التباين العازل وحجة نهاية الألياف: اتجاه مسار الحمل السعوي في دعامات الكابلات الخشبية المحايدة مغناطيسياً

التباين العازل وحجة نهاية الألياف: اتجاه مسار الحمل السعوي في دعامات الكابلات الخشبية المحايدة مغناطيسياً

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park
Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)
Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

ملخّص

دعامة الكابل الخشبية جسم عازل موضوع في المجال القريب لموصل إشارة، ولذلك تكون مساهمتها في المنظومة سعة موزعة تعتمد على الاتجاه ومتوازية مع الكابل. في المعالجة الرئيسة لتصنيف حياد الخشب (Bosque وFerro وPark وTanaka، 2026)، حُدد اتجاه الألياف بصفته متغير تصميم، واعتُمد تشغيل نهاية الألياف رأسياً بناءً على حجة ميكانيكية وعازلة مجتمعة أعلى على طول tan delta وeps_r وردت في قسم واحد. تطور هذه الورقة المرافقة الحجة كاملة. الخشب متباين عازلياً: كل من الألياف منه عبرها، ويتجاوز المحور الطولي المحورين العرضيين لأن هندسة خلايا القصيبات والأوعية الأنبوبية وثنائيات بخلية صفائح متوازية tan delta وeps_r قطب الماء المرتبط المسيطرة على الاستقطاب مصطفة مع الليف. نبلغ قياسات عند محتوى رطوبة 8% (T، والمماسي R والشعاعي L محروسة ومحلل معاوقة لساج استوائي على محاوره التشريحية الثلاثة)الطولي من 1.24 إلى 1.31 عند ترددات الصوت ورطوبة 12%. نبني من eps_L / eps_T ونؤكد نسبة تباين، MHz إلى 10 Hz و12% و16% ومن 20 هذه الثوابت نموذج سعة موزعة لكابل مستقر في مهد مشغول فوق عمود خشبي، ونحسب المساهمة السعوية لكل قالب عند تشغيل نهاية الألياف رأسياً مقارنة بوجه الألياف. يختلف الاتجاهان بهامش قابل للقياس؛ وتقدم نهاية الألياف سعة أقل في المستوى الأفقي حيث يكون مجال الكابل أقوى، وتحجز eps_r محالة إلى الكابل لأنها تضع المحورين العرضيين منخفضي لمسار الحمل الرأسي حيث لا ضرر كهربائياً وهو مثالي ميكانيكياً. يحدد مسح زاوية الألياف أدنى eps_r المحور الطولي عالي اقتران عند نهاية الألياف الحقيقية. ونختتم بأن نهاية الألياف حُددت أولاً للصلابة الانضغاطية، وأن الدليل العازل الذي جرى التوصل إليه مستقلاً وبعد ذلك يتفق مع الدليل الميكانيكي إلى حد تأكيده.

1. مقدمة

لا تحمل دعامة الكابل الإشارة؛ بل تجلس بجانبها. لهذا تحديداً يُستبعد دورها الكهربائي بسهولة: من الواضح أن كتلة الخشب تحت الكابل ليست داخل الدارة، ومن المغري الاستنتاج بأن تركيبها وألياقها واتجاهها شؤون لصانع الأثاث لا للمهندس. جادلت الورقة الرئيسة لتصنيف الحياد بالنصف (Bosque وFerro وPark وTanaka، 2026) المغناطيسي من القضية: أن الدعامة الملامسة باستمرار لموصل جزء من بيئة مجاله القريب، وأن محتواها المتبقي المساير مغناطيسياً مدخل قابل للقياس في المنظومة لا صفة زخرفية. وتخلصت من النصف العازل في قسم واحد. هذه الورقة توسع ذلك القسم إلى الطول الذي تستحقه الفيزياء.

لا تزيل حقيقة أن القالب بجانب الكابل لا داخله القالبَ من الدارة؛ بل تحدد طريقة اقترانه. يخزن جسم عازل في مجال للجسم وعلى eps_r موصل طاقة سعوية، والسعة الموزعة المتوازية مع خط نقل حمل صغير لكنه حقيقي، يعتمد مقداره على فيه على الاتجاه، ولذلك لا تملك eps_r اتجاهها بالنسبة إلى المجال. الخشب ليس عازلاً متناحي الخواص؛ تعتمد الدعامة الخشبية مساهمة عازلة واحدة بل ثلاثاً، يمكن اختيارها عند منضدة التشغيل بزاوية قطع الكتلة.

حلقات النمو على الوجه -- Equatorial Elevation Block ادعاء هذه الورقة ضيق وكمي. اتجاه نهاية الألياف الرأسي المحدد لـ العلوي والألياف مارة رأسياً في مسار الحمل -- هو الاتجاه الذي يصغّر السعة المحالة إلى الكابل، وهذا الأدنى قابل للقياس لا افتراضي، ويوافق الاتجاه المختار أصلاً لأسباب ميكانيكية. لا ندعي أن الأثر كبير؛ بل إن له إشارة ومقداراً واتجاهاً مفضلاً، وأن صانعاً يشغّل القالب بالعكس من أجل وجه ألياف أجمل حرّك الرقم في الاتجاه الخطأ من دون أن يعرف أن الرقم موجود.

2. التباين العازل للخشب

الخشب صلب خلوي مبني من خلايا طويلة جوفاء مصطفة محورياً -- قصيبات في الأخشاب اللينة، وألياف وأوعية في الأخشاب الصلبة مثل الساج -- ويعرّف محورها الطويل اتجاه الألياف. هذه الهندسة أصل التباين الميكانيكي الذي يعرفه كل نجار، وهي أيضاً أصل تباين عازل أقل شيوعاً لكنه حقيقي وموثق منذ زمن (James، 1975؛ Torgovnikov، 1993).

معتمدة على الاتجاه، وتفضل الثلاث المحور الطولي. أولاً، تشكل جدران الخلايا مسارات eps_r تجعل ثلاث آليات مستمرة قابلة للاستقطاب على طول الليف ومسارات متقطعة عبره، فيتراكم الاستقطاب البيني عند حدود الجدار-التجويف الكثيرة تفضيلياً مع الألياف. ثانياً، يوجد الماء المرتبط في جدران (Maxwell-Wagner) للخشب إلا في أشد الحالات جفافاً -- في بيئة تصطف فيها مواقع eps_r الخلايا -- المساهم السائد في الهيدروكسيل وسقالة الليبيفات المجهرية مع الليف، فيكون استقطاب اتجاه ثنائيات قطب الماء المرتبط أسهل إلا قليلاً، وكلاهما أدنى كثيراً من T، والمماسي R مع الألياف منه عبرها. ثالثاً، لا يختلف الاتجاهان العرضيان، الشعاعي والطولي L. النتيجة المتسقة في الأدبيات هي eps_L > eps_R ~ eps_T، ونسبة tan delta، مع الترتيب نفسه في eps_L / eps_T للأخشاب الصلبة المعتدلة والاستوائية في المجال الاسترطابي نموذجية من 1.2 إلى 1.5.

إلى 3، وترتفع بشدة ورتابة مع eps_r = 2 القيم المطلقة متواضعة وتحكمها الرطوبة. يقع الخشب المجفف تماماً قرب زيادة محتوى الرطوبة، لأن كل زيادة في الماء المرتبط تضيف ثنائيات قطب إلى المخزون القابل للاستقطاب. هذه الشدة تجعل محتوى الرطوبة، لا النوع، أكبر رافعة في المساهمة العازلة للدعامة، ويعالجه القسم 5. النقطة الأساسية هو اتجاه الليف، ويحدده النجار لا الشجرة. eps_r لحجة التباين بنيوية لا رقمية: أعلى اتجاه.

CONFIDENTIAL

3. القياس: السماحية والفقد على ثلاثة محاور

قسنا eps_r وtan delta على عينات ساج مشغولة على كل محور من المحاور التشريحية الثلاثة، بحيث يمر المجال المطبق بسماكة 3.0 mm من خلية الصفائح المتوازية طولياً ثم شعاعياً ثم مماسياً في العينة. كانت العينات مربعات 40 mm، مشغولة بسطحين مستويين ومتوازيين ضمن +/- 10 ميكرومتراز، ومقطوعة من ثلاث كتل استوائية بدرجة 5 N. اختيرت بموجب البروتوكول الرئيس حتى لا يشوش التلوث المغناطيسي القراءة العازلة. كُيّفت كل مجموعة إلى التوازن عند محتويات رطوبة 8% و12% و16% في حجرات رطوبة، وتُحقق من رطوبتها وزنياً نسبة إلى الكتلة المجففة في الفرن عند نهاية الجولة.

كانت الخلية تجهيز صفائح متوازية محروساً من النوع الموصوف سابقاً (Tanaka وPark، 2022). يقوده محلل معاوقة Keysight E4990A 20 من Hz 10 إلى MHz. تقمع حلقة الحراسة الحواف ليقابل القياس السعوي مساحة قطب محددة وتكون المستخرجة قيمة حجمية للمادة لا تقديراً ملوثاً بالحافة؛ ويُقرأ eps_r مباشرة بوصفه عامل التبدد tan delta للتجهيز. تحقق التلامس بطبقات رقيقة من إلستومر موصل لاستيعاب خشونة السطح المتبقية من التشغيل من دون لاصق يضيف استقطابه الخاص.

مقدارها 1.31 eps_L / eps_T، بنسبة eps_T = 2.02 وeps_R = 2.09 وeps_L = 2.64 عند محتوى رطوبة 12% و1 kHz، أعاد الساج الترتيب نفسه: 0.021 مع tan delta مقدارها 1.26؛ واتفق المحوران العرضيان ضمن 4% كما هو متوقع. اتبع eps_L / eps_R مسطحة ضمن 3% وظلت نسبة التباين بين eps_r 1.24 كانت قيم kHz إلى 20 Hz الألياف و0.014 إلى 0.015 عبرها. من 20 مقدار 3.08 -- ووسّع التباين قليلاً لأن الماء المرتبط eps_L و1.31. رفع محتوى الرطوبة إلى 16% كل القيم -- فبلغ الإضافي يستقطب تفضيلياً على المحور المفضل. خفّض التجفيف إلى 8% القيم المطلقة والنسبة. لذلك ليس التباين ثابت مادة، بل قيمة تعدلها الرطوبة، أقوى حيث يقل أهميته)رطب(وأضعف حيث تكون المادة أشد جفافاً؛ وهو محلول ومستقر بوضوح عند مواصفة التوريد 12 +/- 1%.

4. نموذج السعة الموزعة للمهد والكابل والعمود

لتحويل ثلاث قيم eps_r في مهد، إلى قرار تصميم، نحتاج هندسة الاقتران. لا يستقر الكابل على قالب مسطح؛ بل أخدود ضحل نصف قطري مشغول في الوجه العلوي، بحيث يفصل سماكة جدار الغلاف وحدها قوساً محدوداً من غلاف الكابل عن الخشب. الخشب تحت ذلك القوس مباشرة -- عمود رأسي قصير يمتد من قاع المهد إلى جسم القالب -- هو حيث يكون المجال بين الموصل وأي عودة أرضية بعيدة أقوى، وحيث تُخزن الغالبية العظمى من سعة الكابل-الدعامة. يساهم الخشب الأبعد إلى الخارج والأسفل بوزن يتراجع سريعاً مع انتشار المجال وضعفه.

ننمذج هذا بصفته سعة موزعة لكل وحدة طول من المسار، وندمج طاقة المجال المحلية في حجم الخشب تحت المهد وحوله مع eps_r للخشب محوراً بمحور. البنية قياسية لعازل متباين: يأخذ مكوّن المجال الرأسي eps_r إدخال موتر للمحور الرأسي، eps_r للمحاور الأفقية. ولأن المهد يركز المجال في المنطقة شبه الرأسية تحت الموصل، eps_r وتأخذ المكونات الأفقية الأفقية الحصة eps_r بينما تسير مسارات العودة التي تغلق السعة إلى الخارج والأسفل عبر جوانب العمود، تحمل قيم لكل pF الأكبر من الطاقة المخزنة. خرج النموذج رقم هندسي واحد مهم: السعة التي يضيفها القالب إلى الكابل بوحدة eps_r قالب، بوصفها دالة لاتجاه موتر.

رأسياً على مسار الحمل، ويترك المحورين L للاتجاهين أهمية عملية. يضع تشغيل نهاية الألياف رأسياً المحور الطولي في المستوى الأفقي. أما تشغيل وجه الألياف)نشر مسطح، ألياف أفقية(فيضع T، وR أي eps_r، العرضيين منخفضي في المستوى الأفقي حيث تأخذه مكونات المجال الأفقية القوية، ويقيم محوراً عرضياً رأسياً. إدخال L المحور الطولي وارتفاع 12 mm، ومهد نصف قطره 3 mm، الثوابت المقاسة عند رطوبة 12% في النموذج لهندسة مهد نموذجية)قطر كابل 12 pF لكل قالب لاتجاه نهاية الألياف ونحو 2.3 pF وعودة أرضية اسمية عند مسافة الهيكل(ينتج نحو 1.9 mm، قالب 60 أي نحو 18%، ينشأ من زاوية القطع وحدها. هو صغير لكل قالب، لكنه حقيقي، pF لاتجاه وجه الألياف -- فرقاً يقرب من 0.4 وقابل للتكرار وأحادي الإشارة ومجاني: لا يكلف الصانع إلا قرار توجيه الكتلة صحيحاً، ويتراكم عبر القوالب المتعددة في مسار كامل.

5. مسح زاوية الألياف وحساسية الرطوبة

الاتجاهان المسميان طرفا متصل، ويستحق التأكد من أن نهاية الألياف أدنى حقيقي لا مجرد الأفضل بين اختيارين اعتباطيين. شغّلنا سلسلة عينات بزوايا ألياف من 0 deg و45 deg الليف رأسي، نهاية ألياف حقيقية(مروراً بـ 30 deg) الليف أفقي، وجه الألياف(بالنسبة إلى محور الحمل، وقسنا كل منها في هندسة نموذج المهد مع) deg إلى 90 deg و60 deg موصل مزوّد بالطاقة فوقها. ارتفعت السعة المحالة إلى الكابل رتيباً مع زاوية الألياف من أدنى نهاية الألياف عند 0 deg متبعة عن كثب وزن مربع جيب التمام الذي يتنبأ به نموذج الموتر مع دوران المحور، deg إلى أقصى وجه الألياف عند 90 deg من خطأ deg لا تكلف بضع -- تدريجياً إلى المجال الأفقي. يكون المنحنى ضحلاً قرب 0 eps_r الطولي عالي التشغيل شيئاً تقريباً -- وأشد انحداراً في منتصف المسح، لذلك تكون عقوبة القطع المهمل حقاً أكبر من عقوبة قطع غير كامل لكنه حسن النية. الأدنى عند نهاية الألياف الحقيقية، وهو أدنى لا نقطة انعطاف.

يحرك محتوى الرطوبة المنحنى كله رأسياً من دون تحريك موقع الأدنى. لأن eps_r ترتفع بشدة مع الماء المرتبط، يضيف قالب انتقلت رطوبته من 12% إلى 16% سعة مطلقة أكبر من فرق نهاية الألياف إلى وجه الألياف كله عند رطوبة ثابتة؛ رافعة الرطوبة أكبر من رافعة الاتجاه. لكنهما مستقلان: ترطيب الخشب يرفع الأرضية ولا يغير أي اتجاه هو الأدنى. ولذلك يكون الاتجاه والتكييف ضابطين متكاملين ويجب تطبيقهما معاً. هذا هو الأساس المقاس لتجفيف كل كتلة مصنفة عند المنشأ إلى 12 +/- 1% وللفحص السنوي للرطوبة في جدول الصيانة: الاتجاه مشغول

CONFIDENTIAL

بصورة دائمة ولا ينحرف، أما الرطوبة التي تكبّره فيمكن أن تنحرف، ودعامة تُترك لتتوازن مع غرفة رطبة تتنازل ببطء عن الهامش الذي أمّنته منضدة التشغيل.

نلاحظ عرضاً أن اتفاق المحورين العرضيين المقاس في القسم 3 يعني أن اختيار العرض الشعاعي أو المماسي في المستوى الأفقي غير مهم ضمن عدم يقين القياس؛ يمكن تدوير القالب حول محوره الرأسي للحصول على أجمل مظهر لحلقات الوجه العلوي بلا نتيجة عازلة، ما دامت الألياف رأسية.

6. المناقشة: حجتان واتجاه واحد

لم يُعتمد اتجاه نهاية الألياف لسلوكه العازل، بل لأنه أصلب وأقوى طريقة لتحميل الخشب بالضغط: مع وقوف الألياف رأسياً، يُحمل الحمل الهابط على طول الخلايا الأنبوبية في أقوى اتجاهها، ويقاوم القالب الوزن الثابت لمسار الكابل واستقرار المنظومة بأقل زحف وأقل تغير أبعاد. هذه حقيقة قديمة لا خلاف عليها في هندسة الخشب، وثبّتت مواصفة التشغيل قبل قياس أي eps_r.

أُجريت القياسات العازلة الواردة هنا بعد ذلك، وكان يمكن مبدئياً أن تختلف مع الخيار الميكانيكي؛ فلو كان محور الألياف منخفض eps_r، لكان إيقافه رأسياً صحيحاً ميكانيكياً وخاطئاً كهربائياً، وافتُرض حل وسط. لم تختلف. محور eps_r طول الألياف عالي، ولذلك يخرجه إيقافه رأسياً من المستوى الأفقي حيث يكون مجال الكابل أقوى، وهذا ما يطلبه نموذج السعة تماماً. الاتجاه المثالي ميكانيكياً هو، بصورة مستقلة، الأهدأ عازلياً. بُنيت الحجتان من فيزياء مختلفة، وفي زمنين مختلفين وبأيدي أشخاص يحلون مشكلتين مختلفتين، واختارتا القطع نفسه.

لا نعلق وزناً غامضاً على الاتفاق؛ فكثيراً ما تصطف في المواد المتباينة محاور الصلابة والسماحية العالية لأن الخاصيتين تعودان إلى البنية المجهرية المصطفة نفسها، والساج كذلك. لكن النتيجة العملية قائمة. يصل الصانع الذي يتبع الحجة الميكانيكية وحدها إلى نهاية الألياف، ومن دون قصد يصغّر الاقتران السعوي أيضاً. والصانع الذي يتجاوز الحجة الميكانيكية من أجل وجه ألياف زخرفي يخسر على المحورين معاً. الالتقاء ليس مصادفة تستوجب الإعجاب بقدر ما هو سبب للوثوق بالمواصفة: عندما تنتهي سلسلتا استدلال مستقلتان عند الرقم نفسه، يرجح أن يكون الرقم صحيحاً.

7. الخاتمة

الخشب جسم متباين عازلياً، ودعامة الكابل الخشبية ذلك الجسم موضوعاً في المجال القريب لموصل. مساهمتها في المنظومة سعة موزعة صغيرة يحدد الصانع مقدارها، عن علم أو دونه، عند منضدة التشغيل. قسنا eps_r وtan delta على المحاور الثلاثة لساج استوائي، وأكدنا الترتيب المتوقع eps_L > eps_R ~ eps_T عند رطوبة 1.3 بنسبة تباين قرب 18%. لكل قالب -- يختلف بصورة قابلة للقياس pF -- التوريد، ومررنا الثوابت في نموذج سعة المهد والعمود إلى مقياس أداء في هندسة نموذجية، ويؤكد مسح الزاوية أنها pF بين تشغيل نهاية الألياف ووجهها. نهاية الألياف أدنى بنحو 0.4 pF أدنى حقيقي.

الهامش صغير لكل قالب ونرفض المبالغة فيه. لا نؤكد إلا أنه حقيقي وله اتجاه مفضل، وأن الاتجاه المفضل هو ما تفعله نهاية الألياف رأسية لأن هذه النهاية أصلب Equatorial Elevation Block المحدد أصلاً على أسس ميكانيكية. نُشغّل طريقة لحمل ضغط؛ أُجري التحليل العازل لاحقاً وأكد أن القطع نفسه الأهدأ عازلياً. نُشحن كل قطعة ونهاية الألياف إلى الأعلى، مجففة في الفرن إلى 12 +/- 1%، وبلا تشطيب، ودرجتها وثوابتها المقاسة على الشهادة. ندعو القارئ إلى سؤال أي صانع آخر للدعامات الخشبية عن اتجاه أليافه وسببه.

المراجع

[1] James, W. L. (1975). الخصائص العازلة للخشب واللوح الليفي: تغيرها مع الحرارة والتردد ومحتوى الرطوبة واتجاه الألياف. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.

[2] Torgovnikov, G. I. (1993). الخصائص العازلة للخشب والمواد الخشبية. Springer-Verlag, Berlin.

[3] Skaar, C. (1988). علاقات الخشب والماء. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.

[4] Norimoto, M. (1976). الخصائص العازلة للخشب. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.

[5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). تصنيف الحياد المغناطيسي للخشب الإنشائي: سلم نقاء N لمواد دعم الصوت. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.

[6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). قياس السماحية بصفائح متوازية محروسة للمواد الصلبة المتباينة منخفضة الفقد. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.

CONFIDENTIAL