



The ERI ITA is funded by the European  
Investment Bank

Tetra Tech International Development

# Economic Resilience Initiative - Infrastructure Technical Assistance TA2017141 RO ERI

مشروع العقبة-عمان لتحلية ونقل المياه AAWDC: ملخص  
تقييم مخاطر تصريف المحلول الملحي

تاريخ الإصدار: 19 كانون الثاني 2022



**TETRA TECH**  
International Development

A project implemented by  
the TTID ERI-ITA Consortium

Tetra Tech International Development B.V.  
Jan Luijkenstraat 92 C, 1071 CT  
Amsterdam, The Netherlands

تم تمويل Infrastructure Technical Assistance التابعة لبنك الاستثمار الأوروبي EIB. هذا وقد قام البنك بطلاق هذه المبادرة استجابةً لدعوة المجلس الأوروبي لتكثيف دعمه لدول جوار الاتحاد الأوروبي سعياً لدفع عجلة النمو الاقتصادي وتحقيقاً لأهداف التنمية المستدامة (SDGs). ولعل الهدف من هذه المبادرة يمكن بتأمين تمويل إضافي على وجه السرعة لدعم النمو المستدام والبنية التحتية الحيوية والاتصالات الاجتماعية في بلدان الجوار الجنوبي وغرب البلقان. وتتركز مبادرة Economic Resilience Initiative على القطاعين العام والخاص دعماً لأنشطة بنك الاستثمار الأوروبي EIB خلال المراحل المختلفة من دورة المشروع. هنا وقد ساهم بنك الاستثمار الأوروبي EIB في نافذة تمويل المساعدة الفنية لمبادرة Economic Resilience Initiative بمبلغ 90 مليون يورو مولت من موارد ميزانيته الخاصة.

#### إخلاء المسؤولية

تقع مسؤولية محتويات هذا التقرير على عاتق ائتلاف شركات WYG و Economic Resilience Initiative "ERI" Infrastructure Technical Assistance "ITA" ، ولا تعكس بأي حال من الأحوال وجهات نظر بنك الاستثمار الأوروبي EIB أو الاتحاد الأوروبي.

يتحمل مؤلف هذا التقرير المسؤولية الكاملة عما ورد فيه. ويشار إلى أن وجهات النظر المطروحة به تعبر عن رأي الكاتب فحسب وقد لا تعكس بالضرورة وجهة نظر بنك الاستثمار الأوروبي EIB.

تم إصدار هذا المستند للطرف الذي كُلف بإعداده ولأغراض محددة مرتبطة بالمشروع المذكور أعلاه فقط. إذ لا ينبغي الاعتماد عليه من قبل أي طرف آخر أو استخدامه لأي أغراض أخرى بخلاف ذلك.

نخلي مسؤوليتنا من تحمل أية عواقب قد تنجم عن الاعتماد على هذا المستند من قبل أي طرف آخر، أو استخدامه من قبل أي غرض آخر بخلاف المشار إليه. هنا ولا نتحمل مسؤولية ما قد يرد به من خطأ أو إغفال قد يكون ناجم عن خطأ أو إغفال في البيانات المقدمة إلينا من قبل أطراف أخرى.

## سجل مسائل التقرير

عنوان المشروع: التقىيم الأولي للمخاطر والتقييم البيئي والاجتماعي لمشروع العقبة-عمان لتحلية ونقل المياه AAWDC (الأردن)  
 رقم المشروع: MSK-JOR-ENV – AAWDC-21  
 عنوان التقرير: ملخص تقرير تقييم مخاطر تصريف المحلول الملحي - ملخص المهمة 1.3  
 العدد: 1

| المرجعية | التاريخ              | التفاصيل  | الإعداد  | تم التتحقق من قبل                         |
|----------|----------------------|---|--|---|
| 4        | 3                    | 2   | 1  |   |
|          | 19 كانون الثاني 2022 | 30 أيلول 2021   |  |   |
|          |                      | ملخص تقرير تقييم مخاطر<br>تصريف المحلول الملحي -<br>ملخص المهمة 1.3 | فريق دراسة تقييم الأثر البيئي<br>والاجتماعي ESIA | Timothy Young<br>SPM<br>Manuel BÉNARD DTL |
|          |                      |   | Mathieu ARNDT<br>TL                              | Mathieu ARNDT<br>TL                       |

## جدول المحتويات

|         |   |
|---------|---|
| 1.....  | سجل مسائل التقرير .....                         |
| 1.....  | جدول المحتويات .....                            |
| 1.....  | قائمة الأشكال .....                             |
| 1.....  | قائمة الجداول .....                             |
| 1.....  | مسرد المصطلحات والاختصارات .....                |
| 3.....  | 1. تقييم مخاطر تصريف المحلول الملحي .....       |
| 3.....  | 1-1 لمحه عامة عن التقييم والتخفيف المقترن ..... |
| 5.....  | 2-1 نتائج نمذجة تشتت المجال القريب .....        |
| 12..... | 3-1 نتائج نمذجة تشتت المجال البعيد .....        |

## قائمة الأشكال

|         |  |
|---------|--|
| 8.....  | الشكل 1: ارتفاع العمود بوجود مسافة من الناشر (الاسترداد 45%)   |
| 8.....  | الشكل 2: نسبة الملوحة فوق السطح المحيط مع وجود مسافة من الناشر (45% الاسترداد)                           |
| 11..... | الشكل 3: ارتفاع العمود مع وجود مسافة من الناشر (استرداد 42%)   |
| 11..... | الشكل 4: نسبة الملوحة فوق السطح المحيط بوجود مسافة من الناشر (42% الاسترداد)                             |
| 12..... | الشكل 5: موزع نашرات التصريف بطول 200 متر على عمق 25 متر .....   |
| 13..... | الشكل 6: تشتت المحلول الملحي في المجال البعيد عند الاسترداد بنسبة 45% (ملاحظة: الملوحة المحيطة PSU 40.8) |
| 14..... | الشكل 7: إعادة تدوير المحلول الملحي المركز إلى أبراج المأخذ .....  |

## قائمة الجداول

|         |  |
|---------|--|
| 6.....  | الجدول 1: ملخص نتائج نموذج بريهين Brihne لتشتت المحلول الملحي في المجال القريب عند معامل الاسترداد 45%     |
| 10..... | الجدول 2: ملخص نتائج نموذج بريهين Brihne لتشتت المحلول الملحي في المجال القريب عند معامل الاسترداد 42%     |
| 13..... | الجدول 3: تركيز المحلول الملحي في المجال البعيد بوجود مسافة من الناشرات (ملاحظة: الملوحة المحيطة PSU 40.8) |

## مسرد المصطلحات والاختصارات

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| أبو علenda                           | AA     |
| مشروع العقبة-عمان لتحلية ونقل المياه | AAWDC  |
| مشروع العقبة-عمان لتحلية ونقل المياه | AAWDCP |
| شركة تطوير العقبة                    | ADC    |
| مجال النفوذ                          | AoI    |
| سلطة منطقة العقبة الاقتصادية الخاصة  | ASEZA  |
| شركة مياه العقبة                     | AW     |
| خزان توزيع مياه العقبة               | AWDR   |
| البناء والتشغيل والنقل               | BOT    |
| محطة تقوية الضخ                      | BPS    |
| خزان تفتيت الضغط                     | BPT    |
| النفقات الرأسمالية                   | CAPEX  |
| التنظيف من الداخل                    | CIP    |
| أول أكسيد الكربون                    | CO     |
| تعويم الهواء المذاب                  | DAF    |
| الترشيح المزدوج للوسائل              | DMF    |
| بنك الاستثمار الأوروبي               | EIB    |
| مبادرة المرونة الاقتصادية            | ERI    |
| تقييم الأثر البيئي والاجتماعي        | ESIA   |
| الاتحاد الأوروبي                     | EU     |
| البلاستيك المقوى بالزجاج             | GRP    |
| البولي ايثلين عالي الكثافة           | HDPE   |
| محطة سحب وضخ المياه                  | IPS    |
| كميلومتر                             | Km     |
| مليون متر مكعب                       | MCM    |
| وزارة البيئة                         | MoEnv  |
| محضر الاجتماع                        | MoM    |
| وزارة المياه والري                   | MWI    |
| الترشيح الدقيق                       | MF     |
| ثاني أكسيد النيتروجين                | NO2    |

|   |       |
|---|-------|
| أوزون   | O3    |
| القطر منافذ التصريف   | OD    |
| التشغيل والصيانة  | O&M   |
| النفقات التشغيلية   | OPEX  |
| الفئة المتأثرة من المشروع   | PAP   |
| الجسيمات ( قطرها > 10 ميكرون )  | PM10  |
| محطة الضخ   | PS    |
| خزان التجميع  | RGT   |
| التناضح العكسي  | RO    |
| مشروع البحر الأحمر - البحر الميت لنقل المياه  | RSDS  |
| ميتا الصوديوم بيسولفيت  | SMBS  |
| ثاني أكسيد الكبريت  | SO2   |
| تحلية المياه بالتناضح العكسي  | SWRO  |
| المساعدة التقنية (في إشارة إلى الفريق العامل في هذا المشروع كجزء من ائتلاف شركات WYG بموجب عقد التابع للمبادرة ERI-ITA) | TA    |
| إجمالي المواد الصلبة الذائبة  | TDS   |
| الأسس المرجعية  | ToR   |
| الإمارات العربية المتحدة  | UAE   |
| الترشيح الفائق  | UF    |
| الوكالة الأمريكية للتنمية الدولية   | USAID |

# 1. تقييم مخاطر تصريف محلول الملح

## 1-1 لمححة عامة عن التقييم والتخفيف المقترن

تم تصميم مشروع العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه AAWDC، كما ذكرنا سابقاً في دراسة تقييم الأثر البيئي والاجتماعي ESIA، لتوفير 300 مليون متر مكعب / سنة من المياه المحلاة من مياه البحر المستخرجة من خليج العقبة. ينتج عن التناضح العكسي (RO) محلول الملح ومخلفات الغسيل العكسي قبل المعالجة، التي من المخطط أن يتم تصريفها، بعد معالجة المواد الصلبة، مرة أخرى في البيئة البحرية.

تم بيان عدد من مراافق تحلية المياه التي تقوم بتصريف محلول الملح في البحر الأحمر، وهناك ما يقارب 7 ملايين  $m^3$  / يوم من طاقة الاستيعابية لتحلية المياه، هي قيد التشغيل بالفعل أو قيد الإنشاء على البحر الأحمر. حالياً، لا توجد محطات لتحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO واسعة النطاق في خليج العقبة، حيث يوجد في مصر بعض مراافق تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO، المشغلة على نطاق أصغر من نظيره في خليج العقبة، حيث يتراوح حجم الطاقة الإنتاجية ما بين 5000 و20000  $m^3$  / يوم ويوجد في إيلات محطة تحلية بطاقة 55,000  $m^3$  / يوم.

سينتج عن محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO لمشروع العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه AAWDCP محلول الملح المفروض بتركيز ملوحة يتراوح بين 1.7 و1.8٪ أعلى من ملوحة مياه البحر المحيطة. لذا، ينبغي تصريف هذا محلول الملح إلى خليج العقبة دون التسبب في أضرار جسيمة للبيئة البحرية؛ لطالما مسار التصريف هذا أمر لا مفر منه. ويقترح تصريف محلول الملح المفروض في البحر في ميناء العقبة الصناعي الجديد. تشتري حدود ثلاثة دول أخرى في خليج العقبة ضمن مسافات تقريرية تقل عن 15 كم من موقع تصريف محلول الملح، وهي المملكة العربية السعودية (1.5 كم) ومصر (13 كم) وإسرائيل (14.5 كم).

يُعد خليج العقبة، بيئته فريدة من نوعها، ويحتوي على بعض النباتات والحيوانات الأكثر أهمية وحساسية في العالم. وبالنظر إلى الظروف الأساسية للمشروع، تتطلب هذه البيئة البحرية الهمامة تحقيق أفضل الممارسات لتنظيف محلول الملح وتثبيته.

يتم تنظيم محطات تصريف محلول الملح باستخدام مناطق الخلط، وطبقاً لحدود المعالجة عند المصب لحماية النباتات والحيوانات من الملوحة المفرطة والمواد الكيميائية. تتطلب لوائح مناطق الخلط المستخدمة دولياً أن ينتشر محلول الملح بنسبة تصل إلى 5-2٪ فوق التركيز في الوسط المحيطي في غضون 100-150 متر من الناشر. بيد أن متطلبات منطقة خلط البحر الأحمر السعودية للملوحة تحدد المستوى المسموح بأقل من أو تساوي 2٪ فوق ملوحة مياه البحر المحيطة على بعد 100 متر من الناشر ، وعليه فإن هذه المتطلبات هي من بين أكثر لوائح منطقة الخلط حماية في العالم، ويوصى باعتمادها لهذا المشروع.

تم تنفيذ نموذجة تشتت محلول الملح، بما يدل على أن نظام ناشر التصريف المصمم بشكل جيد يمكن أن يحقق تشتت محلول الملح إلى ملوحة تتراوح بين 1.3 و2٪ فوق ملوحة مياه البحر المحيطة على بعد 100 متر من الناشر. ومن المتوقع أن يوفر تشتت أقل من 2 في المائة حماية للنباتات والحيوانات المحلية خارج منطقة الخلط. ومع ذلك، يوصى بإجراء اختبار سمية الفاضلات السائلة الكاملة (WET) على المدى الطويل من قبل مطور المشروع أثناء بناء المحطة والتشغيل المبكر للمحطة باستخدام الفاضلات السائلة للمحلول الملح الناتجة عن تشغيل فعلى للمحطة لتأكيد التخفيف اللازم، وملحوظة آثاره على النباتات والحيوانات خارج منطقة الخلط التي يبلغ طولها 100 متر.

ينتج عن محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO تصريف محلول الملح أنظف وأقل اصطداماً بيئياً بكثير من محلول الملح الناتج عن محطات تحلية المياه الحرارية، حيث لا توجد زيادة كبيرة في درجة حرارة محلول الملح (فقط 0.5 إلى 1° درجة مئوية)، ولا يوجد تصريف للمعادن الثقيلة مثل النحاس من أنابيب المبادات الحرارية، ولا توجد مضادات رغوة، كما لا توجد مضادات تكلس (حيث لا يتوقع وجود أي إمكانات لوجود كبريتات الكالسيوم في محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO). ولا ننسى أن محلول الملح في محطات تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO أصبح أكثر نظافة على مدى السنوات العشرين الماضية بسبب الخبرة المتزايدة في تشغيل مراافق المحطة واسعة النطاق باستخدام أغشية الترشيح العضوية المصنوعة من البولي أميد. ويبلغ متوسط جرعات تخلص الحديد التي تستخدمها عادةً محطات تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO في المنطقة 0.5 ملغم/لتر، ونادرًا ما تستخدم الآن جرعات الحمض ومساعدات البوليمر للتخلص، والجرعات المضادة للتخلص في أغشية التناضح العكسي RO؟ نظراً لاستخدام البرمجيات التي تتوقع الكميات المطلوبة من المواد المضادة للتخلص، وبالتالي يتم تحديد الجرعة وفقاً لها. وعادةً ما يتم تناول الكلور المستخدم في مكافحة النفايات بطريقة الصدمة (النفحة) ولا يستخدم بشكل مستمر أو يتم تجنبه تماماً باستخدام أنظمة التنظيف بالكشط. لا يتم تصريف المواد الصلبة مع محلول الملح في المياه البحرية ذات الحساسية البيئية بشكل عام قبل معالجتها بالشكل المناسب.

كشف دراستنا للمواد الكيميائية التي يمكن تصريفها مع محلول الملح عن مادتين كيميائيتين يجب التنبه لهما بشكل خاص، وهما المنتجات الثانوية للتعقيم الكلور ومركبات ثلاثي هالو الميثان THMs، ومضاد التخلص.

1. أول دفعه من مضادات التخلص في محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO مخصصة للتحكم في مقاييس كربونات الكالسيوم وستستخدم نتيجة شروط الضمان التحفظية التي يفرضها مورد أغشية التناضح العكسي. قد يستطيع مطور المشروع الحد من استخدام مضادات الترسيبات بخفض وقت الاحتفاظ في عملية التناضح العكسي. يجب فحص هذا تجريرياً أثناء بناء محطة تحلية المياه SWRO

من قبل مطور المشروع. إذا تم تحديد أن مضادات التكليس ضرورية، فيجب أن تكون خالية من النيتروجين وأن تكون قابلة للتحلل البيولوجي لمنع إضافة هذه العناصر الغذائية إلى بيئه بحرية منخفضة المغذيات وحساسة للغاية، حيث بينت الدراسات المنشورة أن النيتروجين هو العامل المحدد للإنتاجية الأولية في مياه خليج العقبة.

2. تستخدم الجرعات النقية من الكلور بشكل شائع للسيطرة على التلوث الحيوي على المأخذ البحري لمحطات تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO وغالباً ما تستخدم جرعات الكلور المستمر / النبضي لحماية مأخذ محطات الطاقة من التراكمات البحرية الحية. وعلى الرغم من أنه يمكن التخلص من الكلور المتبقى نفسه من محلول الملح في محطات تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO باستخدام مواد كيميائية لإزالة الكلور مثل بيسلفيت الصوديوم (SBS)، فإن استخدام الكلور يولد منتجات ثانوية مسرطنة، كمركبات ثلاثي هالو الميثان THMs، والتي لا يمكن إزالتها من محلول الملح مع إزالة الكلورة وستنبع بها الأمر إلى التصريف في البيئة البحرية باستخدام محلول الملح المتولد من التناضح العكسي RO. نظراً للطبيعة الحساسة جداً للبيئة البحرية التابعة لمشروع العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه AAWDC، يجب تجنب استخدام الكلور في المعالجة المسبقة للتناضح العكسي ومكافحة النفايات في نظام المأخذ ما لم يكن هناك بديل تقني مجدٍ مثل التنظيف اليدوي من قبل الغواصين وأو الكاشطات الميكانيكية.

3. وبشكل خاص، ينبغي أن يكون لخطوط أنابيب المأخذ من أبراج المأخذ إلى محطة سحب وضخ المياه IPS ومرافق تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO استراتيجية لمعالجة الحشيش الكبير لضمان إمدادات كافية من مياه البحر تضمن توافر محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي RO. ومن المتوقع أن يكون طول خطوط أنابيب المأخذ إلى محطة سحب وضخ المياه IPS قصير نسبياً، وأقل من 200 متر، ويجب أن يكون من الممكن الحفاظ على قدرة السحب الهيدروليكي في خطوط الأنابيب القصيرة هذه باستخدام التنظيف اليدوي للغواصين أو باستخدام وحدات الكشط الميكانيكية دون استخدام الكلور.

4- ومن المتوقع أن يكون هناك نوعان من خطوط الأنابيب ذات القطر الكبير 2.3 م المصنعة من مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE لخطوط الأنابيب المركبة من محطة سحب وضخ المياه IPS إلى محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO، حيث تبلغ المسافة تقريباً حوالي 3 كم. إذا كان من الممكن تنظيف هذه الأنابيب ميكانيكياً بوحدات الكشط، فلا ينبغي أن تكون هناك حاجة إلى استخدام جرعات الكلور للتحكم في نفايات المأخذ. ومع ذلك، إذا لم يكن ذلك ممكناً تقنياً، فإن استراتيجية التحكم في تلوث الأنابيب ستطلب تنظيف أنابيب المأخذ يدوياً، ومن ثم من المرجح أن يكون ضرورياً استخدام الكلورة الفاقعية أو الكلورة المستمرة لتقليل تكرار التنظيف اليدوي للأنابيب والوفاء بمتطلبات المحطة المطلوب.

يعتبر المبدأ التحوطي مناسباً بالنسبة لنوع النفايات الناتجة عن عمليات محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO التي يمكن السماح بتصريفها في البحر مع مراعاة تشغيل مرفق تحلية المياه والمحافظة على توافر المحطة. وقد انبثق هذا المبدأ التحوطي نتيجة المراجعة والتقييم التفصيلي لآثار تصريف محلول الملح في مشروع العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه AAWDC، المستكملاً بنمذجة التشتت في الميدانين القريب والبعيد. خلصت دراسة تقييم الأثر البيئي والاجتماعي ESIA إلى ضرورة تلبية المتطلبات التالية للمشروع:

- يجب أن ينتشر محلول الملح المروض على الملوحة بسرعة كبيرة في مياه البحر المحيطة في منطقة خلط صغيرة. يجب أن تكون الملوحة على مسافة 100 متر من الناشرين أقل من أو تساوي 2٪ فوق ملوحة الوسط المحيط.
- يجب أن يكون محلول الملح نظيفاً كيميائياً. وينبغي عدم تصريف المواد الكيميائية أو الأيونات، التي لا توجد بالفعل في مياه البحر المحيطة المستخرجة، إلى خليج العقبة ما لم يكن هناك بديل عملي لمرافق محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO قابل للتشغيل.
- لا ينبغي تصريف أي غشاء تناضح عكسي RO يتلف جراء تنظيف المواد الكيميائية العضوية أو المبيدات الحيوية أو مصادر الفوسفور / النيتروجين المغذية مع محلول الملح. وفي حالة استخدام هذه المواد الكيميائية في المشروع، ينبغي معالجتها إما في الموقع أو خارج الموقع. يمكن السماح بتصرف الأملاح والأحماض والقواعد البسيطة المستخدمة في تنظيف الأغشية مع محلول الملح بعد معادلة حموضتها أو قاعديتها.
- يجب معالجة المواد الصلبة التي تتم إزالتها بواسطة المعالجة المسبقة لمياه البحر والمعالجة اللاحقة وتنظيف الأغشية في محطة لإزالة المواد الصلبة، ولا بد من وجود مرفق لمعالجة الحمأة ونزح المياه من المواد الصلبة للتخلص منها خارج الموقع ككمامة. يمكن بعد ذلك خلط المواد التي تستوفي شروط التعكر المحددة مع محلول الملح للتخلص منه وتصريفه.
- ينبغي أن تكون حدود المعالجة عند المصب للحديد، ومخلفات الكلور (صفر) ومركبات ثلاثي هالو الميثان THMs ، والتعكر، والأكسجين المذاب، والأكسجين المذاب، كما يلي :

  - الأكسجين المذاب: ≤ 3.5 ملغم / لتر
  - التعكر: ≥ NTU 905 ie % بالإضافة إلى تعكر مياه البحر المحيط؛ > ie % NTU 10010
  - مجموع الحديد: ≥ 0.3 ملغم / لتر في المتوسط، ≥ 0.5 ملغم / لتر كحد أقصى
  - الكلور المتبقى: 0

- مركبات ثلاثي هالو الميثان: THMs ينبعى أن تكون تركيزها مساوياً لصفر فوق تركيز الحد المسموح به؛ حيث يكون الحد الأقصى لتركيز مركبات ثلاثي هالو الميثان THMs هو التركيز المحيط المقاس لمركبات ثلاثي هالو الميثان THMs مضروباً في عامل تركيز المحطة عند الاسترداد الكلي.
- الرقم الهيدروجيني:  $\leq 7$  و  $\geq 9$
- يجب تجنب استخدام الكلور لمكافحة النفايات بالمعالجة المسبقة للتناضح العكسي ما لم يكن هناك بديل تقني آخر. وفي حال استخدام الكلور، فيجب مراقبة تركيز مركبات ثلاثي هالو الميثان THMs في محلول الملحي قبل تصريفها يومياً أثناء التشغيل. وعلاوة على ذلك، يتوجى أثناء بناء المأخذ ومنافذ التصريف، تعزيز حماية البيئة البحرية بإدراج الإجراءات الرئيسية التالية:
  - تقليل حفر قاع البحر إلى الحد المطلوب لضمان استقرار أنابيب المأخذ والتصريف (أي الحد الأدنى من الخندق بالنسبة لقاع الحصى).
  - ينبغي دفن أنابيب المأخذ بالكامل في خندق في منطقة تكسر الأمواج،
  - استخدام ستائر الطمي لتقليل تأثير التعرّق الناتج عن التجريف.
  - نقل الشعاب المرجانية التي تقع في مسار خطوط أنابيب المأخذ ومنافذ التصريف؛ حيثما يكون ذلك آمناً للغواصين وباتباع بروتوكول زرع معتمد.
- يتحتم أن يكون هناك رصد شامل والإبلاغ عن تدفق محلول الملحي ومعلمات الجودة المشتركة ومعالجة الكحول التقى للحمأة وتعكرها أثناء تشغيل محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO على النحو المبين في القسم 11-2-2 "الرصد البيئي البحري" لخطة الإدارة البيئية والاجتماعية ESMP.
- يجب تعين مسار التشتت الحقيقي ومدى عمود محلول الملحي من خلال دراسة درجة حرارة -الموصلية- والكتافة (CTD) خلال الموسم المختلفة من قبل مطور المشروع. يجب مراقبة الحالة طويلة الأجل للبيئة البحرية في مسار عمود محلول الملحي كجزء من مسؤوليات مطور الإنشاء والتشغيل والنقل BOT. تشمل خطة الإدارة البيئية والاجتماعية ESMP للمشروع (القسم 9-2-2 إلى 9-5-2) إجراءات التخفيف / الإدارة التفصيلية المتعلقة بتصرف المحلول الملحي خلال مراحل ما قبل الإنشاء ومرحلة الإنشاء والتشغيل لمشروع العقبة - عمان لتحلية ونقل المياه AAWDC. وقد اثبتت جميع هذه الإجراءات عن التقييم الموازي الذي أجراه فريق دراسة تقييم الأثر البيئي والاجتماعي ESIA وتم تقديمها إلى بنك الاستثمار الأوروبي EIB ومروج المشروع كتقرير مستقل بعنوان "المهمة 1.3 - تقييم مخاطر تصريف محلول الملحي".

## 2-1 نتائج نمذجة تشتت المجال القريب

تم استخدام نموذج بريهين Brihne لتقدير تأثير تشتت محلول الملحي للناشرات في محطة ذات الطاقة الانتاجية البالغة 300 مليون متر مكعب / سنة من مياه الشرب.

تم إنشاء تكوين الناشر لنموذج بريهين Brihne، باستخدام معدلات روبرتس Roberts Abessi، ولضمان صحة معدلات روبرتس، يجب أن يكون رقم فرود Froude أكبر أو يساوي 20 لضمان صحة المعدلات.

وتم فحص سيناريوهين:

- السيناريو 1 - محطة تحلية المياه بمعامل الاسترداد 45٪
- السيناريو 2 - محطة تحلية المياه بمعامل الاسترداد 42٪

وترد أدناه المعلومات الرئيسية التي تم الحصول عليها من النموذج.

**السيناريو 1، محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO: الاسترداد الكلي 45٪**

- مدخلات نموذج بريهين Brihne هي كما يلى:
- قطر منفذ الناشر: 300 مم
- عدد الناشرات: 30 مرتبة على شكل 15 زوجاً من الناشر من الخلف إلى الخلف
- زاوية الناشر: 60 درجة بالنسبة للوضع الأفقي
- سرعة الناشر: 5.65 م / ث
- قطر موزع أنابيب التصريف: 2.5 م
- ارتفاع الناشر فوق الموزع: 1.0 م
- ارتفاع الناشر فوق قاع البحر: 3.5 م
- ملوحة مياه البحر المحيطة: PSU 40.8
- ملوحة تصريف محلول الملحي: PSU 74.2
- درجة حرارة مياه البحر: 28 °C
- درجة حرارة محلول الملحي: 29 °C

- كثافة مياه البحر: 1,026.55 كجم/م<sup>3</sup>
- كثافة محلول الملحي: 1,051.68 كجم / م<sup>3</sup>

#### نتائج نموذج بريهين Brihne التشتت في المجال القريب عند الاسترداد 45%

ويرد في الجدول 1 والشكل 1 القريب **Error! Reference source not found.** .  
أهم النتائج التي توصلت إليها نمذجة المجال القريب هي كما يلي:  
**التأكيد على تحقيق منطقة الخلط بنسبة 2% فوق السطح المحيط على بعد @ 100 متر من النشرات.**

يمكن تحقيق متطلبات منطقة الخلط المتمثلة في تحقيق ما لا يزيد عن 2% من الملوحة في الوسط المحيط على بعد 100 متر من النشرات بشكل مريح في موقع المجال القريب. وتبين أن نسبة الملوحة البالغة 2% في المائة فوق تركيز الوسط المحيط تتحقق على مسافة 38 متراً من الناشر (كما يشير الشكل 2). وأشار النموذج إلى أنه في نهاية المجال القريب، أي على بعد 56 متراً من النشرات، سيكون تركيز ملوحة عمود محلول الملحي أعلى بنسبة 1.4% فقط من البيئة المحيطة. ومن الجدير بالذكر، أن جميع هذه النتائج ستكون مناسبة لحماية النباتات والحيوانات من الملوحة المرتفعة.

#### تأكيد ارتفاع العمود عند معامل الاسترداد 45%

يبلغ الحد الأقصى لارتفاع العمود الذي تم الوصول إليه فوق قاع البحر 20.15 متراً باستخدام نموذج بريهين Brihne (الشكل 1 **Error! Reference source not found.**). ويلاحظ أن الحد الأقصى لارتفاع العمود فوق قاع البحر الذي حدده نموذج بريهين، أعلى من ذلك المحسوب باستخدام معادلة روبرتس/أبيسي  $2.25 \times \text{فرويد} \times \text{دو} + 3.5 = 17.7 \text{ m}$ , ( $2.25 \times \text{Froude} \times \text{Do} + 3.5 = 17.7 \text{ m}$ ). إن السماح بهامش 5 أمتار على ارتفاع عمود محلول الملحي الأقصى حسب معادلة روبرتس/أبيسي يعطي عمق مياه يبلغ حوالي 23 متراً، والذي يجب أن يكون كافياً لضمان عدم وصول عمود محلول الملحي إلى سطح البحر.

#### ارتفاع طبقة الانتشار - عند معامل الاسترداد 45%

أشار نموذج بريهين Brihne إلى أن نهاية المجال القريب ستكون على مسافة 56 متراً تقريباً من الناشر. وبهذه المسافة، يصل العمود إلى قاع البحر ويرتد منتصراً كطبقة ومن ثم يفقد القوة الدافعة الأمامية متاثراً بالنشرات. تم تحديد سمك طبقة انتشار عمود محلول الملحي من طراز بريهين Brihne بحوالي 3.1 متراً. يحتوي الجزء العلوي من طبقة انتشار عمود محلول الملحي على تركيز ملوحة بزيادة 25% فقط من الحد الأقصى لزيادة التركيز في طبقة الانتشار.

ولغاية الوصول إلى نهاية منطقة المجال القريب، يبقى تشتت عمود محلول الملحي ناجماً عن الاضطراب الناشئ عن النشرات النفاثة عالية السرعة. وبعد نهاية مسافة المجال القريب البالغة 56 متراً، سيتدفق عمود محلول الملحي كتيار كثيف على قاع البحر متدفعاً نحو أعماق قاع البحر إلى المياه العميقية. سيصبح عمود محلول الملحي أكثر تخفيقاً تدريجياً بفعل التياريات المحلية المحيطة والمنخفضة ونتيجة تشتت تركيز محلول. سيتم تحديد مسار عمود محلول الملحي وانخفاض الزيادة في التركيز الإضافي مع المسافة باستخدام نمذجة المجال البعيد.

#### طول موزع الناشر

تحدد معادلة روبرتس أبيسي الحد الأدنى للفصل المطلوب بين أزواج الناشر، كالتالي:

$$\text{الحد الأدنى للفصل} = 2 \times 21.1 * 0.3 = 12.7 \text{ m} \times 2$$

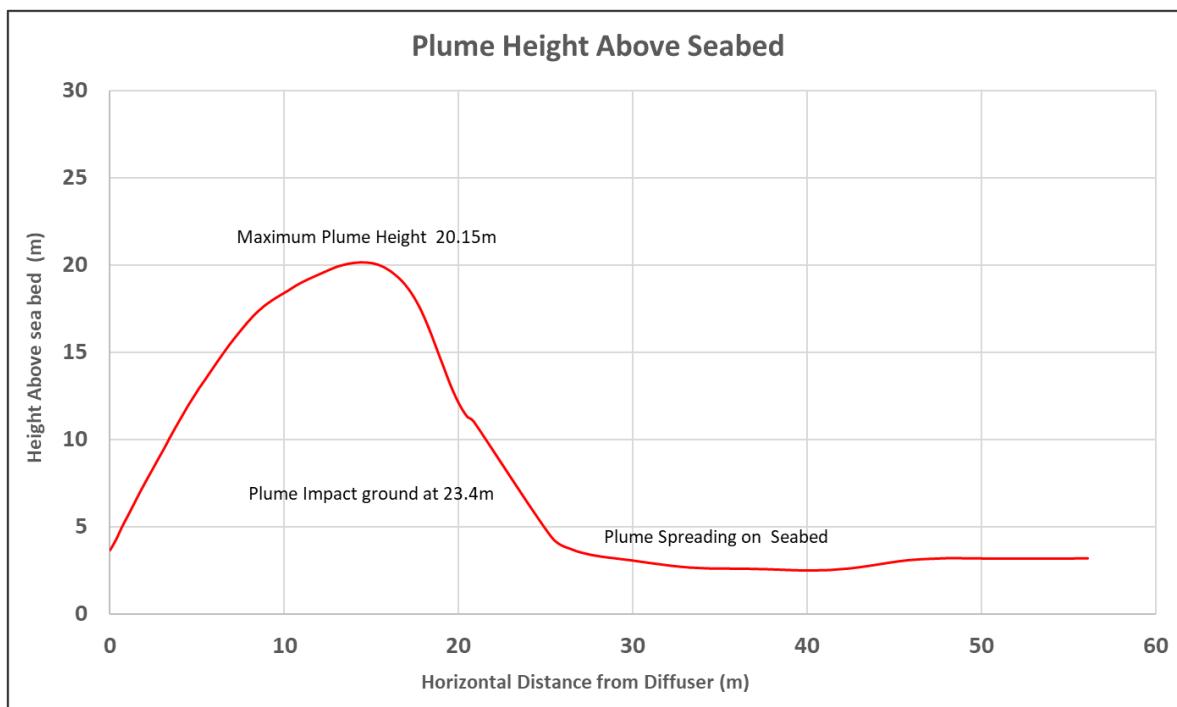
سيكون الطول الإجمالي لقسم الناشر = 12.7 \* (1-15) م.

فيما يلي الجداول ومخرجات الرسم البياني لسيناريو الأول عند معامل الاسترداد 45%

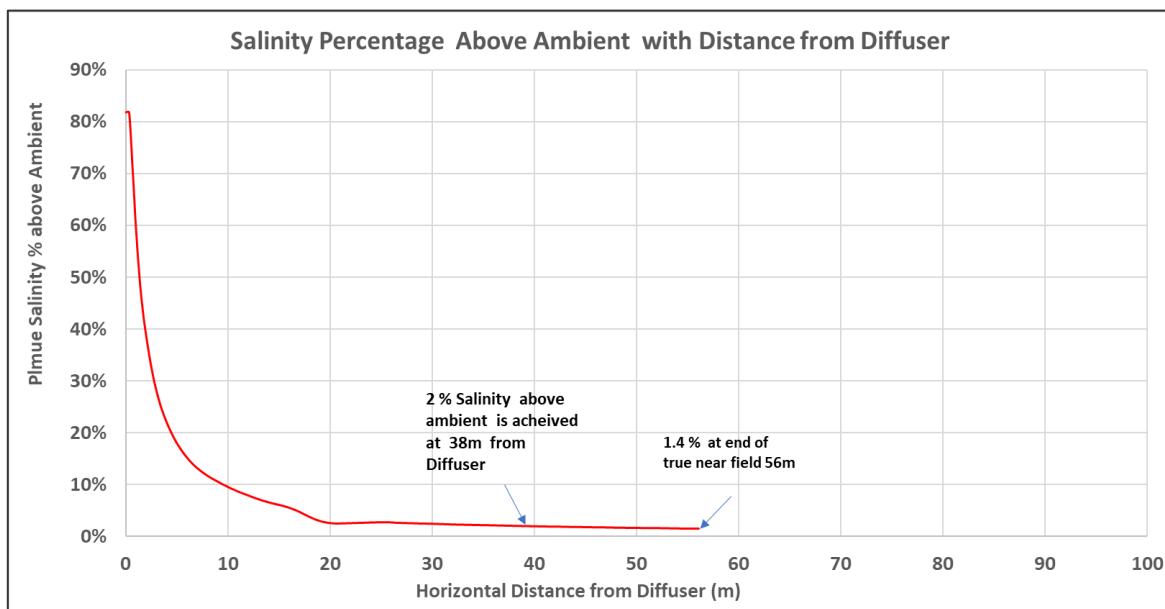
الجدول 1: ملخص نتائج نموذج بريهين Brihne لتشتت محلول الملحي في المجال القريب عند معامل الاسترداد 45%

| رمز       | الوصف  | القياس | الوحدة |
|-----------|--|--------|--------|
| Zm        | ذروة خط الوسط للمسار النفات (بالنسبة لفوهة المنفذ)             | 12.57  | m      |
| Xm        | الموقع الأقصى لنقطة ذروة خط وسط العمود                         | 13.23  | m      |
| Zt Nozzle | الحد الأقصى لارتفاع العمود بالنسبة لفوهة المنفذ                | 16.51  | m      |
| Zt ground | الحد الأقصى لارتفاع العمود بالنسبة إلى القاع                   | 17.51  | m      |
| Sm        | تشتت محلول عند خط الوسط عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (الذروة) | 11.70  |        |

| الوحدة | القياس | الوصف   | رمز |
|--------|--------|---|-----|
| PSU    | 43.70  | تركيز المحلول الملحي المركزي عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (الذرورة)  | Cm  |
| m      | 1.9    | نصف القطر عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (المسافة نصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 50% عند خط الوسط، Cc = 50%)             | bm  |
| m      | 2.7    | نصف القطر عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 25% عند خط الوسط، C = 25%)            | rm  |
| m      | 3.9    | نصف القطر عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 6% عند خط الوسط، Cc = 6%)             | Rm  |
| m      | 20.87  | الموقع الأفقي لخط الوسط لنقطة العودة (حيث يصل المحور النفات إلى مستوى ارتفاع المنفذ)  | Xr  |
|        | 33.5   | تحفييف خط الوسط عند نقطة العودة   | Sr  |
| PSU    | 41.8   | تركيز المحلول الملحي المركزي عند نقطة العودة  | Cr  |
| m      | 3.4    | المسافة النصف قطرية للمسار النفات عند نقطة العودة (المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 50% عند خط الوسط، Cc = 50%) | br  |
| m      | 4.9    | المسافة النصف قطرية للمسار النفات عند نقطة العودة (المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 25% عند خط الوسط، C = 25%)  | rr  |
| m      | 6.9    | المسافة النصف قطرية للمسار النفات عند نقطة العودة (المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 6% عند خط الوسط، Cc = 6%)   | Rr  |
| m      | 23.4   | الموقع الأفقي لخط وسط التأثير بالنقطة السفلية   | Xi  |
|        | 29.7   | تحفييف خط الوسط عند نقطة الاصطدام   | Si  |
| PSU    | 41.9   | تركيز المحلول الملحي المركزي عند نقطة الاصطدام  | Ci  |
| m      | 56.9   | الموقع الأفقي للطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | Xn  |
| m      | 3.18   | سمك الطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | hn  |
|        | 56.9   | تحفييف خط الوسط للطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | Sn  |
| PSU    | 41.4   | تركيز خط الوسط الملحي للطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | Cn  |
| m/s    | 0.10   | سرعة خط الوسط لطبقة الانتشار في نهاية منطقة المجال القريب   | Un  |



الشكل 1: ارتفاع العمود بوجود مسافة من الناشر (الاسترداد 45٪)



الشكل 2: نسبة الملوحة فوق السطح المحيط مع وجود مسافة من الناشر (45٪ الاسترداد)

## السيناريو 2، محطة تحلية المياه بالتناضح العكسي SWRO: عند معامل الاسترداد الكلي 42%

مدخلات نموذج بريهين Brihne هي كما يلي.

- قطر منفذ الناشر: 300 مم
- عدد الناشرات: 15
- زاوية الناشر: 60 درجة من الأفقي
- سرعة الناشر: 6.4 م / ث
- قطر موزع أنبوب التصريف: 2.5 م
- ارتفاع الناشر فوق الموزع: 1.0 م
- ارتفاع الناشر فوق قاع البحر: 3.5 م
- ملوحة مياه البحر المحيطة: PSU 40.8
- ملوحة تصريف محلول الملحي: PSU 70.345
- درجة حرارة مياه البحر: 28 °C
- درجة حرارة محلول الملحي: 29 °C
- كثافة مياه البحر: 1,026.55 كجم/م<sup>3</sup>
- كثافة محلول الملحي: 1,048.73 كجم/م<sup>3</sup>

## نتائج نموذج بريهين Brihne في المجال القريب- معامل الاسترداد بنسبة 42%

يرد في الجدول 2 **Error! Reference source not found.Error! Reference source not found.** لهذا السيناريو.

أهم النتائج التي توصلت إليها نمذجة المجال القريب لهذا السيناريو هي كما يلي:

**التأكيد على تحقيق منطقة الخلط بنسبة 2٪ فوق السطح المحيط على بعد @ 100 متر من الناشرات.**

يمكن تحقيق متطلبات منطقة الخلط المتمثلة في تحقيق ملوحة لا تزيد عن 2٪ فوق المحيط على بعد 100 متر من الناشر بشكل مريح في هذا الموقع في المجال القريب. وتبين أن نسبة 2 في المائة فوق الملوحة المحيطة تتحقق على مسافة 23.5 متراً من الناشر (يشير الشكل 4 **Error! Reference source not found.**). وأشار النموذج إلى أنه في نهاية المجال القريب، وعلى بعد 69 متراً من الناشرات، سيكون تركيز ملوحة عمود محلول الملحي 1.3٪ فقط فوق ملوحة مياه البحر المحيطة. ومن الجدير بالذكر، أن جميع هذه النتائج ستكون ممتازة لحماية النباتات والحيوانات من الملوحة المرتفعة.

## تأكيد ارتفاع العمود عند معامل الاسترداد بنسبة 42٪

يبلغ الحد الأقصى لارتفاع العمود الذي تم الوصول إليه فوق قاع البحر 23.45 م باستخدام نموذج بريهين Brihne (الشكل 3). ويلاحظ أن الحد الأقصى لارتفاع العمود فوق قاع البحر الذي حدده نموذج بريهين، أعلى من ذلك المحسوب باستخدام معادلة روبرتس/أبيسي (2.25 × فرود × دو + 3.5) = 20.7 م. إن السماح بهامش 5 أمتار على ارتفاع العمود الأقصى لروبرتس / أبيسي يعني عمق مياه يبلغ حوالي 25.5 متراً وهو ما يجب أن يكون كافياً لضمان عدم وصول عمود محلول الملحي إلى سطح البحر.

## ارتفاع طبقة الانتشار - معامل الاسترداد 42٪

أشار نموذج بريهين Brihne إلى أن نهاية المجال القريب ستكون على مسافة 69 متراً تقريباً من الناشر. وبهذه المسافة، يصل العمود إلى قاع البحر ويرتد منتصراً كطبقة ومن ثم يفقد القوة الدافعة الأمامية متأثراً بالنماشرات. تم تحديد سمك طبقة انتشار عمود محلول الملحي من طراز بريهين Brihne بحوالي 3.8 متراً. هنا ويحتوي الجزء العلوي من طبقة انتشار عمود محلول الملحي على زيادة 25٪ فقط من الحد الأقصى لزيادة التركيز في طبقة الانتشار.

ولغاية الوصول إلى نهاية منطقة المجال القريب، يبقى تشتت عمود محلول الملحي ناجماً عن الاضطراب الناشئ عن النماشرات النفاثة عالية السرعة. وبعد نهاية مسافة المجال القريب البالغة 69 متراً، سيتدفق عمود محلول الملحي كتيار كثيف على طول قاع البحر يتذبذب نحو أعماق قاع البحر إلى المياه العميقة. سيصبح عمود محلول الملحي أكثر تخفيفاً تدريجياً بفعل التيارات المحلية المحيطة والمنخفضة ونتيجة تشتت تركيز محلول. سيتم تحديد مسار عمود محلول الملحي وتقليل التركيز الإضافي مع المسافة باستخدام نمذجة المجال البعيد.

## طول موزع الناشر

تحدد معادلة روبرتس أبيسي الحد الأدنى للفصل المطلوب بين أزواج الناشر، كالتالي:

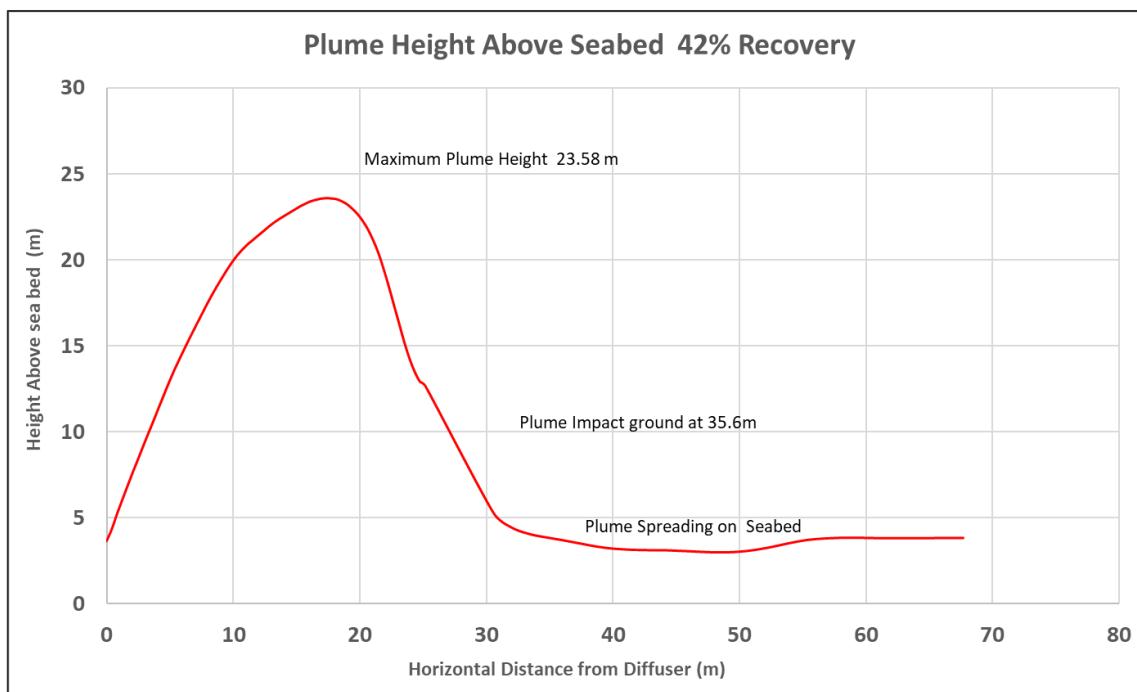
$$\text{الحد الأدنى للفصل} = Froude * Do = 2 \times 25.5 * 0.3 = 15.3 \text{ m} \times 2$$

$$\text{سيكون الطول الإجمالي لقسم الناشر} = 214 = 12.7 * (1-15)$$

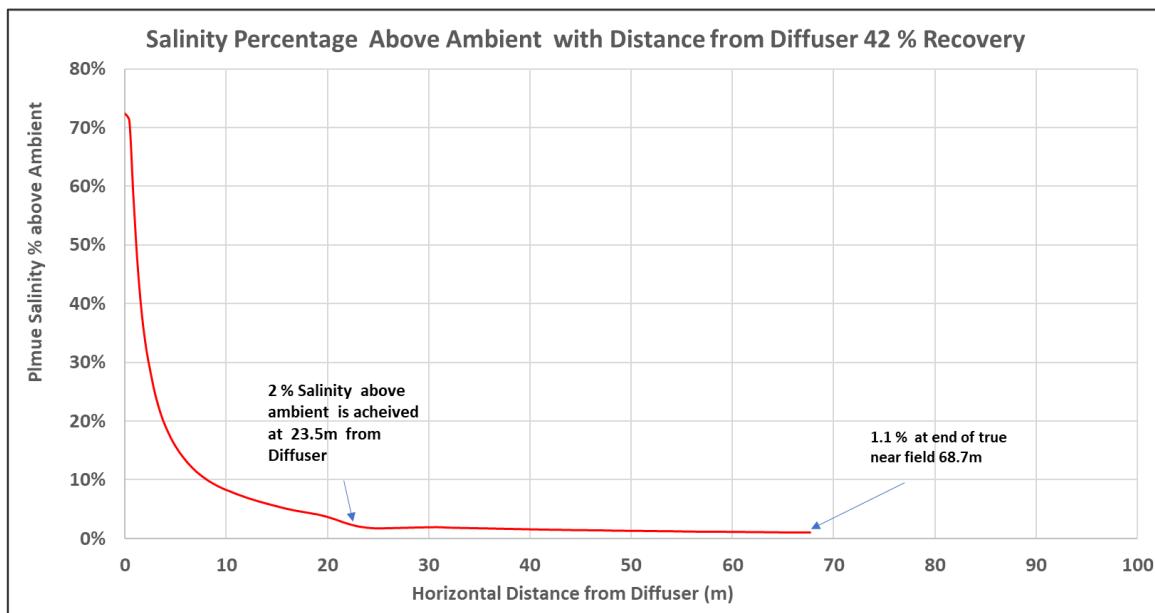
### فيما يلي الجداول ومخرجات الرسم البياني لسيناريو الأول عند معامل الاسترداد 42٪

الجدول 2: ملخص نتائج نموذج بريهين Brihne لتشتت محلول الملحي في المجال القريب عند معامل الاسترداد 42٪

| الوحدة | القياس | الوصف   | الرمز     |
|--------|--------|---|-----------|
| m      | 15.16  | ذروة خط الوسط للمسار النفات (بالنسبة لفوهة المنفذ)  | Zm        |
| m      | 15.96  | الموقع الأفقي لنقطة ذرورة خط وسط العمود   | Xm        |
| m      | 19.90  | الحد الأقصى لارتفاع العمود بالنسبة لفوهة المنفذ   | Zt Nozzle |
| m      | 20.90  | الحد الأقصى لارتفاع العمود بالنسبة إلى القاع  | Zt ground |
|        | 14.10  | تشتت محلول عند خط الوسط عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (الذرورة)   | Sm        |
| PSU    | 42.90  | تركيز محلول الملحي المركزي عند أقصى ارتفاع للمسار النفات (الذرورة)  | Cm        |
| m      | 2.3    | نصف القطر عند أقصى ارتفاع للمسار النفات) المسافة نصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 50٪ عند خط الوسط، $Cc/C = 50$                 | bm        |
| m      | 3.3    | نصف القطر عند أقصى ارتفاع للمسار النفات) المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 25٪ عند خط الوسط، $Cc/C = 25$               | rm        |
| m      | 4.7    | نصف القطر عند أقصى ارتفاع للمسار النفات) المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 6٪ عند خط الوسط، $Cc/C = 6$                 | Rm        |
| m      | 25.17  | الموقع الأفقي لخط الوسط لنقطة العودة (حيث يصل المحور النفات إلى مستوى ارتفاع المنفذ)  | Xr        |
|        | 40.4   | تخفييف خط الوسط عند نقطة العودة   | Sr        |
| PSU    | 41.5   | تركيز محلول الملحي المركزي عند نقطة العودة  | Cr        |
| m      | 4.2    | المسافة النصف قطرية عند المسار النفات عند نقطة العودة) المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 50٪ عند خط الوسط، $Cc/C = 50$ | br        |
| m      | 5.9    | المسافة النصف قطرية للمسار النفات عند نقطة العودة) المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 25٪ عند خط الوسط، $Cc/C = 25$     | rr        |
| m      | 8.3    | المسافة النصف قطرية للمسار النفات عند نقطة العودة) المسافة النصف قطرية من خط الوسط إلى حيث يكون التركيز 6٪ عند خط الوسط، $Cc/C = 6$       | Rr        |
| m      | 28.2   | الموقع الأفقي لخط الوسط عند نقطة السفلية  | Xi        |
|        | 35.8   | تخفييف خط الوسط عند نقطة الاصطدام   | Si        |
| PSU    | 41.6   | تركيز محلول الملحي المركزي عند نقطة الاصطدام  | Ci        |
| m      | 68.6   | الموقع الأفقي للطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | Xn        |
| m      | 3.83   | سمك الطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | hn        |
|        | 68.6   | تخفييف خط الوسط للطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | Sn        |
| PSU    | 41.2   | تركيز خط الوسط الملحي للطبقة المنتشرة في نهاية منطقة المجال القريب  | Cn        |
| م / ث  | 0.10   | سرعة خط الوسط لطبقة الانتشار في نهاية منطقة المجال القريب   | Un        |



الشكل 3: ارتفاع العمود مع وجود مسافة من الناشر (استرداد 42%)

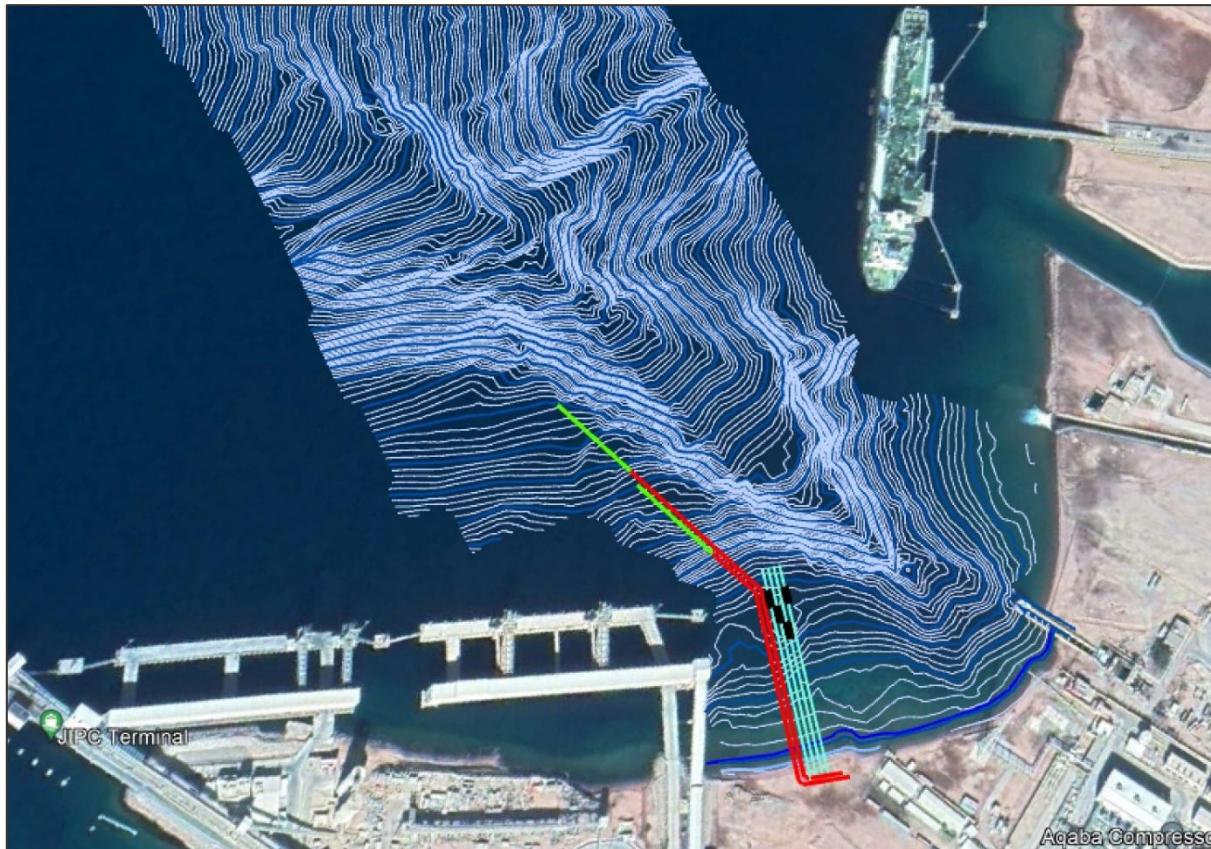


الشكل 4: نسبة الملوحة فوق السطح المحيط بوجود مسافة من الناشر (42% الاسترداد)

### الشكل التوضيحي لموزع نشرات التصريف

قدم نموذج بريهين Brihne في المجال القريب مساحة منطقة الخلط في المجال القريب الفعلى والارتفاعات القصوى لعمود المحلول الملحي التي تتطلب عمق مياه يتراوح ما بين 25 متراً إلى 29 متراً تقريباً.

الشكل 5 أدنى موزع الناشر المتوقع، حيث يبلغ طوله 200 متر (أخضر)، ويبداً عند عمق مياه يتراوح ما بين 25 و30 متراً تقريباً.



الشكل 5: موزع نشرات التصريف بطول 200 متر على عمق 25 متراً

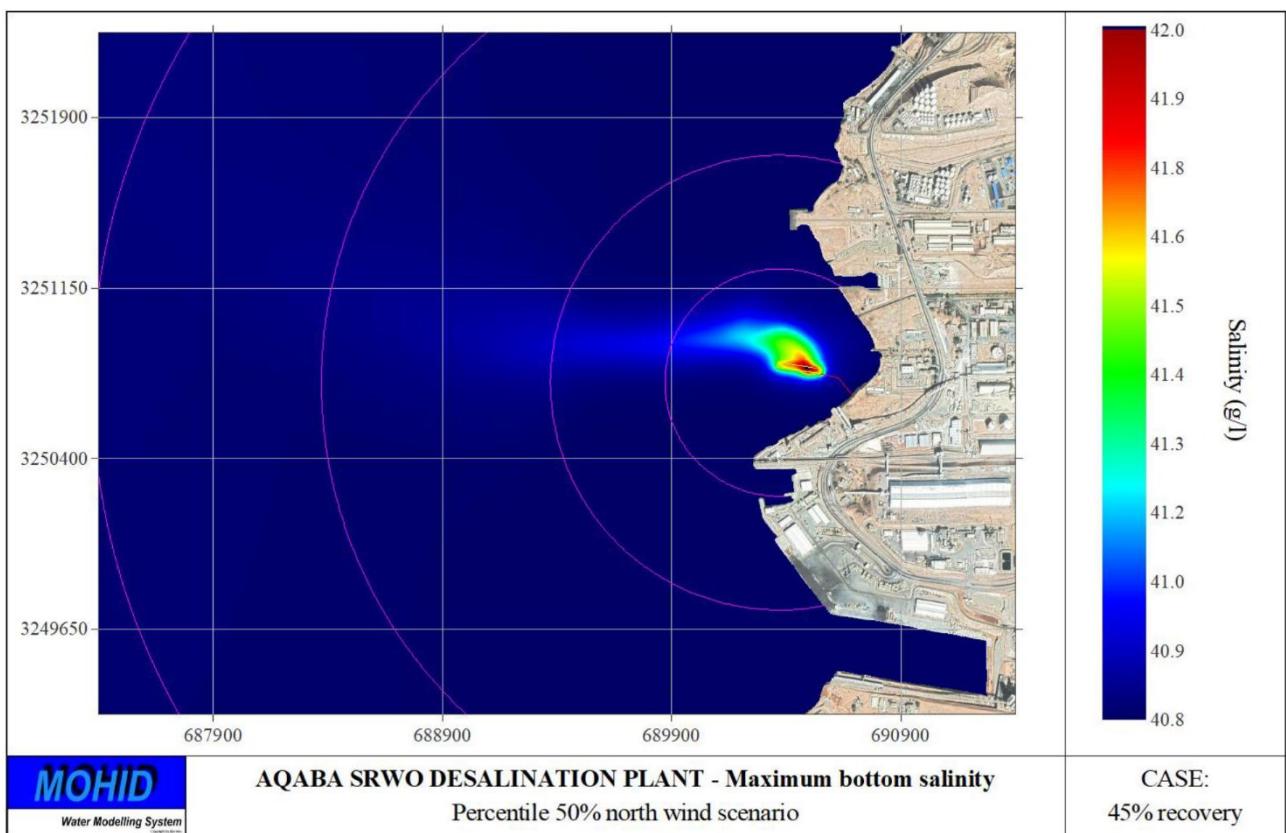
### 3-1 نتائج نمذجة تشتت المجال البعيد

أشارت نتائج نمذجة المجال القريب إلى أن تركيز المحلول الملحي سيخفف إلى أقل من 2% فوق ملوحة الوسط المحيط على بعد 100 متر من الناشر، وهذا من شأنه أن يوفر بالفعل قدرًا مناسبًا من الحماية للنباتات والحيوانات البحرية في منطقة المجال البعيد التي تتجاوز 100 متر من الناشر.

تم تنفيذ نمذجة المجال البعيد باستخدام نموذج موهيد (Mohid) في المجال البعيد. ويرفق التقرير والحسابات ذات الصلة بدراسة دراسة تقييم الأثر البيئي والاجتماعي ESIA (المرفق 1).

ويرد في الشكل أن عمود المحلول الملحي الذي يبدأ من تركيز  $\geq 2\%$  فوق الملوحة للسطح المحيط سيصبح ببطء أكثر تخفيفاً على مدى عدة كيلومترات بسبب التيارات تحت الماء، وتتشتت المحلول الملحي الغارق إلى أسفل بفعل الجاذبية وتتشتت التركيز. سوف ينتقل عمود المحلول الملحي كثيارات كثيف نحو الأعماق نحو قاع البحر.

يبين الجدول 3: تركيز المحلول الملحي في المجال البعيد بوجود مسافة من الناشرات (الملاحظة: الملوحة المحيطة PSU 40.8). يمكن الملاحظة من الجدول أن تركيز المحلول الملحي لا يزال مخفقاً في المجال البعيد. وعلاوة على ذلك سيكون من الصعب ملاحظة عمود المحلول الملحي على مسافات حوالي 1.5 كم من الناشر، نظراً لأن تركيز الملوحة أقل من 0.1 PSU فوق الملوحة للوسط المحيط، التي لا ترصدها حساسية العديد من أجهزة القياس (CTD) المستخدمة لمراقبة أعمدة المحلول الملحي.



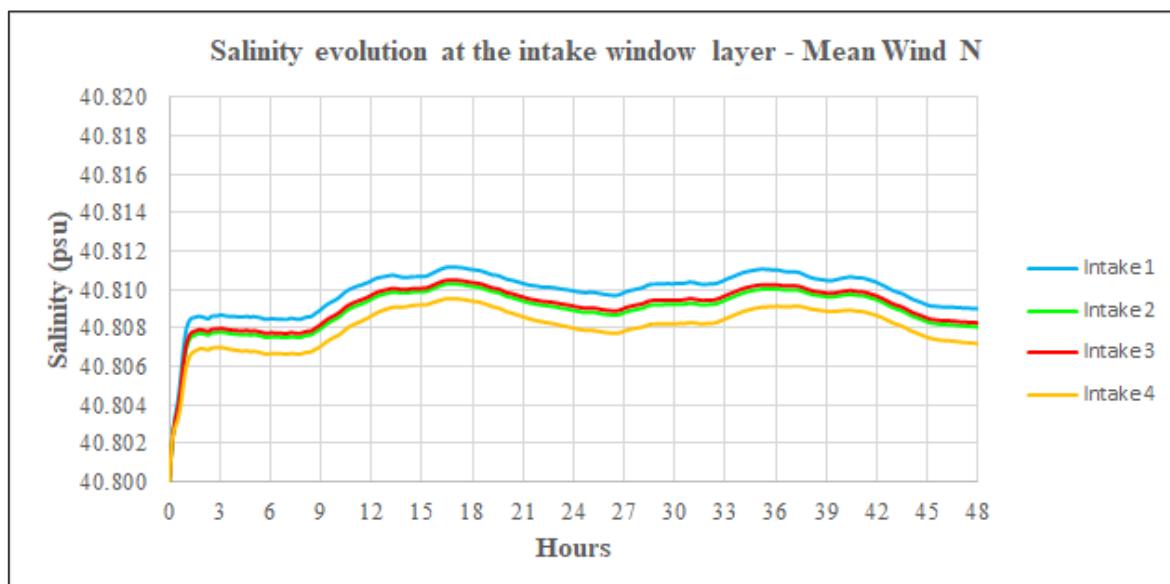
الشكل 6: تشتت المحلول الملحي في المجال البعيد عند الاسترداد بنسبة 45٪ (ملاحظة: الملوحة المحيطة (PSU 40.8)

الجدول 3: تركيز المحلول الملحي في المجال البعيد بوجود مسافة من النشرات (ملاحظة: الملوحة المحيطة (PSU 40.8)

| أقصى قدر من الملوحة (PSU) من النشرات |          |          |         |  | السيناريو                          |
|--------------------------------------|----------|----------|---------|--|------------------------------------|
| 3000 متر                             | 2000 متر | 1000 متر | 500 متر |  |                                    |
| 40.84                                | 40.85    | 40.94    | 41.02   |  | الرياح الشمالية                    |
| 40.84                                | 40.85    | 40.93    | 41.02   |  | 90٪ في المئة الرياح الشمالية       |
| 40.84                                | 40.85    | 40.93    | 41.02   |  | 90٪ النسبة المئوية للرياح الجنوبية |

### تأثير عمود المحلول الملحي على ملوحة المأخذ

نظراً لأن عمود المحلول الملحي أكثر كثافة من مياه البحر في منطقة المجال البعيد، فإنه سينتقل وبالتالي إلى الأسفل كتيار كثيف إلى المياه العميقة، يمكن لتركيز محدود جدًا من عمود المحلول الملحي أن يرجع إلى أبراج المأخذ لمحطة تحلية المياه شريطة أن تكون أبراج المأخذ هذه موجودة في ارتفاعات أقل عميقاً من ناشر التصريف. وبين الشكل 7 نتائج نموذج المجال البعيد لمهيد الذي يوضح تأثير الملوحة على أبراج المأخذ. تم اعتبار الملوحة في السطح المحيط على أنها 40.8 PSU، حيث بلغ ارتفاع درجة الملوحة بسبب المحلول الملحي أقل من 0.012 PSU. لذلك، يمكن اعتبار زيادة درجة الملوحة الناجمة عن إعادة تدوير المحلول الملحي إلى المأخذ ضئيلة.



الشكل 7: إعادة تدوير المحلول الملحي المركز إلى أبراج المأخذ

## Result Report brIHne\_JET\_SPREADING Version (1.0) - Project 'AQADI\_Near dilution study'

### CASE 1

#### Input data

|                                |  |         |
|--------------------------------|--|---------|
| Ambient Conditions             | Average depth at discharge point [Ha (m)]        | 25      |
|                                | Salinity [Ca (psu)]                              | 40.8    |
|                                | Density [rho_a (Kg/m3)]                          | 1026.55 |
| Brine effluent characteristics | Saline concentration [Co (psu)]                  | 70.345  |
|                                | Density [rho_o (Kg/m3)]                          | 1048.73 |
|                                | Jet discharge velocity [Uo (m/s)]                | 6.4     |
| Brine discharge configuration  | Port diameter [do (m)]                           | 0.3     |
|                                | Discharge angle [thettag_o (sexaseg)]            | 60      |
|                                | Altura de la boquilla respecto al fondo [ho (m)] | 1       |

#### Initial fluxes and length scales

|   |                |
|---|----------------|
| Qo, brine flow rate (discharge volume flux) | 0.45 m3/s      |
| Mo, discharge momentum flux                 | 2.90 m4/s2     |
| Jo, discharge buoyancy flux                 | 0.10 m4/s3     |
| Qco, discharge flux of contaminant mass     | 13.37 psu*m3/s |
| LQ, Flux - Momentum length scale            | 0.27 m         |
| LM, Momentum - Buoyancy length scale        | 7.18 m         |
| Densimetric Froude Number, Fo               | 25.4           |

#### Jet flow behavior

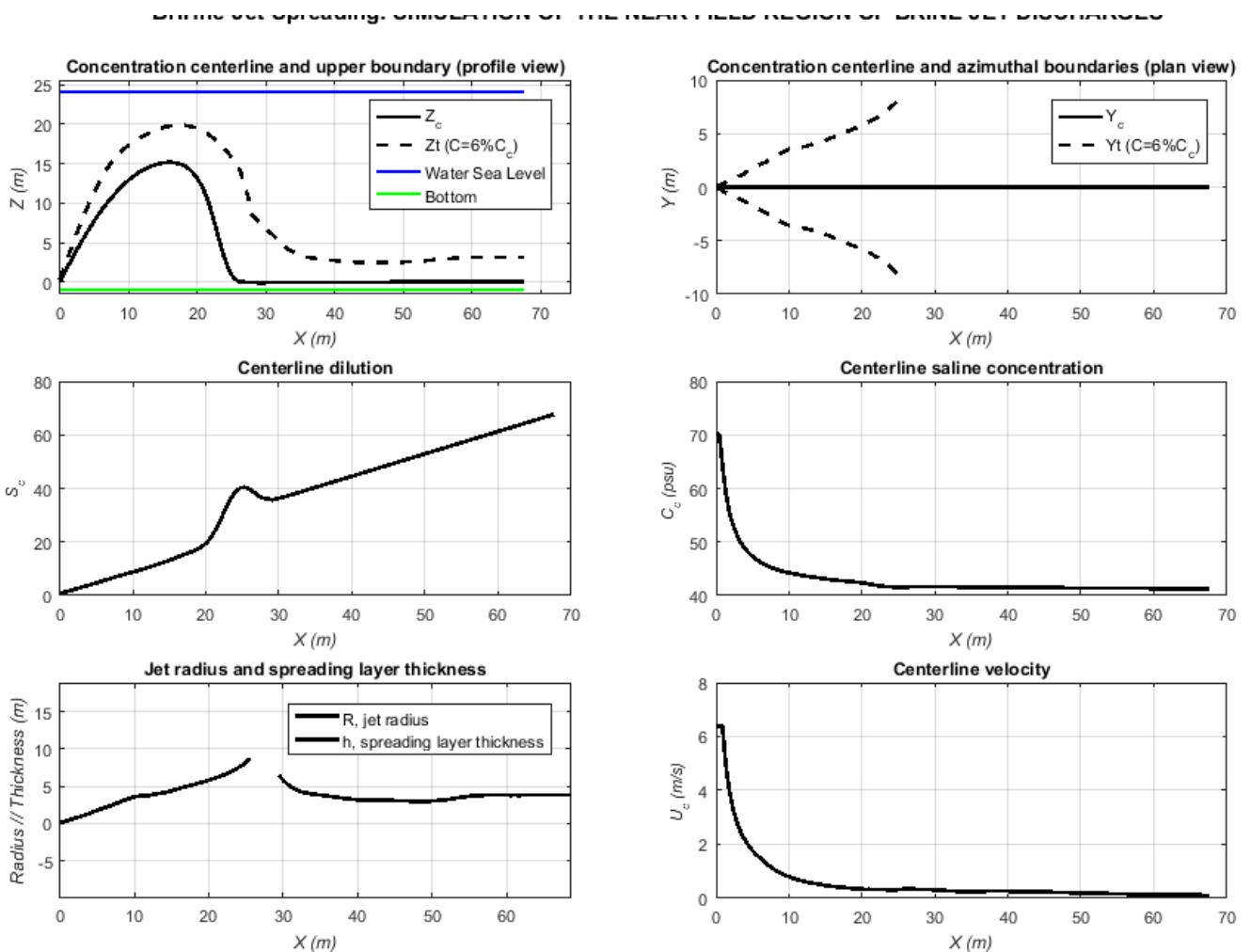
|   |          |
|---|----------|
| Zm, centerline peak of the jet trajectory (relative to the port nozzle)   | 15.16 m  |
| Xm, horizontal location of the centerline peak point  | 15.96 m  |
| Zt, maximum rise height relative to the port nozzle   | 19.90 m  |
| Zt_bottom, maximum rise height relative to the bottom   | 20.90 m  |
| Sr, centerline dilution at the jet maximum height (peak)  | 14.1     |
| Cm, centerline saline concentration at the jet maximum height (peak)  | 42.9 psu |
| bm_50%, radius at the jet maximum height (radial distance from the centerline to where concentration is 50% of that at the centerline, C=50%Cc) | 2.3 m    |
| rm_25%, radius at the jet maximum height (radial distance from the centerline to where concentration is 25% of that at the centerline, C=25%Cc) | 3.3 m    |
| Rm_6%, radius at the jet maximum height (radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline, C=6%Cc)    | 4.7 m    |
| Xr, centerline horizontal location of the return point (where the jet axis reaches the port height level)                                       | 25.17 m  |
| Sr, centerline dilution at the return point   | 40.4     |
| Cr, centerline saline concentration at the return point   | 41.5 psu |
| br_50%, jet radius at the return point (radial distance from the centerline to where concentration is 50% of that at the centerline, C=50%Cc)   | 4.2 m    |
| rr_25%, jet radius at the return point (radial distance from the centerline to where concentration is 25% of that at the centerline, C=25%Cc)   | 5.9 m    |
| Rr_6%, jet radius at the return point (radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline, C=6%Cc)      | 8.3 m    |
| Xi, centerline horizontal location of the impact with bottom point  | 28.22 m  |

|   |          |
|---|----------|
| Si, centerline dilution at the impact point             | 35.8     |
| Ci, centerline saline concentration at the impact point | 41.6 psu |

## Spreading layer flow behavior (at the end of the near field region)

|  |          |
|--|----------|
| Xn, horizontal location of the spreading layer at the end of the near field region             | 68.63 m  |
| hn, thickness of the spreading layer at the end of the near field region                       | 3.83 m   |
| Sn, centerline dilution of the spreading layer at the end of the near field region             | 68.6     |
| Cn, centerline saline concentration of the spreading layer at the end of the near field region | 41.2 psu |
| Un, centerline velocity of the spreading layer at the end of the near field region             | 0.10 m/s |

## Variables evolution graphs



## Jet flow

---

| X     | Zc    | Lc    | Sc    | Cc    | rho_c   | theta  | R    | Uc   | Fc    |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|------|------|-------|
| 0.00  | 0.00  | 0.00  | 1.00  | 70.35 | 1048.66 | 60.00  | 0.15 | 6.40 | 25.42 |
| 0.41  | 0.71  | 0.82  | 1.02  | 69.85 | 1048.29 | 59.54  | 0.15 | 6.40 | 25.42 |
| 0.83  | 1.40  | 1.63  | 1.25  | 64.35 | 1044.17 | 58.89  | 0.35 | 6.40 | 24.86 |
| 1.24  | 2.08  | 2.43  | 1.57  | 59.66 | 1040.66 | 58.74  | 0.48 | 5.06 | 23.59 |
| 1.65  | 2.75  | 3.22  | 1.90  | 56.36 | 1038.19 | 58.26  | 0.61 | 4.18 | 22.61 |
| 2.06  | 3.41  | 3.99  | 2.22  | 54.09 | 1036.49 | 57.77  | 0.73 | 3.57 | 21.49 |
| 2.48  | 4.05  | 4.76  | 2.54  | 52.45 | 1035.27 | 57.25  | 0.86 | 3.11 | 20.26 |
| 2.89  | 4.69  | 5.52  | 2.88  | 51.06 | 1034.23 | 56.71  | 0.99 | 2.75 | 18.97 |
| 3.30  | 5.31  | 6.26  | 3.22  | 49.97 | 1033.41 | 56.15  | 1.12 | 2.47 | 17.91 |
| 3.71  | 5.91  | 7.00  | 3.56  | 49.09 | 1032.76 | 55.57  | 1.25 | 2.24 | 17.02 |
| 4.13  | 6.51  | 7.72  | 3.90  | 48.38 | 1032.22 | 54.93  | 1.43 | 2.05 | 16.27 |
| 4.54  | 7.08  | 8.43  | 4.24  | 47.77 | 1031.77 | 54.23  | 1.60 | 1.89 | 15.61 |
| 4.95  | 7.65  | 9.13  | 4.57  | 47.26 | 1031.38 | 53.43  | 1.77 | 1.75 | 15.03 |
| 5.36  | 8.19  | 9.81  | 4.91  | 46.81 | 1031.05 | 52.45  | 1.92 | 1.64 | 14.47 |
| 5.78  | 8.71  | 10.48 | 5.26  | 46.42 | 1030.75 | 51.30  | 2.06 | 1.53 | 13.94 |
| 6.19  | 9.21  | 11.13 | 5.61  | 46.07 | 1030.49 | 50.01  | 2.19 | 1.44 | 13.42 |
| 6.60  | 9.69  | 11.76 | 5.96  | 45.76 | 1030.26 | 48.64  | 2.32 | 1.33 | 12.90 |
| 7.01  | 10.14 | 12.37 | 6.31  | 45.48 | 1030.05 | 47.27  | 2.47 | 1.24 | 12.39 |
| 7.43  | 10.57 | 12.97 | 6.66  | 45.24 | 1029.87 | 45.96  | 2.64 | 1.15 | 11.88 |
| 7.84  | 10.99 | 13.55 | 7.01  | 45.02 | 1029.71 | 44.71  | 2.81 | 1.07 | 11.39 |
| 8.25  | 11.39 | 14.12 | 7.35  | 44.82 | 1029.56 | 43.52  | 2.98 | 1.01 | 10.92 |
| 8.67  | 11.77 | 14.69 | 7.68  | 44.65 | 1029.43 | 42.31  | 3.14 | 0.95 | 10.47 |
| 9.08  | 12.13 | 15.24 | 8.00  | 44.49 | 1029.31 | 40.99  | 3.28 | 0.90 | 10.05 |
| 9.49  | 12.48 | 15.78 | 8.32  | 44.35 | 1029.21 | 39.48  | 3.42 | 0.84 | 9.67  |
| 9.90  | 12.80 | 16.31 | 8.63  | 44.22 | 1029.11 | 37.74  | 3.55 | 0.79 | 9.32  |
| 10.32 | 13.11 | 16.82 | 8.94  | 44.11 | 1029.02 | 35.76  | 3.65 | 0.75 | 8.98  |
| 10.73 | 13.39 | 17.32 | 9.26  | 43.99 | 1028.94 | 33.58  | 3.71 | 0.71 | 8.67  |
| 11.14 | 13.65 | 17.80 | 9.59  | 43.88 | 1028.86 | 31.28  | 3.75 | 0.68 | 8.38  |
| 11.55 | 13.88 | 18.28 | 9.93  | 43.78 | 1028.78 | 28.95  | 3.77 | 0.65 | 8.13  |
| 11.97 | 14.10 | 18.74 | 10.28 | 43.67 | 1028.70 | 26.65  | 3.81 | 0.62 | 7.91  |
| 12.38 | 14.29 | 19.20 | 10.64 | 43.58 | 1028.63 | 24.41  | 3.87 | 0.59 | 7.71  |
| 12.79 | 14.47 | 19.65 | 11.00 | 43.49 | 1028.56 | 22.22  | 3.95 | 0.57 | 7.52  |
| 13.20 | 14.62 | 20.09 | 11.37 | 43.40 | 1028.50 | 20.05  | 4.03 | 0.55 | 7.34  |
| 13.62 | 14.76 | 20.52 | 11.74 | 43.32 | 1028.43 | 17.82  | 4.10 | 0.53 | 7.17  |
| 14.03 | 14.88 | 20.95 | 12.12 | 43.24 | 1028.37 | 15.44  | 4.17 | 0.51 | 7.01  |
| 14.44 | 14.98 | 21.38 | 12.52 | 43.16 | 1028.32 | 12.82  | 4.25 | 0.49 | 6.85  |
| 14.85 | 15.06 | 21.80 | 12.93 | 43.09 | 1028.26 | 9.91   | 4.35 | 0.47 | 6.70  |
| 15.27 | 15.12 | 22.22 | 13.35 | 43.01 | 1028.21 | 6.73   | 4.48 | 0.45 | 6.56  |
| 15.68 | 15.15 | 22.63 | 13.79 | 42.94 | 1028.15 | 3.31   | 4.60 | 0.43 | 6.44  |
| 16.09 | 15.16 | 23.04 | 14.25 | 42.87 | 1028.10 | -0.31  | 4.73 | 0.42 | 6.32  |
| 16.51 | 15.14 | 23.46 | 14.70 | 42.81 | 1028.05 | -4.14  | 4.84 | 0.41 | 6.22  |
| 16.92 | 15.09 | 23.87 | 15.13 | 42.75 | 1028.01 | -8.28  | 4.96 | 0.40 | 6.13  |
| 17.33 | 15.01 | 24.29 | 15.56 | 42.70 | 1027.97 | -12.88 | 5.07 | 0.39 | 6.03  |
| 17.74 | 14.88 | 24.72 | 15.97 | 42.65 | 1027.93 | -18.13 | 5.18 | 0.38 | 5.93  |
| 18.16 | 14.72 | 25.16 | 16.39 | 42.60 | 1027.90 | -24.00 | 5.30 | 0.37 | 5.84  |
| 18.57 | 14.49 | 25.62 | 16.85 | 42.55 | 1027.86 | -30.47 | 5.41 | 0.35 | 5.77  |
| 18.98 | 14.21 | 26.12 | 17.40 | 42.50 | 1027.82 | -37.31 | 5.52 | 0.34 | 5.72  |
| 19.39 | 13.84 | 26.66 | 18.09 | 42.43 | 1027.77 | -43.45 | 5.63 | 0.33 | 5.71  |
| 19.81 | 13.40 | 27.27 | 18.96 | 42.36 | 1027.72 | -48.57 | 5.76 | 0.32 | 5.75  |
| 20.22 | 12.87 | 27.95 | 20.06 | 42.27 | 1027.65 | -53.42 | 5.89 | 0.32 | 5.84  |
| 20.63 | 12.24 | 28.68 | 21.45 | 42.18 | 1027.58 | -58.37 | 6.03 | 0.32 | 5.99  |
| 21.04 | 11.48 | 29.47 | 23.17 | 42.08 | 1027.50 | -62.89 | 6.17 | 0.32 | 6.17  |
| 21.46 | 10.58 | 30.45 | 25.18 | 41.97 | 1027.43 | -66.71 | 6.32 | 0.32 | 6.39  |

| X     | Zc   | Lc    | Sc    | Cc    | rho_c   | theta  | R    | Uc   | Fc   |
|-------|------|-------|-------|-------|---------|--------|------|------|------|
| 21.87 | 9.51 | 31.62 | 27.42 | 41.88 | 1027.36 | -69.69 | 6.47 | 0.32 | 6.60 |
| 22.28 | 8.31 | 32.96 | 29.82 | 41.79 | 1027.29 | -71.67 | 6.65 | 0.32 | 6.78 |
| 22.69 | 7.01 | 34.40 | 32.23 | 41.72 | 1027.24 | -72.61 | 6.86 | 0.32 | 6.94 |
| 23.11 | 5.69 | 35.87 | 34.56 | 41.65 | 1027.19 | -72.60 | 7.08 | 0.31 | 7.07 |
| 23.52 | 4.41 | 37.27 | 36.60 | 41.61 | 1027.15 | -71.72 | 7.27 | 0.30 | 7.21 |
| 23.93 | 3.24 | 38.56 | 38.28 | 41.57 | 1027.13 | -69.93 | 7.50 | 0.29 | 7.36 |
| 24.35 | 2.21 | 39.68 | 39.49 | 41.55 | 1027.11 | -67.16 | 7.75 | 0.29 | 7.50 |
| 24.76 | 1.37 | 40.63 | 40.21 | 41.53 | 1027.10 | -61.41 | 8.03 | 0.30 | 7.65 |
| 25.17 | 0.76 | 41.44 | 40.41 | 41.53 | 1027.10 | -52.05 | 8.41 | 0.31 | 7.80 |

## Spreading layer

| X     | h    | Sc    | Cc    | rho_c   | Uc   | Fc   |
|-------|------|-------|-------|---------|------|------|
| 30.53 | 5.32 | 36.65 | 41.61 | 1027.15 | 0.28 | 6.74 |
| 31.91 | 4.47 | 37.81 | 41.58 | 1027.13 | 0.26 | 6.53 |
| 33.29 | 4.08 | 38.96 | 41.56 | 1027.12 | 0.24 | 6.41 |
| 34.66 | 3.87 | 40.11 | 41.54 | 1027.10 | 0.22 | 6.32 |
| 36.04 | 3.70 | 41.27 | 41.52 | 1027.09 | 0.24 | 6.29 |
| 37.41 | 3.51 | 42.42 | 41.50 | 1027.07 | 0.25 | 6.33 |
| 38.79 | 3.32 | 43.57 | 41.48 | 1027.06 | 0.26 | 6.40 |
| 40.16 | 3.20 | 44.72 | 41.46 | 1027.04 | 0.25 | 6.49 |
| 41.54 | 3.14 | 45.88 | 41.44 | 1027.03 | 0.25 | 6.48 |
| 42.91 | 3.12 | 47.03 | 41.43 | 1027.02 | 0.24 | 6.37 |
| 44.29 | 3.11 | 48.18 | 41.41 | 1027.01 | 0.23 | 6.18 |
| 45.66 | 3.07 | 49.33 | 41.40 | 1027.00 | 0.22 | 6.01 |
| 47.04 | 3.02 | 50.49 | 41.39 | 1026.99 | 0.20 | 5.80 |
| 48.42 | 2.99 | 51.64 | 41.37 | 1026.98 | 0.19 | 5.57 |
| 49.79 | 3.02 | 52.79 | 41.36 | 1026.97 | 0.18 | 5.34 |
| 51.17 | 3.13 | 53.95 | 41.35 | 1026.96 | 0.18 | 5.11 |
| 52.54 | 3.31 | 55.10 | 41.34 | 1026.95 | 0.17 | 4.88 |
| 53.92 | 3.53 | 56.25 | 41.33 | 1026.94 | 0.16 | 4.66 |
| 55.29 | 3.71 | 57.40 | 41.31 | 1026.94 | 0.15 | 4.45 |
| 56.67 | 3.80 | 58.56 | 41.30 | 1026.93 | 0.14 | 4.26 |
| 58.04 | 3.84 | 59.71 | 41.29 | 1026.92 | 0.13 | 4.09 |
| 59.42 | 3.84 | 60.86 | 41.29 | 1026.91 | 0.13 | 3.93 |
| 60.79 | 3.82 | 62.01 | 41.28 | 1026.91 | 0.12 | 3.78 |
| 62.17 | 3.82 | 63.17 | 41.27 | 1026.90 | 0.12 | 3.66 |
| 63.55 | 3.82 | 64.32 | 41.26 | 1026.89 | 0.11 | 3.56 |
| 64.92 | 3.82 | 65.47 | 41.25 | 1026.89 | 0.11 | 3.44 |
| 66.30 | 3.83 | 66.62 | 41.24 | 1026.88 | 0.10 | 3.33 |
| 67.67 | 3.83 | 67.78 | 41.24 | 1026.88 | 0.10 | 3.29 |

## Model authors:

BrlHne-Jet-Spreading model has been developed by the Environmental Hydraulics Institute (IH Cantabria).

For questions or more information, please contact to [brlhnesupport@ihcantabria.com](mailto:brlhnesupport@ihcantabria.com)

## Modeling approach and calibration:

The model simulates the near field region (including the jet path and the spreading layer) of a submerged and inclined brine jet discharges. Dimensional analysis formulas proposed by Pincince et al. (1973) and Roberts et al. (1987) are applied to predict the variables value along the jet path. For variables of the spreading layer, dimensional analysis formulae proposed by Roberts et al. (1997) are applied. These formulas have been calibrated in brlHne-Jet-Spreading with experimental database obtained by non-intrusive optical techniques tests carried out in the Environmental Hydraulics Institute. PIV (Particle Image Velocimetry) and PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)

techniques have been applied to characterize the velocity and concentration flow-fields with a high quality and resolution. The characterization includes the jet path (Palomar et al, 2015b) and the spreading layer (Palomar et al, 2015c). Thanks to the experimental data obtained, the near field region flow behavior has been studied in depth (Palomar, 2014) and the model brIHne-Jet-Spreading has been calibrated.

A more detail description of the model can be found in the technical specifications file and in (Palomar et al, 2015a).

#### Cross-section assumption:

The model considers the asymmetry and non-gaussian cross-section found for this type of inclined negatively buoyant jets, according to the experimental studies carries out by Kikkert et al. (2007), Shao et al. (2010) and Palomar et al. (2015b). This asymmetry is due to the inner edge extra-spreading of the jet lower edge caused by buoyancy instabilities.

#### Variables glossary:

Cartesian coordinates are considered.

The origin of the coordinate system is set up at the jet nozzle.

#### Jet flow variables:

X: Horizontal coordinate location from the nozzle.

Zc: Vertical coordinate of the concentration centerline.

Lc: Centerline length from the nozzle.

Sc: Centerline dilution.

Cc: Centerline saline concentration.

Rhoc: Centerline density.

Theta: Vertical angle of the centerline relative to the bottom.

R: Jet radius (considered here as the radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline).

Uc: Centerline velocity.

Fc: Centerline densimetric Froude Number.

#### Spreading layer flow variables:

X: Horizontal coordinate location from the nozzle.

h: Spreading layer thickness (corresponding to the vertical distance from the bottom to where concentration is 25% of that at the centerline)

Sc: Centerline dilution.

Cc: Centerline saline concentration.

rhoc: Centerline density.

Uc: Centerline velocity.

Feje: Densimetric Froude Number.

#### Maximum rise height of the jet trajectory (Zt)

The maximum rise height or upper edge of the jet (Zt) is calculated by the model by adding to the maximum centerline height (Zm), the jet radius, "R", which stands for the radial distance radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline (considering a Gaussian profile at the jet upper edge).

### Impact of the jet with the sea surface:

To predict if the jet impacts the sea surface, brIHne-Jet-Spreading compares the maximum height reached by the jet with the sea water depth at the discharge point (HA). However, the maximum rise height ( $Z_t$ ) is given by the model relative to the jet nozzle (coordinate system origin). Therefore, to calculate if the jet reaches the sea surface, the port height ( $h_0$ ) has to be added to the maximum rise height ( $Z_t$ ).

The model considers that the jet impacts the sea surface if:  $Z_t + h_0 > HA$ . In that case, an error message is given by the model, because a confined environment cannot be simulated by brIHne-Jet-Spreading.

### Return and impact point:

The return point is the location where the jet centerline reached the port (nozzle) height, whereas the impact point is the location where the jet centerline impacts the bottom

### References:

Kikkert, G. A., Davidson, M. J., Nokes, R. I. (2007). "Inclined negatively buoyant discharges". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 133, pp. 545 – 554.

Palomar, P; Lara, J. L., Losada, I. J., Portillo, E. (2015a). "BrIHne-Jet-Spreading: A new calibrated model to simulate the near field region of brine jet discharges". Environmental modeling and software (under revision)

Palomar, P; Lara, J. L., Losada, I. J., Tarrade, L. (2015b). "Brine jet study using PIV-PLIF laser anemometry". Journal of Hydro-Environment Research (under revision)

Palomar, P., Losada, I. J., Lara, J. L. (2015c). "PIV-PLIF experimental study of the spreading layer arisen from brine jet discharges". Experiments in fluids (under revision).

Pincince, A. B., List, E. J. (1973). "Disposal of brine into an estuary". Journal of the Water Pollution Control Federation, vol. 45, pp. 2335 - 2444.

Roberts, P. J. W., Toms, G. (1987). "Inclined dense jets in a flowing current". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 113, nº 3, pp. 323 - 341.

Roberts, P. J. W., Ferrier, A., Daviero, G. (1997). "Mixing in inclined dense jets". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, No 8, pp. 693 - 699.

Shao, D., Law, A. W. K. (2010, a). "Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets". Environmental Fluid Mechanics, vol. 10, nº 5, pp. 521 - 553.

## Result Report brIHne\_JET\_SPREADING Version (1.0) - Project 'AQADI\_Near dilution study'

### Case 2

#### Input data

|                                |  |         |
|--------------------------------|--|---------|
| Ambient Conditions             | Average depth at discharge point [Ha (m)]        | 25      |
|                                | Salinity [Ca (psu)]                              | 40.8    |
|                                | Density [rho_a (Kg/m3)]                          | 1026.55 |
| Brine effluent characteristics | Saline concentration [Co (psu)]                  | 74.18   |
|                                | Density [rho_o (Kg/m3)]                          | 1051.68 |
|                                | Jet discharge velocity [Uo (m/s)]                | 5.65    |
| Brine discharge configuration  | Port diameter [do (m)]                           | 0.3     |
|                                | Discharge angle [thettag_o (sexaseg)]            | 60      |
|                                | Altura de la boquilla respecto al fondo [ho (m)] | 1       |

#### Initial fluxes and length scales

|   |                |
|---|----------------|
| Qo, brine flow rate (discharge volume flux) | 0.40 m3/s      |
| Mo, discharge momentum flux                 | 2.26 m4/s2     |
| Jo, discharge buoyancy flux                 | 0.10 m4/s3     |
| Qco, discharge flux of contaminant mass     | 13.33 psu*m3/s |
| LQ, Flux - Momentum length scale            | 0.27 m         |
| LM, Momentum - Buoyancy length scale        | 5.95 m         |
| Densimetric Froude Number, Fo               | 21.1           |

#### Jet flow behavior

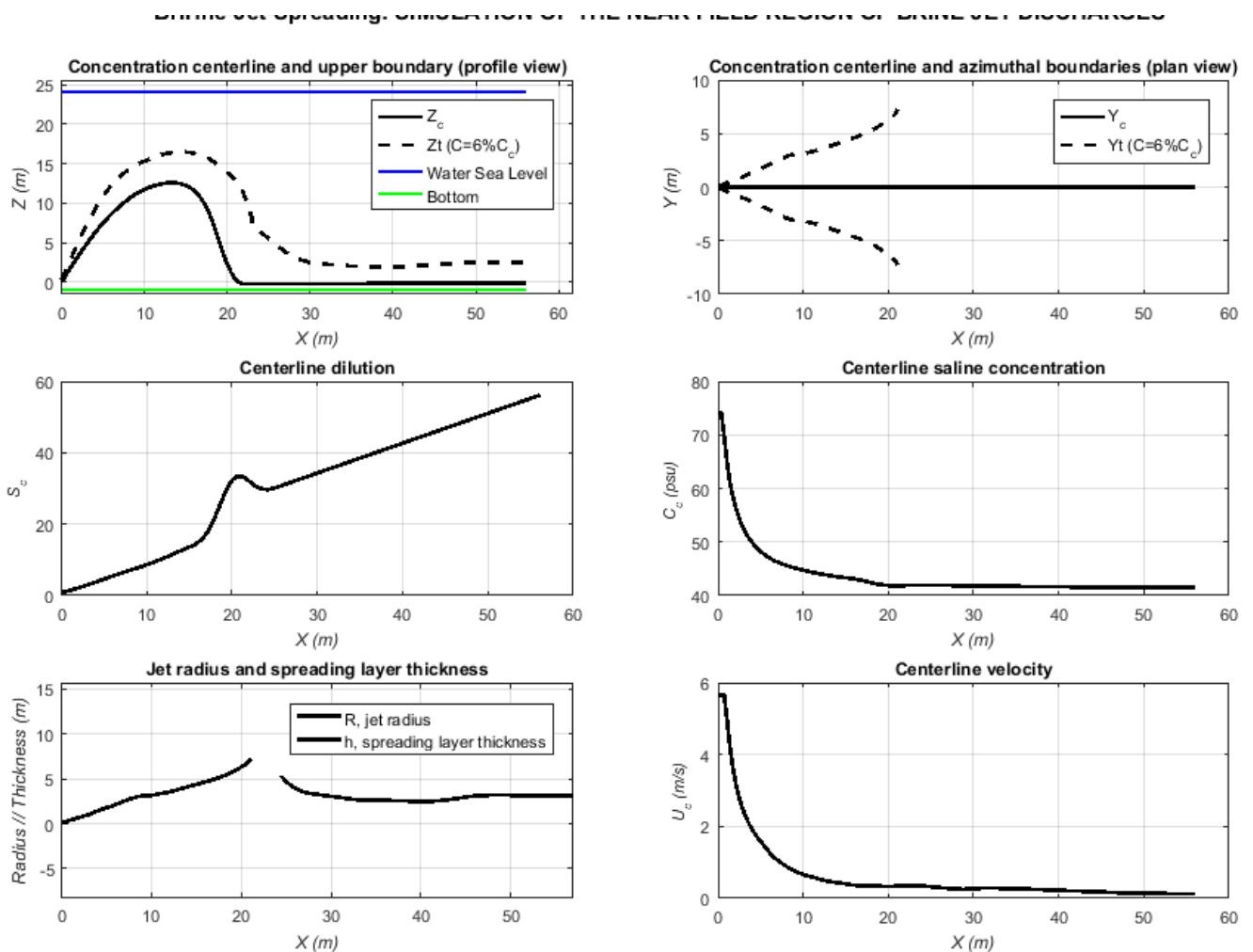
|   |          |
|---|----------|
| Zm, centerline peak of the jet trajectory (relative to the port nozzle)   | 12.57 m  |
| Xm, horizontal location of the centerline peak point  | 13.23 m  |
| Zt, maximum rise height relative to the port nozzle   | 16.51 m  |
| Zt_bottom, maximum rise height relative to the bottom   | 17.51 m  |
| Sr, centerline dilution at the jet maximum height (peak)  | 11.7     |
| Cm, centerline saline concentration at the jet maximum height (peak)  | 43.7 psu |
| bm_50%, radius at the jet maximum height (radial distance from the centerline to where concentration is 50% of that at the centerline, C=50%Cc) | 1.9 m    |
| rm_25%, radius at the jet maximum height (radial distance from the centerline to where concentration is 25% of that at the centerline, C=25%Cc) | 2.7 m    |
| Rm_6%, radius at the jet maximum height (radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline, C=6%Cc)    | 3.9 m    |
| Xr, centerline horizontal location of the return point (where the jet axis reaches the port height level)                                       | 20.87 m  |
| Sr, centerline dilution at the return point   | 33.5     |
| Cr, centerline saline concentration at the return point   | 41.8 psu |
| br_50%, jet radius at the return point (radial distance from the centerline to where concentration is 50% of that at the centerline, C=50%Cc)   | 3.4 m    |
| rr_25%, jet radius at the return point (radial distance from the centerline to where concentration is 25% of that at the centerline, C=25%Cc)   | 4.9 m    |
| Rr_6%, jet radius at the return point (radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline, C=6%Cc)      | 6.9 m    |
| Xi, centerline horizontal location of the impact with bottom point  | 23.40 m  |

|   |          |
|---|----------|
| Si, centerline dilution at the impact point             | 29.7     |
| Ci, centerline saline concentration at the impact point | 41.9 psu |

## Spreading layer flow behavior (at the end of the near field region)

|  |          |
|--|----------|
| Xn, horizontal location of the spreading layer at the end of the near field region             | 56.93 m  |
| hn, thickness of the spreading layer at the end of the near field region                       | 3.18 m   |
| Sn, centerline dilution of the spreading layer at the end of the near field region             | 56.9     |
| Cn, centerline saline concentration of the spreading layer at the end of the near field region | 41.4 psu |
| Un, centerline velocity of the spreading layer at the end of the near field region             | 0.10 m/s |

## Variables evolution graphs



## Jet flow

---

| X     | Zc    | Lc    | Sc    | Cc    | rho_c   | theta  | R    | Uc   | Fc    |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|------|------|-------|
| 0.00  | 0.00  | 0.00  | 1.00  | 74.18 | 1051.60 | 60.00  | 0.15 | 5.65 | 21.08 |
| 0.34  | 0.59  | 0.68  | 1.00  | 74.18 | 1051.60 | 59.54  | 0.15 | 5.65 | 21.08 |
| 0.68  | 1.16  | 1.35  | 1.15  | 69.75 | 1048.27 | 58.89  | 0.31 | 5.65 | 20.87 |
| 1.03  | 1.72  | 2.02  | 1.39  | 64.83 | 1044.58 | 58.74  | 0.42 | 4.95 | 20.04 |
| 1.37  | 2.28  | 2.67  | 1.65  | 61.05 | 1041.75 | 58.26  | 0.52 | 4.18 | 19.38 |
| 1.71  | 2.83  | 3.31  | 1.90  | 58.35 | 1039.72 | 57.77  | 0.63 | 3.61 | 18.62 |
| 2.05  | 3.36  | 3.95  | 2.14  | 56.37 | 1038.23 | 57.25  | 0.73 | 3.18 | 17.75 |
| 2.40  | 3.89  | 4.58  | 2.41  | 54.63 | 1036.93 | 56.71  | 0.83 | 2.84 | 16.81 |
| 2.74  | 4.40  | 5.20  | 2.69  | 53.20 | 1035.85 | 56.15  | 0.94 | 2.57 | 15.94 |
| 3.08  | 4.90  | 5.80  | 2.97  | 52.05 | 1034.99 | 55.57  | 1.04 | 2.34 | 15.21 |
| 3.42  | 5.40  | 6.40  | 3.24  | 51.09 | 1034.27 | 54.93  | 1.18 | 2.15 | 14.60 |
| 3.76  | 5.87  | 6.99  | 3.52  | 50.29 | 1033.67 | 54.23  | 1.32 | 1.99 | 14.06 |
| 4.11  | 6.34  | 7.57  | 3.80  | 49.59 | 1033.15 | 53.43  | 1.46 | 1.85 | 13.57 |
| 4.45  | 6.79  | 8.14  | 4.08  | 48.99 | 1032.70 | 52.45  | 1.60 | 1.73 | 13.10 |
| 4.79  | 7.22  | 8.69  | 4.36  | 48.45 | 1032.29 | 51.30  | 1.71 | 1.63 | 12.65 |
| 5.13  | 7.64  | 9.23  | 4.65  | 47.98 | 1031.94 | 50.01  | 1.82 | 1.53 | 12.19 |
| 5.48  | 8.03  | 9.75  | 4.94  | 47.55 | 1031.62 | 48.64  | 1.93 | 1.42 | 11.74 |
| 5.82  | 8.41  | 10.26 | 5.23  | 47.18 | 1031.34 | 47.27  | 2.05 | 1.32 | 11.28 |
| 6.16  | 8.77  | 10.76 | 5.53  | 46.84 | 1031.08 | 45.96  | 2.19 | 1.23 | 10.82 |
| 6.50  | 9.11  | 11.24 | 5.81  | 46.54 | 1030.86 | 44.71  | 2.33 | 1.14 | 10.37 |
| 6.84  | 9.44  | 11.71 | 6.09  | 46.28 | 1030.66 | 43.52  | 2.47 | 1.07 | 9.94  |
| 7.19  | 9.76  | 12.18 | 6.37  | 46.04 | 1030.48 | 42.31  | 2.60 | 1.01 | 9.53  |
| 7.53  | 10.06 | 12.64 | 6.64  | 45.83 | 1030.33 | 40.99  | 2.72 | 0.95 | 9.16  |
| 7.87  | 10.35 | 13.09 | 6.90  | 45.64 | 1030.18 | 39.48  | 2.84 | 0.90 | 8.81  |
| 8.21  | 10.62 | 13.52 | 7.16  | 45.46 | 1030.05 | 37.74  | 2.94 | 0.84 | 8.48  |
| 8.56  | 10.87 | 13.95 | 7.41  | 45.30 | 1029.93 | 35.76  | 3.03 | 0.80 | 8.18  |
| 8.90  | 11.11 | 14.36 | 7.68  | 45.15 | 1029.81 | 33.58  | 3.08 | 0.76 | 7.90  |
| 9.24  | 11.32 | 14.77 | 7.95  | 45.00 | 1029.70 | 31.28  | 3.11 | 0.72 | 7.64  |
| 9.58  | 11.52 | 15.16 | 8.23  | 44.85 | 1029.59 | 28.95  | 3.13 | 0.69 | 7.41  |
| 9.92  | 11.69 | 15.55 | 8.52  | 44.72 | 1029.49 | 26.65  | 3.16 | 0.66 | 7.20  |
| 10.27 | 11.85 | 15.92 | 8.82  | 44.58 | 1029.39 | 24.41  | 3.21 | 0.63 | 7.02  |
| 10.61 | 12.00 | 16.29 | 9.12  | 44.46 | 1029.30 | 22.22  | 3.28 | 0.60 | 6.85  |
| 10.95 | 12.13 | 16.66 | 9.43  | 44.34 | 1029.21 | 20.05  | 3.34 | 0.58 | 6.68  |
| 11.29 | 12.24 | 17.02 | 9.73  | 44.23 | 1029.12 | 17.82  | 3.40 | 0.56 | 6.53  |
| 11.64 | 12.34 | 17.38 | 10.05 | 44.12 | 1029.04 | 15.44  | 3.46 | 0.54 | 6.38  |
| 11.98 | 12.43 | 17.73 | 10.38 | 44.02 | 1028.96 | 12.82  | 3.52 | 0.52 | 6.24  |
| 12.32 | 12.49 | 18.08 | 10.72 | 43.91 | 1028.89 | 9.91   | 3.61 | 0.50 | 6.11  |
| 12.66 | 12.54 | 18.43 | 11.07 | 43.81 | 1028.81 | 6.73   | 3.71 | 0.48 | 5.98  |
| 13.00 | 12.57 | 18.77 | 11.44 | 43.72 | 1028.74 | 3.31   | 3.82 | 0.46 | 5.86  |
| 13.35 | 12.57 | 19.11 | 11.82 | 43.62 | 1028.67 | -0.31  | 3.92 | 0.45 | 5.76  |
| 13.69 | 12.55 | 19.45 | 12.19 | 43.54 | 1028.61 | -4.14  | 4.02 | 0.43 | 5.67  |
| 14.03 | 12.51 | 19.80 | 12.55 | 43.46 | 1028.55 | -8.28  | 4.11 | 0.42 | 5.59  |
| 14.37 | 12.45 | 20.15 | 12.90 | 43.39 | 1028.49 | -12.88 | 4.20 | 0.41 | 5.49  |
| 14.72 | 12.34 | 20.50 | 13.25 | 43.32 | 1028.44 | -18.13 | 4.30 | 0.40 | 5.40  |
| 15.06 | 12.21 | 20.87 | 13.59 | 43.26 | 1028.39 | -24.00 | 4.39 | 0.39 | 5.32  |
| 15.40 | 12.02 | 21.25 | 13.97 | 43.19 | 1028.34 | -30.47 | 4.49 | 0.37 | 5.25  |
| 15.74 | 11.78 | 21.66 | 14.43 | 43.11 | 1028.29 | -37.31 | 4.58 | 0.36 | 5.21  |
| 16.09 | 11.48 | 22.12 | 15.00 | 43.02 | 1028.22 | -43.45 | 4.67 | 0.35 | 5.20  |
| 16.43 | 11.11 | 22.62 | 15.73 | 42.92 | 1028.14 | -48.57 | 4.77 | 0.35 | 5.23  |
| 16.77 | 10.68 | 23.18 | 16.64 | 42.81 | 1028.06 | -53.42 | 4.88 | 0.34 | 5.32  |
| 17.11 | 10.15 | 23.78 | 17.79 | 42.68 | 1027.96 | -58.37 | 5.00 | 0.34 | 5.45  |
| 17.45 | 9.52  | 24.45 | 19.21 | 42.54 | 1027.85 | -62.89 | 5.12 | 0.34 | 5.62  |
| 17.80 | 8.77  | 25.25 | 20.88 | 42.40 | 1027.75 | -66.71 | 5.24 | 0.34 | 5.82  |

| X     | Zc   | Lc    | Sc    | Cc    | rho_c   | theta  | R    | Uc   | Fc   |
|-------|------|-------|-------|-------|---------|--------|------|------|------|
| 18.14 | 7.89 | 26.23 | 22.74 | 42.27 | 1027.65 | -69.69 | 5.37 | 0.34 | 6.01 |
| 18.48 | 6.89 | 27.34 | 24.73 | 42.15 | 1027.56 | -71.67 | 5.52 | 0.34 | 6.18 |
| 18.82 | 5.81 | 28.53 | 26.73 | 42.05 | 1027.49 | -72.61 | 5.69 | 0.34 | 6.32 |
| 19.17 | 4.72 | 29.75 | 28.66 | 41.96 | 1027.42 | -72.60 | 5.87 | 0.33 | 6.44 |
| 19.51 | 3.66 | 30.91 | 30.36 | 41.90 | 1027.38 | -71.72 | 6.03 | 0.32 | 6.57 |
| 19.85 | 2.69 | 31.98 | 31.75 | 41.85 | 1027.34 | -69.93 | 6.22 | 0.31 | 6.70 |
| 20.19 | 1.83 | 32.91 | 32.76 | 41.82 | 1027.31 | -67.16 | 6.43 | 0.31 | 6.83 |
| 20.53 | 1.11 | 33.70 | 33.35 | 41.80 | 1027.30 | -63.35 | 6.66 | 0.32 | 6.97 |
| 20.88 | 0.55 | 34.37 | 33.51 | 41.80 | 1027.30 | -55.08 | 6.97 | 0.33 | 7.10 |

## Spreading layer

| X     | h    | Sc    | Cc    | rho_c   | Uc   | Fc   |
|-------|------|-------|-------|---------|------|------|
| 25.33 | 4.41 | 30.40 | 41.90 | 1027.37 | 0.30 | 6.13 |
| 26.47 | 3.71 | 31.36 | 41.86 | 1027.35 | 0.28 | 5.94 |
| 27.61 | 3.38 | 32.31 | 41.83 | 1027.33 | 0.26 | 5.83 |
| 28.75 | 3.21 | 33.27 | 41.80 | 1027.30 | 0.24 | 5.75 |
| 29.89 | 3.07 | 34.23 | 41.78 | 1027.28 | 0.25 | 5.73 |
| 31.03 | 2.91 | 35.18 | 41.75 | 1027.26 | 0.27 | 5.77 |
| 32.17 | 2.76 | 36.14 | 41.72 | 1027.24 | 0.28 | 5.82 |
| 33.31 | 2.65 | 37.09 | 41.70 | 1027.23 | 0.26 | 5.91 |
| 34.45 | 2.60 | 38.05 | 41.68 | 1027.21 | 0.26 | 5.90 |
| 35.59 | 2.59 | 39.01 | 41.66 | 1027.19 | 0.25 | 5.80 |
| 36.73 | 2.58 | 39.96 | 41.64 | 1027.18 | 0.24 | 5.63 |
| 37.87 | 2.55 | 40.92 | 41.62 | 1027.16 | 0.23 | 5.47 |
| 39.01 | 2.51 | 41.87 | 41.60 | 1027.15 | 0.22 | 5.28 |
| 40.16 | 2.48 | 42.83 | 41.58 | 1027.13 | 0.21 | 5.07 |
| 41.30 | 2.51 | 43.79 | 41.56 | 1027.12 | 0.20 | 4.87 |
| 42.44 | 2.60 | 44.74 | 41.55 | 1027.11 | 0.19 | 4.66 |
| 43.58 | 2.75 | 45.70 | 41.53 | 1027.10 | 0.18 | 4.44 |
| 44.72 | 2.93 | 46.65 | 41.52 | 1027.09 | 0.17 | 4.24 |
| 45.86 | 3.08 | 47.61 | 41.50 | 1027.08 | 0.16 | 4.06 |
| 47.00 | 3.15 | 48.57 | 41.49 | 1027.07 | 0.14 | 3.88 |
| 48.14 | 3.19 | 49.52 | 41.47 | 1027.06 | 0.14 | 3.72 |
| 49.28 | 3.18 | 50.48 | 41.46 | 1027.05 | 0.13 | 3.58 |
| 50.42 | 3.17 | 51.43 | 41.45 | 1027.04 | 0.13 | 3.44 |
| 51.56 | 3.17 | 52.39 | 41.44 | 1027.03 | 0.12 | 3.33 |
| 52.70 | 3.17 | 53.35 | 41.43 | 1027.02 | 0.12 | 3.24 |
| 53.84 | 3.17 | 54.30 | 41.41 | 1027.01 | 0.11 | 3.13 |
| 54.99 | 3.17 | 55.26 | 41.40 | 1027.00 | 0.11 | 3.04 |
| 56.13 | 3.18 | 56.22 | 41.39 | 1027.00 | 0.11 | 2.99 |

## Model authors:

BrlHne-Jet-Spreading model has been developed by the Environmental Hydraulics Institute (IH Cantabria).

For questions or more information, please contact to [brIHnesupport@ihcantabria.com](mailto:brIHnesupport@ihcantabria.com)

## Modeling approach and calibration:

The model simulates the near field region (including the jet path and the spreading layer) of a submerged and inclined brine jet discharges. Dimensional analysis formulas proposed by Pincince et al. (1973) and Roberts et al. (1987) are applied to predict the variables value along the jet path. For variables of the spreading layer, dimensional analysis formulae proposed by Roberts et al. (1997) are applied. These formulas have been calibrated in brlHne-Jet-Spreading with experimental database obtained by non-intrusive optical techniques tests carried out in the Environmental Hydraulics Institute. PIV (Particle Image Velocimetry) and PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)

techniques have been applied to characterize the velocity and concentration flow-fields with a high quality and resolution. The characterization includes the jet path (Palomar et al, 2015b) and the spreading layer (Palomar et al, 2015c). Thanks to the experimental data obtained, the near field region flow behavior has been studied in depth (Palomar, 2014) and the model brIHne-Jet-Spreading has been calibrated.

A more detail description of the model can be found in the technical specifications file and in (Palomar et al, 2015a).

#### Cross-section assumption:

The model considers the asymmetry and non-gaussian cross-section found for this type of inclined negatively buoyant jets, according to the experimental studies carries out by Kikkert et al. (2007), Shao et al. (2010) and Palomar et al. (2015b). This asymmetry is due to the inner edge extra-spreading of the jet lower edge caused by buoyancy instabilities.

#### Variables glossary:

Cartesian coordinates are considered.

The origin of the coordinate system is set up at the jet nozzle.

#### Jet flow variables:

X: Horizontal coordinate location from the nozzle.

Zc: Vertical coordinate of the concentration centerline.

Lc: Centerline length from the nozzle.

Sc: Centerline dilution.

Cc: Centerline saline concentration.

Rhoc: Centerline density.

Theta: Vertical angle of the centerline relative to the bottom.

R: Jet radius (considered here as the radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline).

Uc: Centerline velocity.

Fc: Centerline densimetric Froude Number.

#### Spreading layer flow variables:

X: Horizontal coordinate location from the nozzle.

h: Spreading layer thickness (corresponding to the vertical distance from the bottom to where concentration is 25% of that at the centerline)

Sc: Centerline dilution.

Cc: Centerline saline concentration.

rhoc: Centerline density.

Uc: Centerline velocity.

Feje: Densimetric Froude Number.

#### Maximum rise height of the jet trajectory (Zt)

The maximum rise height or upper edge of the jet (Zt) is calculated by the model by adding to the maximum centerline height (Zm), the jet radius, "R", which stands for the radial distance radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline (considering a Gaussian profile at the jet upper edge).

### Impact of the jet with the sea surface:

To predict if the jet impacts the sea surface, brIHne-Jet-Spreading compares the maximum height reached by the jet with the sea water depth at the discharge point (HA). However, the maximum rise height ( $Z_t$ ) is given by the model relative to the jet nozzle (coordinate system origin). Therefore, to calculate if the jet reaches the sea surface, the port height ( $h_0$ ) has to be added to the maximum rise height ( $Z_t$ ).

The model considers that the jet impacts the sea surface if:  $Z_t + h_0 > HA$ . In that case, an error message is given by the model, because a confined environment cannot be simulated by brIHne-Jet-Spreading.

### Return and impact point:

The return point is the location where the jet centerline reached the port (nozzle) height, whereas the impact point is the location where the jet centerline impacts the bottom

### References:

Kikkert, G. A., Davidson, M. J., Nokes, R. I. (2007). "Inclined negatively buoyant discharges". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 133, pp. 545 – 554.

Palomar, P; Lara, J. L., Losada, I. J., Portillo, E. (2015a). "BrIHne-Jet-Spreading: A new calibrated model to simulate the near field region of brine jet discharges". Environmental modeling and software (under revision)

Palomar, P; Lara, J. L., Losada, I. J., Tarrade, L. (2015b). "Brine jet study using PIV-PLIF laser anemometry". Journal of Hydro-Environment Research (under revision)

Palomar, P., Losada, I. J., Lara, J. L. (2015c). "PIV-PLIF experimental study of the spreading layer arisen from brine jet discharges". Experiments in fluids (under revision).

Pincince, A. B., List, E. J. (1973). "Disposal of brine into an estuary". Journal of the Water Pollution Control Federation, vol. 45, pp. 2335 - 2444.

Roberts, P. J. W., Toms, G. (1987). "Inclined dense jets in a flowing current". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 113, nº 3, pp. 323 - 341.

Roberts, P. J. W., Ferrier, A., Daviero, G. (1997). "Mixing in inclined dense jets". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, No 8, pp. 693 - 699.

Shao, D., Law, A. W. K. (2010, a). "Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets". Environmental Fluid Mechanics, vol. 10, nº 5, pp. 521 - 553.



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

---

REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

---

## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

---

### Document history:

| Rev. | DATE       | Notes         |
|------|------------|---------------|
| 0    | 16/09/2021 | First edition |

---

REPORTS



## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

**ÍNDICE**

|           |                                      |          |
|-----------|--------------------------------------|----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUCTION .....</b>            | <b>1</b> |
| <b>2.</b> | <b>SCOPE OF WORK.....</b>            | <b>2</b> |
| <b>3.</b> | <b>MODEL DESCRIPTION .....</b>       | <b>3</b> |
| <b>4.</b> | <b>INPUT DATA.....</b>               | <b>6</b> |
| 4.1.      | AMBIENT CONDITIONS .....             | 6        |
| 4.2.      | BRINE EFFLUENT CHARACTERISTICS.....  | 6        |
| 4.3.      | DIFFUSER SET-UP .....                | 7        |
| 4.4.      | CASE -1 OVERALL RECOVERY 42% .....   | 7        |
| 4.5.      | CASE -2 OVERALL RECOVERY 45% .....   | 7        |
| 4.6.      | ENVIRONMENTAL REGULATIONS .....      | 8        |
| <b>5.</b> | <b>CALCULATION AND RESULTS .....</b> | <b>9</b> |
| 5.1.      | CASE – 1 OVERAL RECOVERY 45%.....    | 9        |
| 5.2.      | CASE – 2 OVERAL RECOVERY 42%.....    | 11       |

**ADDENDUM 1: BRIHNE MODEL RESULTS. CASE -1****ADDENDUM 2: BRIHNE MODEL RESULTS. CASE -2**



## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

## 1. INTRODUCTION

This document was written to study the dispersion in near field of brine discharged by the Aqaba SWRO Desalination Plant, with a 300 M m<sup>3</sup>/year capacity for two conversion rates: 42% & 45%.

In the near field (initial mixing area) where the highest hypersaline discharge dilution is achieved mainly due to the turbulent phenomena associated with the quantity of movement transferred with the discharge. In this region, the initial dilution process mainly depends on the **discharge parameters** (diffuser type, number of outlet ports, diameter of the outlet ports, etc.) meaning this is the process where the designer can work to improve the discharge dilution.

Once the possible scenarios have been analysed and the design criteria established, the brine discharge for different alternatives will be modelled by **Brine-Jet-Spreading model**.

---

REPORTS



## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

## 2. SCOPE OF WORK

The aim of this study is to design the diffuser to **fulfil with environmental regulations.**

Two scenarios are modelled considering:

- Case 1 - Desalination plant overall recovery 42%
- Case 2 - Desalination plant overall recovery 45%

---

REPORTS



### 3. MODEL DESCRIPTION

A widely contrasted model for near field study shall be used: **brlHne**.

“BrlHne” tools are a set of numerical models developed by the Environmental Hydraulics Institute of Cantabria (IH Cantabria) to simulate the behaviour of brine discharges from the desalination plants. These tools have arisen as an extension of the research carried out in the MEDVSA project ([www.medvsas.es](http://www.medvsas.es)), in which a methodology to design brine discharges was developed for the Ministry of the Environment and Rural and Marine Affairs of Spain. Within the scope of the project, a critical assessment and validation of the most used commercial models to simulate brine discharges (Cormix, Visual Plumes and Visjet) was carried out, Palomar et al. (2012, a, b). Conclusions revealed significant shortcomings and a poor agreement with experimental data when simulating this type of disposals.

To overcome the commercial model’s shortcomings and with the aim of having more feasible models that can be constantly improved and updated, the Environmental Hydraulics Institute has developed the “brlHne” tools.

These tools are based on dimensional analysis and integration of differential equations with mathematical approaches scientifically supported. They have been designed with an optimized interface, very intuitive and easy to use. BrlHne models have an instantaneous execution and once run, a “pdf” report is provided, including the flow main variables evolution to characterize the discharge behaviour. Plots are also an output of the models to better understand the results.

An important advantage of “brlHne” discharges is the re-calibration with experimental data obtained by tests carried out in IH Cantabria by the use of non-



## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

intrusive optical laser techniques PIV (Particle Image Velocimetry) and PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). These techniques allow obtaining synchronized velocity and concentration values within the flow with a high quality and a large spatial and time resolution. For this reason, the re-calibrated "brIHne" tools present a good agreement with experimental data and therefore they are feasible models to simulate actual desalination plant discharges.

In the end, the **brIHne-Jet-Spreading** model will be used since it simulates the behaviour of the flow in the complete near field region including not only the jet path but also the spreading layer, which makes it possible to establish the initial conditions (speed and concentration profiles) for coupling with the far field model.

The BrIHne-Jet-Spreading model applies the dimensional analysis formulas presented by Pincince et al. (1973), and later by Roberts et al. (1987) for jets. For the spreading layer, formulas are used as presented by Roberts et al. (1997). These formulas have been generally used to characterize the behaviour of flow at unique points along the path such as the maximum height or impact point on the bed or the end of the near field.

Moreover, the results of the model were validated with experimental data published by other authors (Roberts et al. (1997), Cipollina et al. (2005), Kikkert et al. (2007), Shao et al. (2010), Papakonstantis et al. (2011a), Papakonstantis et al. (2011b), for all discharge angles simulated by the model. The validation shows very good correlation between the numerical results of brIHne-Jet-Spreading, especially as refers to the characteristics of the jet at the maximum height, point of return, and end of the near field (spreading layer), and the experimental data published by various authors.

## REPORTS

## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

What follows is a sample diagram of the outfall in the model where the flow axis is represented with a dotted line. The concentration axis ( $X, Z_c$ ) is defined as a line that joins the maximum concentration points of each flow section. Moreover, the variables are shown at the characteristic points in the flow path.

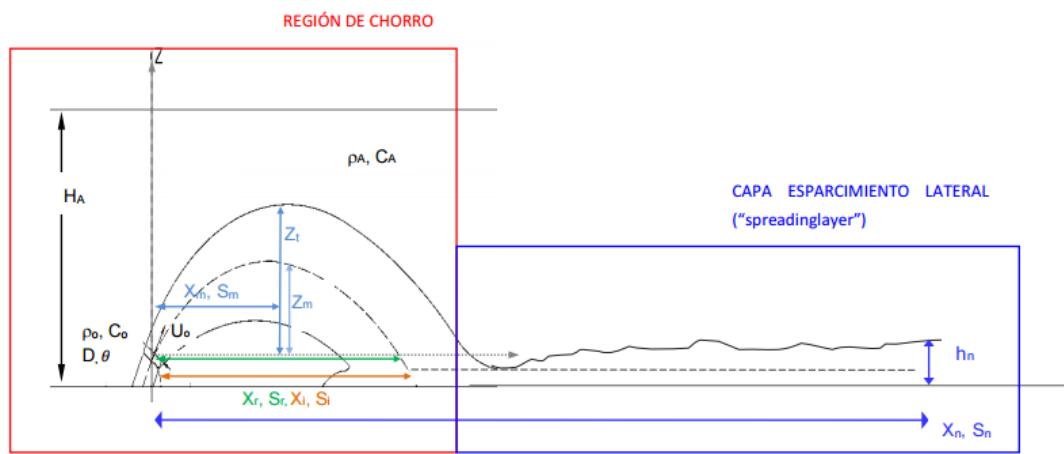


Figure 1. Diagram of the outfall simulated by the Brihne -Jet- Spreading model

In this case, a single discharge outlet will be simulated with the corresponding flow for that outlet. Once the discharge outlet is modelled based on the plume width, a separation between outlets will be defined to guarantee there is no mix between contiguous plumes.



#### 4. INPUT DATA

##### 4.1. AMBIENT CONDITIONS

According to the baseline data, the following values were taken into account:

| Ambient conditions |             |
|--------------------|-------------|
| Salinity           | Temperature |
| 40,80 g/l          | 28 °C       |

From the previous data, the density obtained for seawater is **1,026.67 kg/m3**

##### 4.2. BRINE EFFLUENT CHARACTERISTICS

Following the desalination process study by the plant engineering team, the design data for the brine effluent is as follows:

|                                      | Brine effluent characteristics |                   |                                  |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|
|                                      | Brine flow                     | Salinity          | Temperature                      |
| <b>Case 1 – overall recovery 42%</b> | <b>48,756 m3/d</b>             | <b>70.345 psu</b> | <b>29° C (ambient + 1 deg C)</b> |
| <b>Case 2 – overall recovery 45%</b> | <b>43,152 m3/d</b>             | <b>74.18 psu</b>  |                                  |

The resulting brine densities are **1,048.73 kg/m3** and **1,051.68 kg/m3** respectively.



#### 4.3. DIFFUSER SET-UP

The following diffuser configurations have been considered as an input to check the brine model dispersion in the near-field region.

#### 4.4. CASE -1 OVERALL RECOVERY 42%

| Diffuser system features -Case 1    |          |
|-------------------------------------|----------|
| Parameters                          |          |
| Number of Diffusers                 | 30       |
| Diameter of the Diffuser Port (ID): | 300 mm   |
| Velocity of each diffuser:          | 6.40 m/s |
| Separation between diffusers:       | 15.5 m   |
| Diffuser angle to the horizontal:   | 60 °     |
| Depth of seabed at the diffusers    | - 25 m   |

As can be seen, 30 outlet ports with an ID 300 mm comprises the diffuser system. Each port is separated 15.50 m (total length of 217 m). Outlet ports are arranged by pairs, back to back.

#### 4.5. CASE -2 OVERALL RECOVERY 45%

| Diffuser system features -Case 2    |          |
|-------------------------------------|----------|
| Parameters                          |          |
| Number of Diffusers                 | 30       |
| Diameter of the Diffuser Port (ID): | 300 mm   |
| Velocity of each diffuser:          | 5.65 m/s |
| Separation between diffusers:       | 12.70 m  |
| Diffuser angle to the horizontal:   | 60 °     |
| Depth of seabed at the diffusers    | - 25 m   |



## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

Same concept is used for case – 2 diffuser set-up in terms of total number of diffusers and outlet port inner diameter.

#### 4.6. ENVIRONMENTAL REGULATIONS

According to the environmental regulation at the zone, the **maximum admissible increase of salinity** concerning ambient salinity (seawater) is **2%** at 100 m from the discharge point.

Considering the most restrictive recovery case, the initial dilution required can be calculated by the following expression:

$$S_{final} = S_{inic} + \frac{(S_{efl} - S_{inic})}{D_i}$$

Where:

- $S_{inic}$  = Initial salinity (40.80 psu)
- $S_{efl}$  = Brine salinity (74.20 psu)
- $S_{final}$  = Final salinity (40.80 psu + Δ2% = 41.62 psu)

Therefore, the minimum initial dilution to be achieved is **1:40.90**



## 5. CALCULATION AND RESULTS

The previous diffuser set-up for both cases has been studied to check whether complying with the environmental regulation previously indicated, taking into consideration the minim initial dilution to be achieved.

Results for both cases are summarized below:

### 5.1. CASE – 1 OVERAL RECOVERY 45%

Near-field modelling was carried out considering all input data given. The diffuser design stated above was considered to check whether comply with excess salinity requirement at the end of the near field region.

For this case, the **dilution achieved is 1: 68.60** at the end of the near filed region (spreading layer) which is higher than required.

The resulting horizontal location of the spreading layer at the end of the near field region is 68.60 m from the discharge point. Further from this boundary the far-field region begins, where the hydrodynamic forces (currents, wind, etc) take their place and govern plume behavior.

Moreover, the salinity obtained at the same point is 41.20 psu which represents an increment of **1.06%** concerning seawater salinity, resulting lower than the admissible salinity (2% more than ambient salinity, i.e 41.616 psu).

**Therefore, compliance with Environmental regulations is justified.**

A brief summary of modeling results is shown in the following table:



## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

|          |      |                |   |         | brlhne Results    |        |                                  |      |                               |        |               |
|----------|------|----------------|---|---------|-------------------|--------|----------------------------------|------|-------------------------------|--------|---------------|
|          |      |                |   |         | Jet flow behavior |        |                                  |      | Spreading layer flow behavior |        |               |
| Nº ports | θ(°) | ID(mm); SDR 26 | Flow per diffuser port(m <sup>3</sup> /s) | V (m/s) | dilution          | Xi (m) | Hmax (m) relative to port nozzle | R=2B | dilution                      | Xn (m) | Sal,max (psu) |
| 30       | 60   | 300            | 0.45                                      | 6.40    | 35.80             | 28.22  | 19.90                            | 8.30 | 68.60                         | 68.63  | 41.23         |

where:

- N° ports, the number of outlet ports,
- Θ, the angle with the horizontal line,
- ID, the inside diameter of the outlet port,
- V, the jet output speed,
- Dilution (jet flow behaviour), centerline dilution at the impact point.
- Xi, centerline horizontal location of the impact with bottom point.
- Hmax, the maximum jet height, relative to port nozzle.
- R, the radius of the plume,
- Dilution (spreading layer flow behaviour), centerline dilution of the spreading layer at the end of the near field region.
- Xn, the horizontal reach of the spreading layer.

As can be seen in the previous table the plume's radius (radial distance from the centerline to where concentration is 6% of that at the centerline) is 8.30 m. The following graph illustrates it:

## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

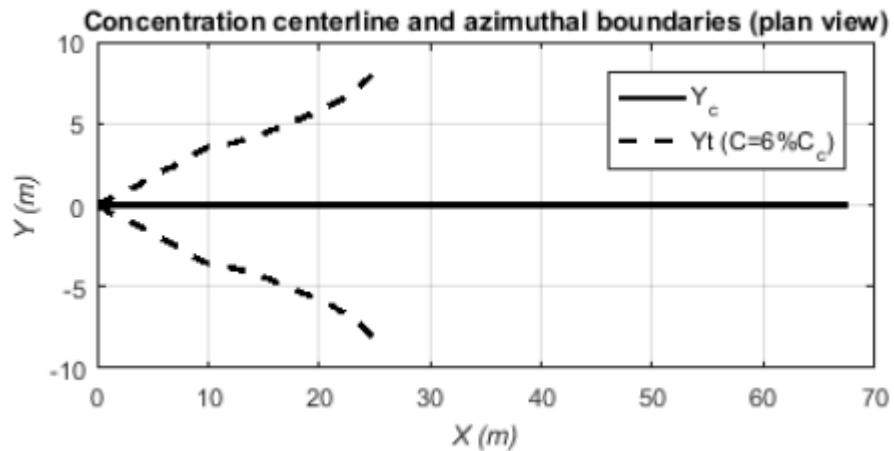


Figure 2. Plume's radius case 1. Plan view.

Thus, as the separation between outlet ports is more than 9.60 m, no merging between discharge plumes are expected, otherwise, if plumes are merged the resulting dilution will be affected.

Further details concerning the plume behaviour are included in **addendum 1.**

## 5.2. CASE – 2 OVERAL RECOVERY 42%

For this case, the **dilution achieved is 1: 56.90** at the end of the near field region (spreading layer) which is higher than required.

The resulting horizontal location of the spreading layer at the end of the near field region is 56.93 m from the discharge point. Further from this boundary the far-field region begins, where the hydrodynamic forces (currents, wind, etc) take their place and govern plume behavior.

## REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

Moreover, the salinity obtained at the same point is 41.38 psu which represents an increment of **1.44%** concerning seawater salinity, resulting lower than the admissible salinity (2% more than ambient salinity, i.e 41.616 psu).

**Therefore, compliance with Environmental regulations is also justified.**

A brief summary of modeling results is shown in the following table:

|          |                    |                |   |         | brIHne Results    |                    |  |      |                               |                    |               |
|----------|--------------------|----------------|---|---------|-------------------|--------------------|--|------|-------------------------------|--------------------|---------------|
| Nº ports | $\theta(^{\circ})$ | ID(mm); SDR 26 | Flow per diffuser port(m <sup>3</sup> /s) | V (m/s) | Jet flow behavior |                    |  |      | Spreading layer flow behavior |                    |               |
|          |                    |                |   |         | dilution          | X <sub>i</sub> (m) | H <sub>max</sub> (m) relative to port nozzle | R=2B | dilution                      | X <sub>n</sub> (m) | Sal,max (psu) |
| 30       | 60                 | 300            | 0.40                                      | 5.65    | 29.70             | 23.40              | 16.51  | 6.90 | 56.90                         | 56.93              | 41.38         |

Likewise, the adopted separation between diffusers is higher than the resulting plume's radius (6.90 m according to model results). Consequently, no merging between continuous discharging ports is expected.

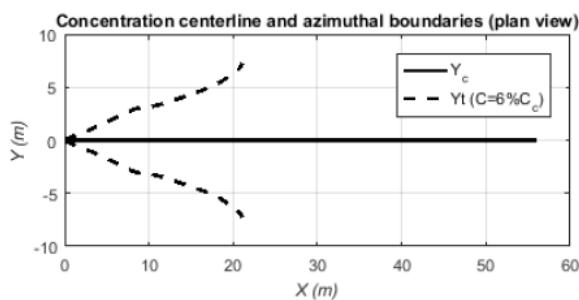


Figure 3. Plume's radius case 2. Plan view.

Further details concerning the plume behaviour are included in **addendum 2.**



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

---

REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

## **ADDENDUM 1: BRIHNE MODEL RESULTS. CASE -1**

---

REPORTS



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

---

REPORT N° 03: DIFFUSER DESIGN - INITIAL DILUTION STUDY

## **ADDENDUM 2: BRIHNE MODEL RESULTS. CASE -2**

---

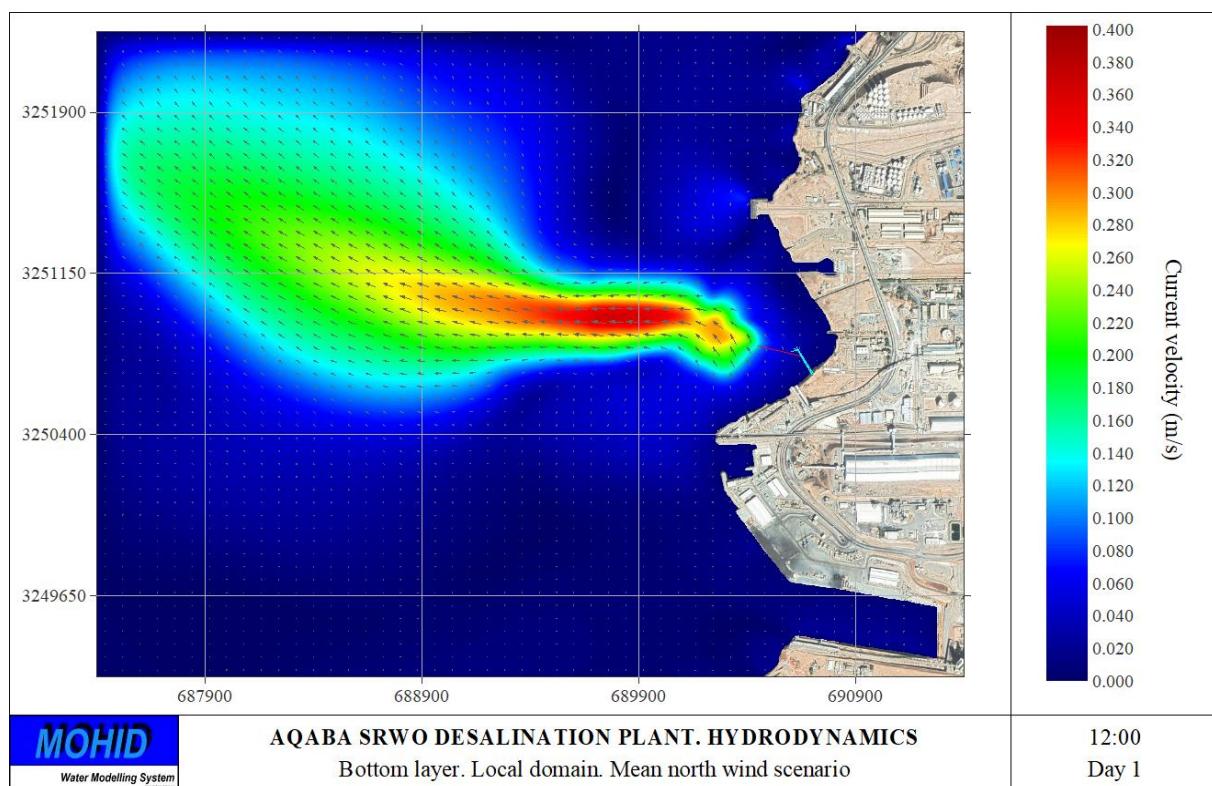
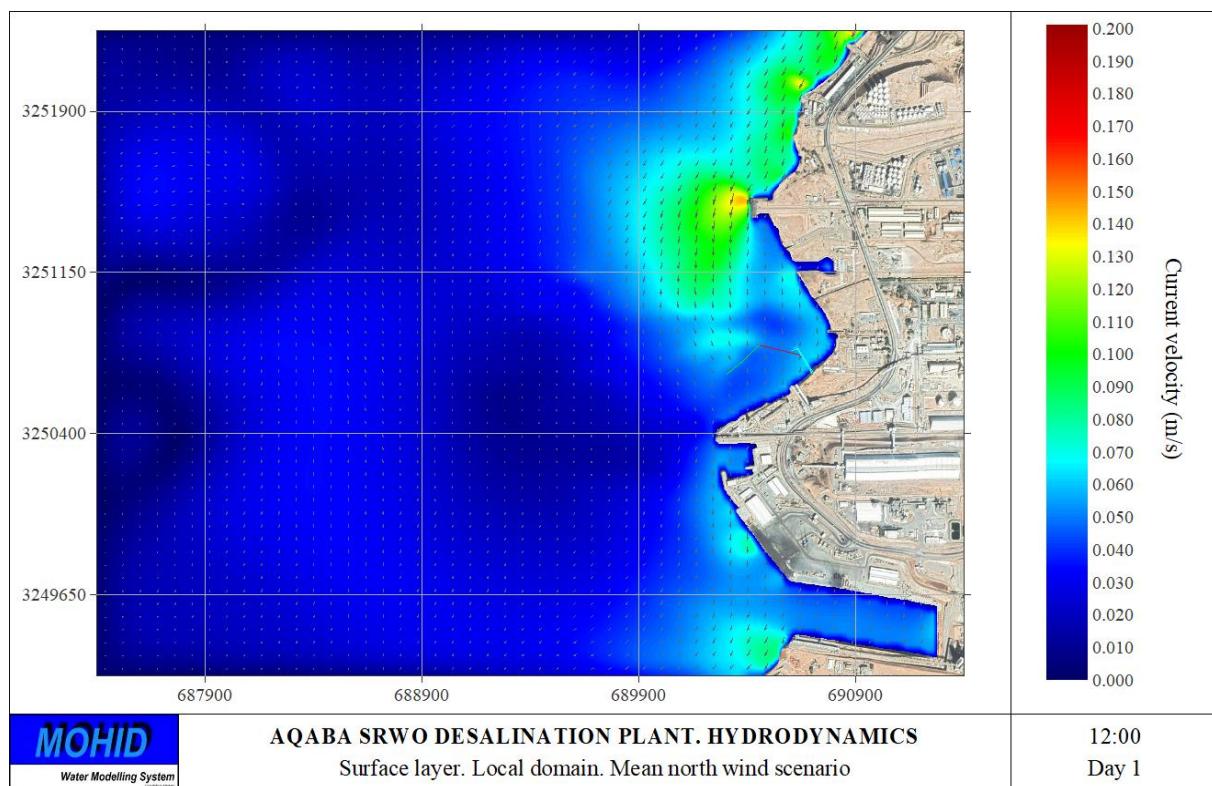
REPORTS



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



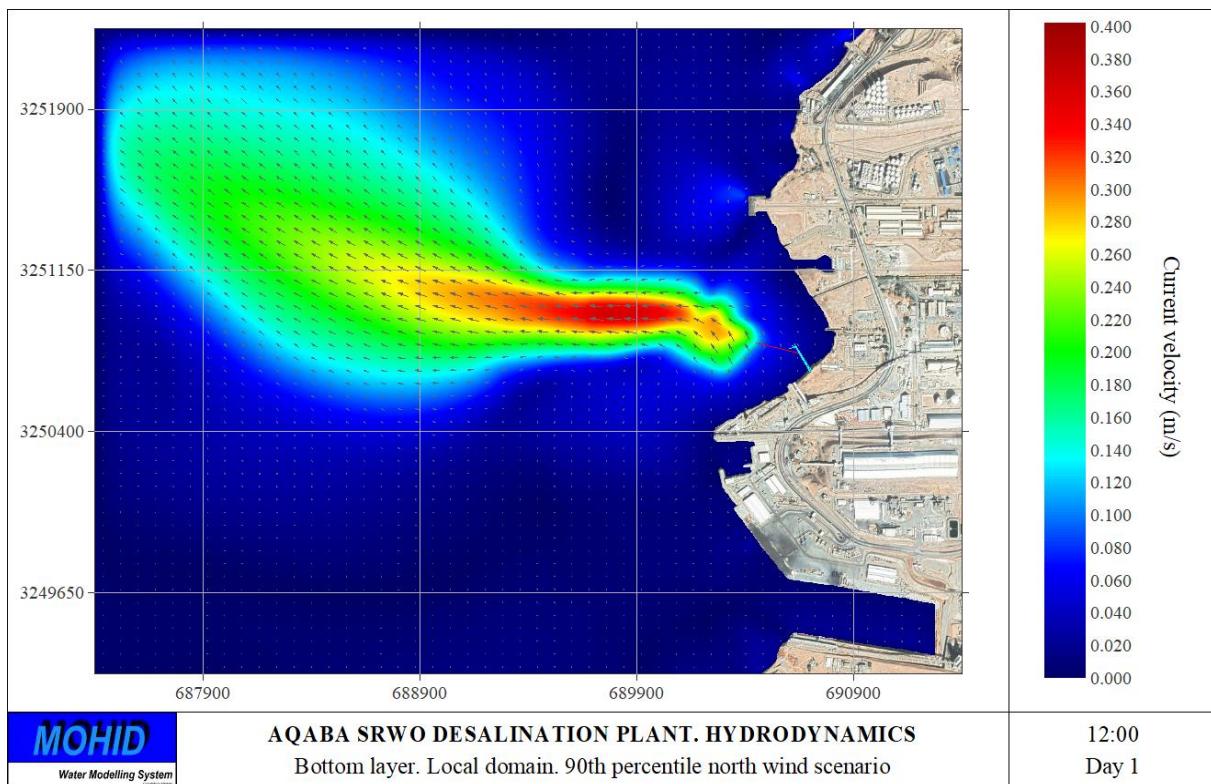
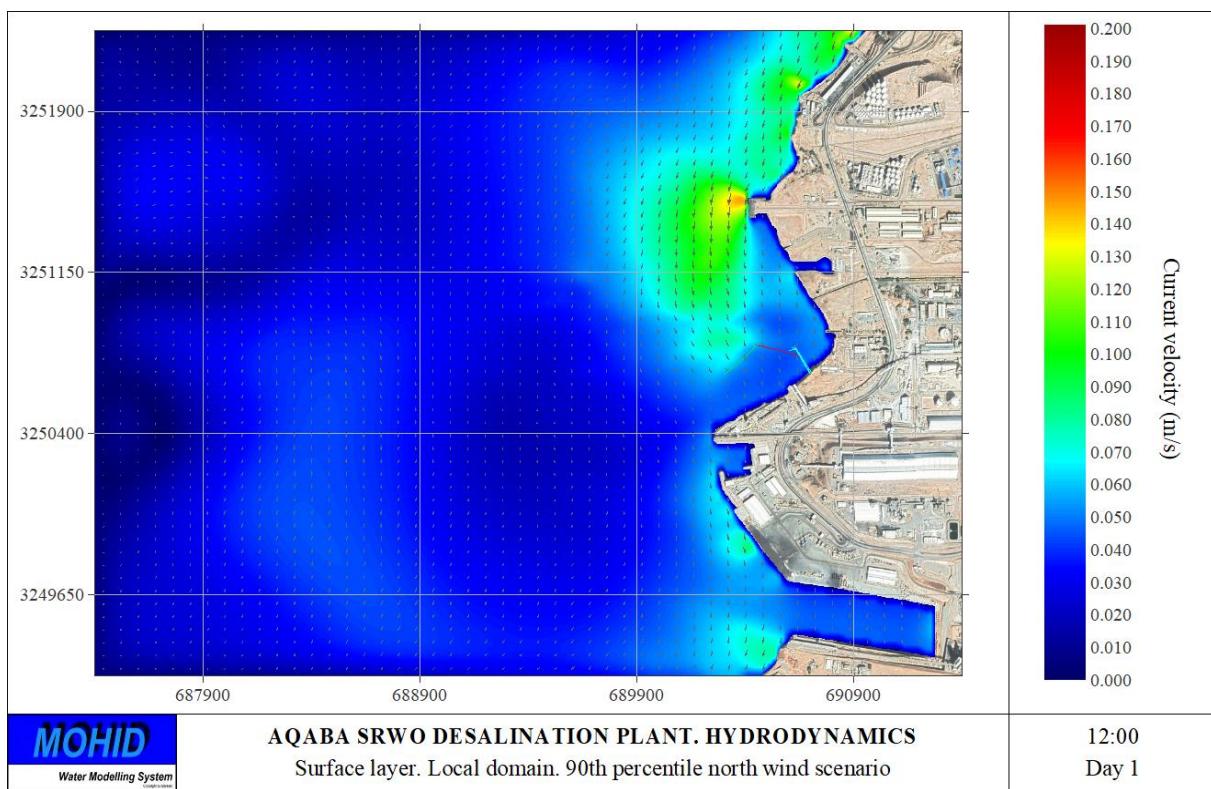
REPORTS



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



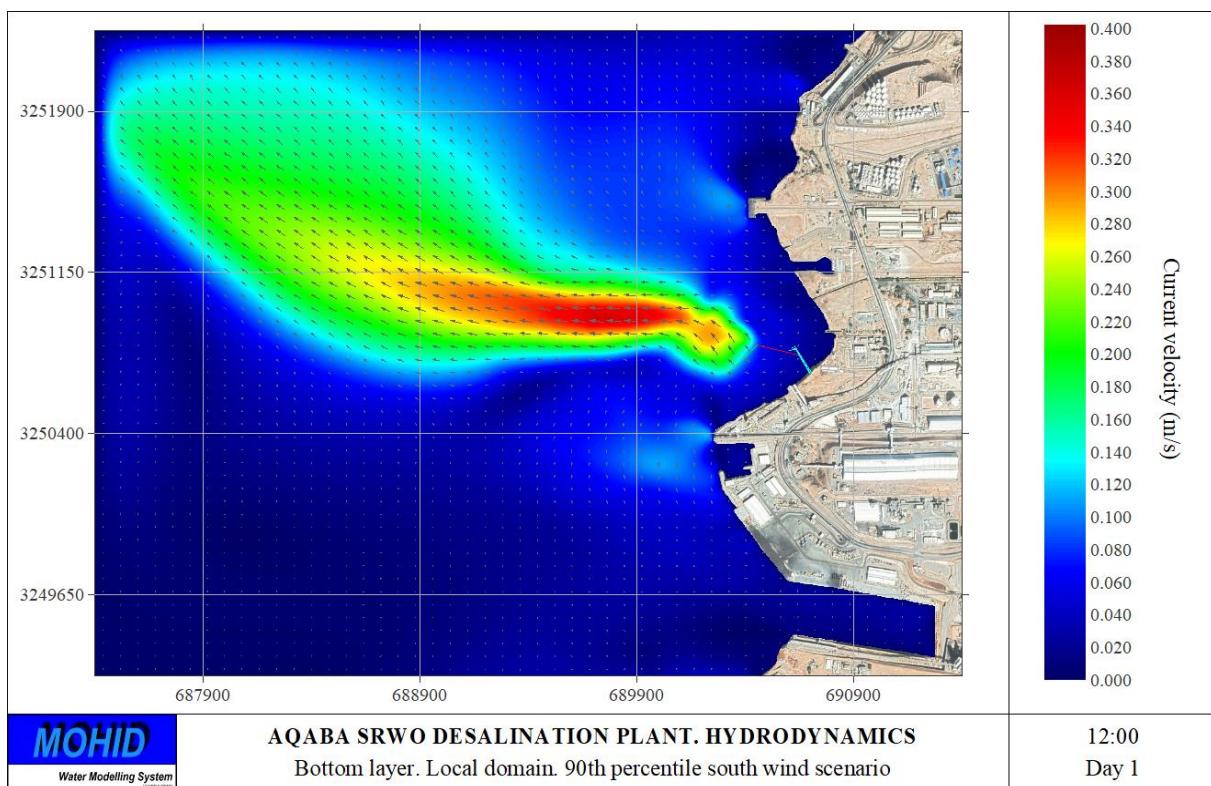
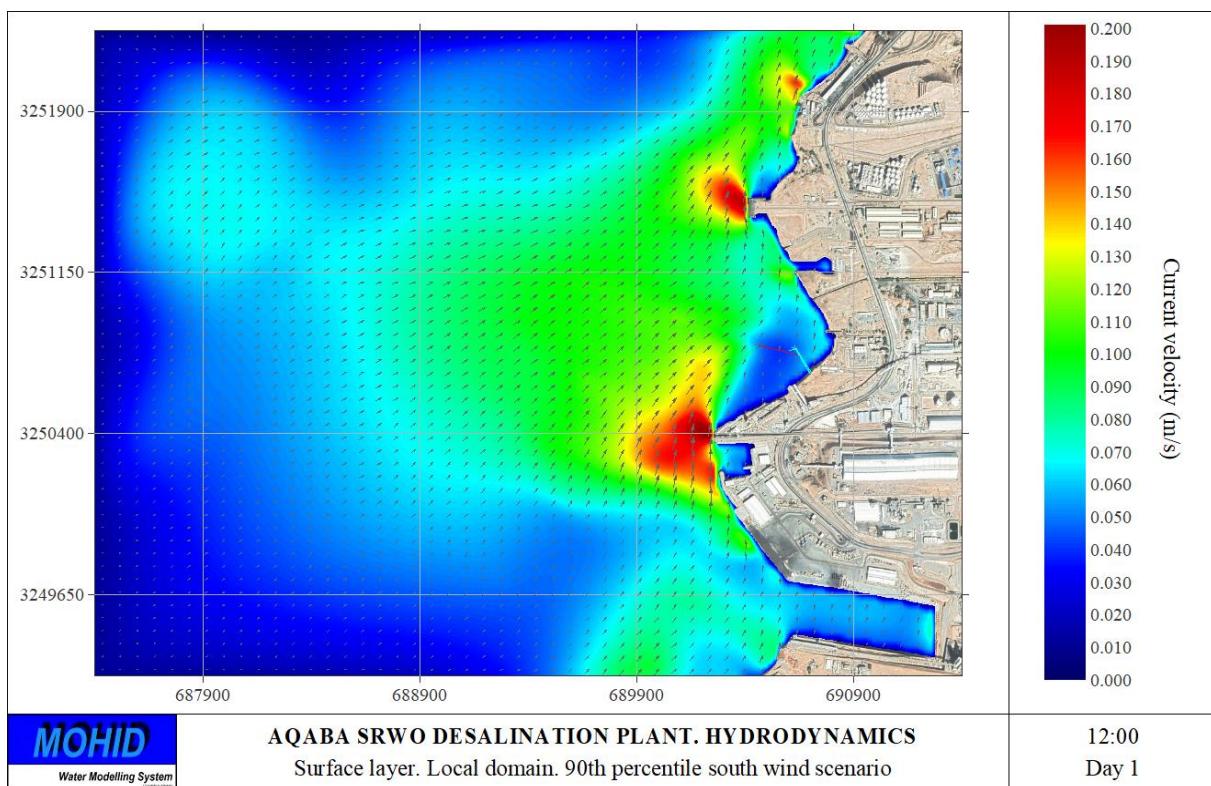
## REPORTS



TETRA TECH

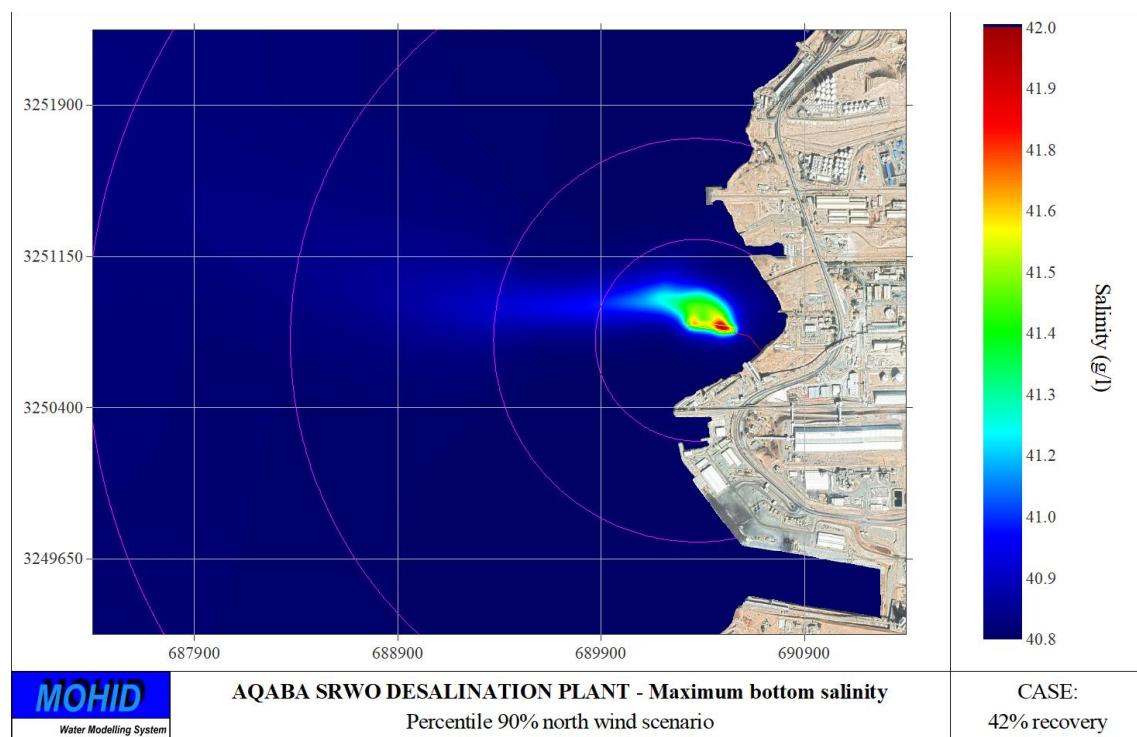
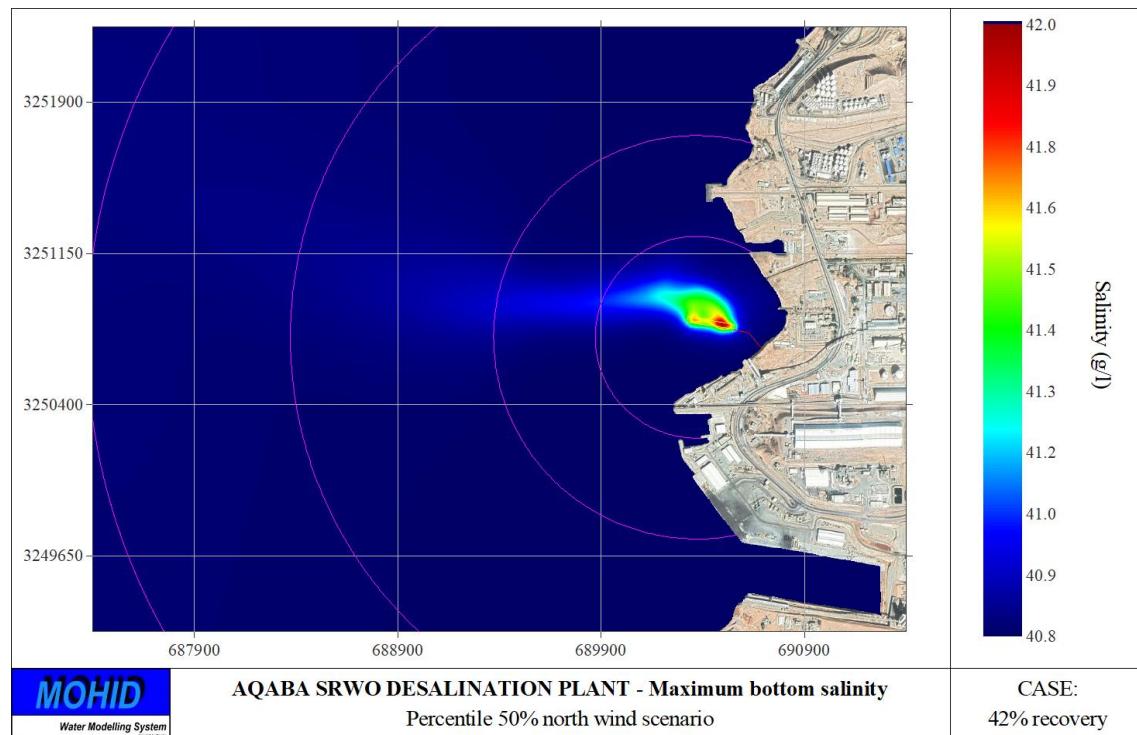
AQABA SRWO DESALINATION PLANT

REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



REPORTS

## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES

**42% of recovery figures:**

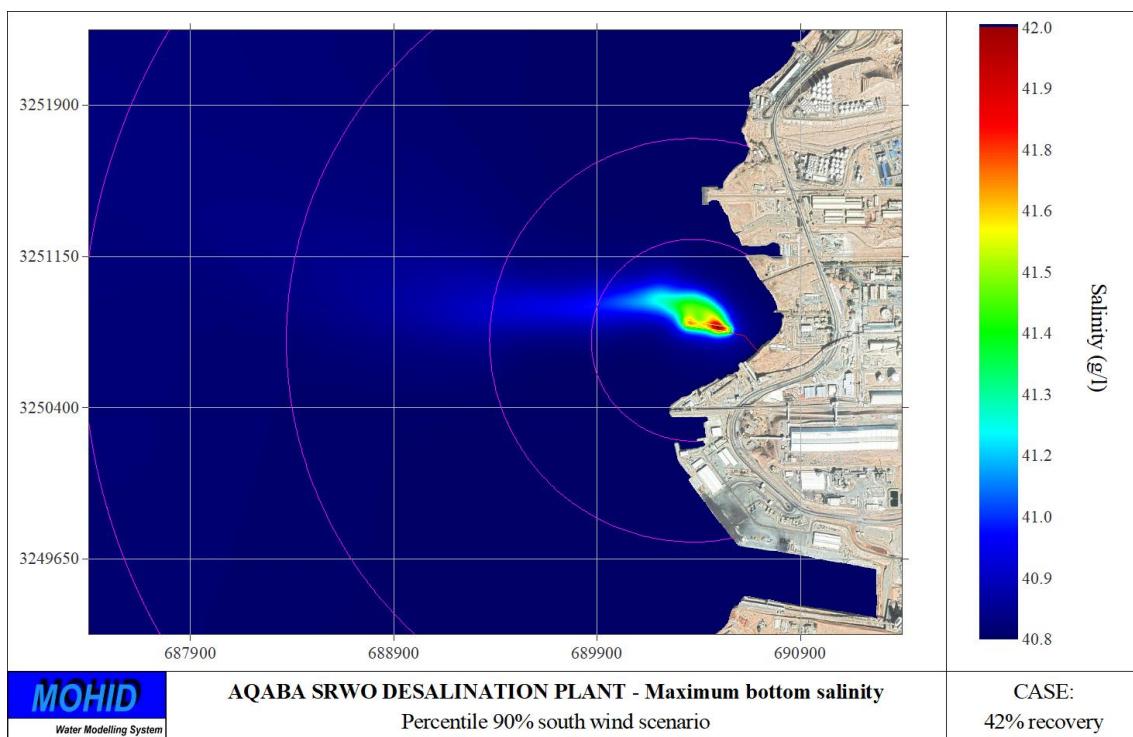
## REPORTS



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

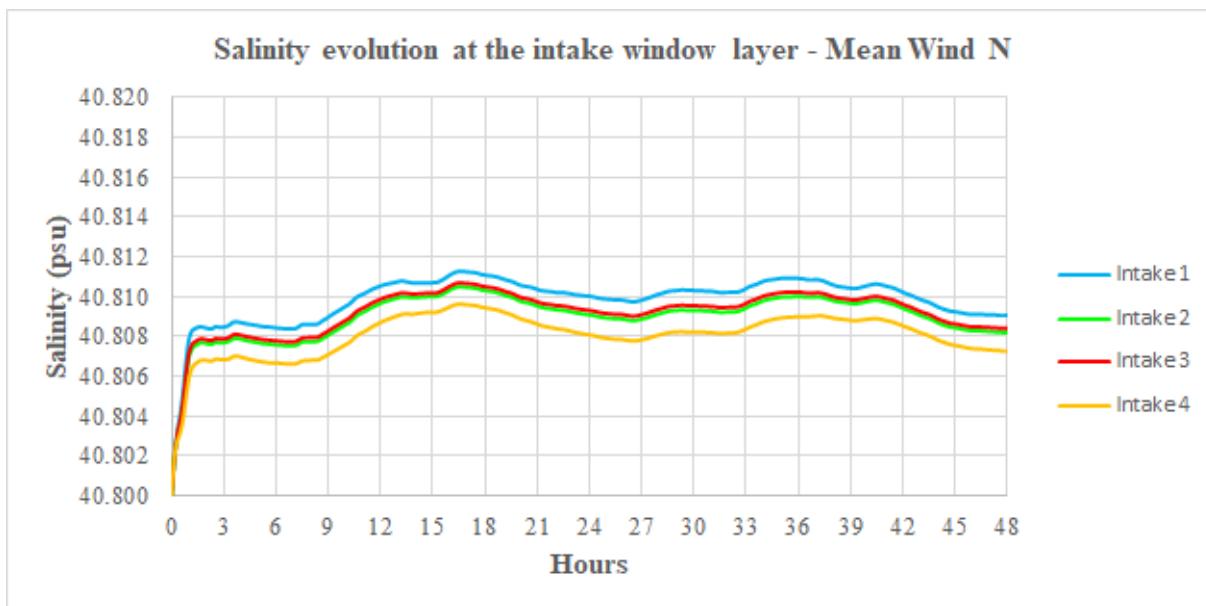
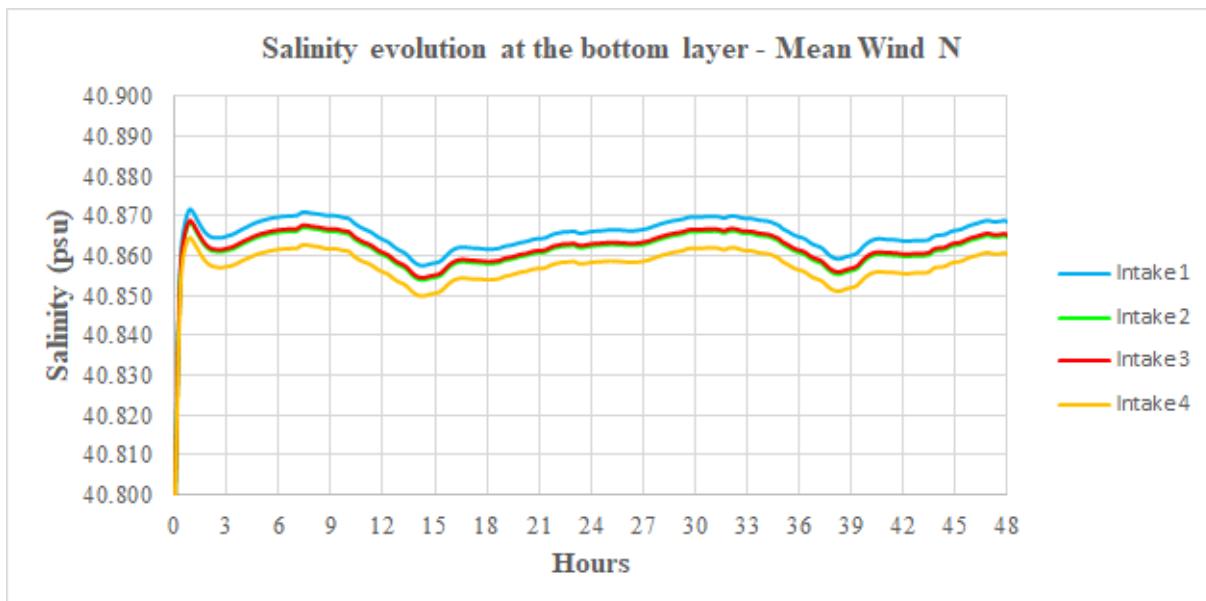
REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



REPORTS

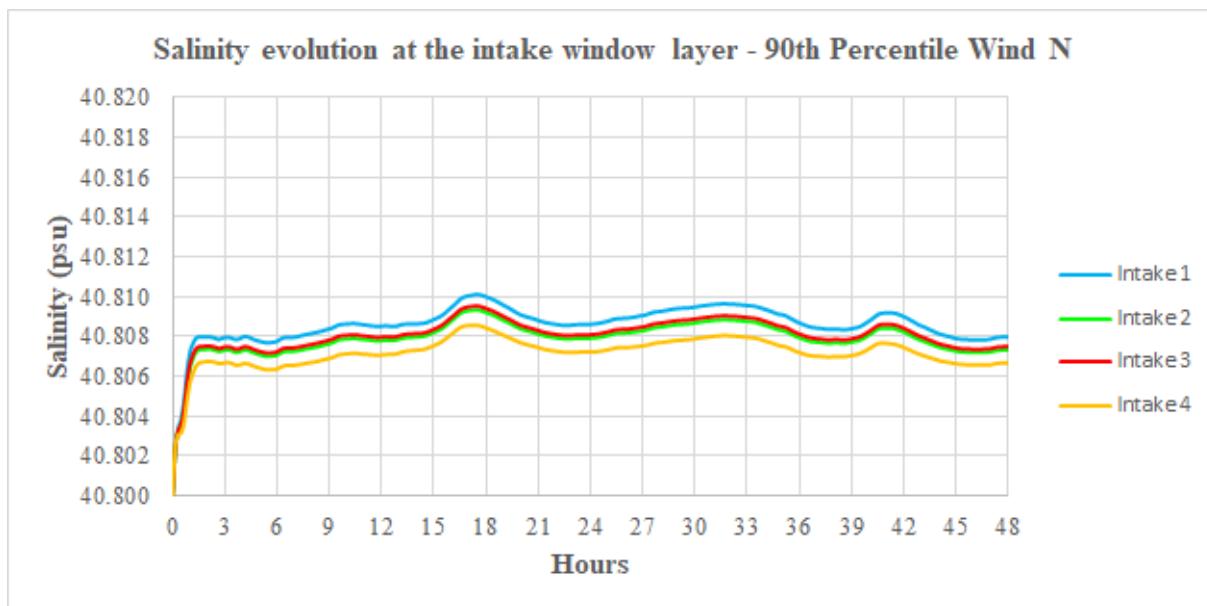
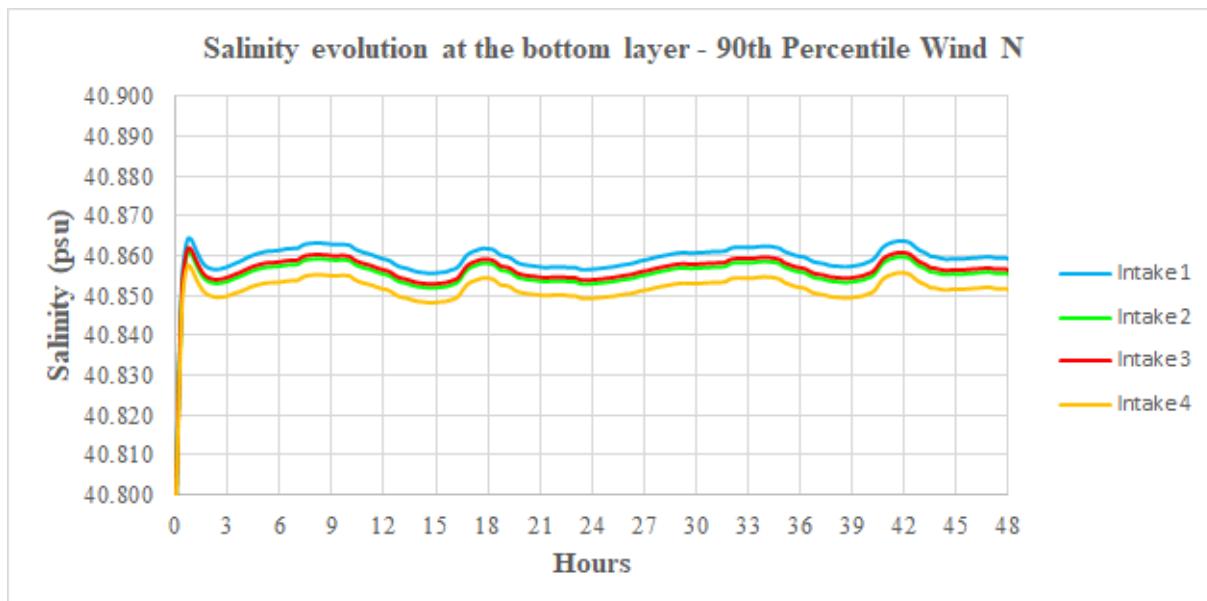


## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



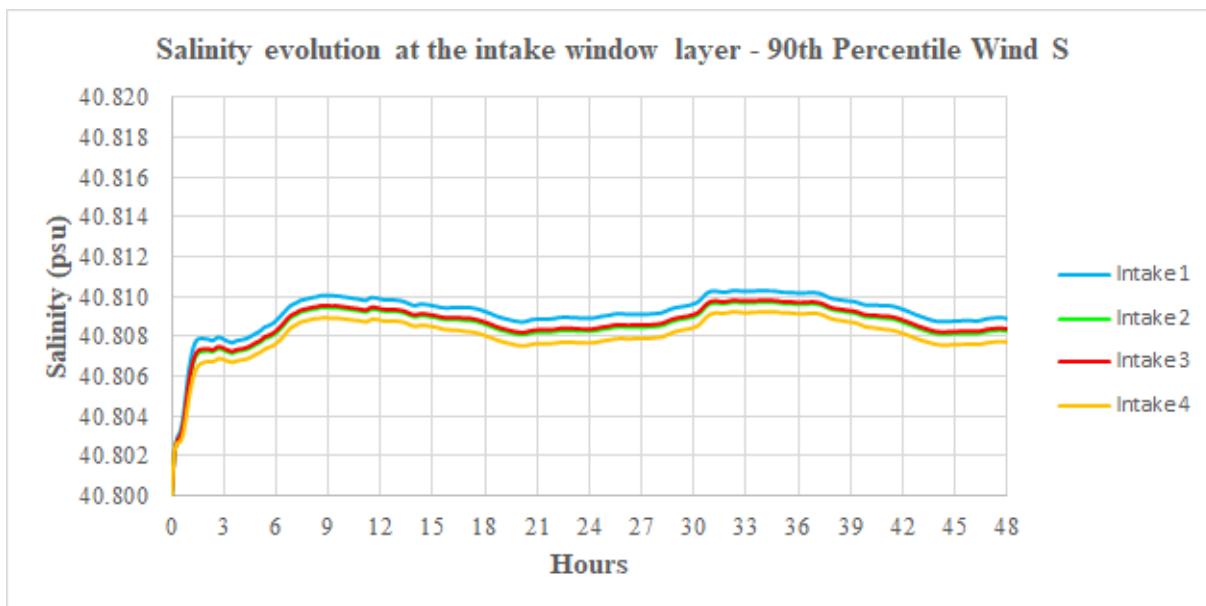
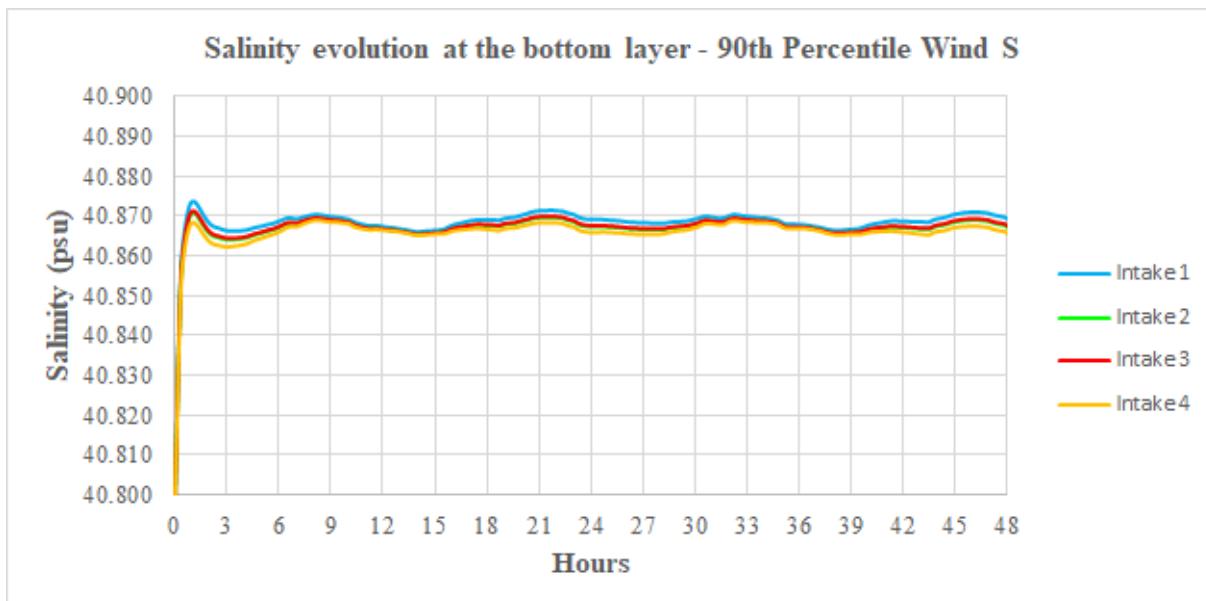


## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES

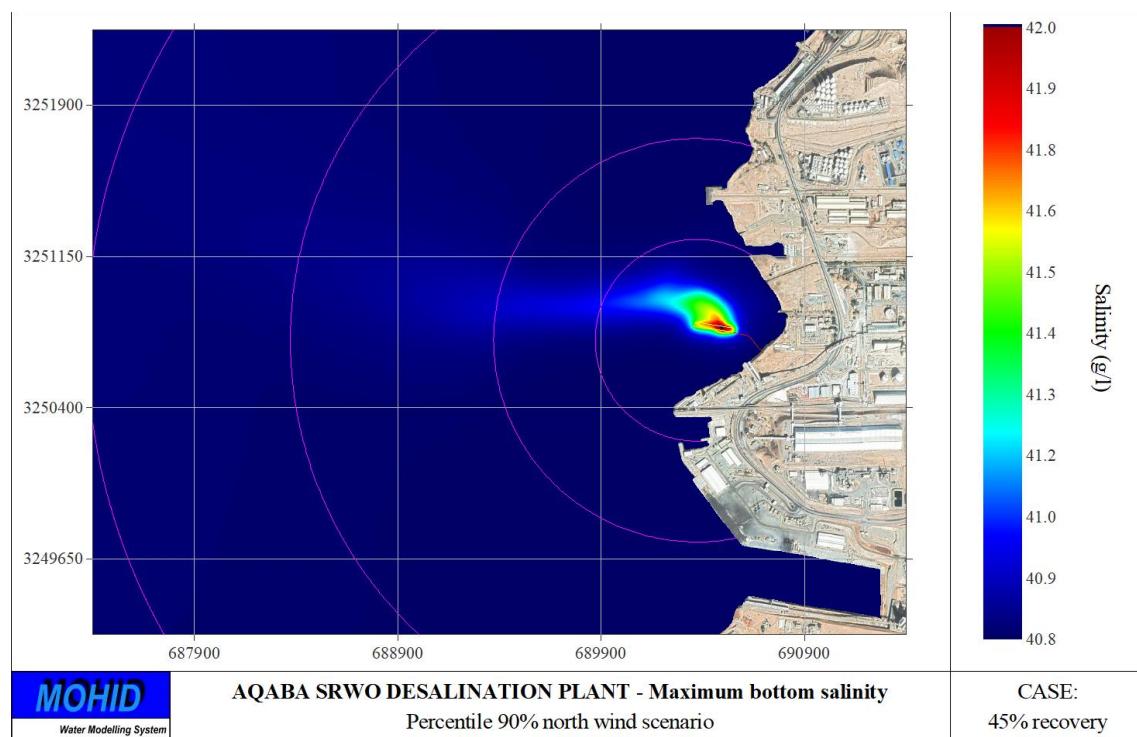
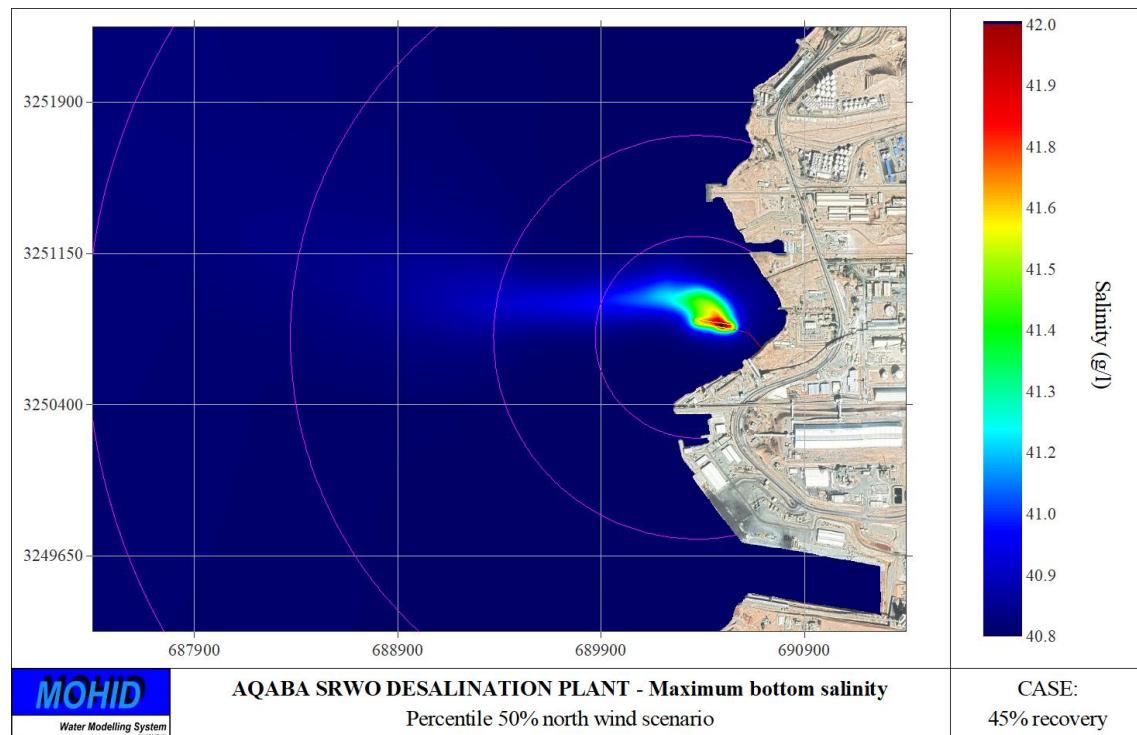




## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES

**45% of recovery figures:**

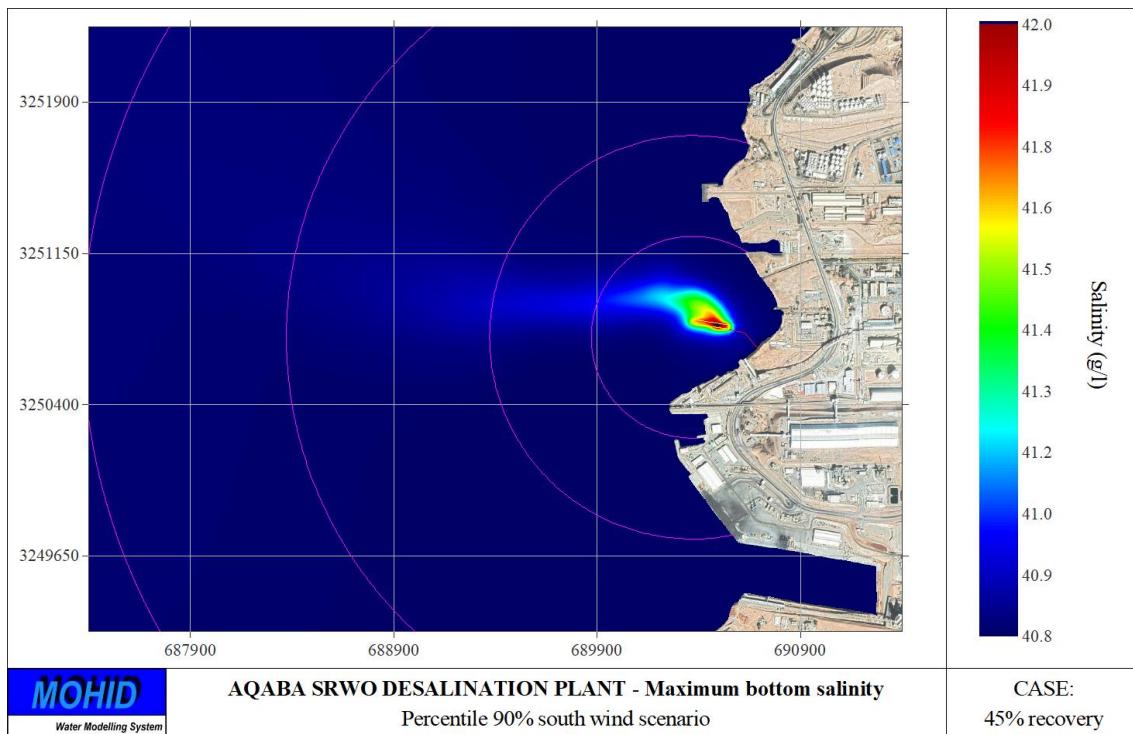
## REPORTS



TETRA TECH

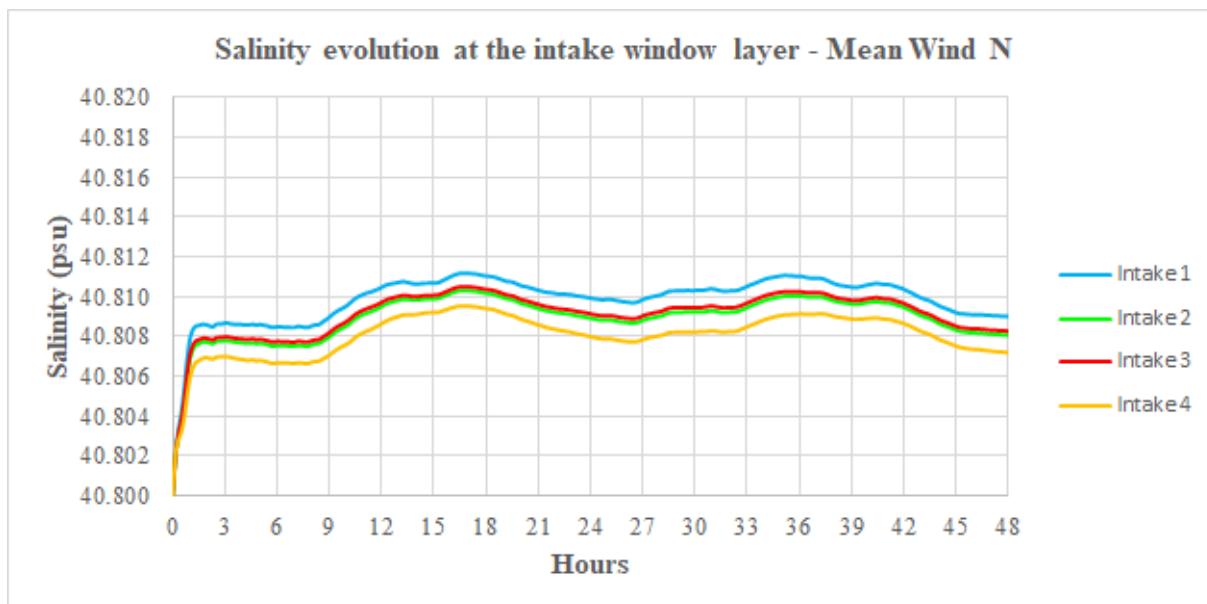
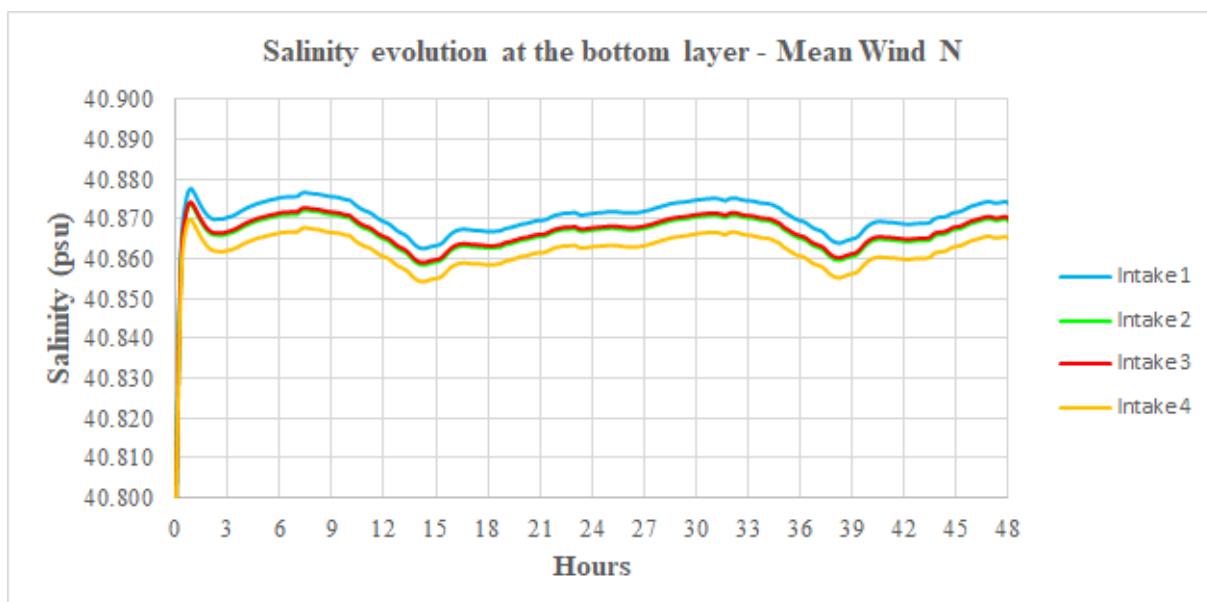
AQABA SRWO DESALINATION PLANT

REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES

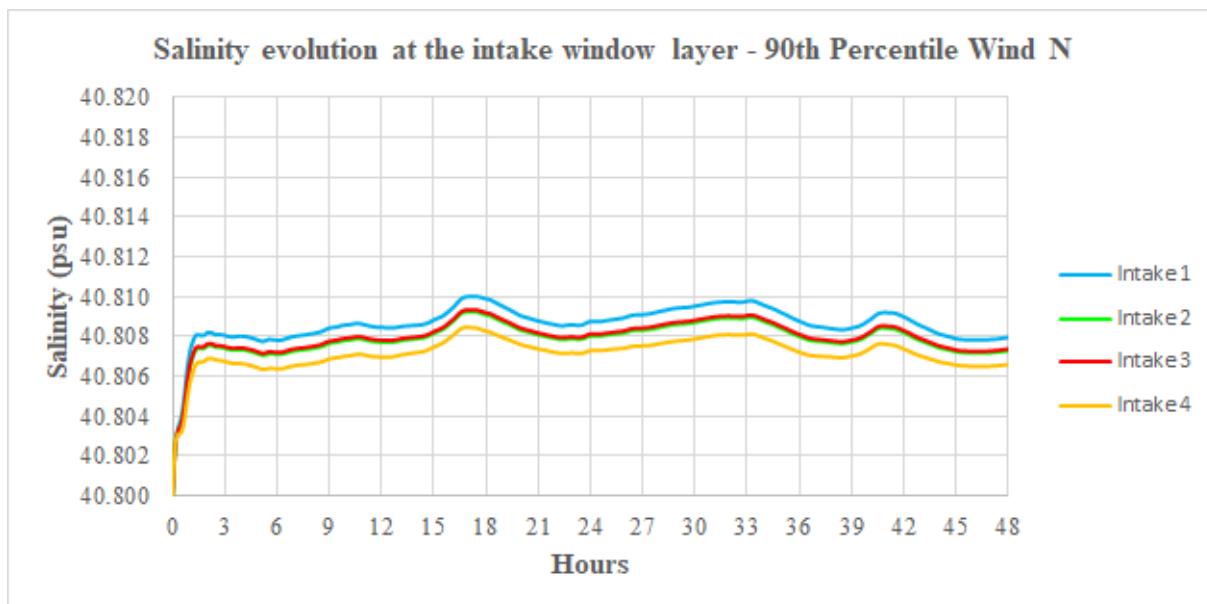
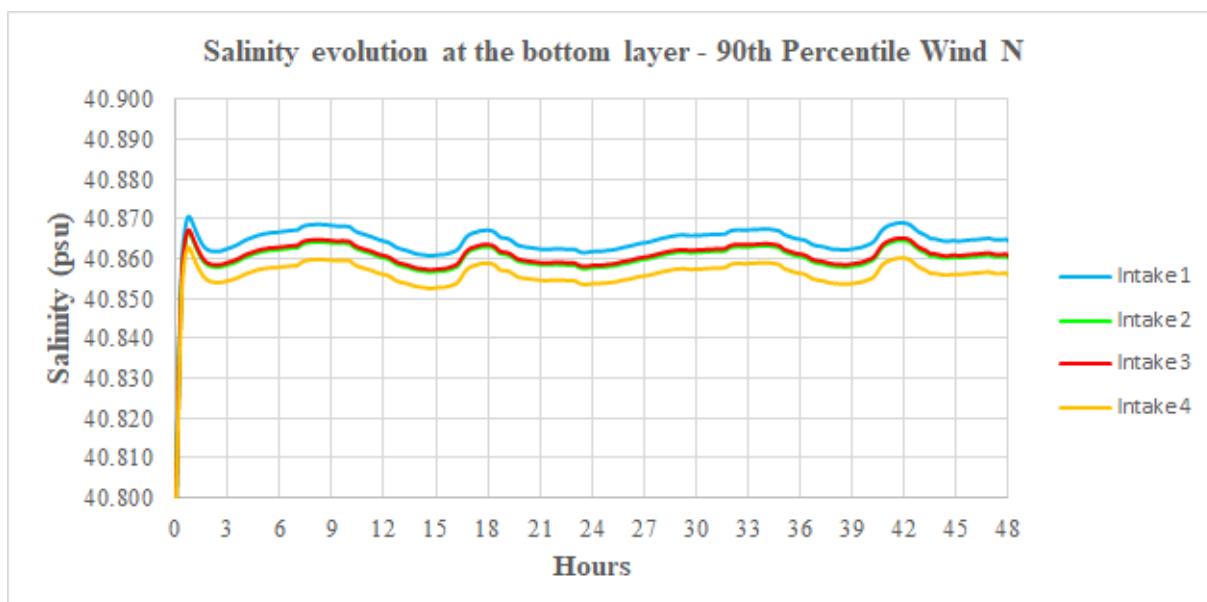


REPORTS

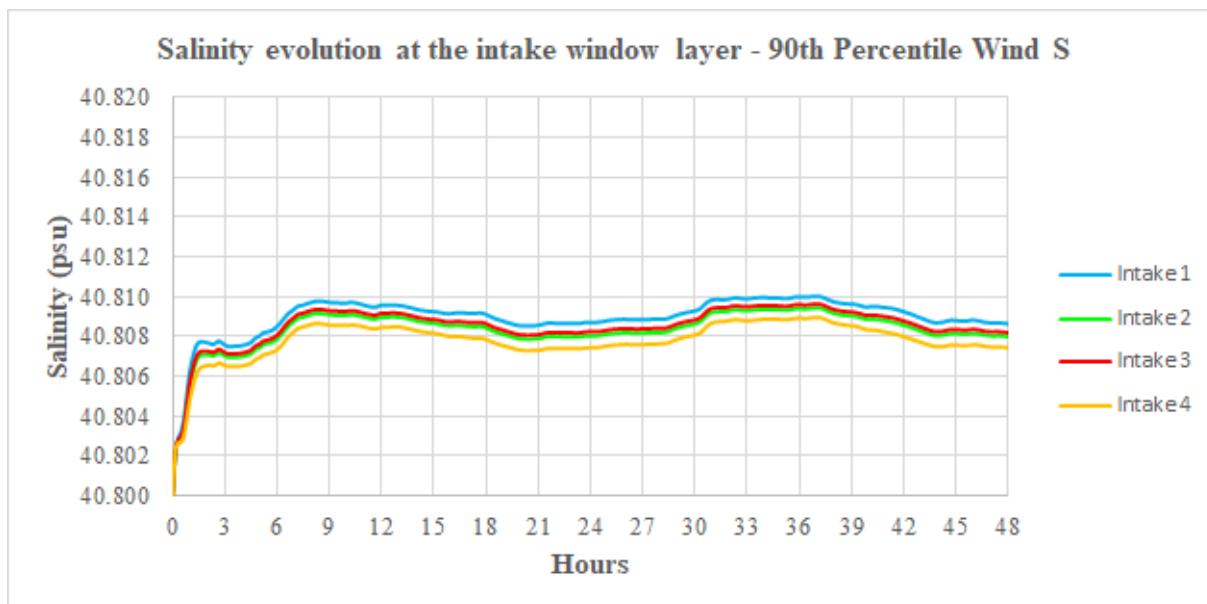
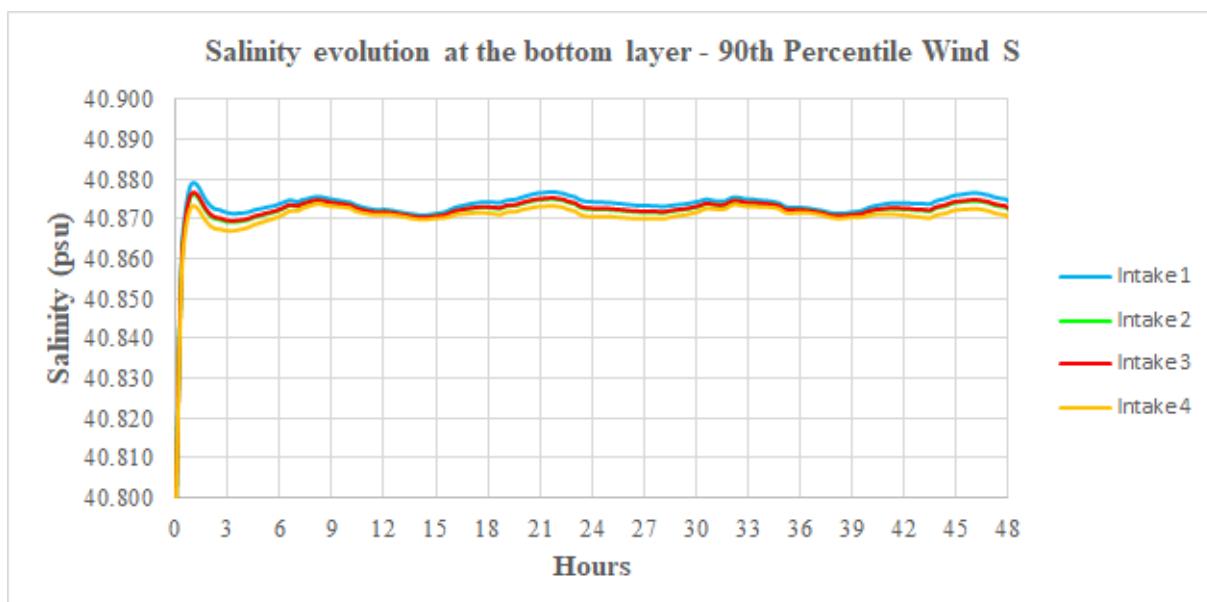
## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES



## REPORT N° 4 ADDENDUM 1: FIGURES





TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

---

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

---

### Document history:

| Rev. | DATE       | Notes         |
|------|------------|---------------|
| 0    | 16/09/2021 | First edition |

---

### REPORTS



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

**ÍNDICE**

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUCTION .....</b>                                   | <b>1</b>  |
| <b>2.</b> | <b>DESCRIPTION OF THE MODEL .....</b>                       | <b>2</b>  |
| <b>3.</b> | <b>INPUT DATA.....</b>                                      | <b>8</b>  |
| 3.1.      | FLOW DESIGN PARAMETERS .....                                | 8         |
| 3.2.      | GRID REFERENCE .....  | 8         |
| 3.3.      | BATHYMETRY .....  | 8         |
| 3.4.      | DIFFUSER AND INTAKE DEFINITION .....                        | 10        |
| 3.5.      | SEA WATER SALINITY AND TEMPERATURE.....                     | 12        |
| 3.6.      | TIDES .....   | 13        |
| 3.7.      | WIND.....   | 15        |
| 3.8.      | ENVIRONMENTAL REGULATIONS .....                             | 20        |
| <b>4.</b> | <b>FAR-FIELD DISPERSION AND RECIRCULATION.....</b>          | <b>21</b> |
| 4.1.      | MODEL SET-UP.....   | 21        |
| 4.2.      | HYDRODYNAMICS IN THE AREA.....                              | 25        |
| 4.3.      | DISPERSION & RECIRCULATION: DISCUSSION OF THE RESULTS ..... | 27        |
| 4.3.1.    | Recovery 42% .....  | 27        |
| 4.3.2.    | Recovery 45% .....  | 31        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSIONS .....</b>                                    | <b>35</b> |

**ADDENDUM 1: HYDRODYNAMICS AND DISPERSION FIGURES**



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

## 1. INTRODUCTION

This document was written to describe modelling studies carried out to assess the intake and outfall pipelines offshore position in the desalination plant in Aqaba, Jordan, with a 300 M m<sup>3</sup>/year capacity for two conversion rates: 42% & 45%.

The objective is to determine the hydrodynamics and saline dispersion (brine path) from the outfall and estimate the possible brine recirculation potential through the intake's pipelines. The concentration above the ambient will be assessed at different distances too.

In Report 3 a Near Field study and diffuser design was developed with brlHne model for the defined production and the two conversion rates. The far field modelling results will show what will be the brine path after the near field (it is expected that brine plume will flow along the bathymetry down slope), and what will be concentration above the ambient at different distances:

- i) End of near field (assumed the same as near field model)
- ii) 500m from the diffusers
- iii) 1000m from the diffusers
- iv) 2000m from the diffusers
- v) 3000m from the diffusers

The MOHID digital model, which will be described further below, will be used for this purpose.

## REPORTS



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

## 2. DESCRIPTION OF THE MODEL

The desalination reject water has a salinity of around double that of seawater which means it is much denser. When this water is discharged into the sea, it sinks (negative buoyancy) due to the higher density and forms a dense and hypersaline layer that moves along the bottom of the sea following the local bathymetry.

When the discharge collides against the seabed, a hydraulic jump forms and, after this, the dense layer moves as a density current. This dense and hypersaline layer can be harmful to benthic organisms in the affected area which requires a discharge system that is capable of adequately diluting the brine to ensure there is no damage to the marine environment.

The highest dilution levels are achieved during the initial dilution process when the turbulent discharge water is mixed with the receiving body. The initial dilution process mainly depends on the discharge parameters (diffuser type, number of outlet ports, diameter of the outlet ports, etc.) meaning this is the process where the designer can work to improve the discharge dilution.

Later, the dilution in the far field is more conditioned by the local hydrodynamics with much lower dilutions.

After making the diffuser design and the Near Field study in the Report 1, a widely contrasted model shall be used to study the dispersion along the far field: MOHID.

MOHID is the short name for Modelo Hidrodinâmico which means Hydrodynamic Model in Portuguese that was the original purpose of the model when it was created back in 1985. MOHID Water Modelling System is a modular

## REPORTS



---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

finite volumes water modelling system written in ANSI FORTRAN 95 using an object-oriented programming philosophy, integrating diverse numerical models, and supporting graphical user interfaces that manage all the pre- and post-processing. It is an integrated modelling tool able to simulate physical and biogeochemical processes in the water column as well as in the sediments and is also able to simulate the coupling between these two domains and the latter with the atmosphere.

The MOHID system includes a baroclinic hydrodynamic module for the water column and a 3D for the sediments and the correspondent eulerian transport and lagrangian transport modules. Parameters and processes involving non-conservative properties are object of specific modules (e.g. turbulence module, water quality, ecology and oil transformation). The turbulence module uses the well-known GOTM turbulence model.

The model is being developed by a large team from Instituto Superior Técnico in close cooperation with Hidromod Lda and includes contributions from the permanent research team and from a large number of Ph.D students on Environmental and Mechanical Engineering and from IST master course on Modelling of the Marine Environment. Contributions from other research groups have also been especially important for the development of the model.

With the growing model complexity, it was necessary to introduce an object-oriented programming in FORTRAN like described in Decyk (Decyk, et al., 1997). The philosophy of the new Mohid model (Miranda, et al., 2000), further on simple designated Mohid, permits to use the model in any dimension (one-dimensional, two-dimensional or three-dimensional). The whole model is programmed in ANSI FORTRAN 95, using the objected orientated philosophy.

---

REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

The subdivision of the program into modules, like the information flux between these modules was object of a study by the Mohid authors.

Mohid model is composed by over 40 modules which complete over 150 mil code lines. Each module is responsible to manage a certain kind of information. The main modules are the modules listed below. Another important feature of Mohid is the possibility to run nested models. This feature enables the user to study local areas, obtaining the boundary conditions from the “father” model. The number of nested models is just limited by the available computer power.

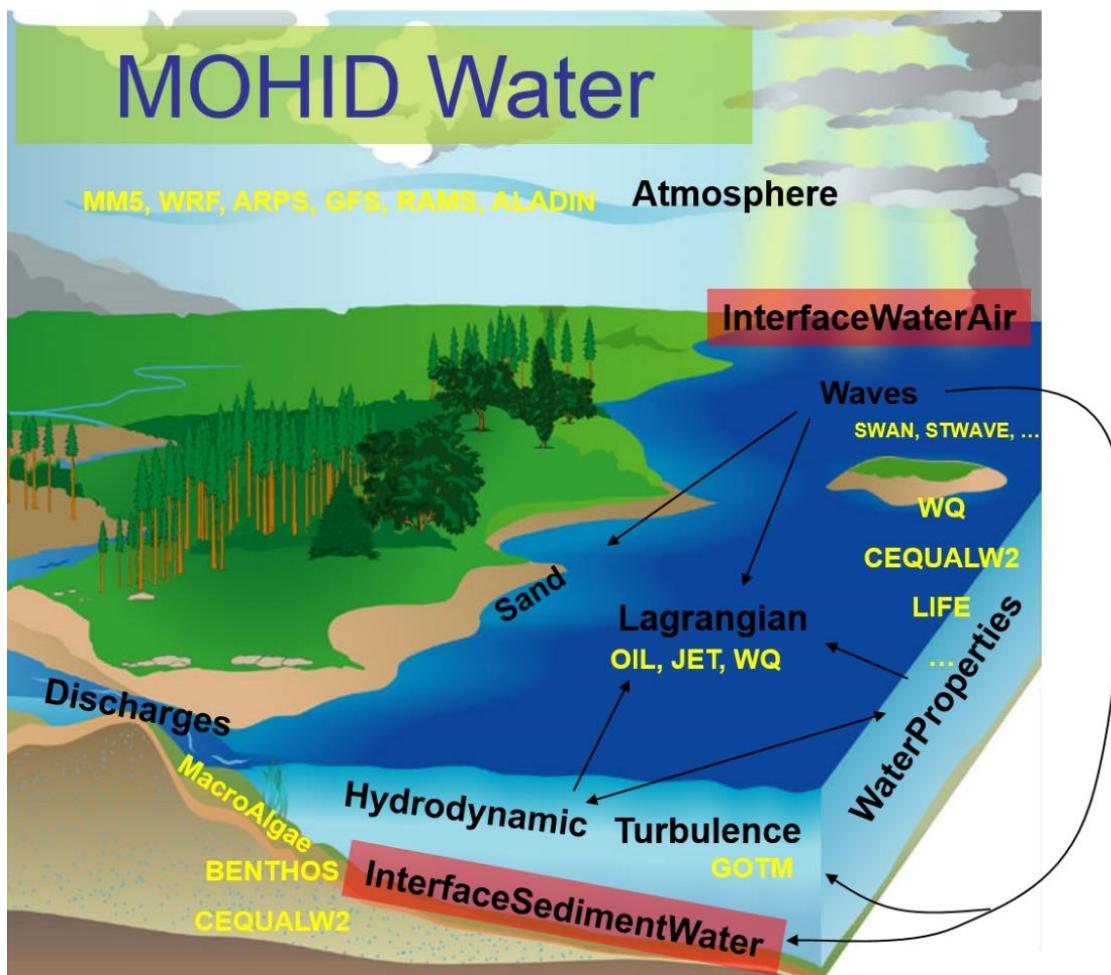


Figure 1. MOHID functioning scheme

## REPORTS



---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

The main MOHID modules are defined below:

*Model* This module manages the information flux between the hydrodynamic module and the two transport modules and the communication between nested models.

*Hydrodynamic* Full 3D dimensional baroclinic hydrodynamic free surface model. Computes the water level, velocities and water fluxes.

*Water Properties* Eulerian transport model. Manages the evolution of the water properties (temperature, salinity, oxygen, etc.) using a eulerian approach.

*Lagrangian* Lagrangian transport model. Manages the evolution of the same properties as the water properties module using a lagrangian approach. Can also be used to simulate oil dispersion.

*Water Quality* Zero-dimensional water quality model. Simulates the oxygen, nitrogen, and phosphorus cycle. Used by the eulerian and the lagrangian transport modules. Based on a model initially developed by EPA (Bowie, et. al., 1985).

*Oil Dispersion* Oil dispersion module. Simulates the oil spreading due thickness gradients and internal oil processes like evaporation, emulsification, dispersion, dissolution and sedimentation.

*Turbulence* One-dimensional turbulence model. Uses the formulation from the GOTM model.

*Geometry* Stores and updates the information about the finite volumes.

*Discharges* River or Anthropogenic Water Discharges

---

REPORTS



---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

The Lagrangian and oil dispersion modules were not used in this study given that the discharge was water.

The MOHID model has been applied to several coastal and estuarine areas and it has showed its ability to simulate complex features of the flows. Several different coastal areas have been modelled with MOHID in the framework of research and consulting projects.

Along the Portuguese coast, different environments have been studied, including the main estuaries (Minho, Lima, Douro, Mondego, Tejo, Sado, Mira, Arade and Guadiana) and coastal lagoons (Ria de Aveiro and Ria Formosa), INAG [2001]; Martins et al. (2000). The model has been also implemented in most Galician Rías: Ría de Vigo by Taboada et al., (1998), Montero, (1999) and Montero et al. [1999], Ría de Pontevedra by Taboada et al. [2000] and Villarreal et al. [2000] and in other Rías by Pérez Villar et al [1999].

Far from the Atlantic coast of the Iberian Peninsula, some European estuaries have been modelled - Western Scheldt , The Netherlands, Gironde, France by Cancino and Neves, [1999] and Carlingford, Ireland, by Leitão, [1997] - as well as some estuaries in Brazil (Santos SP and Fortaleza).

Regarding to open sea, MOHID has been applied to the North-East Atlantic region where some processes including the Portuguese coastal current, Coelho et al. (1994), the slope current along the European Atlantic shelf break, Neves et al. (1998) and the generation of internal tides, Neves et al. (1998) have been studied and also to the Mediterranean Sea to simulate the seasonal cycle, Taboada, (1999) or the circulation in the Alboran Sea, Santos, (1995).

---

REPORTS



---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

More recently MOHID has been applied to the several Portuguese freshwater reservoirs Monte Novo, Roxo and Alqueva, (Braunschweig, 2001), to study the flow and water quality.

The hydrodynamic model solves the primitive continuity and momentum equations for the surface elevation and 3D velocity field for incompressible flows, in orthogonal horizontal coordinates and generic vertical coordinates, assuming hydrostatic equilibrium and Boussinesq approximations.

Module WaterProperties is the 3D eulerian transport module included in MOHID. Module WaterProperties is responsible for computing the properties evolution in the water column. To do so, this module uses other modules, responsible for specific processes like Module AdvectionDiffusion, which computes properties transport, or Module WaterQuality which is one of the three available modules to compute biogeochemical processes, and so on. MOHID is prepared to simulate properties such temperature, salinity, cohesive sediments, phytoplankton, nutrients, contaminants, etc.

Density is computed depending on salt, temperature, and pressure, by the UNESCO equation of state (UNESCO, 1981). The model uses an ADI (Alternate Direction Implicit) time discretization scheme which minimizes stability restrictions and is defined in an Arakawa-C type grid. In the bottom, shear stress can be computed with the assumption of a logarithmic velocity gradient.

---

REPORTS



### 3. INPUT DATA

#### 3.1. FLOW DESIGN PARAMETERS

Following the desalination process study by the plant engineering team, the volume of water for the two possible recovery varies as follows considering a recovery during the process:

- Case 1: Recovery = 42%; Brine discharge = 48,756 m<sup>3</sup>/h
- Case 2: Recovery = 45%; Brine discharge = 43,152 m<sup>3</sup>/h

#### 3.2. GRID REFERENCE

The horizontal coordinates used are Easting and Nothings relative to UTM WGS84 Zone 36 N.

The vertical datum is relative to Lowest Atmospheric Tide (LAT), which is assumed to be equal to the Datum of Soundings at the site.

#### 3.3. BATHYMETRY

The bathymetry was obtained from different sources.

The detailed bathymetry is obtained from local surveys (see Figure 2).

This bathymetry is complemented with a major-scale bathymetry obtained from GEBCO. The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) consists of an international group of experts who work on the development of a range of bathymetric data sets and data products, with the aim of providing the most authoritative, publicly available bathymetric data sets for the world's oceans.



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

GEBCO operates under the joint auspices of the International Hydrographic Organization (IHO) and the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO.

The GEBCO\_2014 Grid is a continuous terrain model for ocean and land with a spatial resolution of 30 arc seconds.

The GEBCO information used in the study is shown in Figure 3.

The vertical datum and chart datum are at the same level as the Lowest Astronomical Tide (LAT), which is the lowest levels which can be predicted to occur under average meteorological conditions.

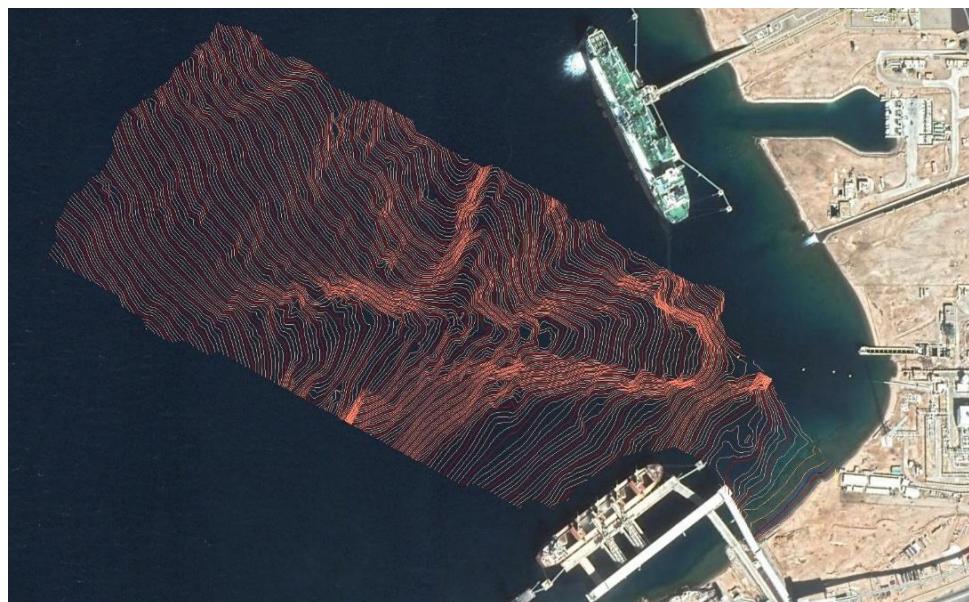


Figure 2. Bathymetry in the Project Area.

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

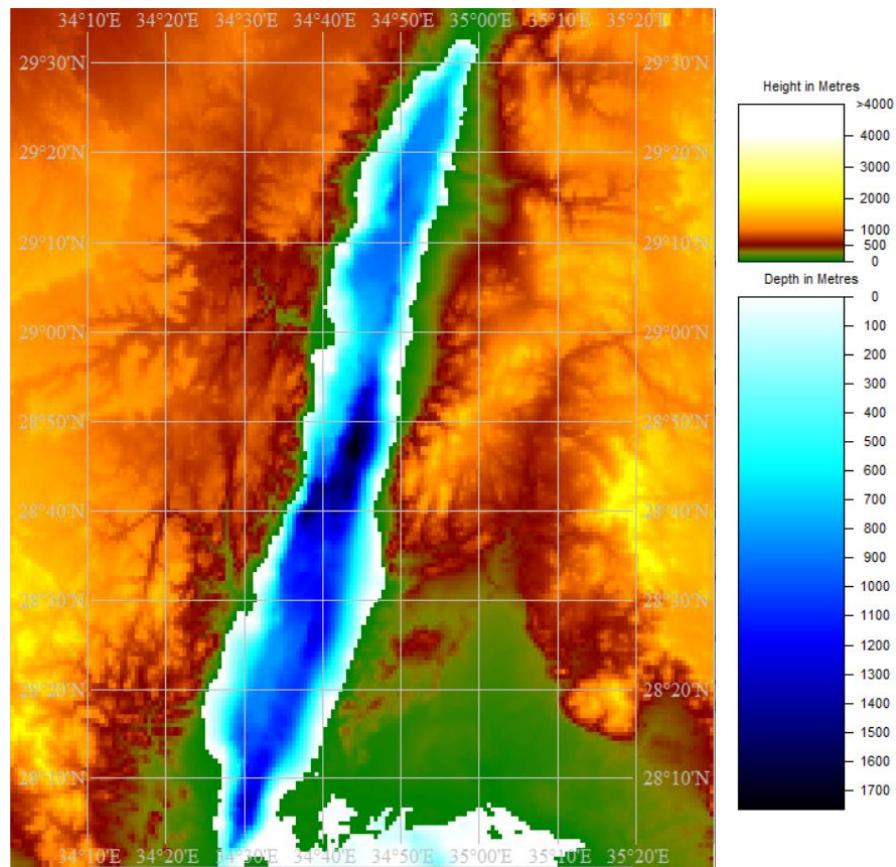


Figure 3. GEBCO bathymetry in the Gulf of Aqaba.

### 3.4. DIFFUSER AND INTAKE DEFINITION

Regarding the diffuser design, two cases were analyzed based on the recovery rates.

Diffuser system features for each case are shown below:

| Diffuser system features -Case 1    |          |
|-------------------------------------|----------|
| Parameters                          |          |
| Number of Diffusers                 | 30       |
| Diameter of the Diffuser Port (ID): | 300 mm   |
| Velocity of each diffuser:          | 6.40 m/s |
| Separation between diffusers:       | 15.5 m   |
| Diffuser angle to the horizontal:   | 60 °     |

---

REPORTS



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

| Diffuser system features -Case 1 |        |
|----------------------------------|--------|
| Parameters                       |        |
| Depth of seabed at the diffusers | - 25 m |

As can be seen, 30 outlet ports with an ID 300 mm comprises the diffuser system. Each port is separated 15.50 m (total length of 217 m). Outlet ports are arranged by pairs, back to back.

For this case, the **dilution achieved is 1: 68.60** at the end of the near field region (spreading layer) which is higher than required. The salinity obtained at the same point is 41.20 psu which represents an increment of **1.06%** concerning seawater salinity, resulting lower than the admissible salinity (2% more than ambient salinity, i.e 41.616 psu).

| Diffuser system features -Case 2    |          |
|-------------------------------------|----------|
| Parameters                          |          |
| Number of Diffusers                 | 30       |
| Diameter of the Diffuser Port (ID): | 300 mm   |
| Velocity of each diffuser:          | 5.65 m/s |
| Separation between diffusers:       | 12.70 m  |
| Diffuser angle to the horizontal:   | 60 °     |
| Depth of seabed at the diffusers    | - 25 m   |

Same concept is used for case – 2 diffuser set-up in terms of total number of diffusers and outlet port inner diameter.

For this case, the **dilution achieved is 1: 56.90** at the end of the near field region (spreading layer) which is higher than required. The salinity obtained at the same point is 41.38 psu which represents an increment of **1.44%** concerning seawater salinity, resulting lower than the admissible salinity (2% more than ambient salinity, i.e 41.616 psu).

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

More details are given in Report n° 3.

In Figure 4 are shown the locations of the four intake towers and diffusers line-up.



Figure 4. Intake and outfall location.

### 3.5. SEA WATER SALINITY AND TEMPERATURE

Ambient seawater temperatures were set to 28°C and a seawater salinity of 40.8 psu was used for this study, according to the Near Field study. The excess salinity of the discharge as compared to the seawater would be 33.4 psu. The discharge value for salinity will be 70.34 psu for 42% recovery and 74.18 psu for 45% recovery.

There will be a discharged excess temperature as compared to the seawater of 1°C, i.e., a temperature of 29°C.

---

REPORTS

---



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

### 3.6. TIDES

The definition of the tide around the domain must be provided, indicating the tidal harmonic constants. Thus, MOHID simulates the tidal curve at each instant throughout the domain.

Harmonic constituents are the harmonic elements in a mathematical expression for the tide producing force and in the corresponding formula for the tidal curve. Each constituent represents a periodic change or variation in the relative positions of the earth, moon, and sun. The descriptions of the main harmonics are:

- 2N2: Lunar elliptic semidiurnal second order
- K1: Lunar diurnal
- K2: Lunisolar semidiurnal
- M2: Principal lunar semidiurnal
- M4: Shallow water overtides of principal lunar
- MN4: Shallow water quarter diurnal
- N2: Larger lunar elliptic semidiurnal
- O1: Lunar diurnal
- P1: Solar diurnal
- Q1: Larger lunar elliptic diurnal
- S2: Principal solar semidiurnal
- MM: Lunar monthly
- MF: Lunisolar fortnightly
- S1: Solar diurnal



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

For informational purposes, the main harmonic constituents are provided along the external domain, and the model reproduces the propagation of the tidal wave (see Table 1).

| TIDAL HARMONICS |               |           |
|-----------------|---------------|-----------|
| Constituent     | Amplitude (m) | Phase (°) |
| M2              | 0.267647      | 114.246   |
| S2              | 0.0612594     | 150.149   |
| K1              | 0.0516119     | -159.563  |
| K2              | 0.0116964     | 143.981   |
| N2              | 0.0886161     | 85.482    |
| 2N2             | 0.00848642    | 74.5408   |
| O1              | 0.0135232     | 137.004   |
| Q1              | 0.0196409     | -165.013  |
| P1              | 0.00629927    | 31.4985   |
| Mf              | 0.00549262    | 56.1286   |
| Mm              | 0.00212409    | 30.0003   |
| Mtm             | 0.00182196    | 69.5992   |
| MSqm            | 0.000274458   | 73.154    |

Table 1. Tidal harmonics at the entrance of the Gulf of Aqaba.

The FES2014 database has been used, which facilitates with a resolution of  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$  the main tidal harmonics throughout the world.

FES2014 was developed by Legos and CLS Space Oceanography Division and distributed by Notice, with the support of Cnes.

To correctly simulate the tidal wave, it is necessary to force the model from the limits of the outer mesh, using multiple points from where the model interpolates at each input node. In this case, the external domain includes the Egyptian and Saudi coasts and the full Gulf of Aqaba. As the Gulf is quite narrow, the location of these points is set on the entrance of the Gulf, where it is connected to the Red Sea.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

The variation in the tidal surge along the Red Sea and the Gulf of Aqaba, produces several oscillations over the MSL among the year that are difficult to reproduce in a numerical model, therefore, only the astronomical tides obtained from FES2014 has been reproduced (see Figure 5).

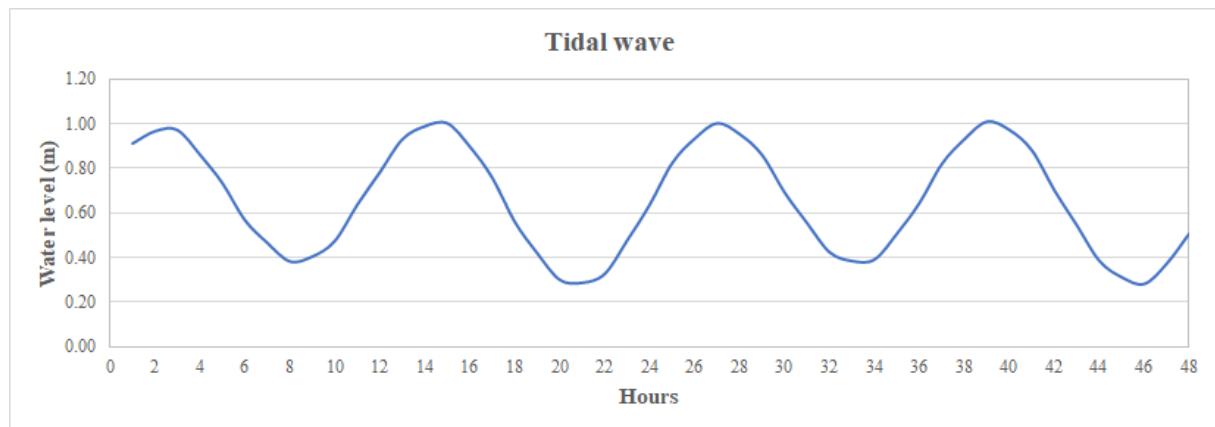


Figure 5. Tidal wave obtained from MOHID at the diffuser point.

### 3.7. WIND

Wind information and other transferred met-ocean dataset are provided by a CFSR node as hourly information at a Southwest location offshore Aqaba, on the Gulf of Aqaba (Lon=34.8°E, Lat=29.2°N).

CFRS is a third-generation reanalysis global product, which offers high accuracy wind dataset for the period from 1979 until at a spatial resolution of 0.2°. The metadata information contains hourly time series of offshore wind:

- W: wind at 10 metres height (m/s)
- $\Theta_{Wind}$ : Mean wind direction (degr., meteorological convention)

Wind speed roses are shown in Figure 6, in Figure 7 and in Figure 8 for the representative periods of summer and winter, and for the totality of data in an

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

annual wind speed rose. There are no substantial differences between the winter and the summer rose, so no seasonality is considered for the study.

Finally, the scatter plot of wind speed and wind direction of the total annual data is shown in Figure 9.

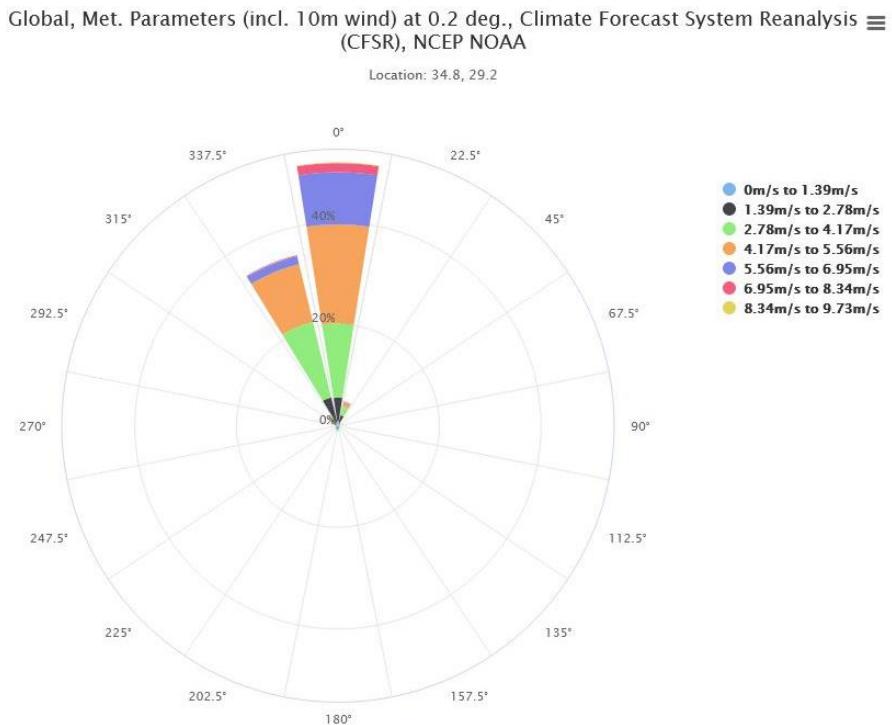


Figure 6. CFSR wind speed rose, representative summer simulation period.

## REPORTS

---

**REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY**

Global, Met. Parameters (incl. 10m wind) at 0.2 deg., Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), NCEP NOAA

Location: 34.8, 29.2

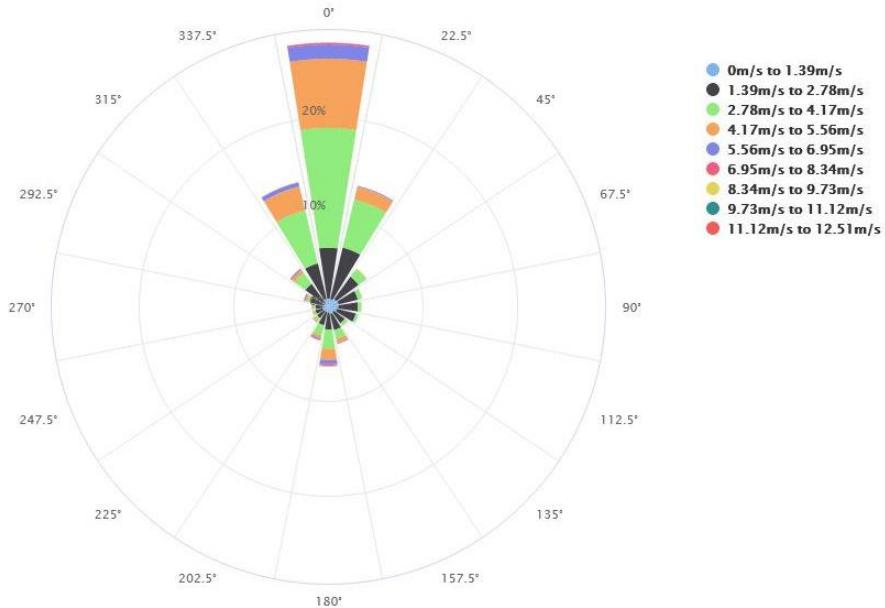
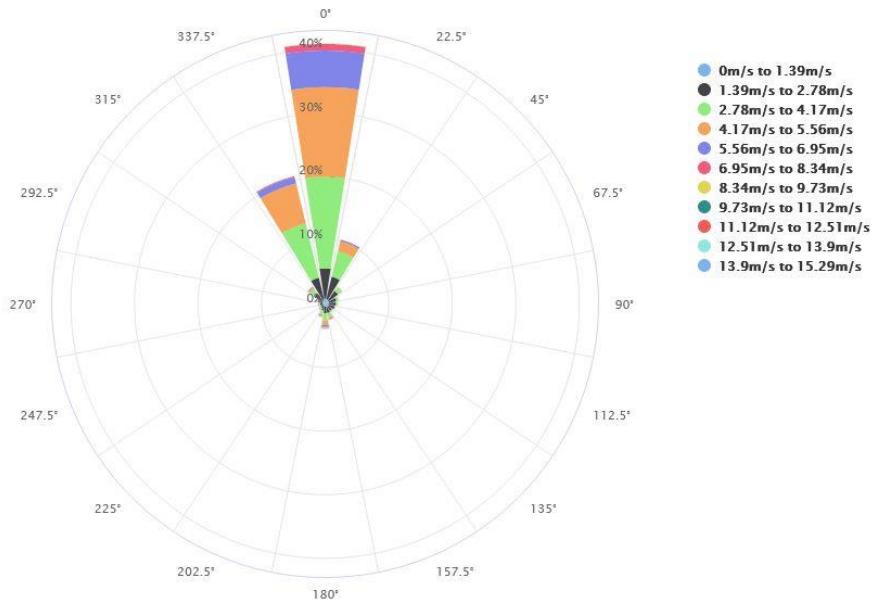


Figure 7. CFSR wind speed rose, representative winter simulation period.

Global, Met. Parameters (incl. 10m wind) at 0.2 deg., Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), NCEP NOAA

Location: 34.8, 29.2



Highcharts.com

Figure 8. CFSR wind speed rose, annual.

---

**REPORTS**

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

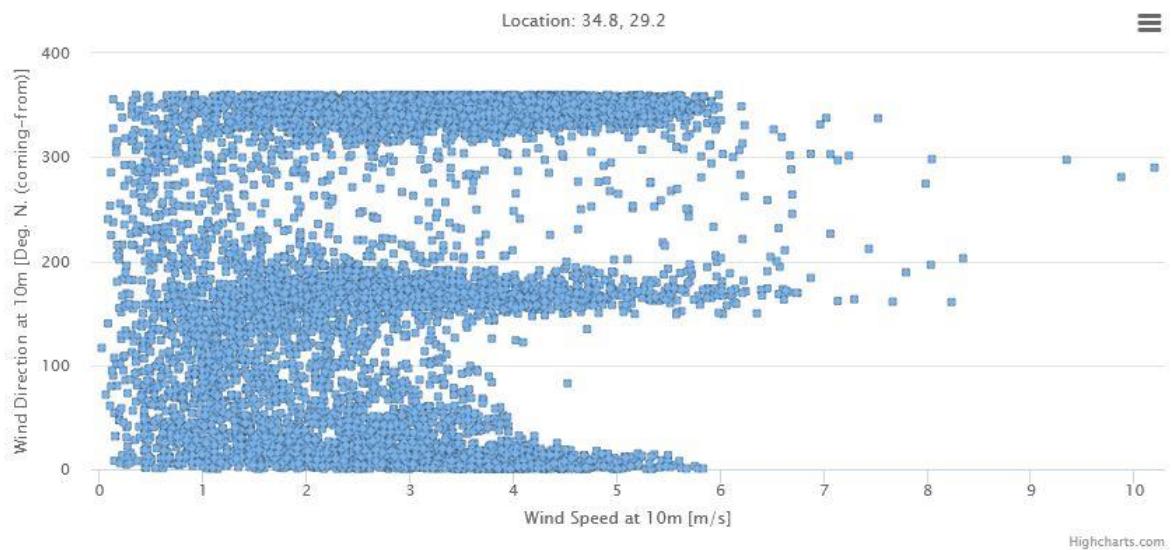


Figure 9. CFSR wind speed and direction scatter plot, annual.

It will be considered the hour-averaged daily wind for the simulations. Figure 10 to Figure 12 show the daily wind for the three different scenarios considered in the studio: mean wind from north, 90<sup>th</sup> percentile wind from north, and 90<sup>th</sup> percentile wind from south, respectively.

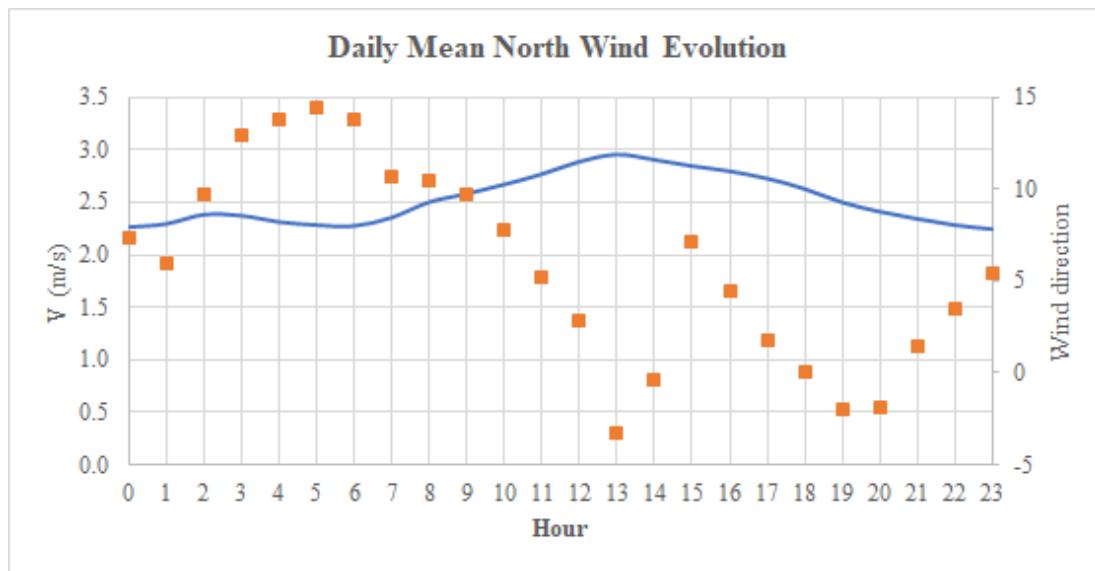
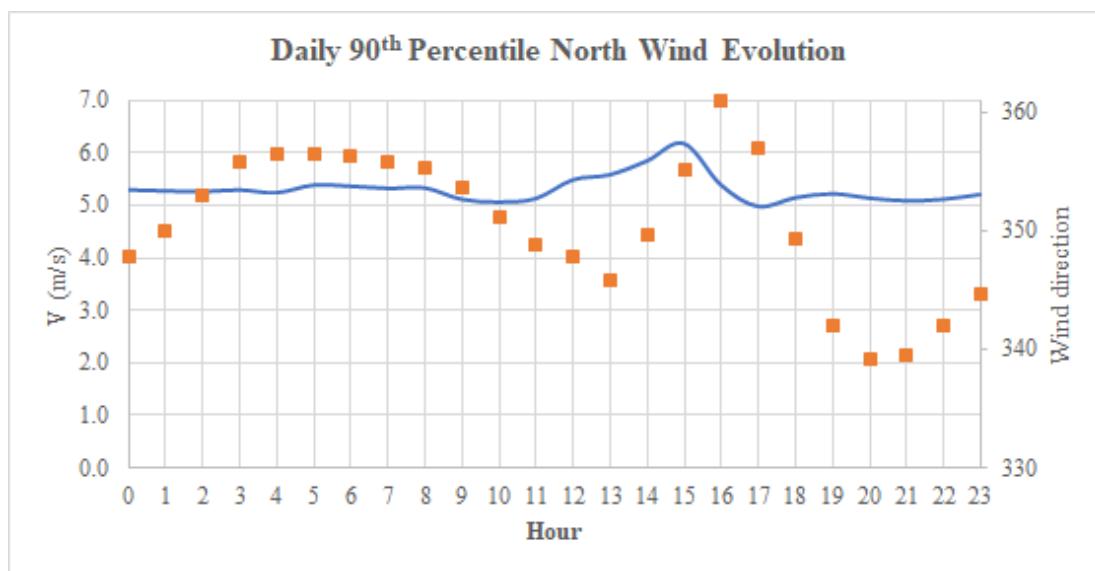
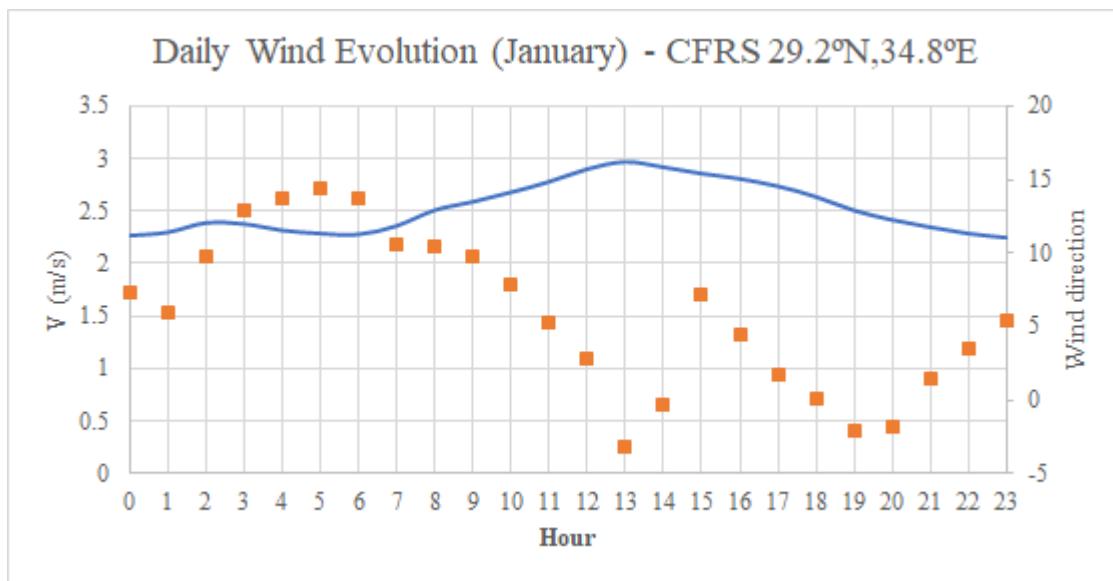


Figure 10. CFSR wind speed hourly series, representative mean wind from north scenario.

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

Figure 11. CFSR wind speed hourly series, representative 90<sup>th</sup> percentile wind from north scenario.Figure 12. CFSR wind speed hourly series, representative 90<sup>th</sup> percentile wind from south scenario.



---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

### 3.8. ENVIRONMENTAL REGULATIONS

Near Filed Study and diffuser design justify the compliment of the Environmental Regulations: the maximum admissible increase of salinity concerning ambient salinity (seawater) is 2% at 100 m from the discharge point.

---

REPORTS



## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

## 4. FAR-FIELD DISPERTION AND RECIRCULATION

### 4.1. MODEL SET-UP

This section describes the calculation methodology used with the MOHID model in this study.

Four nested grids will be used.

A first grid will be used (the "external" domain), which covers the Gulf of Aqaba of some 68,400 m x 171,000 m with a resolution of 900x900m. This first model mesh is resolved in 2D given that it will be used to resolve the tide wave in an area that is extensive enough to consider the spatial variability thereof.

Later, a nested model ("intermediate" model) is defined with a 36 Km x 36 Km mesh, expanding the grid resolution by a ratio of 1:5, all the way to 180x180m. The domain is resolved in 2D. See Figure 13.

An additional nested model ("approximation" model) is defined with a 7.8 Km x 7.8 Km mesh, expanding the grid resolution by a ratio of 1:3, all the way to 60x60m. The domain is resolved in 3D using 5 vertical layers.

Finally, a "local" domain is added measuring approximately 2 Km x 2 Km which covers the outfall and intake area, with a certain margin to study the outfall in detail. The grid resolution is about 20x20 m, in 3D using 12 vertical layers. See Figure 13.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

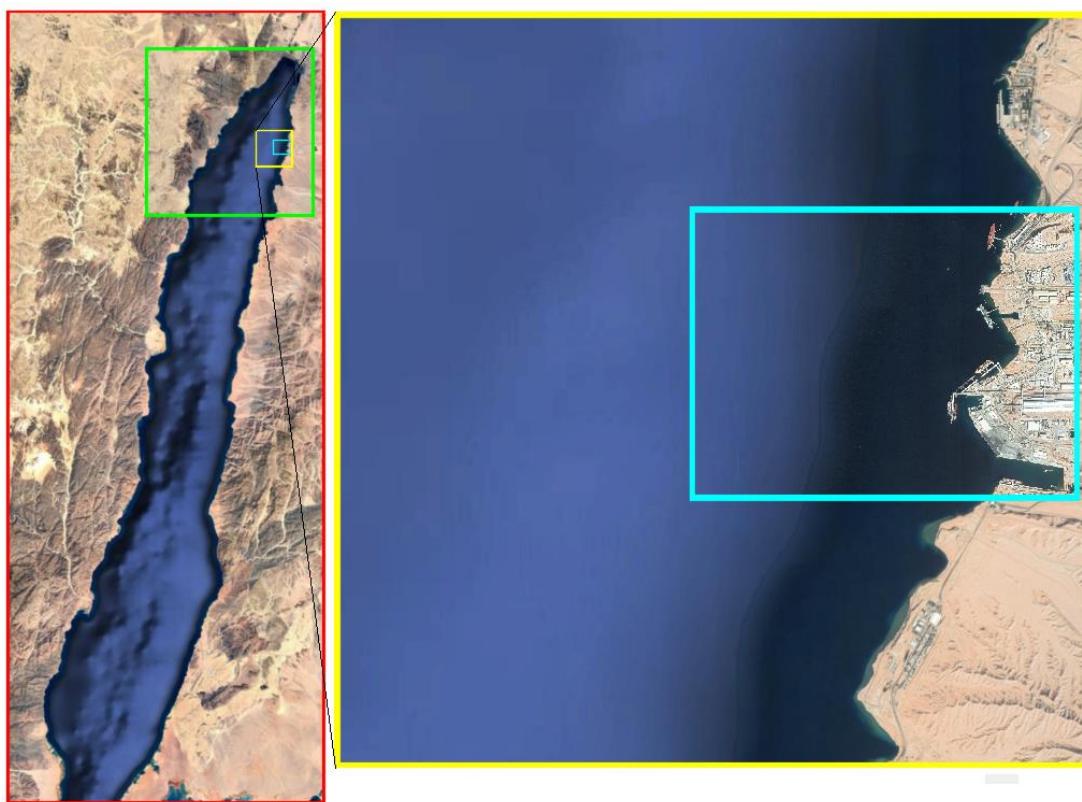


Figure 13. External, intermediate, approximation and local domains.

The vertical discretization of the MOHID Model is resolved with the Geometry Module which makes it possible to divide the water column into different types of vertical coordinates including the most common Cartesian and Sigma ones. In this case, the "sigma" discretization was chosen (see Figure 14).

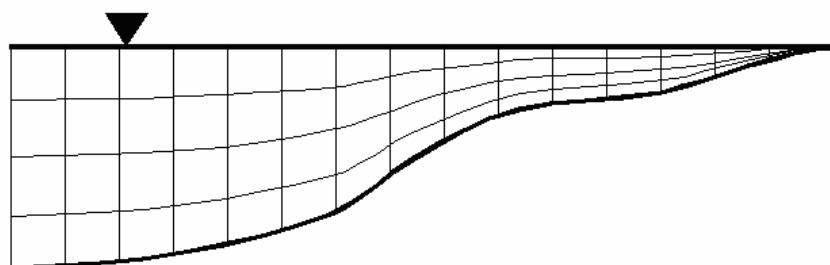


Figure 14. Scheme of sigma coordinates.

## REPORTS



---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

The size of each one of the 12 layers is taken from the following total percentage of the water depth:

- Local model: 4.5% 5.5% 5.5% 6.5% 6.5% 7.5% 8.5% 9.5% 10.5% 12.5% 13.5%.

The reason for nesting four domains is that a fine discretization makes no sense in major areas where the bathymetric resolution is weak (nautical chart) and where it is also not necessary to refine the hydrodynamic resolution.

For this reason, a thicker grid is used outside of the area of interest where only GEBCO data are available as opposed to where the outfall and intake are located and where more accurate bathymetric data are available. Moreover, it significantly reduces the calculation time.

Once the grids are defined and the bathymetry for the area is available, the depth of each mesh node is calculated via interpolation. Thus, the bathymetry value is obtained for each point of the grid and this is known as "grid data".

As an example, what follows is an image with this terrain model for the "local" domain used.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

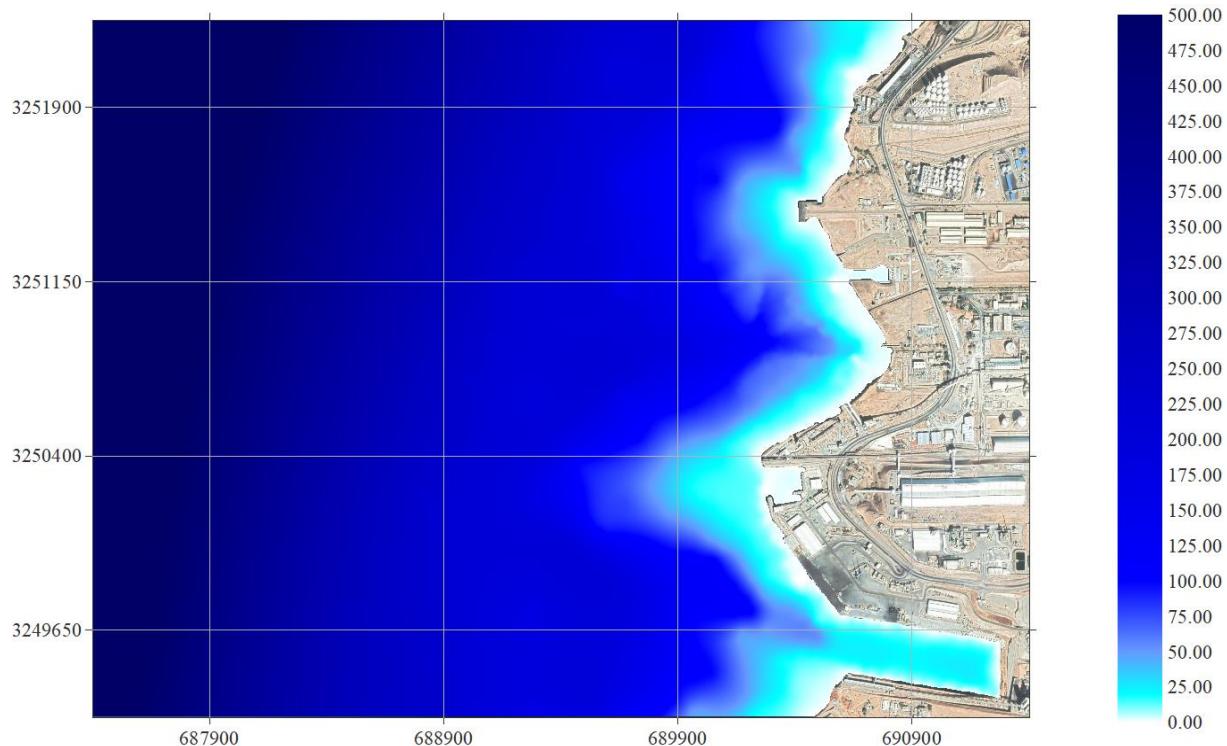


Figure 15. Local domain used in the study.

After the bathymetry is available for the area, the model must be configured by defining the hydrodynamic conditions for the study. Once they are defined, the brine discharge is added to the domain in the plan detail.

The study philosophy is to simulate the most significant hydrodynamic conditions for the tide and wind.

The simulations will be done over 2 days in each scenario, which is considered adequate time to stabilize the simulation. Mean conditions for a North wind will be simulated since it has the highest frequency, along with two more combinations of intense winds from the North and from the South belonging to the 90<sup>th</sup> percentile. This will be done for the two cases of recovery proposed.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

## 4.2. HYDRODYNAMICS IN THE AREA

The hydrodynamics in the area is conditioned by the existing wind and tide as there is no other important agent that affects the current.

The velocity and direction of currents are variable throughout the day due to the flood tide and ebb tide times vary over the course of the simulation and do not always coincide with the same wind. The wind-induced current can be rather important in the layers closest to the surface, especially in periods of strong wind intensity. An example of the MOHID results considering strong winds is shown in Figure 16, where the hydrodynamics on the surface layer are clearly governed by the south wind induced forcing.

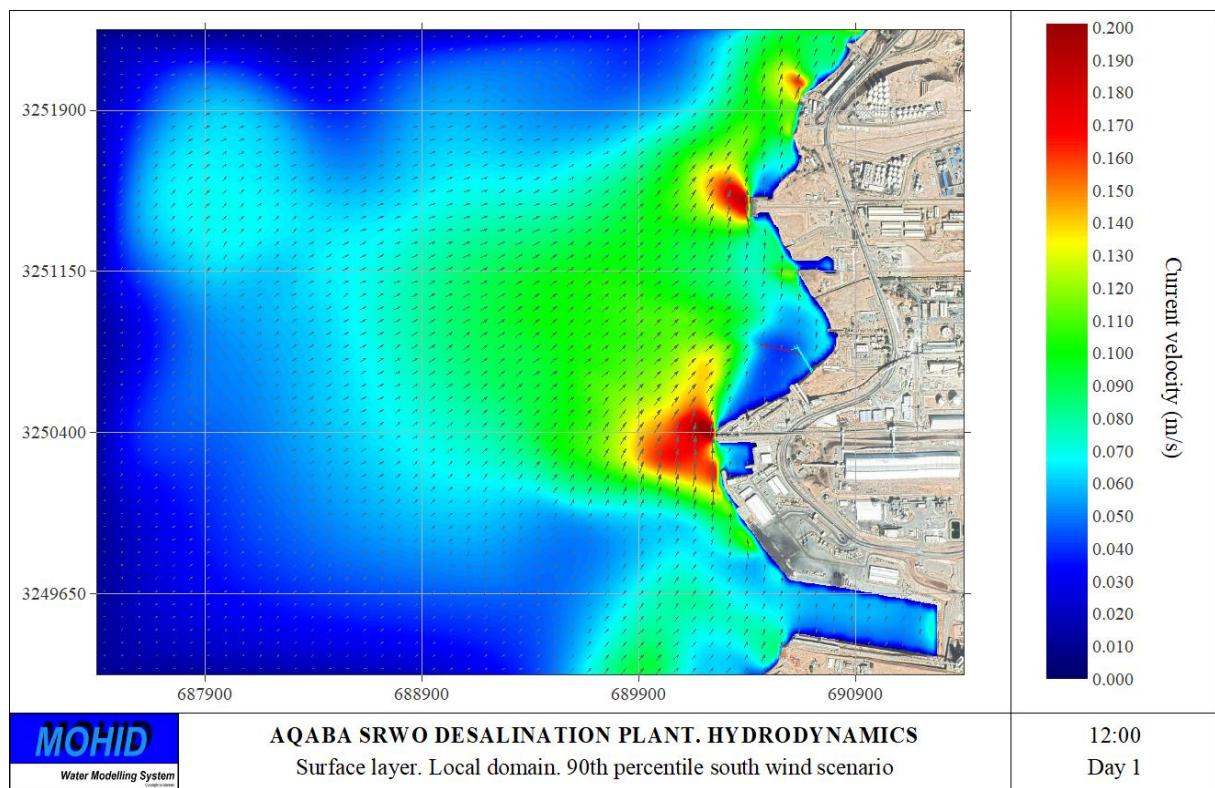


Figure 16. Hydrodynamics at the surface, induced by strong south winds.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

Due to the Coriolis effect, this current deviates with respect to the wind speed on the surface. According to Ekman's Theory, the current turns toward the bottom, forming a spiral.

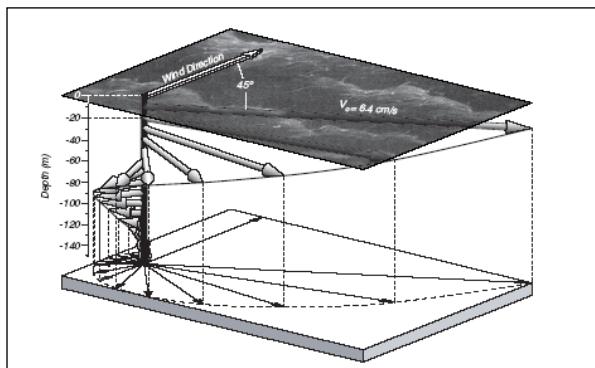


Figure 17. Typical structure of the wind speed profile (Ekman's Theory)

The wind-induced current speeds in the lower layer (desalination plan outfall area) are very low and almost unnoticeable due to the fact that the values get lower, the deeper down. The wave-induced current at these depths is null since there is no break process. Again, the tide-induced current at these depths is quite weak or almost null.

Since the currents on the bottom are so low, the typical behavior occurs once the brine discharge outcomes the diffuser. This behavior is described in the laboratory studies carried out by several organizations, including the Spanish CEDEX. A baroclinic current arises due to the greater density of the water discharged, forming a bottom current that runs along the maximum slope on the bottom. As will be seen below, in the next figure, the discharge "ends up forming a layer that is generally hyperdense which flows and spreads along the bottom, tending to go downwards in the direction of the maximum slopes". In this case, the currents are baroclinic, caused by the hypersaline discharge with a direction towards the deepest area (see Figure 18). Other hydrodynamic results are summarized at the Addendum 1.

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

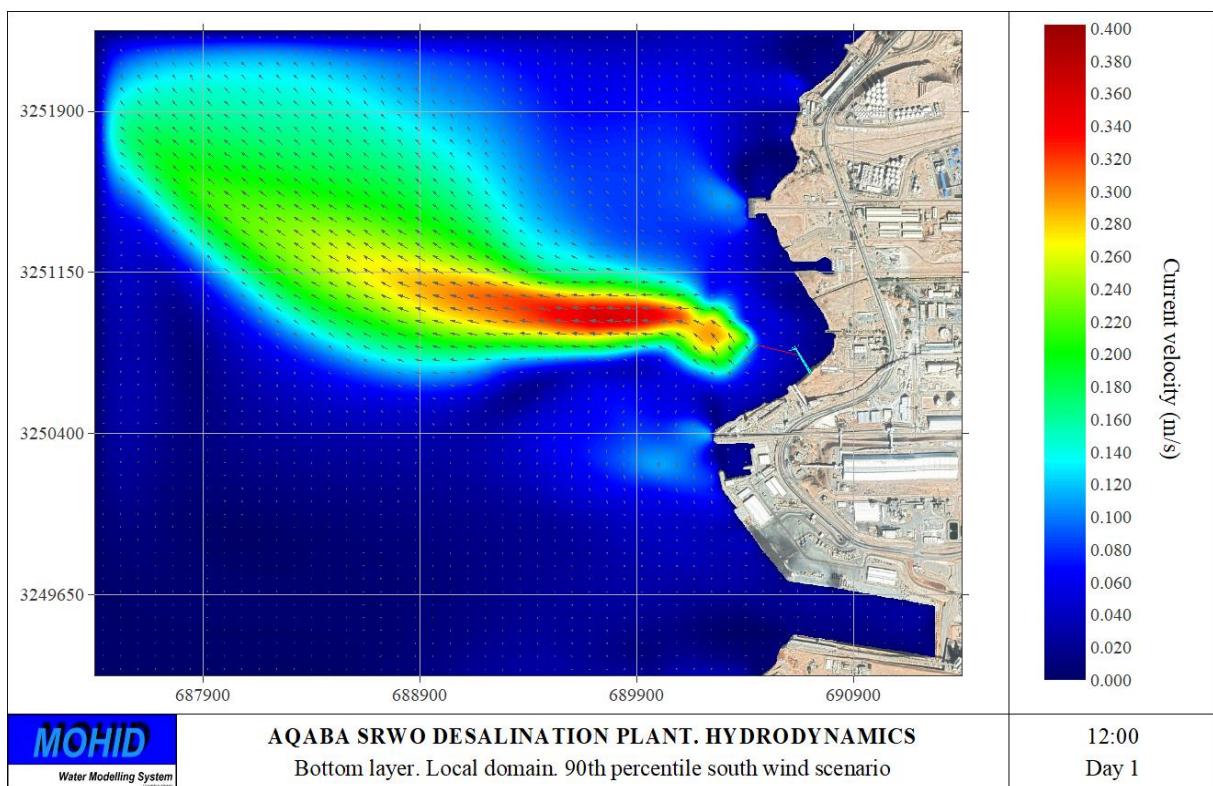


Figure 18. Hydrodynamics at the bottom, considering strong south winds but dominated by baroclinic processes.

### 4.3. DISPERSION & RECIRCULATION: DISCUSSION OF THE RESULTS

This section studies the dispersion of the brine discharged by the desalination plant for the two cases.

#### 4.3.1. Recovery 42%

Considering the three hydrodynamic scenarios simulated with the recovery of 42%, in Figure 19 the maximum salinity “footprint” can be appreciated, with the brine dispersion on the bottom layer, for the hydrodynamic simulation of a mean North wind. In the same way, the maximum salinity footprint for the 90<sup>th</sup> percentile for a North wind is shown in Figure 20, and the

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

maximum salinity footprint for the 90<sup>th</sup> percentile for a South wind is shown in Figure 21.

Salinity at different distances has been obtained too.

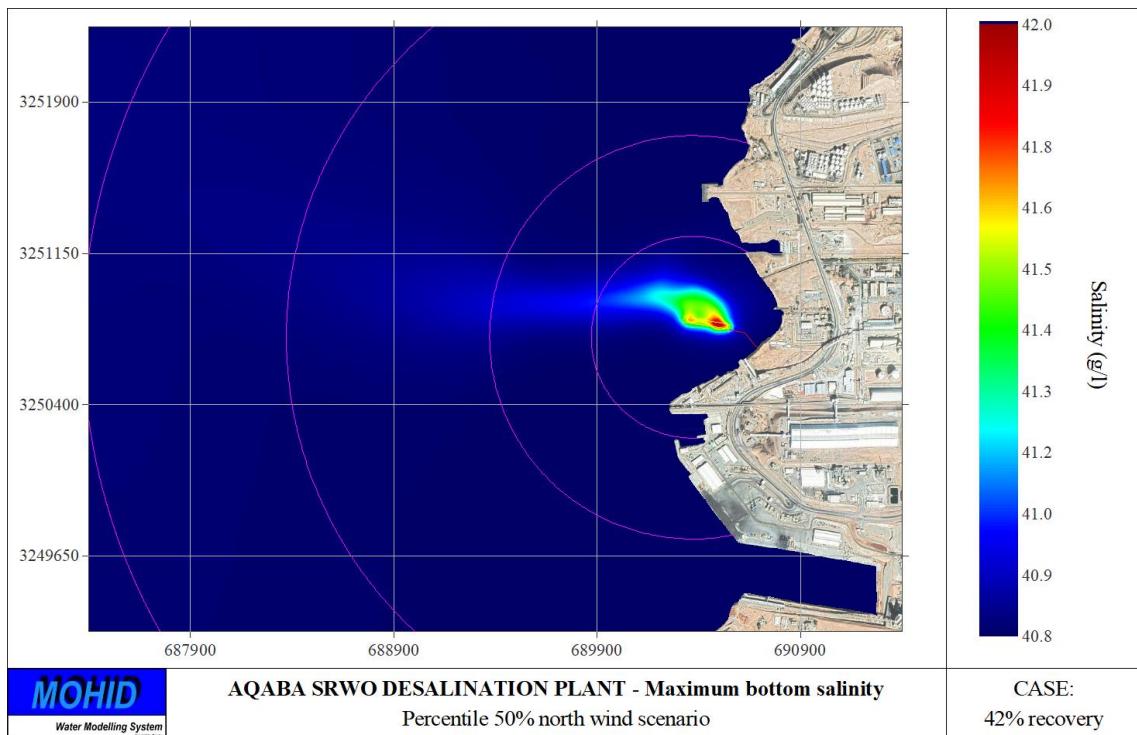


Figure 19. Maximum salinity at the bottom layer in the mean North scenario with 42% of recovery.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

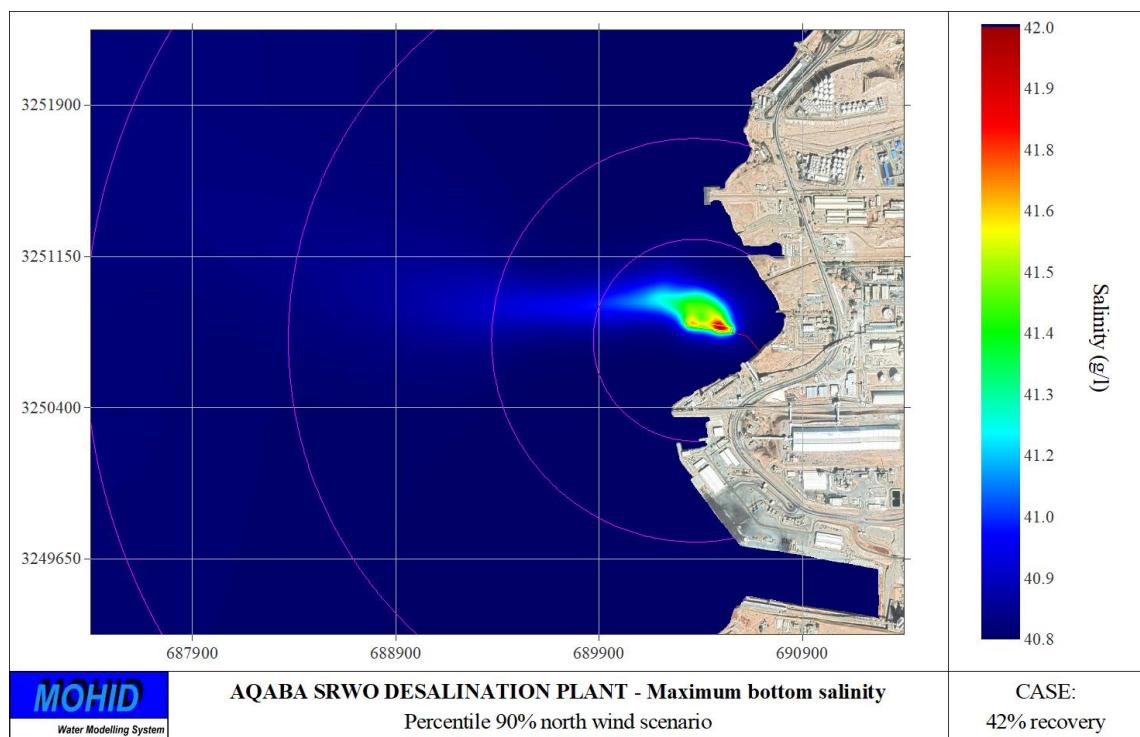


Figure 20. Maximum salinity at the bottom layer in the 90<sup>th</sup> percentile North scenario with 42% of recovery.

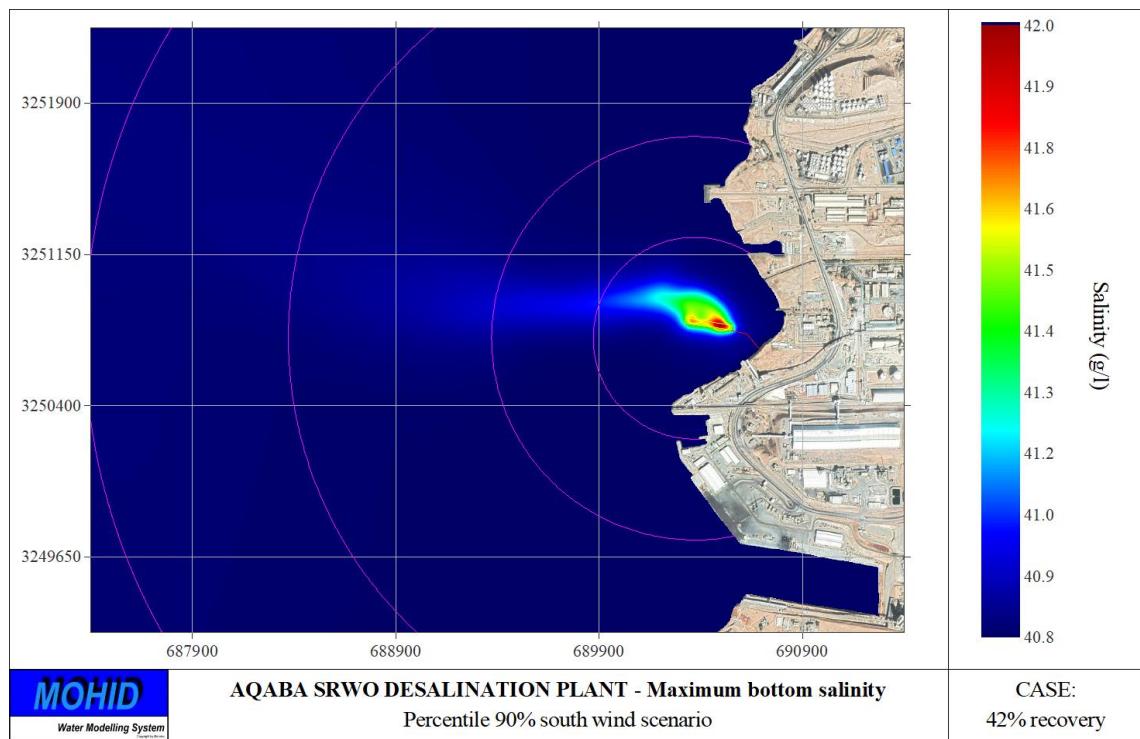


Figure 21. Maximum salinity at the bottom layer in the 90<sup>th</sup> percentile South scenario with 42% of recovery.

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

The figures for the three simulations are remarkably similar as the greatest conditioning factor is the baroclinic current generated by the discharge itself and not winds or tides. Thus, changing wind direction or intensity will not substantially affect the discharge dispersion and the three simulations represent all possible combinations of winds and tides. Brine plume will flow, then, following the bathymetry down slope, which, in this case, is really pronounced, letting the plume get dissolved with these high depths.

In Table 2, the value of the salinity for the end of near field, at 500 m away from the diffusers, at 1000 m, at 2000 m, and at 3000 m from the diffusers, can be found for the three scenarios simulated.

| Scenario                              | Maximum salinity (psu) from the diffusers |       |       |       |
|---------------------------------------|---|-------|-------|-------|
|                                       | 500m                                      | 1000m | 2000m | 3000m |
| Mean Wind North                       | 41.04                                     | 40.95 | 40.86 | 40.85 |
| 90 <sup>th</sup> Percentil Wind North | 41.04                                     | 40.95 | 40.85 | 40.85 |
| 90 <sup>th</sup> Percentil Wind South | 41.05                                     | 40.94 | 40.85 | 40.84 |

Table 2. Salinity at different distances from the diffusers with 42% of recovery.

Attending to the results at different distances from the diffusers, it can be observed that the wind conditions no affected to those results, and the maximum excess salinities above the ambient are generally small, getting less than 0.25 psu at 500 m, 0.15 psu at 1000 m, and 0.06 psu (or less) at major distances (2000 m and 3000 m)

Figure 22 shows the salinity evolution during the 2 days simulations for mean north wind scenario for the Intakes 1, 2, and 3. This is the scenario that causes the lowest mixing processes, but anyway, the excess salinity values at the intake positions are small (around 0.01 psu), so there will not be any recirculation. Other figures at the Addendum.

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

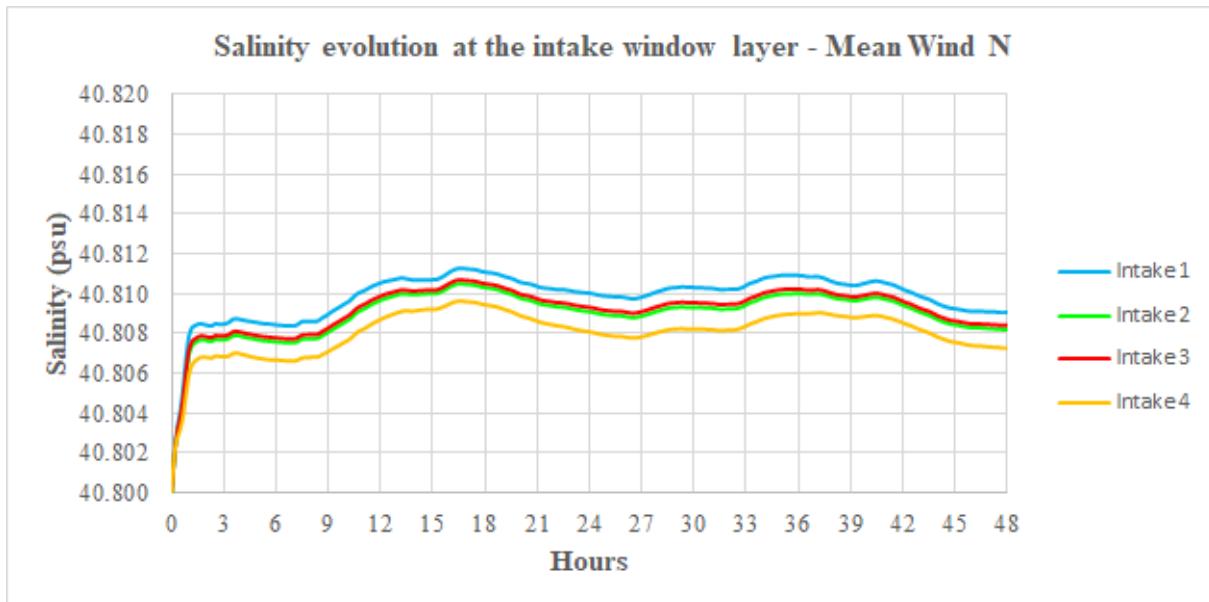


Figure 22. Salinity evolution at intake window with 42% of recovery.

#### 4.3.2. Recovery 45%

In the other side, for the three scenarios simulated with the recovery of 45%, in Figure 23 the maximum salinity footprint for the mean North wind can be appreciated. In the same way, the maximum salinity footprint for the 90<sup>th</sup> percentile for a North wind is shown in Figure 24, and the maximum salinity footprint for the 90<sup>th</sup> percentile for a South wind is shown in Figure 25.

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

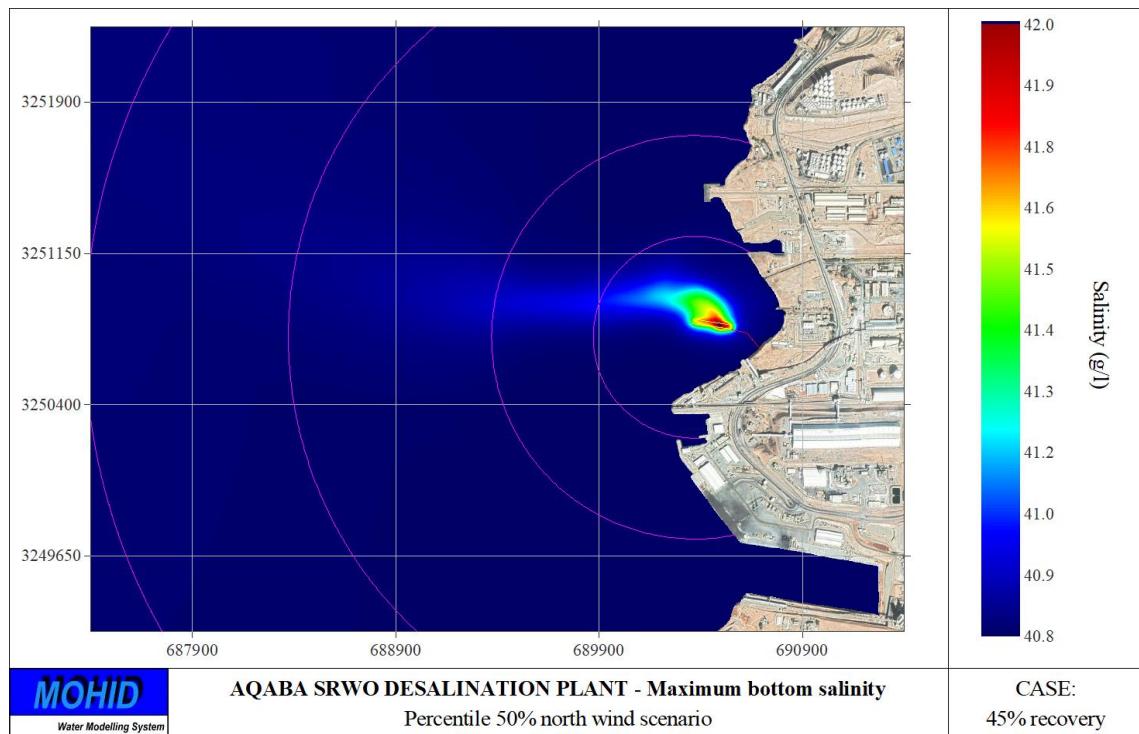


Figure 23. Maximum salinity at the bottom layer in the mean North scenario with 45% of recovery.

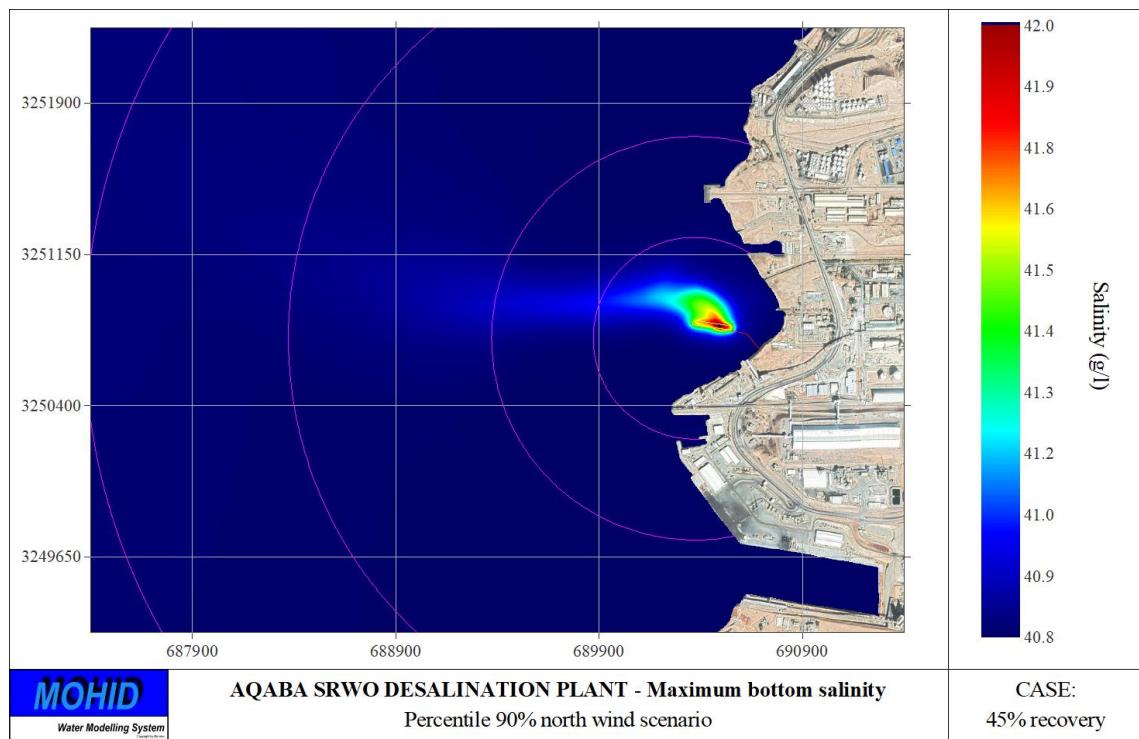


Figure 24. Maximum salinity at the bottom layer in the 90<sup>th</sup> percentile North scenario with 45% of recovery.

## REPORTS

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

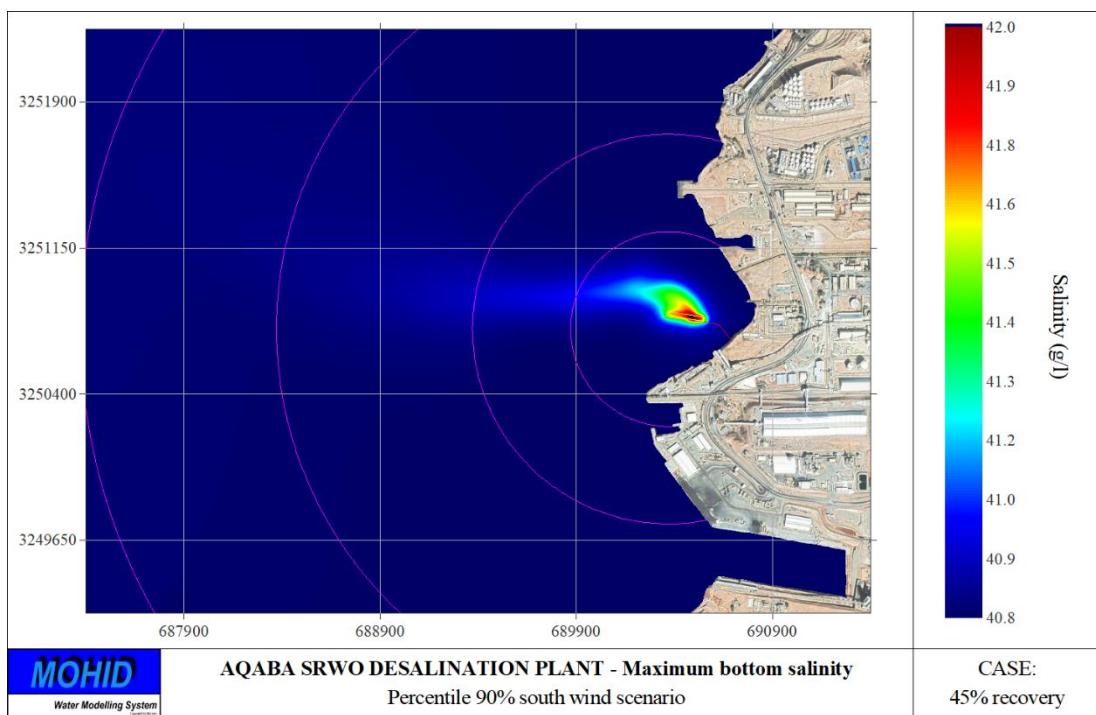


Figure 25. Maximum salinity at the bottom layer in the 90<sup>th</sup> percentile South scenario with 45% of recovery.

In Table 3, the value of the salinity for the end of near field, at 500 m away from the diffusers, at 1000 m, at 2000 m, and at 3000 m from the diffusers, can be found for the three scenarios simulated.

| Scenario                               | Maximum salinity (psu) from the diffusers |       |       |       |
|--|---|-------|-------|-------|
|  | 500m                                      | 1000m | 2000m | 3000m |
| Mean Wind North                        | 41.02                                     | 40.94 | 40.85 | 40.84 |
| 90 <sup>th</sup> Percentile Wind North | 41.02                                     | 40.93 | 40.85 | 40.84 |
| 90 <sup>th</sup> Percentile Wind South | 41.02                                     | 40.93 | 40.85 | 40.84 |

Table 3. Salinity at different distances from the diffusers with 45% of recovery.

Attending to the results at different distances from the diffusers, it can be observed that the wind conditions no affected to those results, and the maximum excess salinities above the ambient are generally small, getting around 0.22 psu

## REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

at 500 m, 0.14 psu at 1000 m, and 0.05 psu (or less) at major distances (2000 m and 3000 m)

Figure 26 shows the salinity evolution during the 2 days simulations for mean north wind scenario for the Intakes 1, 2, and 3. This is the scenario that causes the lowest mixing processes, but anyway, the excess salinity values at the intake positions are around 0.01 psu, so there will not be any recirculation. Other figures at the Addendum.

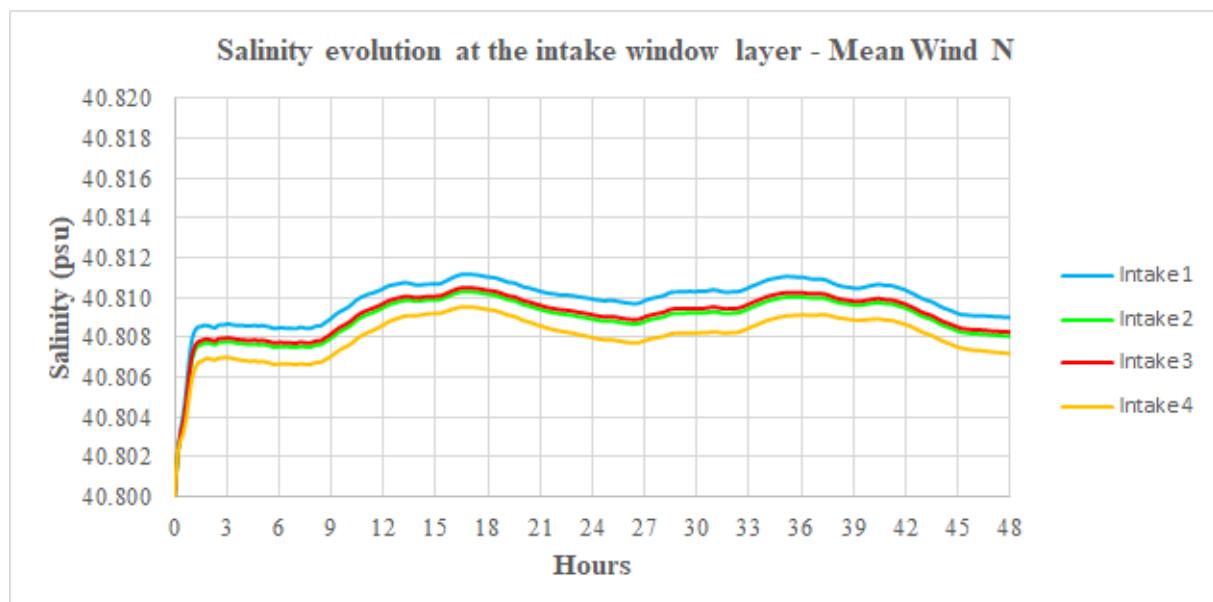


Figure 26. Salinity evolution at intake window with 45% of recovery.



## 5. CONCLUSIONS

This study offers a complete dispersion and recirculation study to design the new desalination plant in Aqaba, Jordan.

Two cases are proposed with different recovery rates: 42% y 45%.

The diffuser was previously designed using the BrIHne model and guarantees that the increase in salinity with respect to the seawater at the point of impact of the jet on the seabed complies with the Environmental Requirements.

Having designed the diffuser and the discharge plume in the near field, the MOHID model was used to calculate the dispersion and recirculation of the discharges for 3 hydrodynamic conditions: mean winds from the north, strong winds (90<sup>th</sup> percentile) from the north and from the south.

As a main conclusion, diffusers pour brine in a depth far enough from the intake towers to avoid brine recirculation. The excess salinity values obtained at the Intake positions are very low, so it can be assured that it will not be recirculation in any case. In addition, attending to the results at different distances from the diffusers, it can be observed that the mixture of brine with seawater occurs in a short distance with a very reduced impact.



TETRA TECH

AQABA SRWO DESALINATION PLANT

---

REPORT N° 4: DISPERSION AND RECIRCULATION STUDY

## **ADDENDUM 1: HYDRODYNAMICS AND DISPERSION FIGURES**

---

REPORTS