

Раздел третий

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

3.5. Направления применения золошлаков энергетических углей

3.5.2.6. Анализ затрат жизненного цикла дорожного покрытия из уплотненного катком бетона с использованием высококальциевой летучей золой Греции

3.5.2. Дорожное строительство

Л. Апостолаки, И. Папайанни, Университет Аристотеля в Салониках, Греция

АННОТАЦИЯ

Для строительства дорожных покрытий требуются очень большие капитальные вложения, как правило, из государственных средств. Строительство должно быть основано на экономических и экологических критериях. Таким образом, анализ затрат жизненного цикла необходим для выбора наиболее подходящей для конкретного случая конструкции дорожного покрытия. До сих пор в Греции опыт строительства жестких дорожных покрытий является очень ограниченным. Пока доминируют гибкие асфальтовые покрытия, хотя значительный уклон дорог, жаркий климат в летний период и длительный срок службы играют в пользу бетонных покрытий. Основным препятствием к этому служит относительно высокая начальная стоимость строительства и нежелание подрядчиков использовать другие материалы, нежели традиционно используемый асфальт. Тем не менее, греческая летучая зола, соответствующая требованиям греческих нормативов 2007 г. по ее использованию в традиционном бетоне, может применяться для замещения большого объема цемента для строительства дорожного покрытия из уплотненного катками бетона (УКБ) с целью уменьшения первоначальной стоимости строительства бетонной дороги. Это открывает новые перспективы для применения бетонных дорог, имеющих низкую стоимость с использованием УКБ.

В этом исследовании, предпринимается попытка экономической оценки двух вариантов, которые отличаются по типу покрытия. В частности, цель этого исследования заключается в изучении и сравнении стоимости гибкого и неармированного жесткого дорожных покрытий, которые предназначены для греческих дорог с высокой интенсивностью движения, и, в частности для проезда тяжелых транспортных средств. Кроме того, рассматриваются альтернативные составы бетона для жесткого дорожного покрытия (при использовании традиционного цемента и летучей золы для частичной замены цемента), а также материалы для противоскользящего слоя. В процедуре анализа затрат дорожного покрытия учитывается не только первоначальная стоимость строительства, но и стоимость технического обслуживания, ремонта и реконструкции, издержки для пользователя и остаточная стоимость материалов во время стандартного периода проведения анализа.

Метод проведения этого экономического анализа известен как анализ затрат жизненного цикла, в нем и используются основные понятия инженерной экономики. Анализ позволяет сделать крайне полезные выводы о стоимости жестких покрытий, особенно для тех вариантов, в которых для частичного замещения цемента используется летучая зола. В сочетании с другими факторами и результатами других исследований они позволяют лицам, принимающим решения, произвести окончательный выбор соответствующего решения для каждого конкретного случая.

Ключевые слова: стоимость жизненного цикла, высококальциевая летучая зола, дорожное покрытие.

1. ВВЕДЕНИЕ

Строительство дорожного покрытия требует очень больших капитальных вложений. Эти инвестиции могут достигать огромных размеров в зависимости от размера проекта, и, как правило, они берутся из государственных средств. Таким образом, важно, чтобы лица, которые за-

нимаются планированием проектов и/или принимают решения, выполнили экономический анализ сравнения различных сценариев. Еще одним очень важным критерием, который должен быть рассмотрен при сравнении альтернативных сценариев, является экологический критерий и информированность.

Бетонные дорожные покрытия, по сравнению с асфальтовыми, являются более предпочтительными с точки зрения таких характеристик, как: прочность конструкции, долговечность в течение времени, требования к техническому обслуживанию, удобство эксплуатации грузонапряженной дороги, по которой ездят большегрузные и грузовые автомобили, прочность в экстремальных условиях окружающей среды (в горячем и холодном климате), экономия материалов слоев, безопасность для пользователей и многие другие экономические, экологические и социальные параметры.

Эти причины привели к тому, что во многих странах, таких как: США, Германия, Австрия, Канада и т.д. начали широко применять бетонные покрытия. Тем не менее, в Греции до сих пор опыт строительства жестких покрытий очень ограничен из-за относительно большой первоначальной стоимости строительства в сочетании с отсутствием строительных знаний и нежеланием подрядчиков применять другие материалы, а использовать традиционный асфальт.

Тем не менее, первоначальная стоимость строительства бетонного дорожного покрытия может быть значительно снижена благодаря использованию летучей золы. В частности, греческая летучая зола, соответствующая требованиям греческих нормативов 2007 г. по ее использованию в традиционном бетоне, может применяться для замещения большого объема цемента для строительства дорожного покрытия из уплотненного катками бетона (УКБ) (Papayianni & Anastasiou 2006; Papayianni 2006). Это открывает новые перспективы для применения бетонных дорог, имеющих низкую стоимость с использованием УКБ. В этом исследовании предпринимается попытка экономической оценки двух вариантов, которые отличаются по типу покрытия. Цель этого исследования заключается в изучении и сравнении стоимости гибкого и жесткого дорожных покрытий, которые предназначены для дорог с высокой интенсивностью движения, и, в частности для проезда тяжелых транспортных средств. Кроме того, в нем рассматриваются альтернативные составы бетона для жестких дорожных покрытий (с использованием только традиционного цемента и применением промышленных побочных продуктов для частичного его замещения), а также материалов для противоскользящих слоев. Другими словами, этот экономический анализ необходим, чтобы ответить на следующие вопросы:

а. Является ли экономически выгодным строительство жестких дорожных покрытий в Греции, особенно для дорог с высокой интенсивностью движения и, в част-

ности пригодных для проезда тяжелых транспортных средств?

- б. Какова финансовая выгода (или убыток) при сравнении альтернативных проектных решений по строительству жестких дорожных покрытий с использованием греческой летучей золы для частичного замещения цемента в бетоне?
- с. В случае, если использование летучей золы приводит к значительно более низким стоимостным решениям, какова предельная будущая увеличенная стоимость, при которой возможны более экономичные решения по сравнению с гибкими дорожными покрытиями?

Метод проведения данного экономического анализа известен как анализ затрат жизненного цикла, в нем используются основные понятия инженерной экономики. Это рациональный метод, в котором учитывается не только начальная стоимость строительства, но и стоимость эксплуатации и реконструкции, издержки для пользователя и остаточная стоимость материалов во время период проведения стандартного анализа.

В результате анализа можно сделать очень полезные выводы о стоимости жестких покрытий. В сочетании с другими факторами и результатами других исследований, они позволят лицам, принимающим решения, прийти к окончательному выбору соответствующего решения для каждого конкретного случая.

2. ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ

В экономическом анализе рассматриваются пять различных сценариев. В исследовании приводится стоимость альтернативных сценариев в случае использования бетонного покрытия по сравнению со стоимостью гиб-

ких дорожных покрытий. Жесткие покрытия отличаются наличием противоскользящего слоя, и составом бетона. Рассматриваются следующие типы противоскользящих слоев (Apostolaki 2011, FHWA 2011):

- а. противоскользящий слой — текстурированные наполнители из шлака электродуговой печи;
- б. тонкий противоскользящий слой толщиной 25 мм с использованием модифицированного асфальта.

Кроме того, синтез бетонов отличается следующим образом. К типам противоскользящих слоев относятся:

- а. традиционный состав с использованием только цемента;
- б. состав с использованием летучей золы для замещения 50 % цемента.

Различные тротуары предназначены для тех же данных. Таким образом, ширина и длина покрытий составляют 7,30 м и 1 км соответственно. Во всех случаях, калифорнийский показатель несущей способности земляного полотна равен 16 %, а средняя годовая температура воздуха составляет 16 °С. Для проектных расчетов покрытий показатель суточной интенсивности движения грузового автотранспорта весом более 1500 кг в каждом направлении во время, отведенное для проекта, составляет 2,113 (40 % от общей интенсивности движения). Процентное распределение интенсивности движения грузового автотранспорта приведено в табл. 2. Кроме того, ожидается, что годовой прирост интенсивности возрастет до 4 % (который представляет собой средневзвешенный ежегодный прирост интенсивности движения для Эгнатия Odos S.A. [6]) и считается постоянным на протяжении всего периода проведения анализа.

Таблица 1. Применение дорожных покрытий в мире

Страна	Использование жестких покрытий	Комментарии
США	29,3 % Межштатной системы дорог	—
Германия	25 % сети интенсивных автодорог	Эксклюзивное использование покрытия из бетонных неармированных плит
Австрия	66 % интенсивных автомагистралей	—
Бельгия	40 % автодорог 60 % сельских дорог 17 % общей автодорожной сети	Широкое использование бесшовного железобетонного дорожного покрытия
Нидерланды	5 % автодорог 4 % от общей автодорожной сети 10 % велосипедных дорожек	Использование покрытия из бетонных неармированных плит и бесшовного железобетонного дорожного покрытия
Канада	4 % автодорожной сети в провинции Квебек Планирование строительства новых бетонных дорожных покрытий	Использование покрытия из бетонных неармированных плит и бесшовного железобетонного дорожного покрытия
Великобритания	0,5 % общей автодорожной сети	—
Греция	Отсутствует использование	—

Таблица 2. Распределение интенсивности движения грузового автотранспорта согласно проведенному анализу, %

Тип грузового автотранспорта	Процент (%)
Автобусы	20
2-осные грузовики	20
3-осные грузовики	35
3-осные прицепы	6
4-осные грузовики	5
4-осные прицепы	8
Грузовики с количеством осей более 4	6

Экономический анализ выполняется на период 40 лет и для разных проектных решений:

Сценарий 1: Асфальтовое покрытие рассчитано на 20 лет при общей толщине слоя, равного 0,475 м. Дорожное покрытие разработано Эгнатия Odos S.A. В конце расчетного периода покрытие реконструируется для того, чтобы эксплуатироваться еще 20 лет. В промежуточные периоды от 0 до 20 лет, а также от 20 до 40 лет работы по обслуживанию дорожного покрытия выполняются с це-

люю сохранения его характеристик на удовлетворительном и безопасном уровне.

Сценарий 2-а: Неармированное бетонное покрытие рассчитано на 40 лет при общей толщине слоя, равного 0,41 м. Наполнители в виде шлака электродуговой печи используются для противоскользящего слоя. Конструкция дорожного покрытия выполнена в соответствии с британской методикой, предложенной в 1994 г. и основана на радикальный пересмотренной старой методике RN29 (версия 1987 г.). Дорожное покрытие реконструировано путем прокладки асфальтобетонного верхнего слоя для продления срока службы еще на 12 лет. В промежуточные периоды от 0 до 28 лет, а также от 28 до 40 лет проводятся ремонтные работы для сохранения характеристик покрытия на удовлетворительном и безопасном уровне. В этом бетонном покрытии не предусмотрены продольные швы из-за ширины плиты. Три различных

типов соединений (сужение, расширение и изгиб) предусмотрены в поперечном направлении.

Сценарий 2-б: Точно такая же структура дорожного покрытия, что в сценарии 2-а. Разница лишь в том, что имеется противоскользящая поверхность, которая в данном случае является тонким противоскользящим слоем толщиной 25 мм с использованием модифицированного асфальта. Таким образом, общая толщина покрытия составляет 0,435 м.

Сценарии 2-а-2-и b-2: Покрытия являются такими же, как и в сценариях 2-а и 2-б, соответственно. Различие состоит в составе бетона. Летучая зола используется взамен половины объема цемента.

Структуры альтернативных сценариев, а также тип и график ремонтных работ представлены в табл. 3 и 4, соответственно.

Таблица 3. Альтернативные сценарии структур дорожных покрытий

Сценарий 1	Сценарий 2-а/ 2-а-2(1)	Сценарий 2-б / 2-б-2(1)
Тонкий противоскользящий слой толщиной 25 мм с использованием модифицированного асфальта	Противоскользящий слой — текстурированные наполнители в виде шлака электродуговой печи (песок удельной плотностью 3,020 т/м ³ , расход 3,0 кг/м ²)	Тонкий противоскользящий слой толщиной 25 мм с использованием модифицированного асфальта
Битумный слой	Неармированная бетонная плита толщиной 0,26 м (тип бетона С30/37)	Битумный слой
Промежуточный слой асфальтобетонного покрытия толщиной 55 мм (общая толщина — 0,1 м)	Пленка ПВХ	Противоскользящий слой — текстурированные наполнители в виде шлака электродуговой печи (песок удельной плотностью 3,020 т/м ³ , расход 3,0 кг/м ²)
Битумный слой	Подоснова из тощего бетона толщиной 0,15 м (тип бетона — С12/15)	Неармированная бетонная плита толщиной 0,26 м (тип бетона — С30/37)
Грунтовочный слой	Укрепление стыков (стальные стержни)	Пленка ПВХ
Асфальтобетонная основа толщиной 50 мм (общая толщина — 0,15 м)	Эластомерный герметик для уплотнения швов в асфальте	Подоснова из тощего бетона толщиной 0,15 м (тип бетона — С12/15)
Основной слой толщиной 0,10 м (общая толщина — 0,2 м)	—	Укрепление стыков (стальные стержни)
Подоснова толщиной 0,10 м (общая толщина — 0,2 м)	—	Эластомерный герметик для уплотнения швов в асфальте

¹⁾ Бетон в этом случае состоит из летучей золы, используемой для замещения 50 % цемента.

Таблица 4. Тип и график работ по плановому техническому обслуживанию при альтернативных сценариях

Время (год)	Сценарий 1	Сценарий 2-а/ 2-а-2	Сценарий 2-б / 2-б-2
0	Назначение: для движения транспорта	Назначение: для движения транспорта	Назначение: для движения транспорта
7	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	Обслуживание стыков	Обслуживание стыков и противоскользящей поверхности
14	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	Обслуживание стыков и противоскользящей поверхности	Обслуживание стыков и противоскользящей поверхности
20	Реконструкция для продления использования еще на 20 лет	—	—
21	—	Обслуживание стыков и противоскользящей поверхности	Обслуживание стыков и противоскользящей поверхности
27	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	—	—
28	—	Восстановление	Восстановление
34	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	—	—
35	—	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт

Для проведения этого анализа имеются следующие допущения:

- а. Только основная структура дорожного покрытия принимается во внимание для анализа.
- б. Проектный период дорожного покрытия считается равным сроку его службы. В случае, если требуется более длительный сервисный период, то необходимы техническое обслуживание, ремонт или реконструкция различных слоев дорожного покрытия, чтобы оно прослужило еще дополнительное время.
- в. Анализ каждого сценария начинается с того времени, когда дорожное покрытие используется для движения.
- д. Во всех альтернативных проектных решениях планируется техническое обслуживание, восстановление и/или реконструкция секций дорожных покрытий, т.к. это соблюдается в греческой и международной практике.
- е. Издержки для пользователя рассчитываются с учетом потраченного времени и дополнительной эксплуатации транспортного средства во время задержек, вызванных обслуживанием, ремонтом, восстановлением и реконструкцией дорог. Другими причинами, такими как аварии, ощущение удовлетворенности/неудовлетворенности и т.д., которые могут способствовать пользовательским издержкам, пренебрегают из-за отсутствия соответствующих данных для Греции или разницы в стоимости при сравнении различных сценариев.
- ж. Остаточная стоимость материалов считается, как доля текущей материальной стоимости. Величина материальной стоимости считается равной 60 % общей стоимости (материальная стоимость и стоимость строительства). Учитывается, что:
 - Остаточная стоимость несвязанного, промежуточного слоев асфальта и бетона считается равной 40 % их текущей стоимости на конец анализируемого периода.
 - Для поверхностных слоев остаточная стоимость имеет место только в том случае, когда остается несколько лет до конца срока их службы.

3. МЕТОД ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Экономический анализ проводится с использованием метода текущей стоимости. Учитываются следующие расходы:

- а. Начальная стоимость строительства.
- б. Запланированные расходы по реконструкции и восстановлению в любое время в течение периода проведения анализа.
- в. Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт.
- г. Издержки для пользователя, обусловленные задержками и дополнительной эксплуатацией транспортных средств во время технического обслуживания, ремонта, восстановительных работ и реконструкций покрытий.
- д. Остаточная стоимость материалов в конце анализируемого периода.

Текущая стоимость общего исследования рассчитывается по следующей формуле:

$$PV = K_o + \sum_{t=1}^{n} DC_{i,t} [KR_t + KM_t + KU_t] DC_{i,t} SV$$

- где:
- PV: общая текущая стоимость
 - K_o: начальная стоимость строительства

DC_{i,t}: коэффициент дисконтирования для ставки дисконтирования в i-ый год $t, = 1/(1+i)^t$

KR_t: стоимость реконструкции и восстановления в i-ый год, выраженная в текущих величинах

KM_t: издержки для пользователя в год t, в течение которого проводятся работы по техническому обслуживанию, ремонту, восстановлению и реконструкции покрытий, выраженные в текущих величинах.

i: ставка дисконтирования

SV: остаточная стоимость

n: анализируемый период, годы. Во всех случаях он полагается равным 40 годам.

Ставка дисконтирования, которая отражает реальную ставку возврата инвестированных денег, берется равной 5 % (средняя ставка), которая соответствует предложенной ставке дисконтирования в Европейском Союзе. Текущая стоимость затрат по альтернативным сценариям рассчитывается также для целого ряда различных ставок дисконтирования: 2 % (низкая ставка), 4 % (средняя ставка), 6 % (высокая ставка) и 8 % (очень высокая ставка). Для рассмотрения берется более одной величины ставки дисконтирования в целях оценки, насколько чувствителен анализ к различным реальным ставкам возврата инвестиций и в какой степени уровень ставки дисконтирования может способствовать выбору одного решения, а не другого.

3.1. Начальная стоимость строительства, эксплуатации, восстановления и реконструкции

Начальная стоимость строительства, эксплуатации, восстановления и реконструкции дорожных покрытий включает в себя стоимость приобретения, транспортировки, требуемой обработки и размещения всех материалов для всего строительства дорожного покрытия. Величины материальных затрат можно легко вычислить из стандартных размеров покрытий и геометрических данных каждой конструкции дорожной одежды. Удельная стоимость необходимых материалов и работ берется из таблиц, в которых представлены величины материалов / работ для строительства дорог, и они предоставляются Министерством охраны окружающей среды, территориального планирования и общественных работ (последнее обновление: июль 2008 г.). Что касается материалов / работ, которые не включены в эти таблицы, то используются величины, предоставленные компаниями, которые выполняют эти работы. Общая стоимость выражается в €/м². Табл. 5 содержит данные по стоимости каждого отдельного вида материала/работы, используемые для определения стоимости строительства, технического обслуживания и ремонта, восстановления и реконструкции.

Таблица 5. Рабочие данные по материалам, учитываемым в экономическом анализе

Материал – работа	Стоимость/ед ⁽¹⁾
Тонкий противоскользящий слой толщиной 25 мм с использованием модифицированного асфальта	5,33€/м ²
Слой битумного вяжущего толщиной 0,05 м с использованием традиционного асфальта	5,19€/м ²
Асфальтобетонный слой основания толщиной 0,05 м	5,03€/м ²
Асфальтобетонный выравнивающий слой толщиной 0,05 м	5,00€/м ²
Основной слой толщиной 0,10 м	2,03€/м ²
Подслой толщиной 0,10 м	2,00€/м ²
Битумное покрытие	0,33€/м ²
Грунтовое покрытие	0,98€/м ²

Бетонная плита (тип бетона - С30/37)	94,00€/м ³
Бетонная плита (тип бетона - С30/37) с использованием летучей золы для замещения 50% цемента	66,44€/м ³
Подоснова из тощего бетона типа С12/15	68,40€/м ³
Подоснова из тощего бетона типа С12/15 с использованием летучей золы для замещения 50% цемента	54,91€/м ³
Летучая зола	2,50€/т
Противоскользящий слой - текстурированный наполнитель из шлака электродуговой печи	17,00€/т
Стальные стержни	1,00€/кг
Стальные стержни	1,00€/кг
Сборные плиты толщиной 12 мм для формирования компенсационных расширений	10,65€/м ²
Эластомерный герметик для уплотнения швов в асфальте	2,98€/м
Пленка ПВХ	4,69€/м ²
Растрескивание и перекладка слоя	1,25€/м ²
Фрезерование на глубину 0-4 см	0,90€/м ²
Фрезерование на глубину 4-8 см	1,46€/м ²

⁽¹⁾ Стоимость/ед. относится ко всей работе

3.2. Издержки для пользователя

Различные работы по техническому обслуживанию и ремонту имеют такие результаты, как снижение уровня обслуживания дорог, задержки, увеличение эксплуата-

ционных расходов транспортных средств, вероятность несчастных случаев и недовольство/отсутствие комфорта для пользователя. Все эти результаты приводят к издержкам для пользователя, которые учитываются в экономическом анализе.

В данном анализе учитываются только те издержки, для пользователя, которые обусловлены потерянными временем (увеличенной продолжительностью поездки) и дополнительной эксплуатацией транспортных средств во время задержки, из-за обслуживания, ремонта, восстановления и реконструкции покрытий.

Продолжительность различных работ по техническому обслуживанию представлена в табл. 6. Расчет этого срока основан на суточной производительности различных работ (табл. 7). Суточная производительность работ определяется из эмпирической оценки Эгнатия Odos S.A. и других компаний, которые занимаются строительством участка дороги при ежедневной продолжительности рабочего дня, равной 8 часам. Предполагается также, что для начала нового этапа работы требуется завершение предыдущего и что после завершения работ дорожное покрытие может использоваться для движения транспорта уже на следующий день.

Таблица 6. Продолжительность работ по техническому обслуживанию и ремонту

Альтернативные сценарии	Годы	Мероприятия	Продолжительность (дни)
Сценарий 1	7, 14, 27, 34	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	2
	20	Реконструкция	17
Сценарий 2-/ 2-а-2	7	Обслуживание стыков	1
	14	Обслуживание стыков и противоскользящих поверхностей	2
	21	Обслуживание стыков и противоскользящих поверхностей	3
	28	Восстановление	5
	35	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	2
Сценарий 2-б / 2-б-2	7, 14, 21	Обслуживание стыков и противоскользящих поверхностей	3
	28	Восстановление	5
	35	Плановое периодическое техническое обслуживание и ремонт	2

Таблица 7. Суточная производительность работ, учитываемая в экономическом анализе

Работы по техническому обслуживанию и ремонту	Суточная производительность ⁽¹⁾
Укладка тонкого противоскользящего слоя толщиной 25 мм с использованием модифицированного асфальта	8.700 м ² /день
Укладка асфальтового вяжущего слоя толщиной 0,05 м, с использованием традиционного асфальта	5.800 м ² / день
Укладка асфальтового базового слоя толщиной 0,05 м	5.800 м ² / день
Укладка асфальтового выравнивающего слоя толщиной 0,05 м	5.800 м ² / день
Укладка эластомерного герметика для уплотнения швов в асфальте	1.500 м/ день
Растрескивание на глубину 1 м и перекладка слоя	10.000 м ² / день
Фрезерование на глубину 0-4 см	6.000 м ² / день
Фрезерование на глубину 4-8 см	3.000 м ² / день

⁽¹⁾ Суточная производительность относится к общему объему работы.

Для анализа также считается, что средняя скорость движения транспортного средства во время проведения работ по техническому обслуживанию снижается следующим образом: для легковых автомобилей — от 100 до 50 км/ч, а для грузового автотранспорта — от 70 до 35 км/ч. Это снижение (50 %) приводит к задержке, которая составляет 0,600 мин (0,010 ч) и 0,857 мин (0,014 ч) для каждого пассажира и грузового транспортного средства при типичной длине дороги.

Временной интервал для пассажиров принимается таким образом [7]:

- Для пассажиров легкового автотранспорта средняя величина временных затрат без поправки на паритет покупательной способности (ППС) по подсчетам европейской программы HEATCO равна 10,60 €/час/1 пассажира в ценах на 2009 г.
- Для водителей грузового автотранспорта средняя величина временных затрат равна 24,19 €/ч в ценах 2009 г. в соответствии с исследованием движения консультанта по дорожному движению Министерства ох-

раны окружающей среды, территориального планирования и общественных работ.

Эти величины обновляются в соответствии с ценами 2011 г. [с использованием Индекса Клиентских Цен (ИКЦ)] и равны [1]:

- временные затраты для пассажиров автомобилей и автобусов составляют 11,50 €/ч/1 пассажира и
- временные затраты для водителей грузового автотранспорта равны 26,20 € /ч/1 водителя.

Предполагается, что временные затраты будут увеличены на 1,5 % в год. Это значение представляет собой 50 % от ожидаемого роста ВВП в постоянных ценах, предполагая, что средний рост ВВП будет около 3 % [8]. Тем не менее, такое развитие событий является предположением, и не может быть принято в качестве стандарта, особенно в настоящей ситуации, в которой находится греческая экономика.

Пользование транспортными средствами учитывается соответствующими средними коэффициентами; при этом полезно рассчитать общее количество пассажиров. Такими факторами определяются следующим образом:

- средний коэффициент пользования транспортными средствами для легковых автомобилей составляет 1,2 человека/машина [9],
- средний коэффициент пользования транспортными средствами для автобусов составляет 24,35 человека/машина [8] и
- средний коэффициент пользования транспортными средствами для грузовых автомобилей и других транспортных средств, составляет 1,26 человека/машина [8]. Однако, в текущем анализе он принимается равным 1, что означает, что только водитель транспортного средства находится в движении.

Необходимо для расчета эксплуатационных затрат транспортных средств рассмотреть удельные величины расходов топлива, расходов на техническое обслуживание и ремонт, стоимость шин и т.д. Для учета этих расходов предполагается следующее:

- Пассажирские транспортные средства: анализ будет выполняться с учетом цены на газ (за исключением налогов и сборов), равной 0,47425 €/л. [1] Для определения расхода топлива для легковых автомобилей используются величины, представляющие средний рас-

ход в зависимости от скорости. Таким образом, потребление равно 8,11 л/100 км и 8,49 л/100 км для скорости 100 км/ч и 50 км/ч, соответственно [1].

- Грузовые автомобили: цена дизельного топлива (за исключением налогов и сборов) принимается равной 0,31404 €/л. [1] Что касается расхода топлива для грузовых автомобилей, то предполагается, что потребление составляет 16,57 л/100 км и 16,38 л/100 км для скоростей 70 км/ч и 35 км/ч, соответственно. [1]

В обоих случаях (легковые и грузовые автомобили) стоимость топлива является средней ценой в 2009-2011 гг., уточненной с учетом цен 2011 г. Кроме того, расходы на техническое обслуживание и ремонт, стоимость шин и т.д. не учитываются при расчетах, т.к. длина исследуемой дороги не меняется, а это означает, что она является одинаковой для каждого сценария.

3.3. Остаточная стоимость

Как упоминалось ранее, материальная стоимость считается равной 60 % от общего объема (материальной стоимости и стоимости строительства). Принимается во внимание, что остаточная стоимость несвязанных, промежуточных слоев асфальтобетона считается равной 40 % от их текущей стоимости на конец периода выполнения анализа. Для поверхностных слоев остаточная стоимость оценивается только в том случае, когда до конца срока их службы остается несколько лет.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

4.1. Начальная стоимость строительства

Начальная стоимость строительства покрытий по альтернативным вариантам представлена на рис. 1. Очевидно, что чем ниже начальная стоимость строительства по сценариям, тем все более жесткими строятся дорожные покрытия с замещением цемента летучей золой и, особенно, в сценарии 2-а-2 (31,66 €/м²), в котором наполнители в виде шлака электрической дуговой печи применяются для противоскользящей поверхности. Напротив, самым дорогим вариантом является традиционное бетонное покрытие с асфальтным противоскользящим слоем (46,46 €/м²).

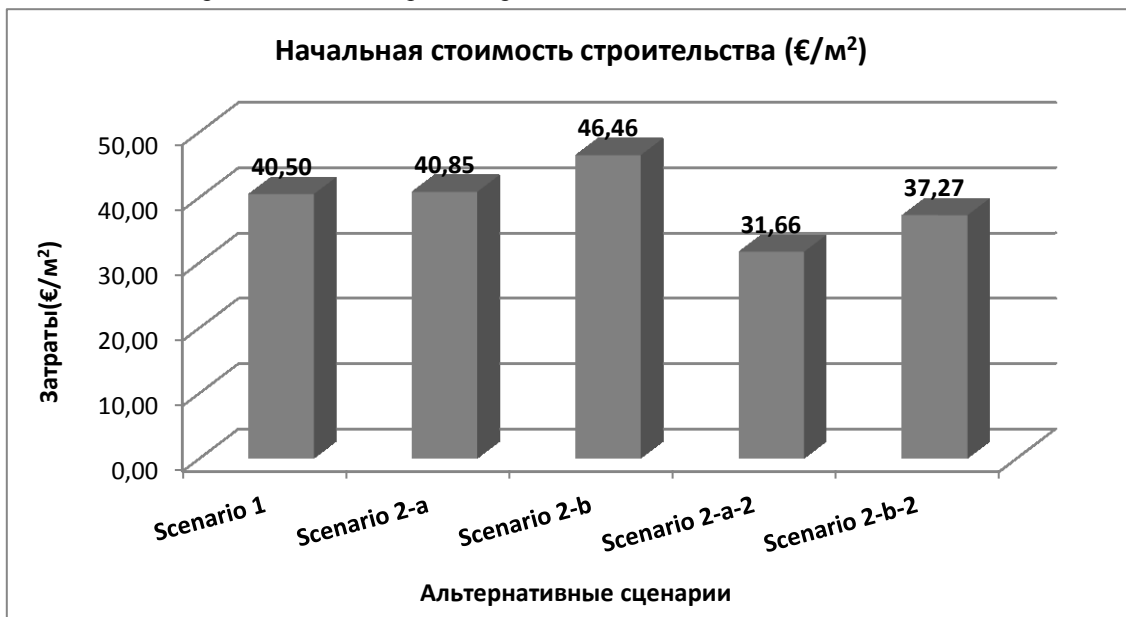


Рис. 1. Начальная стоимость строительства при альтернативных сценариях

В случае асфальтового покрытия стоимость строительства более низкая (40,50 €/м²) по сравнению с традиционными бетонными покрытиями — по сценариям 2-а и 2-б стоимость меньше на 0,87 % и 12,83 %, соответственно. Обратная связь наблюдается при сравнении сценария 1 со сценариями 2-а-2 и 2-б-2. В частности, в случае использования сценария 2-а-2 стоимость строительства — на 21,82 % меньше, а по сценарию 2-б-2 — на 7,97 % меньше, чем по сценарию 1.

Кроме того, важно, что замещение цемента летучей золой снижает начальную стоимость строительства почти на 21 % (среднее снижение по сценариям 2-а и 2-б), а также, что при использовании наполнителей в виде шла-

ка электродуговой печи для противоскользящего слоя появляется альтернативное решение, которое дешевле на 13,56 % (12,07 % — для сценария 2-а и 15,05 % — для сценария 2-а-2).

4.2. Стоимость жизненного цикла

Стоимость жизненного цикла для различных сценариев, которые анализируются в настоящем исследовании, представлены для ставки дисконтирования $i = 5\%$ и для целого ряда различных величин ставок (рис. 2, 3), соответственно.

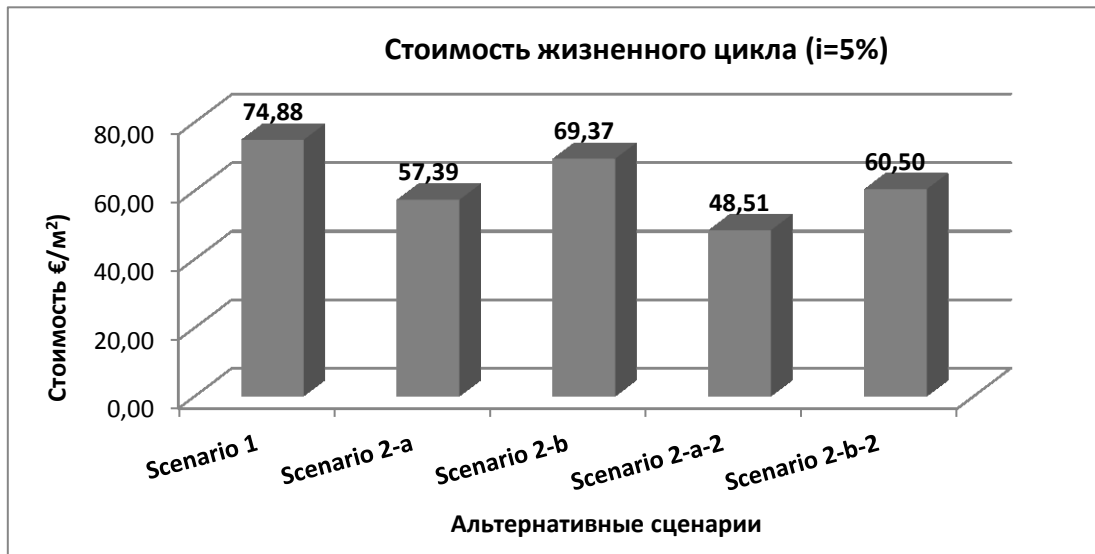


Рис. 2. Стоимость жизненного цикла покрытий при альтернативных сценариях для $i = 5\%$

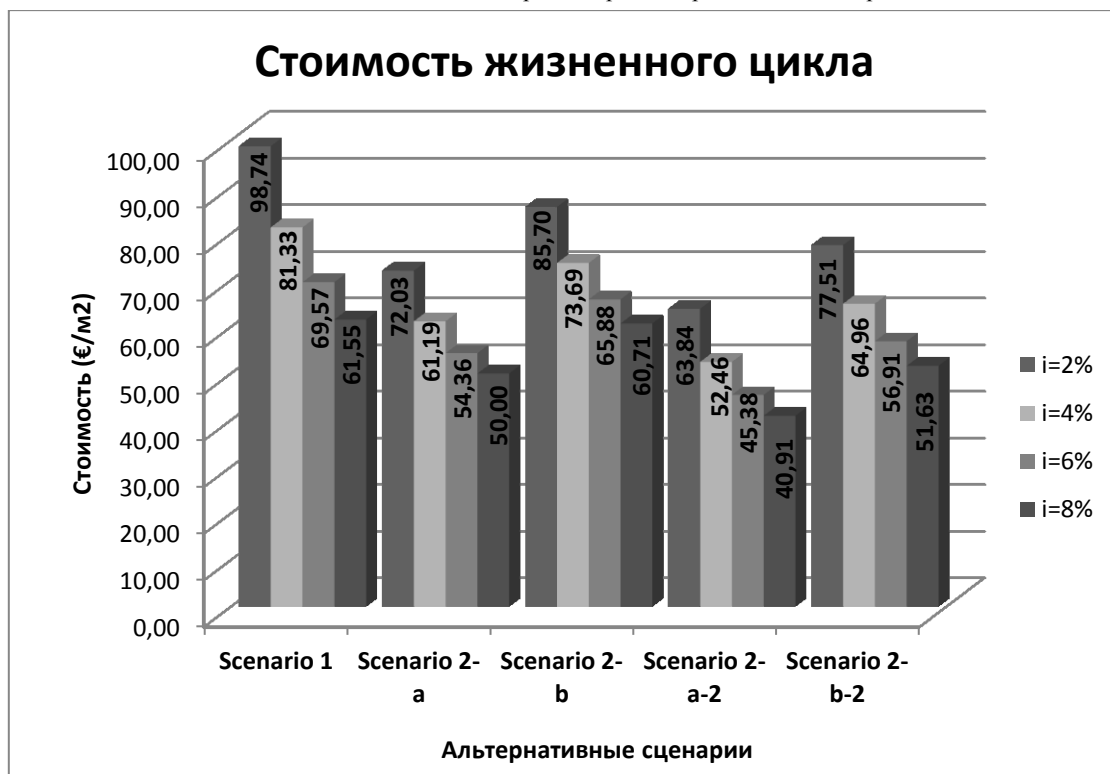


Рис. 3. Стоимость жизненного цикла покрытий при альтернативных сценариях для разных ставок дисконтирования

Следует отметить, что самая низкая стоимость жизненного цикла при нормальной ставке дисконтирования наблюдается в сценарии 2-а-2 и составляет 48,51 €/м². Стоит отметить, что при том же сценарии начальная стоимость строительства — самая низкая. Вопреки это-

му, самый дорогим вариантом является строительство гибкого дорожного покрытия (74,88 €/м²). Разница между этими двумя сценариями составляет 35,22 %.

Сравнение гибких и традиционных составными жестких покрытий (сценарии 2-а и 2-б) показывает, что более

экономичным является вариант 2-а, хотя он имеет почти такую же начальную стоимость строительства, что и в сценарии 1. Экономический эффект составляет 23,37 % для сценария 2-а и 7,36 % для сценария 2-б по сравнению со сценарием 1. Аналогичная взаимосвязь наблюдается при сравнении асфальтовых и бетонных покрытий, в которых применяется летучая зола.

Замещение цемента летучей золой в объеме 50 % приводит к снижению затрат примерно на 14 %. Это сокращение соответствует разности начальной стоимости строительства. Кроме того, использование наполнителей в виде шлака электродуговой печи для противоскользкого слоя приводит к удешевлению решения почти на 18,55 %.

Подобные выводы можно сделать при анализе сценариев в диапазоне ставок дисконтирования. При выборе гибкого покрытия требуется повышение инвестиций на 28,8 % (среднее значение) по сравнению с бетонными покрытиями. Во всех случаях более экономичным является жесткое покрытие, в котором применяются летучая зола и наполнители в виде шлака электродуговой печи. Стоит отметить, что при $i = 8\%$ стоимость жизненного цикла по сценарию 2-а-2 составляет 40,91 €/м², цена почти равна начальной стоимости строительства покрытия, описанного в сценариях 1 и 2-а.

Можно также отметить, что выбор ставки дисконтирования является важным. Более высокие величины ставок дисконтирования, которые используются в проводимом анализе, приводят к снижению стоимости жизненного цикла. В результате этого сценарии с более высокой начальной стоимостью строительства и низкой стоимостью в течение анализируемого периода будут более благоприятными в связи с более низкими ставками.

4.3. Изменение стоимости летучей золы в будущем

Для настоящих расчетов цена греческой летучей золы принимается равной 2,50 €/т. Тем не менее, считается полезным изучить возможное изменение стоимости материала в будущем, а также влияние этого изменения на начальную стоимость строительства жестких покрытий, в которых используется летучая зола в составе бетона в сравнении с соответствующими гибкими покрытиями, которые широко применяются в Греции. Критическое уравнение для определения стоимости строительства:

$$K_o^{Scenarid} = K_o^{Scenari2-a-2} = K_o^{Scenari2-b-2}$$

где K_o - начальная стоимость строительства.

Для сценария 2-б-2 величина отношения составляет 55,20 €/т, что означает увеличение текущей стоимости летучей золы на 22,08 %. Эти величины являются достаточно высокими для другого сценария, в котором используются наполнители в виде шлака электродуговой печи. В частности, величина, при которой начальная стоимость строительства по обоим сценариям одинакова, составляет 146,80 €/т. Это обусловлено тем, что цена летучей золы может быть увеличена в 59 раз, пока стоимость начального строительства дорожного покрытия, в котором используется зола, не достигнет стоимости, соответствующей гибкому дорожному покрытию. Все эти результаты вычисляются только при учете того, что все

остальные параметры и величины остаются неизменными.

ВЫВОДЫ

В Греции считается необходимым проведение дальнейших исследований и изучение использования бетонных покрытий, поскольку международный опыт и исследование показали, что они являются решением будущего. Очень важно, чтобы стоимость каждого технического решения была рассмотрена более полно. Нижний предел начальной стоимости строительства не всегда означает на самом деле экономичный выбор.

Использование греческой летучей золы в составе бетона для частичной замены цемента сказывается удовлетворительно на снижении затрат по сравнению с гибкими покрытиями (почти на 30 %) при существенно лучших экологических показателях с точки зрения отсутствия негативного воздействия на окружающую среду. Существует также возможность гораздо большего снижения стоимости строительства благодаря использованию других материалов, таких как шлак электрической дуговой печи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. **Papayianni I., Anastasiou E.** "Cost effective mixtures for concrete pavements" Proc. of Int. ASCE Conference on Airfield Highway Pavements, Atlanta 2006, pp 1008-1017
2. **Papayianni I.** "Utilization of High Calcium Fly Ash in Pavement Construction" Proc. ASH-TECH Conference, 2006, Birmingham.
3. **Apostolakaki L.**, MSc dissertation: "Life Cycle Cost Analysis of rigid pavements", Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, 2011.
4. **Federal Highway Administration (FHWA)**, Improving Transportation Investment Decisions Through Life-Cycle Cost Analysis, [Online] [Cited: September 18, 2011], <http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/lccafact.cfm>.
5. **Delatte, N.J.**, Concrete Pavement Design, Construction, and Performance, Taylor & Francis Group, New York, NY, 2008.
6. **R. B. Mallick, T. EL-Korchi**, Pavement Engineering: Principles and Practice, CRC Press, Florida, 2009.
7. **Nikolaides, A. F.**, Flexible pavements: Design method - Asphalt mixtures - Anti-skidding layers), Triantafillou publications, Thessaloniki, 2005.
8. **Nikolaides A., Tsohos G., Papavasiliou A.**, Economic Analysis of Pavements (Life Cycle Cost Analysis), Egnatia Odos S.A., Thessaloniki, 1997.
9. **Trias S.A.** (conducted for Egnatia Odos S.A.), Operation Traffic Analysis and Feasibility Study of the Thessaloniki Outer Ring Road from I/C Girokomiou to I/C Scholariou (I/C12) (Feasibility Study Report), Thessaloniki, March 2010.
10. **Trias S.A.** (conducted for Egnatia Odos S.A.), Feasibility study of the Thessaloniki Outer Ring Road Phase A', Traffic and Economic Analysis, Thessaloniki, April 2007.
11. **Papaoannou, P.**, Current Situation and Prospects for the Public Transport System in Thessaloniki, Thessaloniki – Ecomobility, Organized by: Ecocity - International Hellenic University, May 16, 2011.

L. Apostolakaki, I. Papayianni. Life Cycle Cost Analysis of road pavement with Greek High Calcium Fly Ash Roller Compacted Concrete // Proceedings of Eurocoalash 2012, Thessaloniki, Greece, September, 25-27, 2012.