

التشخيص والتنبؤ لنماذج فضاء الحالة ونموذج دالة التحويل - دراسة مقارنة -
**Diagnostic and Prediction For the Models of state spaces and transfer
function model -A Contrastive Study**

الباحث. أحمد خلف حسين
Ahmed Khlaf Husein
qanoo.Ahmed@yahoo.com

د. هيام عبد المجيد حياوي
Dr. Heyam A.Hayawi
heyamhayawi@gmail.com

كلية علوم الحاسوب والرياضيات / جامعة الموصل

تاريخ استلام البحث 2018/5/11 تاريخ قبول النشر 2018/8/15 تاريخ النشر 2019/8/19

المستخلص :

يهدف هذا البحث التنبؤ بأسلوبين هما نماذج المتسلسلات الزمنية المتعددة والتي تسمى بنماذج دالة التحويل، والتنبؤ باستخدام نماذج فضاء الحالة. لبيان امكانية تطبيق النماذج، تم استخدام بيانات اخذت من معمل سمنت سنجار لسنة 2013. البيانات تتكون من متغيرين للإدخال والمتمثلة بثلاثي اوكسيد السليكون (SiO_3) واوكسيد الكالسيوم (Cao). اما قوة التحمل بعد مرور 7 ايام من الصب فانه يمثل متغير الاخراج، اوضحت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال استخدام معايير دقة التنبؤ أن نماذج فضاء الحالة تعطي نتائج أدق من نموذج دالة التحويل. الكلمات المفتاحية / سلاسل زمنية , دالة التحويل , فضاء الحالة

Abstract

This paper deals with two Patterns of prediction which are multiple time series and perdition.To illustrate the usefulness of the two patterns, data set were collected from Sinjar cement factory for 2013. Two factors represent inputs are trilateral Silicon Oxide (SiO_3) and Calcium Oxide(Cao),While the Strength of load after seven days of erection represents the output factor, The results Showed that the state space model Provided more accurate results than the model of transfer function.

Keyword / Time series ,Transfer function , State space

1- المقدمة

أشار [فاندل، 1992] الى ان المتسلسلات الزمنية يمكن تصنيفها تبعا لعدد المتغيرات في نماذجها الى نموذجين الاول يسمى نموذج متسلسلة زمنية أحادية المتغير (Univariate Time Series)، اما الثاني فيسمى نموذج المتسلسلة الزمنية متعددة المتغيرات (Multivariate Time Series) وان دالة التحويل تمثل النموذج الذي يصف العلاقة الحركية بين هذه المتغيرات. وان نماذج دالة التحويل يمكن ان تستعمل لدراسة العلاقة الداخلية بين المتغيرات في النظام الاقتصادي، وكذلك في دراسة الظواهر الطبيعية، مثلا التنبؤ عن ظاهرة خرق الازون. وقد تتضمن دالة التحويل مدخلا واحدا ومخرجا واحدا عندئذ تسمى بنماذج دالة التحويل أحادية المتغير، أما اذا كان دالة التحويل تتضمن عدة مدخلات ومخرج واحد او عدة مدخلات وعدة مخرجات عندئذ تسمى دالة التحويل متعددة المتغيرات. أما فضاء الحالة فهو لا يقل اهمية عن دالة التحويل في استخدامه للتنبؤ فهو أسلوب عام يمكن من خلاله تمثيل العلاقة بين المدخلات (Inputs) والمخرجات (Outputs) للنظم الحركية.

يتميز أسلوب فضاء الحالة عن أسلوب نماذج دالة التحويل بأنه يوفر الامكانية للتعرف على الديناميكية الداخلية والخارجية للنظام وان امتلاك هذه الميزة يعد عنصرا مهما في وصف نظام السيطرة، وعليه فان تمثيل فضاء الحالة للنظام يعد فكرة أساسية في نظرية السيطرة الحديثة [البدراي، 2002].

2- هدف البحث

تم في هذا البحث التنبؤ باستخدام نماذج المتسلسلات الزمنية المتعددة والتي تسمى أيضاً بنماذج دالة التحويل، والتنبؤ باستخدام نماذج فضاء الحالة ومقارنة التشخيص والتنبؤ لنماذج فضاء الحالة ونموذج دالة التحويل لعدة مدخلات، لإيجاد أفضل طريقة للتنبؤ

3 - دالة التحويل (Transfer Function)

تعرف دالة التحويل بأنها دالة رياضية تعبر عن العلاقة بين المدخلات (Inputs) ويرمز لها بالرمز u_t والمخرجات (Outputs) ويرمز لها بالرمز Y_t ، والتي من خلاله تعكس شكل التغير الذي يطرا على المدخلات لتتحول الى المخرجات، بافتراض ان u_t و Y_t متسلسلات زمنية في حالتها المستقرة (Stationary) حيث يتوزع تأثير المدخلات عبر العديد من الفترات الزمنية المستقبلية، وتهدف نماذج دالة التحويل الى تحديد نموذج ذي علاقة قوية لـ Y_t مع u_t و N_t إذ أن الأخير يمثل كل التأثيرات الأخرى على العملية الحركية ويسمى الضوضاء (Noise) [Makridakis, et al, 1983].

1-3 نماذج دالة التحويل (Transfer Function Models)

أن من أبسط الصور التي يمكن من خلالها التعبير عن نماذج دالة التحويل هي العلاقة الديناميكية بين متسلسلتين من المتسلسلات الزمنية أحدهما متسلسلة المدخلات u_t والآخرى متسلسلة المخرجات Y_t ، ولهذه العلاقة أهمية كبيرة في التنبؤ بقيم Y_t المستقبلية، بافتراض أن $(u_t$ و $Y_t)$ متسلسلتان مستقرتان (Stationary) ومرتبطان من خلال مرشح خطي (Linear Filter).

$$Y_t = V(B)u_t + N_t \quad \dots \dots \dots (1).$$

إذ إن.

$$V(B) = \sum_{j=0}^{\infty} V_j B^j = V_0 + V_1 B + V_2 B^2 + \dots \dots \dots , \quad \dots \dots \dots (2).$$

وهي تمثل دالة التحويل أو دالة الاستجابة النبضية (Impulse Response Function).

وإن B : تمثل مؤثر الازاحة ذو التغذية الخلفية (Back Ward shift operator).

V_j : تسمى بأوزان الاستجابة النبضية حيث $j=0,1,2,\dots$ والشكل البياني لهذه الاوزان يسمى دالة الاستجابة النبضية، وهي تمثل الاثر الذي يحدث على Y_t نتيجة حدوث تغير في u_t بمقدار وحدة واحدة [فاندل، 1992]. ويطلق على مجموع أوزان الاستجابة النبضية أسم (عائد حالة الاستقرار) (Steady State Gain)، إذا تحقق الشرط الآتي:

$$\sum_{j=0}^{\infty} V_j = g \quad \dots \dots \dots (3)$$

إذ أن g تمثل التغير الكلي (اي التغير المتراكم على مر الزمن) في متسلسلة المخرجات Y_t نتيجة حدوث تغير في متسلسلة المدخلات u_t بمقدار وحدة واحد، على أن يستمر هذا التغير بصفة دائمة عندئذ يسمى هذا التغير بتغير الخطوة (Step Change)، لكن يسمى هذا التغير بتغير النبضة (Impulse Change) إذا كان التغير لفترة زمنية واحدة فقط [فاندل، 1992]. وقد أشار [Makridakis, et al, 1983] الى أن نموذج دالة التحويل يكون مستقراً (Stationary) إذا تحقق الشرط الآتي:

$$\sum_{j=0}^{\infty} |V_j| < \infty \quad \dots\dots\dots (4).$$

إذا كانت أوزان الاستجابة النبضية قابلة للجمع المطلق (Absolutely Sum Mable) أما إذا كانت $V_j = 0$ لجميع قيم $j < 0$ (أي أن النظام لا يستجيب لمتسلسلة المدخلات y_t ما لم يتم استخدامها في النظام) (أي إن مخرجات النظام الحالية تعتمد على مدخلاته الحالية و الماضية فقط) عندئذ يسمى نموذج دالة التحويل بأنه سببي (Causal). ويمكن تقريب دالة التحويل كنسبة بين متعددتي حدود $\omega(B)$ و $\delta(B)$ بالصيغة الآتية :

$$V(B) = \frac{\omega_s(B)B^b}{\delta_r(B)} \quad \dots\dots\dots (5).$$

إذ إن :

$$\omega_s(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s$$

$$\delta_r(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r$$

الجدير بالذكر أن وضع $(\delta_0 = 1)$ لا يؤدي الى عدم عمومية النتائج التي نحصل عليها، إذ إن $\omega(B)$: تمثل التأثير الابتدائي (Initial Effect)، أي تشير إلى أي مدى القيم الجديدة لمتسلسلة المدخلات تؤثر على متسلسلة المخرجات.

$\delta(B)$: تمثل عامل التضاؤل (Damping Factor) للتأثير الابتدائي، أي أن لحد (Y_{t-r}) متسلسلة المخرجات ترتبط مع القيم السابقة لها.

s : مرتبة متعدد الحدود $\omega(B)$. r : مرتبة متعدد الحدود $\delta(B)$.

b : مرتبة زمن التأخير (Delay Time) أو (الزمن الميت).

بفرض شرط الاستقرار على متعددتي الحدود $\omega(B)$ و $\delta(B)$ هذا يؤدي الى وقوع جميع الجذور (Roots) خارج دائرة الوحدة (Unit Circle)، ويمكن إيجاد اوزان الاستجابة النبضية بعد تحديد كل من $\omega(B)$ و $\delta(B)$ من خلال العلاقة الآتية [الحنون،2007]:

$$V(B) = \frac{\omega_s(B)}{\delta_r(B)} \rightarrow \delta_r(B)V(B) = \omega_s(B)B^b \rightarrow (1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r)$$

$$(V_0 + V_1 B + \dots) = (\omega_0 + \omega_1 B + \dots + \omega_s B^s)B^b \quad \dots\dots\dots (6).$$

وبذلك نحصل على :

$$\left. \begin{aligned} V_j &= 0 && ; j < b && (7.a) \\ V_j &= \delta_1 V_{j-1} + \delta_2 V_{j-2} + \dots + \delta_r V_{j-r} + \omega_0 && ; j = b && (7.b) \\ V_j &= \delta_1 V_{j-1} + \delta_2 V_{j-2} + \dots + \delta_r V_{j-r} - \omega_{j-b} && ; j = b + 1, \dots, b + s && (7.c) \\ V_j &= \delta_1 V_{j-1} + \delta_2 V_{j-2} + \dots + \delta_r V_{j-r} && ; j > b + s && (7.d) \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

تحدد مرتبة (r, s, b) لنموذج دالة التحويل للربط بين متسلسلة المدخلات والمخرجات من خلال إحدى

الطريقتين:

1- استخدام شكل دالة الارتباط المتقاطع (CCF) بين متسلسلي الإدخال والإخراج اللتان تم إعادة تبييضهما (أي تققيتهما).

2- استخدام طريقة جدول الزاوية (Corner Table Model).

ومن الجدير بالذكر أشار [Makridakis,et al,1983] إلى القواعد الآتية :

- 1- b تشير إلى عدم تأثير Y_t بقيم u_t حتى الدورة t+b.
- 2- S تشير إلى أي مدى تبقى متسلسلة المخرجات Y_t متأثرة بالقيم الجديدة لمتسلسلة المدخلات u_t .
- 3- قيمة r تشير إلى أن Y_t ترتبط مع القيم السابقة لها.

2-3 مراحل بناء نماذج دوال التحويل ((Stages Of model Building for Transfer Function

لغرض تشخيص وتقدير دالة التحويل $V(B)$ ونموذج التشويش N_t يجب بناء نموذج ملائم لدالة التحويل وذلك بالاعتماد على معلومات المتغيرات لمتسلسلة المدخلات u_t والمخرجات Y_t ، لقد أشار [Makridakis,et al,1983] إلى أن بناء نموذج دالة التحويل يتطلب المراحل الأربعة الآتية :-

(أ) تشخيص نموذج دالة التحويل (Identification of Transfer Function Mode)

تتضمن مرحلة تشخيص النموذج خطوات عدة هي:

- 1- إعداد أو تهيئة متسلسلة المدخلات والمخرجات، 2- تنقية متسلسلة المدخلات (أعادة تبيض لمتسلسلة المدخلات)، 3- تنقية متسلسلة المخرجات (أعادة تبيض لمتسلسلة المخرجات)، 4- حساب دالة الارتباط المتقاطع CCF بين المتسلسلتين α_t و β_t والذي يرمز لها بالرمز $\rho_{\alpha\beta}^{(k)}$ ، 5- التقدير المباشر لأوزان الاستجابة النبضية ، 6- تحديد رتبة (r , s , b) لنموذج دالة التحويل ، 7- تحديد نموذج ARMA لحد الازعاج N_t .

(ب) تقدير معلمات نموذج دالة التحويل (Parameters Estimation of Transfer Function Model)

(ج) الفحوص التشخيصية لنموذج دالة التحويل: (Diagnostic Checking of Transfer Function Model)

(د) التكهّن (Forecasting).

4- زمن التأخير (Delay Time).

يمثل عدد الفترات الزمنية التي تتقضي قبل أن يظهر تأثير المدخلات u_t في المخرجات ويرمز لزمن التأخير بالرمز b ، إذ أن b عدد صحيح موجب وأن $b = 0$ إذا كان التغيير في u_t يؤدي إلى حدوث تغيير فوري في Y_t (أي دون تأخير)، أما إذا كان هناك تأخير في الاستجابة Y_t للتغيرات التي حدثت في u_t فعندئذ يكون هناك زمن تأخير b ، ومن الضروري جدا تقدير قيمة b قبل البدء بتحديد النموذج الملائم لأن زمن التأخير ذو تأثير مباشر في عملية تحديد النموذج الذي يمثل النظام. ويمكن تحديد زمن التأخير من خلال رسم دالة الارتباط المتقاطع (CCF) بين متسلسلي الإدخال والإخراج اللتان تم إعادة تبيضهما (أي تنقيتهما) التي أشار إليها [Box and Jenkin,1976]. إذ إن b تمثل أول قيمة معنوية تقع خارج فترة الثقة، كما يمكن تحديده من خلال طريقة جدول الزاوية وهي طريقة مقترحة عام (1982) من قبل [Hanssens, Liu] إذ إن b تمثل أول صف غير صفري معنوي. [فاندل،1983] [Yaffee and McGee،1999]. كذلك استخدم نماذج فضاء الحالة (State Space Model) كأسلوب في تقدير زمن التأخير من قبل [البدراني،2002]. وقد أشار [Tong,1996] إلى إمكانية إهمال قيمة b إذا كانت ضئيلة جداً.

5- معايير ضبط دقة التنبؤ

هناك مجموعة من المقاييس الأكثر استعمالاً لقياس دقة التنبؤ منها.

1- متوسط الأخطاء المطلقة MAE (Mean Absolute Errors) :

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t|}{n} \dots\dots\dots (8)$$

2- متوسط القيم المطلقة لنسب الأخطاء MAP (Mean Absolute Percentage Error)

$$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} / n = \sum_{t=1}^n \frac{PE_t}{n} \dots\dots\dots (9)$$

3- متوسط مربعات الخطأ MSE (Mean Square Error):

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n} \dots\dots\dots (10)$$

والجدير بالذكر أن المعايير الثلاثة تعطي أفضلية للنموذج الذي يعطي أقل قيمة، الغرض من استخدامه لمعرفة القوة التنبؤية للنموذج المستخدم [Liu,2006] [Makridakis,et,al,1998].

6 - مفهوم الحالة ونماذج فضاء الحالة

(The Concept of State and State Space Models)

ان مخرجات النظام الديناميكي تعتمد على كل من اشارة الادخال بالإضافة الى التاريخ السابق للإخراج ، لكي نجد الاخراج عند اية لحظة يجب معرفة كم نحتاج من التاريخ السابق للإخراج ، وان ذلك الجزء من التاريخ السابق للنظام الذي يؤثر على السلوك الحالي والمستقبلي يسمى بحالة النظام (State of the System) وان المتغيرات التي تمثل حالة النظام تسمى بمتغيرات الحالة (State Variables).

عرف [Rowell,2002] نظام الحالة بأنه نظام حركي يشير الى تقليل مجموعة المتغيرات المعرفة بـ(متغيرات الحالة) وبصور تماماً النظام ويستجيب لكل مجموعة من المدخلات. أما نموذج فضاء الحالة فقد عرف من قبل كل من [Durbin and Koopman,2001] بأنه نموذج حركي خطي (DLM) وأن المشاهدات التي يتعامل معها تتألف من مركبات مثل الاتجاه، الموسمية، الدورية، التغيرات العشوائية، المتغيرات التوضيحية بالإضافة الى حد الخطأ Error term وان كل واحد من هذه المركبات تندمج بشكل منفصل، وان دمج هذه المركبات معاً تشكل نموذج واحد وهو (نموذج فضاء الحالة).

مما سبق نستنتج بان نموذج فضاء الحالة يزودنا بوصف رياضي للخصائص الداخلية والخارجية للنظام ، كما يسمح بدمج المتغيرات التي ترتبط مع السلوك الداخلي للنظام التي لا يمكن الوصول اليها او قياسها مع المتغيرات الخارجية القابلة للقياس ويمكن استخدامه لتمثيل الصيغة العامة لنماذج الديناميكية الخطية وغير الخطية سواء أكانت تتغير مع الزمن(Time-Variant) ام لا تتغير مع الزمن (Time-Invariant)[Ljung,1999]. وقد اشار [Kanjalal,1995]الى ان نموذج فضاء الحالة تمتلك ميزة خاصة يميزها عن غيرها وهي كونها في موازاة المتغيرات المعروفة او التي يمكن قياسها. فان المتغيرات التي تكون داخل العملية والتي لا يمكن قياسها تدمج ايضا في النموذج وهذا ما يجعل نموذج فضاء الحالة تسمى ايضا بالنموذج الداخلي (Internal Model).

ويتكون نموذج فضاء الحالة عادة من معادلتين :

الاولى :معادلة الحالة (State Equation) وهي تصف متجه المدخلات عند الزمن $(t+1)$ ، ويرمز لها بالرمز (X_{t+1}) ، بدلالة X_t وكذلك المدخلات U_t .

الثانية : معادلة المشاهدة (Observation Equation) وهي تصف المخرجات Y_t بدلالة كل من المدخلات X_t والمدخلات U_t .

ويمكن توضيح هاتين المعادلتين في حالة وجود مدخل واحد و مخرج واحد

(Single-Input Single-Output) كالآتي :

$$X_{t+1} = AX_t + BU_t \quad \text{(معادلة الحالة)} \quad \dots \dots (11).$$

$$Y_t = CX_t + DU_t \quad \text{(معادلة المشاهدة)} \quad \dots \dots (12).$$

إذ ان : A : هي مصفوفة ذات بُعد $(n \times n)$ ، وتمثل الديناميكية المستقلة للنظام.

B : هو متجه عمودي عدد عناصره هي n ، أي بعده $(n \times 1)$ ، ويمثل تأثير افعال السيطرة.

C : هو متجه صفى عدد عناصره هي n ، أي بعده $(1 \times n)$ ، ويمثل الاسقاط على المتغيرات

المشاهدة . D : قيمة حقيقية (real-valued). t : تمثل دليل الزمن.

وللمعادلتين (11) و(12) دور فعال في دراسة النظم الديناميكية حيث يعبر عن المدخلات والمخرجات من خلال معادلات فرقية عند وجود نظام محدد في الزمن المنقطع وتكون هناك ازعاجات غير مسيطر عليها تعامل كمتغيرات عشوائية او تشويش يؤثر في المخرجات [Nelles,2001]. وقد اشار الباحث [Kamen,1987] الى امكانية تعميم نموذج فضاء الحالة في النظم المحددة ليمثل نظام متعدد المدخلات -متعدد المخرجات (Multi-Input Multi- Output) كالآتي :

$$X_{t+1} = AX_t + BU_t + Ke_t \quad \text{(معادلة الحالة)} \quad \dots \dots (13).$$

$$Y_t = CX_t + DU_t + e_t \quad \text{(معادلة المشاهدة)} \quad \dots \dots (14).$$

إذ ان : A مصفوفة ذات بعد $n \times n$ لمدخلات النظام (المدخل الاول وهو في معادلة الحالة) ، B هي مصفوفة ذات بعد $n \times p$ للمدخل الثاني وهو في معادلة الحالة، C مصفوفة ذات بعد $q \times n$ للمدخل الاول ، D مصفوفة ذات بعد $q \times p$ للمدخل الثاني في معادلة المشاهدة وان K متجه عمودي عدد عناصره هي n .

7- الجانب التطبيقي :

تحتل صناعة الإسمنت موقعا مهما بين الصناعات القائمة في القطاع الصناعي العراقي حيث تشكل مادة الاسمنت العنصر الرئيس في قطاع الانشاءات والبناء لذا فإن الهدف الأساسي من هذه الرسالة هو ايجاد النموذج الملائم واستخدامه في التنبؤ عن خاصية من خواص الاسمنت، والتي هي قوة التحمل بعد مرور (7) ايام على الصب لما لهذه الخاصية من تأثير على نوعية الاسمنت وكذلك انعكاسها على جودة البناء ومدى تحملها مع مرور الزمن. أن مادة الاسمنت تتكون بالاعتماد على مادتي الحجر والتراب المتكونتين من العديد من المواد الكيميائية التي تعتبر المدخلات مثل ثلاثي اوكسيد السليكون Sio_3 ، اوكسيد الكالسيوم Cao ، اوكسيد المغنيسيا Mgo ،.....والخ . في حين ان المخرجات التي تقاس ضمن مادة الاسمنت مكونة من العديد من المتغيرات الفيزيائية مثل قوة التحمل (الصلابة)،(النعومة)،التمدد،الانجماد.....والخ [نيفيل، 1985].

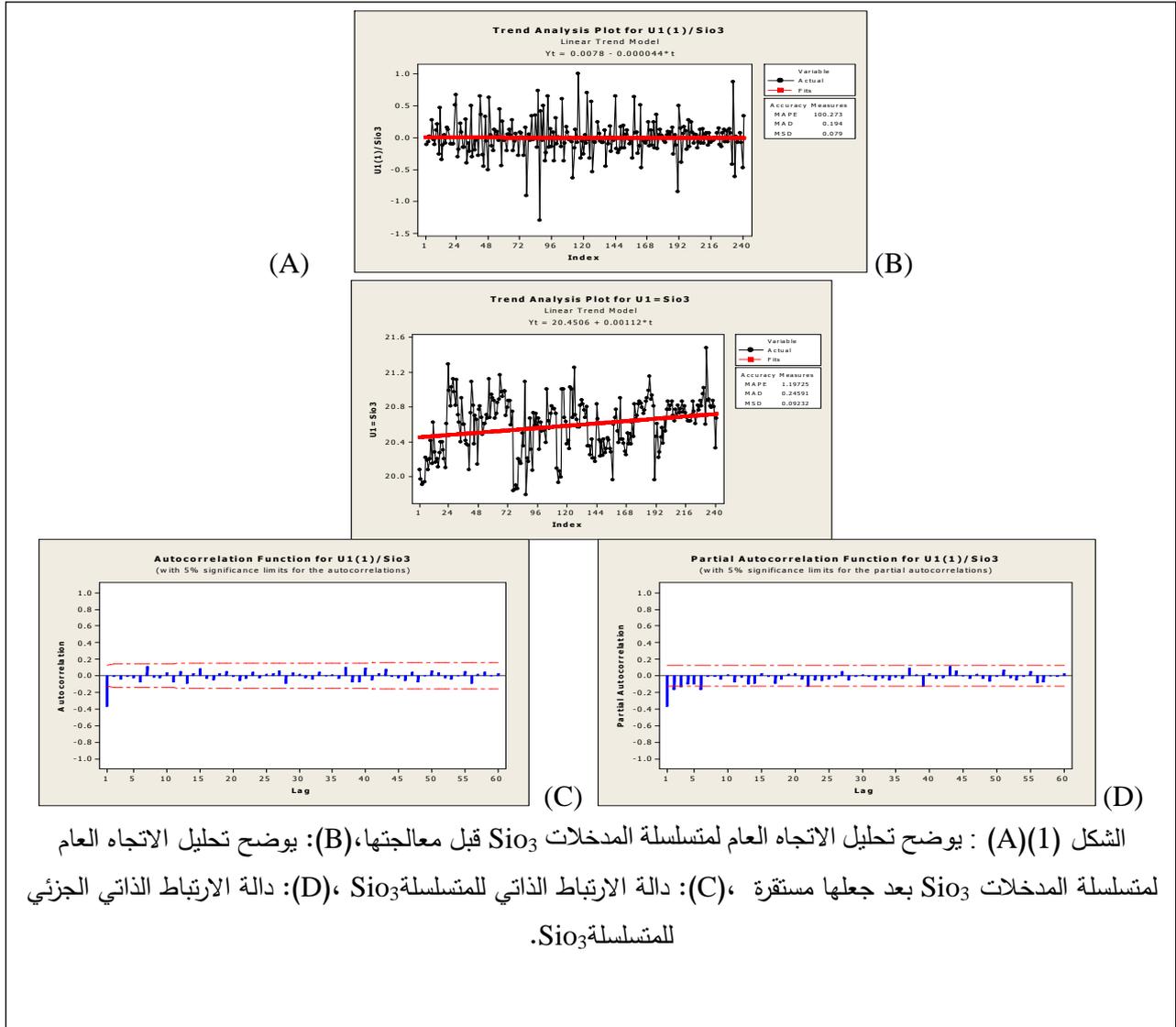
تم أخذ زوج من المتغيرات كمدخلات ومتغير واحد من كمخرجات حيث تمثلت المدخلات بثلاثي اوكسيد السليكون SiO_3 واوكسيد الكالسيوم CaO ، اما المخرجات فتمثلت بمتغير قوة التحمل بعد 7 ايام من الصب للتطبيق الجانب العملي . يتضمن هذا الجانب مبحثين يتناول اولهما بناء نموذج دالة التحويل بزوج من المدخلات ومتغير واحد من المخرجات، لقد تم التحليل وبناء نموذج دالة التحويل بالاعتماد على نظام تحليل السلسلة الزمنية (Statistical System) ويرمز له (SCA)، إذ تم استخدام 230 مشاهدة لتقدير نموذج دالة التحويل الملائم والإبقاء على (11) مشاهدته كعينة بعدية (Out of Sample) لاستخدامها في المقارنة مع القيم المنتبأ بها والتي يتم الحصول عليها من النموذج الذي ذكر أعلاه ، اما الثاني يتناول بناء نموذج فضاء الحالة باستخدام نفس المدخلات والمخرجات المستخدمة في المبحث الاول، وباستخدام البرنامج الاحصائي الجاهز Matlab، ثم المقارنة بين النموذجين واختيار النموذج الافضل للتكهن (Forecasting).

1-7- بناء نموذج دالة التحويل بمتغيري الادخال واخراج منفرد

ان عملية بناء النموذج يتطلب عدة خطوات وهذه الخطوات هي التشخيص، التقدير، إجراء الفحوص التشخيصية، ومن الضروري اجتياز جميع هذه الخطوات لكي يتحول النموذج الابتدائي (التجريبي) إلى النموذج النهائي الجاهز لاستخدامه تطبيقيا في التنبؤ (Prediction).

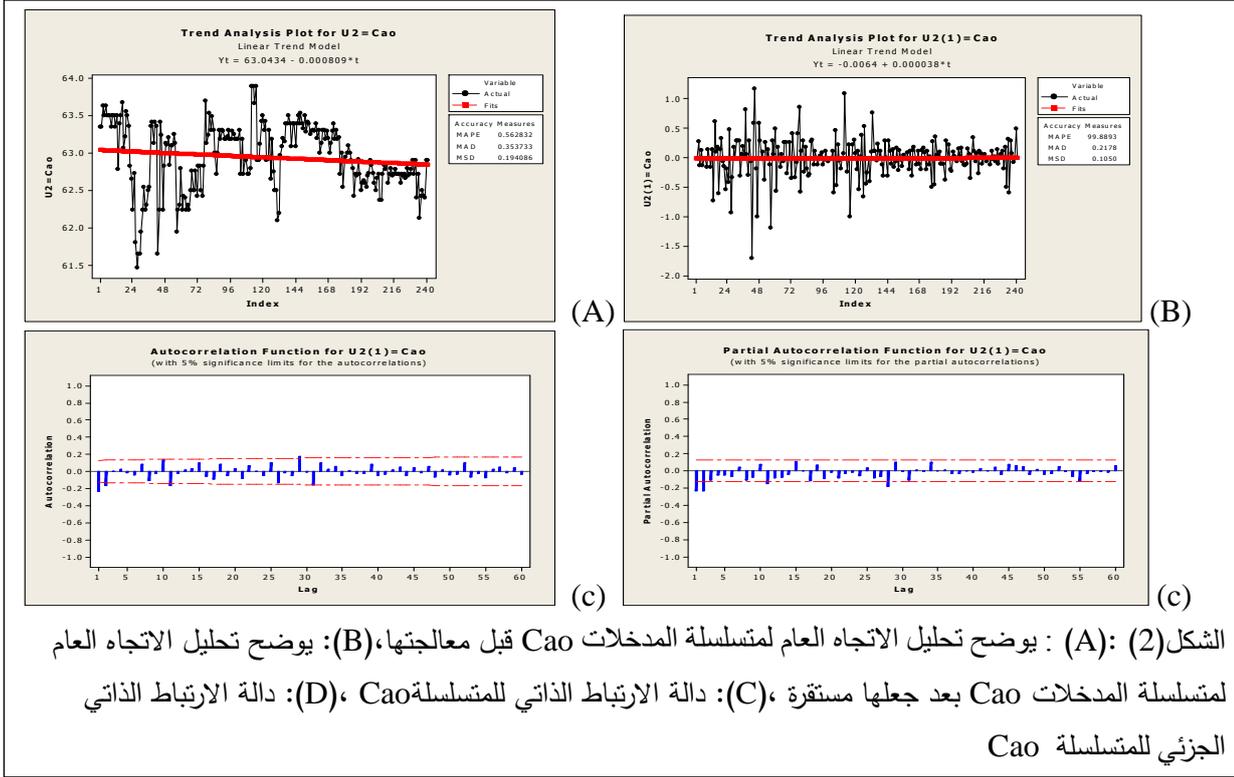
إن من أول الخطوات التي تتبع لوصف أو تحليل متسلسلة زمنية هو رسمها بما يعرف بالرسم الزمني، إذ يمكن من خلال الرسم مشاهدته طبيعة التذبذب فيها وملاحظة فيما إذا كانت المتسلسلة مستقرة أم لا من حيث الوسط والتباين، حيث إن أستقرارية المتسلسلة لها دور كبير في عملية النمذجة لدالة التحويل فضلاً عن علاقتها الوثيقة بالتنبؤ (Prediction).

1- متسلسلي المدخلات



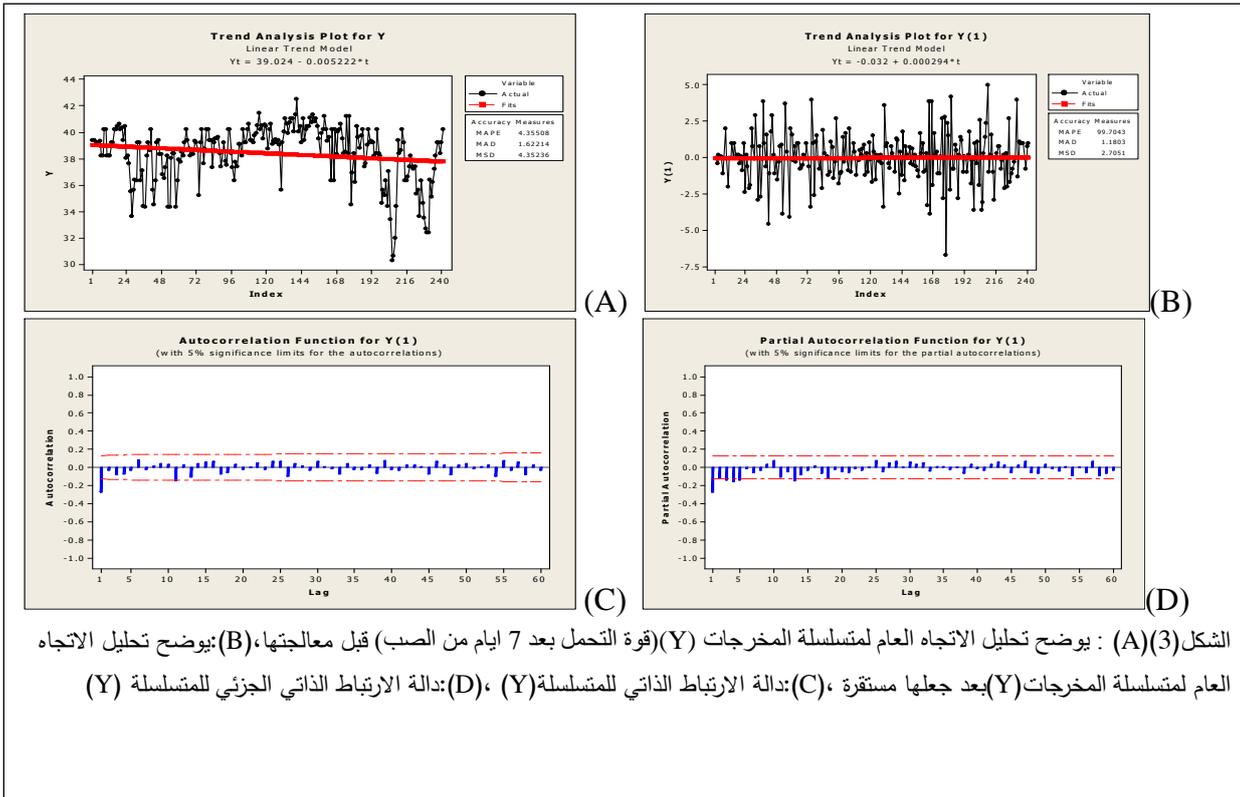
الشكل (1)(A) : يوضح تحليل الاتجاه العام لمتسلسلة المدخلات SiO₃ قبل معالجتها، (B): يوضح تحليل الاتجاه العام لمتسلسلة المدخلات SiO₃ بعد جعلها مستقرة، (C): دالة الارتباط الذاتي للمتسلسلة SiO₃، (D): دالة الارتباط الذاتي الجزئي للمتسلسلة SiO₃.

من خلال الفحص البصري يلاحظ أن المتسلسلة أصبحت مستقرة من حيث المعدل بعد أخذ الفرق الاعتيادي الاول لها وانها مستقرة من حيث التباين في الاصل، وتم التأكد من الاستقرار في التباين من خلال تقسيم المتسلسلة الى اجزاء ثم ايجاد التباين لكل جزء وتبين ان قيم التباين كانت متقاربة، كما يوضح أن دالة الارتباط الذاتي تهبط إلى الصفر بعد الفجوة الزمنية الأولى ودالة الارتباط الذاتي الجزئي تكاد ان تهبط إلى الصفر بعد الفجوة الزمنية الثانية مما يدل على أن متسلسلة ثلاثي أكسيد السليكون مستقرة بالوسط.



من خلال الفحص البصري يلاحظ أن المتسلسلة أصبحت مستقرة بعد أخذ الفرق الاعتيادي الاول لها، كما أن دالة الارتباط الذاتي ودالة الارتباط الذاتي الجزئي تهبط إلى الصفر بعد التخلف الزمني الثاني مما يدل على أن المتسلسلة مستقرة بالوسط.

2- متسلسلة المخرجات (Y)



من خلال الفحص البصري يلاحظ أن دالة الارتباط الذاتي ودالة الارتباط الذاتي الجزئي تهبط إلى الصفر بعد الفجوة الزمنية الأولى مما يدل على أن المتسلسلة مستقرة .
يمكن صياغة نموذج دالة التحويل الخاص بقوة التحمل بعد 7 ايام من الصب بوصفه متغيراً معتمداً وكما يأتي:

$$Y_t = CY + V_1(B)U_{1t} + V_2(B)U_{2t} + N_t \quad \dots\dots(21).$$

إذ أن Y_t : تمثل متسلسلة المخرجات لنماذج دالة التحويل والمتمثلة بـ (قوة التحمل بعد 7 ايام من الصب)،
 CY : يمثل الحد الثابت ،

U_{1t} و U_{2t} : تمثلان متسلسلة المدخلات لنماذج دالة التحويل والمتمثلة بـ (متغير ثلاثي اوكسيد السليكون SiO_3 و متغير اوكسيد الكالسيوم Cao على التوالي) ، N_t : يمثل متسلسلة الإزعاج .

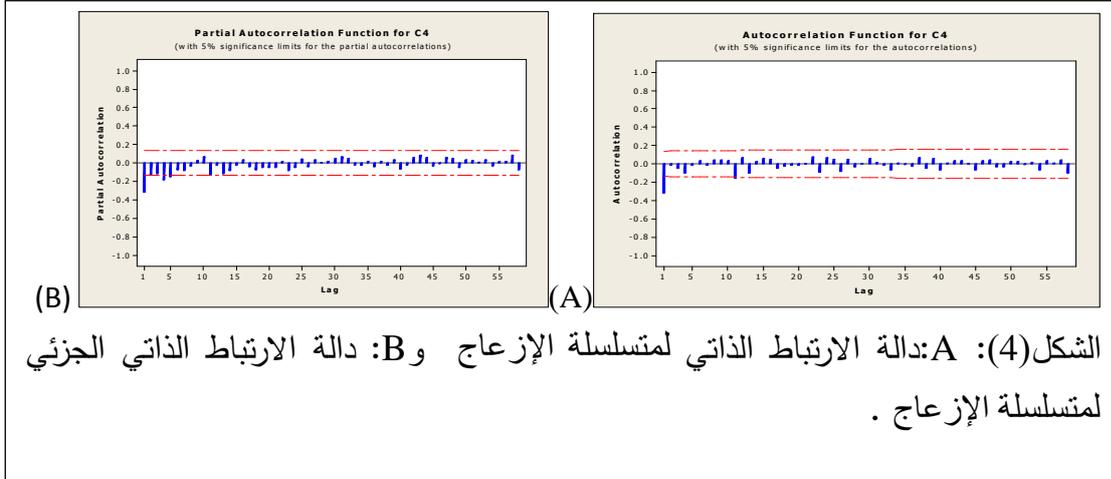
سُيَرمز لنموذج دالة التحويل للمتغير Y_t بالرمز Y MODEL ويفترض كالاتي:

$$\begin{aligned} & \text{TSMODEL YMODEL. MODEL IS @} \\ & Yt = CY + (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) U1t(1) + @ \\ & (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) U2t(1) + (1) / (1) NOISE. \end{aligned}$$

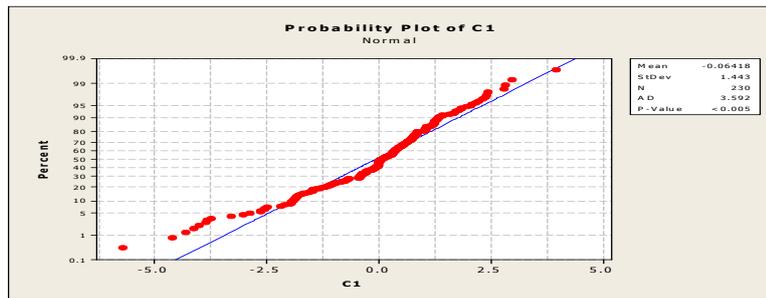
في هذه المرحلة تم افتراض سبعة أوزان للتحويل ($v_0 - v_6$) ضمن دالة التحويل الخطية لجميع المتغيرات التوضيحية، فضلاً عن افتراض أن نموذج حد الإزعاج بوصفه نموذجاً ابتدائياً مفترضاً هو من نوع ARMA(1,1) وهو النموذج الأنسب ومن الممكن أخذ أي نموذج آخر (Liu,1992-1994) وبإجراء عملية التقدير التلقائي على النموذج Y MODEL، تم الحصول على نتائج التقدير كما هي مبينة في الملحق (A) .

يتضح من خلال عملية التقدير التلقائي عدم معنوية الحد الثابت CY (-0.70) بالإضافة إلى عدم معنوية عدة أوزان لدوال تحويل مختلفة ومنها الاوزان ذوات التخلف الصفري (1.05) والأول(-0.39) والثاني(-0.04) والثالث(-1.83) والرابع(-1.77) والخامس(0.08) للمتغير U_1 ، وعدم معنوية الاوزان ذوات التخلف الأول(1.52) والثاني(0.68) والثالث(-1.72) والرابع(-0.94) والخامس(-1.58) للمتغير U_2 ، ومعنوية الوزن ذي التخلف السادس(2.39) للمتغير U_1 ومعنوية الوزن ذي التخلف الصفري(2.33) والسادس(2.44) للمتغير U_2 ، لان جميع هذه الاوزان هي اكبر من ضعف الخطاء المعياري والقيمة المطلقة لـ(T-VALUE) لجميع الاوزان المعنوية اكبر من (2) كما هو ملاحظ من نتائج التقدير السابقة وقد تم إجراء تعديلين على مقدرات أوزان دالة التحويل وذلك بإهمال المقدرات غير المعنوية وإعادة التقدير من جديد حتى تم التوصل إلى نتيجة التعديل رقم(2). وقبل التعرف على نموذج دالة التحويل الفعلي، إن الخطوة التالية هي إجراء التقدير التلقائي لنموذج ARMA الفعلي لمتسلسلة الإزعاج N_t لإبداله بالنموذج الافتراضي المستخدم في النظام (SCA)

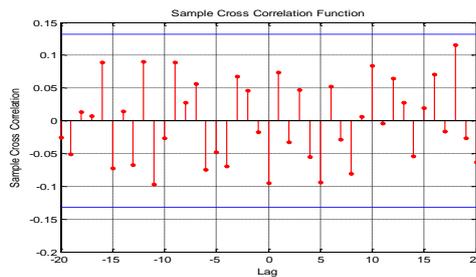
حيث نلاحظ من نتيجة التقدير التلقائي لنموذج ARMA لحد الإزعاج أن النموذج المناسب لحد الإزعاج هو ARMA(0,1)، وأكدها كل من الارتباط الذاتي والذاتي الجزئي والموضح كالاتي :



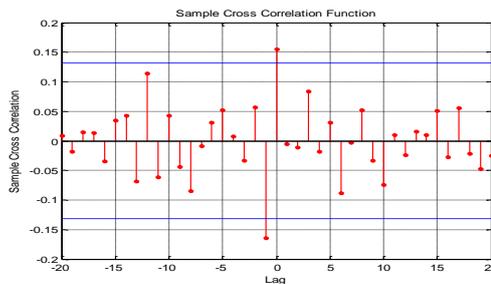
من خلال الفحص البصري يلاحظ أن دالة الارتباط الذاتي الجزئي تتناقص أسياً وقيم دالة الارتباط الذاتي تقع داخل فترة الثقة بعد الفجوة الزمنية الأولى مما يدل على أن النموذج الملائم هو $MA(1)$. وللتأكد من أن عملية التشخيص تمت بصورة صحيحة، تم رسم دالة الارتباط الذاتي ودالة الارتباط الذاتي الجزئي للبواقي (Residuals)، وسلوك Normality - Test متسلسلة البواقي (Residuals)، وكذلك تم فحص الارتباط المتقاطع (Cross-Correlation) بين متسلسلة المدخلات المبيضة لكل من (ثلاثي اوكسيد السليكون SiO_3 و اوكسيد الكالسيوم Cao) ومتسلسلة البواقي.



الشكل (6) سلوك Normality - Test متسلسلة البواقي



(Residuals)



(B) اوكسيد الكالسيوم Cao

(A) ثلاثي اوكسيد السليكون SiO₃

الشكل (7): الارتباط المتقاطع بين المدخلات المبيضة والبواقي (RES).

حيث يلاحظ أن الارتباطات الذاتية والذاتية الجزئية لمتسلسلة البواقي والارتباطات المتقاطعة بين متسلسلة البواقي وكل متسلسلة من متسلسلات المدخلات جميعها غير معنوية، ويلاحظ أن هناك قيمة معنوية عند التخلف الحادي عشر للارتباطات الذاتية والذاتية الجزئية لمتسلسلة البواقي وكذلك قيمة معنوية للارتباط المتقاطع بين متسلسلة المدخلات (SiO₃) ومتسلسلة البواقي (RES) عند التخلف الصفري ويمكن تفسيره بأنه نتيجة الصدفة ، وبذلك يتحقق اجتياز نموذج دالة التحويل للفحوص التشخيصية وهذا بالطبع يؤدي إلى نجاح النموذج . بعد تضمين نموذج ARMA(0,1) الملائم

في النموذج للمتغير Y_t يجرى تقديره تقديراً نهائياً،

أي أن النموذج بعد التقدير النهائي له بالصيغة الآتية :

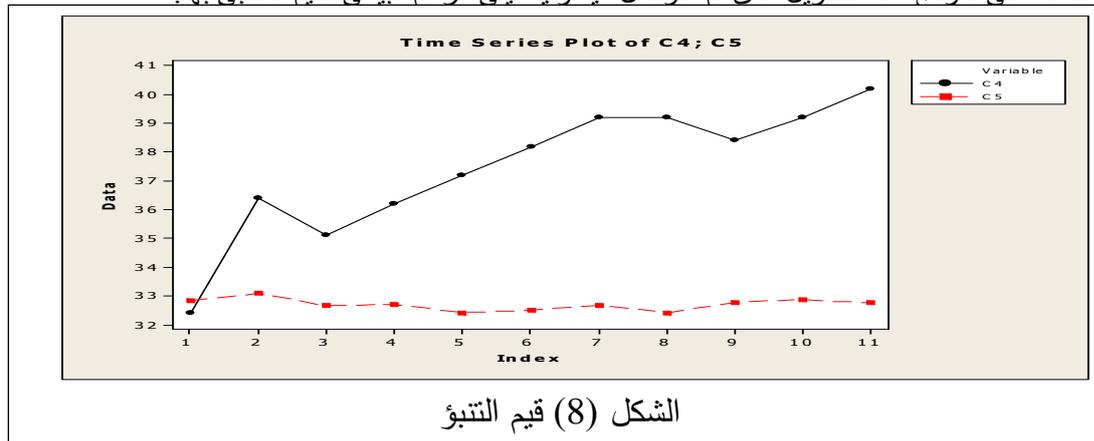
$$(1 - B)Y_t = 0.9380 (1 - B)U_{1(t-6)} + 0.8399 (1 - B)U_{2t} + 0.6653 (1 - B)U_{2(t-1)} + 0.7784 (1 - B)U_{2(t-6)} + (1 - 0.4594 B)a_t$$

ومن نموذج دالة التحويل النهائي نستنتج ان قوة التحمل للصب تتأثر بمتغير الادخال ثلاثي اوكسيد السليكون SiO_3 عند التخلف السادس كما ويتأثر بمتغير الادخال اوكسيد الكالسيوم CaO بصورة مباشرة (اي عند تخلفها الصفري) وبالتخلف الاول والسادس له ونلاحظ أن تأثير متسلسلي المدخلات يشتركان عند التخلف السادس ، نستنتج أن النموذج الملائم لمتسلسلة الإزعاج هي $MA(1)$ حيث بلغت قيمة معلمة النموذج (0.4594) وهذا يدل على أن قوة التحمل بعد مرور 7 ايام من الصب لمتغير الإخراج Y_t تتأثر بالتغيير العشوائي السابق a_{t-1} بمقدار (0.4594) . بعد مرور نموذج دوال التحويل بمراحل بنائه ثم تقديره ثم اجتيازه للفحوص التشخيصية بنجاح، أصبح من الممكن التنبؤ بالقيم المستقبلية لظاهرة قوة التحمل بعد مرور 7 ايام من الصب من خلال نموذج دالة التحويل الذي تم التوصل إليه كما يأتي :-

$$(1 - B)Y_t = 0.9380 (1 - B)U_{1(t-6)} + 0.8399 (1 - B)U_{2t} + 0.6653 (1 - B)U_{2(t-1)} + 0.7784 (1 - B)U_{2(t-6)} + (1 - 0.4594 B)a_t$$

إذ ان :

أدناه التنبؤ للقيم المستقبلية لظاهرة قوة التحمل بعد مرور 7 ايام من الصب لـ (11) $N_t = (1 - 0.4594 B)a_t$ مشاهدته اعتمادا على نموذج دالة التحويل الذي تم التوصل اليه وفيما يلي الرسم البياني للقيم المتنبئ بها:



2-2- بناء نموذج فضاء الحالة بمتغيري الادخال.

وبنفس الاسلوب المستخدم في المبحث الاول نجعل المتسلسلة مستقرة من حيث الوسط والتباين. ثم استخدام البرنامج الاحصائي الجاهز Matlab لبناء عدة نماذج لفضاء الحالة من الرتبة (1) الى الرتبة (10) وباستخدام طريقة تقدير خطأ التنبؤ (Prediction Error Method) لتقدير معاملات النموذج، ولاختيار النموذج الافضل من بين هذه النماذج تم استخدام المعايير الإحصائية وكالاتي:

الجدول (1): قيم معايير المعلومات لنماذج State-space model المقدره.

Si	Aic	Loss Function	Fit	FPE
S1	0.7975	2.14403	7.884%	2.2186
S2	0.8083	2.09323	23.17%	2.23885
S3	0.7824	1.97011	31.12%	2.17569
S4	0.7563	1.85374	25.53%	2.11165
S5	0.7569	1.79141	48.9%	2.10296
S6	0.7356	1.69371	27.3%	2.04718

S7	0.7247	1.61804	51.77%	2.012
S8	0.7039	1.53058	62.63%	1.95648
S9	0.6903	1.45821	79.79%	1.91469
S10	0.7488	1.49325	100%	2.01264

نلاحظ من الجدول (1) ان النمذج(S9) هو الافضل لأنه يقابل أقل قيم لمعايير المعلومات ، والنموذج هو :

$$\text{State-space model: } x(t+T_s) = A x(t) + B u(t) + K e(t) \quad (\text{معادلة الحالة})$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t) \quad (\text{معادلة المشاهدة})$$

إذ ان A مصفوفة ذات بعد $n \times n$ لمدخلات النظام (المدخل الاول وهو في معادلة الحالة) وان

B هي مصفوفة ذات بعد $n \times p$ للمدخل الثاني وهو في معادلة الحالة، وان C مصفوفة ذات بعد

$q \times n$ للمدخل الاول و D مصفوفة ذات بعد $q \times p$ للمدخل الثاني في معادلة المشاهدة وان K متجه

عمودي عدد عناصره هي n .

$$A = \begin{bmatrix} 0.46931 & 0.07536 & 0.487 & -0.15797 & -0.099701 & 0.70598 & 0.15445 & -0.036845 & 0.18942 \\ -0.058089 & 0.85819 & 0.0060968 & 0.12215 & 0.1886 & -0.16984 & -0.032954 & 0.16096 & -0.20199 \\ 0.17955 & -0.067084 & -0.27663 & -0.69491 & -0.061528 & -0.11194 & -0.19696 & 0.070177 & -0.20199 \\ -0.058511 & 0.051256 & 0.62812 & 0.16527 & -0.39078 & -0.46792 & -0.54228 & -0.098466 & -0.15624 \\ 0.1354 & 0.14058 & -0.22128 & 0.20798 & -0.72884 & -0.23667 & 0.47137 & -0.12793 & -0.18002 \\ -0.012339 & 0.15014 & -0.35691 & 0.020985 & -0.41698 & 0.50737 & -0.58452 & 0.087499 & 0.1635 \\ -0.047738 & -0.064405 & 0.050108 & -0.062064 & -0.1471 & 0.11849 & 0.16897 & 0.95231 & 0.097973 \\ 0.11503 & -0.057743 & -0.20533 & 0.47442 & 0.069402 & 0.077473 & -0.2562 & -0.12117 & -0.69574 \\ 0.03611 & 0.057807 & 0.11215 & -0.21311 & -0.056311 & 0.068978 & 0.051657 & 0.10358 & -0.77439 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.068879 & -0.077034 \\ -0.30742 & -0.1617 \\ -0.041368 & -0.040126 \\ -0.012975 & -0.023177 \\ -0.033286 & -0.087776 \\ -0.016175 & -0.011966 \\ -0.054665 & 0.011047 \\ -0.065764 & -0.036402 \\ 0.014351 & -0.0093004 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.037706 \\ 0.016274 \\ -0.0015434 \\ 0.0049504 \\ 0.00038064 \\ -0.00043516 \\ 0.0014344 \\ 0.0078249 \\ -0.0046954 \end{bmatrix}$$

$$X(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D = [0 \quad 0]$$

$$C = [-12.77 \quad 4.1486 \quad 7.9757 \quad -6.6067 \quad -3.3287 \quad 8.0054 \quad 3.6222 \quad -4.9284 \quad -0.22268]$$

$$\text{Discrete-time IDPOLY model: } A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)$$

$$A(q) = 1 - 0.2681 q^{-1} - 0.4403 q^{-2} + 0.4782 q^{-3} - 0.1216 q^{-4} - 0.08074 q^{-5} - 0.3983 q^{-6} + 0.3392 q^{-7} + 0.2836 q^{-8} - 0.2326 q^{-9}$$

$$B1(q) = -0.5358 q^{-1} + 0.175 q^{-2} - 0.4349 q^{-3} - 0.6458 q^{-4} + 0.6386 q^{-5} + 0.5896 q^{-6} - 0.888 q^{-7} + 0.4361 q^{-8} + 1.777 q^{-9}$$

$$B2(q) = 0.5639 q^{-1} + 0.06866 q^{-2} - 0.6419 q^{-3} + 0.3017 q^{-4} - 0.2681 q^{-5} + 0.5437 q^{-6} - 0.2659 q^{-7} + 0.09745 q^{-8} + 0.9527 q^{-9}$$

$$C(q) = 1 - 0.7642 q^{-1} - 0.455 q^{-2} + 0.7253 q^{-3} - 0.3729 q^{-4} - 0.1042 q^{-5} - 0.3137 q^{-6} + 0.5365 q^{-7} + 0.2783 q^{-8} - 0.4616 q^{-9}$$

ويكون النموذج النهائي بالصيغة الآتية:-

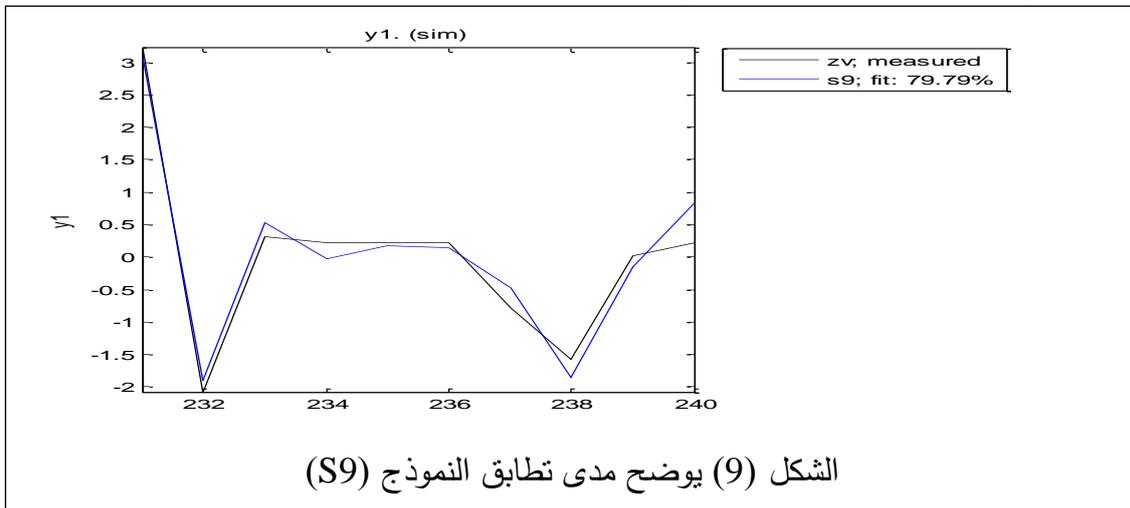
$$y_t = 0.2681y_{t-1} + 0.4403y_{t-2} - 0.4782y_{t-3} + 0.1216y_{t-4} + 0.08074y_{t-5} + 0.3983y_{t-6} - 0.3392y_{t-7} - 0.2836y_{t-8} + 0.2326y_{t-9} - 0.5358u_{1(t-1)} + 0.175u_{1(t-2)} - 0.4349u_{1(t-3)} - 0.6458u_{1(t-4)} + 0.6386u_{1(t-5)} + 0.5896u_{1(t-6)} - 0.888u_{1(t-7)} + 0.4361u_{1(t-8)} + 1.777u_{1(t-9)} + 0.5639u_{2(t-1)} + 0.06866u_{2(t-2)} - 0.6419u_{2(t-3)} + 0.3017u_{2(t-4)} - 0.2681u_{2(t-5)} + 0.5437u_{2(t-6)} - 0.2659u_{2(t-7)} + 0.09745u_{2(t-8)} + 0.9527u_{2(t-9)} + e_t - 0.7642e_{t-1} - 0.455e_{t-2} + 0.7253e_{t-3} - 0.3729e_{t-4} - 0.1042e_{t-5} - 0.3137e_{t-6} + 0.5365e_{t-7} + 0.2783e_{t-8} - 0.4616e_{t-9}$$

وتم التنبؤ لهذا النموذج والنتائج موضحة في الجدول الآتي :

الجدول (2) القيم التنبؤية والقيم الاصلية لنموذج فضاء الحالة

T	القيم الاصلية	القيم الاصلية بعد اخذ الفرق العادي	القم المتنبأ بها والتي تم أخذ الفرق لها	القيم المتنبأ بها بعد اعادة تحويلها
231	32.40	0.00	0.00	32.40
232	36.40	4.00	6.5286	38.9286
233	35.10	-1.30	-7.6251	28.7749
234	36.20	1.10	1.1977	36.2977
235	37.20	1.00	-12.1383	24.0617
236	38.20	1.00	3.5827	40.7827
237	39.20	1.00	-0.3815	37.8185
238	39.20	0.00	10.9607	50.1607
239	38.40	-0.80	-2.9161	36.2839
240	39.20	0.80	-0.8362	37.3638
241	40.20	1.00	-7.5459	31.6541

والشكل الآتي يبين لنا نسبة تطابق النموذج (S9):



الشكل (9) يوضح مدى تطابق النموذج (S9)

الاستنتاجات :

أ- تبين من خلال هذا البحث أن التنبؤ باستخدام نماذج فضاء الحالة افضل من التنبؤ باستخدام نماذج دالة التحويل ،حيث أظهر ان القيم المتنبئ بها باستخدام نماذج فضاء الحالة اقرب الى القيم الحقيقية وكذلك نسبة التطابق النموذج افضل باستخدام نماذج فضاء الحالة .

ب- من خلال نموذج دالة التحويل النهائي نستنتج ان قوة التحمل للصب تتأثر بمتغير الادخال ثلاثي اوكسيد السليكون SiO_3 عند التخلف السادس كما ويتأثر بمتغير الادخال اوكسيد الكالسيوم CaO بصورة متعاصرة وبدون تأخير زمني (اي عند التخلف الصفري) وبالتخلف الاول والسادس له ونلاحظ أن تأثير ثلاثي اوكسيد السليكون SiO_3 و اوكسيد الكالسيوم CaO يشتركان عند التخلف السادس.

المصادر:

- 1- الساداني ،احمد خلف حسين ،(2014):*استخدام الدلتا التحويل وفضاء الحالة والمقارنة بينهما في التنبؤ بقوة التحمل لمادة الاسمنت في معمل اسمنت سنجار*، رسالة ماجستير ، كلية علوم الحاسبات والرياضيات ،جامعة الموصل، العراق.
- 2- البدراني ،ظافر رمضان مطر ،(2002): *دراسة في تشخيص النظم التصادفية مع إشارة خاصة إلى أسلوب فضاء الحالة والاستقرارية*، أطروحة دكتوراه ، كلية علوم الحاسبات والرياضيات ،جامعة الموصل، العراق.
- 3- أي.ام.نيفيل(1985): *خواص الخرسانة*، ترجمة المهندس حقي أسماعيل محمد الجنابي، مدرس مساعد ،المعهد الفني في البصرة، حقوق الطبع والنشر محفوظة لمؤسسة المعاهد الفنية.
- 4- فاندل، والتر،(1983): *السلاسل الزمنية من الوجهة التطبيقية ونماذج بوكس-جنكنز*، تعريب ومراجعة عزام، عبد المرضي وهارون، احمد، دار المريخ للنشر(1992)، الرياض، المملكة العربية السعودية.
- 5- Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. ,(1976)، *“Time Series Analysis, Forecasting and Control”*, 2nd ed., Holden-Day, San Francisco, United States of America.
- 6- Durbin, J. and Koopman, S.J. (2001) *“Time Series Analysis by State Space Methods”* Oxford University Press.
- 7- Jong, M. T. (1982): *“Methods of Discrete Signal and System Analysis”*, McGraw-Hill, Inc., New York, U.S.A.
- 8- Kamen, E. (1987): *“Introduction to Signal and Systems”*, Macmillan Publishing Company, New York, U.S.A.
- 9- Kanjilal, P. P. (1995): *“Adaptive Prediction and Predictive Control”*, Peter peregrinus Ltd., London.
- 10- Ljung, L. (1999): *“System Identification-Theory for the User”*, 2nd. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J. London, UK.
- 11- Makridakis, S. Wheelwright, S.C. and McGee,V. E. ,(1983) ، *“Forecasting: Methods and Applications”*, 2nd ed., John-Wiley and Sons, New York, United States of America.
- 12- Makridakis, S., Wheelwright, S.C. and Hyndman, R., (1998), *“Forecasting Methods and Applications”*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York.
- 13- Nelles, O. (2001): *“Nonlinear System Identification from Classical Approach to Neural Network and Fuzzy Models”*, Springer Verlag Belin Heidelberg Germany.
- 14- Rowell, D. (October /2002), *“State-Space Representation of LTI (Linear and Time-invariant) Systems”*, Analysis and Design of Feedback Control Systems.
- 15- Tong, Howell (1996): *“Non-linear Time Series- A Dynamical System Approach”*, Oxford University Press Inc., New York, U.S.A.
- 16- Yaffee,R.A. and McGee,M.,(1999) ، *“Introduction To Time Series Analysis and Forecasting with Application Of SAS and SPSS”*, Academic press ,INC.