

تصميم نظام لحماية المباني من خطر الصواعق

م. مروان فوزي القصير
جهاز تنفيذ مشروعات الإسكان والمرافق
مصراته- ليبيا
en_mr_78@yahoo.com

د.علي قاسم شتوان
كلية التقنية الصناعية- قسم الهندسة الصناعية
مصراته- ليبيا
ashetwan@cit.edu.ly

د. إبراهيم أحمد بادى
كلية الهندسة- قسم الهندسة الميكانيكية
مصراته- ليبيا
ibadi@eng.misuratau.edu.ly

هذه الأنظمة أكثر فعالية من أنظمة الحماية الاعتيادية (قصر فارادى، إبر فرانكلين) فإنه يجب أن نحصل على التوقيت السليم لكل ضربة صاعقة مما يجعلها أقل فعالية. وساندت الورقة المقدمة من Hartono and Robiah نتائج هذه الدراسة [1]. أما دراسة Foya (2004م) تناولت مفهوم الحماية من الصواعق من حيث تحليل ومقارنة المواصفات العالمية في نطاق متطلبات الحماية من الصواعق والتغير في فلسفتها، إضافة إلى تطبيق طريقة قصر فارادى لمستويات حماية مختلفة. ومن نتائج هذه الدراسة أن الصواعق هي ظاهرة غير خطية، وأن تقنيات الحماية منها لا تزال في تطور مستمر. كما خلصت الدراسة إلى أن الحماية من الصواعق تبدأ مشكلتها عندما يتم تحديد كثافة الومضات للصواعق، وهذه الكثافة تتغير بتغير الطقس، لذا فإن المواصفات توصى بإضافة معامل وهذا المعامل يجب أن يحدد طبقاً للمنطقة موضوع الدراسة [2]. كما تناولت دراسة Hossam- Eldin and Omran استخدام طريقة الحجم التجميعي في تصميم نظام حماية خارجي من الصواعق للسفن البحرية في دولة مصر والتي كانت المفتاح لاستكشاف المكان المناسب لمناعة الصواعق بها. هذه التقنية أثبتت فعاليتها للحماية من الصواعق سواءً لأنظمة الحماية الاعتيادية أو غير الاعتيادية لكونها قدمت الحل الأمثل للحماية من حيث السلامة والتكلفة. هذه التقنية ساعدت مهندسي التصميم من تحديد نظام حماية فعال لارتفاعات وأنواع مختلفة من اللواقط الهوائية. تم تطبيق هذه التقنية لأنواع مختلفة من السفن كسفن الشحن والسفن الحربية، وأظهرت أنها وسيلة فعالة جداً للحماية من الصواعق لهذه السفن [3]. أما دراسة Rousseau and Gruet فهذه تهدف إلى توضيح النتائج التي تم الحصول عليها من تقييم مخاطر الخسارة الاقتصادية الناتجة عن الصواعق والتي يرمز لها بالرمز R_p لحالات واقعية ومتمثلة في مبنين بنشاطين مختلفين، ويرجع السبب في التركيز على هذا النوع من المخاطر بدلاً من مخاطر خسارة الحياة البشرية R_1 هو أن معظم الخسائر المتكررة بفعل الصواعق خسائر اقتصادية وفي أغلب الحالات لا تحدث إصابة للأشخاص عند إصابة المبنى بصواعق. خلصت الدراسة بوجود عدة صعوبات تكمن بشكل رئيسي في تقدير تكاليف المبنى ومحتوياته بالإضافة إلى تقدير تكاليف تدابير الحماية المطلوبة، وعلى وجه الخصوص عندما يتم التحقق من حلول الحماية المختلفة [4]. وهدفت دراسة Shwehdi إلى تأسيس وتطوير خرائط موسمية وسنوية توضح الأيام الرعدية بالملكة العربية السعودية إضافة إلى تجميع وتوثيق البيانات المتعلقة بالأنشطة الرعدية والصواعق وتقديم خطوات فعالة لتطوير الخرائط السابقة. تم تحديد الأيام الرعدية لمناطق مختلفة من البلاد وخاصة تلك المناطق التي تزيد فيها احتمالية حدوث الصواعق. أوضحت النتائج أن العواصف الرعدية تكون أكثر شيوفاً على الجنوب الغربي للبلاد وتنخفض بشكل عام عند الاتجاه نحو الغرب. إن مثل هذه المعلومات تكون ذات قيمة كبيرة لمهندسي تصميم خطوط نقل وتوزيع القدرة الكهربائية لاختيار العوازل وتنسيق أنظمة الحماية من الصواعق [5]. ووصفت دراسة Chachaia تصميم نظام حماية خارجي من الصواعق للمباني المسقوفة بمواد قابلة للاشتعال كمادة القش، حيث أن تركيب نظام حماية خارجي يوفر مساراً آمناً لتفريغ الصواعق بأقل قدر من التأثيرات والأضرار. أجريت اختبارات معملية لتحديد المستوى الذي ستشتعل فيه مادة القش عند تعرضها لضربات صواعق مباشرة، ووجد أن مادة القش تبدأ في التدخين عند 10 كيلو أمبير وتشتعل عند 20 كيلو أمبير وبشحنة قدرها 45 كولوم. نظراً إلى

الملخص - إن ما نشاهده من تطور عمراني وتداول في البنين للقطاع العام والخاص وبما أن أغلب المدن الليبية مدن ساحلية زاد من احتمالية تعرض المباني لخطر الصواعق، وبالتالي تعرضها لأضرار بشرية ومادية عادة ما تكون باهظة الثمن. من هنا جاءت هذه الورقة كمقترح لتصميم نظام حماية من الصواعق لمبنى إداري داخل مدينة مصراته. شملت الدراسة تقييم حالة المبنى، وكذلك تحديد مستوى الحماية المطلوب. تم تنفيذ بعض الحسابات الرياضية الخاصة بنظام الحماية بالإضافة إلى استخدام برنامج DEHN لتحليل مخاطر الصواعق. أظهرت نتائج الدراسة أن مركبة مخاطر الأضرار الفيزيائية R_{B1} تمثل أعلى قيمة من بين مركبات المخاطر الأخرى بنسبة 89% من إجمالي قيمة مخاطر خسارة الحياة البشرية R_1 والتي بلغت قيمتها 0.1376×10^{-5} لكل سنة، وهي أقل من القيمة المقبولة وفق المواصفات القياسية IEC62305-2 لسنة 2010 م. كما بينت الدراسة عدم الحاجة لتركيب نظام حماية خارجي لمبنى التخطيط العمراني، والحاجة لذلك في حال ما إذا كان ارتفاع المبنى أعلى من 40 متر، كما أوضحت النتائج ضرورة تنفيذ نظام حماية داخلي لتقليل من مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين والتي بلغت قيمتها أكثر من 4 أضعاف القيمة المقبولة. إضافة إلى ذلك أثبتت الدراسة تطابق نتائج التحليل الرياضي مع نتائج برنامج DEHN لتقييم المخاطر.

الكلمات المفتاحية: خطر، صواعق، حماية، خسارة، مواصفات.

1. المقدمة

إن السلامة مطلب المجتمع بكل فئاته وشرائحه ولا يختلف اثنان على أهمية توفير وسائل السلامة والأمان في أي موقع يوجد فيه الإنسان، ولذلك يبذل الإنسان الكثير من الجهد والمال والاحتياطات حرصاً على سلامته وسلامة أسرته ومجتمعه المحيط. فالتطور الحاصل في كافة مجالات الحياة زاد من احتمالية تعرض الإنسان والممتلكات للكثير من المخاطر سواءً كانت هذه المخاطر طبيعية أو مهنية، فالصواعق هي أحد المخاطر الطبيعية التي قد يتعرض لها الإنسان أو الممتلكات على حدٍ سواء. نظراً إلى القصور الواضح في الاهتمام بحماية المباني من خطر الصواعق مما يطرح تساؤلاً على مدى الحاجة لتركيب نظام حماية من الصواعق لهذه المباني، إضافة إلى ذلك ضعف تصميم أنظمة الحماية في حال وجودها، وبالتالي جاءت هذه الدراسة لتقديم مقترحاً عملياً لنظام حماية من الصواعق.

تدرس هذه الورقة تصميم نظام للحماية من المخاطر والأضرار التي يمكن أن تحدث للمباني نتيجة لتعرضها إلى ضربات الصواعق باستخدام معادلات رياضية وجدول قياسية وفق المواصفة الدولية IEC62305-2. بالإضافة إلى استخدام الطريقة البرمجية في تحليل المخاطر عن طريق تطبيق برنامج DEHN.

2. الدراسات السابقة

توجد العديد من الدراسات في هذا المجال، فقد تناولت دراسة Faircloth (1996م) التحقق من فعالية أنظمة الحماية من الصواعق غير الاعتيادية كنظام Early Streamer Emission (ESE) من خلال تطبيق برنامج محاكاة لهذه الأنظمة معملياً ومن ثم تحليلها، حيث وجد أنه لتكون

استلمت الورقة بالكامل في 3 أكتوبر 2016 وروجعت في 6 نوفمبر 2016 وقبلت للنشر في 12 نوفمبر 2016 ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 17 نوفمبر 2016 .

- ضربات الصواعق بجوار خطوط الخدمة المغذية للمبنى (صاعقة غير مباشرة).

4. أنظمة الحماية من الصواعق (LPS) Lightning Protecting System

يعرف نظام الحماية من الصواعق بأنه النظام الكامل المستخدم لحماية مجال ما من آثار الصاعقة، وهو يتألف من نظام خارجي ونظام داخلي أو من أحدهما للحماية من الصواعق. لذا فإن الغاية من نظام الحماية من الصواعق هو حماية المباني وما تحتويه من أشخاص وممتلكات من خطر إفراغات الصواعق. إن اختيار نوع النظام المستخدم للحماية من خطر الصواعق هو الخطوة الأساسية في مدى فعالية وموثوقية التصميم، وبالتالي ينبغي دراسة أنظمة الحماية من الصواعق المختلفة واختيار أنسبها.

أ. أنظمة الحماية الخارجية من الصواعق

يستخدم هذا النوع من الأنظمة لحماية المبنى وتركيباته من الأضرار الناتجة عن ضربات الصواعق المباشرة، ويقسم هذا النظام بدوره إلى نوعين كما يلي [9]:

النوع الأول: الأنظمة الاعتيادية للحماية من الصواعق

تصمم الأنظمة الاعتيادية للحماية من الصواعق بشكل مناسب بحيث توفر نقاط ارتباط بالصواعق ومسار لتياراتها لتتدفق من هذه النقاط إلى الأرض بدون حدوث أضرار على المبنى المحمي من قبلها. وتسمى الأنظمة الاعتيادية للحماية من الصواعق بالأنظمة التقليدية نظراً لاستخدامها لأكثر من 200 سنة مضت [11]. يتكون هذا النوع من الأنظمة من ثلاثة أجزاء رئيسية كما يلي [10]:

- 1) الشبكة الهوائية (الواقف): وهي ذلك الجزء من النظام الخارجي للحماية من الصواعق ومهمتها اعتراض الصواعق من خلال وضعها عند نقاط مناسبة على المبنى، حيث تتناقص إمكانية تسرب الصاعقة إلى المجال المراد حمايته عند وجود التصميم المناسب للشبكة الهوائية.
- 2) الموصلات النازلة: وهي إحدى الأجزاء الرئيسية من النظام الخارجي للحماية من الصواعق المعدة لتبرير تيار الصاعقة من الشبكة الهوائية إلى شبكة التأريض.
- 3) شبكة التأريض: وهي جزء من نظام الحماية من الصواعق الخارجي ووظيفتها نقل وتشتيت تيار الصاعقة في الأرض.

إضافة إلى هذه المكونات الأساسية لأنظمة الحماية الاعتيادية من الصواعق هنالك مكونات أخرى كالمشابك، الوصلات، قطع التمديد، نقاط القياس. كل مكون من المكونات الأساسية والفرعية لهذه الأنظمة يجب أن تكون متصلة مع بعضها البعض باستخدام الوصلات المناسبة وذلك لتقليل الأضرار الناتجة من إفراغ تيار الصاعقة.

عند تصميم الأنظمة الاعتيادية للحماية الخارجية من الصواعق يجب التمييز بين نظام الحماية المعزول ونظام الحماية غير المعزول. في أغلب الأحيان يثبت نظام الحماية الخارجي من الصواعق على المبنى المراد حمايته، وفي هذه الحالة يسمى نظام الحماية (نظام حماية غير معزول)، ويكون نظام الحماية معزولاً عن المبنى في حالة وجود مسافة فصل محدودة. هذه المسافة يجب أن تكون كافية بحيث نتجنب حدوث إفراغ شراري خطر بالمبنى. تكون الأنظمة المعزولة مناسبة بشكل جيد للمباني ذات المواد القابلة للاشتعال مثل أسقف القش، مواقع الاتصالات التي تريد تجنب تيارات الصواعق. هذا النظام يستخدم موصل واحد أو أكثر من الموصلات المعقولة بحيث توفر منطقة حماية أكبر للمبنى بالكامل.

يمكن أن تقسم الأنظمة الاعتيادية للحماية من الصواعق إلى نوعين هما كالآتي [12]:

- أنظمة الحماية من الصواعق باستخدام قضبان فرانكلين: يعرف هذا النوع من الأنظمة بأسماء أخرى كأنظمة القضبان المذبذبة الحادة، أنظمة الصاري

أن إمكانية حدوث وميض جانبي بسبب تيار صاعقة قدره 10 كيلو أمبير عالي في حالة وجود أجسام معدنية قريبة من السقف لذا يوصى بترك مسافة كافية بين السقف القابل للاشتعال (القش) وجميع الأجسام الموصلة في نظام الحماية من الصواعق إضافة إلى استخدام نظام حماية من المستوى I أو المستوى II وأن يتم التصميم من قبل أشخاص مؤهلة في هذا المجال [6]. وطورت دراسة Yahaya and Daud (2013م) برنامج حاسوبي باستخدام برنامج متلاب لتقدير مسافة السلامة من الصواعق بين برج اتصالات وصحن استقبال على مبنى مجاور. تم ذلك من خلال نموذج تخطيطي إيضاحي بثلاث أبعاد لمعرفة فهم أفضل لكيفية عمل نظام حماية خارجي من الصواعق. تم دراسة منظومة الحماية من خلال مولد نبضات وبالمحاكاة ببرنامج أوركاد. وجد أن الطول الأفضل للاقط الهوائي العمودي في نظام الحماية يكون بنفس مسافة الصعق. كذلك أثبتت النتائج بأن استخدام طريقة الكرة المتدرجة في أنظمة الحماية الخارجية من الصواعق يحسن من كفاءة الاعتراض للصواعق بنسبة 8% [7]. أما دراسة Rudlosky (2016م) فتناولت مقارنة لكثافة الوصلات لكل من الصواعق ذات القطبية الموجبة والسالبة على أساس سنوي وخلال أشهر السنة الباردة والساخنة كلاً على حدى، بالإضافة إلى المقارنة بين تيار الذروة لكلا النوعين ونسبة وقوع كلاً منهما حسب المناطق الجغرافية المكونة لولاية فلوريدا. اعتمدت الدراسة على البيانات التي تم الحصول عليها خلال فترة خمس سنوات (2002-2006م) من الشبكة الوطنية لكشف الصواعق بأمريكا [8].

يتضح من الدراسات السابقة التنوع في المواضيع التي درست مشكلة الصواعق والتي أجريت في بيئات وظروف مختلفة، فبعض من هذه الدراسات كانت عن خصائص وطبيعة ظاهرة الصواعق، بينما تناولت دراسات أخرى مدى جدوى وفعالية أنظمة الحماية الخارجية في الحماية من ضربات الصواعق، وبحثت دراسة أخرى تقييم مخاطر خسارة القيمة الاقتصادية الناتجة عن الصواعق. يلاحظ على الدراسات السابقة أنها اقتصر على التصميم الداخلي أو التصميم الخارجي، وكذلك اعتمدت في تحليلها للمخاطر على الأسلوب الرياضي المبسط أو استخدام البرامج الحاسوبية. أما بالنسبة لمركبات المخاطر فقد اقتصر أغلب الدراسات السابقة على دراسة مركب واحد أو اثنين. ما يميز هذه الدراسة أنها تناولت كيفية تصميم أنظمة الحماية الخارجية والداخلية من الصواعق معاً، إضافة إلى دراسة تقييم المخاطر بشكل تفصيلي بالطريقة الحسابية ومقارنة نتائجها مع أحد البرامج الحاسوبية لتقييم مخاطر الصواعق، كما أنها درست عدة مركبات للمخاطر.

3. مخاطر الصواعق

تعرف الصاعقة على أنها تفريغ كهربائي يحدث على شكل شرارة أو وميض يتولد في السحب المشحونة [9]. تتمثل أضرار ضربات الصواعق على المباني ومحتوياتها في حدوث حرائق أو انفجارات بسبب الحرارة المصاحبة لتيار الصاعقة، إضافة إلى وقوع تدمير بالمواد عند نقاط الإصابة وكذلك حدوث فشل بالأنظمة الداخلية للمبنى.

تقسم مخاطر الصواعق كما يلي:

- مخاطر خسارة الحياة البشرية (R_1)

- مخاطر خسارة الخدمة المقدمة للمواطنين (R_2)

- مخاطر خسارة التراث الثقافي (R_3)

- مخاطر خسارة القيمة الاقتصادية (R_4)

حيث تحدث هذه المخاطر نتيجة للآتي [10]:

- ضربات الصواعق على المبنى (ضربة صاعقة مباشرة).
- ضربات الصواعق بجوار المبنى (ضربة صاعقة غير مباشرة).
- ضربات الصواعق على خطوط الخدمة المغذية للمبنى (صاعقة مباشرة).

الجدل بأن الصواعق قد تجاوزت أنظمة الحماية من الصواعق ذات الانبعاث المجرى المبكر وأصاب المباني الواقعة في مجال حمايتها [15]. كذلك الدراسة الحقلية التي أجريت في نيو مكسيكو والتي تم وضع مجموعة من اللواقط الهوائية من النوع الاعتيادي (إبر فرانكلين) وأخرى ذات الانبعاث المجرى المبكر، وجد أن جميع ضربات الصواعق قد أصابت اللواقط الهوائية الاعتيادية ولا أحد منها قد أصاب اللواقط ذات الانبعاث المبكر [16]. أثبتت هذه التجربة وبشكل قاطع بأن أنظمة الحماية من الصواعق ذات الانبعاث المجرى المبكر لا تملك ميزة على أنظمة الحماية الاعتيادية من الصواعق، وأن نطاق الحماية المحسن المزعم غير موجود. يوجد أنواع مختلفة من أنظمة الحماية من الصواعق ذات الانبعاث المجرى المبكر والتي يتم تقسيمها وفقاً لطبيعة عمل اللواقط الهوائية بها وهي كما يلي:

■ أنظمة الحماية من الصواعق إشعاعية النشاط: في عام 1970 م كان نظام الحماية من الصواعق الأول ذو الانبعاث المجرى المبكر من النوع إشعاعي النشاط (لواقط هوائية مشعة)، أنواع مختلفة من اللواقط الهوائية المشعة شيدت وبشكل مشابه للواقط الهوائية لفرانكلين باستثناء امتلاكها لعناصر مشعة أضيفت إليها. هذه اللواقط الهوائية تستطيع جذب الصواعق حتى على بعد 100 متر. إلا أن الدراسات العلمية اكتشفت خطورة اللواقط الهوائية المشعة بسبب تحللها في الهواء الجوي وانتقالها إلى جسم الإنسان سواء كان عن طريق الطعام أو من خلال استنشاق الهواء المشع. وبناءً على ذلك تم حظر استخدام هذا النوع من أنظمة الحماية من الصواعق حول العالم في سنة 1987 م [15].

■ أنظمة الحماية من الصواعق ذات الجهد النبضي: هذا النوع من اللواقط الهوائية عبارة عن قضيب مذبذب عليه جزء اسطواني يحتوى على وحدة قياسية إلكترونية تعمل على كشف الزيادة في شدة المجال الكهربائي ومحول للجهد العالي يعمل على إنتاج جهود نبضيه [17].

■ أنظمة الحماية من الصواعق مطلقة الشرارة: تتميز أنظمة الحماية من الصواعق مطلقة الشرارة بأن لواقطها الهوائية تقوم بإحداث شرارة عند نقطة معينة باللاقط الهوائي عندما يكون تحت تأثير مجال كهربائي عالي. هذه الشرارة تعمل على تأين الهواء المحيط به مما يساعد في توليد الدليل الصاعد في وقت مبكر وبالتالي مجال حماية أكبر. وبشكل مختصر فإن أحد هذه الأنواع يتكون من قبة شبه كروية موصلة تحيط بقضيب مركزي مؤرض. هذه القبة المعدنية تكون معزولة عن القضيب وموصلة بالأرض عن طريق ممانعة عالية. فعند اقتراب الدليل المتدرج النازل للصاعقة تزداد كثافة الشحنة على هذه القبة، وبالإستفادة من شكلها الهندسي، وعندما يكون تركيز هذه الشحنات عالي بشكل كافي، تحدث شرارة عبر الفجوة الهوائية ما بين القبة المعدنية والقضيب المؤرض. حيث تعمل هذه الشرارة على إنتاج عدد كبير من الأيونات المطلوبة لبداية الدليل الصاعد إضافة إلى زيادة المجال الكهربائي حول اللاقط الهوائي الذي يعمل على إضافة طاقة لبداية انتشار قوي للدليل الصاعد [17].

II. أنظمة الحماية من الصواعق ذات المنع الفعال: إن مبدأ عمل أنظمة الحماية من الصواعق ذات المنع الفعال يركز على منع وقوع ضربات الصواعق على المنطقة المحمية من قبلها بخلاف أنظمة الحماية الاعتيادية من الصواعق وأنظمة الحماية من الصواعق ذات الجذب الفعال اللذان يعملان على توفير مسار آمن للصاعقة. يعمل هذا النظام على توليد شحنة (سالبة أو موجبة) حول المنطقة المراد حمايتها، حيث تعمل هذه الشحنة على تخفيض المجال الكهربائي الناتج من السحب الرعدية عند مستوى الأرض، أي أنها تعمل كستار واقى للمبنى المراد حمايته من المجالات الكهربائية المتولدة بواسطة الدليل المتدرج النازل وبذلك تمنع حدوث الارتباط بين الدليل الصاعد والدليل المتدرج النازل، وبالتالي عدم وقوع الصاعقة. يعتبر هذا النوع من أنظمة الحماية من الصواعق الخيار الأفضل للمنشآت التي قد يسبب وقوع شرارة واحدة حدوث كارثة كبيرة مثل خزانات الوقود والزيوت والمنشآت التي

المفرد، وأنظمة مخروط فرانكلين. ويمتاز هذا النوع من أنظمة الحماية الخارجية بتوفير نطاق حماية للمبنى على شكل مخروط وبزاوية 45 درجة تكون قاعدته الخارجية على الأرض وحول المبنى أو جزء من المبنى. أوضحت العديد من التجارب أن وضع مجموعة من قضبان فرانكلين في الأماكن الحرجة على المبنى مع استخدام موصلات نازلة وشبكة تأريض مناسبة، فإن الأضرار الناتجة من الصواعق يمكن تخفيضها بشكل كبير وملحوظ. توصي المواصفات القياسية IEC 62305 باستخدام هذا النوع من أنظمة الحماية الخارجية على المباني التي لا يزيد ارتفاعها عن 20 متر.

- أنظمة الحماية من الصواعق باستخدام قفص فارادى: وهي عبارة عن موصلات منسقة على شكل شبكة محاطة ومثبتة على خارج المبنى. حيث يمكن الاستفادة من المباني المعدنية وذلك باستخدام الهيكل المعدني نفسه كجزء من هذا القفص تحت ضوابط ومعايير معتمدة. وتمتاز أنظمة الحماية من الصواعق باستخدام قفص فارادى بأنها إذا ما تم تصميمها بالشكل الصحيح فإنها ستشكل درعاً وقيماً من الموجات الكهرومغناطيسية أي بمعنى عدم وجود المجالات الكهربائية الناتجة من تيار الصواعق المتدفق إلى الأرض بالمبنى.

النوع الثاني: الأنظمة غير الاعتيادية للحماية من الصواعق

يمكن أن نقسم هذا النوع من أنظمة الحماية إلى نوعين رئيسيين هما كما يلي:

I. أنظمة الحماية من الصواعق ذات الجذب الفعال: تختلف أنظمة الحماية من الصواعق ذات الجذب الفعال عن أنظمة الحماية الاعتيادية في شكل اللاقط الهوائي المستخدم. تتمثل أهمية هذا النوع من أنظمة الحماية من الصواعق في قدرتها على جذب ضربات الصواعق إلى نقطة محددة ومعروفة بفعالية أكثر مما هو موجود في أنظمة الحماية من الصواعق الاعتيادية، وبالتالي قدرتها على حماية النقاط الأخرى المحيطة بها وبأقل عدد من اللواقط الهوائية مقارنة بالنوع الاعتيادي وذلك وفقاً لأقوال المخرعين والشركات المصنعة لها [9]. يمكن أن نقسم هذا النوع من أنظمة الحماية إلى الآتي:

- أنظمة الحماية من الصواعق باستخدام قضيب فرانكلين المحسن: يعرف هذا النوع من الأنظمة بنظام الصاري المفرد المحسن بنظام القضبان ذات النهاية غير الحادة. وبالرغم من أن هذا النوع يقع تحت فئة أنظمة الحماية من الصواعق الاعتيادية إلا أن مبدأ عملها يشابه أنظمة الحماية من الصواعق ذات الجذب الفعال. إن من بين الأسئلة المهمة في الحماية من الصواعق هو هل هناك تأثير لشكل اللواقط الهوائية على عملية الارتباط بين الدليل المتدرج النازل للصاعقة والدليل الصاعد. أجرى العالم موري وزملائه دراسة حقلية لمدة سبع سنوات لمعرفة تأثير نصف قطر اللاقط الهوائي على قدرته في جذب الصواعق [13]. لاحظوا بأن نصف قطر اللواقط الهوائية تؤثر بشكل طفيف على مسافة الصعق. وجد أن كفاءة اللواقط الهوائية بأنصاف أقطار مختلفة لا تزيد عن 10% [14].

- أنظمة الحماية من الصواعق ذات الانبعاث المجرى المبكر: المؤيدين لهذا النوع من أنظمة الحماية من الصواعق يدعو بأنها تملك مجال حماية من الصواعق أكبر مما هو محقق من نظيراتها الأنظمة الاعتيادية للحماية تحت نفس الشروط. عادة ما يتم إثبات هذه الادعاءات من خلال الحصول على بداية مبكرة للدليل الصاعد في التجارب العملية والتي تقود هي الأخرى إلى زمن أقصر لعملية الانهيار. بالرغم من هذه الادعاءات، يعتبر النقاش حول كفاءة هذا النوع من أنظمة الحماية من الصواعق موضوع خلاف كبير في الأونة الأخيرة. هذا بسبب الشكوك المنطقية حول صحة التجارب العملية في تقييم كفاءتها وأدائها. لذلك، حتى وقت قريب كان هناك نقص في الأدلة العلمية والتقنية سواء لرفض أو قبول هذا النوع من أنظمة الحماية، ولكن الدراسات الحقلية والنظرية في الأونة الأخيرة عززت الأدلة التي تشير بوضوح إلى أن هذا النوع من أنظمة الحماية لا يملك أداء متفوق على الأنظمة الاعتيادية للحماية من الصواعق. من هذه الدراسات، الدراسة التي أجريت بواسطة هارتنو وزملائه في ماليزيا والتي أعطت أدلة لا تقبل

- أن لا يسبب تيار الصاعقة المتوقع سريانه في هذه المفراغات أي ضرر عليها.
- يجب اختيار نوع المفراغ وفق المواصفات القياسية العالمية IEC61643 الخاصة بذلك.
- لا تكون المفراغات ضرورية في الكابلات المحجبة والتي لا يزيد طولها عن 80 م ومقطع غلافها المعدني أكبر من 10 ملم² وذلك عندما تربط هذه الكابلات من كلا الطرفين مع التجهيزات الكهربائية، ويربط غلافها المعدني مع موصلات تساوي الجهد.
- يجب على المفراغ المركب على منخل البناء المحمي أن يُبقي الجزء الأكبر من القدرة النوعية للصاعقة بعيداً عن التجهيزات الموجودة داخل البناء.
- يجب دائماً تركيب مفراغات الجهد المستخدمة لتخفيض قيمة الجهود الزائدة على موصلات الطاقة بعد الحماية (القواطع الكهربائية) التي تفصل عند زيادة التيار.

د. اختيار نظام الحماية من الصواعق

- من خلال ما تم تناوله في السابق يمكننا أن نصل إلى الآتي:
- الاعتماد على استخدام الأنظمة الاعتيادية للحماية الخارجية من خطر الصواعق ويرجع ذلك إلى ثبوت كفاءتها وفعاليتها من خلال العديد من الدراسات بعكس الأنظمة الغير اعتيادية للحماية الخارجية والتي لاتزال في طور الدراسة والتطوير. لذا فإن العديد من منظمات التقييس الدولية مثل المواصفات البريطانية (BS) British Standard، الهيئة الدولية للنظم الكهروتقنية International Electrotechnical Commission (IEC)، جمعية مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) Institute of Electrical and Electronics Engineers قد اعتمدت نظام الحماية الاعتيادي في مواصفاتها.
- استخدام نظام داخلي للحماية من الصواعق واختيار نوعه سيكون وفقاً لتحليل وتقييم المخاطر للمبنى المراد حمايته (الحالة الدراسية).

موضوع الحالة الدراسية يدرس مبنى التخطيط العمراني الذي يقع بمدينة مصراته والتي تطل إحدى واجهاته على الطريق الدائري الثاني بالمدينة، حيث يوضح شكل (1) موقع المبنى وخطوط الخدمة المغذية له. يتكون المبنى من خمسة طوابق بمساحة مسطحة بحدود 576 متر مربع وبمتوسط ارتفاع قدره 18.5 متر، والمبنى لا يزال في طور التنفيذ. يوضح شكل (2) رسم ثلاثي الأبعاد للمبنى.



شكل (1). صورة من برنامج الجوجل إرث لموقع المبنى وخطوط الخدمة

4. الحسابات التصميمية لنظام الحماية من الصواعق

الخطوة الأولى في إجراءات تصميم نظام حماية من الصواعق التعرف على خصائص المبنى وبيئته المحيطة. تم إجراء قياسات عملية للحصول

تحتوي على مواد حساسة وسريعة الاشتعال. إن جدوى هذا النوع من أنظمة الحماية من الصواعق ذات المنع الفعال لا يزال في جدال، حيث أثبتت دراسات حقلية تعرض المباني المحمية من قبلها لضربات الصواعق [9].

ب. أنظمة الحماية الداخلية من الصواعق

من أهم متطلبات نظام الحماية الداخلي من الصواعق هو علاقة نظام الحماية الخارجي بالتجهيزات المعدنية داخل المبنى، بالإضافة إلى الإجراءات المتخذة للحد من أثر الصاعقة على التجهيزات داخل المبنى. يجب الأخذ بالحسبان أنه لا يمكن تصميم نظام حماية فعال من الصواعق بدون تنفيذ نظام حماية داخلي. حيث أن الهدف من نظام الحماية الداخلي هو منع حدوث شرارات كهربائية خطيرة داخل المبنى المراد حمايته نتيجة سريان جزء من تيار الصاعقة في الموصلات الخارجية لنظام الحماية، وفي الموصلات الداخلة والخارجة من المبنى (كابلات طاقة، معلومات) أو في التركيبات المعدنية داخل المبنى، ويجب بشكل خاص اتخاذ إجراءات حماية إضافية في المباني التي تحوي على مواد قابلة للاحتراق أو للانفجار [10]. تحدث الشرارة الكهربائية بين موصلين عندما يكون فرق الجهد بين هذين الموصلين أكبر من العتانة الكهربائية للمادة العازلة بينهما. يمكن الحد من حدوث شرارة خطيرة بالطرق التالية:

(1) وصلات تساوي الجهد: يُعد تحقيق تساوي الجهد في المبنى بحيث يربط عنده جميع الأغلفة المعدنية للموصلات الداخلة إلى المبنى (موصلات طاقة، معلومات)، بالإضافة إلى موصلات نظام الحماية الخارجي وجميع التجهيزات المعدنية المتواجدة ضمن المجال المراد حمايته إجراء هاماً جداً لخفض أخطار الحرائق والانفجار والخطر على الحياة في المجال المراد حمايته من الصواعق. يتحقق تساوي الجهد بواسطة موصلات ربط، أو مفراغات الجهد المتصلة بنظام الحماية الخارجي من الصواعق (LPS)، أو بالهيكل المعدني للمنشأة أو بالتركيبات المعدنية أو بالأجزاء الموصلة الخارجية والتجهيزات الكهربائية والمعلوماتية ضمن المجال المراد حمايته [10]. يمكن التقليل من الأضرار التي تحدث في التجهيزات الكهربائية والإلكترونية الحساسة داخل المباني، نتيجة الترابط التحريضي بين الموصلات التي يسري فيها أجزاء من تيار الصاعقة وهذه التجهيزات وذلك من خلال الآتي:

- باستخدام كابلات محجبة ذات ممانعة ترابط تحريضية صغيرة.
- باستخدام مفراغات جهد على هذه الكابلات.

(2) مسافة الأمان: عند عدم إمكانية تحقيق وصلات تساوي الجهد، بهدف تجنّب خطر حدوث شرارة كهربائية يجب زيادة مسافة الفصل (S) بين نظام الحماية من الصواعق والتركيبات المعدنية، كذلك المسافة بين الأجزاء الموصلة الخارجية والخطوط بحيث تصبح أكبر من مسافة الأمان d:

$$S \geq d$$

وعندما تكون المسافة بين موصلات الحماية من الصواعق المركبة على السطح (الوافظ) والتجهيزات الكهربائية داخل المبنى أقل من مسافة الأمان المطلوبة، في هذه الحالة يجب إما نقل موصلات الحماية المركبة على السطح، أو نقل التجهيزات الكهربائية داخل المبنى إلى مكان آخر [10].

(3) مفراغات الجهد والتيار (SPD) Surge Protection Devices: إن مفراغات الجهد والتيار مصممة للحد من الزيادة العابرة للجهد والتيار والتي تعتبر أحد التأثيرات الناتجة من ضربات الصواعق، لذا فهي تعتبر أحد الطرق المستخدمة في أنظمة الحماية الداخلية من الصواعق. يتم توصيل هذا الجهاز على التوازي في دائرة تزويد الطاقة للأحمال الكهربائية والتي تحتاج للحماية من خطر الزيادة العابرة للجهد والتيار. كذلك يمكن أن تستخدم مفراغ عند أي مستوى من شبكة تزويد الطاقة الكهربائية. وعند استخدام مفراغات الجهد والتيار في أنظمة الحماية الداخلية من الصواعق يجب أن نأخذ في الاعتبار الآتي [10]:

التركيبات الكهربائية الداخلية وموصلات القدرة الداخلة والخارجة من وإلى المبنى، وكذلك مواصفات التركيبات الإلكترونية الداخلية وموصلات الاتصالات الداخلة والخارجة من وإلى المبنى.

ب. تصنيف مناطق الحماية للمبنى وخصائصها

بالنظر إلى الخصائص التالية:

- اختلاف طبيعة الأرض لمدخل المبنى وللحديقة وللأرضية داخل المبنى.
- يجب أن يكون المبنى والأرشفة محميان بشكل جيد من الحريق.
- لا يوجد تحجيب داخل المبنى.
- يجب أن تكون الخسائر التي تقع في صالة الحاسوب أقل من التي تقع في المكاتب. يمكن تقسيم المبنى إلى مناطق الحماية التالية:

- Z₁: مدخل المبنى
- Z₂: الحديقة
- Z₃: الأرشفة
- Z₄: المكاتب
- Z₅: صالة الحاسوب

ج. دراسة تقييم المخاطر للمبنى

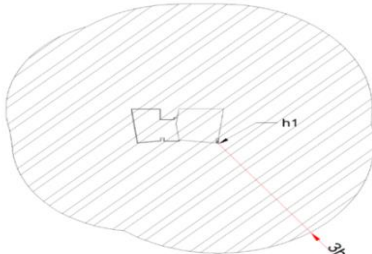
بعد التعرف على خصائص المبنى وبيئته المحيطة وتقسيمه إلى مناطق حماية وفقاً لهذه الخصائص تأتي مرحلة تقييم المخاطر والتي ستنم بطريقتين. الطريقة الأولى باستخدام الحسابات الرياضية، والطريقة الثانية باستخدام برنامج DEHN لتقييم المخاطر مع مقارنة نتائجها. في كلا الطريقتين سيتم حساب كل من مخاطر خسارة الحياة البشرية (R₁) ومخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين (R₂) وإهمال كل من مخاطر خسارة التراث الثقافي (R₃) لعدم وجودها بحالتنا الدراسية ومخاطر خسارة القيمة الاقتصادية (R₄) باعتبار أن الأجهزة والمعدات بالمبنى ليس ذات قيمة باهظة، إضافة إلى عدم توفر البيانات والمعلومات المتعلقة بتكاليف المبنى ومحتوياته وتكاليف توريد وتركيب أنظمة الحماية من الصواعق.

أولاً: تقييم المخاطر باستخدام الحسابات الرياضية

سيتم إجراء تقييم المخاطر لهذا المبنى بناءً على الموصفات القياسية IEC62305 لسنة 2010 م من خلال الجداول القياسية التابعة لها، وإنجاز ذلك يتطلب الأمر حساب المعاملات المتعلقة بكل نوع من أنواع المخاطر ومن ثم حساب هذه المخاطر من خلال الخطوات التالية:

- حساب عدد الأحداث الخطرة (N)

لحساب عدد الأحداث الخطرة لكل من المبنى والموصلات المغذية له نحتاج أولاً حساب المساحة التجميعية لكليهما، ونظراً لأن المبنى معقد من ناحية الشكل تم تحديد المساحة التجميعية للمبنى ولجواره هندسياً، يوضح شكل (3) كيفية حساب المساحة التجميعية للمبنى مع العلم بأن قيمة h₁ تمثل ارتفاع المبنى عند تلك النقطة، أما بالنسبة للمساحة التجميعية لموصلات القدرة والاتصالات فحسبت رياضياً.



شكل (3). المساحة التجميعية للمبنى محسوبة هندسياً

على قيمة المقاومة النوعية للتربة بمحيط المبنى، والتي تعتبر عاملاً هاماً في تصميم منظومة التأريض لنظام الحماية الخارجي من الصواعق في حال ما أثبتت الدراسة الحاجة إليه.



شكل (2). صورة للشكل النهائي لمبنى التخطيط العمراني

أما الخطوة الثانية تتمثل في عملية تقييم المخاطر للمبنى وهي من أهم خطوات التصميم لكونها النقطة التي يتم عندها معرفة ما إذا كان هناك حاجة لنظام حماية من الصواعق لهذا المبنى، ومعرفة تدابير الحماية المطلوبة عند الحاجة لذلك. أما الخطوة الثالثة فهي القيام بإجراءات الحماية المطلوبة والتي تتمثل في تصميم نظام حماية خارجي أو نظام حماية داخلي أو كليهما معاً وذلك وفقاً لنتائج تقييم المخاطر.

أ. خصائص المبنى وبيئته المحيطة

تم إجراء القياسات المطلوبة للحصول على قيمة المقاومة النوعية للتربة (ρ) عند عدة مواقع بمحيط المبنى وذلك باستخدام جهاز قياس من نوع ميجر (Megger). حيث تم تسجيل قيم القراءات المتمثلة في قيمة المقاومة (R) لعمق 1.5 متر وعمق 3 متر كما هو موضح بالجدول (1).

جدول (1). قيم المقاومة (R) المقاسة عملياً عند عدة مواقع		
الموقع	عمق الاختبار (D)	
	1.5 متر	3 متر
قراءة جهاز القياس بالأوم (R)		
1	9	1.092
2	10.88	2.32
3	10.86	2.93

ولإيجاد قيمة المقاومة النوعية للتربة نطبق المعادلة (1).

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times D \quad (1)$$

وجداول (2) يوضح نتائج قيم المقاومة النوعية للتربة بموقع المبنى.

جدول (2). قيم المقاومة النوعية للتربة بموقع المبنى		
الموقع	عمق الاختبار (D)	
	1.5 متر	3 متر
المقاومة النوعية للتربة (ρ) أوم متر		
1	84.82	20.58
2	102.54	43.73
3	102.35	55.23

وبذلك فإن متوسط قيمة المقاومة النوعية للتربة عند موقع المبنى تساوي تقريباً $68.21 \Omega.m$ ، حيث سيتم إدراجها ضمن خصائص المبنى. كما تم تجميع باقي خصائص المبنى وبيئته المحيطة من الجهات ذات العلاقة وتشمل قيم معاملات التصميم المتعلقة بكل خاصية و مواصفات المبنى، و مواصفات

- حساب مركبات خسارة الحياة البشرية (L_{t1}) تتعلق متوسط نسبة الخسارة L_{t1} بالخسارة الناتجة عن الإصابة بسبب جهد الخطوة وجهد اللمس داخل وخارج المبنى، بينما تمثل متوسط نسبة الخسارة L_{t1} الخسارة الناتجة عن الإصابة بفعل الأضرار الفيزيائية بالمبنى من خلال المعادلة (4).

$$L_{t1}(Z) = \frac{L_{t1} \times n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} \quad (4)$$

وعندما يصعب تقدير فترة تواجد الأشخاص بالمبنى يتم تطبيق المعادلة (5).

$$L_{t1}(Z) = \frac{L_{t1}}{n_t} \times n_z \quad (5)$$

وحيث أن قيمة $L_{t1} = 10^{-2}$ للمباني الإدارية، وبالرجوع إلى عدد الأشخاص بكل منطقة حماية يمكن حساب متوسط نسبة الخسائر بمناطق الحماية. فمثلاً لحساب متوسط نسبة الخسارة لمدخل المبنى $L_{t1}(Z_1)$ تطبق المعادلة (5).

$$L_{t1}(Z_1) = \frac{L_{t1}}{n_t} \times n_z = \frac{10^{-2}}{120} \times 4$$

$$L_{t1}(Z_1) = 3.33 \times 10^{-4}$$

حيث أن: العدد 120 يمثل عدد العاملين داخل وخارج المبنى (حسب الخرائط التصميمية)، وعدد 4 يمثل عدد الأشخاص المتواجدين عند مدخل المبنى في لحظة الخطر (فرضية).

وهكذا يتم حساب باقي مناطق الحماية، والجدول (5) يوضح ملخص لمتوسط نسبة الخسائر لكل منطقة من مناطق الحماية.

جدول (5). متوسط نسبة خسائر الحياة البشرية سنوياً بمناطق الحماية

منطقة الحماية	L_{t1}	L_{t1}	المعادلة
Z_1	-	3.33×10^{-4}	
Z_2	-	1.67×10^{-4}	
Z_3	8.33×10^{-4}	8.33×10^{-4}	$L_{t1}(Z) = \frac{L_{t1}}{n_t} \times n_z$
Z_4	7.67×10^{-3}	7.67×10^{-3}	
Z_5	1×10^{-3}	1×10^{-3}	

وبذلك يمكننا حساب مركبات خسارة الحياة البشرية وفقاً للمعادلات الخاصة بكل منها، فمثلاً لإيجاد قيمة مركبة الخسارة L_{A1} لمنطقة الحماية (Z_2) تطبق المعادلة (6).

$$L_{A1}(Z_2) = L_{t1}(Z_2) \times r_t(Z_2) \quad (6)$$

$$L_{A1}(Z_2) = 1.67 \times 10^{-4} \times 10^{-2}$$

$$L_{A1}(Z_2) = 1.67 \times 10^{-6}$$

وبالمثل يتم حساب باقي مركبات الخسارة، وجدول (6) يوضح المعادلات المستخدمة في الحسابات، بينما جدول (7) يوضح ملخصاً لقيم مركبات خسارة الحياة البشرية.

جدول (6). المعادلات المستخدمة لحساب مركبات خسارة الحياة البشرية

مركبات الخسارة	المعادلة
L_{A1}	$L_A = L_U = \left(\frac{n_z \times r_t \times L_t}{n_t} \right) \times \left(\frac{t_z}{8760} \right)$
L_{B1}	$L_B = L_V = \left(\frac{n_z \times r_p \times L_f \times h_z \times r_f}{n_t} \right) \times \left(\frac{t_z}{8760} \right)$
L_{U1}	$L_A = L_U = \left(\frac{n_z \times r_t \times L_t}{n_t} \right) \times \left(\frac{t_z}{8760} \right)$
L_{V1}	$L_B = L_V = \left(\frac{n_z \times r_p \times L_f \times h_z \times r_f}{n_t} \right) \times \left(\frac{t_z}{8760} \right)$

8760. إجمالي عدد الساعات السنوية

ولحساب عدد الأحداث الخطرة (N_D) للمبنى نطبق المعادلة (2).

$$N_D = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$N_D = 1 \times 14.46 \times 10^3 \times 0.5 \times 10^{-6}$$

$$N_D = 7.23 \times 10^{-3}$$

وبالمثل يتم حساب باقي الأحداث الخطرة كما هو موضح بالجدول (3).

ملاحظة: جميع الرموز المستخدمة في المعادلات موضحة في جدول (أ).

جدول (3). عدد الأحداث الخطرة في السنة

الرمز	المعادلة $\times 10^{-6}$	القيمة (1/year)
N_D (المبنى)	$N_D = N_g \times A_d \times C_d$	7.23×10^{-3}
N_M (المبنى)	$N_m = N_g \times A_m \times 10^{-6}$	836.24×10^{-3}
N_L (موصلات القدرة)	$N_l = N_g \times A_l \times C_l \times C_e \times C_t$	2×10^{-4}
N_I (موصلات القدرة)	$N_i = N_g \times A_i \times C_i \times C_t \times C_e$	2×10^{-2}
N_L (موصلات الاتصالات)	$N_l = N_g \times A_l \times C_l \times C_t \times C_e$	6×10^{-4}
N_I (موصلات الاتصالات)	$N_i = N_g \times A_i \times C_i \times C_t \times C_e$	6×10^{-2}

- حساب مركبات احتمالات الضرر (P)

يتم حساب مركبات احتمالات الضرر لكل منطقة من مناطق الحماية بالرجوع إلى خصائص المبنى ومحيطه وخصائص مناطق الحماية ومن ثم تطبيق المعادلات الخاصة بكل مركبة ضرر. فعلى سبيل المثال لإيجاد مركبة الضرر (P_Z) لموصلات القدرة نطبق المعادلة (3).

$$P_Z = P_{spd} \times P_{li} \times C_{li} \quad (3)$$

وبالتعويض بقيمة معاملات P_{spd} , P_{li} , C_{li} (من جداول المواصفة القياسية IEC62305) نجد أن:

$$P_Z = 1 \times 0.3 \times 1 = 0.3$$

وبالمثل يتم حساب باقي مركبات الضرر، وجدول (4) يوضح ملخصاً لقيم مركبات الضرر بمناطق الحماية بالمبنى.

جدول (4). ملخص احتمالات مركبات الضرر لمناطق الحماية والمعادلات المستخدمة

الاحتمالات	مناطق الحماية				
	Z	Z	Z	Z ₂	Z ₁
P_A	-	-	-	1	1
P_B	معامل حدوث أضرار فيزيائية	1	-	-	-
P_C	$P_C = P_{spd} \times C_{id}$	1	-	-	-
(موصلات القدرة)	$P_m = P_{spd} \times P_{ms}$	0.16	-	-	-
(موصلات الاتصالات)	$P_m = P_{spd} \times P_{ms}$	0.44	-	-	-
(موصلات القدرة والاتصالات)	$P_U = P_{tu} \times P_{eb}$	1	-	-	-
P_V	$\times P_{td} \times C_{td}$				
(موصلات القدرة والاتصالات)	$P_V = P_{eb} \times P_{td} \times C_{td}$	1	-	-	-
(موصلات القدرة والاتصالات)	$P_W = P_{spd} \times P_{td} \times C_{td}$	1	-	-	-
(موصلات القدرة)	$P_Z = P_{spd} \times P_{li} \times C_{li}$	0.3	-	-	-
(موصلات الاتصالات)	$P_Z = P_{spd} \times P_{li} \times C_{li}$	0.5	-	-	-

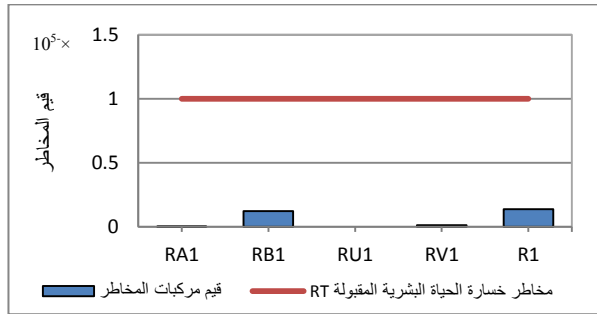
- حساب الخسارة السنوية المتوقعة

نظراً لأنه سيتم في هذا التقييم حساب نوعين من المخاطر وهما مخاطر خسارة الحياة البشرية ومخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين، بالتالي ينبغي حساب نوعية الخسارة المتعلقة بكل منهما.

جدول (9). ملخص لمركبات مخاطر خسارة الحياة البشرية (10^{-5})

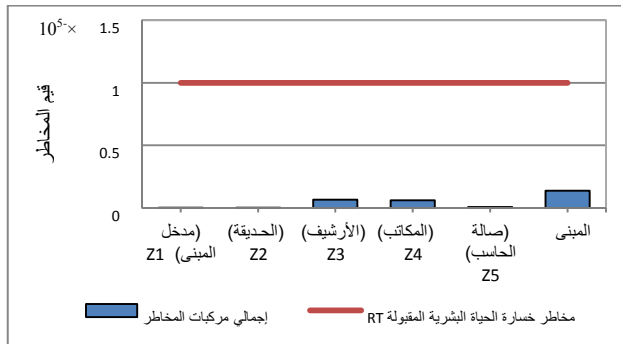
الرمز	مدخل المبنى Z_1	الحديفة Z_2	الأرشيف Z_3	المكاتب Z_4	صالة الحاسب Z_5	القيمة الكلية للمبنى
R_{A1}	0.0002	0.0012	-	-	-	0.0014
R_{B1}	-	-	0.0602	0.0554	0.0072	0.1228
(قدرة) R_{U1}	-	-	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
(قدرة) R_{V1}	-	-	0.0016	0.0015	0.0002	0.0033
(هاتف) R_{U1}	-	-	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
(هاتف) R_{V1}	-	-	0.0049	0.0046	0.0006	0.0101
المجموع الكلي للمخاطر (R_1)	0.0002	0.0012	0.0667	0.0615	0.008	0.1376

ويترجمة القيم الواردة في جدول (9) إلى رسومات بيانية فإن شكل (4) يوضح مقارنة بين قيم مركبات خسارة الحياة البشرية المحسوبة للمبنى مع المخاطرة المقبولة للخسارة البشرية، بينما يوضح شكل (5) مقارنة المخاطرة المقبولة مع إجمالي مركبات مخاطر خسارة الحياة البشرية لمناطق الحماية والمبنى.



شكل (4). مقارنة المخاطرة المقبولة مع مركبات مخاطر خسارة الحياة البشرية للمبنى

من خلال جدول (9) والشكلين (4) و(5) يلاحظ أن قيمة مخاطر خسارة الحياة البشرية للمبنى $R_1 = 0.1376 \times 10^{-5}$ وهي أقل من قيمة مخاطر الخسارة المسموح بها $R_T = 10^{-5}$ ، أي ما نسبته 13.76% من هذه القيمة.



شكل (5). مقارنة المخاطرة المقبولة مع إجمالي مركبات مخاطر خسارة الحياة البشرية

بالتالي من غير الضروري إقامة نظام حماية من الصواعق لتجنب هذا النوع من المخاطر على المبنى. بالرجوع إلى جدول (9) نجد أن التأثير الأكبر على قيمة المخاطرة R_1 تتمثل في مركبة المخاطر R_{B1} والتي تنتج بسبب إصابة المبنى إصابة مباشرة بصاعقة. ولمعرفة ارتفاع المبنى الذي يتطلب فيه لنظام حماية خارجي فإننا نحتاج إلى تحليل قيمة مركبة المخاطر R_{B1} . إن زيادة قيمة R_{B1} بمقدار 8 أضعاف لتصبح قيمتها 1×10^{-5} مع تثبيت قيمة الخسارة L_{B1} يؤدي إلى زيادة عدد الأحداث الخطرة N_D بنفس

جدول (7). مركبات الخسارة للحياة البشرية

مركبات الخسارة	منطقة الحماية				
	Z_5	Z_4	Z_3	Z_2	Z_1
L_{A1}	1×10^{-7}	7.67×10^{-7}	8.33×10^{-7}	1.67×10^{-6}	3.33×10^{-7}
L_{B1}	1×10^{-5}	7.67×10^{-5}	8.33×10^{-5}	0	0
L_{U1}	1×10^{-7}	7.67×10^{-7}	8.33×10^{-7}	1.67×10^{-6}	3.33×10^{-7}
L_{V1}	1×10^{-5}	7.67×10^{-5}	8.33×10^{-5}	0	0

حساب مركبات خسارة الخدمة المقدمة للمواطنين (L_2)

تتعلق الخسارة L_{P2} بالخسارة الناتجة عن الأضرار الفيزيائية بالمبنى والتي ينتج عنها انقطاع بالخدمات المقدمة إلى المواطنين. بينما تمثل الخسارة L_{O2} الخسارة الناتجة عن فشل الأنظمة الداخلية بالمبنى وبالتالي عدم القدرة على تزويد المواطنين بالخدمات المطلوبة، ونظراً لعدم معرفة عدد المستفيدين من الخدمة لكل منطقة من مناطق الحماية، بالتالي فإنه سيتم اعتبار أن هذا العدد متساوي. ولحساب مركبات الخسارة المقدمة إلى المواطنين نطبق المعادلتين (7) و(8).

$$L_B = L_V = \left(\frac{n_P \times r_P \times L_f \times r_f}{n_T} \right) \quad (7)$$

$$L_C = L_m = L_z = L_w = \left(\frac{n_P \times L_O}{n_T} \right) \quad (8)$$

فعلى سبيل المثال يمكن حساب المركبة L_{B2} لمنطقة الحماية (Z_3) كالتالي:

$$L_{B2}(Z_3) = L_{f2} \times r_p \times r_f \quad (9)$$

$$L_{B2}(Z_3) = 3.33 \times 10^{-2} \times 0.5 \times 10^{-1}$$

$$L_{B2}(Z_3) = 1.66 \times 10^{-3}$$

بذلك تكون مركبات الخسارة المقدمة إلى المواطنين كما هي موضحة بالجدول (8).

حساب مخاطر خسارة الحياة البشرية (R_1)

الإعتبار الأول في هذه الحالة الدراسية هو حساب مخاطر خسارة الحياة البشرية حيث أن:

جدول (8). مركبات خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين

مركبات الخسارة	منطقة الحماية				
	Z_5	Z_4	Z_3	Z_2	Z_1
L_{B2}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-3}	0	0
L_{C2}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	0	0
L_{M2}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	0	0
L_{V2}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-4}	1.66×10^{-3}	0	0
L_{W2}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	0	0
L_{Z2}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	3.33×10^{-3}	0	0

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{U1}(\text{قدرة}) + R_{V1}(\text{قدرة}) + R_{U1}(\text{اتصالات}) + R_{V1}(\text{اتصالات})$$

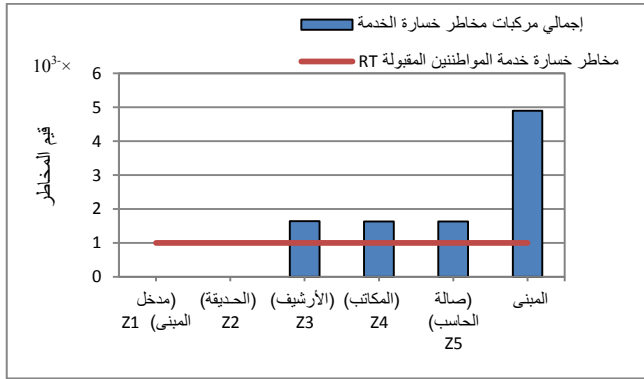
وينطبق المعادلة (10) نحصل على مركبات المخاطر المطلوبة، جدول (9) يوضح ملخصاً لنتائج قيم هذه المركبات.

فعلى سبيل المثال لإيجاد قيمة مركبة المخاطر R_{B1} لمنطقة الحماية Z_3 :

$$R_{B1}(Z_3) = N_D \times P_B \times L_{B1} \quad (10)$$

$$R_{B1}(Z_3) = 7.23 \times 10^{-3} \times 1 \times 8.33 \times 10^{-5}$$

$$R_{B1} = 0.602 \times 10^{-5}$$



شكل (7). مقارنة المخاطرة المقبولة مع إجمالي مركبات مخاطر خسارة الخدمة للمواطنين

- تدابير الحماية من خطر الصواعق

بالنظر إلى جدول (10) نجد أن مركبة المخاطر R_{M2} وهي مركبة مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين بسبب فشل الأنظمة الداخلية نتيجة لضربات الصواعق بجوار المبنى هي المسؤولة عن ارتفاع قيمة المخاطر الكلية R_2 ، لذلك سوف يكون التركيز على تقليل هذه المركبة وذلك من خلال تقليل الاحتمالية P_m .

وبالرجوع إلى المعادلتين (11)، (12).

$$P_m = P_{spd} \times P_{ms} \quad (11)$$

$$P_{ms} = (K_{S1} \times K_{S2} \times K_{S3} \times K_{S4})^2 \quad (12)$$

نجد أن تركيب نظام حماية خارجي للحماية من الصواعق ليس له تأثير فعلي على هذا المعامل، إلا أن إنشاء نظام حماية داخلي يؤثر وبشكل واضح في عملية التقليل من هذا المعامل وبالتالي التقليل من مخاطر خسارة الخدمة، ومن أنسب الطرق لتخفيض هذه القيمة هو أخذ التدابير اللازمة من أجل منع تشكيل حلقات ذات مساحة كبيرة لموصلات القدرة والاتصالات داخل المبنى لتصبح $K_{S3}=0.2$. وبالتعويض بهذه القيمة لموصلات القدرة والاتصالات لكل منطقة حماية نحصل على قيم مركبات مخاطر خسارة الخدمة الموضحة بالجدول (11). من خلال جدول (11) يلاحظ أن قيمة مخاطر خسارة الخدمة $R_2=0.656 \times 10^{-3}$ أصبحت أقل من قيمة المخاطرة المقبولة $R_T=10^{-3}$ بنسبة 61%.

جدول (11). ملخص لمركبات مخاطر خسارة الخدمة للمواطنين بعد اتخاذ إجراءات الحماية ($10^{-3} \times$)

الرمز	المبنى Z1	الحديقة Z2	الأرشيف Z3	المكاتب Z4	الحاسب Z5	القيمة الكلية للمبنى
R_{B2}	-	-	0.012	0.0012	0.0012	0.0144
R_{C2}	-	-	0.024	0.024	0.024	0.072
R_{M2}	-	-	0.067	0.067	0.067	0.201
قدرة) R_{V2}	-	-	0.0003	0.00003	0.00003	0.00039
اتصالات) R_{V2}	-	-	0.001	0.0001	0.0001	0.0012
قدرة) R_{W2}	-	-	0.0006	0.00066	0.00066	0.00198
اتصالات) R_{W2}	-	-	0.002	0.002	0.002	0.006
قدرة) R_{Z2}	-	-	0.02	0.02	0.02	0.06
اتصالات) R_{Z2}	-	-	0.1	0.1	0.1	0.3
المجموع الكلي	-	-	0.226	0.215	0.215	0.656

للمخاطر (R_2)

المقدار والذي بدوره يستوجب تركيب نظام حماية خارجي للمبنى للحد من مخاطر خسارة الحياة البشرية، نجد أن قيمة الارتفاع المؤثر على المبنى تقريباً يساوي 40 متر أي ما يعادل 10 طوابق. ومن ناحية أخرى عند مضاعفة المساحة المربعة للمبنى موضوع الدراسة لتصبح 1152 متر مربع نجد أن الارتفاع المؤثر يبلغ تقريباً 38 متر.

■ حساب مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين (R_2)
الاعتبار الثاني في هذه الحالة الدراسية حساب مخاطر خسارة الخدمة إلى المواطنين (R_2)، حيث أن:

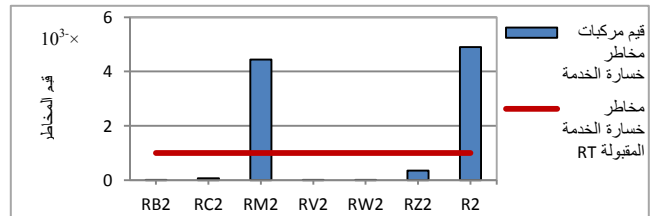
$$R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2}(\text{قدرة}) + R_{V2}(\text{اتصالات}) + R_{W2}(\text{قدرة}) + R_{W2}(\text{اتصالات}) + R_{Z2}(\text{قدرة}) + R_{Z2}(\text{اتصالات})$$

وبنفس الطريقة السابقة في حساب مركبة R_1 يتم حساب مركبة R_2 . جدول (10) يوضح ملخصاً لمركبات مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين.

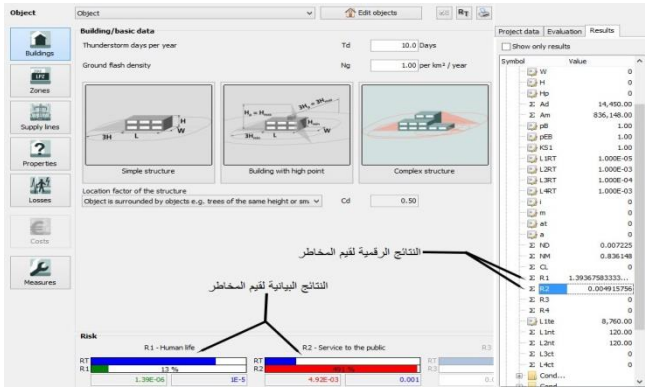
جدول (10). ملخص لمركبات مخاطر خسارة الخدمة إلى المواطنين ($10^{-3} \times$)

الرمز	المبنى Z1	الحديقة Z2	الأرشيف Z3	المكاتب Z4	الحاسب Z5	القيمة الكلية للمبنى
R_{B2}	-	-	0.012	0.0012	0.0012	0.0144
R_{C2}	-	-	0.024	0.024	0.024	0.072
R_{M2}	-	-	1.48	1.48	1.48	4.44
قدرة) R_{V2}	-	-	0.00033	0.000033	0.000033	0.000396
اتصالات) R_{V2}	-	-	0.001	0.0001	0.0001	0.0012
اتصالات) R_{W2}	-	-	0.002	0.002	0.002	0.006
قدرة) R_{W2}	-	-	0.00066	0.00066	0.00066	0.00198
اتصالات) R_{Z2}	-	-	0.1	0.1	0.1	0.3
قدرة) R_{Z2}	-	-	0.02	0.02	0.02	0.06
المجموع الكلي (R_2)	-	-	1.63999	1.627993	1.627993	4.8959

من خلال جدول (10) والشكلين (4)، (5) يلاحظ أن قيمة مخاطر خسارة الخدمة المقدمة للمواطنين بالمبنى $R_2 = 4.8959 \times 10^{-3}$ أي ما نسبته 490% وهي أكبر من قيمة مخاطر الخسارة المسموح بها $R_T = 10^{-3}$ ، وبالتالي فإن اتخاذ تدابير الحماية اللازمة من خطر الصواعق لهذا المبنى يعتبر أمراً ضرورياً لتقليل مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى المواطنين. وترجمة القيم الواردة في جدول (10) إلى رسومات بيانية فإن شكل (6) يوضح مقارنة بين قيم مركبات خسارة الخدمة للمواطنين المحسوبة للمبنى مع المخاطرة المقبولة للخسارة للخدمة، بينما يوضح شكل (7) مقارنة المخاطرة المقبولة مع إجمالي مركبات مخاطر خسارة الخدمة للمواطنين لمناطق الحماية و المبنى.



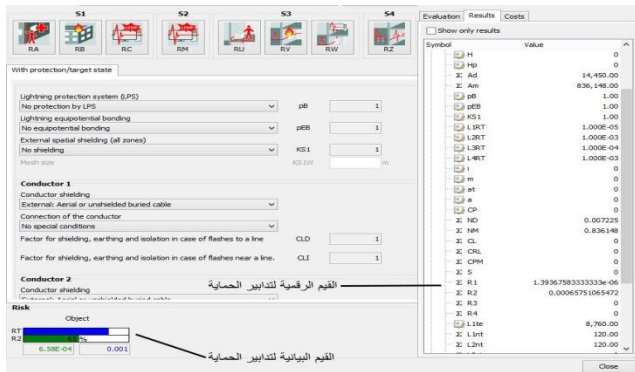
شكل (6). مقارنة المخاطرة المقبولة مع مركبات مخاطر خسارة الخدمة للمواطنين بالمبنى



شكل (9). النتائج الرقمية والبيانية لتقييم المخاطر

(8) تنفيذ إجراءات الحماية المطلوبة من خلال الضغط على أيقونة تدابير (Measures) وإدخال معاملات التصحيح لمناطق الحماية والمتمثلة في قيمة K_{S3} والحصول على النتائج، وشكل (10) يوضح ذلك. حيث يلاحظ أن قيمة مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى الجمهور انخفضت لتصبح نسبتها 65% من القيمة المقبولة وهي نتيجة متطابقة مع النتائج الرياضية.

(9) سحب نتائج التقييم من خلال الضغط على أيقونة ملف (File) و من ثم اختيار طباعة (Print).



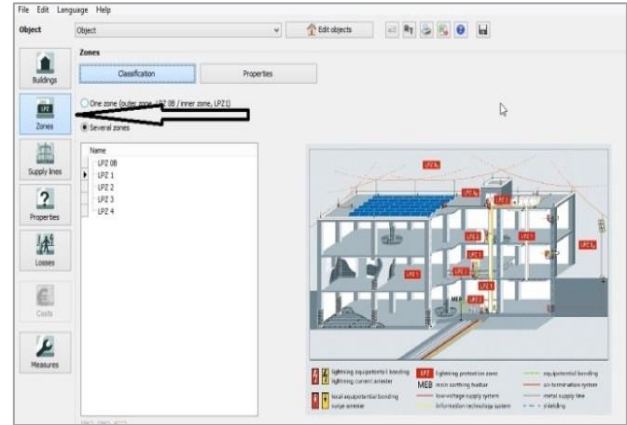
شكل (10). نتائج تدابير الحماية وأثرها على المخاطر

6. الخلاصة

هدفت الورقة إلى تصميم نظام لحماية المباني من خطر الصواعق. أوضحت نتائج الدراسة إلى أن زيادة ارتفاع المبنى يزيد من تأثير وخطر الإصابة بخطر الصواعق مقارنة بالطول وعرض المبنى. وجد أن قيمة مركبة مخاطر خسارة الحياة البشرية R_{B1} أعلى من باقي قيم مركبات المخاطر وبنسبة 89% من إجمالي قيمة مخاطر خسارة الحياة البشرية R_1 ، وذلك بسبب الأضرار الفيزيائية الناتجة عنها، حيث بلغت قيمة مخاطرة خسارة الحياة البشرية (R_1) 0.1376×10^{-5} لكل سنة، وهي أقل من القيمة المقبولة وفق المواصفات القياسية IEC62305-2 لسنة 2010م أي ما نسبته 13.76% مما يعني عدم الحاجة إلى تركيب نظام حماية من الصواعق لتجنب هذا النوع من المخاطر. أظهرت النتائج إلى ضرورة تركيب نظام حماية خارجي للمبنى موضوع الدراسة في حال ما إذا كان ارتفاعه 40 متر أي ما يعادل 10 طوابق تقريباً. بلغت قيمة مخاطر خسارة الخدمة المقدمة إلى الجمهور (R_2) 4.89×10^{-3} لكل سنة أي ما يمثل أكثر من 4 أضعاف القيمة المقبولة وفق المواصفات القياسية IEC62305-2

ثانياً: تقييم المخاطر باستخدام برنامج DEHN TOOLS كما لاحظنا سابقاً أن طريقة الحسابات الرياضية لتقييم المخاطر تأخذ الكثير من الوقت والجهد لإجراء هذه الحسابات إضافة إلى أنها ليست دائماً سهلة لتطبيق الإجراءات والبيانات المعطاة، لذلك فإن أغلب مصممي الحماية من الصواعق يلجؤوا إلى استخدام أنواع متعددة من البرامج لإنجاز دراسة تقييم المخاطر. من بين هذه البرامج برنامج DEHN TOOLS 3.101 لسنة 2015 م الصادر من شركة DEHN الدولية بألمانيا الرائدة في مجال الحماية من خطر ارتفاع الجهد العابر بشكل عام وخطر الصواعق بشكل خاص، ومن أهم مميزات البرنامج الآتي:

- تقييم المخاطر وفقاً للعديد من المواصفات القياسية الدولية.
- تقييم المخاطر بشكل تفصيلي وإعطاء النتائج في صورة قيم ورسومات في وقت قصير.
- القدرة على إجراء تدابير الحماية اللازمة لتقليل المخاطر إلى الحد المقبول. عملية تقييم المخاطر بهذا البرنامج تتم وفقاً للخطوات الآتية:
- (1) تحدد نوع المواصفة التي سيتم على أساسها تنفيذ التقييم، وقد حُدثت طبقاً للمواصفة القياسية IEC62305-2 لسنة 2010 م لتتوافق مع أساس التقييم في الحسابات الرياضية، ثم الدخول إلى الواجهة الرئيسية للبرنامج.
- (2) تحديد خصائص المبنى بإدخال قيم المعاملات الخاصة به كمعامل البيئة ومعامل عدد أيام العواصف الرعدية وأبعاد المبنى.
- (3) اختيار أيقونة مناطق الحماية (Zones) على يسار نافذة البرنامج لتقسيم المبنى إلى مناطق حماية وكما هو مبين بالشكل (8).



شكل (8). تقسيم المبنى إلى مناطق حماية

- (4) اختيار أيقونة خطوط التغذية (Supply lines) لتحديد خصائص خطوط الخدمة المغذية للمبنى وإدخال قيم معاملاتها كطول الموصل وطريقة تمديده. إضافة إلى ذلك إدخال خصائص الأنظمة الداخلية كمعامل وجود مفرغات الجهد (P_{spd}) ومعامل تمديد الموصلات الداخلية (K_{S3}) وغيرها.
- (5) اختيار أيقونة خصائص (Properties) وإدخال قيم معاملاتها لكل منطقة حماية.
- (6) اختيار أيقونة خسائر (Loses) وتحديد خصائصها المتعلقة بكل منطقة حماية.
- (7) بعد إتمام إدخال كافة البيانات المطلوبة نضغط على أيقونة تقدير (Evaluation) الموجودة على يسار النافذة لإتمام عملية التقييم وإظهار النتائج على صورة رسومات بيانية مع تحديد نوع المخاطر المطلوب عرضها وكما هو موضح بالشكل (9). حيث نجد أن نسبة مخاطر خسارة الحياة البشرية $R_1=13\%$ بينما نسبة خسائر الخدمة المقدمة إلى المواطنين $R_2=491\%$ ، وهذه النتائج متطابقة مع نتائج الحسابات الرياضية للتقييم.

جدول (أ). قائمة بالرموز

كثافة ومضات الصواعق، (1/km ² /year)	N_s
المساحة التجميعية المكافئة للمبنى	A_d
معامل موقع المبنى	C_d
المساحة التجميعية المكافئة حول المبنى	A_m
المساحة التجميعية لضربات الصواعق المباشرة على الموصلات	A_l
معامل تمديد الموصلات	C_i
معامل البيئة	C_e
معامل وجود محول جهد	C_f
معامل يعتمد على استخدام مفرغات الجهد وعلى مستوى الحماية	P_{spd}
احتمالية فشل الأجهزة بسبب ضربات الصواعق بالقرب من موصلات الخدمة	P_{li}
معامل يعتمد على التحجيب وشروط العزل لموصلات الخدمة	C_{li}
معامل يعتمد على تدابير الحماية من جهد الخطوة وجهد اللمس	P_{ta}
احتمالية حدوث أضرار فيزيائية	P_b
معامل يعتمد على تحجيب وتأريض الموصلات المغذية للمبنى	C_{ld}
معامل يعتمد على تدابير الحماية من المجالات الكهرومغناطيسية للصواعق	P_{ms}
معامل يعتمد على تدابير الحماية ضد جهد اللمس	P_{tu}
معامل يعتمد على ربط تساوي الجهد ومستوى الحماية من الصواعق	P_{eb}
احتمالية فشل الأنظمة الداخلية بسبب ضربات الصواعق لموصلات الخدمة	P_{ld}
خسائر جهد الخطوة وجهد اللمس	L_t
عدد الأشخاص في منطقة الحماية	n_z
عدد الأشخاص داخل وخارج المبنى	n_i
مركبة الخسارة البشرية بسبب الصدمة الكهربائية	L_{A1}
مركبة الخسارة البشرية بسبب الأضرار الفيزيائية الناتجة من ضربات الصاعقة	L_{B1}
مركبة خسائر الحياة البشرية بسبب جهد اللمس	L_{U1}
مركبة الخسارة البشرية بسبب الأضرار الفيزيائية الناتجة من ضربات الصاعقة	L_{V1}
مركبة خسارة الخدمة بسبب الأضرار الفيزيائية الناتجة من ضربات الصواعق	L_{B2}
مركبة خسارة خدمة المواطنين بسبب فشل الأجهزة نتيجة لضربات الصواعق	L_{C2}
مركبة خسارة خدمة المواطنين بسبب فشل الأجهزة نتيجة لضربات الصواعق	L_{M2}
مركبة خسارة الخدمة بسبب الأضرار الفيزيائية الناتجة من ضربات الصواعق	L_{V2}
مركبة خسارة خدمة المواطنين بسبب فشل الأجهزة نتيجة لضربات الصواعق	L_{W2}
مركبة خسارة خدمة المواطنين بسبب فشل الأجهزة نتيجة لضربات الصواعق	L_{Z2}
معامل نوع الأرضية	r_t
خسائر جهد الخطوة وجهد اللمس	L_t
معامل تخفيض الخسارة نتيجة للأضرار الفيزيائية	r_p
معامل زيادة الخطورة نتيجة الأضرار الفيزيائية في المبنى	h_z
معامل تخفيض الخسارة نتيجة للأضرار الفيزيائية، ويتعلق بمخاطر الحريق أو الانفجار بالمبنى	r_f
نسبة الضحايا المصابين نتيجة الأضرار الفيزيائية (حريق-انفجار)	L_f
عدد الأشخاص الذين يتأثرون بانقطاع الخدمة	n_p
العدد الكلي للأشخاص الذين يستخدمون هذه الخدمة	n_T
عدد الأشخاص المتواجدين بمنطقة الحماية	n_z
نسبة الضحايا المصابين نتيجة الفشل في عمل التجهيزات الكهربائية والإلكترونية	L_O
معامل التحجيب الخارجي للمبنى	K_{S1}
معامل التحجيب الداخلي للمبنى	K_{S2}
معامل يتعلق بمواصفات الكابلات المستخدمة	K_{S3}
معامل يتعلق بجهد الثبات للتجهيزات المستخدمة	K_{S4}
مركبة مخاطر حدوث صدمة كهربائية بسبب ضربات الصواعق للمبنى	R_A
مركبة مخاطر حدوث أضرار فيزيائية (حريق أو انفجار) بسبب شرارة الصاعقة	R_B
مركبة مخاطر فشل الأنظمة الداخلية بسبب ضربات الصواعق المباشرة للمبنى	R_C
مركبة مخاطر فشل الأنظمة الداخلية بسبب ضربات الصواعق حول المبنى	R_M
مركبة مخاطر حدوث صدمة كهربائية بسبب ضربات الصواعق للخطوط	R_{Li}
مركبة مخاطر حدوث أضرار فيزيائية (حريق أو انفجار) بسبب شرارة تفريغ	R_V
مركبة مخاطر فشل الأنظمة الداخلية بسبب ضربات الصواعق للخطوط	R_W
مركبة مخاطر فشل الأنظمة الداخلية بسبب ضربات الصواعق حول الخطوط	R_Z

لسنة 2010م، مما يستوجب تركيب نظام حماية من الصواعق. أثبتت نتائج الدراسة تطابق نتائج التحليل الرياضي والبرمجي.

المراجع

- Faircloth, D. C. (1996), *Lightning protection of buildings using active finials*, Citeseer.
- Foya, U. C. (2004), Protection Of Structures Against Lightning, *METU, July*.
- Hossam-Eldin, A. A., and Omran, E. E. A. (2006), *The Collection Volume Method for lightning protection of marine ship*. Paper presented at the Power Systems Conference, 2006, MEPCON 2006, Eleventh International Middle East.
- Rousseau, A., and Gruet, P. (2008), *Practical approach for economic losses lightning risk evaluation*, Paper presented at the 29, International Conference on Lightning Protection (ICLP 2008).
- Shwehdi, M. (2008), *Lightning thunderstorms day maps for Saudi Arabia*, Paper presented at the Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008, POWERCON 2008, Joint International Conference on.
- Chachaia, F. H. (2009), *Lightning protection of thatched roofed structures*.
- Yahaya, N. Z. and Daud M. A. (2013), Study of Lightning Safety Distance Using Rolling Sphere Method.
- Rudlosky, S. D. (2016), Characteristics of positive cloud-to-ground lightning. Becerra, M. and Cooray, V. (2006), Time dependent evaluation of the lightning upward connecting leader inception. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(21), 4695.
- Cooray, V. (2009), *Lightning protection: The Institution of Engineering and Technology*.
- Commission, I. E. (2010), *IEC 62305 protection against lightning* (2 ed.)
- Zipse, D. W. (1994), Lightning protection systems: Advantages and disadvantages, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(5), 1351-1361.
- Rakov, V. A. (2012), Lightning discharge and fundamentals of lightning protection, *Journal of Lightning Research*, 4(1), 3-11.
- Moore, C., Rison, W., Mathis, J., and Aulich, G. (2000), Lightning rod improvement studies, *Journal of Applied Meteorology*, 39(5), 593-609.
- Becerra, M., and Cooray, V. (2006), Time dependent evaluation of the lightning upward connecting leader inception, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(21), 4695.
- Hartono, Z., and Robiah, I. (2004), *Conventional and un-conventional lightning air terminals: an overview*. Paper presented at the Forum on Lightning Protection, Hilton Petaling Jaya.
- Moore, C., Aulich, G., and Rison, W. (2000), Measurements of lightning rod responses to nearby strikes, *Geophysical Research Letters*, 27(10), 1487-1490.
- McIvor, S., Carpenter, R. and Drabkin, M. (1998). Evaluation of Early Streamer Emission Air Terminals: ITEM.