

חמש שנים לאחר שקרס הגשר העיקרי המחבר את מונרוביה, בירת ליבריה, לפרבריה ולנמלה - המהווה מקור ההכנסה חשוב של המדינה הרוסת התשתיות - נבנה במקומו גשר חדש במבצע הנדסי מסובך

# הגשר מעל נהר מאסורדו

אינג' מאירי אבישור



גשר הפלדה והבטון הישן, שנבנה בשנות ה-30 של המאה שעברה, קרס במרכזו בשנת 2006 ולא איפשר עוד מעבר כלי רכב

מכרז לביצוע בפורמט הבנק העולמי ועזרה בבחירת הקבלן שיזכה במכרז; ליווי צמוד של עבודת הקבלן ומסירת הגשר המושלם לממשלת ליבריה.

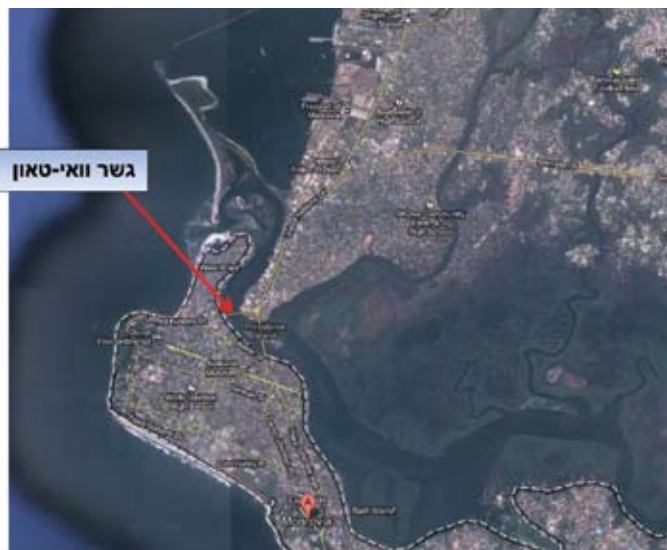
באפריל 2008 פורסם המכרז לחברה הקבלנית שתבנה

את הגשר. זכתה בו חברת הבנייה הסינית Chico Construction ובספטמבר 2011 נסתיים הפרויקט בעלות של כ-14 מיליון דולר, במימון הבנק העולמי וממשלת סין. בדצמבר 2011 נחנך הגשר על-ידי נשיאת ליבריה, אלן ג'ונסון סירליף, במעמד כמה משרי ממשלת ליבריה. במעמד זה צויינה תרומתו הגדולה של הגשר החדש לכלכלתה של ליבריה. שמו של הגשר הוסב אז הוסב לגשר "מלך זולו דומה", על שמו של ראש שבט דיי, שמילא בשעתו תפקיד מרכזי במסירת הקרקעות באיזור שנועדו לבניית הגשר למתיישבים החדשים בבירת ליבריה - עבדים משוחררים מארה"ב שהובאו למקום בתחילת המאה ה-19.

במאמר זה יתוארו חלופות הגישור השונות שנדונו במהלך התכנון תוך התחשבות בתנאים ובאמצעים הקיימים במדינה האפריקאית, אופן ביצוע הגשר במרכזו של הנהר, תוצג שיטת היז המאוזן (Balanced Cantilever Method), שבה בוצע המבנה העליון של הגשר, ולסיום יתוארו כמה בעיות הנדסיות שהופיעו במהלך ביצוע הפרויקט ואופן ההתמודדות עימן.

בנובמבר 2006 קרס אחד משני הגשרים המחברים את מרכז מונרוביה, בירת ליבריה, לפרבריה ולנמל העיר, המהווה את אחד ממקורות ההכנסה החשובים של המדינה. הגשר שקרס (גשר וואי-טאון) נבנה בשנות השלושים של המאה שעברה וניזוק באופן קשה במהלך מלחמות האזרחים שפקדו את המדינה. מאז מלחמת האזרחים האחרונה שהסתיימה בשנת 2003 לא בוצעו עבודות תיקון לגשר והוא שימש כמעבר להולכי רגל ורכבים דו גלגליים. עם השנים הדרדר מצבו של הגשר ובסופו של דבר קרס מרכזו תחת כובד המעמס עליו. בשנת 2007 זכתה חברת "ג.א.ש - הנדסת בניין וגשרים" - חברה הנדסית ישראלית ותיקה שנוסדה ב-1971 על-ידי המהנדסים גרשון שטרן ושלמה ליברמן, ומתמחה מאז בתכנון מבנים וגשרים; בשיתוף עם חברת "פניקס הנדסה", חברה בבעלותו של ישראלי הפועלת באפריקה - במרכז הבינלאומי שפרסם הבנק העולמי לתכנון וניהול פרויקט גשר וואי-טאון שמטרתו להחליף את הגשר הישן שקרס בגשר חדש.

תכולת הפרויקט כללה: איסוף נתונים קיימים שיכולים לסייע בתכנון הפרויקט; מדידת המצב הקיים; ניתוח הכדאיות הכלכלית של הפרויקט; ביצוע תסקיר השפעה על הסביבה; ניתוח הידרולוגי; תכנון הריסת הגשר הקיים; בחינת מצב המחצבים הקיימים באיזור הגשר היכולים לשמש כחומרים לבניית הגשר; בחינת אלטרנטיבות תנועתיות וקונסטרוקטיביות; תכנון מפורט לחלופה שתיבחר; הכנת



צילום לוויין של מיקום בניית הגשר החדש במקומו של גשר וואי-טאון הישן לחיבור בירת ליבריה, מונרוביה (משמאל) עם פרבריה ונמלה הגדול (למעלה מימין). מעל שפך נהר מאסורדו

## תיאור אתר הפרויקט

הגשר עובר מעל נהר Massurdo המפריד את בירת ליבריה, מונרוביה, עיר בעלת יותר ממיליון תושבים, מפרבריה. רוחב הנהר הוא כ-220 מטר ועומק המים מתחתיו הוא כ-5.0 מטר. שכבות הקרקע באתר שבתחתית הנהר מאופיינות בשכבה עליונה, בעובי של כ-16 מטר; מתחתיה פסולת בניין ובולדרים שהונחו בזמן בניית הגשר הישן, ולאחר מכן שכבת חול רך בעלת חוזק חלש, בעובי של כ-60 מטר. מתחת לשכבת החול התגלה סלע קשה עליו בוסס הגשר הישן באמצעות כלונסאות קדוחים בעומק של 25 מ' מתחתית הנהר.

## בחינת חלופות הגישור

אחד הגורמים שהשפיעו על בחירת החלופה לביצוע הגשר החדש הייתה העובדה כי ליבריה, השוכנת בחוף המערבי של אפריקה, עברה שתי מלחמות אזרחים קשות ואכזריות בשנים 1989-1996, ו-1999-2003, שהרסו חלק ניכר מתשתיותיה, חסרה את האמצעים לביצוע פרויקטים מסוג זה, כגון מנופים בעלי יכולות הרמה מתאימות, מפעלי בטון, ציוד ומפעלים לעבודות בטון טרום, ציוד וקבלנים בעלי ידע לעבודות דריכות קדם ואחר, וכדומה. הנחת המוצא הייתה כי כל הציוד וכוח האדם המקצועי יגיעו מחוץ למדינה ולכן הוקדשה חשיבות רבה לעלות הבאת הציוד וכוח האדם המקצועי לאתר העבודה.

חלופות רבות נבחנו לבניית הגשר, כגון גשרי בטון מזוין

במפתחים של עד 16 מטר ועד גשרי מסמכי פלדה במפתחים של מעל 100 מטר. לשלב האחרון הגיעו שלוש חלופות עיקריות והן: גשר קורות טרומיות במפתחים של עד 22 מטר; גשר דחיקה במפתחים של עד 50 מטר; וגשר מקטעים יצוקים באתר במפתחים של עד 100 מטר. נבחנו בקפדנות היתרונות והחסרונות של כל חלופה (ראה איור מס' 1).

מבחינת העלויות, שלוש החלופות שנבחנו היו פחות או יותר דומות בהתבסס כמובן על המקרה הייחודי של בניית גשר במדינה ללא אמצעים מתאימים. בסופו של דבר נבחרה חלופת גשר המקטעים היצוקים. זאת, בעיקר בהסתמך על השיקולים הבאים: הפחתת העבודה בתוך הנהר תוך בניית שני נציבים בלבד; ביטול הצורך בכלים מכאניים להנפת קורות טרומיות או אף פלדה; שיקולים אסתטיים.

## תיאור החלופה שנבחרה

### כללי:

הגשר תוכנן לאורך של 240 מ', כבעל מפתח מרכזי של 100 מ' ושני מפתחי קצה באורך 70 מ' כל אחד. רוחב הגשר הוא 13 מ' וכולל שני נתיבי נסיעה ברוחב של 3.6 מ' כל אחד, שני מעקות בטיחות לרכב ברוחב 0.4 מ' ושתי מדרכות להולכי רגל ברוחב 2.5 מ' (כולל הכרכוב) כל אחת.

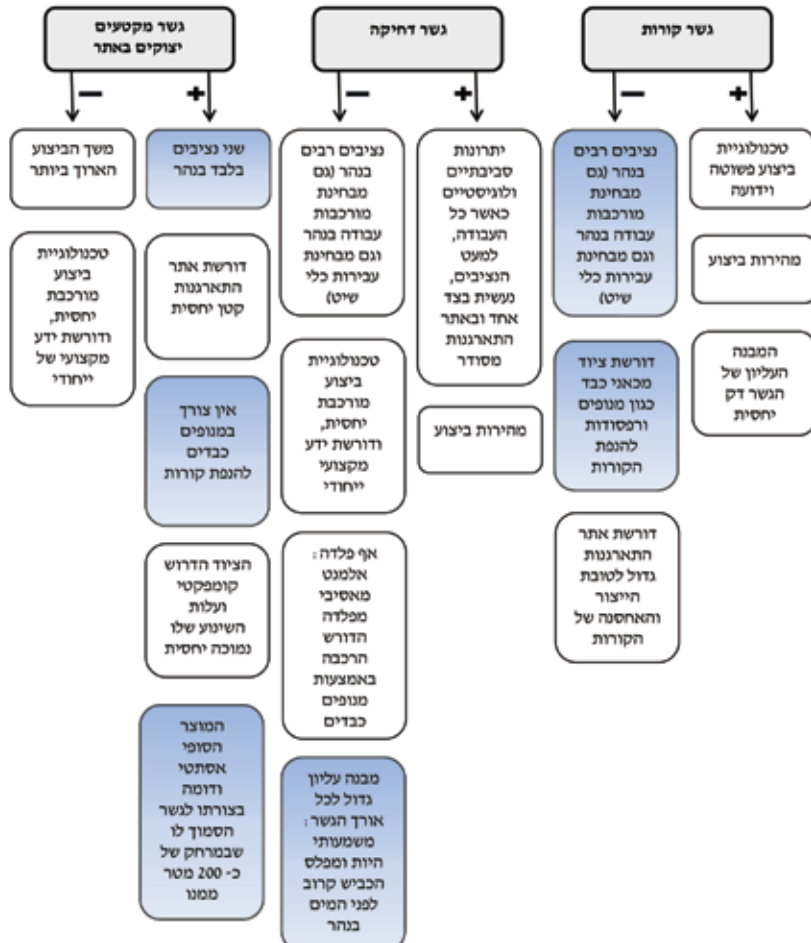
### ביצוע המבנה העליון:

חתם המבנה העליון של הגשר הינו ארזי בגובה משתנה של 5.6 מ' מעל העמודים ועד 2.5 מ' באמצע המפתח. המבנה העליון של הגשר בוצע בשיטת הזיז המאוזן, שבה שני זיזים מתקדמים מכיוון העמודים לכיוון אמצע המפתח אחד כלפי השני על-ידי יציקת מקטעים קטנים בתבנית ניידת (Form Traveler) כנגד קצה האלמנט שנוצק בשלב הקודם. האלמנט הראשון שנוצק הוא מקטע הנציב (Pier Segment) ולאחר מכן נוצקים ונדרכים כנגדן אלמנטים נוספים משני צדיו לסירוגין. בגשר זה קיימים, בנוסף לאלמנט הנציב, 11 אלמנטים באורך של ארבעה מטרים כל אחד, כאשר בכל יציקת אלמנט נדרכים ארבעה כבלים של 250 טון כל אחד (12T15S).

המומנט המאוזן מתקבל על-ידי חיבור מונוליטי של המבנה העליון לנציב האמצעי. לאחר ביצוע כל האלמנטים מבוצעים אלמנט הסגירה במפתח האמצעי ומקטעי הקצה בסמוך לנציבי שלושה שדות.

לסיום, הסכימה הנמשכת נדרכת דריכה חיובית, שנותנת מענה לעל העומסים הנוספים, כגון קבוע נוסף, שימושי, הצטמקות וזחילה הממשיכים לעבוד על הגשר בסכימה החדשה שלו. שתי התמונות בעמוד מס' 4 מתארות את אחד השלבים האחרונים של יציקות

איור מס' 1 - ניתוח יתרונות (+) - חסרונות (-) לכל חלופה:



טבלת ניתוח היתרונות והחסרונות של כל אחת משלוש החלופות לתכנון הגשר

בריבוע למכפלת מרחקי מרכז הכובד מהסיבים החיצוניים:

$$\rho = \frac{r^2}{c1 \cdot c2}$$

לפי נוסחה זו, כאשר כל הבטון מרוכז באגפים דקים, מקדם היעילות יהיה 1.0. לעומת זאת, עבור חתך מלבני מלא המקדם יהיה רק שליש. בחתכי הארגז המקדם יהיה לרוב 0.6, ולכן בזמן תכנון החתך יש לבדוק את המקדם בפועל, כאשר המטרה היא להיות מעל לערך זה.

#### חישובים

חישובי הגשר נעשו באמצעות תוכנת Midas Civil, המתאימה, בין היתר, לגשרים מסוג זה. התוכנה לוקחת בחשבון את שלבי הביצוע של הגשר ואת תכונות הבטון ופלדת הדריכה עם הזמן. התוכנה מחשבת את מצב המאמצים בבטון בכל שלבי הביצוע המוגדרים, תוך התחשבות בהשפעות תלויות זמן, כגון התפתחות החוזק ומודל האלסטיות של הבטון, הצטמקות, זחילה, רלקסציה וכדומה, ובהשפעת המומנטים המשניים המתפתחים בסכימה הבלתי מסוימת של הגשר. נושא זה מאוד חשוב בגשר מקטעים היצוקים באתר בשל העובדה שהאלמנטים נדרכים בשלב מאוד מוקדם של גילם.



ביסוסו של גשר וואי-טאון הישן. הביסוס נעשה באמצעות צינורות פלדה שהוחדרו לנהר ומולאו בבטון, כאשר מעטפת הפלדה נאכלה עם הזמן.

#### נציבים פנימיים

הנציבים הפנימיים של הגשר בנויים משני ראשי כלונסאות במידות 200X200 ס"מ ובמרחק של 8.0 מטר זה מזה. ראשי הכלונסאות מבוצעים בקו המים באופן שתחתית ראש הכלונס נמצא כ-50 ס"מ מתחת לקו המים. כל ראש כלונס מבוסס על גבי שלושה כלונסאות בקוטר 140 ס"מ ובעומק 40 מטר, כאשר חמישה המטרים העליונים של הכלונסאות חופשיים ונמצאים בתחום מי הנהר. שיטה זו, הנקראת ביסוס בקו המים (Waterline Footing), מפשטת את הביצוע בכך שלאחר ביצוע הכלונסאות נדרשת השפלת מים מינורית יחסית על מנת לבצע את ראש הכלונס ולעלותו מעל קו המים.

בביצוע נציבים בסביבה ימית, נדרש בדרך כלל שימוש ברפסודה שתהווה פלטפורמה חזקה ויציבה לכלים מכאניים כבדים, כגון מכוונת קידוח, מנופים, מערבלי בטון, משאבות בטון וכדומה. דוגמה לשיטה זאת ניתן לראות בתמונה מס' 6, המראה את עבודות בניית גשר אבולומה-ווג'י בניגריה,

המקטעים תוך הביצוע בשטח. ניתן לראות בהן, כי מקטע הנציב מבוצע בפאזה של חצי אלמנט ביחס למרכז הנציב. ביצוע מקטע הנציב באופן כזה, מבטיח, כי המומנט המאזן הפועל על הנציב ועל הביסוס נקבע ממשקל חצי אלמנט ולא אלמנט שלם.

#### קביעת חתך המבנה העליון:

סכמת הזיז והמפתח הגדול של הגשר גורמים לכך, כי כל שינוי קל בחתך המבנה העליון מוביל לשינוי גדול בכוחות הכפיפה והגזירה עליו. לכן, קיימת חשיבות רבה בקביעת החתך בצורה יעילה תוך הפנמת המשפט "כל המוסיף גורע". ניתן לסכם מספר עקרונות חשובים שהיה צורך לתת עליהן את הדעת בזמן קביעת חתך הגשר כלהלן:

קביעת עובי הדפנות המינימלי הדרוש עקב גזירה ופיתול נקודה חשובה בגשר וואי-טאון, היא העובדה כי לחתך הגשר גובה משתנה באיזור הנציבים המרכזיים. עקב כך, ניתן להתחשב בתרומה הלא מבוטלת לתסבולת החתך לגזירה לפי הנוסחה:

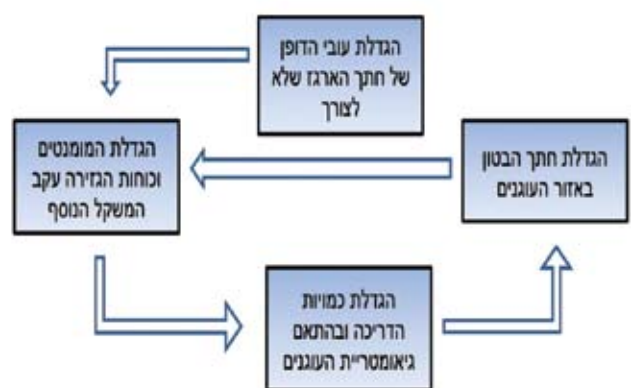
$$V_{cfd} = \frac{M_d}{d} \tan \phi_2$$

#### חישוב פעולה רוחבית של החתך

יש לבדוק את פעולת המסגרת של החתך בעיקר לעומסים מרוכזים ואקסצנטריים.

#### קביעת החתך בצורה הקומפקטית ביותר

קביעת מידות החתך באופן היעיל ביותר מקטין באופן משמעותי את הכוחות הפועלים עליו עקב משקלו העצמי למשל, הגדלת עובי הדופן של חתך הארגז שלא לצורך יגדילו את המומנטים וכוחות הגזירה באופן ניכר. כתוצאה מכך, תידרש הגדלת כמויות הדריכה ולפעמים הצורך בעוגנים גדולים יותר, מה שיכול להוביל לצורך בהגדלת חתך הבטון באיזור העוגנים ולהגדלת המומנטים וכוחות הגזירה עם תוספת המשקל, וחוזר חלילה. להלן תיאור סכמתי לאמור לעיל:



#### עיבוי האגף התחתון מעל הסמכים

שיטת ביצוע הזיז המאוזן גורמת למומנטים שליליים גדולים על הנציבים האמצעיים. הדרך להתמודד עם מומנטים אלה היא להגדיל את עובי האגף התחתון של החתך בתחום זה.

#### בדיקת מקדם האפקטיביות של החתך - P

יכולת החתך, בעל כמות מסוימת של בטון, לקבל את מומנטי הכפיפה במינימום דריכה, נמדדת על-ידי מקדם אפקטיביות החתך P, כאשר P שווה ליחס בין רדיוס האינרציה של החתך





האי המלאכותי שנבנה בצד המערבי של הגשר (מימין) והגשר הקיים המחוזק ממזרח, שתוכננו כפלטפורמה לביצוע הנציבים



התקדמות זיזי הבטון של הגשר החדש זה כלפי זה

- שאיבה.
- החדרת צינור המגן לעומק החפור במקביל לביצוע החפירה.
- ביצוע שלבים 2 ו-3 עד למצב שכל צינור המגן נכנס לקרקע; חיבור צינור מגן נוסף באמצעות ריתוך וביצוע המשך החפירה.
- לאחר הגעה למפלס המתוכנן, שואבים את הבוץ הנותר בקדח, מחדירים את כלוב הזיון ויוצקים את הבטון. לשיטה זו שני חסרונות בולטים, האחד הוא משך ביצוע איטי מאוד (ביצוע הכלונס הראשון נמשך חודש שלם ולאחר מכן כעשרה ימים לכלונס) והחיסרון השני שהמשקולת מפוררת את הקרקע/סלע באופן כזה שקשה ליועץ הקרקע להעריך אם הוא הגיע לשכבה הרצויה ומה עומק הכלונס בשכבה זו. לאור החיסרון השני החליט יועץ הקרקע שלנו, אינג' מוטי יוגר, לערוך ניסיון העמסה דינמי על מנת לוודא כי הכלונסאות הם בעלי התסבולת הרצויה. ניסיונות העמסה בוצעו בהתאם לתקן ASTM D4945 על-ידי חברת "איזוטופ" הישראלית. בשיטה זו מתקינים בראש הכלונס בלבד מדי עיבור ומדי תאוצה, מפילים מגבהים שונים משקולת במשקל של כ-10% מהתסבולת המוערכת של הכלונס ובאמצעות מספר שיטות חישוב ניתן למדוד את התסבולת הכוללת של הכלונס (שהייתה במקרה זה 2007 טון) ואת תסבולת החיכוך (שהייתה

שתוכנן גם הוא על-ידי משרד "ג.א.ש הנדסה" ובוצע על-ידי חברת "אשטרם חו"ל". בגשר וואי-טאון בוצעו הנציבים ללא רפסודות, תוך בניית אי מלאכותי עבור נציב מס' 2 ממערב, ושימוש בגשר הקיים, לאחר חיזוקו, עבור נציב מס' 3 ממזרח. לאחר חיזוק הגשר הקיים נעשתה עמיסת ניסיון על מנת לוודא כי הוא מסוגל לקבל את העומסים הצפויים בזמן הביצוע. ניסיון העמסה דינמי על הכלונסאות שיטת ביצוע כלונסאות הגשר על-ידי החברה הקבלנית הסינית הייתה ייחודית, כאשר לנו, כמנהלי הפרויקט, לא היה ניסיון קודם עימה. בבסיס השיטה, הנפוצה מאוד בסין, האלמנט הקודח הינו משקולת גדולה המופלת מגובה דרך צינור מגן (Casing), מרסקת ודוחקת את הסלע/קרקע אל מחוץ לצינור המגן דרך החלק התחתון שלו, ומוציאה את החומר החפור הנשאר בקדח באמצעות הכנפיים שלה. המשקולת נשענת על גבי



גשר אבולומה-ווג' בניגריה, שתוכנן גם הוא על-ידי "ג.א.ש הנדסת מבנים וגשרים" ובוצע על-ידי "אשטרם חו"ל", בו שימשה רפסודה בצד הגשר כפלטפורמה לנשיאת קורות וכלים מכניים כבדים

חצובה ומחוברת לכבל ארוך המאפשר קידוח לעומקים גדולים. היתרונות של מכונה זו הם מימדיה הקטנים יחסית ומחירה הזול. להלן שלבי הביצוע המפורטים של השיטה:

- החדרה מינימלית של צינור מגן (Casing) בקוטר הכלונס לתוך הקרקע באורך של כ-5.0 מטר.
- הפלת המשקולת וגריסת הקרקע/סלע - כאשר חלק מהחומר נדחק מטה והצידה מחוץ לצינור המגן וחלק יוצא מחוץ לבור באמצעות הכנפיים של המשקולת או באמצעות



השיטה הסינית להחדרת כלונסאות לקרקע, באמצעות משקולת כבדה המונחת על הכלונס דרך צינור מגן

המבססת עד לקבלת התסבולת הדרושה. הכלונסאות תוכננו ככלונסאות בטון דרוכים בחתך מתומן ברוחב של 45 ס"מ. אולם לאחר ביצוע קידוחי הניסיון על-ידי הקבלן הזוכה נתגלתה שכבת בולדרים מלאכותית בעובי של כ-10 מטר שאינה מאפשרת את ביצוע הכלונסאות בשיטה שתוכננה. כתוצאה מכך, שונתה השיטה לכלונסאות קדוחים בקוטר גדול, מה שגרם לעיכוב משמעותי בביצוע הפרויקט, שהיה נמנע על-ידי השקעה יחסית קטנה לפני הוצאת המכרז. הלקח העיקרי שניתן ללמוד מנושא זה הוא, כי בזמן התכנון יש לעשות את כל המאמצים על מנת להבין את נתוני האתר הקיימים בפועל במיקומם המדויק של נציבי הגשר ולא במרחק של 200 מטר מהם. בנוסף, שינויים מלאכותיים מעשה ידי אדם יכולים לשנות את תנאי האתר ללא קשר לקרקע הטבעית. לפיכך, ללא חקירה מדויקת לפני ביצוע הגשר קיים סיכון לשינויי תכנון במהלך הביצוע על כל המשמעות הנגזרות מכך.

840 טון) לאורך הכלונס. מקדם ביטחון לתסבולת הכלונס היה 2.2. כמובן, שמשני נתונים אלו ניתן היה להסיק מה היא תסבולת הקצה - 1,167 טון.

## בעיות מיוחדות בזמן הביצוע

### ביסוס הגשר

על-פי החלטת הלקוח ולמרות התנגדותנו כמנהלי הפרויקט, הוחלט לתכנן את הגשר ולהוציא את המכרז לביצוע הגשר ללא קידוחי ניסיון. לאור כך, שיטת הביסוס של הגשר נקבעה על-ידי חקירה ויזואלית של הגשרים הקיימים (הגשר הישן שקרס וגשר Gabriel Tucker הסמוך לו), ועל-ידי המסמך היחיד שנמצא על-ידי הלקוח שהכיל כתב כמויות של גשר Gabriel Tucker הסמוך, בו מתוארים סעיפי התשלום של ביסוס הגשר. גשר Vai Town הישן בוסס על-ידי צינורות פלדה שהוחדרו בדפיקה לתוך הסלע ומולאו בבטון. בכתב הכמויות של גשר Gabriel Tucker הסמוך, שתוכנן במונרוביה בשנת 1978, מצוין כי ביסוס הגשר בוצע באמצעות פרופילים מפלדה בחתך I (HP10\*42,h\_250) שהוחדרו בדפיקה לעומק של כ-13 מטר.

לאור נתונים אלה ובשל אילוצי הלקוח, הוחלט כי גם הגשר החדש יבוסס בשיטת הכלונסאות המוחדרים בדפיקה לשכבה



### אינג' מאירי אביסוב

שותף בחברת ההנדסה "ג.א.ש. הנדסה" אותה ייסדו המהנדסים גרשון שטרן ושלמה ליברמן בשנת 1979. בן 42. יליד אשקלון, שם סיים את בית הספר התיכון "תגר". למד לתואר ראשון ושני בהנדסת

מבנים בפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית בטכניון. עם סיום לימודיו הצטרף לחברת "ג.א.ש.", שם התמחה במיוחד בתכנון גשרים. תכנן, בין השאר, את מנהרת מכבית בכביש 471, המחברת את כביש 4 לכביש 6, וכן את גשר פולג, שנבנה כגשר בדחיקה. תושב רחובות. נשוי+1.



גשר וואי טאון לאחר השלמתו בשנת 2011 וחנוכתו בשמו החדש: גשר "מלך זולו דומה"