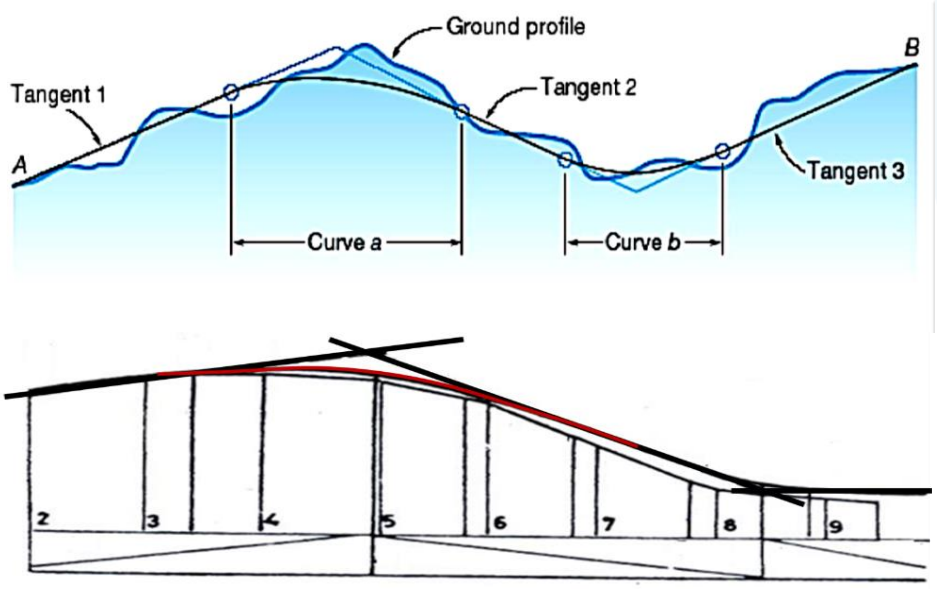
التخطيط الشاقولي للطريق

التخطيط الرأسي أو الشاقولي للطريق، هو وضع مسارات رأسية عبارة عن خطوط بميول معينة يتغير انحدارها ليكون هناك صعود وهبوط، كما تتقاطع مع بعضها في نقاط تقاطع تحدد خطوط التصميم الرأسي، ليتم تصميم منحنيات رأسية محدبة ومقعرة فيما بينها، ويعتمد تحديد الميول الطولية لهذه الخطوط ونوع وأطوال المنحنيات الرأسية بصفة أساسية على اعتبارات وافتراضات، تتعلق بخصائص كل من السائق والمركبة والطريق، وكذلك على متطلبات مسافات الرؤية اللازمة للتوقف.



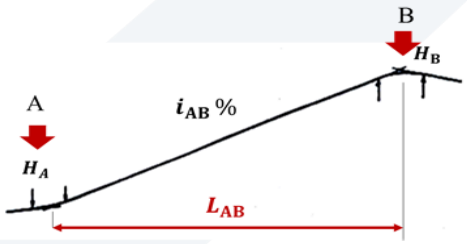
التخطيط الشاقولي للطريق

يتكون المضلع الشاقولي للطريق من استقامات شاقولية تشكل فيما بينها زاوية، يتم التغلب على انكساراتها، بتصميم منعطفات شاقولية في نقاط انكسار هذا المضلع، وعند اختيار المضلع الشاقولي للطريق في المناطق السهلية، قد يحدث تطابق شبه تام بين الأرض الطبيعية وخط المشروع للطريق، ويكون المسار الأقصر هو المستقيم الذي يصل بين النقطة A ذات الارتفاع H_A مع النقطة B ذات الارتفاع H_B من الأرض الطبيعية، ويكون المسقط الأفقي لهذا المستقيم هو L_{AB} ، أما ميل هذا المستقيم فهو:

$$i_{AB}\% = \frac{H_B - H_A}{L_{AB}} = \frac{H_{AB}}{L_{AB}}$$

وعندما نبدأ بدراسة مشروع طريق ما، يجب أن نحدد مسبقاً الميل الأعظمي الذي يمكن أن نعطيه للطريق في المقطع الطولي، وتحول هذا الميل يتبع إلى عناصر عديدة منها:

1- تكاليف المشروع التي تتزايد كلما كان الميل أكبر
2- سهولة السير التي تتحسن عندما نخفف الميل
3- شكل الأرض متعرجة أم مسطحة
4- تربة الطريق ومقاومتها
5- طبيعة القوافل والسيارات ثقيلة أم خفيفة

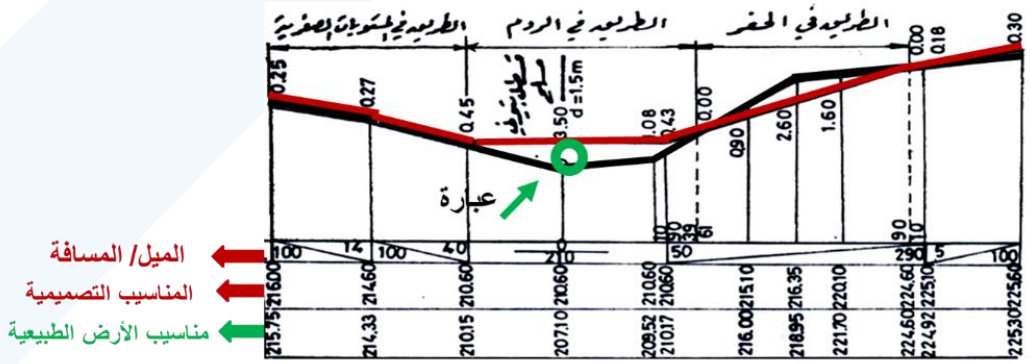


في الطرقات السريعة يجب أن تكون الميول أقل من الميول في الطرقات العادية،
والميول العظمى المسموحة على الطرق هي:

- **الطرق السريعة من 3- 4%**
- **الطرق الرئيسية في المناطق السهلية من 4 -5 %**
- **الطرق الرئيسية في الأراضي المتعرجة قليلاً من 5 -6 %**
- **الطرق الرئيسية في المناطق الجبلية حتى 8%**

وعند البدء بتصميم المنحني الشاقولي في المقطع الطولي يجب التحقق من مسافة الرؤية المناسبة، المتعلقة بالسلامة والقيادة المريحة، والتصريف الجيد للمياه المتجمعة من سقوط الأمطار.

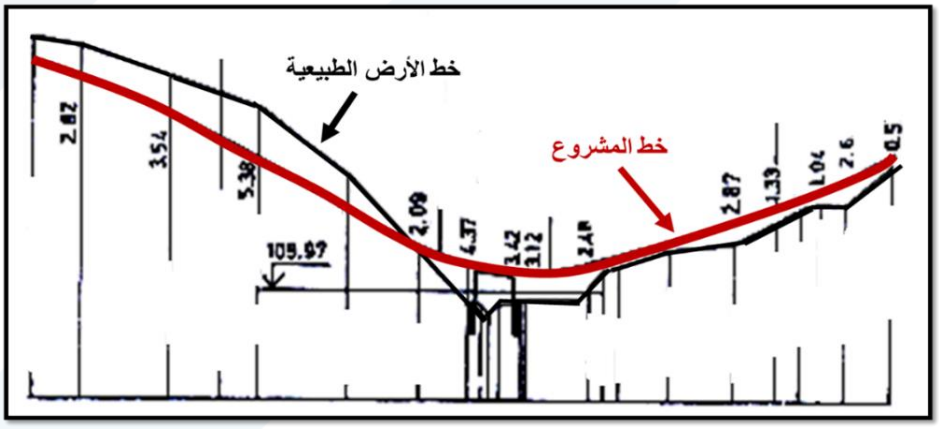
المقطع الطولي للطريق: هو المخطط الناجم عن إسقاط محور الطريق المنشور على مستوي شاقولي مع المحافظة على المناسيب، حيث يحدد بشكل أساسي قيم الميول الطولية لمختلف أجزاء الطريق، فعندما تزيد الميول الطولية لسطوح منحدرات الأرض الطبيعية عند محور الطريق عن الميول المناسبة والمسموح بها لحركة العربات، نلجأ إلى اختيار ميول طولية للطريق أقل من ميول سطح الأرض الطبيعية، وهذا ما ينتج عنه حفر جزء من التربة وردم جزء آخر.



وتختلف مناسيب سطح الطريق، نتيجة تشكل الحفريات والردميات عن مناسيب الأرض الطبيعية، ويحدد فرق الارتفاع بينهما، ارتفاع الحفر أو الردم في كل نقطة من نقاط الطريق، أما أهم العناصر التي تتحكم في المقطع الطولي فهي: طبوغرافية الأرض (الميول ضمن القيم المسموحة)، وصنف الطريق وبالتالي السرعة التصميمية، بالإضافة إلى المخطط الأفقي وتكاليف الإنشاء.

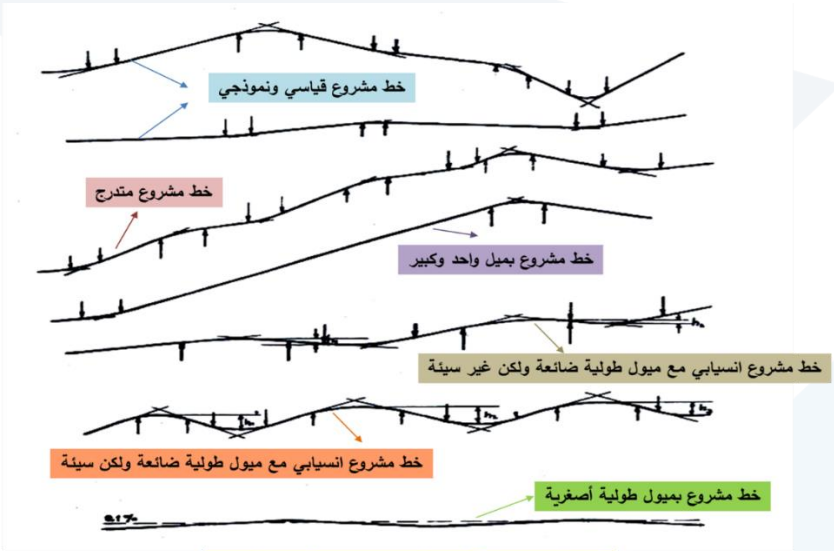
خط الأرض الطبيعية: هو الخط الذي يصل مناسيب الأرض الطبيعية في المقطع الطولي، ويرسم باللون الأسود.

خط المشروع: هو الخط التصميمي الذي يتوضع على طول الطريق في محور الجزء المعبد، والذي عليه تتخذ كافة العناصر الأفقية كالاستقامات والمنحنيات الأفقية، وهو يصل مناسيب سطح الطريق عند المحور بتحديد مناسيب المرور الإجبارية، وتصميم قيم الرفع اللازم لأسفل الغطاء الطرقي على الأجزاء المختلفة من الطريق، تبعاً لنوع التربة والشروط الهيدرولوجية، ومن ثم يتم تصميم خط المشروع بما يوافق الميول الطولية المسموح بها حسب درجة الطريق، ويرسم باللون الأحمر، ويكون أغلظ بمرتين من خط الأرض الطبيعية، وذلك لإبرازه على المخطط.

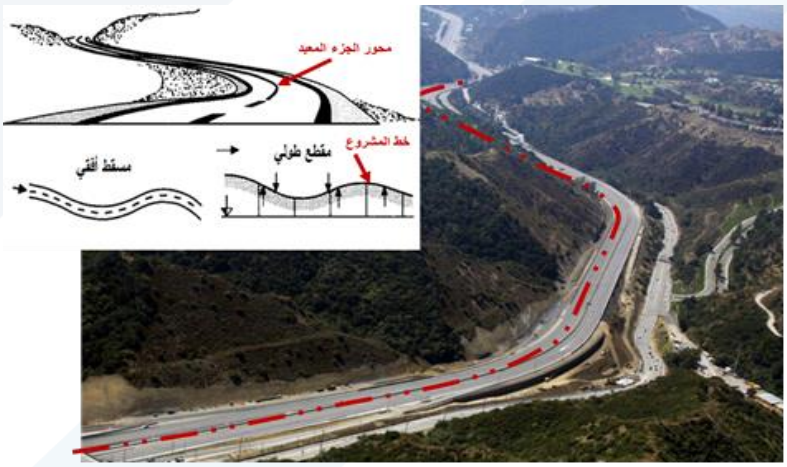


مقطع طولي في الطريق مبيناً فيه خط المشروع وخط الأرض الطبيعية

إذا كانت الميول الطولية متناوبة لمسافات قصيرة أي (ميول موجبة ومن بعدها ميول سالبة)، فإن هذه الحالة يعبر عنها بالميول الضائعة، حيث تضطر العربة عندها إلى كبح السرعة عند النزول وزيادة قدرة المحرك عند الصعود، مما ينتج عن ذلك هدر في الطاقة بشكل عام. ومن أجل الإقلال من الميول الضائعة نصل بين النقاط باستقامات ذات ميل أقل من الميل الأعظمي المسموح، ولكن قد تزيد عندها كميات الحفر والردم، لذلك لا بد من إجراء المقارنة بين الحلول واختيار الحل المناسب والأكثر اقتصادية.



أشكال مختلفة لخط المشروع في الطريق

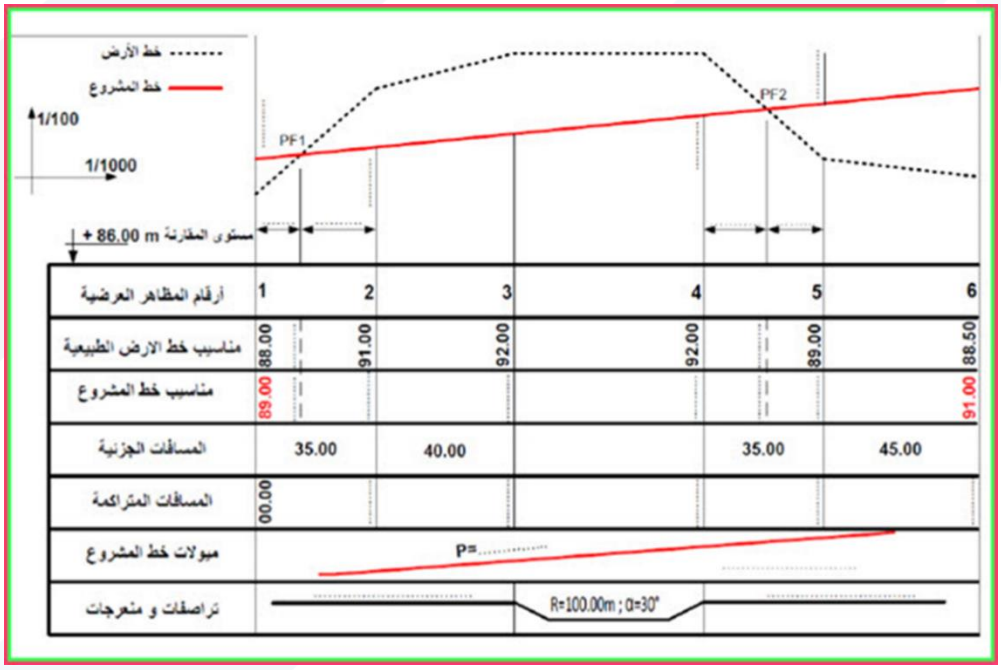


نحدد مناسيب الأرض الطبيعية على خط التسوية الذي يتقاطع مع محور الطريق في المسطح، وعند تصميم المقطع الطولي وأثناء وضع خط المشروع، يجب مراعاة ما يلي:

1- **انسيابية المقطع الطولي للطريق.**
2- **التقيد بالقيم المسموحة للميول الطولية وتأمين رؤية كافية، تسمح بتحقيق سرعة مناسبة لحركة العربات.**
3- **تأمين الراحة في الحركة والأمان أثناء سير العربة ليلاً ونهاراً، وفي كافة الظروف والأحوال.**
4- **تصريف المياه عن الجسم الترابي للطريق.**
5- **تجنب الميل الضائع في المقطع الطولي للطريق على شكل زكزاك، مما يؤدي إلى جهد ضائع في عمل المحرك.**
6- **التركيز على جمالية الطريق وعلى تلاؤمه مع الطبيعة المجاورة، والحرص على انسجام العناصر الأفقية مع العناصر الشاقولية.**

إن عناصر التصميم الأساسية التي تمثل في المقطع الطولي هي: **الميل الطولي، نصف قطر الانحناء**، ويتضمن المقطع الطولي أيضا المعطيات التالية:

أوتاد المسقط الأفقي على محور الفواصلOX ، إحداثيات خط المشروع والارض الطبيعية عند كل مقطع عرضـــي، وعند كل نقطة انعطاف، وعند جميع التقاطعات والطرق المحورية والتحويلات ومعابر المياه..... الخ. ولكي نستطيع تمثيل المقطع الطولي بشكل واضح، يتم تكبير الأشكال على محور التراتيب OY عادةً بنسبة 1/10 مقارنةً بمحور الفواصل OX، والمقياس في المسقط الأفقي عادةً يكون 1/1000، إلا إذا كانت المنطقة صغيرة، أي في المقطع الطولي يكون لدينا مقياسان أفقي 1/1000 وشاقولي مثلا 1/100، أي الفرق بينهما 10 أضعاف، ولذلك في تصميم الطريق، يظهر بشكل واضح الميول وفروق الارتفاعات.



الميل الطولي:

للتغلب على تفاوت ارتفاعات المناطق الموجودة، وللتغلب على ارتفاعات العناصر الإجبارية (كالجسور مثلاً)، يجب إمالة خطوط الطريق وفق مواصفات قياسية، حيث تتضمن النورمات النظامية الميول الطولية الأعظمية وقيمها الدنيا بدلالة السرعة التصميمية.

وبشكل عام تصمم الميول الطولية بقيم قليلة بحيث تؤمن المتطلبات التالية:

- **السلامة المرورية**
- **التوفير في تكاليف التشغيل والتوفير في الطاقة**
- **تقليل الانبعاثات الضارة**
- **تحسين نوعية المرور الطرقي، فكلما كان الميل أقل تكون نوعية المرور أفضل.**

يعتبر تحديد الميول الطولية من الأمور الهامة عند تصميم مسار الطريق، ومن الاعتبارات التي يجب الانتباه لها عند التصميم، حيث يتعلق تحديد الميل المناسب للطريق بصنف الطريق وبشكل الأرض الطبيعية، ففي الأراضي السهلية مثلاً يتحكم تصريف المياه السطحية من فوق الطريق بتحديد الميول، وفي المناطق الجبلية قد يتجاوز الميل الطولي الميول المسموحة، فطبيعة الأرض في الغالب هي التي تتحكم بشكل الميل الطولي، لذلك فإن تحديد الميل الطولي للطريق يتبع عدة عوامل من أهمها: سهولة القيادة عندما نقلل من الميل ونجعله أقل من الميل الأعظمي، شكل الأرض (هل هي متعرجة أو سطحية)، طبيعة العربات على الطريق ونوع السيارة سياحية أو شاحنات، بالإضافة إلى تكاليف المشروع والعامل الاقتصادي.

الميول الطولية الأعظمية والأصغرية

ترتبط قيم الميول الطولية الأعظمية المسموحة بدرجة الطريق وبطبيعة المنطقة المحيطة بهذا الطريق، ولكن تتفق معظم المعايير العالمية على أن تكون هذه القيمة بين **(6 – 10 %)**، أما الميول الطولية الأصغرية المسموحة فهي توافق **0.5%** في مناطق الردم و**1%** في مناطق الحفر، وذلك بما يتلاءم مع إمكانية تصريف المياه عن سطح الطريق.

يفضل ألا يتجاوز الميل الطولي 2% وذلك في حالة المسافات الطويلة للطرق، وذلك للتقليل من أخطار الحوادث المحتمل أن تكون عالية، ولتجنب تخفيض سرعات المركبات الثقيلة. ويفضل ألا يقل الميل الطولي الأصغري عن 0.7 % في حال كون الميل العرضي أقل من 2.5%، أي لا يجوز تصميم الطريق أفقياً تماماً، حيث أن تصريف المياه يتم طولياً وعرضياً، أي يكون سير المياه بزاوية معينة وليست عمودية على سطح الأرض.

يجب أن لا يقل الميل الطولي في مناطق الجسور عن 0.5%، ويجب أن يكون هناك اختلاف بين الميل الطولي والميل العرضي بمقدار لايقل عن 0.2% ويفضل 0.5%.

الميل الطولي – الميل العرضي≤ 0.2% (والأفضل 0.5%).

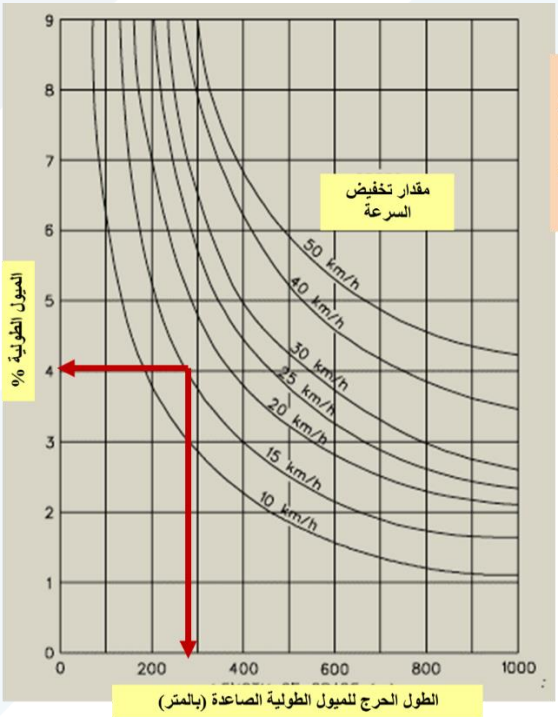
الميول الطولية القصوى والعظمى المرغوبة للميل الطولي حسب صنف الطريق

السرعة التصميمية	صنف الطريق									
	الطرق السريعة		طرق الدرجة الأولى		طرق الدرجة الثانية والثالثة				طرق الدرجة الرابعة	
Km/h	المرغوب	المطلق	المرغوب	المطلق	المرغوب	المطلق	المرغوب	المطلق	المرغوب	المطلق
40	-	-	-	-					8	15
50	-	-	-	-	7	8	7	10	7	12
60	-	-	-	-	6	8	7	9	6	10
70	-	-	4.5	6	5	6	6	8	5.5	9
80	4	5	4	5	4	6	5	7	5	8
90	3.5	5	3.5	5	3.5	5	4	6.5	5	7
100	3	5	3	5	3	3	3	6	-	-

الأطوال الحرجة للميول الطولية

يتوجب على المصمم عند اختيار الميول الشديدة أن يأخذ الطول الحرج للميول بعين الاعتبار، **والطول الحرج هو أقصى طول للميل الصاعد في الطريق الذي تستطيع الشاحنات محملةً الاستمرار في السير عليه، بدون تخفيض سرعتها انخفاضاً كبيراً يؤثر على السلامة أو على سعة الطريق بشكل غير مقبول،** (بحيث لا يتجاوز انخفاض السرعة **15 كيلومتر/سا)**، ولتحديد الطول الحرج للميول الطولية، فإنه تم اختيار الشاحنة الثقيلة والتي يشار إليها هنا بنسبة الوزن إلى الاستطاعة، والتي تعادل **(180 كغ/ كيلوواط)** كعربة نموذجية، وإذا تم تجاوز الطول الحرج في التصميم، فإنه يجب على المصمم، إما أن يعطي ميول منبسطة، أو أن يضع حارات خاصة بصعود الشاحنات (حارات التسلق).

الميل الطولي %	الطول الحرج بالمتر	الميل الطولي %	الطول الحرج بالمتر
3	400	6	170
4	280	7	150
5	210	8	135



مثال:
هل تم تجاوز الطول الحرج للميول الطولية في طريق جبلي بميل طولي صاعد 4% وبطول 350 متر في حال تخفيض السرعة 15%؟؟؟

إن الطول الحرج المطلوب للميل الطولي الصاعد 4% هو 280 متر و المقابل لمنحني تخفيض السرعة المعياري (15 كم/ سا)، وبالتالي فإن الطول 350 متر يتجاوز الحدود الحرجة، أي يجب على المصمم إما أن يخفض الميول على كامل المسافة أو أن يخلق مناطق خفيفة الميل بعد الطول الحرج، أو أن يفكر في وضع حارات خاصة بصعود الشاحنات.

وعلى المصمم إذا زاد طول الميل عن الطول الحرج أن يأخذ بالاعتبار:

- **تعديل الميول بحيث لا يزيد طول أي منها عن الطول الحرج.**
- **إضافة حارة صاعدة لاستيعاب الشاحنات التي ستقل سرعتها لأكثر من 15 كم/ساعة.**

حارات الصعود الخاصة بالشاحنات (حارات التسلق):

إن الهدف الرئيسي لإنشائها هو عدم إعاقة المركبات المختلفة وتخفيض سرعتها، وكذلك تجنباً للحوادث المرورية في حال تجاوز المركبات للشاحنات، وتستخدم هذه الحارات عند توفر الشروط التالية:

A. معدل تدفق المرور لكل أنواع المركبات المارة في الميل الصاعد يتجاوز **200 مركبة/ سا**.

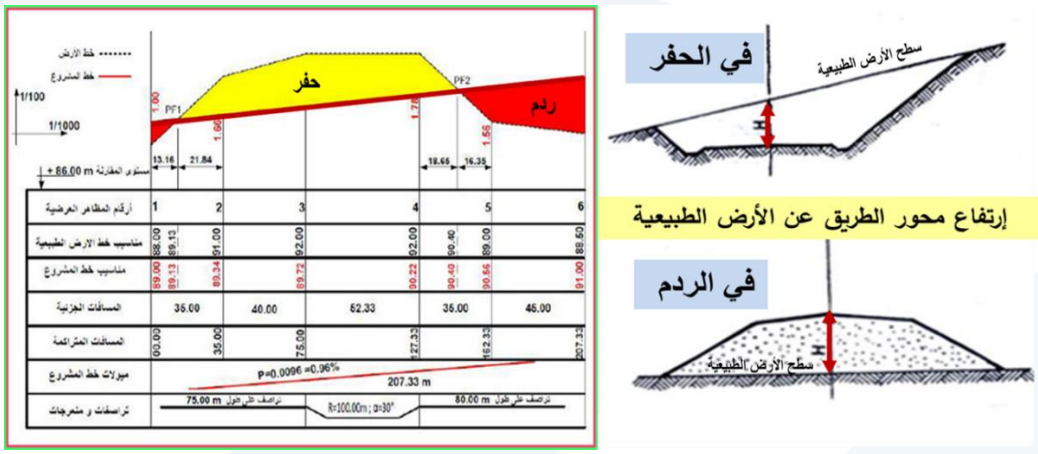
B. معدل تدفق المرور للشاحنات في الميل الصاعد يتجاوز **20مركبة/ سا**.

C. **في إحدى الحالات التالية:**

1. تجاوز الطول الحرج للحدود المسموحة عند منحني تخفيض السرعة **15كم/ سا**.
2. عندما يحصل انخفاض في مستوى الخدمة **(LOS) من درجة E or F**
3. عندما يحصل انخفاض في مستوى الخدمة درجتين أو أكثر.
4. وفي حالات خاصة مثل وجود أسباب أخرى أهمها السلامة الطرقية، مثل نشوء حوادث مرورية على الميل الصاعد، بسبب السرعة المنخفضة للشاحنات وتجاوزها من المركبات الأخرى، أو عندما يلاحظ انخفاض السرعة التشغيلية إلى أقل من **50كم/سا** على الطرق السريعة الحرة **(4 حارات)**.

تشكل الحفريات والردميات

عندما تزيد الميول الطولية لسطوح منحدرات الأرض الطبيعية عند محور الطريق عن الميول المناسبة والمسموح بها لحركة العربات، نلجأ إلى اختيار ميول طولية للطريق مناسبة وأقل من ميول سطح الأرض الطبيعية، مما ينتج عن ذلك كميات من الحفر والردم مختلفة، وبالتالي يجب أن نوازن بين حجوم الحفريات والردميات في المناطق المتجاورة.



وبما أن حجوم الحفريات تكون عادةً أكبر منها في الردميات، من أجل مساحات تصميمية متساوية على المقطع الطولي، لذلك فإنه يجب اختيار خط المشروع بحيث تكون مساحة أجزاء الحفر أقل من مساحة أجزاء الردم على المقطع الطولي بمـــــقدار **(30-25) %**، ويفضل عدم استخدام استقامات طويلة بميل ثابت، حتى لا تتطلب أعمال ترابية إضافية، ويفضل في هذه الحالات استخدام منحنيات شاقولية مغلفة، ذات أنصاف أقطار كبيرة جداً.

المنحنيات الرأسية Vertical Curves

تصمم المنعطفات الشاقولية على شكل قطوع مكافئة بسيطة في ذروة المضلع الشاقولي، عند نقاط خط المشروع للطريق عندما يتغير الميل الطولي له، وذلك من أجل التغلب على الانكسارات الحاصلة الناجمة عن تغير هذه الميول في المقطع الطولي، والتي تسيء الى حركة العربات، إما من عدم تحقيق الرؤية في المناطق المحدبة، أو من تعرض العربة لصدمة مفاجئة نتيجة دخولها في المناطق المقعرة.

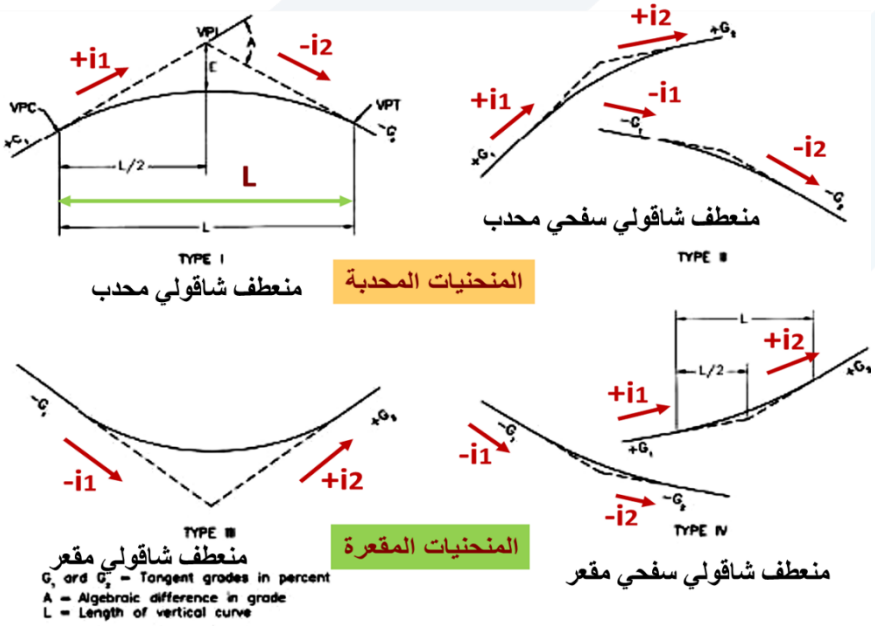
شروط التصميم:

يجب أن تكون المنحنيات الرأسية سهلة الاستخدام، وأن تهيئ تصميماً مأموناً ومريحاً في التشغيل ومقبولاً في الشكل، وأهم مطلب في تصميمها هو أن تعطينا مسافات رؤية كافية للسرعة التصميمية، حيث تصمم على شرط توفّر مسافة رؤية للتوقف لتكون مساوية للحد الأدنى من طول المنحني أو أكبر منه.

تحقق المنحنيات الرأسية منطقة انتقال انسيابية عند تغير الميول الطولية، ويستخدم القطع المكافئ في هذه المنحنيات لأن تغير الميل فيه ثابت، وهذا مروروياً يعتبر ايجابياً، ويعطي معدل تغير منتظم للانحناء مما يسهل حساب إحداثياته، وبالتالي يسهل حساب مناسيب خط المشروع، بالإضافة إلى بساطة توقيعه في

الطبيعة واستيفائه شروط الرؤية على كامل طول المنحني، ويمكن إلباسه حسابياً بالقوس الدائري، حيث تكون دقة الحساب في هذه الطريقة مقبولة جداً.

أنواع المنعطفات الشاقولية: تقسم المنحنيات الشاقولية إلى نوعين رئيسيين: المنحنيات المحدبة والمنحنيات المقعرة، واستناداً الى اتجاه الميول الطولية، فإنه يتحدد لدينا الأنواع التالية من المنعطفات الشاقولية.



أشكال المنحنيات الشاقولية المحدبة والمقعرة

المنعطفات الشاقولية المحدبة:

ينطلق حساب نصف قطر المنعطف الشاقولي المحدب من علاقات هندسية بسيطة، انطلاقاً من شرط تأمين مسافة الرؤية التصميمية لسطح الطريق من قبل سائق العربة، حيث أن هذا الشرط كاف لتحقيق أمان الحركة وراحتها، باعتبار أن الأثر السلبي للقوة النابذة في قيادة العربة وثباتها ليس كبيراً.

يجب أن تؤمن المنعطفات الشاقولية شروط الرؤية التي تحدد مسافة الرؤية للتوقف في حال تصميم الطرق باتجاهات منفصلة بجزيرة وسطية، أما في حال الطرق التي لا تفصل بين اتجاهاتها جزيرة وسطية، فإننا نأخذ بعين الاعتبار مسافة الرؤية للتجاوز، فإذا اعتبرنا:

L: طول مسافة المنعطف (الطول الأفقي للانحناء).

S: مسافة الرؤية.

h_1: ارتفاع عين السائق عن سطح الطريق.

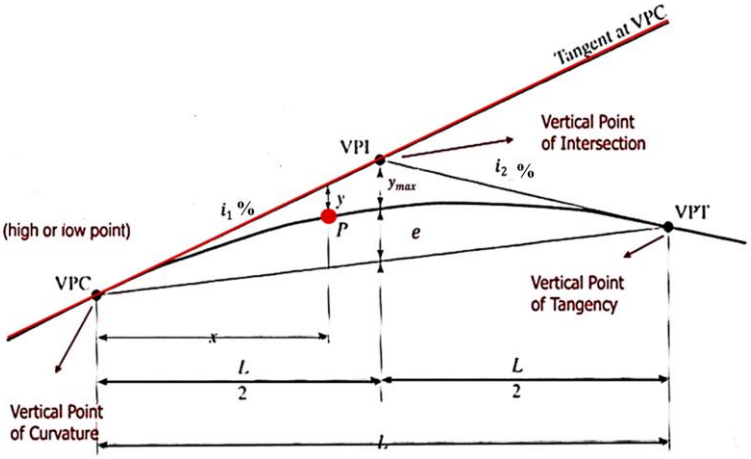
h_2 : ارتفاع العائق المتوضع على سطح الطريق والمطلوب رؤيته.

$i_1 - i_2$: الفرق بين الميلين.

يتضمن تصميم المنعطف الشاقولي شكل ونوعية المنعطف، طول المنعطف مع تحديد نصف قطره، مكان توضع المنعطف الشاقولي، حيث يؤثر في مسافة الرؤيا على المنحنيات قيمتان أساسيتان، وهما

الفارق الجبري لميلي المماسين المتتاليين A، وطول المنحني الشاقولي L

تصمم المنحنيات الشاقولية على شرط توفّر مسافة رؤية للتوقف تكون مساوية للحد الأدنى من طول المنحني أو أكبر منه، حيث يؤثر في مسافة الرؤيا على المنحنيات قيمتان أساسيتان وهما الفارق الجبري لميلي المماسين المتتاليين A أو α وطول المنحني الشاقولي L.



عناصر المنحنيات الشاقولية المحدبة

شروط الرؤية:

الرؤية ضرورية في المقطع الطولي كما هي ضرورية في المسقط الأفقي للطريق، بحيث يرى السائق أي عائق أمامه، ثابتاً كان أو متحركاً على مسافة كافية، وأن يكون لديه الوقت اللازم لكبح جماح عربته، فعندما يكون العائق ثابتاً تكون مسافة الرؤية:

$$S = 0.75\,v + \frac{v^2}{2.g.f}$$

السرعة بالمتر/ ثا

عامل الاحتكاك وقيمته 0.4 إذا لم يذكر خلاف ذلك

وعندما يكون العائق متحركاً، (أي سيارة آتية من الجهة المعاكسة)، تكون مسافة الرؤية هي ضعف القيمة أعلاه، أي:

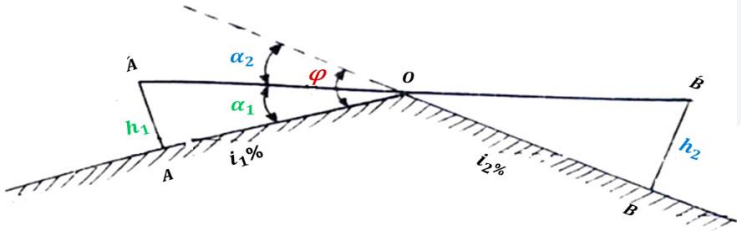
$$S = 1.5v + \frac{v^2}{g.f}$$

وإذا عوضنا **f =0.4, g = 9.81 , V= v/3.6**، ينتج لدينا العلاقة التالية حيث السرعة بالكم/سا:

$$S = 2 * (\frac{v}{5} + \frac{v^2}{100})$$

ملاحظة: إذا لم يذكر في النص نوع العائق (ثابت أو متحرك)، نصمم على أساس أن العائق متحرك لأننا يجب أن نصمم على الحالة الأسوأ.

شروط الانحناء في المقطع الطولي:



يشكل المستقيمان المتقاطعان زاوية φ فيما بينهما مماسها يساوي $tg\varphi = i_1\% \mp i_2\%$ ،
حيث نعتبر الإشارة موجبة عندما يكون الميلان باتجاهين مختلفين، ونعتبر الإشارة سالبة عندما يكون الميلان باتجاه واحد، وارتفاع عين السائق h1 يتراوح بين 1.25 متر و1.35 متر، أما ارتفاع العائق فإن قيمته وسطية تساوي 0.5 متر، ومن الشكل نستنتج العلاقة التالية:

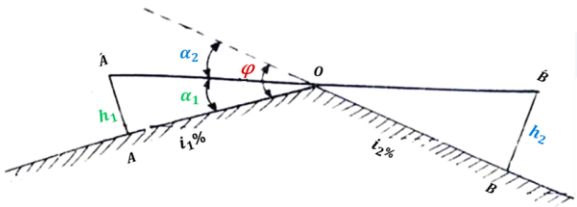
$$\acute{OA} = \frac{h_1}{\sin\alpha_1} \cong \frac{h_1}{\alpha_1} \qquad \acute{OB} = \frac{h_2}{\sin(\varphi-\alpha_1)} \cong \frac{h_2}{\varphi-\alpha_1}$$

لأن الزاوية صغيرة

والمسافة التي يتمكن ضمنها السائق من رؤية العائق أو السيارة المتحركة هي:

$$\acute{AB} = \acute{OA} + \acute{OB} = \frac{h_1}{\alpha_1} + \frac{h_2}{\varphi-\alpha_1}$$

لكل قيمة لـ α_1 يوجد وضع معين للسيارة والسائق، وهناك قيمة واحدة فقط تعطي القيمة الأصغرية للمسافة $\acute{AB}$ ، فإذا رمزنا L للمسافة $\acute{AB}$:



$$L = \frac{h_1}{\alpha_1} + \frac{h_2}{\varphi-\alpha_1}$$

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2 + 2\sqrt{h_1 * h_2}}{L} = \frac{\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)^2}{L}$$

$$h = h_1 = h_2 \Leftrightarrow \varphi = \frac{4h}{S}$$

h: ارتفاع عين السائق عن الأرض
S: مسافة الرؤية المطلوبة

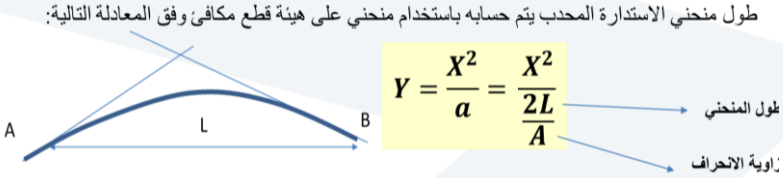
$i_1 + i_2 > \varphi$ ← من الضروري نظرياً وعملياً إنشاء منحني شاقولي للوصل

$i_1 + i_2 < \varphi$ ← لا داعي نظرياً لإنشاء منحني وصل شاقولي، وعملياً نحتاج إلى منحني وصل حتى لا يحصل انكسار في الطريق، ولكي نتجنب حدوث قفزة للسيارة

انتقاء المنحني الشاقولي:

إن المنحني المفضل نظرياً هو القطع المكافئ، ولكن باعتبار أن زاوية الميلφ تكون عادةً صغيرة، فيمكن عندها استخدام الدائرة التي يمكن أن تنطبق على القطع المكافئ، في هذه الحالة يكون الفرق بينهما صغيراً ويمكن إهماله، ولهذا يجب حساب نصف قطر دائرة الوصل.

طول منحني الاستدارة المحدب يتم حسابه باستخدام منحني على هيئة قطع مكافئ وفق المعادلة التالية:



وبما أن المنحني طويل نسبياً وإحداثياته الرأسية صغيرة، فإنه يمكن اعتبار طول المنحني L يساوي المسقط الأفقي AB، وعند تحديد طول المنحني يجب أن نتحقق من مسافة الرؤية للتوقف وللتجاوز.

نصف قطر التحدب: يحدد بشكل أساسي من خلال الرغبة بحركة آمنة بمقدار كاف، بحيث يمكن لسائق المركبة من التوقف في الوقت لمناسب قبل اصطدامه بعائق فجائي، وهذا يعني الحفاظ على مسافة الرؤية للتوقف على طول الطريق، وكذلك على طول المجال المحدب من الطريق، واستناداً إلى نموذج تحديد قطر التحدب الأصغري كتابع لمسافة الرؤية للتوقف، نستنتج العلاقة التالية:

$$\min R = \frac{S^2}{2\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)^2}$$

مسافة الرؤية للتوقف بالمتر

نصف قطر التحدب الأصغري بالمتر

ارتفاع نظر السائق وارتفاع العائق، م

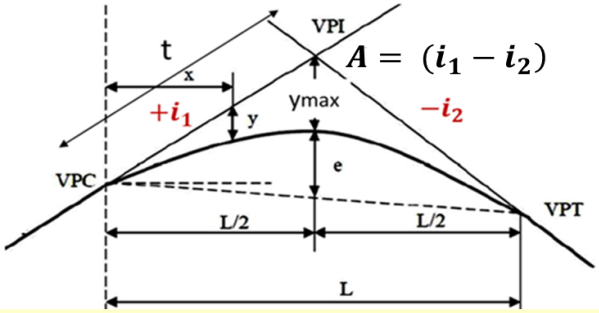
يجب ان تكون أنصاف أقطار المنحنيات الشاقولية المحدبة والمقعرة كبيرة ما أمكن، مع مراعاة محافظتها على صورة الطبيعة، وملاءمتها للمناطق المجاورة ، وبأقل تكاليف انشائية ممكنة، ويجب أن يكون نصف القطر الشاقولي أكبر من نصف القطر الأفقي بنسبة بين 1:5 إلى 10: 1 .

العناصر الهندسية والتصميمية للمنعطفات الشاقولية:

يعتبر القطع المكافئ هو أبسط وأسهل المنحنيات التي تستخدم في المنعطفات الشاقولية لأن:

- ✓ **تغير الميل فيه ثابت، وهذا مروروياً يعتبر ايجابياً.**
- ✓ **سهولة حساب الإحداثيات، وبالتالي سهولة حساب مناسيب خط المشروع.**

يجب أن نترك عند كل وتد (عند كل نقطة) ارتفاع خط المشروع، ولا يجوز أن يتداخل منحنيان دائريان، وعلى الأكثر يمكن أن يلتقوا في نقطة واحدة.



تحدد الأطوال الدنيا أو الأصغرية للمماسات بالمتر حسب العلاقات التالية:

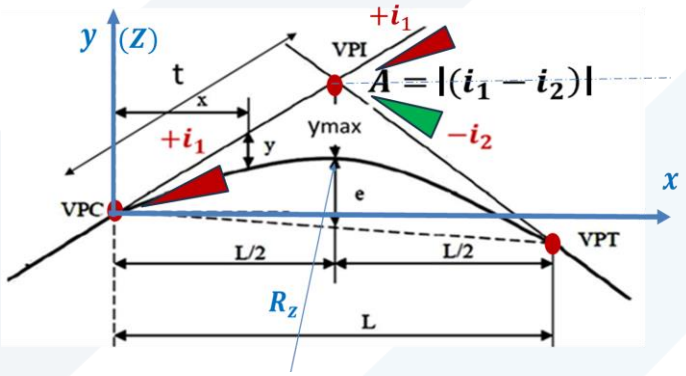
min t = V (مجموعة طرق الدرجة الأولى)

min t = 0.75 V (مجموعة طرق الدرجة الثانية)

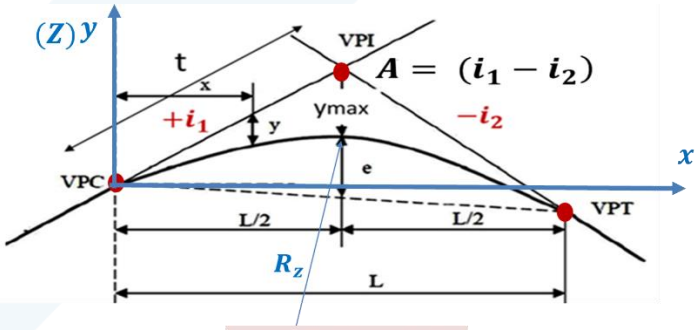
حيث V السرعة التصميمية كم/ سا.

هناك أطوال مماسات مختلفة، وذلك حسب أهمية الطريق ويختلف من كود إلى أخر.

نصف قطر المنعطف Rz ، طول المماس t، طول المنحني الشاقولي L، السهم Ymax .



يمكن استخدام القوس الدائري كمنعطف شاقولي ولكنه الأقل استخداماً، ونظراً لأن الميول الطولية الأعظمية المسموحة هي بحدود 10%، ولأن أنصاف أقطار المنعطفات الشاقولية التصميمية كبيرة، فإن الفرق بين الدائرة والقطع المكافئ صغير جداً. إذاً: يمكن التعويض عن انحناء القطع المكافئ بقوس دائري بسيط، وبالتالي يمكن الحصول على المعادلة النهائية للمنعطف الشاقولي المؤلف من قوس بسيط كما يلي:



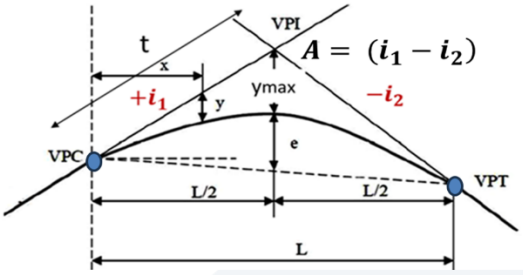
$$t = \frac{R_z(i_1 - i_2)}{2}$$

$$y_{max} = \frac{t^2}{2R_z} \qquad y_{max} = e = \frac{A.L}{800}$$

$$y = \frac{X^2}{2.R_z}$$

نصف قطر المنعطف Rz ، طول المماس t، طول المنحني الشاقولي L، السهم Ymax .

$$minL = R_{zmin} * (i_1 - i_2)$$



$$A = (i_1 - i_2)$$

$+i_1$ $\quad -i_2$

$$y = \frac{X^2}{2.R_z}$$

$$y_M = y_{max} * \left[\frac{X_M}{\frac{L}{2}}\right]^2$$

$$R_z = \frac{L}{i_1 - i_2} \qquad t = \frac{R_z(i_1 \mp i_2)}{2 * 100} \qquad L = R_z(i_1 - i_2)$$

$$y_{max} = \frac{t^2}{2R_z} = A * \frac{L}{800}$$

إذا كان الميل صغيراً يمكن أن نساوي بين قيمة المماس المائلة t وقيمتها أفقياً لتسهيل الحساب.

تصميم المنعطفات الشاقولية المحدبة:

يجب أن نأخذ بالاعتبار عند حساب طول منحني الاستدارة العلوي أو المحدب لمسافة الرؤية للتوقف الحالتين:

- طول المنحني أكبر من مسافة الرؤية للتوقف
- طول المنحني أصغر من مسافة الرؤية للتوقف

1. طول المنحني الشاقولي أكبر من مسافة الرؤية للتوقف (S<L):

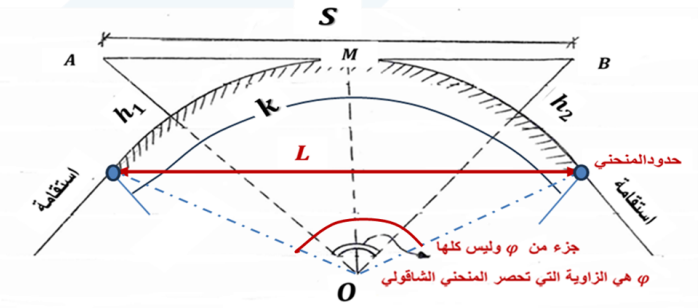
زاوية الانحراف وتساوي الفرق الجبري بين الميلين

$$L = \frac{A * S^2}{\left(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2}\right)^2}$$

مسافة الرؤية للتوقف

ارتفاع عين السائق عن سطح الأرض ويؤخذ 1.08-1.22m

ارتفاع عائق عن سطح الأرض ويؤخذ 0.08- 0.1 m



وبالتعويض نحصل على العلاقة التالية:

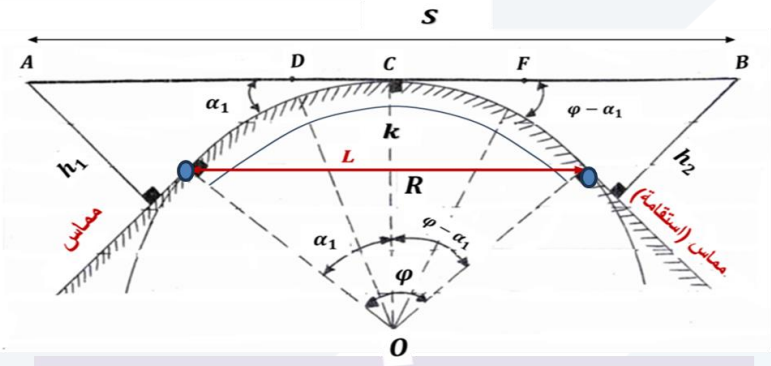
$$L = \frac{A * S^2}{4.04}$$

$$minR_z = \frac{S^2}{2\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)^2} = \frac{S^2}{2\left(h_1 + 2\sqrt{h_1.h_2} + h_2\right)}$$

2. طول المنحني الشاقولي أقصر من مسافة الرؤية للتوقف (S >L):

المعادلة العامة لطول المنحني المكافئ هي:

$$L = 2 * S - \frac{\left(\sqrt{2h_1}+\sqrt{2h_2}\right)^2}{A}, \qquad L = 2 * S - \frac{404}{A}$$



$$L = 2 * S - \frac{2}{A}\left(h_1 + 2\sqrt{h_1.h_2} + h_2\right)$$

ويمكن بعد ذلك تحديد نصف قطر المنحني والتحقق من قيمته من الجداول حسب السرعة التصميمية.

بنفس الطريق يحسب طول منحني الاستدارة لمسافة التجاوز، حيث يؤخذ ارتفاع العائق في هذه الحالة مساوياً لارتفاع خط البصر، أي أن :

$$H = h_1 = h_2 = 1.22m$$

1- طول المنحنى أكبر من مسافة الرؤية للتجاوز $L > S$

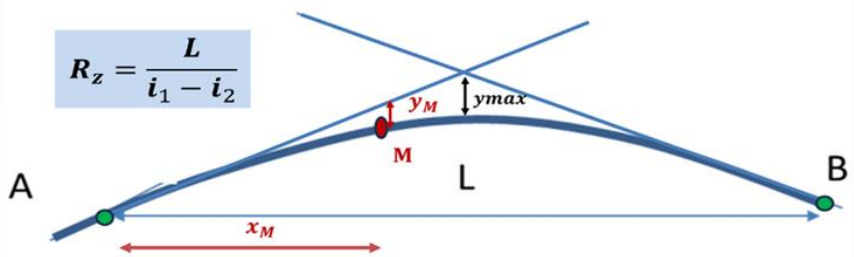
$$L = \frac{A * S^2}{8\,H} = \frac{A * S^2}{9.76}$$

2- طول المنحنى أصغرمن مسافة الرؤية للتجاوز $L < S$

$$L = 2 * S - \frac{9.76}{A}$$

حساب المناسيب لنقاط المنعطفات الشاقولية المحدبة:

$$R_z = \frac{L}{i_1 - i_2}$$



يتم حساب إحداثيات نقاط منحني الاستدارة العلوي أو المنحني المحدب، باستخدام المعادلة الرياضية لمنحني على هيئة قطع مكافئ وفق المعادلة التالية:

$$y = \frac{X^2}{2.R_z} \qquad y = \frac{X^2}{\frac{2L}{A}}$$

طول المنحني

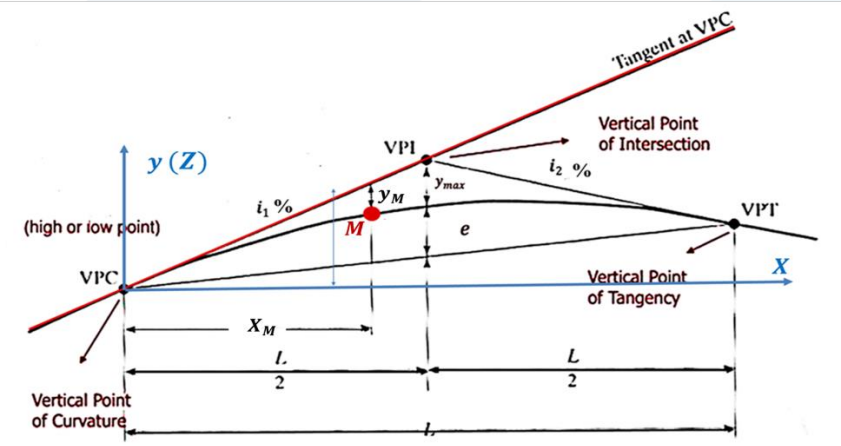
$$y_M = y_{max} * \left[\frac{X_M}{\frac{L}{2}}\right]^2 \quad = \quad y_M = 4 * y_{max} * \left[\frac{X_M}{L}\right]^2$$

- منسوب النقطة M على خط المشروع:

$$H_M = H_{M0} \pm y_M$$

H_{M0}: منسوب مبدئي

$$Ele.of\ M = [Ele.of\ VPC + i_1/100\ *x] - y_M$$



ويمكن حساب طول المنحني الشاقولي بدلالة ثابت الانحناء كما يلي:

المعادلة الأساسية في حساب طول المنحني الشاقولي المحدب باستخدام ثابت الانحناء الشاقولي (K) الموافق لمسافة الرؤية في حال التوقف:

$$L = K \times A$$

- ثابت الانحناء الشاقولي (بلا واحدة)
- الفارق الجبري لميلي المماسين الطوليين (%)

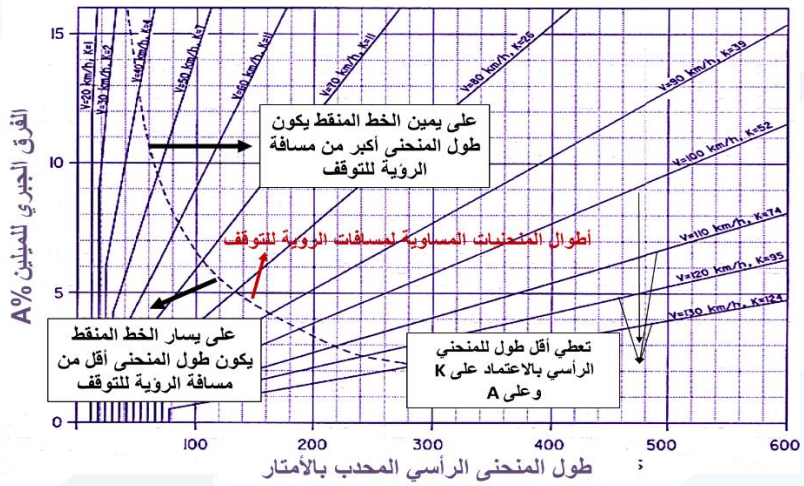
طول المنحني لكل درجة تغير في زاوية الانحراف

$$L = 3\,V$$

أيهما أكبر من حيث القيمة

معدل الانحناء الشاقولي المحدب في حالة مسافة الرؤية للتوقف

السرعة التصميمية	مسافة الرؤية للتوقف	ثابت الانحناء التصميمي K
20	20	1
30	35	2
40	50	4
50	65	7
70	105	17
80	130	26
90	160	39
100	185	52
110	220	74
120	250	95
130	285	124

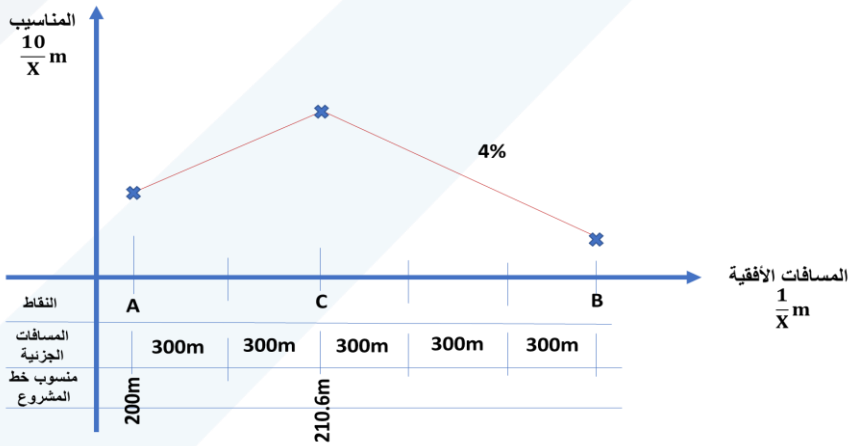


مخطط ايجاد طول المنحنى الرأسي المحدب وفقاً لمسافة الرؤية للتوقف

مسألة (1):

إذا كان لدينا خط المشروع المقترح بين A,B:

1. احسب ميل الخط ***AC***
2. احسب منسوب النقطة **B**
3. صمم منعطف شاقولي مع رسم كروكي لعناصره على خط المشروع واحسب منسوب ذروته علماً أن مسافة الرؤية للتوقف **S= 115m**



$$I_{AC} = \frac{\Delta h_{AC}}{L_{AC}} * 100 = \frac{210.6 - 200}{600} * 100 = 1.766\% = 2\%$$

$$h_B = h_C - i.L_{CB} = 210.6 - \frac{4}{100} * 900 = 174.6m$$

$$R_{Zmin} = \frac{S^2}{2 * (h_1 + 2\sqrt{h_1.h_2} + h_2)} = \frac{115^2}{2 * (1.2 + 2\sqrt{1.2 * 0.2} + 0.2)} = 2778.6m$$

$$T = \frac{R_Z}{2}|(\mp i_1) - (\mp i_2)| = \frac{2778.6}{2}|(+0.02) - (-0.04)| = 83.36m$$

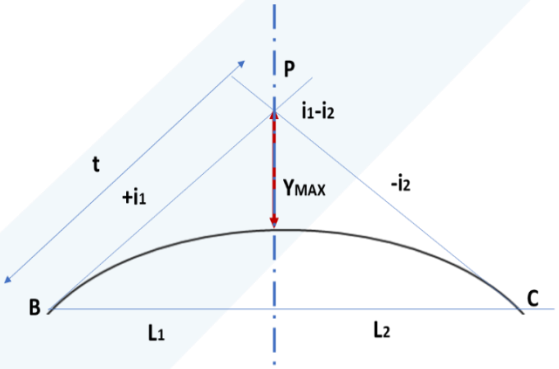
$$Y_{max} = \frac{T^2}{2R_Z} = \frac{83.36^2}{2 * 2778.6} = 1.25m$$

$$H_C = h_C - Y_{max} = 210.6 - 1.25 = 209.35m$$

وهو منسوب الذروة على المنعطف الشاقولي المحدب.

مسألة (2):

صمم منعطف شاقولي محدب ومتماثل، واحسب نصف القطر الأصغري الموافق، إذا علمت أن طول هذا المنحني هو 120 متر، وأن منسوب النقطة B هو 100 متر، وأن الميلين $i_1 = +5\%$, $i_2 = 5.5\%$، ثم حدد قيمة t لمعرفة بداية ونهاية هذا المنحني، واحسب المناسيب الموافقة وذلك على مسافة كل 20 متر من بداية المنحني.



$$A = |i_1 - i_2| = +5 - (-5.5) = +10.5\%$$

$$L = L_1 + L_2 = 120m$$

$$R_z = \frac{L}{i_1 - i_2} = \frac{120}{0.05 - (-0.055)} = \frac{120}{0.105} = 1142.86m$$

$$t = \frac{R_z(i_1 - i_2)}{2} = \frac{1142.86(0.105)}{2} = 60m$$

$$y_{max} = \frac{L_1 * L_2}{2(L_1 + L_2)} * \frac{\propto}{100} = \frac{60 * 60}{2(60 + 60)} * \frac{10.5}{100} = 1.575m$$

أو:

$$y_{max} = \frac{t^2}{2R_z} = \frac{60^2}{2 * 1142.86} = 1.575m$$

حساب المناسيب:

$$y_M = y_{max} * \left[\frac{X_M}{\frac{L}{2}}\right]^2$$

أو:

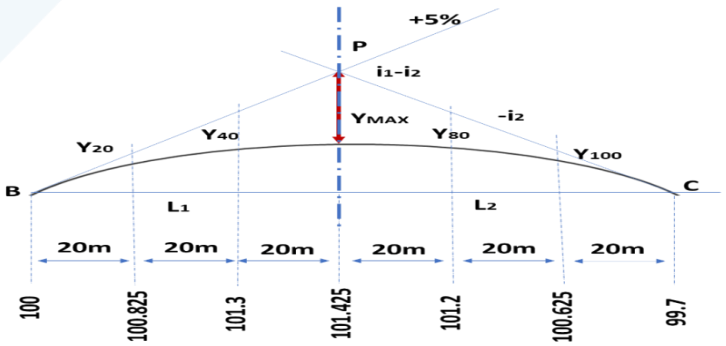
$$y_M = y_{max} * \left(\frac{2 * X_M}{L}\right)^2$$

$$X_M = 20m \Rightarrow y_M = 1.575 * \left(\frac{2 * 20}{120}\right)^2 = 0.175m$$
$$X_M = 40m \Rightarrow y_M = 1.575 * \left(\frac{2 * 40}{120}\right)^2 = 0.70m$$
$$X_M = 60m \Rightarrow y_M = 1.575 * \left(\frac{2 * 60}{120}\right)^2 = 1.575m$$

$$X_M = 80m \Rightarrow y_M = 1.575 * \left(\frac{2 * 80}{120}\right)^2 = 2.8m$$
$$X_M = 100m \Rightarrow y_M = 1.575 * \left(\frac{2 * 100}{120}\right)^2 = 4.375m$$
$$X_M = 120m \Rightarrow y_M = 1.575 * \left(\frac{2 * 120}{120}\right)^2 = 6.3m$$

وتكون المناسيب كما يلي:

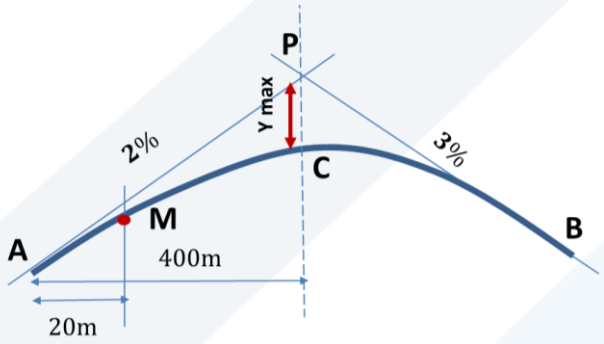
$$H_{X=20} = [(0.05 * 20) - 0.175] + 100 = 100.825m$$
$$H_{X=40} = [(0.05 * 40) - 0.70] + 100 = 101.3m$$
$$H_{X=60} = [(0.05 * 60) - 1.575] + 100 = 101.425m$$
$$H_{X=80} = [(0.05 * 80) - 2.8] + 100 = 101.2m$$
$$H_{X=100} = [(0.05 * 100) - 4.375] + 100 = 100.625m$$
$$H_{X=120} = [(0.05 * 120) - 6.3] + 100 = 99.7m$$



مسألة (3):

إذا كان لدينا خط المشروع المقترح ما بين النقطتين A,B:

1. صمم المنعطف الشاقولي وارسم كروكي لعناصره إذا علمت أن مسافة الرؤية للتوقف 115 متر.
2. احسب منسوب ذروة المنعطف المحدب علماً أن منسوب النقطة A هو 200 متر.
3. احسب منسوب النقطة M التي تقع على بعد 20 متر من بداية المنعطف.



$$R_{Zmin} = \frac{S^2}{2*(h_1 + 2\sqrt{h_1.h_2} + h_2)} = \frac{115^2}{2*(1.2 + 2\sqrt{1.2*0.2} + 0.2)} = 2778.6\text{m}$$

$$\text{T} = \frac{R_Z}{2}|(\mp i_1) - (\mp i_2)| = \frac{2778.6}{2}|(+0.02) - (-0.03)| = 69.47\text{m}$$

$$Y_{max} = \frac{T^2}{2R_Z} = \frac{69.47^2}{2*2778.6} = 0.87\text{m}$$

$$h_\text{p} = H_A + \text{i}.L_{AC} = 200 + \frac{2}{100}*400 = 208\text{m}$$

وبالتالي منسوب النقطة C على المنعطف:

$$H_C = 208 - 0.87 = 207.13m$$

منسوب النقطة M على المنعطف = منسوب النقطه Mعلى المضلع - Y_X

$$H_M = H_{\tilde{M}} - Y_X$$

$$H_{\tilde{M}} = H_A + i.L_{MA} = 200 + 0.02*20 = 200.4m$$

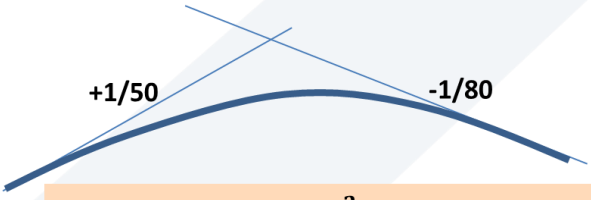
$$Y_X = \frac{X^2}{2R_Z} = \frac{20^2}{2*2778.6} = 0.072m$$

$$H_M = 200.4 - 0.072 = 200.32\text{m}$$

مسألة (4):

في مشروع طريق باتجاهين يطلب إدخال منعطف شاقولي (قطع مكافئ متساوي المماسين)، يصل بين ميلين الأول صاعد 50/1 مع انحدار بميل 1/80-، فإذا علمت أن مسافة الرؤية للتوقف 120 متر وأن مسافة الرؤية للتجاوز 640 متر، وإذا كانت ظروف الموقع تسمح بطول أعظمي للمنعطف الشاقولي لا يتجاوز 500 متر، المطلوب مناقشة تحقيق الرؤية على هذا المنعطف.

$$A = |i_2 - i_1| = \left|-\frac{100}{80} - \frac{100}{50}\right| = 3.25\%$$



الحالة الأولى: $L > S$

نستخدم العلاقة التالية:

$$500 = \frac{A*SSD^2}{100(\sqrt{2h_1}+\sqrt{2h_2})^2} = \frac{3.25*SSD^2}{100(\sqrt{2*1.07}+\sqrt{2*0.15})^2}$$

$$SSD = 249.38\ m > 180\ m$$

أي أن مسافة الرؤية للتوقف محققة ضمن هذا الطول من المنعطف

ملاحظة: لو حسبنا من العلاقة $L < S$ نلاحظ أن المتراجحة غير محققة حيث أن L = 500 m, S= 313.16 m

الحالة الأولى: $L > S$

من أجل مسافة الرؤية للتجاوز PSD= 640 m، نستخدم العلاقة التالية:

$$500 = \frac{A*PSD^2}{100(\sqrt{2h_1}+\sqrt{2h_2})^2} = \frac{3.25*PSD^2}{100(\sqrt{2*1.07}+\sqrt{2*1.03})^2}$$

$$PSD = 359.47m < 640\ m$$

أي أن مسافة الرؤية للتجاوز غير محققة ضمن هذا الطول من المنعطف

ملاحظة: لو حسبنا من العلاقة $L < S$ نلاحظ أن المتراجحة غير محققة حيث أن L = 500 m, S= 301.24 m

مسألة (5):

في منعطف شاقولي محدب بفرق للميلين الجبريين مساوي 0.08، أوجد طول المنحني في الحالتين:

- عندما يكون طول المنحني أكبر من مسافة الرؤية للتوقف، والتي تساوي 120 متر.
- عندما يكون طول المنحني أقل من مسافة الرؤية للتوقف، والتي تساوي 45 متر.

أوجد الحد الأدنى لنصف القطر، وناقش النتائج على أساس أن أقل نصف قطر مسموح به هو 420 متر لسرعة 65 كم/سا.

عندما يكون طول المنحني أكبر من مسافة الرؤية للتوقف:

$$L = \frac{A * S^2}{\left(\sqrt{2 * h_1} + \sqrt{2 * h_2}\right)^2} = \frac{A * S^2}{4} \qquad L > S$$

حيث :

h_1=1.22 m
h_2=0.1 m
$A = 0.08$

$$L = \frac{A*S^2}{4} = \frac{0.08*120^2}{4} = 288 \text{ m}$$

$L < S$

$$L = 2 * S - \frac{\left(\sqrt{2h_1}+\sqrt{2h_2}\right)^2}{A} = 2 * S - \frac{4}{A} = 40 \text{ m}$$

الحد الأدنى لنصف القطر:

$$R = \frac{L}{A} = \frac{40}{0.08} = 500 \text{ m}$$

هذه القيمة أكبر من الحد الأدنى المسموح به 420 متر عند السرعة 65 كم/ سا، ولذلك لا داعي لوضع قيود لتخفيض السرعة عن القيمة 65 كم/سا.

مسألة (6):

في مقطع طولي لطريق لدينا انحدار صاعد 1/50 يتقابل مع انحدار هابط مقداره 1/30- ، فلو تطلب الأمر تصميم منعطف شاقولي محدب يسمح بمسافة رؤية للتوقف 125 متراً، ومسافة رؤية للتجاوز 400 متراً،احسب طول هذا المنحني الذي يفي بالشرطين، علماً بأنه ونظراً لأسباب فنية فإن طول المنعطف الشاقولي يجب ألا يتجاوز 500 متراً.

$$A = +\frac{1}{50} - \left(-\frac{1}{30}\right) = \frac{8}{150}$$

1- مسافة الرؤية للتوقف تساوي 125 متر:

$$L = \frac{A*S^2}{4} = \frac{8*125^2}{150*4} = 208\ m \qquad L > S$$

وهي أقل من الطول المسموح به 500 متر.

2- مسافة الرؤية للتجاوز تساوي 400 متر:

$$L = 2 * S - \frac{9.76}{A} \qquad L < S$$

$$L = 2 * 400 - \frac{9.76*150}{8} = 617\ m > 400$$

وبالتالي نطبق العلاقة الخاصة حيث أن طول المنحني أكبر من مسافة الرؤية للتجاوز:

$$L = \frac{A * S^2}{9.76} = \frac{8 * 400^2}{150 * 9.76} = 875\ m$$

ونظراً لأن طول المنحني يجب ألا يتعدى 500 متر، فإنه لا يمكن تحقيق مسافة الرؤية للتجاوز المطلوبة وهي 400 متر، وبالتالي لا يسمح بالتجاوز على هذا المنعطف.

مسألة (7):

في مقطع طولي لطريق لدينا انحدار صاعد 1/30 يتقابل مع انحدار هابط مقداره 1/40، فلو تطلب الأمر تصميم منعطف شاقولي محدب يسمح بمسافة تجاوز مقدارها 440 متراً، احسب طول هذا المنحني في الحالتين:

- طول المنحني أكبر من مسافة الرؤية للتجاوز
- طول المنحني أقل من مسافة الرؤية للتجاوز

ثم تحقق من الحد الأدنى لنصف القطر والذي يجب ألا يقل عن 660 متراً.

$$A = \frac{1}{30} - \left(-\frac{1}{40}\right) = \frac{7}{120}$$

طول المنحني أكبر من مسافة الرؤية للتجاوز:

$$L = \frac{A * S^2}{\left(\sqrt{2 * h_1} + \sqrt{2 * h_2}\right)^2} = \frac{A * S^2}{8 * h} = \frac{A * S^2}{9.76} \qquad L > S$$

$h_1 = h_2 = 1.22$ m

$$L = \frac{7*440^2}{120*9.76} = 1160\ m$$

$L < S$

$$L = 2 * S - \frac{\left(\sqrt{2h_1}+\sqrt{2h_2}\right)^2}{A} = 2 * S - \frac{9.76}{A} = 40\ \text{m}$$

$$L = 2 * 440 - \frac{9.76*120}{7} = 713\ \text{m}$$

الحد الأدنى لنصف القطر:

$$R = \frac{L}{A} = \frac{1160*120}{7} = 19890\ \text{m}$$

وهي أكبر من الحد الأدنى المسموح به وهو 660 متر.

مسألة (8):

في مشروع طريق سرعته التصميمية 90 كم/سا، يراد إدخال منعطف شاقولي يصل بين ميلين الأول صاعد (+3.5%) والثاني هابط (-4%) والمطلوب:

تحديد الطول الأصغري للمنعطف الشاقولي ليتمكن سائق يسير وفق السرعة التصميمية من التوقف بأمان حين رؤيته لعائق يعترض الطريق، لا يقل ارتفاعه عن 0.15 متر، وفق الاعتبارات التالية:

الحالة الأسوأ للتوقف وحيث أن زمن رد الفعل 3 ثواني، ارتفاع عين السائق عن سطح الطريق 1.07 متر، عامل الاحتكاك الطولي بين سطح الطريق وإطار العربة 0.24.

يجب أن نحسب الحالتين لأنه تم طلب الحالة الأسوأ، ونختار القيمة الأكبر لتكون هي الأسوأ.

$$SSD = t * v + \frac{v^2}{2g(f_1 + i)} = \frac{3 * 90}{3.6} + \frac{(90)^2}{2 * 9.81\left(0.24 + \frac{3.5}{100}\right) * (3.6)^2} = 190.837m$$

حالة ميل صاعد

$$SSD = t * v + \frac{v^2}{2g(f_1 - i)} = \frac{3 * 90}{3.6} + \frac{(90)^2}{2 * 9.81\left(0.24 - \frac{4}{100}\right) * (3.6)^2} = 234.276\ m$$

حالة ميل هابط

الحالة الأسوأ هي الأطول عندما تكون مسافة الرؤية للتوقف SSD= 234.276 m

لتحديد الطول الأصغري أيضاً ندرس حالتين ونختار الحل الذي يحقق المتراجحة:

الحالة الأولى: $L > S$

نستخدم العلاقة التالية:

$$L = \frac{A*S^2}{100(\sqrt{2h_1}+\sqrt{2h_2})^2} = \frac{7.5*(234.276)^2}{100(\sqrt{2*1.07}+\sqrt{2*0.15})^2} = 1018.28\ m > 234.267\ m$$

أي أن المتراجحة محققة

الحالة الثانية: $L < S$

نستخدم العلاقة التالية:

$$L = 2 * S - \frac{200 * (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A}$$

$$L = 2 * (234.276) - \frac{200*(\sqrt{1.07}+\sqrt{0.15})^2}{7.5} = 414.65\ m > 234.267\ m$$

أي أن المتراجحة غير محققة

إذاً الطول الأصغري للمنعطف الشاقولي هو **L= 1018.28 m** وهو في حالة $L > S$