Journal of Azzaytuna University (JAZU)
JAZU Homepage: https://azzujournal.azu.edu.ly
ISSN (Print):2523-1006, ISSN (Online): 3105-4420 DOI: 10.35778/g5jjxn66

استخدام نموذج البرمجة الخطية لتقليل التكلفة وتحسين جودة الانتاج بالمؤسسات الصناعية

عماد مختار المصراتي*[1]، المبروك محمد عبدالجليل[2]، عبدالباسط ميلود عبدالله[3]

[3،2،1]قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة، جامعة الزيتونة، ترهونة، ليبيا

imadmokhtar@yahoo.com[1]، mabroukabduljalil@gmail.com[2]، Abdulbasit.Meeloud@gmail.com[3]

المؤلف المرسل: (*)

تاريخ النشر : 30 يونيو 2026

الملخص : في هذه الدراسة تم استخدام البرمجة الخطية لتحسين مدخلات تصنيع المنتجات، حيث تم اختيار منتج الاسمنت كحالة دراسية. تواجه صناعة الإسمنت تحديًا مستمرًا يتمثل في الموازنة بين خفض تكاليف الإنتاج، التي يشكل فيها تكلفة المواد الخام جزءًا كبيرًامنها، وبين الجودة اللازمة للمنتج. حيث تم تطبيق نموذج البرمجة الخطية كأداة علمية لإيجاد المزيج الأمثل للمواد الخام الذي يحقق أقل تكلفة ممكنة مع ضمان الايفاء بجميع المتطلبات والحدود الفنية. لتحقيق هذا الهدف، تم بناء نموذج رياضي للبرمجة الخطية بطريقة (**Simplex Method**) باستخدام بيانات فعلية من مصنع أسمنت سوق الخميس امسيحل. وتم تنفيذ الحل باستخدام أداة **Excel Solver** نظرًا لقدرتها على التعامل مع النماذج الخطية متعددة المتغيرات والقيود وإيجاد الحل الأمثل بكفاءة. تمت الدراسة والتحليل لإنتاج دفعة قياسية تزن **100** طن. أظهرت النتائج نجاح النموذج في إيجاد حلول مثلى ومنخفضة التكلفة، فكان مزيجها الأمثل من المواد الخام يتكون من **82.448** طن من الحجر الجيري، **11.531** طن من الطين، **0.155** طن من خام الحديد، و**5.866** طن من الرمل، بتكلفة **767** دينارًا ليبيًا (**7.67** دينار للطن). وقد حقق الحل الامثل جميع المتطلبات الرئيسية. خلصت الدراسة إلى أن البرمجة الخطية ليست مجرد أداة لتحسين التكلفة، بل هي أداة تحليلية استراتيجية قادرة على تقييم جدوى الإنتاج وتحديد المخاطر التشغيلية المتعلقة بجودة المواد الخام قبل البدء في عملية الإنتاج. قدمت الدراسة أساسًا كميًا لإدارة المصنع لاتخاذ قرارات أكثر دقة وموثوقية في عمليات الإنتاج وإدارة المشتريات، أثبت البحث أن نموذج البرمجة الخطية يعمل كأداة مزدوجة الفائدة: فهو أداة تحسين (**Optimization**) لخفض التكاليف، وأداة تشخيص (**Diagnostic**) لتحديد القيود التشغيلية والإنتاجية.

الكلمات المفتاحية: البرمجة بالخطية، تحسين الانتاج، تقليل التكلفة، منتج الاسمنت

Abstract :In this study, linear programming was used to optimize the inputs for product manufacturing, cement production was chosen as a case study. The cement industry faces a continuous challenge of balancing the reduction of production costs, where the cost of raw materials constitutes a significant portion of these costs, with the necessary quality of the product. The linear programming model was applied as a scientific tool to find the optimal raw material mix that achieves the lowest possible cost while ensuring compliance with all technical requirements and limitations. To achieve this objective, a mathematical model for linear programming was built using the Simplex Method with actual data from the Souk El Khemis Msehel cement plant. The solution was implemented using Excel Solver due to its ability to handle multivariable linear models and constraints. The study and analysis were conducted for the production of a standard batch weighing 100 tons. The results demonstrated the model's success in finding optimal and low-cost solutions. The optimal raw material mix consisted of 82,448 tons of limestone, 11,531 tons of clay, 0.155 tons of iron ore, and 5,866 tons of sand, at a cost of 767 Libyan dinars (7.67 dinars per ton). This optimal solution met all the key requirements. The study concluded that linear programming is not only a cost optimization tool, but a strategic analytical tool capable

 This is an open access article under the CC BY-SA license.

of assessing production feasibility and identifying operational risks related to raw material quality before the production process begins. The study provided a quantitative basis for factory management to make more accurate and reliable decisions in production processes and procurement management. The research demonstrated that the linear programming model serves a dual purpose: it is an optimization tool for reducing costs and a diagnostic tool for identifying operational and production constraints.
Keywords: Linear programming, production optimization, cost reduction, cement product

1. المقدمة

تعتبر صناعة الإسمنت إحدى أضخم الصناعات الثقيلة على مستوى العالم، وتشكل أحد الركائز الأساسية في قطاع البناء والبنية التحتية، حيث يوفر الإسمنت المادة الرابطة الأساسية اللازمة لتشييد البنية التحتية الحيوية من مساكن ومنشآت صناعية وجسور وطرق وسدود. الإسمنت البورتلاندي (Portland Cement) هو النوع الأكثر شيوعاً في تطبيقات البناء والتشييد العامة، حيث يمثل النسبة الأكبر من الإنتاج والاستهلاك العالمي.

يُعد تحسين مزيج المواد الخام محور هذه الدراسة، هذه الصناعة الحيوية تتطلب تحسيناً مستمراً في الكفاءة والفعالية. تمر عملية إنتاج الإسمنت البورتلاندي العادي بسلسلة من المراحل الهندسية، والتي تتطلب إدارة دقيقة للعمليات الميكانيكية والحرارية والكيميائية. تبدأ هذه المراحل من المحجر بعمليات استخلاص المواد الخام الأولية مثل الحجر الجيري، الطين خام الحديد، والرمل. يتم نقل هذه المواد وتكسيرها وطحنها لتقليل حجمها، تمهيداً لمرحلة مزج المواد الخام، قبل الدخول إلى المعالجة الحرارية بالافران. الدقة في هذه المرحلة حاسمة، إن التحدي الهندسي والتشغيلي في هذه المرحلة يكمن في ضرورة تحقيق تركيب كيميائي مستهدف ودقيق لخلطة المواد الخام ليضمن إنتاج اسمنت بورتلاندي بالمواصفات المطلوبة (التي تُقاس بعدد من المعاملات الكيميائية والتي تقع ضمن نطاقات قياسية محددة). في الوقت ذاته تسعى المصانع جاهدة لتقليل التكلفة الإجمالية للمواد الخام التي تمثل جزءاً كبيراً من تكلفة الإنتاج. إن تعقيد هذه المشكلة، التي تتضمن التعامل مع عدة أنواع من المواد الخام وتحقيق تركيب كيميائي ضمن نطاقات محددة مع تقليل التكلفة، يجعل من الصعب حلها بكفاءة باستخدام الطرق التقليدية. هنا تبرز الحاجة لمنهجية تحليلية وكمية منظمة قادرة على التعامل مع هذا النوع من المشاكل المعقدة متعددة المتغيرات والقيود. تُعد البرمجة الخطية (Linear Programming – LP) أداة رياضية قوية وراسخة في مجال البحث العملياتي، مصممة خصيصاً لحل مشاكل التحسين التي يمكن صياغتها كنموذج رياضي يتكون من دالة هدف خطية (تقليل التكلفة) تخضع لمجموعة من القيود الخطية (متطلبات التركيب الكيميائي ونطاقات توفر المواد). حيث يمكن التعبير عن العلاقات بين كميات المواد الخام والتركيب الكيميائي النهائي والتكلفة باستخدام علاقات خطية، يجعلها منهجية ناجعة لتحسين هذه العملية. يهدف هذا البحث إلى استكشاف وتطبيق هذه المنهجية الكمية لتقديم حل أمثل لمشكلة تحديد مزيج المواد الخام في سعي نحو تعزيز الكفاءة التشغيلية والاقتصادية لإنتاج الاسمنت.

2. أهمية البحث (Significance)

تكمن أهمية هذا البحث في كونه يقدم نموذجًا تحليليًا مبنيًا على أسس رياضية لدعم قرارات تخطيط المزيج الخام في صناعة الإسمنت. يتيح النموذج المقترح لمصنع سوق الخميس امسيحل تقدير الكميات المثلى للمواد الخام المستخدمة وتقليل التكاليف الإجمالية للإنتاج دون التأثير على الجودة.

كما يمكن للنموذج أن يكون أداة مساعدة للإدارة في تقييم بدائل المواد، وتحسين قرارات الشراء، والحد من الهدر في الموارد، ما يعزز الكفاءة التشغيلية ويقلل من المخاطر الناتجة عن التقدير اليدوي أو القرارات غير المبنية على بيانات دقيقة.

3. اهم المواد الخام المستخدمة في صناعة الإسمنت البورتلاندي

1.3 المواد الخام الأساسية (Basic Raw Material):

تشكل المواد الكلسية (Calcareous materials) والمواد الطينية (Argillaceous materials) المكونات الرئيسية في مزيج الخليط الفرن للإنتاج.

- المواد الجيرية: تُعتبر هذه المواد المصدر الرئيسي لأكسيد الكالسيوم(CaO). يشمل أبرزها الحجر الجيري. يمثل المادة الأساسية في هذه الصناعة، حيث يمكن أن تصل نسبة استهلاكه إلى ما يقرب من 75-80% من مزيج المواد الخام [1].
- المواد الطينية : هذه المواد هي المصدر الرئيسي لثاني أكسيد السيليكون (SiO2) وأكسيد الألومنيوم(Al2O3) ، بالإضافة إلى جزء من أكسيد الحديد(Fe2O3) ، تشكل المادة الطينية حوالي 20-25% من المواد الأولية [1] .[2].

2.3 المواد الخام المصححة (Additive/Corrective Materials) :

قد لا توفر المواد الخام الأساسية دائمًا النسب المثالية من الأكاسيد المطلوبة لإنتاج نوع معين من الكلنكر، لذا يتم إضافة مواد مصححة لضبط التركيب الكيميائي للخلطة.

- الرمل (Sand Stone) أو مصادر السيليكا: يُستخدم الرمل كمادة تصحيحية لرفع محتوى ثاني أكسيد السيليكون (SiO2) في الوجبة الخام.
- خام الحديد (Iron Ore): يُعتبر خام الحديد مصدراً أساسياً لأكسيد الحديد (Fe2O3) وأيضًا SiO2 وهو ضروري في صناعة معظم أنواع الإسمنت.

3.3 الأكاسيد الرئيسية والمكونات الثانوية والشوائب

ينتج عن تفكك المواد الخام الأولية أربعة أكاسيد رئيسية تُشكل حوالي 95% من كتلة الإسمنت، وهي: أكسيد الكالسيوم(CaO) ، وثاني أكسيد السيليكون(SiO2) ، وأكسيد الألومنيوم(Al2O3) ، وأكسيد الحديد(Fe2O3)[1] .

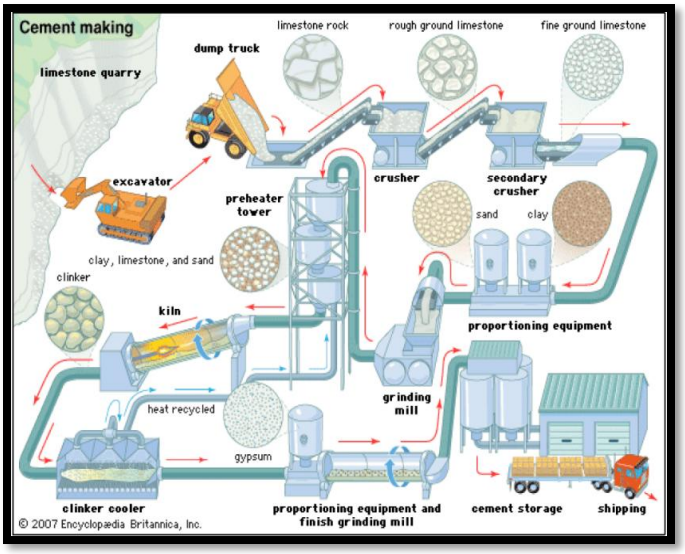
جدول 1: التركيب الكيميائي لاهم مكونات الإسمنت البورتلاندي

المركب	النسبة المئوية
CaO	% 67 - 58
SiO2	% 26 - 16
Al2O3	% 8 - 4
Fe2O3	% 5 - 2
MgO	% 5 - 1

4. عملية تصنيع الإسمنت:

بصفة عامة، تتضمن عملية إنتاج الإسمنت البورتلاندي عدة مراحل متتابعة، تبدأ باستخلاص المواد الخام الأولية المناسبة، تليها عمليات المعالجة الميكانيكية من تكسير وطحن. يتم بعد ذلك مزج هذه المواد بنسب محددة ودقيقة لتشكيل الوجبة الخام المتجانسة. وتُجرى هذه الخطوات وفقًا لعدة طرق إنتاج معروفة كما هو موضح بالشكل1. تخضع الوجبة الخام بعد ذلك لعملية حرق في أفران دوارة عند درجات حرارة مرتفعة جدًا، تصل إلى حوالي°C 1450، مما يؤدي إلى تفاعلها وتكوين حبيبات صلبة تُعرف بالكلنكر(Clinker). يتم تبريد الكلنكر الناتج، ومن ثم يُطحن طحنًا ناعمًا مع إضافة نسبة قليلة من

الجبس (حوالي 3–5%) للحصول على المنتج النهائي وهو مسحوق الإسمنت البورتلاندي. وتُجرى التحاليل الكيميائية بشكل متكرر لجميع المواد الخام والكلنكر لضمان إنتاج إسمنت عالي الجودة [1].



شكل 1:عملية تصنيع الإسمنت البورتلاندي

ويمكن تحسين كفاءة الطاقة التشغيلية هذه العملية من خلال تطبيق تكنولوجيا استرداد الحرارة المهدرة الناتجة من مبرد الكلنكر، حيث تعتبر تكنولوجيا استرداد الحرارة المهدرة Waste Heat Recovery-WHR أحد الحلول الفاعلة في صناعة الإسمنت لأنها طاقة حرارية مهدرة من مبرد الكلنكر، يمكن الاستفادة منها في توليد الطاقة الكهربائية. حيث تسهم في تحسين الكفاءة التشغيلية وخفض تكاليف الإنتاج والحد من الانبعاثات الكربونية.

5. بحوث العمليات والبرمجة الرياضية

نشأت بحوث العمليات كتخصص علمي مستقل خلال الحرب العالمية الثانية، حين واجهت قوات الحلفاء تحديات معقدة في مجالات التخطيط، الإمداد، وتوزيع الموارد في سياق العمليات العسكرية واسعة النطاق. وللتغلب على هذه المشكلات، أنشأت كل من بريطانيا والولايات المتحدة فرقًا بحثية متعددة التخصصات ضمّت علماء في مجالات الرياضيات، الفيزياء، الإحصاء، والهندسة، بهدف توظيف المنهج العلمي لتحليل وتحسين كفاءة العمليات العسكرية.

وقد أسفرت هذه الجهود عن تحسينات حاسمة، أبرزها الاستخدام الفعّال للرادار في معركة بريطانيا، وتحسين إدارة القوافل البحرية في معركة الأطلسي، مما ساهم في تحقيق تفوق استراتيجي لقوات الحلفاء. ولأول مرة، جرى توظيف النماذج الرياضية والنُهج الكمية في صنع القرار العسكري بشكل منهجي ومنظم.

1.5 النمذجة الرياضية ودورها في اتخاذ القرارات :

تُعد النمذجة الرياضية من الأدوات الأساسية في علم بحوث العمليات، وهي تعني تمثيل نظام أو مشكلة واقعية باستخدام عناصر رياضية مثل المتغيرات، الدوال، المعادلات، والمتباينات، وذلك بهدف توصيف العلاقات بين العوامل المؤثرة في الظاهرة المدروسة. وتسعى النمذجة إلى تجريد المشكلة من تعقيداتها الثانوية والتركيز على العناصر الأساسية التي تُؤثّر فعليًا في النتائج، مما يُمكّن من فهم بنية النظام بصورة أوضح.

تُوفّر النماذج الرياضية وسيلة منهجية لصياغة المشكلات بشكل يمكن تحليله رياضيًا، ما يسمح لصانع القرار بإجراء دراسات ماذا لو (What-if analysis)، وتقييم سيناريوهات متعددة في ضوء الموارد المتاحة والقيود المفروضة. ومن خلال هذه النماذج، يمكن مقارنة البدائل وتحديد الخيار الأمثل استنادًا إلى معيار محدد مثل تقليل التكلفة، تعظيم الربح، أو تحقيق التوازن بين عدة أهداف متعارضة.

تكمن قوة النمذجة الرياضية في أنها **تحوّل عملية اتخاذ القرار من مجرد الاعتماد على الحدس أو التجربة الشخصية إلى عملية عقلانية ومنظمة، قائمة على بيانات كمية وتحليلات موضوعية**. هذا يجعلها أداة فعّالة، خاصة في البيئات الصناعية والاقتصادية المعقدة التي تتطلب قرارات دقيقة وموثوقة. كما تتيح النمذجة تقييم أثر التغيرات في المدخلات أو الظروف المحيطة على النتائج، مما يعزز من قدرة المؤسسات على التكيّف مع المتغيرات وتقليل المخاطر.

بالتالي، فإن النمذجة الرياضية لا تُستخدم فقط كوسيلة لحل المشكلات، بل أيضًا كإطار عام لفهم الأنظمة، والتخطيط الاستراتيجي، ودعم صُـــنع القرار في مختلف المجالات، ســـواء في الإنتاج، أو النقل، أو إدارة الموارد، أو غيرها من القطاعات التي تتســـم بالتعقيد والديناميكية[3] ، [4].

2.5 البرمجة الخطية(Linear Programming) :

تُعد البرمجة الخطية من أهم أدوات بحوث العمليات، وتُستخدم لتحسين استغلال الموارد عبر نمذجة المشكلات الواقعية بدوال هدف وقيود. وتكمن أهميتها في قدرتها على تقديم حلول كمية دقيقة تدعم اتخاذ القرار، خاصة في البيئات الصناعية المعقدة.

في صناعة الإسمنت، يمثل تحديد التوليفة المثلى من المواد الخام (مثل الحجر الجيري، الطفلة، الرمل، وخام الحديد) تحديًا فنيًا واقتصاديًا، نظرًا لاختلاف تركيبتها الكيميائية وتكلفتها. ويســـعى المهندس الصـــناعي إلى تحقيق توازن بين تكلفة المواد وجودة المنتج، من خلال ضمان توافق نسب الأكاسيد الأساسية(CaO ، SiO2، Al2O3، Fe2O3)مع المواصفات المطلوبة لإنتاج كلنكر عالي الجودة. توفر البرمجة الخطية وســـيلة فعالة لاختيار التركيبة المثلى التي تحقق أقل تكلفة ممكنة دون الإخلال بالجودة، مع إمكانية تحليل سيناريوهات مختلفة والتفاعل مع تغيّر الأسعار أو توفر المواد، مما يجعلها أداة حيوية في تحسين الأداء الصناعي واتخاذ قرارات قائمة على البيانات.

3.5 المكونات الأساسية لنموذج البرمجة الخطية:

يتكون أي نموذج برمجة خطية من ثلاثة عناصر أساسية:

ا. متغيرات القرار(Decision Variables) :

تمثل متغيرات القرار الكميات المجهولة التي يسعى النموذج لتحديد قيمها المثلى من خلال عملية التحسين. تمثل هذه المتغيرات القرارات التي يجب اتخاذها لتحقيق الهدف المنشود ضمن القيود المفروضة .

في هذا السياق، ستكون متغيرات القرار هي كمية كل نوع من المواد الخام المتاحة (بالطن أو بالكيلوجرام) التي سيتم إدخالها في عملية الخلط لتكوين وجبة الفرن(Raw Meal). التي يُرمز لها عادةً بـ Xj حيث j=1,2,…,n، و n هو عدد متغيرات القرار (أي عدد أنواع المواد الخام المختلفة المتاحة).

ب. دالة الهدف(Objective Function) :

تمثل دالة الهدف العلاقة الرياضية التي تعكس الهدف المطلوب تحقيقه من النموذج، سواء كان ذلك **تعظيمًا** (مثل زيادة الإنتاج أو الربح) أو **تقليلاً** (مثل خفض التكلفة أو الهدر). في نموذج خلط المواد الخام في سياق هذا البحث، الهدف هو تقليل التكلفة الإجمالية للمواد الداخلة في إنتاج الكلنكر.

ج. القيود(Constraints) :

تمثل القيود في نموذج البرمجة الخطية مجموعة من المعادلات أو المتباينات الخطية التي تعبّر عن الحدود التي يجب ألا يتجاوزها الحل، سواء كانت فنية، كيميائية، أو تشغيلية.

هذه القيود تحدد منطقة الحلول الممكنة(Feasible Region) ، وهي المنطقة التي يمكن ضمنها البحث عن الحل الأمثل لدالة الهدف.

أنواع القيود المستخدمة في هذا البحث:

ا. قيود التركيب الكيميائي (Chemical Composition Constraints):

يُعتمد في هذا النموذج على فرضية أن كل مادة خام تساهم بنسبة معينة من الأكاسيد الكيميائية الأساسية (CaO، SiO2، Al2O3، Fe2O3، إلخ) في الخليط النهائي (وجبة الفرن). ويتم فرض قيود مباشرة على مجموع نسب كل أكسيد ناتج عن مساهمات جميع المواد الخام، بحيث تقع هذه النسب ضمن حدود مقبولة مسبقًا بناءً على متطلبات الجودة للكلنكر.

الصيغة العامة لهذا النوع من القيود [5]:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}X_j \geq b_i \quad \text{أو} \quad \sum_{j=1}^{n} a_{ij}X_j \leq b_i \qquad (1)$$

حيث:

- a_{ij}: نسبة الأكسيد الكيميائية i في المادة الخام j.
- X_j: كمية المادة الخام j المستخدمة.
- bi: الحد المقبول لنسبة الأكسيد i في المزيج الكلي.

ب. قيود الكمية الإجمالية

يفرض هذا القيد أن مجموع كميات المواد الخام المستخدمة يجب أن يساوي كمية محددة مطلوبة لتكوين وجبة الفرن(Raw Meal) . الصيغة [5]:

$$\sum_{j=1}^{n} X_j = \text{الكمية الإجمالية المطلوبة للخليط} \qquad (2)$$

ج. قيود توفر المواد الخام(Raw Material Availability Constraints) :

قد تكون هناك قيود على الحد الأقصى (أو الأدنى) لكمية مادة خام معينة، بناءً على توفرها الفعلي أو المحدودية في المورد أو القيود التشغيلية للمصنع. هذا القيد ينص على [5]:

$X_j \leq j$ الحد الأقصى المسموح به من المادة الخام

$$X_j \geq j \quad \text{الحد الأدنى المسموح به من المادة الخام} \qquad (3)$$

د. قيود عدم السلبية (Non-negativity Constraints) :

هي قيود أساسية تفرض أن جميع متغيرات القرار يجب أن تكون موجبة أو صفرًا، ولا يُسمح باستخدام كميات سالبة من المواد الخام .وتكون **الصيغة كما يلي** [5]:

$$X_j \geq 0 \qquad j = 1, 2, \dots \dots, n \qquad (4)$$

6. حل نماذج البرمجة الخطية باستخدام خوارزمية السمبلكس (Simplex Algorithm)

بعد صياغة نموذج البرمجة الخطية وتحديد دالة الهدف والقيود المرتبطة بها، تأتي الخطوة التالية المتمثلة في إيجاد الحل الأمثل، أي مجموعة القيم التي تحقق جميع القيود وتنتج أفضل قيمة ممكنة لدالة الهدف، سواء كان الهدف هو التعظيم أو التصغير. وتوجد عدة طرق لحل نماذج البرمجة الخطية تختلف بحسب عدد المتغيرات وتعقيد النموذج من أبرزها [5]:

تُعد خوارزمية السمبلكس من أكثر الطرق انتشارًا وكفاءةً في حل نماذج البرمجة الخطية التي تتضمن أكثر من متغيرين. وهي تعتمد على أسلوب جبري تكراري يُحسّن الحل في كل خطوة حتى الوصول إلى الحل الأمثل.

وقد طُوّرت هذه الخوارزمية على يد جورج دانتزغ عام 1947، وأصبحت منذ ذلك الحين الأداة المعيارية لحل مشكلات البرمجة الخطية في معظم البرمجيات الرياضية، وتتضمن الخوارزمية المراحل التالية:

التهيئة(Initialization)

في البداية، يتم تحويل جميع القيود إلى **معادلات مساواة** بإضافة متغيرات إضافية (مثل المتغيرات المساعدة والمتغيرات الفائضة) للحصول على ما يُعرف بـ **الحل القاعدي الابتدائي** (Basic Feasible Solution)، وهو نقطة بداية للخوارزمية يُفترض أنها تحقق جميع القيود.

اختبار الأمثلية (Optimality Test)

بعد الحصول على حل ابتدائي، يتم التحقق مما إذا كان هذا الحل هو الأفضل وفقًا لنوع المسألة:

- **في حالة التعظيم:(Maximization)**

يكون الحل الحالي أمثلًا إذا كانت جميع معاملات المتغيرات غير الأساسية في صف دالة الهدف(أي صفّ Z) سالبة أو تساوي صفرًا. إذ يشير ذلك إلى عدم وجود اتجاه يمكن من خلاله زيادة قيمة دالة الهدف.

- **في حالة التقليل:(Minimization)**

يكون الحل الحالي **أمثلًا** إذا كانت **جميع معاملات المتغيرات غير الأساسية** في صف دالة الهدف **موجبة أو تساوي صفرًا**. وهذا يعني أن أي تحرك إضافي سيزيد من قيمة دالة الهدف، مما يُخالف هدف التقليل.

الدورة التكرارية(Iteration)

إذا لم يتحقق شرط الأمثلية، تبدأ دورة تحسين جديدة تتضمن:

- **تحديد المتغير الداخل إلى القاعدة(Entering Variable)** :
  - **في حالة التعظيم** :يُختار المتغير ذو **أكبر معامل موجب** في صف دالة الهدف، لأنه سيُسهم بأكبر قدر في زيادة قيمة الهدف.
  - **في حالة التقليل** :يُختار المتغير ذو **أكبر معامل سالب** في صف دالة الهدف، لأنه سيُسهم بأكبر قدر في تقليل قيمة الهدف.
- **تحديد المتغير الخارج من القاعدة(Leaving Variable)** :

يُستخدم اختبار المعدل الأدنى(Minimum Ratio Test) ، حيث يُحسب ناتج قسمة قيم العمود الأيمن على القيم الموجبة في عمود المتغير الداخل، ويتم اختيار الصف الذي يُعطي أصغر نسبة. هذا الاختيار يضمن بقاء الحل ضمن الحدود الممكنة (Feasible Region).

- **تحديث الجدول(Pivoting)** :

تُجرى عمليات صفية أولية (Row Operations) على الجدول لتحقيق الانتقال إلى حل جديد، حيث يُستبدل المتغير الخارج بالمتغير الداخل في القاعدة.

التكرار(Repetition)

تُعاد الخطوات من اختبار الأمثلية ثم تحسين الحل، حتى يتم الوصول إلى الحالة التي يتحقق فيها شرط الأمثلية النهائي، ويكون الحل الحالي هو الأفضل الممكن وفقًا لنوع المسألة.

7. المنهجية والادوات

تم في هذا البحث تحويل المشكلة البحثية من إطارها النظري إلى نموذج رياضي تطبيقي. وتم الاعتماد على البيانات الفعلية التي تم جمعها من **مصنع سوق الخميس امسيحل للإسمنت** كحالة دراسية لبناء نموذج برمجة خطية يهدف إلى تحسين مزيج المواد الخام. تم تحديد عينة تركيبة كيميائية محتملة للمواد التي يتعامل معها المصنع. التي توصفً دراسة الحالة (يصف البيانات المستخدمة بعد معالجتها)، ثم ينتقل إلى الخطوات العملية لبناء النموذج: تحديد متغيراته، وصياغة دالة الهدف، وبناء القيود استنادًا إلى البيانات الفنية المتاحة. وأخيرًا، استخدام اداة لحل النموذج، كما تم التحقق من صحة نتائجه.

منهجية البحث Research Approach) :

لتحقيق أهداف الدراسة، تم اتباع المنهجيات التالية:

- **المنهج الوصفي التحليلي** :لوصف وتحليل البيانات الفنية من المصنع.

- **منهج دراسة الحالة** :حيث يمثل مصنع سوق الخميس للإسمنت حالة دراسية واقعية.
- **المنهج الكمي** :وهو جوهر البحث، ويتمثل في استخدام أسلوب البرمجة الخطية.

بيانات النموذج وإعدادها:

تمثل البيانات التي تم جمعها من المصنع حجر الأساس لبناء النموذج. ، يتم معالجة البيانات لتكون صالحة للاستخدام في نموذج البرمجة الخطية.

ا. المواد الخام ومتغيرات القرار:

بناءً على جمع البيانات الموضحة فيما يلي، يتكون المزيج من أربع مواد خام. هذه المواد ستمثل **متغيرات القرار Decision Variables**) في نموذجنا الرياضي، وهي الكميات التي نسعى لتحديدها:

- X1: كمية **الحجر الجيري** المستخدمة (بالطن).
- X2: كمية **الطين (الطفلة)** المستخدمة (بالطن).
- X3: كمية **خام الحديد** المستخدمة (بالطن).
- X4: كمية **الرمل** المستخدمة (بالطن).

ب. معالجة بيانات التركيب الكيميائي:

البيانات الكيميائية المسجلة معطاة كنطاقات ("لا يقل عن"، "لا يزيد عن"،"ما بين"). نماذج البرمجة الخطية تتطلب معاملات رقمية ثابتة ومحددة لتمثيل التركيب الكيميائي لكل مادة. لذلك، ولغرض بناء النموذج في هذه الدراسة، تم اعتماد قيم ضمن هذه النطاقات لبناء النموذج.

جدول 2: التركيب الكيميائي لخام الاسمنت

اسم المادة	الرمز	CaO %	SiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MgO %	SO3 %
الحجر الجيري	X1	50.5	4	2	1.5	1.5	0.4
الطين(الطفلة)	X2	10	48	20	4	6	1.4
خام الحديد	X3	5	3	10	66	0.9	0.3
الرمل	X4	0	88	0.5	0	0	0

8. تكاليف المواد الخام

تمثل تكاليف المواد الخام، كما وردت في استمارة جمع البيانات من المصنع المعاملات الأساسية لدالة الهدف. يوضح الجدول التالي هذه التكاليف.

جدول 3: تكلفة المواد الخام

اسم المادة	الرمز	التكلفة (دينار ليبي / طن)	الرمز
الحجر الجيري	X1	8.1	C1
الطين (الطفلة)	X2	5.5	C2
خام الحديد	X3	51	C3
الرمل	X4	4.82	C4

9. بناء نموذج البرمجة الخطية(LP Model Formulation)

بناءً على البيانات المجهزة، سيتم تطبيق النموذج الرياضي علىها، سيتم حل النموذج لإنتاج دفعة قياسية تزن 100طن.

9 . 1 صياغة دالة الهدف(Objective Function)

تهدف دالة الهدف في هذا النموذج إلى **تقليل التكلفة الإجمالية** للمواد الخام الداخلة في إنتاج الكلنكر، وذلك بالاعتماد على بيانات التكاليف المذكورة في الاستمارة. ويُعد **خفض التكلفة** هو الهدف الأساسي الذي يسعى النموذج الرياضي إلى تحقيقه. وتُصاغ دالة الهدف على النحو التالي:

$$\boldsymbol{Minimize\ Z = 8.1X_1 + 5.5X_2 + 51X_3 + 4.82X_4} \qquad (5)$$

حيث Z هي التكلفة الإجمالية بالدينار الليبي.

9 . 2 صياغة القيود(Constraints)

ا. قيد الكمية الإجمالية(Total Quantity Constraint) :

يجب أن يكون مجموع كميات المواد الخام مساويًا للكمية المستهدفة 100 طن .

$$\boldsymbol{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 100} \qquad (6)$$

ب. قيود التركيب الكيميائي(Chemical Composition Constraints) :

تضمن هذه القيود أن التركيب الكيميائي للخليط النهائي يتوافق مع المواصفات المستهدفة، والتي تم تحديدها في استمارة جمع البيانات على النحو التالي:

- **أكسيد الكالسيوم (CaO)**: من 39% إلى 43%
- **ثاني أكسيد السيليكون (SiO2)**: من 12% إلى 14%

- **أكسيد الألومنيوم (Al2O3)**: من 2% إلى 4%
- **أكسيد الحديد (Fe2O3)**: من 1.8% إلى 2.5%
- **أكسيد المغنيسيوم (MgO)**: من 1% إلى 2%
- **ثالث أكسيد الكبريت (SO3)**: من 0.1% إلى 0.5%

تتم صياغة هذه المتطلبات رياضيًا بضرب نسبة كل أكسيد في المادة الخام (من الجدول 2). في كمية تلك المادة (متغير الكمية الخاص بها Xj). ونظرًا لأن النموذج يعتمد على دفعة قياسية تزن 100 طن، فإن الحدود المستهدفة تُترجم مباشرة إلى أوزان بالطن (مثلاً من 39% إلى 43%) تصبح (من 39 طن إلى 43 طن).، مما ينتج عنه القيود الرياضية التالية:

القيود الرياضية للعينة :

- **قيد أكسيد الكالسيوم(CaO)** :

$$0.505X_1 + 0.1X_2 + 0.05X_3 + 0X_4 \geq 39 \quad (7)$$ **الحد الأدنى**

$$0.505X_1 + 0.1X_2 + 0.05X_3 + 0X_4 \leq 43 \quad (8)$$ **الحد الأقصى**

- **قيد ثاني أكسيد السيليكون(SiO2)** :

$$0.04X_1 + 0.48X_2 + 0.03X_3 + 0.88X_4 \geq 12 \quad (9)$$ **الحد الأدنى**

$$0.04X_1 + 0.48X_2 + 0.03X_3 + 0.88X_4 \leq 14 \quad (10)$$ **الحد الأقصى**

- **قيد أكسيد الألومنيوم(Al2O3)** :

$$0.02X_1 + 0.2X_2 + 0.1X_3 + 0.005X_4 \geq 2 \quad (11)$$ **الحد الأدنى**

$$0.02X_1 + 0.2X_2 + 0.1X_3 + 0.005X_4 \leq 4 \quad (12)$$ **الحد الأقصى**

- **قيد أكسيد الحديد(Fe2O3)** :

$$0.015X_1 + 0.04X_2 + 0.66X_3 + 0X_4 \geq 1.8 \quad (13)$$ **الحد الأدنى**

$$0.015X_1 + 0.04X_2 + 0.66X_3 + 0X_4 \leq 2.5 \quad (14)$$ **الحد الأقصى**

- **قيد أكسيد المغنيسيوم(MgO)** :

الحد الأدنى $$0.015X_1 + 0.06X_2 + 0.009X_3 + 0X_4 \geq 1.5$$ (15)

الحد الأقصى $$0.015X_1 + 0.06X_2 + 0.009X_3 + 0X_4 \leq 2$$ (16)

- **قيد ثالث أكسيد الكبريت(SO3)** :

الحد الأدنى $$0.004X_1 + 0.014X_2 + 0.003X_3 + 0X_4 \geq 0.1$$ (17)

الحد الأقصى $$0.004X_1 + 0.014X_2 + 0.003X_3 + 0X_4 \leq 0.5$$ (18)

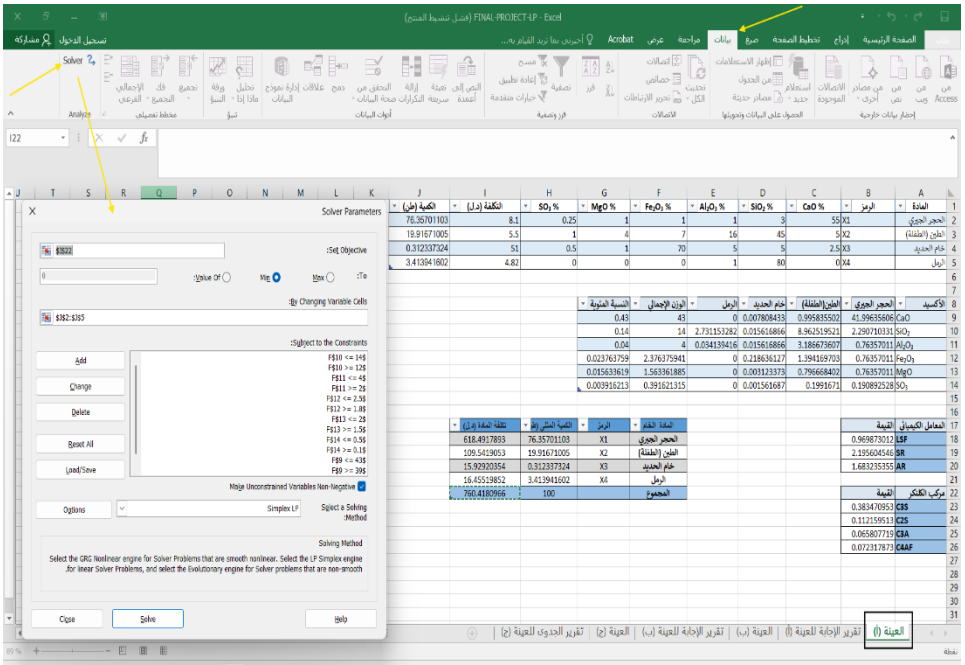
ج. قيود عدم السلبية(Non-negativity Constraints) :

لا يمكن استخدام كميات سالبة من المواد الخام .

$$X_1, X_2, X_3, X_4 \geq 0$$ (19)

10. أداة حل النموذج

حل هذا النموذج الرياضي، تم استخدام أداة **Solver** المدمجة في برنامج **Microsoft Excel**. تم اختيار هذه الأداة لقدرتها على التعامل مع نماذج بهذا الحجم بكفاءة، ولسهولة تحليل النتائج التي توفرها، كما موضح بالشكل التالي:



11. معايير ضبط جودة الخلطة الخام والتحقق من صحة النموذج

بما أنه لا يمكن اختبار المزيج المقترح عمليًا في المصنع، سيتم التحقق من جودة وصحة الحل الأمثل الذي يقدمه النموذج من خلال اجراء حسابات تحليل معايير جودة مزيج المواد الخام للاسمنت، تُستخدم عدة معايير كيميائية مشتقة من التحليل الأكسيدي لضبط جودة الخلطة للخام الناتج، وضمان الحصول على النسب المطلوبة، وهي كالاتي[6]:

ا. معامل إشباع الجير:(Lime Saturation Factor – LSF)

يُعد معامل إشباع الجير من المعاملات الكيميائية الأساسية التي تُستخدم في تحليل خواص الإسمنت، بعد الحصول على النسب المئوية النهائية للأكاسيد في المزيج الأمثل، سيتم حساب المعاملات الكيميائية الرئيسية للتحقق من توافقها مع النطاقات القياسية، وذلك لضمان جودة الخليط وتحقيق المتطلبات الفنية لإنتاج الاسمنت، ويُحسب هذا المعامل باستخدام الصيغة التالية:.

$$\boldsymbol{LSF}(\boldsymbol{MgO} < 2\%) = \frac{(\boldsymbol{CaO} + \boldsymbol{0.75MgO})}{\boldsymbol{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}} \qquad (20)$$

$$\boldsymbol{LSF}(\boldsymbol{MgO} > 2\%) = \frac{(\boldsymbol{CaO} + \boldsymbol{1.5MgO})}{\boldsymbol{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}} \qquad (21)$$

ب. معامل السيليكا :(Silica Ratio – SR)

يعبر معامل السيليكا (SR) عن النسبة بين ثاني أكسيد السيليكون (SiO2) ومجموع أكسيد الألومنيوم (Al2O3) وأكسيد الحديد(Fe2O3) ، ويُحسب بالعلاقة التالية:

$$\boldsymbol{SR} = \frac{\boldsymbol{SiO_2}}{\boldsymbol{Al_2O_3 + Fe_20_3}} \qquad (22)$$

SR يُعد من المعاملات التجريبية وليس النظرية، حيث تم تطويره من خلال الملاحظة الصناعية لضبط نسب الأطوار في الاسمنت في ضوء درجات حرارة الحرق. وتتراوح القيم النموذجية لمعامل السيليكا في الكلنكر البورتلاندي العادي بين 2.0 و3.0.

ج. معامل الألومينا :(Alumina Ratio – AR)

يمثل معامل الألومينا (AR) النسبة بين أكسيد الألومنيوم (Al2O3) وأكسيد الحديد(Fe2O3) ، ويُحسب باستخدام المعادلة التالية.

$$\boldsymbol{AR} = \frac{\boldsymbol{Al_2O_3}}{\boldsymbol{Fe_2O_3}} \qquad (23)$$

تتجلى أهمية هذا المعامل في تأثيره على خصائص الإسمنت النهائية، كما يتحكم في كمية الطور السائل المتكون عند درجات الحرارة المنخفضة نسبيًا، وتكون قيمة AR عادةً بين 1.0 و4.0 [6].

إن توافق نتائج المعاملات الكيميائية مع النطاق النموذجي سيعتبر دليلاً قويًا على صحة وجودة المزيج الذي يقترحه النموذج.

12. عرض النتائج ومناقشتها

فيما يلي النتائج التي تم التوصل إليها بعد تطبيق نموذج البرمجة الخطية علي النموذج الرياضي، وكانت نتائج **المزيج الأمثل والتكلفة موضحة بالجدول .4.**

جدول 4: المزيج الأمثل والتكلفة

المادة الخام	الرمز	الكمية المثلى (طن)	تكلفة المادة (د.ل)
الحجر الجيري	X1	82.44772086	667.83
الطين (الطفلة)	X2	11.53126954	63.42
خام الحديد	X3	0.154596069	7.88
الرمل	X4	5.866413527	28.28
المجموع		100.00	767.41

النتيجة الاقتصادية: بلغت التكلفة الإجمالية لإنتاج 100 طن من وجبة الفرن 767.41 دينار ليبي، أي أن تكلفة الطن الواحد هي 7.67 دينار ليبي. التحقق من قيم التركيب الكيميائي للمزيج الأمثل حسب معادلات القيود، وقيم المعاملات الكيميائية ومقارنتها النطاقات القياسية، النتائج موضحة بالجداول (5 ،6).

جدول 5: قيم المزيج والتركيب الكيميائي لقيود النموذج

الأكسيد	النسبة المحسوبة%	النطاق المستهدف%	الحالة
CaO	42.8	43 – 39	ضمن النطاق
SiO2	14.00	14 – 12	ضمن النطاق
Al2O3	4.00	4 – 2	ضمن النطاق
Fe2O3	1.8	2.5 – 1.8	ضمن النطاق
MgO	1.93	2 – 1.5	ضمن النطاق
SO3	0.492	0.5 – 0.1	ضمن النطاق

جدول 6: نتائج المعاملات الكيميائية

المعامل	القيمة المحسوبة	النطاق المستهدف القياسي	الحالة
LSF	0.98	0.98 – 0.92	ضمن النطاق
SR	2.41	3 – 2	ضمن النطاق
AR	2.22	4 – 1	ضمن النطاق

لقد أظهر **النتائج** قدرة نموذج البرمجة الخطية على التعامل مع سيناريوهات مختلفة لجودة المواد الخام، حيث نجح النموذج في تقديم حلول مثلى توازن بين التكلفة والجودة، حيث كانت 7.67 دينار ليبي

لقد هدفت هذه الدراسة إلى تطبيق البرمجة الخطية لتحسين مزيج المواد الخام، وبعد التحليل ، تم التوصل إلى النتائج الرئيسية التالية:

نجاح التحســـين، حيث نجح النموذج في تحديد المزيج الأمثل الذي يحقق أقل تكلفة ممكنة 7.67 دينار ليبي للطن مع الالتزام التام بجميع القيود الكيميائية والمواصفات الفنية المطلوبة، حيث تكون المزيج من:

- 82.448 طن من الحجر الجيري.
- 11.531 طن من الطين.
- 0.155 طن من خام الحديد.
- 5.866 طن من الرمل.

النموذج كأداة مزدوجة: أثبت البحث أن نموذج البرمجة الخطية يعمل كأداة مزدوجة الفائدة: فهو أداة **تحسين** (**Optimization**) لخفض التكاليف، وأداة **تشخيص** (**Diagnostic**) لتحديد المخاطر التشغيلية والقيود الإنتاجية.

بناءً على النتائج الموجزة أعلاه، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

1. **البرمجة الخطية أداة فعالة وموثوقة**: أثبتت هذه الدراسة أن البرمجة الخطية هي أداة علمية قوية وفعالة يمكن الاعتماد عليها في إدارة عمليات المزج في صناعة الإسمنت، وتقديم حلول مبنية على البيانات.
2. **القيمة الاستراتيجية تتجاوز خفض التكلفة**: القيمة الحقيقية للنموذج لا تكمن فقط في قدرته على إيجاد أرخص مزيج، بل في قدرته الاستراتيجية على تحديد "متى يكون الإنتاج غير ممكن" وفقًا للمواصفات. هذه المعلومة تمكن الإدارة من اتخاذ قرارات استباقية لتجنب إنتاج منتج غير مطابق للمواصفات.
3. **جودة المواد الخام هي العامل الحاسم**: أظهرت الدراسة أن تكلفة الإنتاج وجودة المنتج النهائي مرتبطان بشكل مباشر وحساس بالتركيب الكيميائي للمواد الخام المتاحة. النموذج يترجم هذا الارتباط إلى أرقام وقرارات واضحة.

13. التوصيات

في ضوء النتائج والاستنتاجات التي تم التوصل إليها، يوصي الباحث بما يلي:

توصيات مقترحة لمصانع الإسمنت: التحول نحو اتخاذ القرارات المعتمدة على البيانات الكمية: التوصية الرئيسية هي تبني **نماذج الأمثلية الرياضية**، مثل البرمجة الخطية، كأدوات معيارية في عمليات الإنتاج ومراقبة الجودة. هذا التحول من الأساليب التقليدية المعتمدة على الخبرة إلى أساليب مبنية على أساس كمي يضمن تحقيق أقصى كفاءة ممكنة واستقرار في جودة المنتج.

توصيات لأبحاث مستقبلية :

1. تضمين متغيرات اضافية مثل دراسة تكلفة الطاقة اللازمة لحرق المزيج، مما يجعل دالة الهدف أكثر شمولية لتكلفة التشغيل بدلاً من تكلفة المواد فقط. مما قد يسهم في تقليل المعدل السنوي لاستهلاك الطاقة.
2. تقليل تكاليف التشغيل.
3. تحسين أداء مبرد الكلنكر من خلال التحكم الحراري الأمثل لإستقرار العمليات التشغيلية لخط الإنتاج.
4. خفض الانبعاثات الكربونية للمصنع بشكل ملحوظ من خلال استخدام طاقة نظيفة خالية من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون CO_2.

المراجع:

[1] مصعب نافع البناء، "صناعة الإسمنت،" جامعة الموصل، الموصل، 2022.

[2] فواز محمد قائد مجلي، كيمياء الإسمنت، مكتبة نور، 2017.

[3] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, Introduction to Operations Research, vol. Ninth Edition, D. B. Hash, Ed., New York: McGraw-Hill, 2010.

[4] طلال عبود و طاهر حسن، بحوث العمليات، دمشق: الجامعة الافتراضية السورية، 2021.

[5] أ. عمر موسى، بحوث العمليات، دار الخضراء للطباعة والنشر، 2009.

[6] H. F. W. Taylor, Cement Chemistry, vol. 2nd edition, London: Thomas Telford Publishing, 1997.