fiber characteristics and handsheet properties of a high-yield pulp. *Tappi Journal*, 79(1): 161-169.
- [13]. Nordstrom, F., Lindstrom, T., and Holst, J. (2005). Statistical models for on-line monitoring quality properties. Technical report, Lund Institute of technology.
- [14]. Ortiz-Cordova, M., Hagedorn, A., Orcotoma, J.A., and Baril, J. (2006). Analysis of paper strength variability in an integrated newsprint mill. *Pulp and Paper Canada*, October, 37-43.
- [15]. Winchell, P. (2006). Using multivariate data analysis for process trouble shooting. *Pan Pacific Conference*, 191-195.
- [16]. Mazandaran Wood and Paper Industries documents, Basic of design annex 2, 1995.
- [17]. Farshadfar, E. (2007). *Basis and Methods of Multivariate Statistics*. 2end Ed., Taghbostan Press, Razi University.
- [18]. Van der Voet, H. (1994). Comparing the Predictive Accuracy of Models Using a Simple Randomization Test. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, (25): 313-323.