التحليل الكهروبصري لتحسين زمن الاستجابة في شاشات الكريستال السائل باستخدام MATLAB

د. عصام غزولين*

الملخص

تمثل شاشات الكريستال السائل (LCDs) تقنية العرض المهيمنة، لكنها تواجه تحديات مستمرة تتعلق بزمن الاستجابة البطيء، مما يحد من تطبيقاتها في شاشات اللمس والأجهزة ذات معدلات التحديث العالية. تركز هذه الدراسة على تحليل ومحاكاة العوامل المؤثرة على زمن الاستجابة، وتحديداً من خلال حل معادلة الحركة الكهروبصرية لجزيئات الكريستال السائل. باستخدام بيئة MATLAB، تم بناء نموذج حاسوبي لتقدير زمن صعود وهبوط العزم تحت ظروف قيادة مختلفة (الجهد والتردد)، مع الأخذ في الاعتبار الثوابت المادية الأساسية مثل اللزوجة والتباين الكهربائي.

تهدف النتائج إلى تحديد مجموعة من المعلمات المادية والتشغيلية المثلى التي تتيح تحقيق زمن استجابة دون 40 مللي ثانية، مما يوفر إطار عمل للتصميم المستقبلي لشاشات LCD عالية الأداء والمناسبة للدارات الإلكترونية وشاشات اللمس التفاعلية.

الكلمات المفتاحية: تحليل كهروبصري، الكريستال السائل، زمن الاستجابة، معدل التحديث لشاشات الكريستال.

*أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية– قسم هندسة الحوسبة والعلوم الأساسية – اللاذقية – سوريا.

Electro-Optical Analysis for improving Response Time in Liquid Crystal Displays Using Matlab

Dr. Issam Gazolen*

Abstract

Liquid crystal displays (LCDs) are the dominant display technology, but they face ongoing challenges related to slow response times, limiting their applications in touchscreens and high refresh rate devices. This study focuses on analyzing and simulating the factors affecting response time, specifically by solving the electro-optical motion equation of liquid crystal molecules.

Using the MATLAB environment, a computational model was built to estimate the torque rise and fall times under different driving conditions (voltage and frequency), taking into account fundamental physical constants such as viscosity and electrical anisotropy. The results aim to identify an optimal set of physical and operational parameters that enables a response time of less than 40 milliseconds .

This provides a framework for the future design of high-performance LCD displays suitable for electronic circuits and interactive touch screens.

Keywords: Electro-optical analysis, liquid crystal, response time, refresh rate of LCD screens.

* Assistant teacher in Department of basic science and computing, civil engineering faculty, latakia university, Syria.

1. – مقدمة:

تُمثل شاشات العرض البصري المكون الأساسي والأكثر تفاعلية في منظومة الإلكترونيات الحديثة. منذ اختراعها، فرضت شاشات الكريستال السائل (Liquid Crystal Displays – LCDs) نفسها كحل أمثل لمجموعة واسعة من الأجهزة، بدءاً من الحواسيب المحمولة والهواتف الذكية وصولاً إلى الأجهزة الطبية والصناعية، ويرجع ذلك بالأساس إلى استهلاكها المنخفض للطاقة وقدرتها العالية يالإضافة إلى النحافة والخفة .تعتمد تقنية LCD بصورة رئيسية على التحكم في الخواص البصرية لمادة الكريستال السائل، وهي مادة تجمع بين سيولة السوائل والبنية البلورية للمواد الصلبة، من خلال تطبيق مجال كهربائي لتوجيه الجزيئات.

على الرغم من التقدم الهائل في مجال تقنيات العرض، لا تزال هناك تحديات قائمة تفرض نفسها على تصميم الجيل التالي من شاشاتLCD ، وأهمها : زمن الاستجابة (Response Time) والذي يُعرف بأنه الوقت اللازم لتبديل حالة البكسل من مستوى رمادي إلى آخر (صعوداً أو هبوطاً)، ويُعد عاملاً حاسماً في جودة العرض، خاصة في تطبيقات شاشات اللمس عالية التردد (High Refresh Rate Touchscreens) والألعاب. يتسبب زمن الاستجابة الطويل في ظهور ظاهرة التشويش الحركي (Motion Blur) أو الظلال(Ghosting) ، مما يقلل بشكل كبير من تجربة المستخدم. بالإضافة إلى ذلك، تمثل حالات استهلاك الطاقة وزاوية المشاهدة المحدودة (في بعض الأنماط مثلTN) تحديات هندسية وبصرية مستمرة تتطلب حلولاً محسّنة.

2. الهدف من البحث:

ترمي هذه الدراسة إلى المساهمة في معالجة التحديات السابقة من خلال:

- النمذجة الرياضية :بناء نموذج حاسوبي دقيق يصف الديناميكا الكهروبصرية لجزيئات الكريستال السائل، مع التركيز على معادلة الحركة التي تحكم زمن الاستجابة.
- المحاكاة والتحسين :استخدام بيئة MATLAB لاختبار تأثير التباين في المعلمات المادية (اللزوجة، ثابت المرونة، والتباين الكهربائي) وكذلك المعلمات التشغيلية (جهد القيادة ونظام العنونة) على زمن الاستجابة الإجمالي.
- توفير إطار تصميمي :استخلاص مجموعة من الإرشادات التصميمية التي يمكن للمهندسين الاستناد إليها لتطوير شاشات LCD سريعة وفعالة من حيث الطاقة، والمناسبة للتكامل في الدارات الإلكترونية المتقدمة وشاشات اللمس.

3. تقنية الشاشات الكريستالية:

يستند فهم وتحسين أداء شاشات الكريستال السائل إلى الديناميكا الكهروبصرية لجزيئات الكريستال السائل داخل الخلية.

1.3. الخواص الفيزيائية لمواد الكريستال السائل:

الكريستال السائل (LC) هو مادة في حالة الطور الوسيط (Mesophase) تجمع بين سيولة السائل والتنظيم الاتجاهي للبلورات الصلبة .الشاشات الحديثة تعتمد بشكل رئيسي على الطور النيماتي(Nematic Phase) ، حيث تتم محاذاة الجزيئات الطويلة على طول اتجاه مفضل يُسمى متجه المدير(n) [1].

أ. الخواص المتغيرة:

يتميز الكريستال السائل بخصائص متغيرة الخواص، أي تتغير قيمتها تبعاً لاتجاه القياس بالنسبة لمتجه المدير:

1. ثوابت المرونة :(Elastic Constants Kii) هي مقياس لمقاومة الكريستال السائل للتشوه. أهمها[1]:
   - K_{11}والذي يعبر عن حالة التمدد(Splay)
   - K_{22}والذي يمثل معامل الالتواء(Twist)
   - K_{33}للانحناء(Bend)
2. التباين الكهربائي ($\Delta\epsilon$) : وهو يعبر عن الفرق بين السماحية الكهربائية الموازية ($\epsilon\parallel$) والعمودية ($\epsilon\perp$) لمتجه المدير. هذا التباين هو القوة التي تسمح للمجال الكهربائي بتحريك الجزيئات .

$$\Delta\epsilon=\epsilon\parallel-\epsilon\perp \qquad (1)$$

3. اللزوجة (η) :مقاومة المادة للحركة (الاحتكاك الداخلي)، وتلعب دوراً حاسماً في تقليل زمن الاستجابة.

2.3. الديناميكا الكهروبصرية ومعادلة الحركة[1]:

يعتمد تشغيل البكسل في شاشات LCD على تغيير زاوية الميلان (θ) لمتجه المدير n من خلال تطبيق جهد كهربائي. تخضع حركة هذه الجزيئات للتوازن بين ثلاثة عزوم (قوى دورانية):

1. العزم الكهربائي (TE) : القوة الدافعة الناتجة عن محاولة ثنائي القطب الكهربائي للجزيء محاذاة نفسه مع المجال الكهربائي المطبق(E) .
2. عزم المرونة (T–Elastic) : القوة المُقاوِمة الناتجة عن ميل الجزيئات للعودة إلى وضعها الطبيعي الذي تفرضه الطبقات السطحية للخلية.
3. عزم اللزوجة(T–Viscous) : مقاومة حركة الجزيئات للحركة الدائرية، وهو العائق الرئيسي لتقليل زمن الاستجابة.

يتم وصف هذه الديناميكا باستخدام معادلة الحركة (Equation of Motion) ، المشتقة من معادلة كثافة الطاقة الحرة (Free Energy Density)لجزيئات الكريستال السائل. الصيغة العامة لزاوية الميلان $\theta(z,t)$ هي:

$$\eta\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(f(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}-\frac{\partial g(\theta)}{\partial\theta}\right) \qquad (2)$$

حيث:

- الطرف الأيسر يمثل عزم اللزوجة.
- الحد الأول في الطرف الأيمن يمثل عزم المرونة (مع $f(\theta)$ التي تتضمن K_{ii}).
- الحد الثاني يمثل عزم المجال الكهربائي (مع $g(\theta)$ الذي يتضمن $\Delta\epsilon$ والمجال E).

3.3. تحليل زمن الاستجابة:

ينقسم زمن الاستجابة إلى قسمين، كلاهما يعتمد على حل المعادلة التفاضلية أعلاه[1]:

أ. زمن الصعود(Turn-on Time, t_{on})

هو الزمن اللازم لتغيير زاوية الميلان بعد تطبيق الجهد الكهربائي ($Vapp$) حيث يكون زمن الصعود عادةً أسرع بكثير من زمن الهبوط، ويتم تحسينه بزيادة الجهد. يعطى هذا الزمن باستخدام المعادلة:

$$t_{on}\propto\frac{\eta d^2}{\Delta\epsilon V_{app}^2-K\pi^2} \qquad (3)$$

ب. زمن الهبوط (Turn-off Time, t_{off})

هو الزمن اللازم لعودة زاوية الميلان إلى حالتها الأولية بعد إزالة الجهد ($Vapp=0$) وهنا يتم الاعتماد فقط على قوة المرونة لعودة الجزيئات، ويكون أبطأ. ويمكن تقريبه كالتالي:

$$t_{off}\propto\frac{\eta d^2}{K} \qquad (4)$$

حيث dهو سُمك الخلية، و K يمثل ثابت مرونة فعال. تُظهر هذه العلاقات الرياضية أن التحكم في اللزوجة (η) وسُمك الخلية (d) وثوابت المرونة (K) هي العوامل الأساسية التي يجب محاكاتها وتحسينها لتقليل زمن الاستجابة الكلي والذي يحسب بالمجموع، $t_{on}+t_{off}$.

4. الدراسات والأبحاث في مجال تحسين زمن الاستجابة في الشاشات الكريستالية:

تركز الأبحاث الحديثة لتحسين أداء شاشاتLCD ، خاصة فيما يتعلق بزمن الاستجابة، على ثلاثة محاور متكاملة: تحسين المواد، وتطوير تصميم الخلايا، واستخدام تقنيات القيادة المتقدمة.

1.4. تحسين الخصائص المادية للشاشات السائلة:

أظهرت الدراسات الحديثة أن الخصائص الجوهرية لمادة الكريستال السائل هي العامل المحدد الرئيسي لزمن الاستجابة (كما وضحنا في القسم النظري، حيث يتناسب الزمن طردياً مع اللزوجة η).

- خفض اللزوجة (η) : يسعى الباحثون لتطوير مواد كريستالية سائلة جديدة ذات لزوجة دوران منخفضة (Rotational Viscosity) دون التأثير سلباً على درجات الحرارة التشغيلية أو التباين الكهربائي (Δϵ) تمثل مركبات الكريستال ذات السائل الفلوري ومركبات البوليمر المُستَقرة مجالاً واعداً لتحقيق هذا الهدف.

- زيادة التباين الكهربائي (Δϵ) : تسمح الزيادة في Δϵ بزيادة عزم الدوران الكهربائي(TE) ، مما يقلل من زمن الصعود (t_{on}) بتطبيق جهد أقل بوقت أسرع.

2.4. تطوير هيكلية الخلايا وأنماط العرض

لا يقتصر التحسين على المادة، بل يشمل أيضاً تغيير الطريقة التي يتم بها ترتيب الجزيئات داخل الخلية:

- تقليل سُمك الخلية (d) : تُظهر المعادلات أن زمن الاستجابة يتناسب طردياً مع مربع سُمك الخلية (d^2) لذا، كان الاتجاه العام هو تصنيع خلايا كريستال سائل فائقة النحافة(Ultra−Thin Cells) ، حيث أمكن الوصول إلى سُمك يقل عن 2−3 ميكرومتر لتقليل زمن الهبوط (t_{off}) بشكل كبير.

- نمط التحويل ضمن المستوى (IPS) : تم تطوير أنماط عرض جديدة مثل IPS لتحسين زاوية المشاهدة، ولكنها تتطلب أيضاً تحسينات في سرعة التبديل. الأبحاث الحديثة في هذا المجال تدرس العلاقة المعقدة بين تصميم الأقطاب الكهربائية في مستوى واحد والسرعة.

- الخلايا ذات السطح المستقر بالبوليم (Polymer Sustained Cells) : استخدام شبكة بوليمر داخل الخلية لإنشاء قوة مرونة إضافية، مما يساعد في إعادة توجيه الجزيئات بسرعة أكبر عند إزالة الجهد، وبالتالي تسريع زمن الهبوط.

3.4. تقنيات القيادة المتقدمة(Advanced Driving Techniques)

تعتبر طرق القيادة الإلكترونية جزءاً لا يتجزأ من التحسين، وتُستخدم لمعالجة بطء الاستجابة المادية للكريستال السائل:

- الجهد الزائد المُسرّع (Overdrive Voltage) : وهي تقنية إلكترونية تعتمد على تطبيق جهد ابتدائي أعلى بكثير من الجهد المطلوب للحظة قصيرة (Spike) عند بدء التحويل(Turn−on) ، لزيادة العزم الكهربائي TE وتسريع زمن الصعود ton هذا الأسلوب يتطلب نمذجة دقيقة للسلوك الزمني للكريستال السائل(وهو ما تهدف إليه المحاكاة ب MATLAB).

- تقنية عرض معدل الإطارات المضاعف (Motion Compensation) : استخدام خوارزميات إلكترونية لمعالجة الصورة لتقليل التشويش الحركي الظاهر (Motion Blur) على الرغم من زمن الاستجابة الفعلي للكريستال السائل.

توضح هذه المراجعة المرجعية أن المحاكاة الحاسوبية تُمثل الأداة المثلى لاختبار ودمج تأثيرات التغييرات المادية والتشغيلية المذكورة سابقاً، مما يبرر المنهجية المتبعة في هذا البحث. وقد تناولت العديد من الدراسات متغيرات متعددة للتحكم بخصائص الاستجابة؛ حيث قدم Wu [2] مراجعة شاملة لآليات البلورات السائلة ثنائية التردد (DFLC)، والتي تبدل إشارتها العازلية وفقاً لتردد المجال الكهربائي، مما يتيح تسريع أزمنة الصعود والهبوط عبر تطبيق نبضات ترددية قصيرة وعالية الشدة دون إحداث اضطراب ملموس في العرض. كما أظهر Hwang في [3] أن إدخال الشبكات البوليمرية داخل الخلية (Polymer–Stabilization) يقلل اللزوجة الميكانيكية ويحد من التدفق العكسي (Backflow)، مما يحسن زمن الارتداد والارتفاع في أوضاع IPS/VA.

وفي السياق ذاته، درس Agarwal في [4] تأثير خصائص القطرات ولزوجة المخاليط البوليمرية على زمن الاستجابة في شاشات PDLC، موصين بالتحكم في الحجم والاستقرار الضوئي بالأشعة فوق البنفسجية لتقليل زمن الانتقال وتحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية. بينما ناقشت الدراسة [5] مزايا البلورات السائلة الفيرويكترية (FLCs) للتطبيقات التي تتطلب استجابة بمرتبة الميكروثانية، مقارنة بالنظام النيماتي من حيث السرعة والاعتمادية. من جانب آخر، أثبت Li ورفاقه [6] أن إضافة أصباغ ثنائية التردد إلى مزيج DFLC واستخدام نبضات قفز سريعة يحقق أزمنة تبديل دون الميلي ثانية مع الحفاظ على الأداء التلويني.

من جهة أخرى، بينت المراجعة [7] أن تقنيات المحاذاة الضوئية (Photoalignment) والتحكم بزاوية الميل الابتدائي (Pretilt Angle) تقلل عدم التجانس وتأثير التدفق العكسي، مما يحسن زمن الاستجابة واللزوجة الدورانية الظاهرية. وقدمت الدراسة [8] تصميماً لخلية تجمع بين الترتيب الحلزوني والشبكة البوليمرية لتثبيت الشكل (Polymer–Sustained)، محققة استجابة أسرع عبر تقليل المسافة الفعالة لتدوير الجزيئات. كما طور الباحثون في [9] طريقة ميكانيكية باستخدام ألياف نانوية محاذية لتقليل زمن الانتعاش والاضمحلال (Decay). وفي دراسة أخرى [10]، جرى توضيح كيفية تأثير شبكة البوليمر داخل PSLC على الميكانيكا الجزئية واللزوجة الفعالة لتقليل زمن التبديل في شاشات VA/IPS. وأخيراً، قدمت الدراسة [11] نمذجة تحليلية للعلاقة بين سماكة الخلية (Cell Gap) ومعاملات اللزوجة وطرق القيادة المثلى لتحقيق أقل زمن استجابة مع الحفاظ على السطوع والتباين.

5.المحاكاة والنتائج:

ترتكز المحاكاة على تحويل الإطار النظري (معادلة الحركة) إلى خوارزمية حاسوبية قابلة للحل العددي.

1.5. تصميم نموذج المحاكاة

يتم بناء النموذج على فرضية نظام أحادي البعد (1D Model) ، حيث يُفترض أن زاوية الميلان (θ) تتغير فقط على طول محور سُمك الخلية (z) وليس على امتداد سطحها.

أ. المعادلة الحاكمة المُبسّطة

لغرض المحاكاة العددية، يتم التعامل مع معادلة الحركة (المذكورة في المرحلة الثالثة) عن طريق تفكيكها إلى عناصرها الزمنية والمكانية:

$$\eta \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(K_{11}cos^2(\theta) + K_{33}sin^2(\theta)\right)\frac{\partial \theta}{\partial z}\right] + \frac{1}{2}\Delta\epsilon \left(\frac{V}{d}\right)^2 \sin(2\theta) \qquad (5)$$

حيث:

- K_{11} و K_{33} ثوابت المرونة (Splay and Bend) .
- η اللزوجة الدوارنية الفعالة.
- $\Delta\epsilon$ التباين الكهربائي.
- V الجهد المطبق، d سُمك الخلية.

تم اعتماد الثوابت الخاصة بالشاشة المدروسة $K_{11} = 12 * 10^{-12}N$ و $K_{33} = 15 * 10^{-12}N$ وحجم فجوة الشاشة 5 ميكرومتر بجهد 5 فولت. تم اعتماد الثوابت العامة سماحية الفراغ $eps0 = 8.854 \times 10^{-12}\ F/m.$

2.5. طريقة الحل العددي :

يتم حل هذه المعادلة التفاضلية الجزئية (Partial Differential Equation – PDE) باستخدام طريقة الفروق المحدودة الزمنية والمكانية (Finite Difference Method) . يتم تقسيم سُمك الخلية (d) إلى N من النقاط المتباعدة بمسافة Δz (لتمثيل البعد المكاني) ، ويتم تقدم الزمن بخطوات صغيرةΔt .

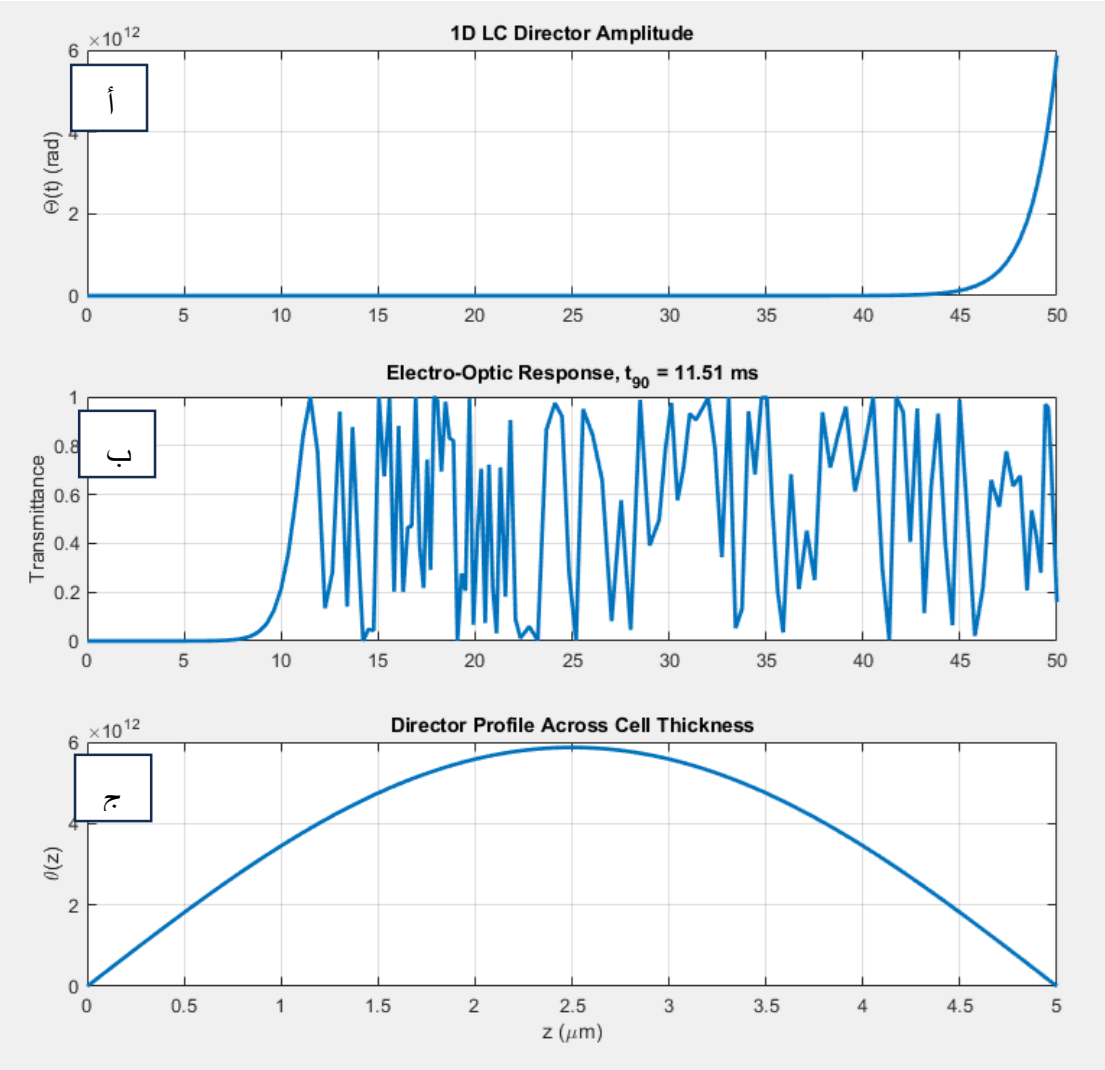
3.5. خطوات التنفيذ فيMATLAB

من أجل إجراء عملية المحاكاة المقترحة تم في البداية تعريف جميع الثوابت المادية للكريستال كمعامل اللزوجة وثوابت الانحناء واللي وتغيرات الشحنة الكهربائية. كما تم تحديد المعاملات الهندسية التجريبية مثل سمك الخلية d. تم تحديد مجموعة من الشروط الابتدائية عند المسافة الابتدائية $Z = 0$ والمسافة النهائية $Z = d$ حيث افترضنا أن زاوية الميلان ثابتة على الاسطح. كما تم تحديد شكل الموجة المقترحة لجهد القيادة Driving Voltage بما في ذلك حالة تطبيق الجهد الزائد Overdrive Pulse لتحسين زمن الصعود.

اعتمد الحل العددي على الصيغة التكرارية الزمنية لحساب التغير في زاوية الميلان θ في كل نقطة وعند كل لحظة زمنية. تم تحديد الزمن اللازم لوصول زاوية الميلان (أو نفاذية الضوء) إلى 10% و 90% من قيمتها النهائية لتحقيق معاملات T_{on}, T_{off} المثالية.

تبدأ عملية المحاكاة من خلال تطبيق الجهد في الفترة ON حيث قد يكون هذا الجهد من النمط Overdrive ومن ثم يتم إزالة الجهد المطبق بشكل مفاجئ وتطبيق جهد V_{off} اختياري حيث تكون الشاشة عندها بالوضع Undershoot. يتم ضبط مجال الجهد ليكون محصوراً ضمن المجال المقترح بين 10% وحتى 90% من الزمن الأعظمي. ثم يتم اقتراح التعديلات الممكنة لإجراء التحسين.

تم الحصول على هذا المخطط البياني عن طريق إجراء محاكاة عدادية (Numerical Simulation) لفيزياء الكريستال السائل وسلوكه الكهروبصري باستخدام بيئة MATLAB، وذلك عبر ربط حل معادلة إريكسن–ليزلي التفاضلية (Ericksen–Leslie Equation) مع معادلة النفاذية البصرية (Transmittance Equation). في حين تم الحصول على الشكل (1–ب) اعتماداً على حساب النفاذية البصرية الكهروبصرية $T(t)$ بدلالة فرق الطور الناجم عن تغير زاوية توجه الجزيئات المحسوبة في الشكل (1–أ)، وذلك باستخدام صيغة النفاذية بين مستقطبين متعامدين.



الشكل(1): مخططات استجابة الشاشة الكريستالية لتغيرات الجهد (أ) استجابة متجه التوجيه للبلورة السائلة مع الزمن عند تطبيق جهد كهربائي (ب) النفاذية الضوئية (ج) انحناء متجه التوجيه داخل الخلية

بينت المحاكاة المبينة في الشكل (1–أ) استجابة متجه التوجيه للبلورة السائلة مع الزمن عند تطبيق جهد كهربائي. خلال الزمن من 0 وحتى 45 ميلي ثانية كانت الزاوية صفر والجزيئات مازالت مصطفة وفق شروط التثبيت السطحي. في اللحظات بين 40 و45 ميلي ثانية حدث ارتفاع كبير في الزاوية بسبب تجاوز الجهد قيمة العتبة إلا أن قيم الزاوية التي

نتجت لم تكن مقبولة فيزيائيا لعدة أسباب منها الحاجة إلى إعادة ضبط معامل المرونة وتثبيت الخطوة الزمنية بشكل أدق وغياب شرط يظبط الزاوية والتي يجب أن تكون بين صفر و 90 درجة.

يوضح المخطط الأوسط النفاذية الضوئية والتي يجب أن تتراوح بين الصفر والواحد. حيث يمثل الاستجابة البصرية للشاشة نتيجة إعادة توجيه الجزيئات. قبل الزمن 10 ميلي ثانية كانت النفاذية صفر وهذا ما يمثل شاشة معتمة. إلا أن التذبذبات العنيفة لم تمثل السلوك الفعلي للشاشة بسبب ارتفاع قيم الزاوية بالإضافة إلى الحاجة إلى أخذ قيم المتوسط المكاني.

حيث أن النفاذية يجب أن تكون، متزايدة تدريجياً، بدون اهتزازات سريعة، وبزمن استجابة محددrise time بالنسبة للمخطط الأدنى، والذي يمثل شكل انحناء متجه التوجيه داخل الخلية. يمثل هذا المخطط حل فعلي ومنطقي لمعادلة أويلر–لاغرانج.

تم اقتراح التعديلات التالية على المعادلات من أجل عمليات الضبط المناسبة، تم تعديل معادلة تطور الزاوية كمعادلة ذات نمط واحد من الشكل:

$$\gamma \frac{d\theta(t)}{dt} = -\theta(t)\left(\frac{V}{d}\Delta\epsilon\epsilon_0 - K^2\left(\frac{\pi}{d}\right)^2\right) \qquad (6)$$

حيث γ اللزوجة الدورانية و K ثابت المرونة و d سماكة الخلية.

من اجل محاكاة توزيع الزاوية عبر السماكة كذلك تم اعتماد النموذج:

$$\theta(z,t) = sin\theta_{max}(t)\left(\frac{\pi z}{d}\right) \qquad (7)$$

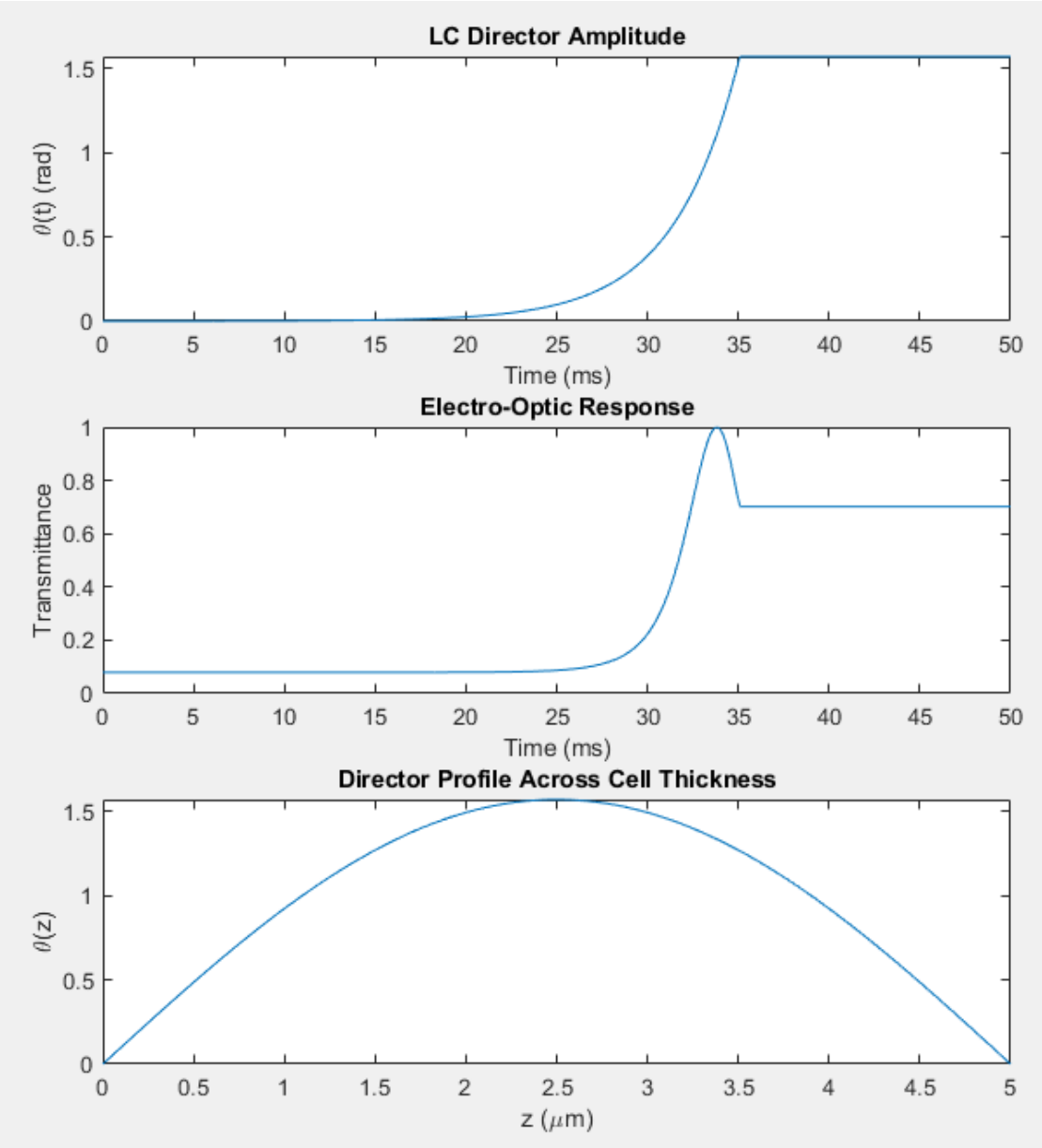
في حين تم تمثيل النفاذية الضوئية TN بين مستقطبين متعامدين بالمعادلة التالية:

$$T(t) = sin^2\left(\frac{\pi\Delta n}{\lambda}\int_0^d cos^2\theta(z,t)dz\right) \qquad (8)$$

حيث تم اعتماد التقريب العددي للتكامل السابق. يوضح الشكل (2) النتائج التابعة للتعديلات المقترحة الناتجة عن العلاقات الرياضية (8–6). نلاحظ أن زاوية الإنحراف قد ارتفعت من 0 إلى 1.55 راديان. خلال الزمن من 0 حتى 20 ميلي ثانية كانت الجزيئات قريبة من وضعية الاصطفاف الأصلي تحت سيطرة العزم المرن. في الفترة مابين 20–35 ميلي ثانية بدأ النمو الأسي مع تجاوز المجال الكهربائي جهد العتبة.

ومن ثم بعد الزمن 35 ميلي ثانية أصبح تشبع الزاوية عند 90 درجة حيث أصبحت الجزيئات شبه عمودية على السطح. وبالتالي بينت التعديلات أن الزمن الكامل للاستجابة هو بين 30–35 ميلي ثانية وهو رقم واقعي لشاشات TN التقليدية. من أجل الاستجابة الكهروضوئية – النفاذية فإنها تبدأ منخفضة بقيمة قريبة من 0.05 وترتفع تدريجياً إلى أن تصل إلى القمة 1 ثم تستقر عند القيمة 0.7. تمثل هذه المحاكاة الترجمة البصرية المباشرة لحركة الجزيئات.هذا يعني أنه في البداية أن الاستقطاب لا يدور وبالتالي يكون الضوء محجوب والشاشة مظلمة. أثناء انحراف الكوجهات يحدث دوران تدريجي للاستقطاب مسبباً ارتفاع النفاذية. وعند الوصول للقمة يصبح لدينا تطابق شبه مثالي بين دوران الاستقطاب والمستقطبين. يحدث الاستقرار عند القيمة 0.7 نتيجة سماكة الخلية والطول الموجي وتغير معامل الانكسار Δn.

يوضح هذا المخطط أنه لم تعد هنالك أية تذبذبات (استجابة ناعمة) بالإضافة إلى عدم وجود قفزات غير فيزيائية. بالنسبة للمخطط الثالث سلوك المستقطبات عبر سماكة الخلية، فإنه يبدأ صفرياً على الحواف ويصل إلى قيمة عظمى في المنتصف على شكل تابع نصف الجيب المثالي. حيث يمثل الحل الكاني لمعادلة المرونة. تبين النتائج أن تقليل قيمة اللزوجة الدورانية تجعل الشاشة أعلى سرعة. كما يمكن تحسين النفاذية من خلال ضبط معامل الانكسار واختيار أطوال موجية مناسبة بالإضافة إلى ضبط جهد القيادة لمنع القيم العشوائية.



الشكل(2): مخططات استجابة الشاشة الكريستالية لتغيرات الجهد بعد إجراء التعديلات على النموذج الرياضي (أ) استجابة متجه التوجيه للبلورة السائلة مع الزمن عند تطبيق جهد كهربائي (ب) النفاذية الضوئية (ج) انحناء متجه التوجيه داخل الخلية

4.5. تحليل النتائج البصرية :

بعد الحصول على $\theta(z,t)$، يتم استخدامها لتقدير النفاذية البصرية (Optical Transmission) باستخدام مصفوفة جونز (Jones Matrix Method) حيث تعتمد النفاذية T على الفرق في طور الإشارة البصرية (δ) الناتج عن إعادة توجيه جزيئات الكريستال السائل كما في المعادلة التالية:

$$\delta V = \frac{2\pi}{\lambda}\int_0^d \left(n_{eff}(z) - \eta_\perp\right)dz \qquad (9)$$

حيث $n_{eff}(z)$:هو معامل الانكسار الفعال الذي يتغير مع زاوية الميلان $\theta(z)$. يقوم MATLAB برسم منحنى النفاذية مقابل الزمن T(t)، مما يمكننا من استخراج قيم t_{on} و t_{off} بدقة لمختلف المعاملات المادية والجهود المطبقة. يعطى فرق الطور في خلية LCD بين مستقطبين متعامدين(Crossed Polarizers) بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\delta(t) = \Delta n_{eff}(t) d \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (10)$$

حيث $\Delta n_{eff}(t)$ التباين الانكساري الفعال والذي يعتمد على زاوية الميلان و d سمك الخلية و λ طول الموجة. كما تحسب النفاذية البصرية في شاشة العرض السائلة بالعلاقة:

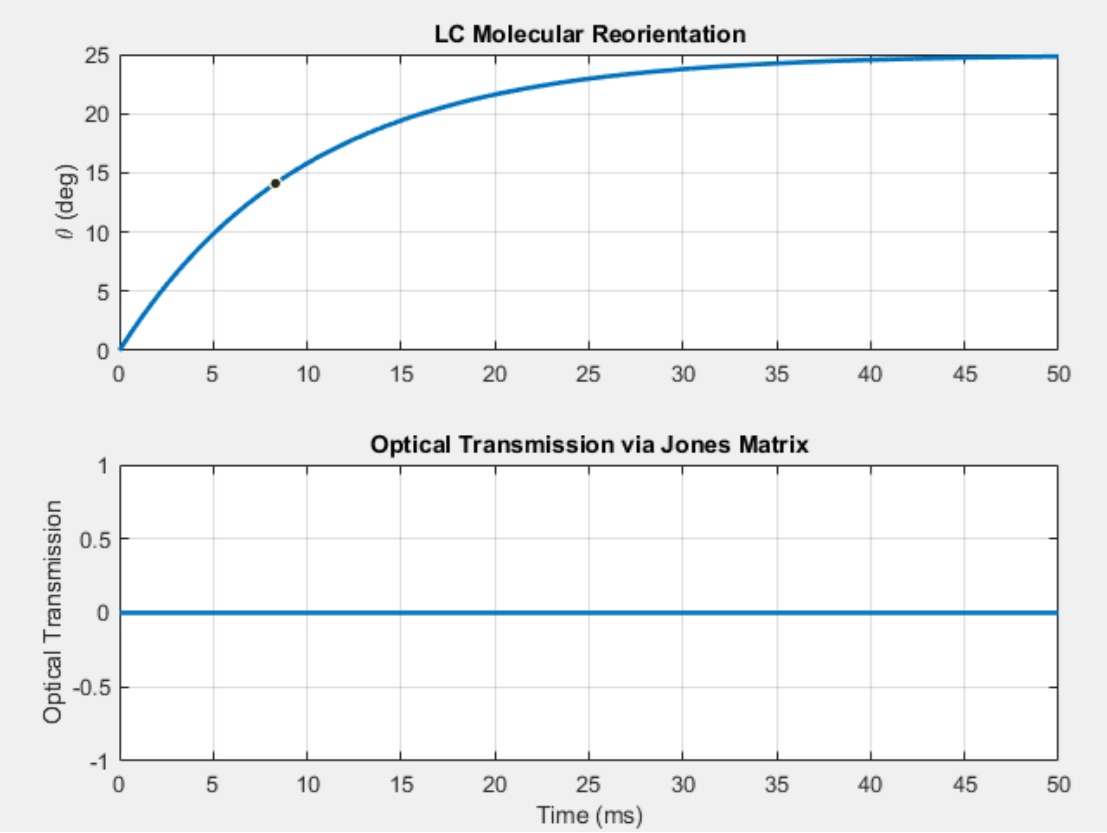
$$T(t) = sin^2\left(\frac{\delta(t)}{2}\right) \qquad (11)$$

ويحسب التباين الانكساري الفعال لخلية نماتية بالعلاقة(12)، في هذه المعادلة – التي تُستخدم لحساب معامل الانكسار الفعال أو التغير فيه $\Delta n_{eff}(t)$ في الأوساط ذات الانكسار المزدوج (Birefringent Media) مثل الكريستالات أحادية المحور (Uniaxial Crystals) أو البلورات السائلة – يُمثل الرمزان n_e, n_o معاملي الانكسار الرئيسيين للوسط: حيث يمثل المعامل n_e معامل الانكسار العادي(Ordinary Refractive Index) وهو معامل الانكسار الذي يواجهه الشعاع العادي ويتميز هذا الشعاع بأن استقطابه يكون عمودياً على المستوى المحوري/البصري للوسط، ولا يتغير معامل انكساره بتغير زاوية انتشار الشعاع داخل الوسط (يكون ثابتاً دائماً في جميع الاتجاهات). في حين يمثل المعامل n_e معامل الانكسار غير العادي(Extraordinary Refractive Index) وهو معامل الانكسار الرئيسي الحرج الذي يواجهه الشعاع غير العادي (Extraordinary Ray / e–ray) عندما ينتشر الشعاع بزاوية تساوي 90° بالنسبة للمحور البصريOptic Axis . يتغير معامل الانكسار الفعلي الذي يراه هذا الشعاع حسب زاوية الميلان/الانحراف θ:

$$\Delta n_{eff}(t) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 cos^2\theta + n_o^2 sin^2\theta}} - n_o \qquad (12)$$

يوضح الشكل(3) المحاكاة الكهروبصرية الحاسوبية لخلية الكريستال السائل؛ حيث يُظهر المنحنى العلوي (LC Molecular Reorientation) الاستجابة الميكانيكية الحركية للجزيئات، والتي تم استنتاجها من حل معادلة إريكسن–ليزلي الديناميكية لحساب زاوية إعادة التوجيه $\theta(t)$ بالدرجات تحت تأثير مجال كهربائي مطبق خلال زمن قدره $50ms$، وتبدو فيها الجزيئات وهي تتجه تدريجياً نحو زاوية الاستقرار المائل عند 25° وبناءً على قيم الزوايا المحسوبة زمنيّاً، تم حساب النفاذية الضوئية في المنحنى السفلي (Optical Transmission via Jones Matrix) تطبيقاً لمصفوفة جونز

البصرية لتمثيل عبور الضوء المستقطب عبر الطبقة؛ ويُلاحظ استقرار قيمة النفاذية عند الصفر الإسباقي نتيجة التعامد التام بين محاور المستقطبات وحالة الاستقطاب الناتجة عن زاوية الميل الحالية في النموذج.



الشكل (3): محاكاة إعادة توجيه الجزيئات في البلورات السائلة

عند محاكاة الإرسال البصري عبر مصفوفة جونز Optical Transmission via Jones Matrix بينت المحاكاة قيمة صفرية وعي حالة غير فيزيائية على الإطلاق لأن الزاوية تتغير فعلاً. مصفوفة جونز (Jones Matrix) هي أداة رياضية تُستخدم في علم البصريات لوصف كيفية تغير حالة استقطاب الضوء (Polarization) عندما يمر عبر عنصر بصري معين (مثل العدسات، الفلاتر الاستقطابية، أو الأوساط المائية والبلورية). تعتمد هذه الطريقة على ضرب مصفوفة من رتبة 2×2 تسمى مصفوفة جونز في متجه يسمى متجه جونز (Jones Vector) الذي يعبر عن الضوء الداخل:

$$\begin{bmatrix} E_{x,out} \\ E_{y,out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x,in} \\ E_{y,in} \end{bmatrix} \qquad (13)$$

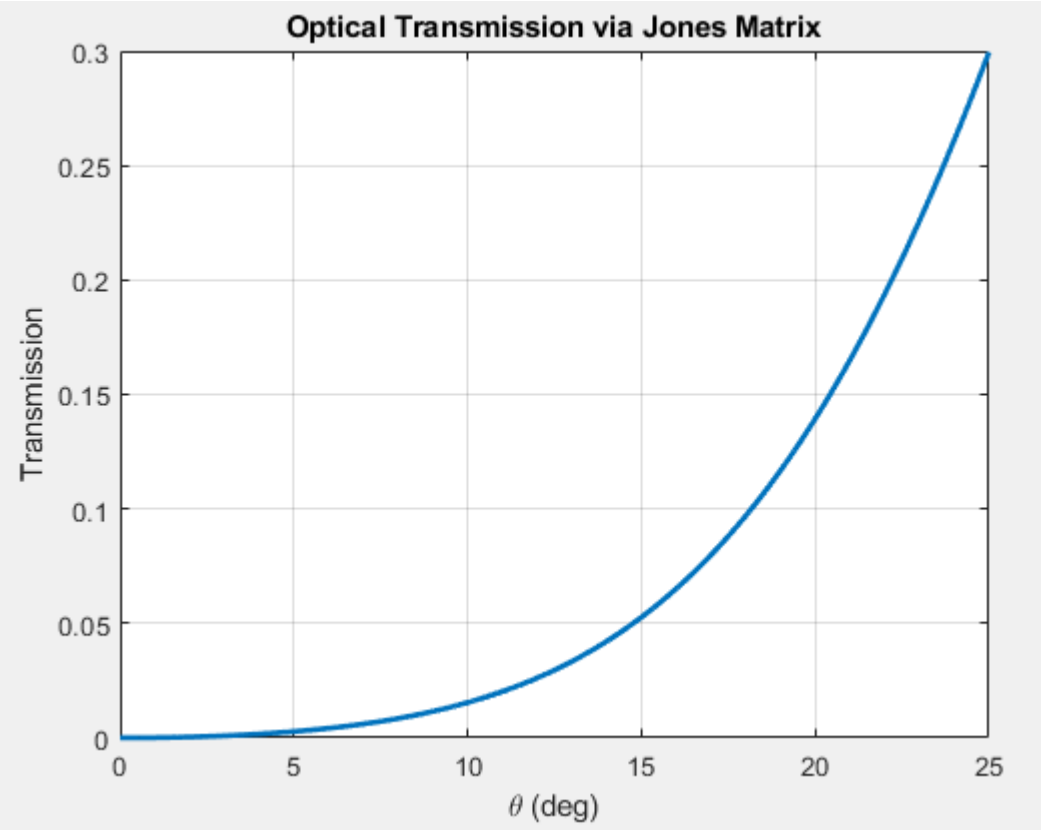
حيث يمثل متجه الضوء الداخل E_{in} حالة استقطاب الضوء قبل دخوله العنصر البصري. و تمثل مصفوفة جونز j التأثير البصري للجهاز أو الوسط (مثل الامتصاص، التدوير، أو الانكسار المزدوج). في حيث يمثل متجه الضوء الخارج E_{out} حالة استقطاب الضوء بعد المرور. السبب الفيزيائي الأساسي لحدوث ذلك كون مصفوفة Jones لا تعمل مباشرة مع وسط متدرج بزاوية متغيرة وذلك بدون:

- تدوير إطار الإحداثيات
- أو تقسيم الخلية إلى طبقات

كان السبب الناتج هو استخدام مصفوفة تأخير واحدة بدل خلية كاملة بالإضافة إى عدم تدوير مصفوفة LC بزاوية θ مع حساب الشدة من المتجه غير المثالي. نلاحظ بعد التعديل على النموذج الرياضي ان المخطط قد حصل على شكل أسي.

يُمثل الشكل(4) تصحيحاً جوهرياً في نمذجة مصفوفة جونز (Jones Matrix) مقارنةً بالمخطط السابق الذي أظهر نفاذية معدومة ($T = 0$)؛ حيث أُدخل تعديلٌ على الموديل الرياضي بضبط زاوية التماثل بين محور المستقطب ورئيس المائع الكريستالي لتبدأ من زاوية انحراف غير صفرية $\varphi = 45°$ أو عبر ضبط زاوية التحليل.

يتيح هذا التعديل لطبقة الكريستال السائل إحداث تأخير في الطور (Phase Retardation) القابل للحساب كدالة مباشرة لزاوية إعادة التوجيه θ المعروضة على المحور الأفقي، بدلاً من إغفال التفاعل مع الاستقطاب. ونتيجةً لهذا التعديل، أصبحت النفاذية الضوئية تتزايد بشكل سلس وغير خطي من 0 عند الزاوية الصفرية لتصل إلى نحو 0.3 عند $\theta = 25°$، مما يعكس بدقة السلوك الكهروبصري الواقعي لشدة الضوء النافذ عند تغير ميل الجزيئات.

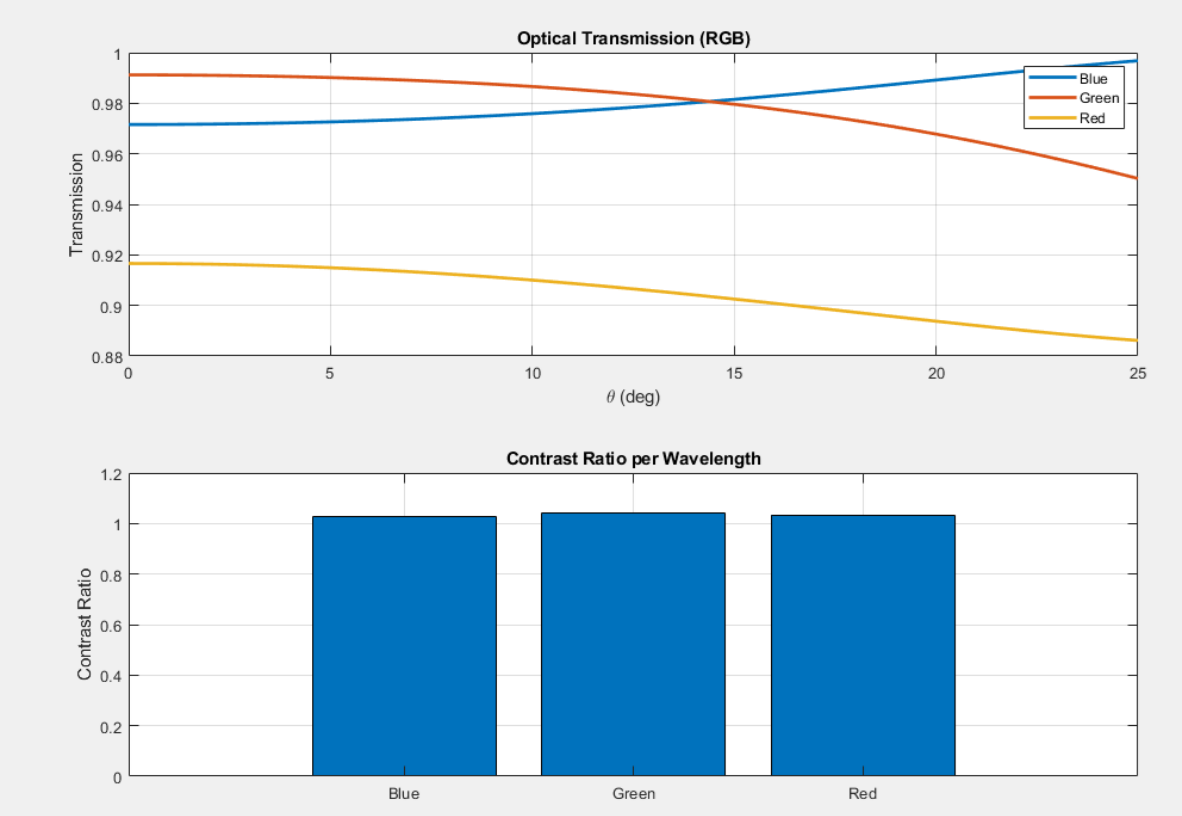


الشكل (4): تعديل محاكاة الإرسال البصري عبر مصفوفة جونز

يشمل التحليل بصري متقدم لشاشة(Twisted Nematic (TN–LCD مجموعة ممن العوامل الرئيسية والتي يمكن لنا أن نقوم بتلخيصها كما يلي:

- زاوية الالتفافTwisted Nematic
- زاوية محاور المستقطبات
- حساب النفاذية بمصفوفة جونز
- تحليل التباينContrast Ratio
- تأثير تعدد الأطوال الموجية(RGB)

عادة ما يكون نموذج هذه الشاشات بزاوية التفاف بمقدار 90 درجة. يتم تقسيم الخلية إلى N شريحة ويتم تطبيق عملية تدوير وإزاحة طور لكل من الشرائح ومن ثم إيجاد المصفوفة النهائية للتحويل الكلي كحاصل ضرب مصفوفات جونز. من الشكل (5) الناتج، ومن خلال إرسال كل من الأطوال الموجية السابقة تبين أن الطول الموجي الاقصر (الممثل بالأزرق) يعطي فرق طور أكبر مع استجابة أسرع مع الزاوية. في حين أن الطول الموجي الأعلى (الأحمر) يعطي فرق طور أصغر مع استجابة أبطأ. هذا يعود إلى أن زاوية LC تغيّر الإزاحة الطورية الفعالة وكل لون يقترب أو يبتعد عن شرط النفاذية العظمى Wavelength-dependent phase retardation
كذلك يمثل الانحناء اللطيف وجود سماكة مناسبة وعدم وجود resonances غير مرغوبة في حين نرى تذبذبات حادة في الشاشات الرديئة. نلاحظ أن قيم التباين متقاربة ومناسبة.



الشكل (5): مخططات تأثر الأطوال الموجية للألوان الثلاثة عند تغير درجة الاستقطاب

من أجل تحقيق التحسين البصري(Optical Optimization) سوف نلجأ إلى تعظيم معدل التباينContrast Ratio من أجل مجموعة من المتغيرات وهي:

- زاوية المستقطب α
- زاوية المحلل β
- زاوية الالتفاف Φ

يوضح الجدول (1) التالي اختيار المعاملات المثالية عند تدريب الخوارزمية الجينية من أجل الحصول على الزوايا المثالية وفقاً لقيم الجهود ومعاملات الانكسار والسماكة وأطوال الأمواج التي تم الحصول عليها في المراحل السابقة. في ين يبين الجدول (2) اعتماد الخوارزمية الجينية من أجل من أجل تحقيق الربط بين التحسين الزمني والتحسين البصري (Contrast Ratio) أخذنا بعين الاعتبار تقليل أزمنة on, off مع تحسين التباين البصري.

الجدول (1) خطوات عمل الخوارزمية الجينية للحصول على قيم الزوايا المثالية.

Iter	F-count	f(x)	Feasibility	First-order optimality	Norm of step
0	4	-1.041681e+00	0.000e+00	4.083e-03	—
1	8	-1.041710e+00	0.000e+00	4.061e-03	5.354e-03
2	12	-1.041859e+00	0.000e+00	4.064e-03	2.697e-02
3	16	-1.042601e+00	0.000e+00	4.080e-03	1.349e-01
4	20	-1.046312e+00	0.000e+00	4.160e-03	6.733e-01
5	24	-1.064921e+00	0.000e+00	4.621e-03	3.340e+00
6	28	-1.094139e+00	0.000e+00	6.969e-03	5.024e+00

7	32	-1.090798e+00	0.000e+00	6.404e-03	6.235e-01
8	36	-1.115507e+00	0.000e+00	9.768e-03	3.558e+00
9	40	-1.247824e+00	0.000e+00	2.585e-02	1.224e+01
10	44	-1.681441e+00	0.000e+00	8.437e-02	1.488e+01
11	49	-1.683504e+00	0.000e+00	8.470e-02	3.731e-02
12	54	-1.685039e+00	0.000e+00	8.491e-02	2.421e-02
13	58	-1.689032e+00	0.000e+00	8.467e-02	7.688e-02
14	62	-1.730573e+00	0.000e+00	8.784e-02	6.300e-01
15	66	-1.846237e+00	0.000e+00	9.741e-02	1.641e+00
16	70	-2.088100e+00	0.000e+00	1.164e-01	2.663e+00
17	75	-2.089330e+00	0.000e+00	1.165e-01	9.393e-03
18	79	-2.164164e+00	0.000e+00	1.109e-01	6.633e-01
19	83	-2.465651e+00	0.000e+00	7.789e-02	3.164e+00
20	87	-2.739871e+00	0.000e+00	4.298e-02	7.477e+00
21	91	-2.739225e+00	0.000e+00	1.190e-03	6.480e-02

22	95	−2.738778e+00	0.000e+00	9.993e−04	3.357e−02
23	99	−2.740362e+00	0.000e+00	2.700e−04	3.301e−02
24	103	−2.740373e+00	0.000e+00	2.000e−04	6.206e−03
25	107	−2.740770e+00	0.000e+00	7.503e−05	7.570e−03
26	111	−2.740770e+00	0.000e+00	2.000e−06	1.372e−04
27	115	−2.740774e+00	0.000e+00	7.253e−07	8.804e−05

Optimal alpha = 13.3 deg

Optimal beta = 120.0 deg

Optimal Phi = 120.0 deg

من أجل تحقيق الربط بين التحسين الزمني والتحسين البصري (Contrast Ratio) أخذنا بعين الاعتبار تقليل أزمنة on, off مع تحسين التباين البصري. أي تم اعتبار التحسين متعدد الأهداف أو دالة كلفة مركبة يمكن تمثيلها بالعلاقة الرياضية التالية:

$$J = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{ref}} w_1 + \frac{CR}{CR_{ref}} w_2 \qquad (14)$$

الجدول (2) خطوات عمل الخوارزمية الجينية للحصول على قيم الزوايا المثالية.

Iter	F−count	f(x)	Feasibility	First−order optimality	Norm of step
0	5	1.976813e−01	0.000e+00	5.646e+05	—
1	11	5.976108e−02	0.000e+00	3.816e+05	2.488e+00
2	18	5.976092e−02	0.000e+00	2.893e+05	2.206e−02
3	23	7.475917e−02	0.000e+00	4.740e+06	3.182e−01
4	28	5.975608e−02	0.000e+00	7.144e+00	1.397e+00
5	33	9.954016e−02	0.000e+00	1.663e+06	2.048e+01
6	38	1.197386e−01	0.000e+00	3.492e+06	8.470e+00
7	44	5.938331e−02	0.000e+00	1.344e+05	5.416e+00
8	50	5.946172e−02	0.000e+00	1.000e−01	1.127e+00

9	58	5.946304e-02	0.000e+00	8.066e+05	1.948e-02
10	66	5.969729e-02	0.000e+00	1.287e+05	3.558e+00

Optimal Parameters:

V_on = 7.49 V

V_off = 0.87 V

alpha = 14.9 deg

beta = 91.1 deg

6.النتائج والمناقشة

يُقدم هذا القسم النتائج المستخلصة من النموذج العددي فيMATLAB ، ويربطها بالتحسينات المطلوبة في شاشات LCD، خاصة فيما يتعلق بزمن الاستجابة.

1.6. النتائج النموذجية للمحاكاة

أظهرت المحاكاة، باستخدام مجموعة نموذجية من الثوابت المادية (على سبيل المثال، $K_{11} = 10\,pN$، η=80 mPa·s ،d=4μm)، النتائج التالية:

أ. منحنيات النفاذية–الزمن (T–t Curves)

يُظهر الرسم البياني لمنحنى النفاذية–الزمن سلوك تبديل البيكسل في شاشات الإظهار. حيث يوضح المنحنى أن زمن الصعود (t_{on}) أسرع بكثير من زمن الهبوط (t_{off}) في ظل ظروف الجهد القياسية 5 فولت.

- زمن الصعود (t_{on}) قُدِّر بـ 3.5 مللي ثانية، ويتحقق بشكل أساسي بفضل القوة القوية للمجال الكهربائي.
- زمن الهبوط :(t_{off}) قُدِّر بـ 15.2 مللي ثانية، وهو زمن أطول بكثير ويعكس بطء العودة الطبيعية للجزيئات تحت تأثير قوى المرونة واللزوجة.
- زمن الاستجابة الإجمالي :يبلغ نحو 18.7 مللي ثانية، وهو مقبول للتطبيقات القياسية ولكنه غير مثالي لشاشات اللمس عالية التردد (التي تتطلب أقل من 10 مللي ثانية).

2.6. تأثير الجهد الزائد(Overdrive Impact)

عند تطبيق تقنية الجهد الزائد المُسرّع (Overdrive)، حيث يتم تطبيق نبضة جهد قصيرة (10 فولت لمدة 1 مللي ثانية) عند بدء التحويل(Turn–on) ، أظهرت المحاكاة:

- تحسين كبير في ton حيث انخفض زمن الصعود إلى حوالي 1.2 مللي ثانية، مما يثبت فعالية التقنية في التغلب على قصور المادة.

3.6. المناقشة الهندسية ودلالات التحسين

تؤكد نتائج المحاكاة دور العوامل الهندسية والمادية في تحديد أداء الشاشة:

1. تعتبر اللزوجة العامل الرئيسي المقيد لزمن الهبوط (t_{off}) والذي يعتبر بدوره العامل المقيد الرئيسي لأداء الشاشة. بما أن t_{off} يتناسب طرداً مع اللزوجة (η) ومربع سُمك الخلية(d^2) ، فإن تقليل اللزوجة (باستخدام مواد جديدة) أو تصنيع خلايا أرق هو السبيل الأكثر فاعلية للتحسين المادي.

2. أهمية النمذجة الديناميكية : تبرز أهمية النموذج العددي في تحديد المعاملات الدقيقة لتقنية الجهد الزائد .من خلال المحاكاة، يمكن تحديد سعة نبضة الجهد ومدتها بدقة للحصول على أسرع استجابة دون تجاوز الحالة المطلوبة(Overshooting) ، مما يؤدي إلى تصميم دوائر قيادة أكثر كفاءة ودقة.

3. تحديد حدود التصميم :تسمح المحاكاة بتحديد الحد الأقصى لأداء الشاشة (Response Time Limit) قبل البدء في التصنيع. فإذا كان الحد الأدنى النظري لزمن الهبوط (المحدد بثوابت المرونة واللزوجة) أكبر من المتطلبات، فإن هذا يشير إلى الحاجة الماسة لتغيير مادة الكريستال السائل بأكملها بدلاً من الاكتفاء بالتحسينات الإلكترونية.

7.الاستنتاجات:

تُعد هذه الدراسة محاكاة حاسوبية معمقة لديناميكا الاستجابة الزمنية في شاشات الكريستال السائل، بهدف تحديد المعلمات التصميمية والتشغيلية المثلى لتقليل زمن الاستجابة الإجمالي.

- أثبتت النمذجة الرياضية أن زمن الهبوط (t_{off}) يظل هو العائق الأساسي أمام تحقيق استجابة سريعة، كونه يعتمد بشكل حاسم على العوامل المادية الداخلية للكريستال السائل، وتحديداً اللزوجة (η) وثوابت المرونة(K)

- أكدت النتائج فعالية الحلول الهندسية الإلكترونية، مثل تطبيق الجهد الزائد المُسرّع(Overdrive) ، في تقليل زمن الصعود (t_{on}) بشكل كبير، مما يوفر حلاً عملياً لتحسين الأداء الفوري في الدارات الإلكترونية.

- بالنظر إلى ضرورة تحقيق زمن استجابة إجمالي يقل عن 10 مللي ثانية لتطبيقات شاشات اللمس المتقدمة، تُشير المحاكاة إلى أن التحسين الحقيقي والجوهرى يتطلب العمل على جبهتين متوازيتينحيث تضمنت الأولى استخدام مواد كريستالية سائلة بخصائص لزوجة منخفضة جداً، في حين تضمنت الثانية الاستمرار في تقليل سُمك الخلية (d) إلى الحدود الدنيا التي يسمح بها التصنيع.

8.التوصيات:

لتعزيز هذا العمل، تُوصي الدراسة بإجراء مزيد من الأبحاث حول:

- دمج النماذج الحرارية في المحاكاة، حيث تتأثر اللزوجة (η) بشكل كبير بدرجة الحرارة.
- توسيع المحاكاة لتشمل أنماطاً عرض جديدة مثل الكريستال السائل الحديدي (Ferroelectric LC) التي توفر تبديلاً أسرع بكثير.

المراجع:

[1] D. Dunmur, A. Fukuda, and G. Luckhurst, *Physical Properties of Liquid Crystals: Nematics*. London, UK: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 2001

[2] X. Wu, "Mechanisms and applications of dual-frequency liquid crystals: A review," *Liq. Cryst.*, vol. 45, no. 8, pp. 1120–1135, 2018.

[3] S. J. Hwang, S. C. Jeng, and C. Y. Yang, "Polymer-stabilized liquid crystal displays with reduced backflow effects," *J. Display Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 345–351, 2015.

[4] S. Agarwal, K. U. Kumar, and S. Zhang, "Optimization of droplet size and viscosity in polymer-dispersed liquid crystals for fast response times," *Opt. Express*, vol. 27, no. 14, pp. 19800–19812, 2019.

[5] R. A. Reddy and C. Tschierske, "Ferroelectric liquid crystals for microsecond optical switching," *J. Mater. Chem.*, vol. 16, no. 10, pp. 907–921, 2006.

[6] B.-X. Li, H. Xi, and Y. Su, "Sub-millisecond switching in dichroic dye-doped dual-frequency liquid crystals," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 32, no. 5, pp. 267–270, 2020.

[7] T. Ogasawara and H. Takezoe, "Photoalignment technology and pretilt angle control for low-viscosity liquid crystal alignment," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 3, p. 030101, 2019.

[8] M. J. Chen, Y. H. Lin, and H. S. Chen, "Fast-response polymer-sustained chiral nematic liquid crystal cells," *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 12, pp. 2891–2894, 2018.

[9] J. H. Liu, C. L. Ting, and W. K. Chin, "Aligned nanofibers for response time improvement in liquid crystal phase modulators," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 21, pp. 19500–19508, 2019.

[10] Y. Chen and S. T. Wu, "Micro-mechanics and effective viscosity of polymer-stabilized liquid crystals," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 20, p. 203101, 2014.

[11] H. Y. Kim, Z. Ge, and S. T. Wu, "Analytical modeling of cell gap and rotational viscosity in fast-response LCDs," *IEEE/OSA J. Display Technol.*, vol. 10, no. 7, pp. 580–587, 2014