جسر الجمرات
المحاكاة بالحاسب الآلي وتحليل سلامة الحجاج

الأستاذ الدكتور سعد بن عبدالرحمن القاضي
الدكتور جورج كيث ستيل

الملخص التنفيذي:

تكررت الحوادث المؤسفة في منطقة الجمرات نتيجة لتدافع الحجاج حيث قضى عدد من الحجاج نحبهم نتيجة للزحام، لذا فقد قررت حكومة المملكة العربية السعودية، ممثلة بوزارة الأشغال العامة والإسكان بالتعاون مع معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج، أن تقوم بإعادة تخطيط وتصميم منطقة الجمرات وذلك باستبدال الجسر الحالي بمنشأ يتكون من خمس طوابق لتسهيل أداء هذا النسك في يسر وسلامة ، وقد اكتمل الآن هذا التصميم بشكله العام (المبدئي).

وقامت الجهات المعنية بتشكيل لجنة فنية مهمتها التأكد من أن التصميم المقترح يفي بمتطلبات السلامة للحجاج، وعلى وجه الخصوص عند أوقات الازدحام الشديد. ولقد كلفت اللجنة الأستاذ الدكتور سعد بن عبدالرحمن القاضي للتأكد من استخدام تمثيل حاسوبي مناسب يأخذ في الاعتبار مختلف العناصر واتخاذه كأداة لتقييم التصميم واقتراح التعديلات المطلوبة.

ونظراً للطبيعة الخاصة لهذا الحدث التزاحمي فقد اختار الأستاذ الدكتور سعد القاضي الدكتور جورج كيث ستيل، الخبير في ديناميكيات الازدحام، والذي كلف من قبل وزارة الأشغال العامة والإسكان، ليقوم بإجراء محاكاة لجسر الجمرات المقترح من خلال برامجه الحاسوبية المتخصصة التي طورها. ويتناول هذا الملخص ما تم التوصل إليه.

١ – أهداف نموذج المحاكاة

الوضع الراهن عند الجمرات عالي الخطورة نظراً لمحاولة الأعداد الهائلة من الحجاج أداء نسك رمي الجمرات خلال فترة قصيرة نسبياً. ولقد تكررت الحوادث في السنوات الماضية الأمر الذي يتطلب تطوير المنطقة. والتصميم المقترح من قبل وزارة الأشغال العامة والإسكان بالتعاون مع معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج يوفر تحسيناً كبيراً لسلامة الحجاج، من خلال استبدال الجسر الحالي ذو الطابق العلوي الواحد إلى منشأ ذي أربعة طوابق علوية، أي يوفر خمسة مناسيب لاستخدام الحجاج.

إن الغرض من التمثيل الحاسوبي للمنشأ المقترح من قبل وزارة الأشغال العامة والإسكان بالتعاون مع معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج هو تحديد ما إذا كان أي من عناصر التصميم المقترح قد يؤدي إلى ازدحام شديد. والهدف هو تحديد الطاقة الاستيعابية للجسر المقترح وتقييم إمكانية وفاء المنشأ بالغرض المطلوب، والهدف الأساسي لهذا المشروع هو **السلامة أولاً دونما أي تنازلات**.

٢ – منهجية الدراسة

خلال الإثنتي عشرة سنة الماضية قام الدكتور ستيل (الذي كان عنوان اطروحته للدكتوراه هو "ديناميكيات الازدحام") بتطوير نماذج وبرامج محاكاة للازدحام.

وقد حصل برنامجان من البرامج التي طورها الدكتور ستيل (برنامج فيجاس وبرنامج ليجون) على جوائز تقديرية كأدوات تستخدم لنمذجة سلامة الازدحام، وقام بتوظيف تلك البرامج في مشروعات عديدة، مثل مدينة الألعاب الأولمبية في سيدني، مترو الأنفاق بلندن، نادي هونغ كونج للفروسية، وخطة إخلاء منطقة رصيف كناري (حي المال بلندن).

وأحدث البرامج التي طورها الدكتور ستيل هو مجموعة أدواته الحديثة (ميرياد) والتي قام بتطويرها خصيصاً لنمذجة واختبار المخططات الهندسية للمشاريع من أجل سلامة الازدحام. وقد تم تطبيق هذه البرامج على لاختبار مدى السلامة لجموع الحجاج أثناء رمي الجمرات، فقد تم الحصول على رسومات بالحاسب للتصميم المقترح لجسر الجمرات وتمت نمذجة ومحاكاة كل دور من أدواره. وتمكنت أدوات المحاكاة

والنمذجة من تحديد وإبراز المناطق التي تعاني من مشاكل أو مخاطر محتملة. ونوقشت تلك المعلومات مع المعماريين لدى الوزارة والاستشاري (دار الهندسة) ومن ثم أجريت بعض التعديلات على التصميم، وتكررت عملية الاختبارات والمناقشة والتعديل وإعادة الاختبارات لعدة مرات حتى تم التخلص من جميع الأخطار التي يمكن أن تهدد سلامة الحجاج، والاطمئنان إلى كل جوانب السلامة. وبالعمل اللصيق مع فريق التصميم تمكن الدكتور القاضي والدكتور ستيل من تحديد جميع المناطق غير الآمنة ومعالجتها حتى أمكن التوصل إلى نتائج مرضية.

١/٢ النموذج المتكامل لجسر الجمرات وأداء الرجم

استحدث أولاً نموذج متكامل لجسر الجمرات وذلك للتعرف على متطلبات التصميم . وهذه الخطوة تهدف إلى تقويم التصميم المقترح من قبل وزارة الأشغال العامة والإسكان . و التعرف على مدى قدرة الجسر على استيعاب ١٢٥٠٠٠ حاج في الساعة لكل دور وهو المعدل المتوقع حيث أن عملية الرجم تستغرق خمس ساعات ونصف تقريباً من وقت الظهر إلى المغرب في يومي الحادي عشر والثاني عشر من ذي الحجة.

وقد أجريت خمسة اختبارات على التصميم نوضحها فيما يلي:

١ – الكفاءة الاستيعابية للمداخل :

تم اختبار كل مستوى (منسوب) للتحقق من توفر عرض كاف يسمح بدخول الأعداد المتوقعة من الحجاج والتقدم نحو الجمرات.

٢ – كفاية مساحة الرجم:

لكل جمرة حوض بيضاوي (منتظم) يسمح لعدد معين من الحجاج للقيام بالرجم لكل متر طولي من محيط الحوض. وقد افترض أن أقصى مسافة يمكن منها الرجم لوصول الحصى إلى الجمرة حوالي ١٢ متراً.

ولما كانت زاوية التقدم نحو الجمرة هي التي تحدد طبيعة الترتيب التلقائي للحجاج ليقوموا بالرجم كان من المهم أن يتم اختبار ميداني لكل جمرة للتأكد من وجود محيط

كاف للرمي ووجود زاوية تقدم مناسبة نحو الجمرة (عرض كاف) لمنع التزاحم حول الجمرة ، وقد توصل كاتبا التقرير إلى أن المعامل ثلاثي أي أن لكل متر من عرض الدخول تحتاج إلى ثلاثة أمتار من محيط الحوض حول الجمرة للتأكد من عدم خلق تزاحم.

٣ – التأكد من وجود مساحة كافية (٤ حجاج لكل متر مربع)

ويجب ألا يكون هناك أي مساحة داخل النظام تزيد كثافة الحجاج فيها عن حد السلامة وهو ٤ حجاج لكل متر مربع . وهو الرقم العالمي لحد السلامة وتبلغ الكثافة في الوضع الحالي للجسر القائم ٨-٩ حجاج لكل متر مربع. ويجب ملاحظة أنه عند المداخل والمخارج والمساحة حول الجمرة يمكن أن يمر فيها الحجاج بكثافة أعلى ولكن لفترة قصيرة من الزمن.

٤ – مساحات المرور بين الجمرات

يقوم الحاج بالدعاء في مساحات يجب أن تكون كافية بحيث تسمح لمن يقف للدعاء أن تكون حوله مساحات كافية لمرور الآخرين من جواره بسهولة ويسر . وتشتمل مساحات المرور التي درست على النهايات العلوية للسلالم الآلية والمنحدرات حيث تبدأ الجموع الصاعدة لإعادة التشكل عند تلك النهايات.

٥ – كفاية القدرة الاستيعابية للخروج (المغادرة)

يجب أن يؤخذ في الاعتبار عاملان هامان لتحديد طرق المغادرة وهما : المغادرة العادية و المغادرة الطارئة وذلك لتسهيل التحرك بدون معوقات للخروج من كل مستوى في حالتي الرجم العادي أو الخروج المتعجل (لأغراض الطوارئ الطبية مثلاً كالأزمات القلبية أو ضربات الشمس .... إلخ) الأمر الذي يستدعي التلبية العاجلة من فرق الإسعاف ، ويشتمل التصميم على العديد من المخارج التي تسمح بالخروج السريع مما يضيف إلى الوفاء بمتطلبات السلامة.

٢/٢ نموذج التصميم لجسر الجمرات

تم استحداث نموذج يمثل جسر الجمرات لإدخال شروط التصميم الخمسة المذكورة أعلاه ومن ثم إجراء الاختبارات من ١ إلى ٥ في حالة كل جمرة.

ولقد تم التوصل من خلال القياس والتمثيل أن أكفأ توزيع هو توفير ثلاثة أمتار من المحيط حول الجمرة لكل متر من عرض طريق الدخول، ويجب توفير محيط أطول حول الجمرة (إن أمكن ذلك) باستخدام حائط حول الجمرة يكون شكلها متناسباً مع طريق تقدم الحجاج من المدخل في اتجاه الجمرة.

٣ – اختبار سعة جسر الجمرات (مقترح وزارة الأشغال العامة والإسكان ومعهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج)

اختبار أكفأ الأشكال لعملية الرجم:

- الدائرة :

حوض الجمرة الحالي (القائم في الجسر القديم) يبلغ قطره حوالي ١٦متراً مما يوفر ٥٠ متراً من المحيط ، واتساع طريق التقدم نحو الجمرة من ٤٠-٥٠ متراً (من خلال حواجز تستخدم للتحكم في معدل وصول الحجاج) عندما يزيد عرض الوصول (الدخول) عن ثلث المحيط

سوف يتكون صف من الحجاج بمعدل كبير ويزداد محيط الدائرة بمعدل ٦ أمتار لكل متر واحد زيادة في نصف القطر . لذا فإن الخواص الهندسية للدائرة لا تسمح بزيادة المحيط بمعدل مناسب.

- الشكل البيضاوي (المنتظم) :

من خواص الشكل البيضاوي (المنتظم) أن له محوران (رئيسي وعمودي عليه) مما يسمح بمرونة أكبر لزيادة المحيط بمحاذاة المحور الرئيسي دون زيادة العرض أو التأثير على اتساع طريق المرور وقد تم اختبار العديد من الأشكال البيضاوية ومن ثم تم تطوير أداة اختبار للأشكال وأعطيت لكل من معهد خادم الحرمين لأبحاث الحج ووزارة الأشغال العامة والإسكان وعقدت دورة قصيرة لمدة نصف يوم لتعريفهم على كيفية استخدام هذه الأداة .

ولقد تم اختبار الشكل البيضاوي (المنتظم) في كل مستوى من المستويات حيث أن طريق الدخول يختلف في كل منها عن الأخر ولإدخال ما يفرضه مكان وحجم الحوض في المستوى الأرضي آخذين في الاعتبار أن يقوم الحاج بواجب رمي الجمرات في سهولة ويسر.

- أشكال أخرى :

استخدمت أشكال أخرى عديدة ولكن لم يثبت أن أياً منها تفوق على الشكل البيضاوي الذي تم اختياره من قبل وزارة الأشغال العامة والإسكان.

٤ – نتائج اختبارات المستويات (الأدوار)

تبين كما ذكر من قبل أن الشكل الهندسي الأمثل لتوفير محيط رمي حول الجمرة بمقدار ثلاثة أمثال عرض الطريق الذي يدخل منه الحجاج ويتقدمون نحو الجمرة هو الشكل البيضاوي وسوف نعرض فيما يلي التحليل الحاسوبي لكل مستوى قبل أن نصل إلى النتيجة التي تحدد أبعاد المحيط المناسب حول الجمرة .

٤-١ المستوى الرابع

١/١/٤ الدخول

يخدم هذا المستوى ربوة الحضارم والذي استبدلت فيه السلالم القديمة بمنحدر بعرض ٣٠متراً يخدم المنشأ مباشرة ويشكل بذلك تحسناً كبيراً نحو سلامة الحجاج وتجنب التزاحم في مكان ضيق بالدور الأرضي.

ويشكل هذا المستوى استجابة إلى مطلب كامن لتزايد في عدد الحجاج حيث أنه يوفر حلاً مناسباً للنقل . وحيث أن المطلب هو استيعاب ثلاثة ملايين حاج في خمس ساعات ونصف الساعة يمكن استخدام المرونة في تحديد محيط الجمرة لتناسب عرض اتساع المدخل . لذا يجب أن يكون المحيط حول الجمرة أكبر من ١٠٨متراً على شكل بيضاوي (منتظم). ويمكن استخدام حواجز عند المدخل لتوجيه الحجاج للتقدم نحو الجمرة الصغرى وتشكيل طريق التقدم بنظام وتحكم . وسوف تحدد أماكن الحواجز بدقة عند عمل التصميم النهائي دون تغيير الشكل الهندسي لهذا المستوى.

٢/١/٤ الالتفاف

عند دوران الحجاج حول الجمرة يجب الاحتفاظ بعرض المساحة الواقعة حول الجمرات وهي التي تقع بين الدخول والمغادرة بحيث لا يقل عرضها في أي جزء عن عرض المداخل والمخارج.

٣/١/٤ المغادرة.

يوجد مساحات كافية للرجم والمرور دون زيادة في كثافة الحجاج مع استمرار الدعاء بين الجمرات . وتم توفير مخارج طوارئ بالقرب من المخارج الرئيسية و عن طريق خمسة أبراج.

٢/٤ المستوى الثالث:

يتم الوصول إلى هذا المستوى بواسطة السلالم المتحركة وبعد دراسة متأنية و مستفيضة للسلالم المتحركة في الحرم الشريف عملنا مع فريق التصميم لإدخال العناصر الرئيسية للتأكد من سلامة الحجاج ، ومن تلك الاعتبارات تخفيض عرض المداخل المؤدية للسلم المتحرك لمنع التكدس الخطر عند أسفله. وقد خصصت مساحات للأشخاص المكلفين بمساعدة الحجاج عند صعود السلم أو الخروج منه عند الحاجة.

كما تم توفير سلمين للطوارئ عند كل منسوب ، وقد اقترح تقليل عدد مرات الدوران للخلف من ستة إلى اثنين فقط وقد وجد أن هذا التطوير يؤمن الحجاج.

كما نوصي بتنفيذ المنحدر المقترح في التصميم من جهة طريق الملك فهد من منى لتقليل المخاطر التي قد يتعرض لها الحجاج من السيارات المارة على هذا الطريق.

١/٢/٤ الدخول :

عن طريق منحدرين بعرض ١٠ إلى ١٥ متراً من منطقة منى ليعبر طريق الملك فهد إضافة إلى السلالم المتحركة بسعة ٣٥٠٠ حاج في الساعة (لكل سلم) وذتقي سعة المداخل عند هذا المنسوب ما يتطلبه التصميم وتفرضه اعتبارات السلامة

شروط تشغيل المستوى الثالث:

- يجب أن تكون السلالم المتحركة مراقبة في كل الأوقات لمساعدة الحجاج عند دخول السلم والخروج منه..

- تفتيش الحجاج (على بعد كاف من السلالم) للتأكد من عدم حملهم أمتعة أو أي أغراض قد تسبب إصابات للحجاج الآخرين.
- ضرورة توفير المنحدر الذي يعبر طريق الملك فهد لتأمين دخول الحجاج المتجهين إلى جسر الجمرات من .
- نوصي بعمل دراسات أخرى لتوفير منحدرات لمغادرة هذا المنسوب بعد الرجم.

٢/٢/٤ الالتفاف :

التصميم متماثل في كل المستويات ويوفر مساحات كافية للرجم والدعاء.

٣/٢/٤ الخروج (المغادرة)

باستخدام أبراج الخروج المبينة أعلاه تبلغ ستة أبراج بطاقة حوالي ٦٥٠٠ حاج في الدقيقة من هذا المنسوب.

٣/٤ المستوى الثاني:

تم تصميمه لخدمة الحجاج القادمين من مكة المكرمة ، وتوجد إمكانية للوصول إلى نحو الجمرات بمنحدرين عرض كل منهما ٢٠متراً ويمكن أن يخدم هذا المنسوب بكفاءة حوض للجمرات بمحيط ١٢٠متراً.

١/٣/٤ الدخول:

يجب توفير فرق للتحكم في الزحام في يوم ١٢ ذي الحجة على هذا المنحدر حيث أن طوله ١ كم ويمكن أن يتجمع الحجاج على هذا المنحدر الأمر الذي يتطلب توجيه الحجاج والتحكم في تدفقهم .

٢/٣/٤ الالتفاف:

عندما يقترب الحجاج على طول جسر الجمرات قد يكون من الأمور التي تسهل ديناميكية التحرك أثناء الرجم توفير منظور توجيهي للحجاج ، ويوفر المحيط بطول ١٢٠متراً مساحات كافية للرجم والدعاء.

٣/٣/٤ الخروج (المغادرة) :

يتم الخروج من اثنى عشر مخرجاً صغيراً بالأبراج (التي تخدم منحدرات الدخول والخروج) مع خمس مخارج رئيسية (تخدم كل مستوى) بالإضافة إلى منحدرات المغادرة الرئيسيين .

مع العلم أن المشروع مبني على أساس أن منحدرات الدخول لا تستخدم في الخروج.

٤/٤ المستوى الأول :

يخدم هذا المستوى الحجاج المتجهين إلى جسر الجمرات من منطقة منى والقادمين من عرفات ومزدلفة

١/٤/٤ المداخل:

عن طريق منحدرين ٢×٢٠ متراً يمتد إلى منطقة منى. ويجب أن تكون هذه المنحدرات أقصر ما يمكن مع الاحتفاظ بميل لا يزيد عن ٨,٣% وهو الموصى به كحد أعلى للسلامة ليسمح بالتحكم في الازدحام والتوزيع على المنحدرين للتقليل من التكدس وموازنة تدفق الحجاج إلى الجمرة الصغرى.

٢/٤/٤ الالتفاف :

يتحدد المحيط حول الجمرة للتأكد من سقوط الحصى في البئر أسفله ، هذا يحد من السعة الآمنة لهذا المنسوب مما يجعلنا نوصي بأن تخفض منحدرات التقدم نحوه لموازنة التدفق ومنع الاصطفاف الذي قد يؤدي إلى الازدحام.

ونوصي بأن يجري حوار مع علماء الدين حول حجم الحوض في الدور الأرضي والاتفاق على قطره قبل أن يتم عمل التصميم النهائي لهذا المنسوب.

٣/٤/٤ الخروج :

يوجد ثلاثة منحدرات للخروج من هذا المنسوب بالإضافة إلى خمسة أبراج خروج ويبلغ معدل خروج الحجاج ١٣٠٠ حاج في الدقيقة

٥/٤ المنسوب الأرضي :

نوصي بأن تتم مناقشة علماء الدين بخصوص هذا المنسوب حيث ظهرت قضيتان رئيستان عند تقويم التصميم:

إمكانية زيادة طول المحيط على هذا المنسوب (ويمكن إنجاح عدد من المقترحات) لزيادة الانسياب على هذا المنسوب.

وحيث أن هذا يسمح بزيادة المحيط في عموم النظام فإن مناقشة العلماء شئ مرغوب ونوصي به.

إن كمية انسياب الحجاج تتوقف على المحيط حول الجمرة ويبلغ هذا الآن ٧٤٠٠٠ حاج في الساعة ولن يتغير إلا إذا زاد محيط الحوض حول الجمرة.

ومن المطلوب أن يتم التحكم في التزاحم على المستوى الأرضي وسوف يؤدي هذا إلى تغير في ديناميكية التزاحم إلى الأفضل.

الخلاصة (ملخص)

إن الوضع الحالي لجسر الجمرات مهدد لسلامة الحجاج وحياتهم .وإن التصميم الجديد الذي تقترحه وزارة الأشغال العامة والإسكان ومعهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج يضع سلامة الحجاج في المقام الأول.

١) فقد قامت الوزارة والمعهد بإعداد تصميم لجسر جديد من أربعة طوابق علوية بدلاً من الجسر الحالي ذي الطابق الواحد العلوي وفي الجسر الجديد تم توفير مساحات كافية حول الجمرات، وزود بمداخل ومخارج كافية الاتساع لتوزيع الحجاج على خمسة مستويات يختص كل مستوى فيها بحجاج منطقة من المناطق فيقل التزاحم والتكدس ، وقد زود المشروع بمداخل تخدم المناطق المختلفة ومنحدرات وسلالم متحركة يؤدي كل منها إلى مستوى معين يضمن توزيع الحجاج على كل المستويات ، كما زود المنشأ الجديد بالمخارج العادية بالإضافة إلى مخارج طوارئ تمكن فرق الإسعاف من الإخلاء السريع حتى في أوقات الذروة أي أن المشروع متكامل من حيث متطلبات السلامة والأمان لضيوف الرحمن.

٢) يجب التنويه بأن التصميم مبدئي ولكن بعد عدة اجتماعات مع المعماريين تبين إن التصميم يفي بمتطلبات السلامة واختبارات التمثيل الحاسوبي.

٣) إن من توصياتنا إجراء حوار مع علماء الدين بخصوص الدور الأرضي وإذا ما نتج عن ذلك الحوار زيادة في محيط حوض الجمرات بالدور الأرضي فإن ذلك يسمح بزيادة في سعة النظام ككل .

٤) إن تدفق الحجاج (بناء على حجم حوض الجمرات في المساقط الأفقية التي توفرت لنا، وديناميكية التزاحم واعتبارات السلامة والتحكم في الزحام) قد تبين كفاءتها لاستيعاب السعة الدنيا المطلوبة (حوالي ثلاثة ملايين) . ويبلغ

الحد الأعلى لسعة الجسر الجديد المقترح ٣,٩٠٠,٠٠٠ حاج في فترة زمنية مقدارها ٥,٥ ساعة ويعتمد على زيادة محيط الجمرة في المنسوب الأرضي.

التوصيات

١) يتوقف الأداء الناجح لجسر الجمرات على التكامل بين التصميم وإدارة التشغيل، لقد تأكدنا من أن كل إجراءات السلامة قد توفرت في التصميم من حيث الإخلاء الإسعافي والإمكانات الطبية ، ونوصي بأن يصدر دليل إرشادي للتشغيل أثناء التصميم النهائي للمشروع

٢) من العناصر المهمة في التصميم تنفيذ المنحدر الذي يخدم المنسوب الثالث لتلافي التكدس المحتمل للحجاج من جهة طريق الملك فهد إلى جسر الجمرات ، وعدم اختلاطهم بالسيارات المارة في هذا الطريق.

٣) يجب إجراء حوار مع العلماء بخصوص المنسوب الأرضي ، وننوه على صغر محيط الحوض حول الجمرة عند هذا المنسوب الأمر الذي قد يفضي إلى تزاحم وإن زيادة القطر سوف تحسن كثيراً من سلامة الحجاج.

٤) يجب أن يتم التمثيل المتكامل ودراسة ديناميكيا التزاحم بصفة مستمرة لتحسينها مع التعديلات التي تجرى أثناء فترة التصميم النهائي وتنفيذ المشروع.

٥) نوصي بأن يتم إعداد دليل إرشادي أثناء مرحلة التصميم النهائي بالتعاون مع الدفاع المدني والأمن العام.

٦) يجب القيام بمسح لوادي منى يشتمل على قياسات طبيعية واستبيان أثناء موسم الحج في أول عام لتشغيل الجسر الجديد وكذلك في العام التالي له للتحقق من كفاءة أداء الجسر وتأثيره على الزحام والحركة المرورية في المنطقة المحيطة بالجسر.

وفي النهاية نؤكد أن التصميم قد استوفى جميع اعتبارات السلامة المحددة من قبلنا وطبقاً للمقاييس العالمية وعلى أهمية سرعة تنفيذ المشروع لتوفير السلامة المطلوبة لحجاج بيت الله الحرام.