

*Звонов Д.Д.,
магистрант*

2 курс, факультет «Строительный факультет»

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

Россия, г. Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛОСКИХ ФЕРМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

***Аннотация:** В статье рассматривается методика разработки параметрической расчётно-оптимизационной модели стальной фермы покрытия здания с элементами из замкнутых гнутосварных профилей. Описываются принципы построения алгоритма геометрического формирования фермы в среде Grasshopper, интеграция с конечно-элементным плагином Karamba3D, постановка многокритериальной оптимизационной задачи и её реализация с помощью эволюционного алгоритма в плагине Octopus. Результатом исследования является работоспособный алгоритм, при помощи которого возможно предварительно найти наиболее оптимальную расчетную схему металлической фермы.*

***Ключевые слова:** стальные фермы; гнутосварные профили; параметрическое моделирование; Grasshopper; Karamba3D; многокритериальная оптимизация; Octopus; фронт Парето.*

***Annotation:** This article examines a methodology for developing a parametric calculation and optimization model for a building's steel roof truss with elements made of closed bent-welded sections. It describes the principles of constructing an algorithm for geometric truss formation in the Grasshopper*

environment, integration with the Karamba3D finite element plugin, the formulation of a multi-criteria optimization problem, and its implementation using an evolutionary algorithm in the Octopus plugin. The result of the study is a workable algorithm that can be used to preliminarily determine the most optimal calculation scheme for a metal truss.

Key words: *parametric modeling, Grasshopper, Karamba3D, Octopus, steel truss, hollow sections, steel consumption. steel trusses; bent-welded sections; parametric modeling; Grasshopper; Karamba3D; multi-criteria optimization; Octopus; Pareto frontier.*

Введение

В современной проектной практике выбор конструктивной схемы стальной фермы покрытия, её высоты, числа панелей, типа решётки и сечений элементов традиционно выполняется последовательно: сначала назначается геометрическая схема, затем подбираются сечения и выполняется расчёт. Такой подход позволяет получить работоспособное решение, однако не обеспечивает одновременного анализа взаимного влияния геометрических параметров, схемы решётки и сортамента профилей на массу, жёсткость и степень использования несущей способности элементов [1].

В связи с этим разработка параметрической расчётной модели, позволяющей автоматически формировать различные варианты ферм, выполнять их расчёт и сравнивать по нескольким критериям, представляет значительный практический и научный интерес. Параметрическое моделирование позволяет перейти от фиксированной геометрии к модели, которая может управляться набором исходных параметров: изменение пролета, уклона верхнего пояса, высоты фермы или количества панелей автоматически перестраивает всю схему. Визуальная среда Grasshopper позволяет организовать такую модель через систему компонентов и связей, а Karamba3D дает возможность сразу преобразовать геометрию в расчетные

стержневые элементы [2, 3]. Подобный подход даёт возможность не только подобрать отдельное допустимое решение, но и выявить зависимости между конструктивными параметрами, что является ключевой задачей настоящего исследования.

Целью статьи является описание алгоритма построения и расчета стропильной фермы из гнутосварных профилей с использованием Grasshopper и Karamba3D, а также представление результатов оптимизационного анализа по массе, деформациям, коэффициенту использования элементов и количеству панелей.

Объектом исследования являются плоские стропильные фермы покрытия здания, в которых пояса и элементы решётки выполнены из замкнутых квадратных гнутосварных профилей по ГОСТ 30245–2003 [4]. В расчетной идеализации она представляется системой стержневых элементов, соединенных в узлах. Основными группами элементов являются верхний пояс, нижний пояс, раскосы и стойки.

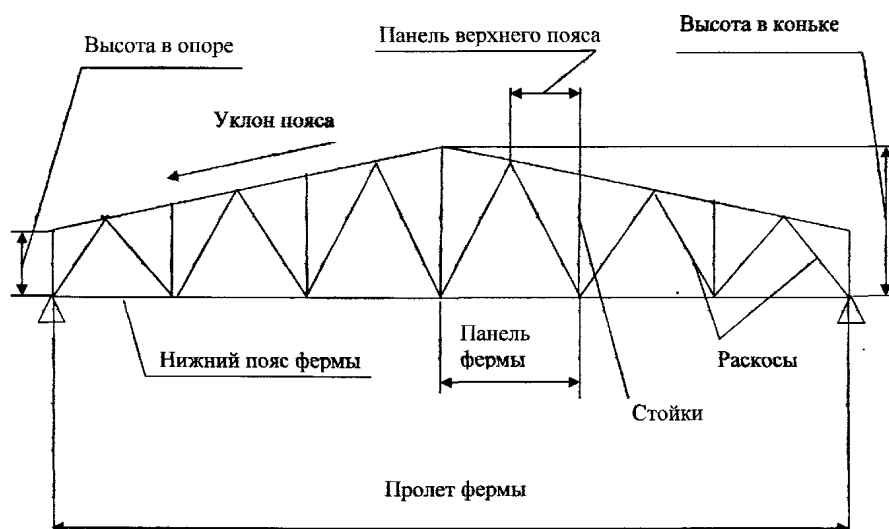


Рисунок 1. Входные параметры геометрии фермы в Grasshopper

Модель фермы является параметрической. В роли входных данных выступают следующие параметры (Рис. 1):

- тип ригеля;

- пролёт фермы, м;
- уклон верхнего пояса, %;
- тип фермы (очертание поясов и схема решётки);
- высота фермы на опоре, м;
- количество панелей на половину пролёта;
- нагрузка (кН/м) — собственный вес конструкций, постоянная от покрытия и снеговая по СП 20.13330.2016 [5] .

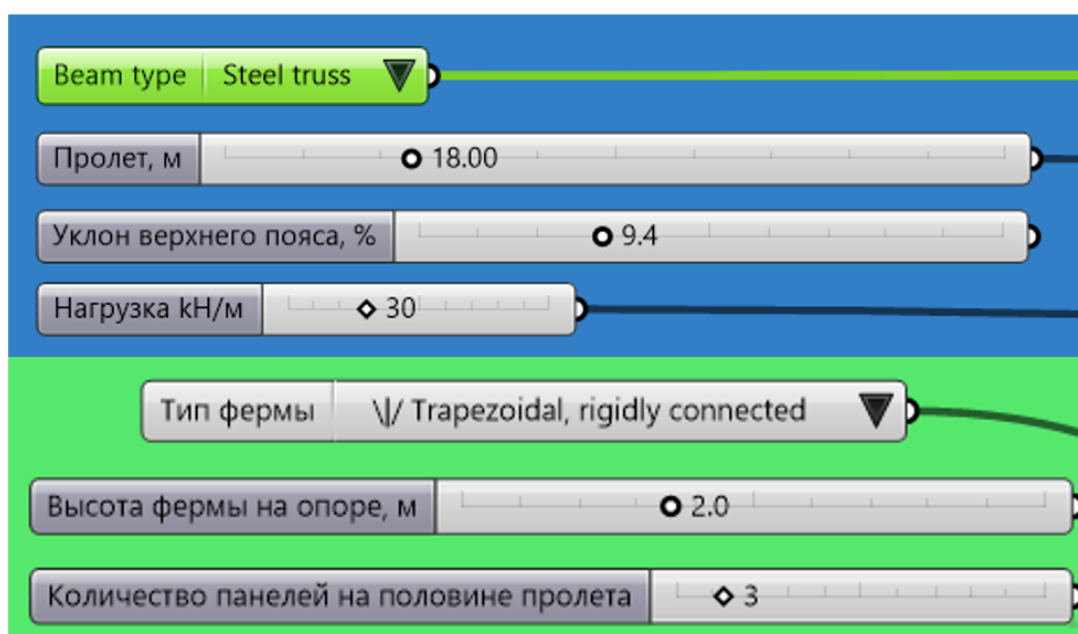


Рисунок 2. Входные параметры геометрии фермы в Grasshopper

В основу алгоритма принята точка – простейший элемент параметрического моделирования. Конечная модель представляет собой множество точек (узлов), соединённых прямыми линиями (стержнями). Все расстояния параметризованы и зависят от входных данных. Основные операции, использованные при создании алгоритма (рис. 2–4):

- «Construct Point» – создание узловой точки с заданными координатами;
- «Unit X / Unit Z» – задание направляющих векторов вдоль осей X и Z;

- «Move» – копирование точки на заданное расстояние в заданном направлении;
- «Line» – построение прямолинейного элемента между двумя точками;
- «Divide Curve» – деление линии пояса на заданное число панелей;
- «Shift List» – смещение списка узлов для формирования раскосов;
- «Cull / Equals» – фильтрация узлов для выделения крайних и промежуточных;
- «Sort Points» – упорядочивание узлов по координате X.

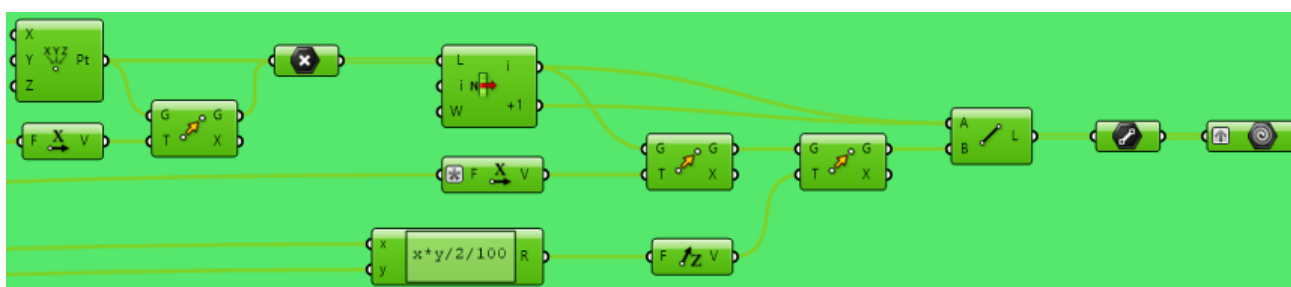


Рисунок 3. Общий вид создания начальной геометрии в Grasshopper 3D

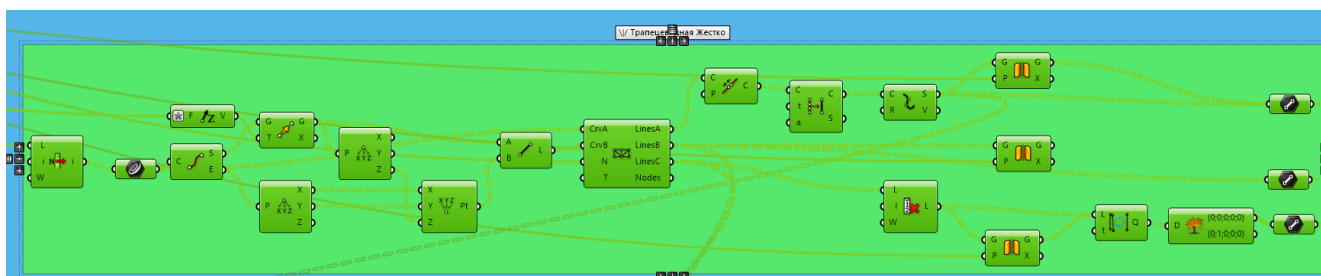


Рисунок 4. Создание геометрии трапецевидной фермы с жестким опиранием

Последовательное соединение соседних точек верхнего и нижнего поясов можно записать в виде:

$$e_i^t = (T_i, T_{i+1}), \quad e_i^b = (B_i, B_{i+1}),$$

где e_i^t — элемент верхнего пояса; e_i^b — элемент нижнего пояса; T_i и B_i — узлы верхнего и нижнего поясов.

Решетка фермы создается соединением узлов верхнего и нижнего поясов со смещением на один шаг:

$$e_i^d = (B_i, T_{i+1}) \quad \text{или} \quad e_i^d = (B_{i+1}, T_i).$$

Если в схеме предусматриваются стойки, они формируются соединением узлов с одинаковой координатой по оси X :

$$e_i^s = (B_i, T_i).$$

Все варианты геометрии (по типу решётки и очертанию) объединяются в общий список; переключение между схемами осуществляется одним слайдером.

На основе подготовленной геометрии строится расчётная конечно-элементная модель с помощью плагина Karamba3D, который позволяет непосредственно в параметрической среде преобразовывать геометрические объекты в расчётную модель, назначать материалы и поперечные сечения, задавать опоры, нагрузки и сочетания воздействий, а затем выполнять расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции. Результатами такого расчёта являются внутренние усилия, перемещения, реакции опор, масса конструкции, а также коэффициенты использования элементов.

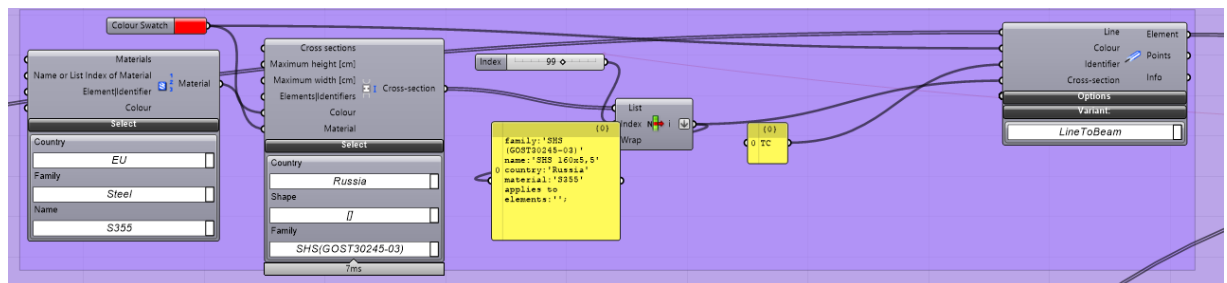


Рисунок 5. Создание верхнего пояса фермы

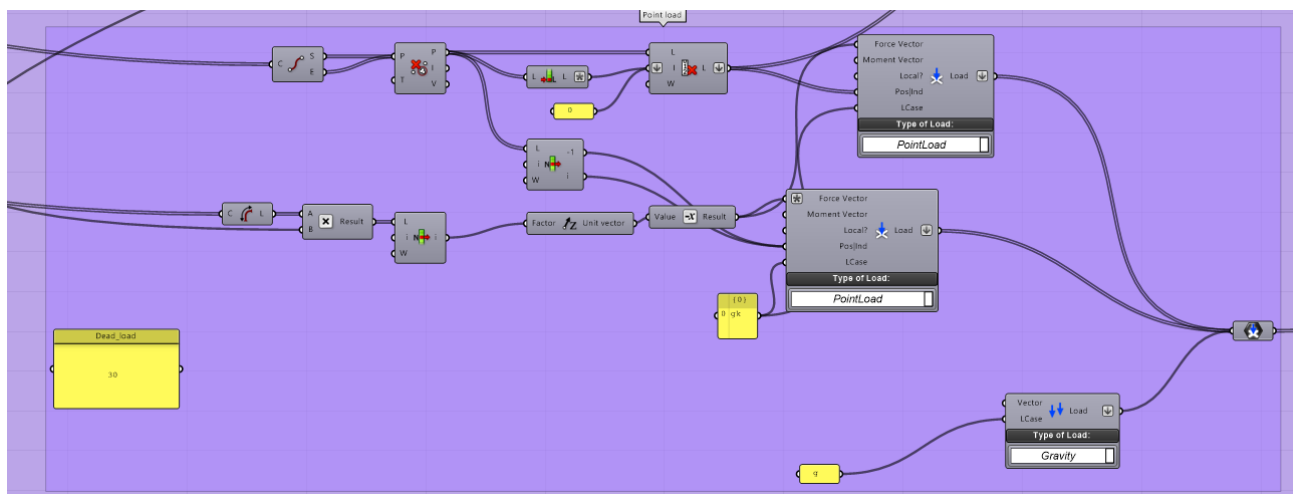


Рисунок 6. Создание узловой нагрузки

Для оптимизации алгоритма подсчета, а также для его упрощения в связи с тем, что подсчет металлоемкости осуществляется предварительно, были введены некоторые допущения:

- расчет производится только на вертикальные нагрузки от собственного веса, перекрытия, снега;
- параметризация стали не производится, принята сталь С355;
- в алгоритм не включен расчет узлов соединения.

Реализация подсчета металлоемкости и нахождения оптимальной расчетной схемы осуществлена при помощи плагина эволюционного алгоритма “Octopus”. Оптимизация выполняется как многокритериальная задача. В качестве изменяемых параметров используются слайдеры Grasshopper, управляющие выбором сечений, высотой фермы и количеством панелей. После каждого изменения параметров Karamba3D выполняет расчет, а полученные показатели передаются в оптимизационный блок Octopus [6].

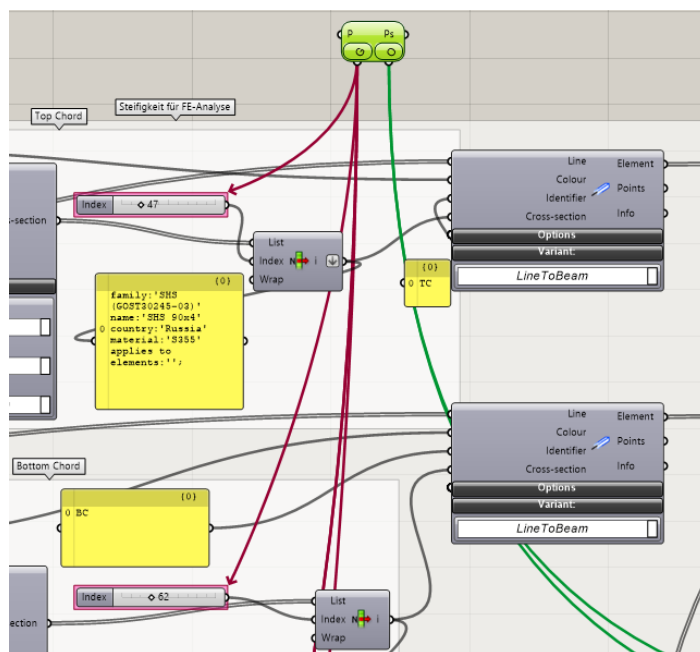


Рисунок 7. Общий вид эволюционного алгоритма

Реализация совместной работы среды параметрического моделирования Grasshopper и Karamba3D и эволюционного алгоритма Octopus продемонстрированы на примере фермы :

- Пролет – 18м;
- Уклон верхнего пояса – 9,4%;
- Трапециевидная с треугольной решеткой;
- Высота фермы на опоре – 1,6м;
- Количество панелей на половину пролета – 4;
- Материал – Сталь С535;
- Нагрузка – узловая нагрузка, эквивалентная распределенной 30 кН/м.

В результате расчетов была получена серия вариантов фермы с различной массой, деформациями и коэффициентами использования. Алгоритм SPEA-2 за 299 поколений сформировал и проанализировал 186 расчётных вариантов: 149 вошли в множество Парето-оптимальных решений,

37 признаны доминируемыми, 1779 отброшены как не удовлетворяющие ограничениям.

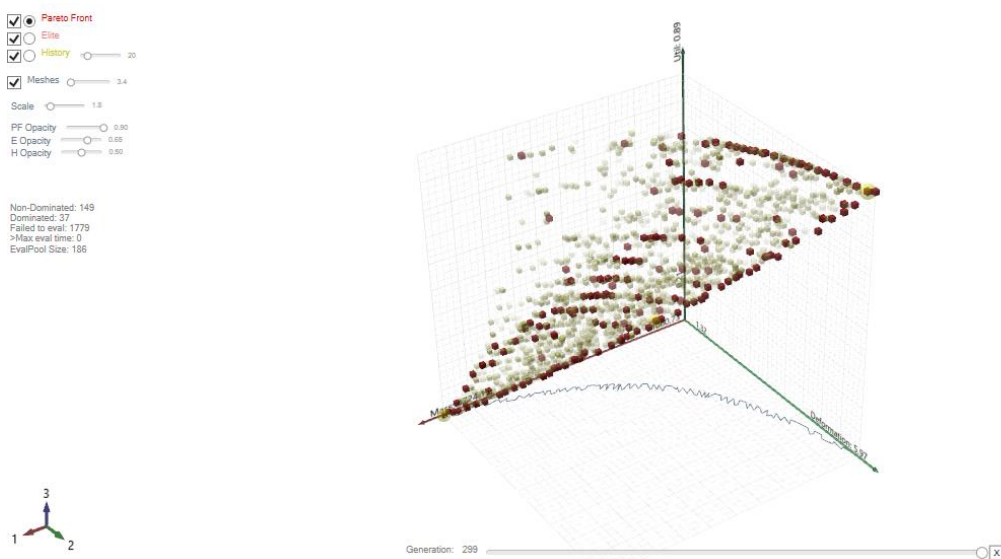


Рисунок 8. Мультиобъектный отбор вариантов.

Наиболее эффективный по критерию массы вариант получил сечения: верхний пояс — SHS 160×5,5; нижний пояс — SHS 140×4,5; раскосы и стойки — SHS 120×3,5 (рис. 15, 16).

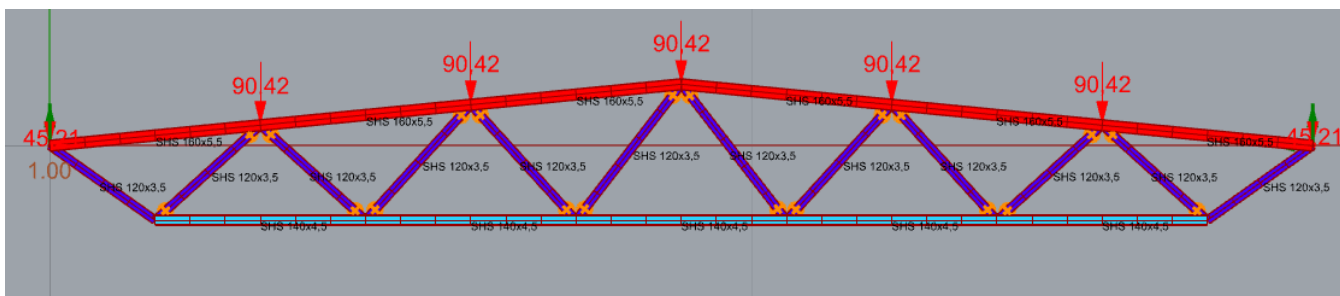


Рисунок 9. Расчетная схема с подобранными сечениями.

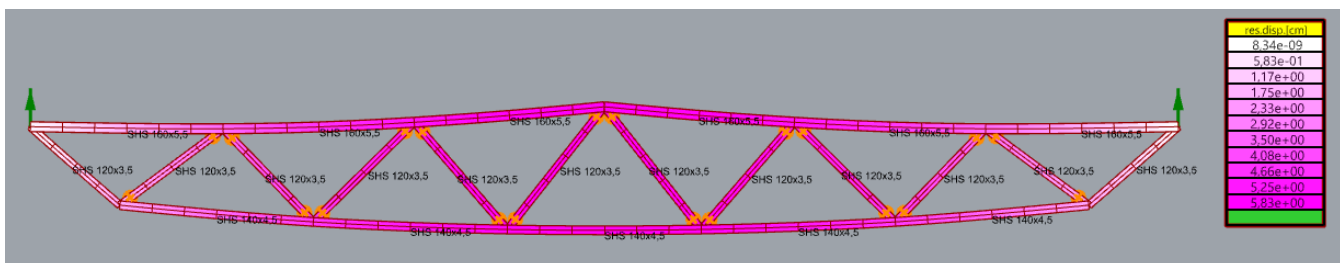


Рисунок 10. Прогибы фермы – см.

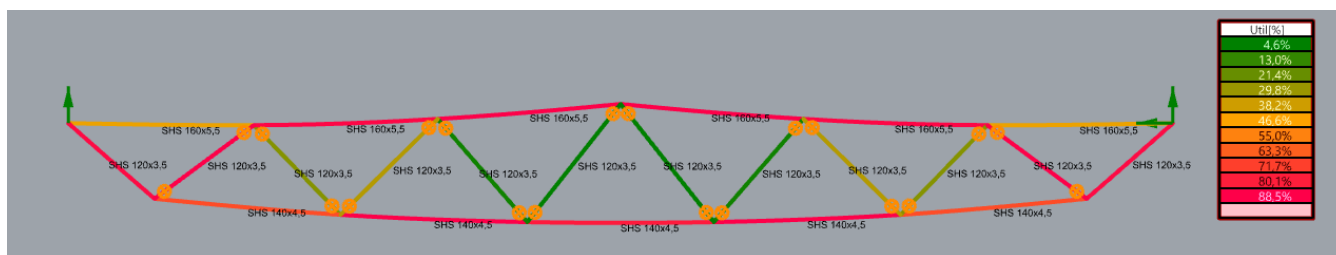


Рисунок 11. Коэффициенты использования элементов.

Выводы

Таким образом, результатом работы является полностью функциональный алгоритм параметрического формирования, расчёта и оптимизации стальной фермы покрытия из замкнутых гнутосварных профилей на основе связки Grasshopper – Karamba3D – Octopus. Алгоритм обеспечивает автоматическое формирование геометрии при изменении любого из входных параметров, расчёт без переключения между приложениями и многокритериальную оптимизацию с получением множества Парето-оптимальных вариантов. Разработанный алгоритм позволяет значительно сократить время предварительного вариантного анализа конструкций покрытий.

Использованные источники:

1. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. М. : Стройиздат, 1979. 319 с.
2. Bachman, D. Grasshopper: Visual Scripting for Rhinoceros 3D. New York: Industrial Press, 2017. — 288 p.
3. Preisinger, C. Karamba3D. User Manual. [Электронный ресурс]. URL: <https://manual.karamba3d.com/> (дата обращения: 10.05.2026).
4. ГОСТ 30245–2003 — Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия.

5. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*
6. Vierlinger R. Multi objective design interface: дис. – Technische Universität Wien, 2013.
7. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. — М.: Минстрой России, 2017.